

WP3

Riesgo de inundación (3.1.1)

Medidas estructurales para la reducción del riesgo (3.1.2)

Medidas no estructurales para la reducción del riesgo (3.1.3)

Herramientas para la estimación del riesgo (3.1.4)

Metodología (3.1.5)

Universidad Politécnica de Valencia

Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente

Camino de Vera s/n

46022 Valencia (España)

Autores

Ignacio Escuder Bueno

Adrián Morales Torres

Jesica Tamara Castillo Rodríguez

Sara Perales Momparler

iescuder@hma.upv.es

admotor@cam.upv.es

jecasrod@aaa.upv.es

sperales@pmenginyeria.com

NOTA

El presente documento forma parte del proyecto SUFRI, desarrollado por seis instituciones. La “Metodología” descrita (3.1.5) está basada en estudios y trabajos de relevancia en la temática planteada. Las referencias empleadas pueden encontrarse en Internet, artículos y publicaciones que se detallan en la sección “Referencias”.

Este documento se encuentra en versión borrador, por lo que ciertos aspectos de la metodología pueden modificarse a lo largo del proyecto SUFRI, a partir de las opiniones y recomendaciones que puedan derivarse de otros colaboradores o investigadores en el ámbito de estudio. Por ello, cualquier comentario y/o sugerencia será tenido en cuenta por los autores.

SUFRI – WP3

Riesgo residual y análisis de vulnerabilidad

FECHA Diciembre 2010

RESUMEN

Las inundaciones producidas por ríos, estuarios, la acción del mar o fuertes precipitaciones suponen un riesgo para las personas y causan significativos costes económicos. En el siglo 20, el 12% de las muertes debidas a catástrofes naturales fueron consecuencia de inundaciones, alcanzando un total de 93,000 víctimas en todo el mundo (*Flood Risk to People*, DEFRA, UK [32]). Como ejemplo más reciente, en agosto de 2010, los medios de comunicación notificaron 3 víctimas en Córdoba (España), como consecuencia de las fuertes lluvias, de hasta 286 mm, que tuvieron lugar en sólo 3 horas.

El establecimiento de sistemas de defensa frente a inundaciones contribuye a la reducción del riesgo, sin embargo, el riesgo no puede ser eliminado totalmente. Por ello, sistemas de predicción, sistemas de aviso, el planeamiento y otras medidas no estructurales pueden ser de gran importancia en la reducción del riesgo existente. Por tanto, surge la necesidad de desarrollar nuevos métodos que permitan la estimación del riesgo (social y económico) y el efecto en riesgo de dichas medidas.

Seis entidades colaboradoras de cuatro países diferentes (Austria, Alemania, Italia y España) participan dentro de la iniciativa CRUE ERA-NET en el periodo 2009 – 2011, desarrollando el proyecto europeo SUFRI (*Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with non-structural measures to cope with the residual risk*).

El principal objetivo del proyecto SUFRI radica en la mejora de la gestión del riesgo de inundación mediante medidas no estructurales. Este proyecto persigue la definición de estrategias sostenibles de gestión del riesgo de inundación, incluyendo sistemas avanzados de aviso, análisis de vulnerabilidad y comunicación del riesgo para la optimización de la gestión y control de desastres.

Este documento es el segundo de dos informes realizados dentro del tercer bloque “WP3 – Residual Risk and Vulnerability Analysis” del proyecto SUFRI, aportando una herramienta para la caracterización del riesgo residual en zonas urbanas y la cuantificación del efecto de medidas de reducción del riesgo. Dicha herramienta puede ser empleada para informar en la toma de decisiones y la definición de estrategias de reducción del riesgo. El documento recoge la descripción metodológica de la herramienta propuesta.

La memoria se divide en seis apartados. En primer lugar, la sección 1.1 “Riesgo de inundación” describe conceptos generales y la función de medidas estructurales y no estructurales. En segundo lugar, en la sección 1.2 “Medidas estructurales para la reducción del riesgo”, se resumen diferentes tipologías de estructuras de retención y protección, así como sistemas de drenaje. Posteriormente, en la sección 1.3 “Medidas no estructurales para la reducción del riesgo” se recogen e identifican estrategias como el planeamiento urbanístico, predicción meteorológica, comunicación, coordinación, etc. En la sección 1.4 “Herramientas de estimación del riesgo”, los métodos existentes se clasifican en función del estudio de las dos componentes del riesgo (amenaza, o probabilidad, y vulnerabilidad, o consecuencias), y su cuantificación. Seguidamente, en la sección 1.5 “Metodología” se describe la

metodología propuesta (denominada metodología SUFRI a lo largo del documento) para la evaluación del efecto de medidas no estructurales en el riesgo de inundación. Finalmente, la sección 1.6 recoge las principales conclusiones del presente documento.

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

WP3 – Riesgo Residual y Análisis de Vulnerabilidad

Índice

1.1.	RIESGO DE INUNDACIÓN	11
1.1.1.	Definición general y componentes.....	11
1.1.2.	Fuentes de riesgo en áreas urbanas.....	13
1.1.3.	El papel de las medidas estructurales y no estructurales en la reducción del riesgo de inundación	14
1.2.	MEDIDAS ESTRUCTURALES PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN 15	
1.2.1.	Estructuras de retención	15
1.2.2.	Estructuras de protección	18
1.2.3.	Sistemas de drenaje	21
1.2.4.	Medidas estructurales y riesgo de inundación	23
1.3.	MEDIDAS NO ESTRUCTURALES PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN	26
1.3.1.	Políticas y planeamiento urbano	26
1.3.2.	Predicción de inundaciones.....	27
1.3.3.	Comunicación	30
1.3.4.	Movilización.....	31
1.3.5.	Coordinación y procedimientos de operación	33
1.3.6.	Seguros e indemnizaciones	34
1.3.7.	Medidas no estructurales y riesgo de inundación	35
1.4.	HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN	36
1.4.1.	Herramientas parciales y cualitativas.....	36
1.4.2.	Herramientas completas y cualitativas	37
1.4.3.	Herramientas parciales y cuantitativas	38
1.4.4.	Herramientas completas y cuantitativas.....	40
1.5.	METODOLOGÍA.....	42
1.5.1.	Generalidades.....	42
1.5.2.	Estado del arte.....	43
1.5.3.	Metodología SUFRI para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas 47	
1.6.	CONCLUSIONES.....	94
	Referencias	96
	Apéndices	103

Figuras

Figura 1.2.1. Presa arco. Aldeadávila (España-Portugal).....	16
Figura 1.2.2. Estanque de retención.....	17
Figura 1.2.3. Barreras marítimas.	18
Figura 1.2.4. Encauzamiento en la ciudad de Elche (España).....	20
Figura 1.2.5. Hidrogramas para la situación con y sin medidas de retención.	22
Figura 1.2.6. Efecto de la existencia de la presa en riesgo.	24
Figura 1.2.7. Consecuencias de la inundación en función del caudal y el fallo de la estructura [29].	25
Figura 1.3.1. Disposición de sacos de arena como refuerzo para diques en Rumania, 2006.....	32
Figura 1.4.1. Mapa de los niveles de ocurrencia de inundación en Europa basado en los eventos históricos de inundación en el período 1998-2005.	37
Figura 1.4.2. Mapa de riesgo de la ciudad de Valencia (España).	38
Figura 1.4.3. Mapas de inundación para diferentes períodos de retorno en Zaragoza.	39
Figura 1.5.1. Esquema riesgo de inundación.....	42
Figura 1.5.2. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-N. Riesgo social (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI).....	48
Figura 1.5.3. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-D. Riesgo económico (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI).....	48
Figura 1.5.4. Efecto de medidas estructurales con respecto a la situación sin ningún tipo de medida. Riesgo social. (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	49
Figura 1.5.5. Efecto de medidas estructurales con respecto a la situación sin ningún tipo de medida. Riesgo económico. (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI).....	50
Figura 1.5.6. Fases del proceso de confección y uso de modelos de riesgo para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	51
Figura 1.5.7. Variables intervinientes en la obtención de inputs al modelo en términos de consecuencias en pérdida de vidas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	66
Figura 1.5.8. Diagrama de flujo para la obtención de inputs al modelo para la estimación de consecuencias económicas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI).....	66
Figura 1.5.9. Variables intervinientes en la obtención de inputs al modelo en términos de consecuencias económicas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	71
Figura 1.5.10. Ejemplo de curva F-N.....	72
Figura 1.5.11. Niveles de severidad en escorrentía pluvial en función del calado y la velocidad de la inundación (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	85
Figura 1.5.12. Variables intervinientes en la obtención de inputs al modelo en términos de consecuencias en pérdida de vidas. Inundación pluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)	88
Figura 1.5.13. Reducción de daños económicos según tiempo de aviso.	93

Tablas

Tabla 1.5. 1. Niveles de detalle en función del ámbito de estudio.....	52
Tabla 1.5.2. Variables de relevancia para la caracterización de la inundación.	57
Tabla 1.5.3. Clasificación para el establecimiento de tasas de mortalidad en inundación fluvial.....	61
Tabla 1.5.4. Ejemplo de distribución para el cálculo de población en riesgo.....	63
Tabla 1.5.5. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Pérdida de vidas.	65
Tabla 1.5.6. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Costes económicos.	70
Tabla 1.5.7. Resumen de la información necesaria para el estudio.	74
Tabla 1.5.8. Niveles de información para la caracterización de la inundación.....	81
Tabla 1.5.9. Categorías de formación-aviso para el establecimiento de tasas de mortalidad.	82
Tabla 1.5.10. Niveles de severidad para inundaciones por escorrentía pluvial.	84
Tabla 1.5.11. Tasas de mortalidad en escorrentía pluvial.	86
Tabla 1.5.12. Índices de corrección de tasas de mortalidad por vulnerabilidad poblacional (Penning- Rowse et al, 2005 [19]).....	86
Tabla 1.5.13. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Pérdida de vidas.	87

Notación

A_F	Área total afectada por la inundación (km ²).
$A_{f,i}$	Área de afección (km ²), dada una categoría 'i' de uso del suelo, CU. De modo que $A_F = \sum A_{f,i}$.
A_T	Área total de la población de estudio (km ²).
w_{df}	Ancho máximo de la inundación en el núcleo de estudio, medido transversalmente al cauce.
C	Categoría de la población para la definición de tasas de mortalidad de referencia en inundación fluvial.
C_p	Categoría de la población para la definición de tasas de mortalidad a aplicar en inundación por escorrentía pluvial.
CD	Coste directo (euros).
CI	Coste indirecto (euros).
CT	Coste total, suma de costes directos e indirectos (euros).
CR	Coste de referencia. Coste en euros/m ² establecido para cada categoría de uso del suelo.
CU	Categoría según usos del suelo.
d	Densidad de población (habitantes/km ²).
d_c	Densidad de población de cálculo, establecida para la estimación de la población en riesgo en núcleos de estudio con tipologías de edificación de elevado número de plantas (habitantes/km ²).
DV	Parámetro para la definición de niveles de severidad en inundación fluvial, función de las características del flujo (m ² /s).
f	Probabilidad anual de excedencia (años ⁻¹).
f_c	Factor para el cálculo de costes indirectos (porcentaje de los costes directos).
F	Probabilidad anual de excedencia acumulada (años ⁻¹).
FMF	Factor Modo Fallo (horas). Variable de cálculo para la estimación del tiempo de aviso en inundación fluvial (con existencia de presa).
FR	Tasa de mortalidad en inundación fluvial.
FRp	Tasa de mortalidad en inundación pluvial.
h	Altura de edificio (m).
h_m	Altura promedio de los edificios existentes en la población de estudio (m).
H	Calado de afección (m), diferencia de cota entre la lámina de agua y el suelo en la zona afectada.
m,n,p,q,r	Notación genérica para formulación.

n_p	Número de plantas promedio. Obtenido como la media ponderada del número de plantas de los edificios de la población de estudio.
N	Número potencial de víctimas.
PAE	Probabilidad anual de excedencia (años^{-1}).
PD	Porcentaje de daños (%).
PR	Población en riesgo (en número de personas).
$PR_{\text{out, in}}$	Población expuesta a la inundación (en el exterior – outdoors – o en el interior de viviendas – indoors –). Población a aplicar a las tasas de mortalidad en inundación por escorrentía pluvial.
P_T	Población total de la población de estudio (en número de personas).
Q	Caudal (m^3/s).
Q_1	Caudal de alerta, definido como el caudal que alcanza la capacidad del cauce a su paso por la población de estudio (m^3/s).
Q_2	Caudal de inicio de afección, caudal para el que la inundación alcanza las primeras edificaciones (m^3/s).
Q_{br}	Caudal obtenido de los hidrogramas en caso de rotura (m^3/s).
Q_f	Caudal máximo de afección en la población de estudio (m^3/s).
Q_{max}	Caudal máximo del hidrograma considerado o caudal pico (m^3/s).
Q_{nbr}	Caudal establecido de la laminación para casos en no rotura (m^3/s).
Q_{pf}	Caudal de escorrentía en inundación pluvial (m^3/s).
RFR	Tasa de mortalidad de referencia, en función de la categoría C de la población para el cálculo de tasas en inundación pluvial.
S	Nivel de severidad de la inundación (en inundación pluvial), en función del calado y la velocidad del flujo.
S_v	Nivel de severidad de la inundación (inundación fluvial), en función del parámetro DV.
t_{Q1}	Tiempo en el que se produce el caudal de alerta, Q_1 , en la zona de estudio (horas).
t_{Q2}	Tiempo en el que se produce el caudal de afección, Q_2 , en la zona de estudio (horas).
T	Periodo de retorno (años).
TW	Tiempo de aviso (horas).
TBR	Tiempo de formación de la brecha (horas). Variable de cálculo para la estimación del tiempo de aviso en inundación fluvial (con existencia de presa).
TC	Categoría de tiempo establecida para la estimación de la población en riesgo.
TD	Tiempo de diferencia entre los caudales Q_1 y Q_2 (horas).
T_{wv}	Tiempo de llegada de la onda de avenida (horas).
v	Velocidad (m/s).
y	Calado de inundación (m). También denotado como H, calado de afección.

Acrónimos

ANCOLD	Australian National Committee on Large Dams
ARC	Atlanta Regional Commission
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs (United Kingdom)
EE.UU.	Estados Unidos
FEAT	Flood Emergency Action Team
FEMA	Federal Emergency Agency (Estados Unidos)
FHRC	Flood Hazard Research Centre (United Kingdom)
ICE	Institution of Civil Engineers
MS	Medidas estructurales
MNS	Medidas no estructurales
RN	Régimen natural (en inundación fluvial, régimen del cauce sin existencia de medidas estructurales).
PAE	Probabilidad Anual de Excedencia
PEP	Plan de Emergencia de la Presa
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UK	United Kingdom
UN	United Nations
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
UPV	Universidad Politécnica de Valencia

1.1. RIESGO DE INUNDACIÓN

1.1.1. Definición general y componentes

La Directiva 2007/60/EC de la Unión Europea [18]¹ define inundación como el cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta. Por lo tanto, se incluyen las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras.

Las inundaciones son el desastre natural más destructivo en consecuencias económicas y número de víctimas. Desde el año 2000 al 2006, los desastres relacionados con la acción del agua produjeron más de 290,000 víctimas, afectaron a más de 1,500 millones de personas y costaron más de 422,000 millones de US\$ (UN, 2009 [48]). En general, estas consecuencias son especialmente importantes en áreas urbanas, donde habita la mayor parte de la población y donde pueden darse las consecuencias económicas más importantes.

Con anterioridad a la Directiva, el objetivo principal en reducción del riesgo se centraba en la prevención frente a inundaciones, pero en los últimos años se ha incrementado la adopción de medidas para tratar de mitigar las consecuencias provocadas por la inundación, con el fin de reducir dichas consecuencias tanto como sea posible.

Respecto al concepto de riesgo, este se define como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento, llamado peligro, y las potenciales consecuencias adversas que tendría este evento para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural o las actividades económicas [18]. Estas consecuencias se denominan vulnerabilidad. Por lo tanto, el riesgo tiene dos componentes principales, la amenaza y la vulnerabilidad.

Por un lado, la amenaza representa un evento físico, fenómeno o actividad humana potencialmente dañina, ya que puede causar pérdida de vidas, heridos, daño a la propiedad, trastornos sociales y económicos, o degradación medioambiental. La amenaza es comúnmente definida por el riesgo individual, que es la probabilidad de que una persona media, presente permanentemente en una localización, muera debido a que se presente la amenaza (Jonkman, 2007 [25]). El análisis de la amenaza incluye la identificación, estudio y monitorización de la misma, para determinar su origen, características y comportamiento. El principal resultado de dicho análisis es la probabilidad de ocurrencia de la amenaza considerada. Por lo tanto, el riesgo individual se fundamenta en la probabilidad de que la persona más expuesta fallezca por causa de dicha amenaza. Las unidades del riesgo individual son número de víctimas por unidad de tiempo (generalmente, años).

Por otro lado, la vulnerabilidad se define como las condiciones, determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y medioambientales, que causan la

¹ [] indica la referencia correspondiente de la lista incluida al final del documento (tras sección 1.6).

susceptibilidad de una comunidad al impacto de una amenaza. Por ello, el análisis de vulnerabilidad se centra en la descripción de las potenciales consecuencias producidas por la amenaza considerada.

Normalmente, el riesgo se expresa como $Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad$. En general, sus unidades son las usadas para medir las consecuencias divididas por unidad de tiempo (por ejemplo, una unidad monetaria o número de víctimas por año, dado que la probabilidad de la amenaza presenta unidades de tiempo⁻¹). Cuando las consecuencias están expresadas en número de víctimas, el riesgo resultante se denomina riesgo social, definido como la relación entre la frecuencia y el número de víctimas en una población dada por la consecución de unas amenazas específicas. Generalmente, el riesgo social se expresa en unidades de número de víctimas por año. Por tanto, el riesgo social incluye vulnerabilidad, no solamente características de la amenaza.

El análisis del riesgo de inundación consiste en determinar la naturaleza y extensión del riesgo existente mediante el análisis de las amenazas potenciales y evaluación de las condiciones de vulnerabilidad que pueden derivarse de la amenaza potencial, causando daños personales, a la propiedad y al medio ambiente.

Analizar el riesgo de inundación existente para la vida humana y la propiedad es fundamental como primer paso para conseguir su reducción. El riesgo puede calcularse mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un evento y el impacto producido en el receptor.

Existen numerosas medidas de reducción del riesgo de inundación. En general, se dividen en dos grupos: medidas estructurales y medidas no estructurales. Las medidas estructurales engloban todas aquellas construcciones que reducen o evitan el posible impacto de la inundación, incluyendo un amplio rango de obras de ingeniería civil, como, por ejemplo, la construcción de infraestructuras de protección y resistencia a la acción del agua, tales como diques o presas. Las medidas no estructurales incluyen políticas, concienciación, desarrollo del conocimiento, reglas de operación, así como mecanismos de participación pública e información a la población, de modo que puede reducirse el riesgo existente y los impactos derivados de la inundación (UN, 2009 [48]).

La aplicación de medidas estructurales puede evitar las consecuencias de inundación hasta un determinado evento, denominado evento de diseño. Dado que siempre puede producirse un evento superior al de diseño para un determinado valor de probabilidad, existe siempre un nivel de riesgo residual, aún cuando la infraestructura se comportase perfectamente. Por otra parte, las medidas no estructurales también ayudan en la reducción de dicho riesgo residual. Sin embargo, éste no puede ser completamente eliminado. Por tanto, el riesgo residual se compone de las consecuencias que no pueden ser evitadas mediante medidas estructurales ni por medidas no estructurales.

1.1.2. Fuentes de riesgo en áreas urbanas

Las inundaciones son causadas por una compleja interacción de diferentes fuentes, especialmente en áreas urbanas. En general, la inundación causa un evento que produce una pérdida de misión de las medidas tomadas. Por tanto, una inundación producirá un determinado nivel de consecuencias.

Las principales fuentes que pueden causar una inundación en un área urbana son:

- Inundación pluvial: Lluvias de alta intensidad pueden producir inundaciones en áreas urbanas. Este tipo de inundación puede ser más peligrosa en aquellas situaciones en las que el sistema de drenaje de la ciudad sea ineficaz o esté mal dimensionado.
- Inundación fluvial: El caudal en ríos y cauces puede desbordar las márgenes e inundar áreas urbanas. Aunque las inundaciones de origen fluvial suelen estar asociadas a fenómenos de tormenta, deben analizarse diferentes fuentes de riesgo, dado que precipitaciones en cuencas situadas aguas arriba pueden ocasionar inundaciones, independientemente de la precipitación ocurrida en el área urbana. Además, otros procesos naturales como el deshielo pueden derivar en importantes inundaciones fluviales.
- Inundación marítima: El mar puede inundar zonas urbanas situadas en la costa como resultado de la acción de huracanes, ciclones o tifones. Además, en el caso de zonas urbanas situadas bajo el nivel del mar, si las infraestructuras de protección no son capaces de contener la acción del oleaje, las consecuencias de una posible inundación marítima podrían ser de gran importancia. El mar ejerce, a su vez, de condición de contorno concomitante a la inundación fluvial, no permitiendo desaguar al mar y elevando el nivel del río.
- Colapso estructural: El fallo de una infraestructura puede ocasionar importantes inundaciones y puede incrementar las consecuencias por inundación producidas por otras fuentes. Por ejemplo, el fallo de una presa produciría un elevado aumento del caudal de descarga en el río, ocasionando elevadas consecuencias aguas abajo. Por ello, las medidas estructurales para la reducción del riesgo de inundación presentan normalmente un doble papel. Este doble efecto en el riesgo de inundación (protección frente a riesgo incremental) se analiza en detalle en la sección 1.2.

Además de las fuentes de riesgo citadas anteriormente, existen fenómenos como el cambio climático que pueden aumentar el riesgo de inundación. También existen otras amenazas importantes como el terrorismo, el sabotaje o el vandalismo que pueden llevar a la destrucción de estructuras como diques y presas, provocando importantes inundaciones (ICE, 2008 [24]).

1.1.3. El papel de las medidas estructurales y no estructurales en la reducción del riesgo de inundación

Tal y como se ha definido en el apartado anterior, el riesgo residual se fundamenta en el hecho de que las medidas estructurales y no estructurales no pueden eliminar el riesgo de inundación por completo.

Tanto las medidas estructurales como no estructurales son de especial relevancia en la reducción del riesgo. Su funcionalidad y fiabilidad desempeñan un papel importante por diversas razones:

- **Funcionalidad de las medidas estructurales:** Las medidas estructurales se diseñan para eventos asociados a una cierta probabilidad anual de excedencia. Si se produce un evento superior al de diseño, la estructura no es capaz de proporcionar la protección necesaria frente a la inundación, perdiendo su funcionalidad.
- **Fiabilidad de las medidas estructurales:** Las infraestructuras de protección o retención, como presas y diques, evitan consecuencias hasta el punto en el que éstas resultan fiables. Más allá de cierto nivel, su rotura o fallo incrementa las consecuencias de la inundación, aunque vinculadas a una probabilidad de ocurrencia muy reducida.
- **Funcionalidad de las medidas no estructurales:** Las medidas no estructurales reducen el riesgo de inundación cuando ésta ya se ha producido, reduciendo las consecuencias de la misma. A tal efecto, pueden emplearse medidas como el planeamiento urbano, sistemas de predicción meteorológica, modelos de pre-caracterización de avenidas, sistemas de aviso y procedimientos de evacuación.
- **Fiabilidad de las medidas no estructurales:** Debe analizarse la robustez de dichas medidas para conocer si su funcionamiento y aplicación serán correctos para alcanzar la máxima reducción posible, dado que su fallo o ineficacia puede ocasionar importantes consecuencias.

Las secciones 1.2 y 1.3 describen las principales medidas estructurales y no estructurales existentes, analizando su influencia en riesgo.

1.2. MEDIDAS ESTRUCTURALES PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Las medidas estructurales para la reducción del riesgo de inundación comprenden todas aquellas medidas consistentes en la construcción de obras civiles con el fin de proteger áreas frente a inundaciones. Existen diferentes estrategias en función de cada caso. En general, estas medidas pueden dividirse en tres grupos:

- Estructuras de retención: Su misión consiste en retener el agua para evitar inundaciones asociadas a grandes descargas, que pueden producir importantes daños e incluso el fallo de la propia estructura de retención o de otras estructuras existentes aguas abajo. Las estructuras más comunes son presas y embalses situados aguas arriba de zonas urbanas.
- Estructuras de protección: Estas estructuras protegen la zona urbana de forma directa, evitando la entrada del agua en la ciudad, como son los diques, o bien forzando al flujo a discurrir por un determinado lugar, como es el caso de los encauzamientos. Estas estructuras aportan protección frente a inundaciones fluviales y marítimas.
- Sistemas de drenaje: Los sistemas de captación y drenaje se diseñan para la gestión del agua de escorrentía generada por un evento de precipitación en la zona urbana y sus alrededores. Por tanto, son estructuras de protección frente a inundaciones de origen pluvial.

Cabe considerar que las estructuras deben diseñarse teniendo en cuenta la dinámica natural del río, comprendiendo su naturaleza cambiante. En teoría, las estructuras deben diseñarse permitiendo, en la medida de lo posible, el régimen natural del río, respetando los cursos naturales del agua (Ureña y Teixeira, 2004 [14]).

Las medidas estructurales presentan un papel fundamental en la reducción del riesgo de inundación, pues evitan numerosas avenidas. En este capítulo (1.2) se describen sus principales características, prestando especial atención a las ventajas, limitaciones y potenciales consecuencias de su fallo.

1.2.1. Estructuras de retención

Principales estructuras de retención en cauces fluviales

Engloban, principalmente, presas que pueden presentar diferentes tamaños, ubicadas aguas arriba de zonas urbanas. Su función consiste en el almacenamiento de agua para diferentes usos: riego, abastecimiento urbano, producción eléctrica, usos recreativos y protección frente a inundaciones mediante laminación de avenidas.

Las grandes presas pueden almacenar grandes volúmenes de agua y aportan un elevado grado de protección. Las tipologías más comunes son:

- Presas de gravedad.
- Presas arco (se muestra un ejemplo en la Figura 1.2.1).
- Presas de contrafuertes.
- Presas de materiales sueltos.



Figura 1.2.1. Presa arco. Aldeadávila (España-Portugal).

Las presas tienen una importante función como estructuras de retención para reducir el riesgo de inundación, pues la laminación de avenidas disminuye notablemente los caudales de descarga aguas abajo de la presa durante un evento extremo. Sin embargo, dado que estas infraestructuras se diseñan para una determinada avenida, asociada a una probabilidad anual de excedencia, para el caso de avenidas superiores al evento de diseño de la presa, ésta puede perder progresivamente su efectividad.

Por tanto, los beneficios sociales de la reducción del riesgo de inundación prevalecen sobre la posibilidad de rotura de la presa, dado que la probabilidad asociada es, generalmente, extremadamente baja. En la actualidad, la presión social en la gestión de seguridad de presas ha aumentado a causa de los significativos riesgos asociados a la rotura. Por ello, el enfoque tradicional del análisis de riesgo, que asume la no existencia de riesgo por rotura de la presa dados los elevados coeficientes de seguridad con los que fue diseñada, está siendo complementado por un enfoque basado en el análisis informado de riesgo, que considera el riesgo asociado al fallo de la presa, mediante la identificación, evaluación y gestión del mismo, a pesar de parecer improbable, ya que las grandes presas se diseñan para avenidas de elevados periodos de retorno (entre 5,000 y 10,000 años).

Estructuras secundarias de retención en las proximidades de zonas urbanas

Existen estructuras de menor entidad, localizadas aguas arriba de zonas urbanas, que gestionan el flujo de agua que alcanzaría la ciudad, reduciendo los caudales de escorrentía y almacenando agua durante el evento de precipitación.

Estas estructuras pueden presentar un dispositivo de control que permite mantener niveles de descarga constantes por retención de agua.

Algunos ejemplos de este tipo de estructuras son:

- Estanques de retención (Figura 1.2.2): Estanques o balsas de retención construidas para contener agua de forma permanente, en general, con apariencia natural. El embalse detiene y trata el agua de escorrentía, mediante sedimentación y mecanismos biológicos de absorción.



Figura 1.2.2. Estanque de retención.

- Estanques de detención: Áreas inundables durante eventos de tormenta, mediante el almacenamiento de agua por un periodo reducido de tiempo. Presentan menos costes que las estructuras anteriores para un mismo nivel de almacenamiento, pues requieren de menor excavación. Su nivel de complejidad puede variar desde un simple campo hasta la inundación de un área controlada automáticamente mediante órganos de desagüe.
- Estructuras subterráneas de retención: Su objetivo se basa en la reducción del caudal pico de descarga. Pueden permitir filtraciones al subsuelo, o bien pueden ser impermeables, devolviendo el agua almacenada al sistema siguiendo ratios controlados de descarga.

Las estructuras secundarias de retención pueden construirse para inundaciones con diferentes periodos de retorno, desde 1 a 100 años (ARC, 2001 [3]). Dado que estos valores no son muy elevados, un análisis de riesgos es de gran utilidad para comprender las consecuencias de una pérdida de efectividad de este tipo de medidas.

1.2.2. Estructuras de protección

Protección directa frente a inundaciones

Su principal función consiste en la prevención frente a inundaciones del entorno adyacente. Por ello, estas estructuras están ubicadas normalmente a lo largo de la costa, cauces fluviales, canales, lagos o embalses. Las estructuras más comunes son:

- Diques: Se construyen siguiendo el cauce del río, mar o el perfil de lagos naturales. Los diques marítimos se construyen generalmente a partir de montículos de materiales finos, con una pendiente suave en el lado exterior para reducir el sobrevvertido y la erosión del dique debido al oleaje.
- Muros: Estructuras verticales cuya principal función consiste en prevenir el sobrevvertido y la inundación de áreas colindantes. Pueden variar desde estructuras de paramentos verticales, como muros de hormigón en masa o de roca, hasta estructuras con superficies específicas, efectuadas mediante losas de hormigón armado, reforzado o con escombros. En el caso de protección frente a inundaciones de origen marítimo, se construyen paralelamente a la línea de costa.
- Dunas: Esta medida estructural para protección marítima se basa en la colocación de arena de playa de una granulometría específica para formar un campo de dunas que reemplaza a las dunas que han sido dañadas o eliminadas durante una fuerte tormenta. La vegetación del sistema de dunas es esencial para mantener la reconstrucción y retener el material bajo la acción del viento.
- Barreras frente a oleaje (Figura 1.2.3): Estas estructuras se componen de un sistema combinado de diques y compuertas. Las compuertas pueden ser deslizantes o rotatorias, cuya base está compuesta por construcciones de acero sostenidas por estructuras de hormigón con cimentación profunda. Protegen estuarios frente a la acción del oleaje o cambios en el nivel del mar.



Figura 1.2.3. Barreras marítimas.

En este grupo de estructuras para protección directa frente a inundaciones también se incluyen medidas de protección en edificios e infraestructuras. Estas medidas se centran en el uso de determinados materiales y configuraciones con el propósito de reducir el riesgo de inundación. Algunos ejemplos de estas medidas son (Kreibich et al, 2005 [30]):

- Aislamiento resistente al agua: Empleando materiales de construcción impermeables y mejorando la configuración del edificio.
- Fortificación de sótanos: Mejora de los materiales empleados en sótanos y uso de cimentaciones especiales, para evitar el colapso como consecuencia de inundaciones severas.
- Usos del suelo adaptados a inundaciones: Modificación del uso del suelo en plantas bajas de edificios para reducir las consecuencias por inundación, de modo que esta medida puede considerarse también una medida no estructural.

Las estructuras de protección reducen el riesgo de inundación debido a la formación de una barrera física al paso del agua durante un evento extremo y su diseño se define, generalmente, en base a un determinado periodo de retorno.

Las defensas marítimas se diseñan para una altura máxima de ola asociada a un periodo de retorno que varía de 25 a 5,000 años, en función de la importancia económica y las potenciales consecuencias del fallo de la infraestructura, especialmente en áreas situadas bajo el nivel del mar.

El diseño de infraestructuras de protección en ríos y canales depende de las distribuciones de caudales máximos. Los periodos de retorno empleados suelen ser inferiores que en el caso de las defensas marítimas, variando desde 5 a 1,000 años.

Los eventos extremos asociados a los periodos de retorno de diseño definen los límites de efectividad y funcionalidad de la infraestructura.

Modificación de las características del cauce

Estas estructuras de protección modifican la morfología del cauce para incrementar su capacidad en áreas urbanas, reduciendo las consecuencias. Estas medidas actúan como una protección indirecta y pueden considerarse una parte del sistema de drenaje existente.

Las principales medidas estructurales para la modificación de las características del río son:

- **Ensanchamiento de la sección:** Esta medida consiste en el ensanchamiento de la sección del cauce para reducir el calado resultante para el mismo nivel de descarga.
- **Cambio de la rugosidad:** Niveles más bajos de la rugosidad dan lugar a mayores velocidades del flujo, dando como resultado calados inferiores en el cauce (por ejemplo, actuando en la vegetación del cauce).
- **Encauzamientos (Figura 1.2.4):** Esta medida se basa en la construcción de un nuevo lecho en el cauce, reduciendo en gran medida el riesgo de inundación. Sin embargo, esta medida es más destructiva desde el punto de vista medioambiental.

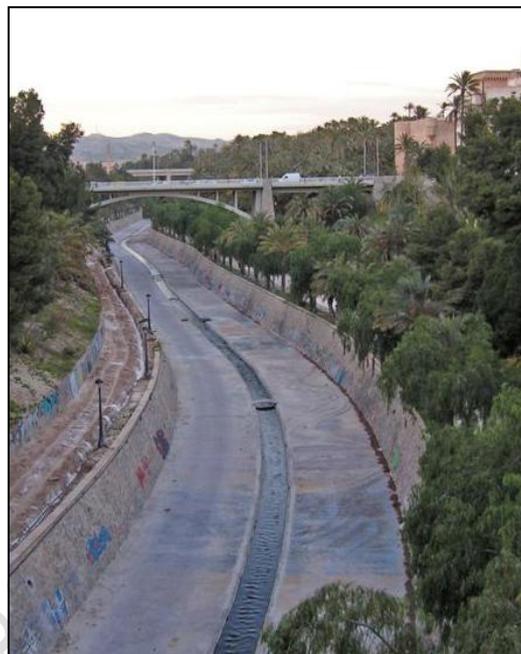


Figura 1.2.4. Encauzamiento en la ciudad de Elche (España).

- **Nuevos cauces:** Se basa en la ejecución de un nuevo cauce, divergiendo el cauce natural del río. Este tipo de medidas se ejecuta cuando existe un alto riesgo de inundación, con el objetivo de evitar elevados caudales de descarga en zonas urbanas.
- **Modificación de las características de la cuenca:** Tareas de reforestación de la cuenca que incrementan la interceptación del agua de lluvia y reducen los caudales pico en el río.

1.2.3. Sistemas de drenaje

Sistemas de drenaje convencionales

La función principal del sistema de drenaje de una ciudad es la recogida del agua de lluvia a través de un complejo sistema de estructuras que incluye imbornales, arquetas, tuberías, colectores, estaciones de bombeo, etc.

En el sistema de drenaje de una ciudad pueden distinguirse dos partes. Por un lado, el sistema de alcantarillado, y por otro, el sistema principal que drena el agua superficial o el flujo excedente. Caudales elevados pueden alcanzar la capacidad máxima del sistema dando lugar a la inundación del área urbana.

Existen dos categorías para clasificar los sistemas de drenaje:

- **Sistemas unitarios:** El sistema capta las aguas residuales domésticas y el agua superficial en el mismo sistema de alcantarillado, lo que conlleva un mayor nivel de contaminación del agua de lluvia recogida. Se diseña para la suma de ambos caudales, aunque el caudal máximo debido al agua procedente de la precipitación es muy superior.
- **Sistemas separativos:** Existen dos sistemas de alcantarillado diferentes: uno para aguas residuales y otro para la captación del agua superficial. El segundo es mayor y puede ser superficial, pues la calidad del agua es superior.

Los sistemas de drenaje presentan diferentes niveles de complejidad: desde canales abiertos a complejos sistemas con estaciones de bombeo, combinadas con otras medidas estructurales para la protección frente a inundaciones. Todos estos elementos pueden afectar a la capacidad del sistema.

Tradicionalmente, los sistemas urbanos de drenaje se han diseñado para funcionar hasta un cierto nivel de servicio, asociado a un periodo de retorno, que varía desde 2 a 30 años, en función de la normativa local. Sin embargo, los sistemas de drenaje existentes no alcanzan el nivel de servicio requerido, debido al deterioro de la red y la incorporación de caudales adicionales procedentes de áreas urbanas en expansión. No obstante, pueden evitar las inundaciones asociadas a eventos muy frecuentes.

Sistemas de drenaje sostenibles

Los sistemas de drenaje sostenibles (SuDS) son sistemas innovadores desarrollados en la línea del concepto de desarrollo sostenible. Estos sistemas también se diseñan para la gestión de los riesgos medioambientales resultantes de la escorrentía urbana y contribuir en la medida de lo posible a la mejora del medio ambiente.

Los objetivos de un sistema SuDS son: minimizar los impactos de la escorrentía generada, tanto en cantidad como en calidad, y maximizar las oportunidades de servicio y biodiversidad. La filosofía de los SuDS se centra en ejecutar una réplica, lo

más cercana posible, del drenaje natural del lugar con anterioridad al desarrollo urbanístico (Woods-Ballard et al, 2007 [51]).

Los caudales de escorrentía son cada vez más elevados en áreas convencionales de nueva urbanización, pues el pavimento reduce el nivel de infiltración y presenta una rugosidad menor que el suelo natural. Las estructuras de detención reducen estos niveles, tal y como se muestra en la Figura 1.2.5.

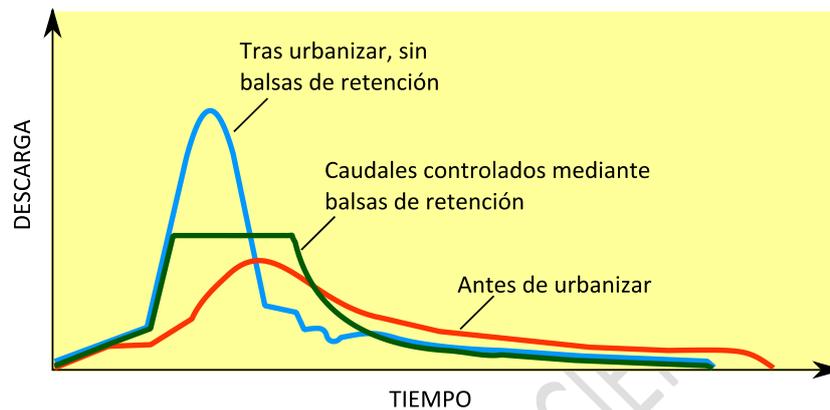


Figura 1.2.5. Hidrogramas para la situación con y sin medidas de retención.

Los sistemas SuDS deben ser capaces de reducir la escorrentía generada mediante la integración de sistemas de control del agua de lluvia ubicados en el área, en pequeñas y discretas unidades. A partir del control efectivo de la escorrentía en su origen, no se requiere un elevado nivel de atenuación para caudales elevados, minimizando las estructuras de control necesarias (Woods-Ballard et al, 2007 [51]).

Las estructuras SuDS (ARC, 2001 [3] y Kovacs, 2001 [29]) más comunes son:

- Cubiertas vegetadas: Un sistema multicapa que cubre la cubierta de un edificio o bien una estructura con vegetación sobre una capa drenante. Se diseñan para interceptar y retener la precipitación, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando los caudales pico.
- Áreas de bioretención: Estructuras de control de agua de lluvia que capturan y tratan el agua de escorrentía de eventos de precipitación de carácter frecuente. La calidad del agua se trata mediante vegetación en cuencas someras u otras áreas, de modo que se eliminan contaminantes.
- Franjas filtrantes: Secciones del suelo uniformemente graduadas y con una elevada densidad de vegetación, diseñadas para tratar el agua de escorrentía y eliminar contaminantes por filtrado, mediante vegetación o infiltración.

- Mejora de cunetas: Canales a cielo abierto con vegetación que tratan el agua de escorrentía por medio de celdas (húmedas o secas) construidas mediante bermas permeables.
- Filtros de arena: Estructuras multicelulares diseñadas para el tratamiento de agua de escorrentía mediante filtración, empleando balsas de pretratamiento de sedimentos, un lecho de arena como filtro primario y, normalmente, un sistema recolector bajodren.
- Balsas de retención y detención: Ya descritas en el apartado 1.2.1.
- Estructuras de retención subterráneas: Estas estructuras permiten la retención de agua en el subsuelo, reduciendo el caudal de descarga por almacenamiento.
- Zanjas de infiltración: Excavaciones poco profundas, rellenas mediante escombros o piedras que constituyen un almacenamiento sub-superficial temporal para que el agua de escorrentía infiltre en el subsuelo circundante. Además, deben recibir caudal lateral desde una superficie impermeable adyacente.
- Pavimentos permeables: Proveen un pavimento adecuado para peatones y/o el tráfico rodado, a la vez que permiten la infiltración del agua de lluvia a través de su superficie hacia la capa inferior. El agua se almacena temporalmente antes de ser reutilizada o devuelta a un curso o sistema de drenaje.

Además, las trayectorias a seguir por el agua superficial (calles, canales, etc.) pueden considerarse como una estructura de retención, ya que almacenan parte del agua de escorrentía, alcanzando caudales pico inferiores, pero produciendo inesperados calados y velocidades.

Los sistemas SuDS presentan límites de capacidad ya que no se diseñan para drenar eventos extremos. Su capacidad viene limitada bien por el caudal entrante, por ejemplo la capacidad de admisión de un pavimento permeable, o bien, en estructuras de retención, por el volumen de almacenamiento. Sin embargo, pueden servir de gran utilidad en términos de mejora de la calidad del agua.

1.2.4. Medidas estructurales y riesgo de inundación

El objetivo principal de las medidas estructurales es evidentemente la reducción del riesgo de inundación. Sin embargo, existe una determinada probabilidad de fallo.

El fallo de una medida estructural puede clasificarse en dos grupos:

- Fallo de servicio: La estructura no dispone de suficiente capacidad frente a inundaciones, pues pueden producirse eventos de inundación superiores al evento de diseño. Este fallo está asociado a una importante componente probabilística de incertidumbre, pues deriva de la ocurrencia de un evento extremo. Este tipo de fallo depende de la funcionalidad de la infraestructura.
- Fallo por rotura: El fallo depende de la incertidumbre en las cargas a la estructura y se determina en función de las características y el estado de la misma. Es más relevante en presas y diques, dadas las elevadas consecuencias potenciales de su rotura, pero la probabilidad anual de excedencia del evento que da lugar al fallo es, en general, extremadamente baja.

El primer grupo recoge los sistemas de drenaje, encauzamientos, protecciones en edificios en áreas urbanas y la mayoría de las estructuras de retención, dado que su fallo depende principalmente del evento de diseño.

Las estructuras del segundo grupo reducen el riesgo de inundación, incrementando el nivel de protección en áreas urbanas, pero existe un cierto riesgo incremental debido a la probabilidad de fallo de la estructura. Por ello, la reducción en riesgo se obtiene de la diferencia entre el riesgo existente y el riesgo con la estructura, añadiendo el riesgo incremental por la existencia de la misma (Figura 1.2.6).



Figura 1.2.6. Efecto de la existencia de la presa en riesgo.

La Figura 1.2.7 muestra el efecto de la existencia de estas estructuras en las consecuencias de inundación en función del caudal. Las líneas verde y negra representan las consecuencias de inundación con y sin la existencia de la estructura, respectivamente; la línea amarilla muestra las consecuencias en caso de fallo. La línea vertical de color azul hace referencia al caudal asociado a la avenida de diseño.

Avenidas mayores a la de diseño dan lugar a un fallo de servicio de la infraestructura, de modo que el área sombreada en rojo muestra el incremento en consecuencias cuando el fallo de la estructura tiene lugar para un evento en dicho rango. Las consecuencias incrementales debidas al fallo para avenidas inferiores al valor de diseño se representan en el área sombreada de color azul. El riesgo incremental asociado a la infraestructura es la suma de las ambas áreas. Este riesgo incremental debe analizarse y limitarse (de Membrillera et al, 2005 [13]).

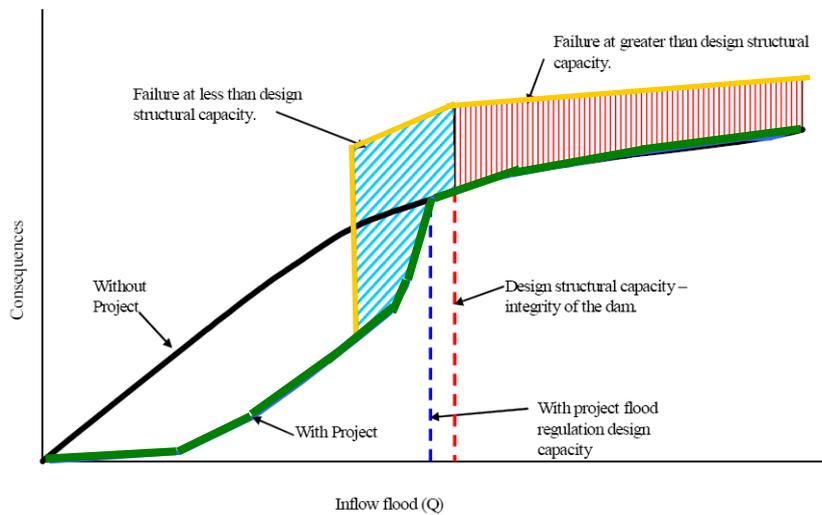


Figura 1.2.7. Consecuencias de la inundación en función del caudal y el fallo de la estructura [29].

En general, la aplicación de estas estructuras reduce el riesgo de inundación. Sin embargo, puede producirse un aumento del riesgo en determinadas circunstancias tales como:

- Casos en los que el estado de la estructura está asociado a una probabilidad de fallo alta, por lo que deben tomarse medidas para mejorar su estado, y reducir así el riesgo existente.
- Situaciones en las que la percepción del riesgo de inundación ha disminuido por la existencia de la estructura, derivando en la urbanización de áreas inundables. Para evitarlo, deben desarrollarse políticas adecuadas de planeamiento urbano.
- Áreas potencialmente vulnerables que sólo pueden ser afectadas por inundaciones producidas por un colapso estructural, por lo que debe limitarse el riesgo incremental introducido por la estructura.

1.3. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Las medidas no estructurales comprenden las políticas, advertencias, medidas para desarrollo del conocimiento, procesos legislativos y de participación pública y recopilación de información que permiten la reducción del riesgo (Graham, 1999 [22]).

En el apartado anterior (1.2), se han explicado las medidas estructurales para reducción del riesgo de inundación. Las medidas estructurales proporcionan protección hasta un determinado evento, llamado evento de diseño, a partir del cual se produce la inundación. La aplicación de medidas no estructurales puede ayudar a reducir sus consecuencias, especialmente la pérdida de vidas. Por ello, las medidas no estructurales buscan la reducción de la vulnerabilidad de la población en riesgo a partir del planeamiento y la gestión llevados a cabo antes, durante y después de la catástrofe.

Existen diferentes categorías para clasificar las medidas no estructurales. En este documento se distinguen seis grupos:

- Políticas y planeamiento urbano
- Predicción de inundaciones
- Comunicación
- Movilización
- Coordinación y procedimientos de operación
- Seguros e indemnizaciones

1.3.1. Políticas y planeamiento urbano

En numerosas áreas urbanas, existen zonas potencialmente inundables que han sido ocupadas por viviendas e infraestructuras a causa de una disminución en la percepción del riesgo, tras la construcción de nuevas medidas estructurales, modificando la dinámica del río y aumentando el riesgo de inundación.

Por ello, un planeamiento urbano adecuado debe evitar la construcción de instalaciones y asentamientos en zonas inundables. Esta medida requiere del desarrollo de normativa que limite los usos de suelo y el tipo de edificación en zonas de elevado riesgo de inundación. Estas restricciones pueden variar desde la prohibición de determinados usos del suelo (como residencial, industrial, etc.) hasta requisitos en cuanto a utilización de materiales de construcción y elementos estructurales resistentes a la acción del agua.

En relación a los sistemas de drenaje, debe definirse normativa para el establecimiento de los periodos de retorno e identificación de las trayectorias del flujo para dichos valores con el objetivo de evitar futuros daños (por ejemplo, dirigir los caudales sobrantes hacia una superficie de parking o un jardín, y no en dirección a un edificio con plantas subterráneas). Estas normativas para el planeamiento urbano deben ir

acompañadas de las herramientas adecuadas de estimación del riesgo de inundación, tal y como se describe posteriormente en la sección 1.4.

Además, el planeamiento urbano en zonas fluviales debe basarse en los principios de conservación y sostenibilidad. La dinámica del cauce debe acercarse al régimen natural, ya que el planeamiento debe respetar las llanuras de inundación naturales, dividiendo el cauce en diferentes áreas (Ureña y Teixeira, 2004 [14]).

Por otra parte, las políticas urbanísticas deben combinarse con formación a la población en materia de riesgo de inundación, incrementando así la efectividad de las medidas adoptadas para la reducción del riesgo (Gago, 2005 [20]), basadas en la distribución restringida de usos del suelo y evitando la urbanización masiva en áreas potencialmente inundables.

1.3.2. Predicción de inundaciones

La predicción se basa en la estimación de la ocurrencia de un evento futuro empleando el conocimiento del medio ambiente y la recopilación de datos. Por ello, la predicción de avenidas es la estimación del desarrollo, tiempo y duración de una avenida, especialmente del caudal máximo, en un punto específico del cauce, ocasionada por fuertes precipitaciones y/o deshielo.

La predicción de inundaciones es una herramienta importante en la reducción del riesgo de inundación, ya que puede reducir considerablemente las consecuencias de la misma, combinada con adecuados sistemas de aviso y procedimientos de evacuación. A su vez, puede ser una herramienta muy útil en la gestión de otras medidas estructurales y no estructurales. Por ejemplo, si se predice un evento de precipitación extremo en la cuenca, las presas existentes pueden gestionarse de tal forma que se reduzcan los impactos de la avenida aguas abajo, además de aportar tiempo suficiente para la instalación de barreras temporales en áreas urbanas.

El intervalo de tiempo de antelación es el margen existente desde que se predice el evento hasta que éste tiene lugar es vital para gestionar las medidas y se denomina tiempo de predicción o tiempo de aviso. Un tiempo de aviso mayor incrementa la efectividad de las medidas para evitar consecuencias; sin embargo, las predicciones con antelación presentan un menor grado de exactitud.

La predicción de inundaciones se compone de dos pasos. El primer paso consiste en la predicción meteorológica y se basa en el conocimiento científico y el uso de nuevas tecnologías para predecir el estado atmosférico a corto plazo y en un lugar determinado. El segundo paso se corresponde con la pre-caracterización de avenidas, considerando la situación meteorológica futura para predecir las inundaciones resultantes, mediante modelos hidrológicos. La combinación de ambas fases (en función de la cooperación entre las entidades responsables) es fundamental para la obtención de predicciones precisas.

Predicción meteorológica

La predicción meteorológica es la información necesaria para los modelos de pre-caracterización de avenidas y tiene el objetivo de predecir la inundación antes de que ocurra. Las principales metodologías existentes son (Bramer, 2010 [7]):

- Método de la persistencia: Es el método de predicción más sencillo. Este método asume que las condiciones atmosféricas no cambian en el tiempo, esto es, que las condiciones futuras serán las mismas que las actuales. Por tanto, es adecuado en lugares en los que los patrones atmosféricos no varían estacionalmente de forma importante.
- Método de las tendencias: Este método se basa en la determinación de la velocidad y dirección de centros de bajas y altas presiones, frentes y áreas de nubes, así como precipitación. Con dicha información, pueden predecirse dónde tendrán lugar ciertas características meteorológicas. Se emplea principalmente para predicciones de precipitación a corto plazo (varias horas).
- Método climatológico: Este método involucra el uso de promedios estadísticos de las variables atmosféricas, acumulados en varios años. Puede emplearse siempre que los patrones meteorológicos sean similares a los esperados en la fecha escogida, pero no son adecuados para eventos extremos.
- Método análogo: Este método analiza el escenario actual con el objetivo de relacionar el pronóstico con un día en el pasado, en el que el patrón fue similar (escenario análogo).
- Predicciones meteorológicas numéricas: Consisten en complejos programas informáticos que aportan información de numerosas variables meteorológicas como temperatura, presión, velocidad y dirección del viento o precipitación. Posteriormente, se analiza cómo estas variables interactúan para dar lugar al pronóstico actual. Dado que los modelos y la información de entrada no son totalmente precisos, debe considerarse la incertidumbre existente.

La incertidumbre en el proceso de predicción meteorológica varía en función del método empleado. Dado que siempre existe un determinado nivel de incertidumbre, debe analizarse y limitarse para gestionar y tomar decisiones de forma correcta.

Pre-caracterización de avenidas

Esta medida se centra en la estimación del instante de inicio y duración de una avenida, en un determinado punto, así como el hidrograma de la avenida, a partir de la información obtenida mediante predicción meteorológica. Estos sistemas estiman las características hidráulicas de la inundación para apoyar la gestión del riesgo frente a inundaciones.

En general, este método analiza cursos de agua superficial como ríos, arroyos o escorrentía superficial, mediante modelos hidráulicos e hidrológicos, para definir las características de la inundación en cada punto. Estos modelos son ampliamente utilizados, por ello se comprueba y predice el estado y caudal en ríos y arroyos de forma continua, permitiendo la predicción de avenidas en cualquier momento, lo que supone una herramienta muy adecuada para el proceso de toma de decisiones.

Estos modelos de pre-caracterización requieren de los siguientes datos de entrada (Moreno-Santaengracia et al, 2000 [36]):

- Datos físicos: Características de la cuenca, relieve, cauces, medidas estructurales existentes y áreas urbanas.
- Medidas meteorológicas: Información procedente de la red de estaciones meteorológicas (pluviómetros, anemómetros, etc.) para implementar características atmosféricas; especialmente, datos de precipitación.
- Datos de predicción meteorológica: Información procedente de pronósticos meteorológicos para la predicción de avenidas.
- Datos de aforo: Información obtenida de la red de aforos en cauces para predicción de avenidas.
- Procedimientos de gestión: Consideración del efecto de las actividades y procedimientos de gestión de infraestructuras en referencia a la predicción.

Además de los modelos hidrológicos, existen modelos marítimos que predicen el estado del mar, así como el régimen de mareas, lo que resulta una herramienta de gran utilidad para la reducción del riesgo de inundación de origen marítimo. Los eventos marítimos extremos se definen en general en función de la máxima altura de ola, lo que implica un alto tratamiento de datos, dado que las distribuciones de altura de ola pueden presentar grandes variaciones (Medina y Méndez, 2006 [34]). En este caso, se requieren mediciones meteorológicas específicas (por ejemplo, datos de presión y velocidad del viento), así como predicciones de la dinámica marítima.

En resumen, estos modelos deben verificarse y validarse con información procedente de la medición directa de diversas variables para corregir y calibrar los procesos a desarrollar, parámetros del modelo y resultados. Las limitaciones del modelo dependen de la exactitud de los datos de entrada y los parámetros empleados, no obstante, son una herramienta eficaz para la gestión de medidas estructurales y no estructurales, así como en la toma de decisiones.

1.3.3. Comunicación

La comunicación es una actividad fundamental en la reducción del riesgo de inundación. En general, pueden diferenciarse dos grupos de medidas de comunicación: por una parte, los procedimientos de comunicación general a la población en materia de riesgo de inundación, ya que aporta un mejor entendimiento del riesgo existente, además de facilitar el conocimiento de los procedimientos de actuación durante la inundación; por otra parte, la comunicación durante el evento de inundación se centra en el aviso a la población sobre la amenaza de carácter inminente, mediante la utilización de sistemas de alarma.

Comunicación general

La comunicación del riesgo debe ser un proceso continuo, basado en el desarrollo del conocimiento, así como en facilitar la información necesaria para aumentar el nivel de concienciación con respecto al riesgo existente, con el objetivo de alcanzar un mayor grado de responsabilidad pública.

La comunicación general se compone, principalmente, de formación a la población y se basa en la comunicación del riesgo existente en condiciones normales. De este modo, la población puede aprender cómo actuar en caso de inundación. Esta medida es especialmente importante para la población situada en áreas de elevado riesgo de inundación.

Un programa de formación a la población en materia de riesgo de inundación debe incluir, al menos, los siguientes puntos (Balmforth et al, 2006 [5]):

- Conceptos básicos de hidrología (por ejemplo, en lo referente a periodos de retorno).
- Conocimientos sobre eventos extremos e impacto del cambio climático.
- Comprensión de la efectividad y sostenibilidad de las medidas estructurales existentes, dado que su diseño para avenidas de elevados periodos de retorno no resulta eficiente en términos de coste/beneficio.
- Conocimiento sobre minimización y control del riesgo de inundación.
- Procedimientos de actuación antes, durante y después de la inundación.

De este modo, si los aspectos anteriores se tienen en cuenta para la comunicación del riesgo a la población y se llevan a cabo correctamente, las consecuencias de la inundación pueden reducirse notablemente (principalmente, en número de víctimas) gracias a la consecución eficaz de los procedimientos de evacuación.

Comunicación durante el evento de inundación: Sistemas de alarma

Los sistemas de alarma (o aviso) se centran en el aviso a la población de un inminente evento de inundación. Un sistema adecuado, junto con actividades de formación a la población, puede reducir significativamente el número de víctimas, ya que son una herramienta fundamental para iniciar y desarrollar los procedimientos de evacuación.

Los sistemas de aviso deben iniciarse en el momento en el que los pronósticos predicen un evento de importantes consecuencias o bien un fallo estructural a corto plazo. Fuerzas de seguridad e instituciones gubernamentales encargadas de la gestión de emergencias [35] deben definir el inicio y términos del proceso de evacuación, a partir de las indicaciones recogidas en los planes de emergencia. Para ello, se establecen diferentes niveles de emergencia en función de la probabilidad de ocurrencia y de la potencial magnitud de la inundación.

El aviso a la población en riesgo puede efectuarse de forma directa, a través de la percepción de la amenaza (por ejemplo, por un aumento del nivel del agua en el cauce), o bien indirectamente a partir de otras fuentes, como (Jonkman, 2007 [25]):

- Medios de comunicación: radio, Internet, televisión, etc.
- Sistemas de alerta: altavoces, bando, sirenas, etc.
- Difusión individual: personal de emergencias, fuerzas de seguridad, redes sociales, etc.
- Otros sistemas: llamadas de teléfono, mensajes de texto, etc.

La efectividad de los sistemas de aviso varía para cada una de las fuentes citadas anteriormente y, en general, viene determinada por el nivel de preparación y las posibilidades de comunicación entre autoridades y población, así como por el tiempo de aviso disponible y las propias características del sistema.

1.3.4. Movilización

Los procedimientos de movilización incluyen las acciones llevadas a cabo por fuerzas de seguridad y servicios de emergencia para la reducción de las consecuencias, como por ejemplo, los procesos de evacuación. Estos procedimientos se clasifican en tres categorías en función del tiempo disponible para la evacuación (Jonkman, 2007 [25]):

- Evacuación preventiva: Con anterioridad al inicio del evento de inundación. Por ejemplo, en un área inundable, antes de la progresión de una brecha en un dique.
- Evacuación forzosa: Durante el desarrollo de la inundación. Por ejemplo, hacia un área en la que la población no esté expuesta a los efectos físicos del evento.

- Huída: Desplazamiento de la población existente, en un área expuesta, afectada por los efectos de un evento inminente (por ejemplo, reducción de la estabilidad y de la capacidad para caminar por aumento del nivel del agua en las calles).

Los niveles de organización varían en función de la categoría. En el primer caso, la pre-caracterización de la avenida con anterioridad permite la comunicación y aviso con antelación, lo que da lugar a un menor número de víctimas. Sin embargo, en el tercer caso, la movilización se efectúa de una forma menos organizada lo que puede dar lugar a un mayor número de víctimas.

Los planes de evacuación en áreas de alto riesgo de inundación definen los procedimientos a seguir y el papel de cada agente interviniente: fuerzas de seguridad, autoridades y servicios de emergencia (FEAT, 1997 [19]). La efectividad de la evacuación depende de la propia efectividad de los sistemas de aviso y del tiempo disponible para llevar a cabo la evacuación antes de que el evento de inundación tenga lugar. Estos aspectos se describen en mayor detalle en el apartado 1.3.5.

Además de los procedimientos de evacuación, la instalación de barreras temporales puede reducir considerablemente las consecuencias de la inundación, lo que impide la entrada de agua en áreas urbanas y refuerza las medidas estructurales existentes (Figura 1.3.1). La efectividad de dichas barreras es función del tiempo disponible para su colocación, de una adecuada planificación y de la disponibilidad de personal y materiales (por ejemplo, sacos de arena, bloques, etc.).



Figura 1.3.1. Disposición de sacos de arena como refuerzo para diques en Rumania, 2006.

1.3.5. Coordinación y procedimientos de operación

El objetivo principal de las medidas de coordinación se centra en la mejora de la comunicación entre diferentes organizaciones y agentes intervinientes con un papel de relevancia en la gestión del riesgo de inundación.

Estas medidas pueden clasificarse en dos grupos: el primer grupo comprende las medidas generales que facilitan la coordinación entre agentes, desarrollando planes de emergencia y estrategias para reducir el riesgo, incluyendo, también, las prácticas o reglas de operación a ejecutar; el segundo grupo recoge las medidas para una coordinación adecuada durante la emergencia, mejorando la efectividad de otras medidas no estructurales.

Procedimientos para la coordinación general

Algunos de los principales objetivos de estas medidas son: definir los procedimientos a seguir durante la inundación y el papel de fuerzas de seguridad y de la Administración; posibilitar la coordinación entre administraciones para la toma de decisiones con el fin de reducir el riesgo, y evitar medidas contradictorias procedentes de diversos organismos.

Estas medidas dependen en gran medida de la estructura de la administración correspondiente, de la legislación existente, así como de instituciones y agentes intervinientes en cada área. Por ello, no pueden establecerse recomendaciones específicas en materia de coordinación. No obstante, se enumeran en este punto algunos ejemplos:

- Organismos para la gestión del riesgo de inundación (COPUT, 2002 [11] y DEFRA, 2009 [15]): Creación de un organismo específico para la gestión y reducción del riesgo de inundación, con representación de todas las instituciones y agentes intervinientes.
- Planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) [4]: La Directiva Europea 2007/60/EC [18] establece la obligación de desarrollar planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) para fijar objetivos para la reducción del riesgo de inundación y coordinar administraciones.
- Planes de emergencia (COPUT, 2002 [11]): Definen los procedimientos a llevar a cabo durante la catástrofe y el papel de cada fuerza de seguridad para reducir consecuencias. Pueden establecerse para el fallo de una medida estructural o en el caso de emergencias de inundación de carácter general.

Las actividades de coordinación pueden mejorar la efectividad del resto de medidas estructurales y no estructurales, además de reducir el riesgo notablemente.

Procedimientos para la coordinación durante el evento de inundación

Las medidas de coordinación durante el evento de inundación proporcionan una comunicación eficaz entre agentes, un funcionamiento correcto de los sistemas de aviso y de los procedimientos de evacuación.

Debe establecerse una jerarquía determinada para la gestión de emergencias con el fin de mejorar los resultados de las medidas existentes. A continuación se muestran algunas de las principales relaciones de coordinación que pueden definirse entre diversas de las medidas descritas anteriormente:

- Predicción meteorológica y pre-caracterización de avenidas: Deben enviarse pronósticos meteorológicos de forma continua a las agencias encargadas de la realización de los modelos de pre-caracterización para disponer de mayores tiempos de aviso.
- Pre-caracterización de avenidas y sistemas de alerta: Una coordinación adecuada entre entidades permite la notificación del aviso a la población con suficiente antelación.
- Sistemas de alerta y procedimientos de evacuación: Los sistemas de aviso deben alertar a las fuerzas de seguridad para iniciar los procedimientos de evacuación de la población en riesgo, tan pronto como sea posible, en un inminente evento de inundación.

En resumen, una coordinación eficaz entre las entidades responsables de las medidas a efectuar, antes y durante la inundación, puede incrementar el tiempo de aviso disponible para movilizar a la población, reduciendo las consecuencias de la misma y, por tanto, el riesgo.

1.3.6. Seguros e indemnizaciones

La rápida recuperación tras la inundación es fundamental y requiere de la existencia de esquemas apropiados de indemnización y seguros.

Por una parte, los seguros incluyen la distribución de riesgos y pérdidas entre un elevado número de personas. Un sistema de seguros adecuado puede reducir notablemente las consecuencias indirectas de la inundación, de modo que las pérdidas económicas pueden cubrirse rápidamente para reestablecer la situación previa. En países desarrollados, las aseguradoras son el principal mecanismo para financiar las pérdidas producidas por una catástrofe, como es un evento de inundación (Kovacs, 2001 [29]), asignando cuotas superiores a las propiedades ubicadas en zonas potencialmente inundables para obtener compensaciones tras la inundación.

Por otra parte, las indemnizaciones se emplean para compensar las pérdidas no cubiertas por los seguros. El sistema para la asignación de indemnizaciones se basa en

la contribución solidaria y el voluntariado, así como en la asistencia procedente del gobierno central y de la ayuda internacional.

Ambos mecanismos deben planearse con anterioridad a la inundación para facilitar el restablecimiento del empleo, ayudar a las víctimas a reparar los daños producidos y recuperar su vida normal tras la inundación (Kundzewicz, 2001 [31]).

1.3.7. Medidas no estructurales y riesgo de inundación

Las medidas no estructurales son métodos eficientes y sostenibles para la reducción del riesgo de inundación. Sin embargo, siempre existe un riesgo residual, cuyo valor depende de la funcionalidad y fiabilidad de dichas medidas:

- La funcionalidad define la máxima reducción posible, en términos de consecuencias, por limitaciones de la propia medida. Como ejemplo, en algunas ocasiones, los sistemas de aviso y los procedimientos de evacuación no llegan a movilizar a toda la población en riesgo.
- La fiabilidad define la posibilidad de que ocurra un fallo en la estructura o en los procedimientos a seguir. Por ejemplo, puede producirse un error en el sistema de aviso o bien un fallo en los modelos de pre-caracterización de avenidas, de modo que no se obtiene la reducción en las consecuencias de inundación que sería esperable.

1.4. HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

En la sección 1.1 se ha definido riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y la vulnerabilidad del área de afección, medida de las consecuencias de dicha amenaza. Por tanto, el riesgo de inundación puede calcularse como el producto de ambas componentes, de modo que el riesgo presenta unidades que dependen de los valores empleados para la estimación de la probabilidad y de las consecuencias potenciales.

Las herramientas para la estimación del riesgo de inundación obtienen un valor general de riesgo para apoyar en la gestión de las medidas de reducción del mismo. Sin embargo, estas herramientas no están tan desarrolladas como otros métodos existentes en ámbitos como la industria aeronáutica o nuclear (de Membrillera et al, 2005 [13]).

Existe una gran variedad de herramientas para la estimación del riesgo de inundación o de alguna de sus componentes. Como se muestra a continuación, estas herramientas pueden dividirse en completas o parciales, según caractericen una o las dos componentes del riesgo. También pueden clasificarse como cuantitativas o cualitativas, según si obtienen o no un valor numérico para el riesgo.

1.4.1. Herramientas parciales y cualitativas

Estas herramientas son el método más sencillo para la estimación del riesgo y, en general, se basan en la experiencia y el conocimiento, sin estimar un valor numérico de probabilidad o consecuencias. Por tanto, estas herramientas sólo calculan una de las dos componentes del riesgo y de una forma cualitativa.

Existen ciertas limitaciones dado que no aportan un conocimiento completo del riesgo existente. En algunos casos, pueden dar lugar a conclusiones erróneas sobre la necesidad de aplicar medidas de reducción del riesgo. Por ejemplo, atendiendo únicamente a la estimación de la probabilidad de inundación, dos áreas de igual probabilidad con diferente densidad de población podrían mostrar el mismo nivel de prioridad para la reducción del riesgo, a pesar de presentar diferencias en cuanto a vulnerabilidad.

En general, estas herramientas pueden dividirse en dos grupos, en función de la componente del riesgo estudiada.

En primer lugar, las herramientas para la estimación de la probabilidad de la amenaza se basan en la ocurrencia de eventos históricos de inundación (Figura 1.4.1) o en cálculos hidráulicos e hidrológicos simplificados.

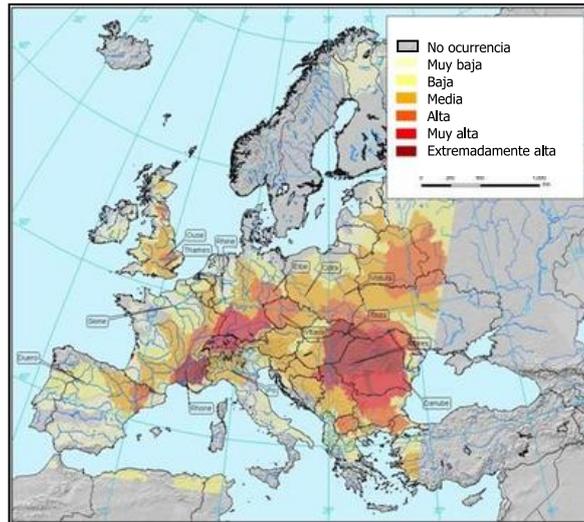


Figura 1.4.1. Mapa de los niveles de ocurrencia de inundación en Europa basado en los eventos históricos de inundación en el período 1998-2005.

Sin embargo, en relación a la estimación de la componente de consecuencias, es fundamental la definición de áreas en función de la pérdida potencial de vidas humanas o bien a partir de la estimación de las consecuencias económicas directas, según diferentes usos del suelo.

Las herramientas cualitativas pueden ser la única solución para la estimación de pérdidas de carácter cultural o medioambiental. Se emplean, principalmente, para la descripción de los efectos indirectos y sociales de la inundación.

En general, estas herramientas incluyen la representación en mapas de eventos históricos, listados de consecuencias o mapas a gran escala (Figura 1.4.1). La obtención de resultados más detallados requiere de la utilización de métodos cuantitativos. Sin embargo, pueden ser de gran utilidad para efectuar análisis preliminares del riesgo de inundación.

1.4.2. Herramientas completas y cualitativas

Estas herramientas estiman ambas componentes del riesgo mediante la combinación de métodos cualitativos para la obtención del riesgo de inundación por separado. Por tanto, se obtiene un resultado del riesgo cualitativo.

Dentro de este grupo, los mapas de riesgo son la herramienta más común. Se obtienen mediante una combinación de la estimación cuantitativa de la probabilidad de ocurrencia de una inundación, a partir de modelos hidrológicos e hidráulicos, y una estimación cualitativa de las consecuencias (Figura 1.4.2). Por ello, los niveles de riesgo obtenidos proceden directamente de la cuantificación de una única componente.

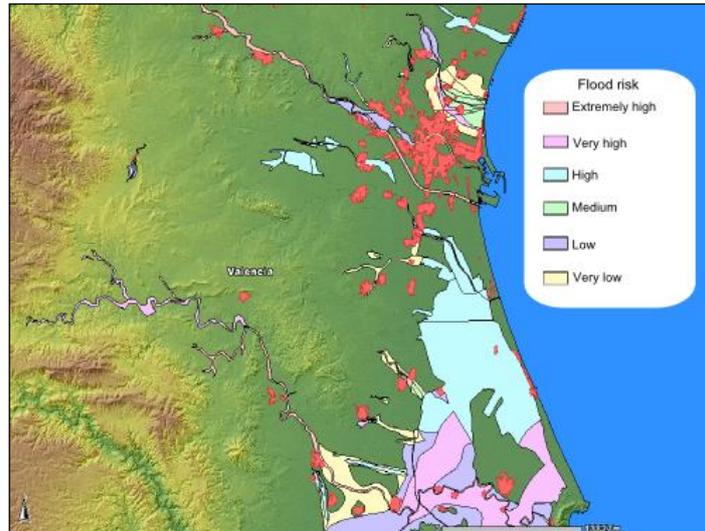


Figura 1.4.2. Mapa de riesgo de la ciudad de Valencia (España).

Estas herramientas sirven para la identificación de áreas prioritarias para la aplicación de medidas de reducción del riesgo, además de ser muy útiles para el planeamiento y la gestión. Sin embargo, el grado de detalle es menor que en herramientas cuantitativas, especialmente en la estimación de consecuencias, lo que supone una limitación frente a otros análisis.

1.4.3. Herramientas parciales y cuantitativas

Estas herramientas definen una componente del riesgo de forma cuantitativa. Por lo tanto, se pueden dividir entre las herramientas que estiman la probabilidad de la amenaza y aquellas que estiman la vulnerabilidad.

Dentro de las herramientas que definen la amenaza, las más comunes son los mapas de inundación, que muestran el área inundada para diferentes eventos asociados a ciertas probabilidades anuales de ocurrencia (Figura 1.4.3). Por tanto, muestran la componente de probabilidad, sin considerar las consecuencias de la inundación.

El proceso a seguir para el desarrollo de estos mapas incluye (Sánchez, 2010 [46]):

- Análisis histórico de las inundaciones: Eventos históricos y variaciones de la morfología del cauce empleando fotos aéreas y otras mediciones.
- Análisis geomorfológico: Estudio de la morfología y geología de las áreas potencialmente inundables.
- Estudio hidrológico: Análisis estadístico de la frecuencia y magnitud de las inundaciones para estimar la avenida asociada a cada probabilidad de ocurrencia.
- Modelización hidráulica: Modelo hidráulico para obtener el área inundada para cada evento de inundación.

- Calibración y comparación de los resultados: Calibración del modelo hidráulico con información de eventos históricos.

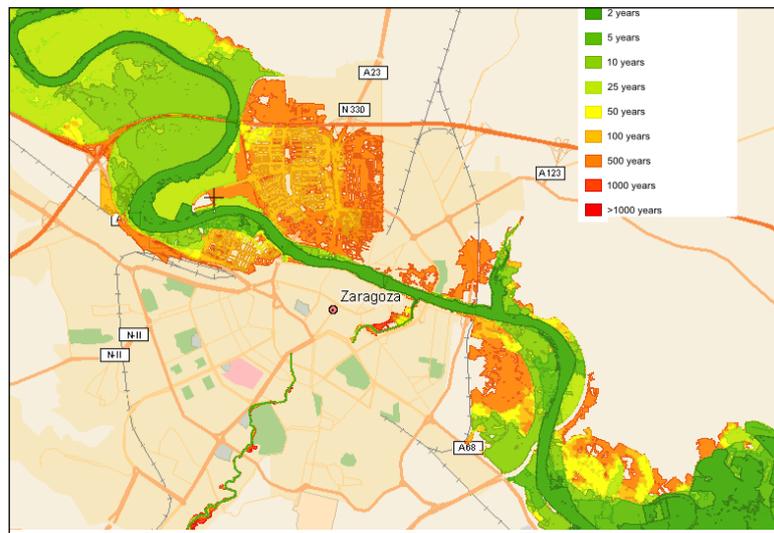


Figura 1.4.3. Mapas de inundación para diferentes períodos de retorno en Zaragoza.

Existen herramientas para el cálculo de consecuencias de inundación que pueden servir para realizar una primera aproximación de las consecuencias de una inundación de gran magnitud. Las metodologías existentes varían en función de las consecuencias estimadas: pérdida de vidas o pérdidas económicas.

En lo referente a la pérdida de vidas, la mayoría de las metodologías para su estimación se basan en tasas de mortalidad fijas según el tipo de inundación, el tiempo de aviso y la severidad de la inundación, ya que datos históricos de inundaciones revelan que estas tasas suelen permanecer constantes para determinados rangos de dichas variables (Jonkman, 2007 [25]). Actualmente, existen métodos más sofisticados que permiten simular los diferentes procesos que tienen lugar durante una inundación, como el método propuesto por Jonkman [25], el método RESCDAM propuesto por Reiter [43] y el modelo LifeSIM desarrollado en SIG (Sistemas de Información Geográfica) por Utah State University [6].

Respecto a la estimación de consecuencias económicas, la mayoría de las estimaciones se basan en los trabajos originales de Kates [28]. Estas metodologías usan la profundidad del agua como parámetro de referencia y utilizan curvas calado-daños para estimar las pérdidas económicas en función del valor del uso del suelo (PATRICOVA, 2002 [11]). Los métodos más recientes se pueden combinar con SIG, empleando además curvas calado-daños calibradas según el uso del suelo (industrial, servicios, residencial unifamiliar, etc.). En general, los costes indirectos se calculan como una fracción de los costes directos, aunque esta aproximación puede llevar a errores importantes en función de la importancia económica del área, infraestructuras afectadas, etc.

1.4.4. Herramientas completas y cuantitativas

Este tipo de herramientas permite cuantificar el riesgo tras obtener un valor numérico para cada una de sus componentes: probabilidad y consecuencias.

En general, estas herramientas se basan en la combinación de mapas de peligrosidad y la estimación de las consecuencias de inundación. El riesgo de inundación debe definirse para un área que depende del nivel de detalle del estudio. En cada área, se obtiene la probabilidad de inundación dado un determinado calado y se estiman las consecuencias asociadas a dicha profundidad del agua. La suma de los productos resultantes de probabilidad y consecuencias para cada evento da lugar al riesgo total en el área de estudio. Normalmente, las unidades en que se estima el riesgo están vinculadas a las unidades de las consecuencias estimadas, divididas por una unidad de tiempo (por ejemplo, número de víctimas por año).

En la actualidad, se han desarrollado este tipo de herramientas para el análisis del riesgo para el caso de medidas estructurales, como presas o diques, obteniendo el riesgo incremental resultante de la existencia de la estructura.

Un ejemplo de este tipo de herramientas son los mapas de riesgo. Estos mapas distribuyen el área de estudio en pequeñas celdas para cuantificar el riesgo en cada una de ellas y así obtener la distribución del riesgo en el área total (Jonkman, 2007 [25]). De este modo, el riesgo total en el área es la suma de los valores obtenidos en todas las celdas. Sin embargo, son una herramienta todavía en desarrollo dada su complejidad y nivel de detalle.

Existe otro tipo de herramientas cuantitativas y completas que se basan en la representación gráfica de ambas componentes del riesgo. Las curvas F-N (Figura 1.4.4) representan la probabilidad anual acumulada de excedencia de cada nivel de consecuencias, en términos de pérdida de vidas o bien costes económicos.

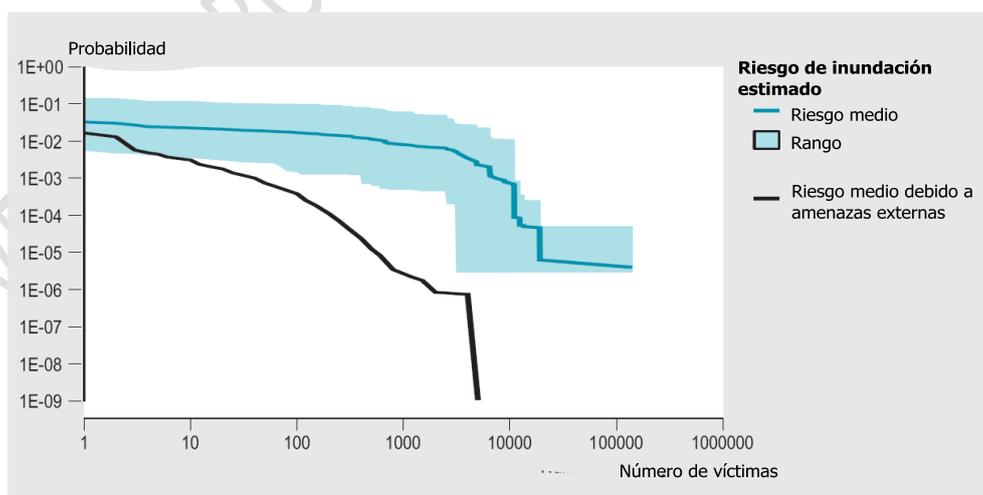


Figura 1.4.4. Curva F-N del riesgo de inundación en Holanda comparada con el riesgo de otras amenazas externas [39].

Estas curvas reflejan todas las combinaciones posibles de probabilidad de excedencia y número de víctimas en una determinada área de estudio. En caso de representar el número potencial de víctimas por inundación, el área encerrada bajo la curva se corresponde con el riesgo social total en el área estudiada.

Esta herramienta muestra la distribución de la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de consecuencias (por ejemplo, número de víctimas) de una forma clara y sencilla, además de permitir la comparación con criterios de tolerabilidad.

Aunque no permite un análisis directo de la distribución espacial del riesgo de inundación, como ocurre en los mapas de riesgo, puede ser una herramienta muy útil para el análisis del riesgo de inundación de un núcleo urbano. De este modo, el análisis preliminar de un área geográfica de estudio más amplia, puede complementarse con el análisis de las curvas F-N asociadas a determinados núcleos de población o zonas urbanas.

Este tipo de curvas resulta de gran utilidad para la caracterización del riesgo de inundación. Además, permiten la comparación del caso de estudio con criterios de tolerabilidad para la evaluación del riesgo existente con respecto a posibles estándares establecidos en la normativa.

Este tipo de curvas también pueden ser trazadas con las potenciales consecuencias económicas por inundación en el área urbana de estudio, en cuyo caso se denominan curvas F-D.

1.5. METODOLOGÍA

El objetivo de este capítulo consiste en la descripción de una metodología de análisis del riesgo en zonas urbanas para inundación fluvial e inundación pluvial (escorrentía producida por capacidad insuficiente de la red de drenaje). La cuantificación del riesgo de inundación se efectúa mediante el uso de árboles de eventos² y su representación mediante curvas tipo F-N o F-D (probabilidad anual de excedencia frente al nivel de consecuencias, ya sea en número potencial de víctimas o pérdidas económicas).

1.5.1. Generalidades

Como se ha definido en capítulos anteriores (1.1 a 1.4), para el análisis del riesgo de inundación deben considerarse las dos componentes del riesgo: peligro y vulnerabilidad.

La metodología descrita a continuación expone cómo obtener los valores de probabilidad asociados a los eventos de inundación considerados y las consecuencias potenciales de los mismos. De este modo pueden compararse diferentes escenarios de estudio para una misma población y evaluar la efectividad de ciertas medidas en la reducción del riesgo (Figura 1.5.1).

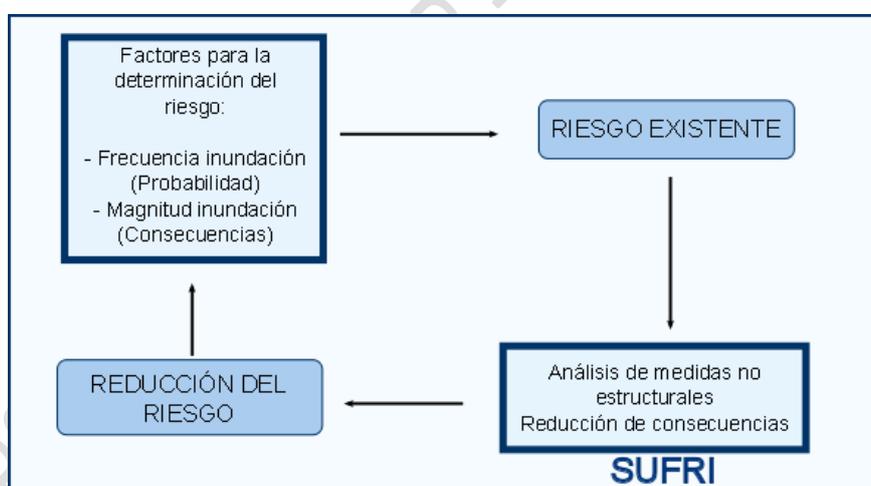


Figura 1.5.1. Esquema riesgo de inundación (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

A continuación se definen algunos conceptos empleados a lo largo del documento:

- *Área geográfica de estudio.* Área que engloba los diferentes núcleos de estudio (poblaciones).
- *Núcleo o población de estudio.* Ciudad o localidad objeto de estudio, considerando el término municipal o el área sujeta a consideración, incluyendo

² Software iPresas (Universidad Politécnica de Valencia). Versión 0.9.1 21/06/2010

todas las zonas con posibilidad de verse afectadas por un evento de inundación. En general, se considera el núcleo urbano completo.

- *Escenarios de inundación.* Eventos de inundación considerados que pueden afectar a la población de estudio, cuyas consecuencias se estiman para la incorporación al modelo de riesgo de la vulnerabilidad del núcleo de estudio.
- *Medida estructural.* Medida consistente en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas (según RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación [32]).
- *Medida no estructural.* Aquella que sin actuar sobre la avenida en sí modifica la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación (según RD903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación [32]).
- *Caso-base.* Representa la situación actual del caso de estudio frente al riesgo de inundación, incluyendo infraestructuras de defensa frente a inundaciones existentes y medidas no estructurales. El análisis del caso-base aporta resultados en riesgo en el momento actual.
- *Escenarios de estudio.* Para un mismo núcleo urbano, el número de escenarios de estudio se define por el número de alternativas a considerar en función de las medidas no estructurales incluidas en el análisis, además del caso base (situación existente). Las distintas alternativas definen la situación futura tras la aplicación de las medidas consideradas.

1.5.2. Estado del arte

Una vez descritas en el apartado 1.4 las herramientas existentes para la estimación del riesgo de inundación, se presenta a continuación el estado del arte en la caracterización de la componente del riesgo referente a las consecuencias por inundación (la cuantificación de la componente de probabilidad ha sido ampliamente estudiada dentro del campo de la hidrología, a diferencia de la componente de consecuencias).

1.5.2.1. Métodos para la evaluación de consecuencias por inundación fluvial

Pérdida de vidas

Existen diversos métodos de estimación de pérdida de vidas por inundación fluvial basados en registros históricos y fundamentos estadísticos (Graham, 1999 [22] o

Jonkman, 2007 [25]), además de otros métodos que emplean información estadística junto con otros factores de impacto de la inundación (Reiter, 2001 [43]).

En los últimos años se han desarrollado métodos que combinan la simulación de la inundación, considerada generalmente como resultado de la rotura de presas, con modelos de simulación del movimiento de la población en riesgo, como son: el modelo LIFESim desarrollado por Utah State University (EE.UU.) o el método LSM desarrollado por BC Hydro de Vancouver (Canadá).

Numerosas entidades e instituciones trabajan actualmente en el campo del análisis del riesgo de inundación, tales como DHS (United States Department of Homeland Security), United States Bureau of Reclamation (USBR), U.S. Army Corps of Engineers (USACE), etc.

Pérdidas económicas

Existen diversas metodologías para la estimación de pérdidas económicas por inundación.

En el ámbito español existen ejemplos como el *Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana*, PATRICOVA en 2002 [11] y el *Plan Especial de Emergencias por Inundación*, INUNCAT en 2009 [1]; también se citan ejemplos en el ámbito internacional como el *Economic Guidance Memorandum* (EGM) elaborado por USACE (Dawson, 2003 [12]).

Estas metodologías se basan fundamentalmente en el establecimiento de curvas calado-daños que asignan un nivel de daños (en porcentaje) en función del nivel del agua alcanzado por la inundación. Estimado el valor económico del bien o de la zona inundada, pueden establecerse las pérdidas económicas a partir del grado de destrucción ocasionado por la inundación.

A su vez, existen en la bibliografía diversas recomendaciones para la incorporación del efecto de sistemas de aviso en la estimación de costes económicos por inundación. Estos estudios se basan en la reducción de daños materiales por la implantación de medios de barrera al paso del agua en viviendas y locales comerciales (Parker et al, 2005 [41]).

Las pérdidas económicas de un evento de inundación pueden clasificarse en tangibles (cuantificables) e intangibles (no cuantificables). A su vez, los costes tangibles pueden dividirse en costes directos e indirectos. En este documento, la evaluación de consecuencias económicas se basa en la estimación de costes directos e indirectos.

1.5.2.2. Métodos para la evaluación de consecuencias por escorrentía pluvial

Pérdida de vidas

Existen diversos criterios de riesgo asociados a inundaciones por escorrentía pluvial, basados en el calado máximo alcanzado por la inundación tanto en ámbito rural como urbano (Témez, 1991 [47]; Nanía, 2002 [38]), en la velocidad máxima del flujo (Témez, 1991 [47]) o en la consideración conjunta de ambos parámetros (Gómez y Russo, 2009 [21]; Reiter, 2001 [43]).

Gran parte de los criterios existentes se basan en estudios teóricos concernientes a las condiciones de estabilidad peatonal frente a la fuerza del flujo (deslizamiento, arrastre y vuelco de personas) y al peligro de atrapamiento en vehículos o edificios. También existen ejemplos de estudios experimentales (Gómez y Russo, 2009 [21]) en los que se ha estudiado la estabilidad de individuos en condiciones de velocidad del flujo críticas.

Existen recomendaciones y métodos descritos en el proyecto Flood Risk to People, desarrollado por DEFRA (UK) [32] para el establecimiento de tasas de mortalidad asociadas a eventos de inundación.

Pérdidas económicas

En general, no se dispone de metodologías para evaluar las pérdidas económicas derivadas de una inundación en función del origen de la misma. Por tanto, los criterios a considerar para el análisis de consecuencias económicas por inundación no distinguen entre inundación fluvial, pluvial, etc.

Como ejemplo, se hace referencia en este punto a dos normativas publicadas en España: el “*Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*” de 2002 [11], normativa ampliamente empleada dentro del marco normativo vigente en España en materia de riesgo de inundación para la estimación de consecuencias en zonas urbanas; y el “*Plan Especial de Emergencias por Inundación (INUNCAT)*” [1], publicado por la Agencia Catalana del Agua (ACA) en 2009.

1.5.2.3. Análisis de riesgos en presas y su aplicación a la evaluación del riesgo de inundación en zonas urbanas

En la actualidad, la aplicación del análisis de riesgos ha adquirido un destacable desarrollo, en particular en el ámbito de la seguridad de presas y embalses (USBR, 2001 [8]). La rotura de la presa de Tetón en 1976 representa un punto clave en la aplicación de esta disciplina en el campo de la seguridad de presas.

Desde entonces, distintos organismos y universidades han creado grupos de trabajo para el desarrollo de metodologías para la evaluación del riesgo como herramienta de

apoyo a la toma de decisiones en seguridad de presas. Entre ellos, destacan U. S. Bureau of Reclamation (USBR, 2003 [9]), U. S. Army Corps of Engineers (USACE, EE.UU.), Federal Emergency Agency (FEMA, EE.UU.), BC Hydro (Canadá), Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD, 2003 [2]), etc. Dentro del campo de la investigación, destacan las publicaciones de diversos autores: Dr. Bowles (Utah State University), Dr. Baecher (University of Maryland), Dr. Wol (Michigan State University) y Dr. McCann (Stanford University) en Estados Unidos, junto con los doctores Vrijling y Jonkman [25] en Países Bajos. Además, en los últimos años, ha aumentado el número de congresos y eventos relacionados con este ámbito, como, por ejemplo, la celebración de la *I y II Semana Internacional sobre la Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas* (en 2005 y 2008, organizada por el grupo iPresas de la Universidad Politécnica de Valencia, España).

Dada la clara interdependencia entre el ámbito de la seguridad de presas y el riesgo de inundación en zonas urbanas (principalmente, en aquellas localidades situadas en áreas cercanas a la presa), la metodología SUFRI plantea la utilización de herramientas de cálculo que permitan la computación del riesgo de inundación.

En particular, se plantea como ejemplo la utilización de un software, inicialmente creado para el análisis de riesgo en seguridad de presas y embalses, que, aplicado para el análisis del riesgo de inundación, permite obtener resultados cuantitativos en riesgo y poder así evaluar alternativas de reducción del mismo. El software *iPresas*³ (Serrano-Lombillo, 2010 [45]) permite la resolución de árboles de eventos mediante diagramas de influencia, ofreciendo una interfaz sencilla para la representación de modelos de riesgo de forma esquemática y compacta. Los diagramas de influencia están constituidos por nodos y conectores: los nodos contienen la información necesaria para el cálculo y los conectores especifican las relaciones entre ellos. Por tanto, el software permite generar el modelo de riesgo asociado a una presa (o sistema de presas) mediante un diagrama de influencia que incorpora los nodos necesarios para captar todas las posibles variables y combinaciones que gobiernan el sistema⁴. Siguiendo la misma filosofía, pueden construirse diagramas que representen el modelo de riesgo del régimen natural de un río, del sistema de drenaje de una ciudad, del conjunto de medidas estructurales que afectan al régimen del cauce (p.e. diques, encauzamientos, motas, presas, etc.). En general, proporciona la posibilidad de plantear modelos de riesgo representativos tanto de escenarios presentes como futuros.

Por tanto, empleando herramientas informáticas u otros métodos de cálculo pueden obtenerse resultados cuantitativos en riesgo, permitiendo la evaluación del riesgo existente con criterios de tolerabilidad. La metodología SUFRI incluye algunos de los criterios existentes hasta la fecha para la evaluación del riesgo en zonas urbanas (Apéndice 8).

³ Desarrollado por el grupo iPresas y registrado por la Universidad Politécnica de Valencia.

⁴ Entendiendo como sistema a la presa en cuestión o al conjunto de varias presas.

1.5.3. Metodología SUFRI para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas

La metodología SUFRI para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas se basa en la utilización de curvas F-N y F-D para la representación y posterior evaluación del riesgo de inundación. Por ello, en primer lugar, el punto 1.5.3.1 describe de forma conceptual el análisis del riesgo de inundación mediante curvas F-N y F-D.

La metodología describe el proceso a seguir para la obtención de las curvas F-N y F-D. Dicho proceso se divide en una serie de fases descritas en el punto 1.5.3.2.

La metodología SUFRI distingue el análisis del riesgo por inundación fluvial y por escorrentía pluvial. Aunque ambos análisis presentan similitudes en diversas etapas del cálculo y evaluación del riesgo, dadas las diferencias en las características hidráulicas de la inundación (menores velocidades y calados para las inundaciones por escorrentía pluvial) existen ciertas variaciones, principalmente, en la estimación de consecuencias en el cálculo de la pérdida potencial de vidas. Por tanto, se describen por separado (puntos 1.5.3.3 y 1.5.3.4).

Se proponen diagramas de flujo para ambos casos (Apéndices 1 y 2), incluyendo de forma esquemática los pasos a seguir y los puntos del procedimiento que pueden incluir modificaciones en la definición de diferentes escenarios de estudio.

Finalmente, se establecen consideraciones con respecto a la incorporación al análisis de la existencia de medidas no estructurales (punto 1.5.3.5) para la evaluación de la reducción del riesgo de inundación.

1.5.3.1. Evaluación del riesgo de inundación mediante curvas F-N

Este apartado presenta la utilización de curvas F-N como herramienta para caracterizar el riesgo de inundación en zonas urbanas de una forma completa y cuantitativa, asistiendo en la gestión y planificación frente al riesgo de inundación.

A partir de los resultados de riesgo obtenidos para el área de estudio y alternativas a la situación existente como la aplicación de medidas no estructurales, puede representarse una curva F-N para las situaciones con medidas tanto estructurales como no estructurales. La Figura 1.5.2 muestra un ejemplo de representación de curvas F-N para tres escenarios de estudio (situación sin medidas, medidas estructurales y situación con medidas estructurales y no estructurales) para un caso de estudio hipotético.

La Figura 1.5.3 muestra el gráfico equivalente para la representación de pérdidas económicas por inundación, en cuyo caso, se denomina curva F-D.

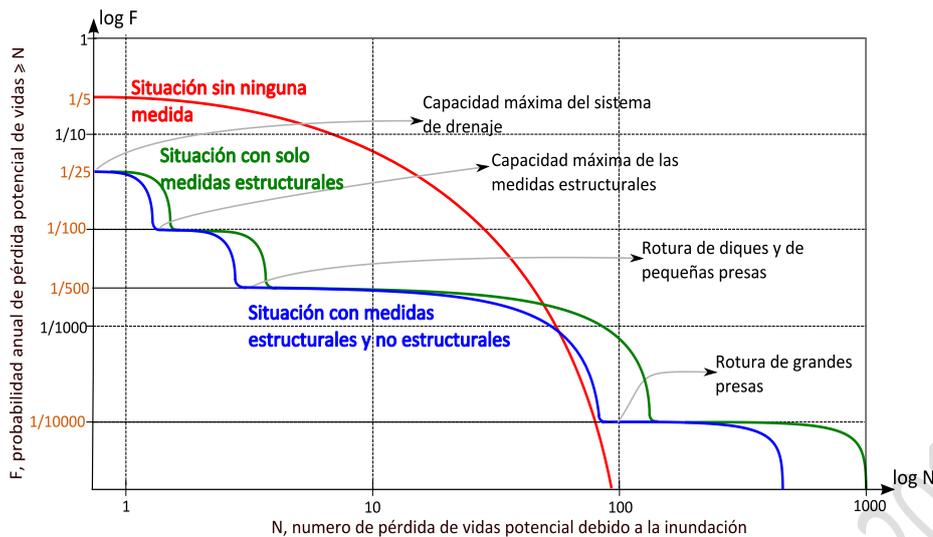


Figura 1.5.2. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-N. Riesgo social (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

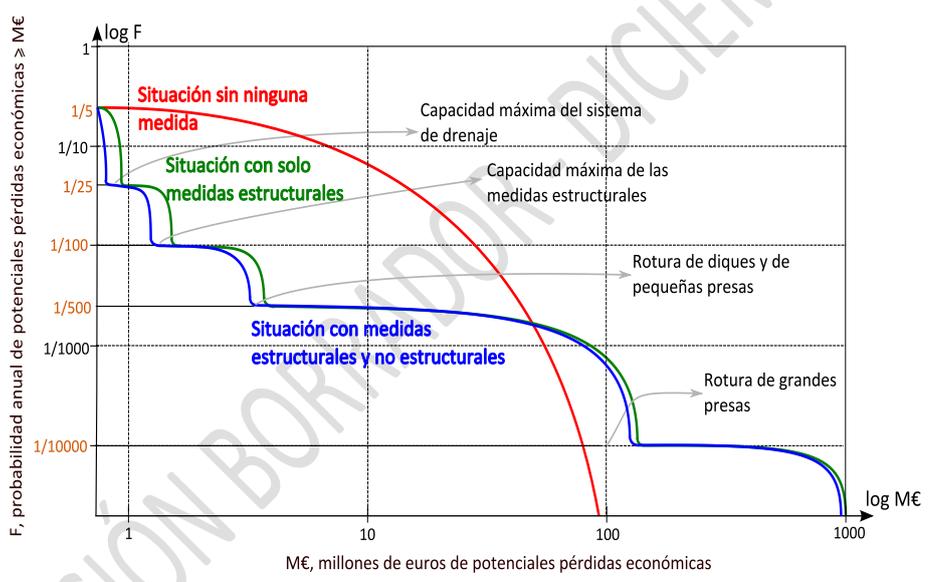


Figura 1.5.3. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-D. Riesgo económico (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

Las figuras anteriores muestran la probabilidad de ocurrencia de un evento de inundación (años⁻¹) y las potenciales consecuencias del mismo (pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas). El área bajo la curva representa el riesgo total de inundación, pues supone la integración de la probabilidad de ocurrencia por las consecuencias.

El estudio de la situación actual frente al riesgo de inundación para el caso de estudio y la comparación con la situación sin ningún tipo de medidas (por ejemplo, el régimen

natural del río en el caso de inundación fluvial) permite analizar el efecto aislado de las medidas estructurales existentes, tal y como se muestra en la Figura 1.5.4.

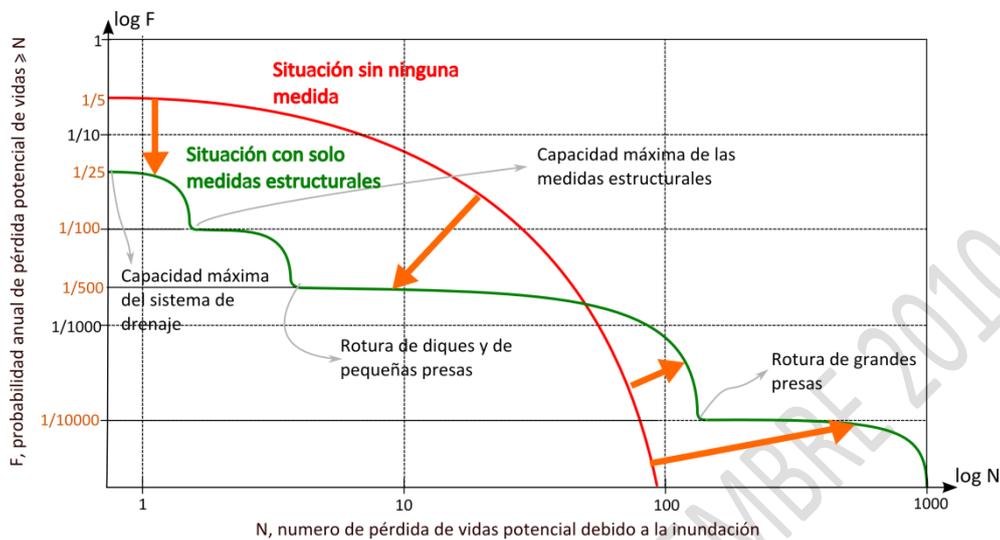


Figura 1.5.4. Efecto de medidas estructurales con respecto a la situación sin ningún tipo de medida. Riesgo social. (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

La Figura 1.5.4 se muestra el efecto de diversas estructuras, como son la existencia del sistema de drenaje/captación, diques, pequeñas y grandes presas. Dependiendo de la medida estructural considerada, el efecto se verá reflejado en la curva F-N. Por ejemplo, la existencia de una medida estructural puede suponer un descenso en la probabilidad de excedencia, pero su fallo puede derivar en un aumento de las consecuencias por inundación.

También puede establecerse la comparación de la situación existente frente al escenario con medidas no estructurales. La Figura 1.5.5 incluye un ejemplo de las diferencias entre las curvas F-N de un caso hipotético en las situaciones con sólo medidas estructurales y con medidas tanto estructurales como no estructurales.

La Figura 1.5.5 muestra cómo la introducción de medidas no estructurales puede suponer una reducción importante de las consecuencias de inundación, especialmente en el número de víctimas.

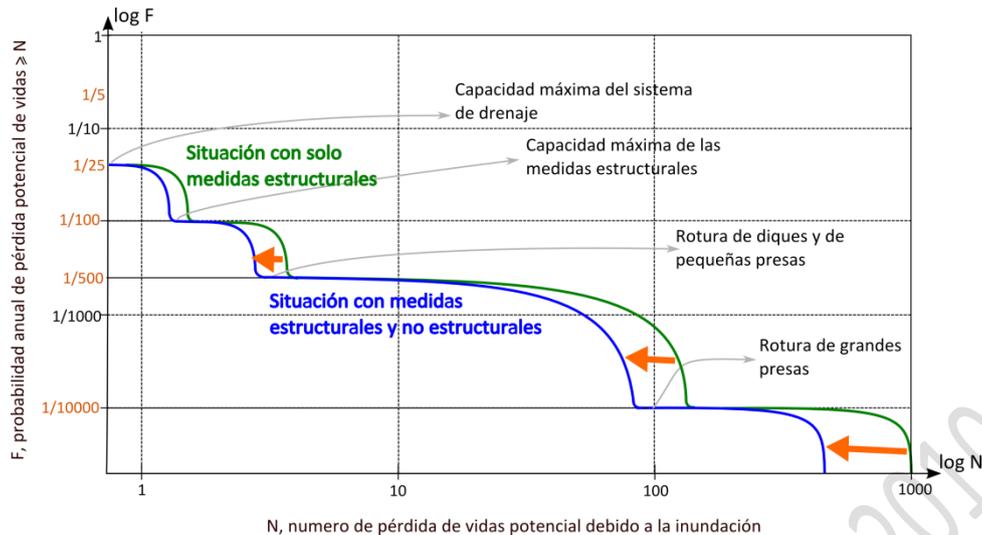


Figura 1.5.5. Efecto de medidas estructurales con respecto a la situación sin ningún tipo de medida. Riesgo económico. (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

Las figuras anteriores (1.5.2 a 1.5.5) sirven para ilustrar cómo las curvas F-N y F-D pueden emplearse como herramienta para la cuantificación y evaluación del riesgo de inundación. La metodología SUFRI propone estas curvas como base para el análisis del riesgo por inundación, además de describir el proceso a seguir para cuantificar el efecto en reducción del riesgo de inundación de medidas estructurales y no estructurales.

1.5.3.2. Procesos a seguir para la evaluación del riesgo de inundación en zonas urbanas

Previamente a la descripción detallada de la metodología a seguir para el análisis del riesgo de inundación se describen en este apartado las diferentes fases que componen el procedimiento. En la Figura 1.5.6 se muestra el esquema general de los procesos a seguir para la confección del modelo o modelos de riesgo para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas.

Las fases a considerar son:

- Fase I Definición del ámbito de estudio.
- Fase II Revisión de la información existente.
- Fase III Estudio de la situación actual. Definición del caso base.
- Fase IV Definición de escenarios de inundación.
- Fase V Arquitectura del modelo de riesgo.
- Fase VI Datos de entrada al modelo de riesgo.
- Fase VII Cálculo del riesgo.
- Fase VIII Representación de curvas F-N.
- Fase IX Evaluación del riesgo.
- Fase X Incorporación y análisis del efecto de medidas no estructurales.

En los apartados siguientes se describe cada una de las fases anteriores, distinguiendo entre inundación fluvial (punto 1.5.3.3) e inundación por escorrentía pluvial (punto 1.5.3.4).

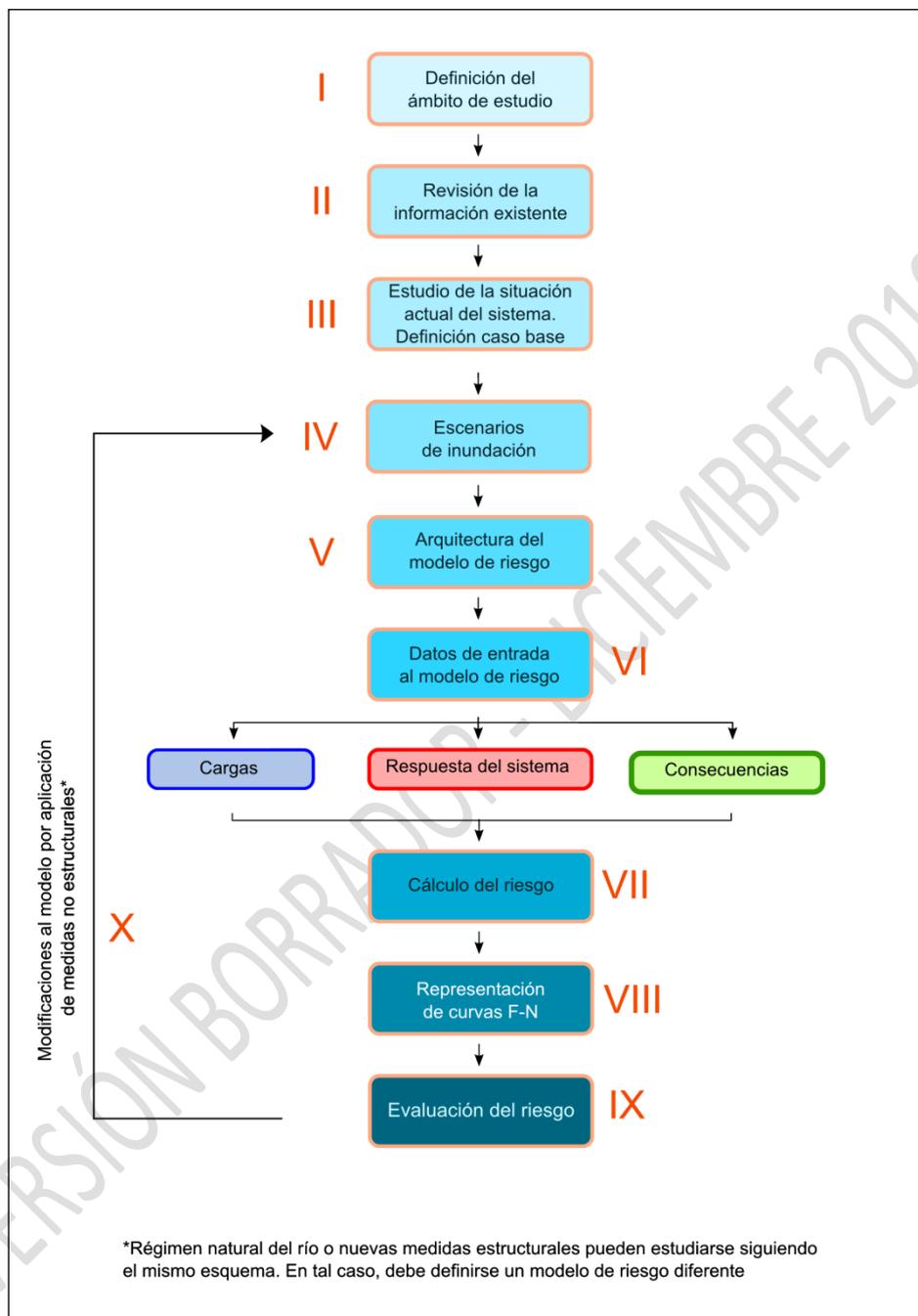


Figura 1.5.6. Fases del proceso de confección y uso de modelos de riesgo para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

1.5.3.3. Descripción de la metodología para el análisis del riesgo de inundación de origen fluvial

En este apartado se describe la metodología a seguir para el análisis del riesgo de inundación en zona urbana para el caso de inundación fluvial. Como apoyo a la descripción del procedimiento se ha elaborado el diagrama A.1 (Apéndice 1)⁵.

A continuación se describe cada una de las fases y su vinculación con el diagrama A.1:

Fase I. Definición del ámbito de estudio.

Debe establecerse el ámbito de estudio (término municipal, núcleo urbano, diversas poblaciones, etc.) y el grado de detalle del mismo, pues condiciona la información necesaria (obtención de datos) y el tiempo requerido para la realización de los cálculos y la construcción del modelo o modelos de riesgo. Para ello deben revisarse los diferentes apartados de la metodología para conocer la información requerida para el cálculo, incluyendo todo lo concerniente a las medidas estructurales y no estructurales existentes.

El nivel de detalle o escala del estudio está relacionado, no solamente con el tamaño del área de estudio, sino también con la adquisición de datos, nivel de recursos necesarios y gestión de los mismos (Tabla 1.5.1).

<i>Escala del estudio</i>	<i>Tamaño del área de estudio</i>	<i>Nivel de gestión</i>	<i>Nivel de detalle</i>	<i>Nivel de recursos necesarios</i>	<i>Nivel de obtención de datos</i>
Macro-escala	Nacional	Políticas de reducción de inundaciones	Bajo	Bajo	Bajo
Meso-escala	Regional	Estrategias a gran escala de reducción de inundaciones	Medio	Medio	Medio
Micro-escala	Local	Medidas individuales de protección	Alto	Alto	Alto

Tabla 1.5.1. Niveles de detalle en función del ámbito de estudio. Adaptado de HR Wallingford Ltd [33]

Establecido el ámbito de estudio debe recopilarse la máxima cantidad de información posible relacionada posteriormente con los cálculos y la arquitectura del modelo de riesgo. Distinguiendo entre:

- **Obtención de datos.** Deben obtenerse los datos correspondientes a población total, datos demográficos, área del núcleo, cartografía, densidad de población, tipologías de edificación, distribución de usos del suelo, mapas topográficos, modelos digitales del terreno, zonas industriales, caracterización hidrológica, modelos hidráulicos anteriores, etc. Deben contemplarse todas aquellas zonas

⁵ Tablas y notas al diagrama se encuentran en las hojas 1B y 1C del Apéndice 1.

que supongan un incremento de la población con respecto a la población residente.

- Trabajo de campo. Conocer las características del área urbana, cauces, estructuras que modifiquen el flujo, etc. Deben tomarse datos de morfología de las secciones transversales más representativas del río, vegetación y estructuras hidráulicas (diques, puentes, pasarelas, azudes, motas, etc.)

Fase II. Revisión de la información existente.

La información disponible condiciona el grado de detalle de los cálculos o simulaciones que puedan realizarse. En función de los datos e información obtenidos durante las fases I y II se definen los siguientes aspectos:

- *Núcleos de estudio:* Número de poblaciones a analizar. En el caso de existir más de una población de estudio, se realiza un modelo de riesgo para cada una, siempre que presenten diferencias considerables (localización con respecto al cauce, tipología, tamaño, etc.). Lo habitual es el análisis de una única población.
- *Categorías de tiempo (TC):* Definición de categorías de tiempo (TC) para capturar variaciones de población.

Puede existir variabilidad poblacional a lo largo del año, ya sea distinguiendo entre día y noche, día de la semana, mes o estación. Deben considerarse eventos especiales que puedan suponer un incremento o descenso notable de la población (festividades, eventos culturales, etc.). Se recomienda capturar todas aquellas fluctuaciones debidas a motivos de trabajo, estudio, periodos vacacionales, segundas residencias, etc.

Por tanto, en función de la variabilidad estacional, diaria, etc. debe establecerse un número 'm' de categorías de tiempo. Una clasificación habitual es la distinción entre verano-día, verano-noche, invierno-día e invierno-noche (donde se distinguen 4 categorías).

El establecimiento de diferentes categorías de tiempo permite la definición de diferentes niveles de población en riesgo, contemplando así la variabilidad diaria, estacional, etc. de la población. Asociadas a estas categorías se establecen diversos niveles de población total (PT) existente en el núcleo urbano para la categoría dada o, bien, niveles de densidad de referencia de la población según categoría de tiempo (se denotan como d_{TC1} , d_{TC2} , ..., d_{TCm}).

- *Categorías de usos del suelo (CU):* Pueden distinguirse distintas zonas dentro de la localidad en función del uso del suelo. Estas zonas se caracterizan por presentar diferentes actividades o usos, asociadas a diferentes valores de densidad de población o valor del suelo. Por simplificación, en núcleos de población en los que la inundación solamente afecte a zonas residenciales, puede establecerse una única categoría.

Fase III. Estudio de la situación actual. Definición del caso base.

Para evaluar la reducción del riesgo de inundación por aplicación de medidas no estructurales debe analizarse en primer lugar la situación actual, definiendo el caso base.

El modelo de riesgo del caso base representa la situación actual de la población, es decir, el conjunto de medidas estructurales que hayan podido alterar el régimen natural del cauce. En el caso de no existir ninguna medida, el caso base se corresponde con el régimen natural del río.

No obstante, cuando se disponga de información al respecto, puede efectuarse el modelo de riesgo del régimen natural como complemento al estudio, para poder comparar el efecto de la existencia de las medidas actuales.

Fase IV. Definición de escenarios de inundación.

Por tanto, se realiza un primer modelo de riesgo para el caso base. El modelo incorpora la consideración de un rango de avenidas (asociadas a una serie de periodos de retorno). Este rango debe ser representativo de todos los potenciales eventos de inundación que puedan presentarse en la población.

Un escenario de inundación puede identificarse mediante un periodo de retorno (y el correspondiente caudal pico del hidrograma, Q_{max}), por una combinación de cargas que determinan el escenario de fallo de la infraestructura de defensa (identificado por un caudal del hidrograma de rotura, Q_{br}) o por el caudal resultante de la laminación de la avenida (Q_{nbr}). En cualquier caso, con independencia del origen del evento de inundación, cada escenario de inundación debe quedar identificado por un caudal de afección en el área de estudio (Q_f).

El modelo de riesgo emplea las variables mencionadas anteriormente para vincular cada escenario de inundación con las probabilidades asociadas y las consecuencias potenciales de cada evento.

La elección de periodos de retorno o escenarios de inundación debe atender a los siguientes criterios (Kates, 1965 [28]):

- En áreas con inundaciones regulares pueden tomarse valores de 20, 50, 100, 250 y 1,000 años.
- En áreas con infraestructuras de protección (diseñadas para periodos de retorno entorno a 75 o 100 años) pueden tomarse valores de 100, 200, 300, 500 y 1,000 años.
- En áreas con grandes infraestructuras de protección (p.e. diques o presas, diseñadas para periodos de retorno de 1,000 años o superior) pueden establecerse valores de 1,000, 1,500, 2,000, 5,000 y 10,000 años.
- En áreas situadas aguas abajo de grandes presas o diques, los escenarios de inundación irán asociados a valores de probabilidad ($1/T$) muy inferiores, pues

los posibles eventos de inundación asociados al fallo o rotura pueden alcanzar valores de probabilidad de 10^{-5} , 10^{-6} , etc.

Además debe considerarse que:

- En el caso de implementar el modelo de riesgo para el régimen natural (por ser el caso base o como complemento al estudio), debe establecerse un rango de periodos de retorno (T), asociado a una serie de hidrogramas en el cauce. La definición de los periodos de retorno aporta los hidrogramas necesarios a utilizar en la modelación hidráulica para conocer los caudales de afección (Q_f) y otras características hidráulicas de la inundación. Por tanto, para una serie de 'p' periodos de retorno se obtienen las características hidráulicas de 'p' escenarios de inundación. La estimación de consecuencias para estos escenarios de inundación se incluye como input al modelo para el cálculo del riesgo tanto social como económico.
- Si el caso base incluye la existencia de medidas estructurales, deben establecerse escenarios de inundación asociados al fallo de la infraestructura y a la laminación de la avenida. Por ejemplo, la existencia de una presa aguas arriba supone la simulación hidráulica del cauce para casos de rotura y no rotura de la misma: caudales en rotura (Q_{br}) y caudales laminados (Q_{nbr}). Por tanto, se obtienen las características hidráulicas de estos escenarios de inundación (rotura y no rotura) para la estimación de inputs al modelo.

Fase V. Arquitectura del modelo de riesgo.

Con independencia del modelo considerado para la situación existente (ya sea régimen natural o con medidas estructurales), pueden distinguirse tres partes en el diagrama de influencia para la arquitectura del modelo de riesgo:

- *Cargas (Bloque inicial)*. Nodos del diagrama de influencia que recogen las solicitaciones o cargas. Contienen la información referente a periodos de retorno de las avenidas de estudio y probabilidades de excedencia. En caso de incorporar la existencia de infraestructuras de defensa (p.e. presa o dique), incluye niveles previos, operatividad de compuertas, laminación de caudales, etc.
- *Respuesta del sistema (Bloque intermedio)*. Nodos que incluyen la respuesta del sistema. Estos nodos incorporan los pasos del diagrama para la obtención de las probabilidades asociadas a los caudales de afección al núcleo de estudio (bien caudal máximo de afección por la avenida en régimen natural, caudal laminado por la infraestructura de protección o caudal máximo por rotura en función de los diferentes modos de fallo considerados, etc.) en función de las solicitaciones consideradas (hidrogramas, niveles máximos de embalse, etc.).

- *Consecuencias (Bloque final)*. Nodos de consecuencias. Estos nodos incorporan la información relativa a la vulnerabilidad de la población frente a los escenarios de inundación establecidos (en vidas humanas y costes económicos) vinculados a los caudales de afección en el núcleo. Los nodos se asocian a listados que relacionan los caudales de avenida con los valores de vulnerabilidad obtenidos.

Combinando los nodos pertenecientes a los tres bloques anteriores, el modelo de riesgo genera los resultados en riesgo social y económico para representar las curvas F-N y F-D que permiten la evaluación del riesgo y la comparación de alternativas. El Apéndice 7 incluye ejemplos tipo de modelos de riesgo⁶.

Fase VI. Datos de entrada al modelo de riesgo.

Una vez se define la arquitectura del modelo, deben efectuarse una serie de cálculos previos para obtener los inputs necesarios para la ejecución del mismo.

Los datos de entrada al modelo de riesgo se organizan siguiendo la estructura descrita anteriormente: cargas, respuesta del sistema y consecuencias.

a) Cargas

La información necesaria para el modelo en los nodos de la parte de *cargas* se corresponde con los datos procedentes del estudio hidrológico. El estudio aporta los datos concernientes a periodos de retorno, probabilidades de excedencia, caudales pico de los hidrogramas, etc.

Por tanto, el *estudio hidrológico* se centra en la determinación de los caudales de avenida asociados a los escenarios de inundación establecidos en la Fase IV. Para ello pueden emplearse paquetes informáticos como HEC-HMS (HEC- Hydrologic Modeling System).

En el caso de estudiar el modelo del régimen natural del río, los hidrogramas deben llegar a probabilidades anuales de excedencia ($f=1/T$) del orden de al menos 10^{-5} en caso de existir infraestructura de protección, para poder comparar resultados del caso base y del régimen natural.

Para casos base en los que exista presa aguas arriba deben estudiarse los hidrogramas de entrada al embalse, niveles previos, curvas de gasto, etc. para obtener los niveles alcanzados en el embalse para cada escenario de inundación y la serie de caudales laminados, además de los hidrogramas de rotura.

⁶ En el manual del software iPresas (UPV, 2010) [45] puede encontrarse la descripción detallada del modelo de riesgo de una presa con dos modos de fallo en escenario hidrológico.

b) Respuesta del sistema

Para casos base⁷ en los que existen infraestructuras de laminación o defensa (p.e. presa, diques, encauzamientos, etc.), los nodos del modelo correspondientes a la respuesta del sistema deben capturar los posibles modos de fallo, las probabilidades de fallo asociadas a los mismos, así como los caudales de rotura y no rotura resultantes (Bramer, 2010 [7]).

Por tanto, deben realizarse dos series de simulaciones hidráulicas que engloben el rango de todos los eventos de inundación posibles: simulaciones sin rotura y con rotura de la infraestructura existente.

Simulación hidráulica

La simulación hidráulica permite la obtención de las características de los escenarios de inundación establecidos.

En la Tabla 1.5.2 se muestran algunas de las variables relevantes para la caracterización de cada escenario de inundación.

<i>Variable</i>	<i>Relevancia</i>
Áreas inundadas (A_f)	Determinación de las zonas de afección.
Calado (H)	Indicador de la magnitud de la inundación, principalmente para la estimación de daños.
Velocidad (v)	Indicador de la magnitud de la inundación, principalmente para la estimación de daños.
Ratio de incremento	Relación calado-tiempo. Significativo en cuanto a tiempos de aviso.
Desarrollo del hidrograma de llegada	Significativo en cuanto a tiempos de aviso e intervalos entre caudales de alerta y caudales de afección.

Tabla 1.5.2. Variables de relevancia para la caracterización de la inundación.

La estimación de calados y velocidades mediante simulación hidráulica puede resultar costosa, especialmente en estudios de ámbito regional. A continuación se incluyen posibles enfoques al respecto:

- *Utilización de mapas de inundación e información topográfica.* Este tipo de información puede emplearse para estimar calados pero no aportan

⁷ La realización de un modelo hidráulico para el régimen natural emplea datos geométricos y de flujo sin la existencia de medidas estructurales (es decir, el modelo digital del terreno del cauce sin incorporar infraestructuras).

información sobre velocidades. Pueden obtenerse velocidades máximas basadas en cálculos hidráulicos simplificados o juicio de experto.

- *Modelos 1D* (p.e. HEC-RAS o MIKE11). Pueden obtenerse valores de calado y velocidad (en promedio).
- *Modelos 2D*. Permiten obtener información detallada de calado y velocidad, pero requieren de la definición de numerosos parámetros e información para caracterizar el área de estudio.

Deben obtenerse, como mínimo, los siguientes datos de la simulación:

- *Caudal de identificación de la avenida*. Caudal pico del hidrograma en régimen natural, caudal laminado o caudal máximo del hidrograma de rotura asociado a la avenida (definidos como Q_{max} , Q_{nbt} y Q_{br}).
- *Caudal máximo de afección (Q_f)*. Caudal máximo que llega al punto de estudio (población).
- *Calados de afección (H)*. Calados máximos alcanzados en la población, diferencia de cota entre el terreno y la lámina de agua.
- *Velocidad (v)*. Velocidades alcanzadas por la onda de avenida en la población.
- *Área de afección total (A_f)*. Área máxima inundada por la avenida dentro del área del núcleo de estudio. Obtenida a partir de los mapas de inundación para cada simulación.
- *Área de afección por categoría del uso del suelo ($A_{f,i}$)*. Área inundada por la avenida para cada una de las categorías del uso del suelo establecidas (CU).
- *Ancho máximo (w_{df})*. Considerando sección triangular para las características de la avenida dado el caudal máximo de afección (Q_f , v , H).
- *Tiempo de llegada de la onda (T_{ww})*. En caso de simulaciones en rotura.

Para escenarios de inundación sin fallo de la infraestructura o en régimen natural:

- *Caudal de alerta (Q_1)*⁸. Caudal para el que se alcanza la capacidad máxima del cauce.
- *Caudal de afección (Q_2)*. Caudal para el que se producen las primeras afecciones a edificaciones o viviendas.

⁸ No aplicable para casos en rotura.

- *Tiempo de llegada del caudal de alerta (t_{Q1})*. Tiempo que transcurre desde el punto en el que se inicia la onda de avenida y se alcanza el caudal de alerta (Q_1) en el cauce a la altura de la población de estudio.

- *Tiempo de llegada del caudal de afección (t_{Q2})*. Tiempo que transcurre desde el punto en el que se inicia la onda de avenida y se alcanza en el caudal de afección (Q_2).

c) Consecuencias

Debe analizarse la vulnerabilidad del área de estudio frente a inundaciones de origen fluvial para la estimación de datos de entrada al modelo en relación a las consecuencias potenciales de los escenarios de inundación establecidos.

Los valores estimados de pérdida de vidas y pérdidas económicas para cada escenario de inundación sirven de datos de entrada para el modelo de riesgo.

c.1. Pérdida de vidas

La parte de la metodología consistente en la determinación de la pérdida de vidas por *inundación fluvial* se basa en el informe DSO-99-06 publicado por Graham en 1999 [22], considerando otros aspectos adicionales: entendimiento de la población, correcciones en la población en riesgo por posibilidad de encontrar refugio, distinción entre día y noche, entre otras. La determinación de tasas de mortalidad depende de la severidad de la inundación (definida a partir de un parámetro de cálculo, DV, función del caudal de afección, Q_{af} , y el ancho del área inundada, b), del tiempo de aviso a la población (TW), del tipo de rotura de la presa (si existe) y de la categoría de tiempo considerada (día/noche).

Por tanto, la metodología SUFRI propone una combinación del método estadístico recogido en el DSO-99-06 junto con otros factores desarrollados por separado, basados en el caso de estudio correspondiente. Presenta la posibilidad de incluir la consideración de diferentes estadios de sistemas de aviso y de las actuaciones de los servicios de emergencia, autoridades y gestores de infraestructuras para contemplar los efectos en la reducción del riesgo.

Se establecen diez categorías (C1 a C10) para la definición de tasas de mortalidad de referencia (RFR) que atienden a los mismos rangos propuestos por Graham en 1999, capturando los diferentes estadios que pueden darse en cada núcleo de población de estudio (existencia o no de Plan de Emergencia, formación a la población, coordinación, eventos de inundación previos, comunicación efectiva, simulacros, etc.). De este modo, diferentes niveles de aviso y preparación dan lugar a tasas de mortalidad de referencia inferiores atendiendo a una mejor capacidad de gestión y actuación durante el evento de inundación.

La clasificación propuesta en la metodología SUFRI distingue seis niveles del tiempo de aviso para la definición de tasas de referencia: tiempo de aviso cero (no hay posibilidad de aviso), y tiempos de aviso de 0.25, 0.625, 1, 1.5 y 24 horas (siguiendo criterios adicionales procedentes del USBR [8] o del propio DSO-99-06 [22]).

A continuación se describe por pasos el cálculo para la estimación de inputs de consecuencias al modelo de riesgo. Las ecuaciones empleadas en el método son sencillas, recomendando la utilización de plantillas-tipo en Excel⁹ para la realización de los cálculos.

c.1.1. Definición de la categoría para la obtención de tasas de mortalidad de referencia

La definición de las tasas de mortalidad se basa en el método establecido por Graham en 1999 [22], basado en datos empíricos obtenidos de registros históricos de eventos de fallo de presas en EE.UU.

Se definen en esta metodología un total de diez categorías (C1 a C10) en función de la formación a la población, la implantación o no del Plan de Emergencia de la Presa, la existencia de coordinación entre servicios de emergencia y autoridades y la existencia de medios de comunicación. La Tabla 1.5.3 recoge la clasificación de categorías para el cálculo de pérdida de vidas asociada a eventos de inundación fluvial.

Cada categoría tiene asociada una serie de valores de referencia para las tasas de mortalidad (denotadas como RFR), atendiendo a tres niveles de severidad de la inundación y seis valores del tiempo de aviso (Apéndice 2, Tabla A.2.1).

El núcleo urbano de estudio se encuentra dentro de una categoría u otra en función del escenario de estudio considerado (caso base o situaciones con medidas no estructurales). Es decir, un núcleo urbano puede encontrarse en diferentes categorías en función del escenario que se quiera estudiar: actual, anterior a las medidas existentes o futuro.

⁹ El Apéndice 6 incluye plantillas para los cálculos de estimación de pérdida de vidas por inundación fluvial.

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
C1	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - No se dispone de sistemas de aviso ni PEP. - No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - No existen medios de comunicación a la población.
C2	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - No se dispone de PEP, aunque existen otros sistemas de aviso. - No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - No existen medios de comunicación a la población.
C3	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - Existe PEP, pero no se ha implantado. - Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades (no existen protocolos). - No existen medios de comunicación a la población.
C4	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes. - Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades, protocolos de comunicación. - No existen medios de comunicación a la población.
C5	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población (sin comprobar).
C6	<ul style="list-style-type: none"> - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.
C7	<ul style="list-style-type: none"> - Formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados. <p><i>***Si se produce rotura instantánea en 'C8', 'C9' y 'C10'.¹⁰</i></p>
C8	<ul style="list-style-type: none"> - Formación a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.
C9	<ul style="list-style-type: none"> - Formación a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.
C10	<ul style="list-style-type: none"> - Planes de formación continua a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.

Tabla 1.5.3. Clasificación para el establecimiento de tasas de mortalidad en inundación fluvial.

¹⁰ Se recomienda considerar categoría C7 en lugar de 'C8', 'C9' o 'C10' en aquellos casos en los que se produzca una inundación como consecuencia de rotura de una infraestructura de defensa de forma instantánea (sin escenario hidrológico).

c.1.2. Cálculo de la población en riesgo

La población en riesgo (PR) viene dada como la fracción equivalente de la población total (PT) según la relación existente entre la superficie del núcleo urbano afectada por la inundación (A_F) en comparación con la superficie total del mismo (A_T). También puede obtenerse como el producto del área de afección (A_F) y la densidad de población del núcleo (d).

La densidad de población a emplear debe corregirse en aquellas poblaciones en las que la tipología de edificación presente una altura media de varias plantas¹¹, obteniendo una densidad de cálculo, d_c .

Debe obtenerse el valor de población en riesgo para cada escenario de inundación y categoría de tiempo (definidas en la fase II). En general, para un caso de estudio con p escenarios de inundación y m categorías de tiempo, se obtiene una matriz de $p \cdot m$ valores de población en riesgo en función de los p escenarios de inundación estudiados y m categorías de tiempo.

En el caso de realizar una clasificación de usos del suelo, distinguiendo n categorías CU (véase fase II), pueden asociarse diferentes valores de densidad de población según el uso del suelo dentro del área de afección de cada categoría ($A_{f,i}$) (p.e. zona residencial frente a zona industrial), de modo que:

$$PR = \sum_{i=1}^n PR_i = \sum_{i=1}^n d_i \cdot A_{f,i} \quad (\text{ec.1})$$

donde PR indica población en riesgo, n es el número establecido de categorías CU, d es la densidad de población, $A_{f,i}$ es el área inundada de cada categoría de uso del suelo.

Si no existen datos de densidad de población por uso del suelo, puede emplearse la siguiente ecuación:

$$PR = \sum_{i=1}^n PR_i = \sum_{i=1}^n PT_i \cdot \frac{A_{f,i}}{A_{T,i}} \quad (\text{ec.2})$$

donde n es el número establecido de categorías CU, d es la densidad de población, $A_{T,i}$ es el área y PT es la población total de cada categoría.

La Tabla 1.5.4 recoge un ejemplo de distribución de los cálculos de población en riesgo en función del escenario de inundación (identificado por el caudal de afección, Q_f), la categoría de tiempo (TC) y la categoría de uso del suelo (CU, asociada a diferentes valores de densidad de población).

¹¹ En el Apéndice 1 se define como densidad de cálculo (d_c) la densidad de población corregida en función de la altura media de los edificios del municipio.

Q_f	TC_1				TC_k				TC_m			
	CU_1	CU_j	...	CU_n	CU_1	CU_j	...	CU_n	CU_1	CU_j	...	CU_n
$Q_{f,1}$	PR_{111}											
$Q_{f,i}$					PR_{ikj}							
...												
$Q_{f,p}$									PR_{pnm}			

Tabla 1.5.4. Ejemplo de distribución para el cálculo de población en riesgo.

c.1.3. Obtención de tiempos de aviso

Para la definición de las tasas de mortalidad a partir de las tasas de referencia dadas por la categoría de la población (C) deben estimarse los tiempos de aviso para cada escenario de inundación.

Para casos base con existencia de presa aguas arriba, el tiempo de aviso a la población depende de diversos factores:

- Tiempo de desarrollo de la brecha (TBR).
- Modo de fallo de la presa. Distinguiendo entre escenario sísmico, erosión interna o escenario hidrológico (Factor Modo de Fallo, FMF).
- Tiempo de llegada de la onda de avenida (T_{wv}).
- Existencia de Plan de Emergencia de la Presa.
- Momento del día. Según se considere día o noche. Se define un valor del tiempo de aviso para categorías de tiempo incluyendo 'día' y un valor reducido en 0.25 horas (15 minutos) para categorías de tiempo que contemplen situación 'noche'.

Para escenarios de inundación referentes a eventos sin fallo de las infraestructuras de defensa o en casos en los que las consideraciones anteriores no pueden aplicarse (p.e. régimen natural del río), se define el tiempo de aviso como la diferencia de tiempo entre los tiempos del caudal de alerta y el caudal de afección (denotado como TD). Esta diferencia de tiempo corresponde con el intervalo de tiempo desde que se alcanza la capacidad del cauce hasta que la inundación afecta a las primeras edificaciones o viviendas.

En el Apéndice 1 se incluye una tabla de apoyo al cálculo del tiempo de aviso (Tabla A.1.4).

c.1.4. Definición de la severidad de la inundación

Para la definición del grado de severidad de la inundación pueden distinguirse tres niveles:

- *Severidad Baja.* En caso en los que no se prevean daños estructurales en edificios ni en cimentación.
- *Severidad Media.* En casos de inundación en los que pueden producirse importantes daños estructurales, pero no se espera una destrucción total del área.
- *Severidad Alta.* Zonas devastadas por la inundación en los instantes posteriores al fallo de una infraestructura de defensa, o áreas que resultan totalmente destruidas por la inundación (p.e. zonas de acampada).

Según Graham [22], el grado de severidad del escenario de inundación (S_v) se obtiene en función del caudal máximo alcanzado por la avenida en el lugar de estudio (Q_f) en comparación con el caudal medio del río ($Q_{2.33}$) y el ancho alcanzado por la inundación (w_{df}). El parámetro DV (ec. 3) define los tres niveles de severidad a considerar (baja, media y alta), donde DV es:

$$DV = \frac{Q_{af} - Q_{2.33}}{b} \quad (\text{ec. 3})$$

Se establece un nivel de severidad baja para valores de DV inferiores a $4.6 \text{ m}^2/\text{s}$, y severidad media para valores superiores. El nivel de severidad alta sólo es aplicable a zonas situadas en las proximidades de la presa¹².

c.1.5. Estimación de tasas de mortalidad

Una vez se conoce el grado de severidad de cada escenario de inundación considerado, la estimación de las tasas de mortalidad (FR) se realiza en función del tiempo de aviso (distinguiendo día y noche) de cada escenario de inundación, por interpolación de los valores de referencia (RFR) asociados a la categoría 'C' asignada a la población (donde las tasas de referencia se establecen para tiempos de aviso de 0, 0.25, 0.625, 1, 1.5 y 24 horas).

c.1.6. Cálculo del número de víctimas potenciales

El número de víctimas potencial se obtiene del producto de la población en riesgo (PR) existente en el área de afección y la tasa de mortalidad establecida (FR).

Para cada escenario de inundación (asociado a un periodo de retorno o a un caudal máximo del hidrograma, Q_{max}) y categoría de tiempo (TC) debe obtenerse el número

¹² La tabla A.1.2. del Apéndice 1 detalla la definición de la severidad de la inundación.

potencial de víctimas para cada zona identificada por uso del suelo. Por tanto, si se identifican diversos usos del suelo, debe obtenerse el número de víctimas para cada subárea (N_i).

$$N(Q_{\max}, TC) = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n PR(Q_{\max}, TC)_i \cdot TR(Q_{\max}, TC)_i \quad (\text{ec. 4})$$

donde n es el número de categorías de uso del suelo establecidas.

Por tanto, dadas m categorías de tiempo y p escenarios de inundación, existen $m \cdot p$ estimaciones del número potencial de víctimas. Los $m \cdot p$ valores de víctimas potenciales se integran al modelo de riesgo dentro de un listado de datps de entrada (generalmente, un archivo Excel).

La Tabla 1.5.5 incorpora un ejemplo del listado necesario para incorporar datos de consecuencias al modelo de riesgo. Se establece cada categoría de tiempo (TC) y escenario de inundación (definido, por ejemplo, por un caudal pico del hidrograma, Q_{\max}), junto con el nivel de consecuencias potenciales estimado.

	Q	N
TC ₁	$Q_{\max,1}$	N_{11}
...	$Q_{\max,2}$	N_{12}
...
TC ₁	$Q_{\max,p}$	N_{1p}
TC _i	$Q_{\max,1}$	N_{i1}
...	$Q_{\max,2}$	N_{i2}
...
TC _i	$Q_{\max,p}$	N_{ip}
TC _m	$Q_{\max,1}$	N_{m1}
...	$Q_{\max,2}$	N_{m2}
...
TC _m	$Q_{\max,p}$	N_{mp}

Tabla 1.5.5. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Pérdida de vidas.

La Figura 1.5.7 muestra un esquema resumen del proceso para la obtención de datos de entrada al modelo en términos de pérdida potencial de vidas.

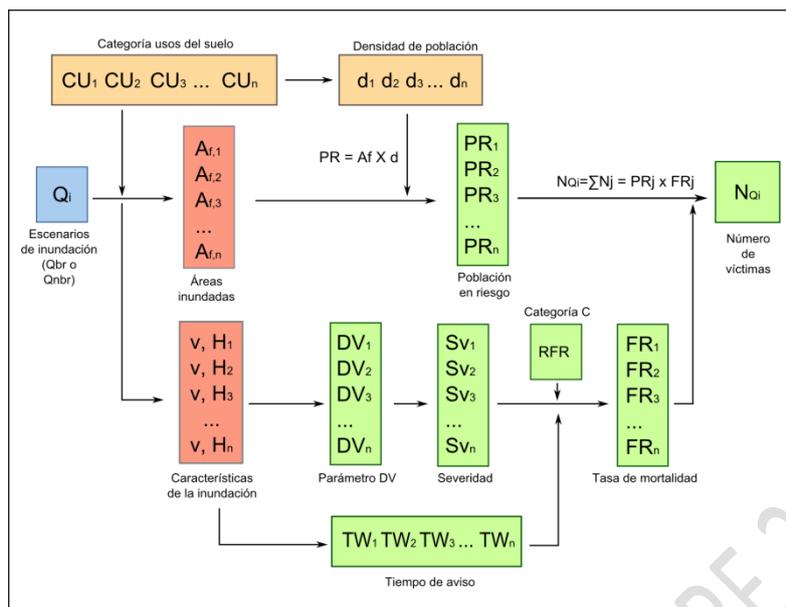


Figura 1.5.7. Variables intervinientes en la obtención de inputs en términos de consecuencias en pérdida de vidas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado para la metodología SUFRI)

c.2. Pérdidas económicas

La metodología SUFRI considera pérdidas económicas aquellas asociadas a daños materiales en el área de afección (es decir, costes directos e indirectos de la inundación). Por tanto, el riesgo económico por inundación no incluye la pérdida de vidas, considerándose ésta una variable intangible (no obstante, existen publicaciones en las que se analiza el coste económico de la pérdida de vidas por inundación).

A la hora de estimar las consecuencias económicas de una inundación en zona urbana pueden considerarse diferentes factores como el calado de afección (H), velocidad del agua (v), duración del evento de inundación, etc. (PATRICOVA, 2002 [11]).

Un análisis económico detallado incluye todos los factores anteriores. Dada la dificultad que supone obtener las variables asociadas a todos ellos, en esta metodología se recomienda la estimación de daños en función del calado de afección (H).

A continuación se presenta el método de evaluación de consecuencias económicas propuesto en este documento, cuyo esquema se muestra en la Figura 1.5.8 (integrado en el Apéndice 1, diagrama A.1).



Figura 1.5.8. Diagrama de flujo para la obtención de inputs para la estimación de consecuencias económicas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

Los pasos a seguir para la obtención de la información necesaria para el modelo para el cálculo del riesgo económico son:

c.2.1. Identificación de categorías de afección para los usos del suelo existentes

En primer lugar debe efectuarse un listado de afecciones del núcleo urbano de estudio, incluyendo todos aquellos sectores o elementos susceptibles de sufrir daños materiales o pérdidas económicas. Por ejemplo, zonas residenciales, zonas industriales, zonas agrícolas (rural), equipamientos (zonas deportivas, ocio, parques, etc.), otros equipamientos o servicios (hospitales, clínicas,...), complejos educacionales (colegios, institutos, universidades, etc.), patrimonio histórico-cultural (iglesias, museos, monumentos, lugares de interés, etc.), etc.

Se debe definir, por tanto, una clasificación de las diferentes categorías de usos del suelo en el núcleo (CU), incluyendo aquellas edificaciones que requieran especial atención (importancia económica, elevado número de ocupantes, etc.).

Esta clasificación puede coincidir con la clasificación realizada para la definición de la población en riesgo en el apartado de 'pérdida de vidas' (siempre que las categorías establecidas se correspondan con usos del suelo claramente diferenciados). De este modo, puede utilizarse la misma clasificación tanto para la definición de las densidades de población como para el establecimiento de costes de referencia.

Como ejemplo, se propone la siguiente clasificación:

- CU₁. Zonas residenciales
- CU₂. Zonas industriales y comerciales
- CU₃. Equipamientos
- CU₄. Zonas de acampada
- CU₅. Zonas agrícolas
- CU₆. Infraestructuras y vías de comunicación (calles, carreteras locales, autonómicas, nacionales, vías de acceso, etc.)

Cada una de estas categorías se relaciona con un coste o valor económico de referencia.

c.2.2. Definición del coste de referencia

Una vez clasificados los diferentes usos del suelo o afecciones potenciales, debe establecerse un coste de referencia (CR) por metro cuadrado (en aquellas afecciones que se identifiquen con una superficie total, como son zonas residenciales, industriales, agrícolas...) o bien un coste de referencia fijo (para aquellas afecciones de carácter individual como, por ejemplo, edificaciones históricas o aquellos elementos de los que se conoce el valor económico total). Este coste refleja la pérdida económica que supone la destrucción total de la afección.

Para el establecimiento del coste de referencia deben emplearse índices de precios correspondientes al país o región de la población de estudio, o bien pueden utilizarse las directrices recogidas por otras normativas internacionales, corrigiendo los valores en función de indicadores económicos nacionales como el PIB (Producto Interior Bruto), el nivel de renta per cápita, etc.

Como ejemplo, se hace referencia en este punto a dos normativas publicadas en España: el “*Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*” de 2002 [11], normativa ampliamente empleada dentro del marco normativo vigente en España en materia de riesgo de inundación para la estimación de consecuencias en zonas urbanas; y el “*Plan Especial de Emergencias por Inundación (INUNCAT)*” [1], publicado por la Agencia Catalana del Agua (ACA) en 2009. Estas normativas sugieren ratios en €/m² en función del grado de densidad de la zona urbana y los usos del suelo. Se recoge un resumen en el Apéndice 5.

Por tanto, se establece, bien, un ratio (€/m²) o un valor total (€) para cada una de las clasificaciones o identificaciones efectuadas (en caso de existir seis categorías de usos del suelo, CU₁ a CU₆, se obtienen seis valores de costes de referencia CR₁ a CR₆).

c.2.3. Porcentaje de daños

Para cada una de las avenidas debe identificarse la superficie de las áreas inundadas para cada categoría ‘CU’ (residencial, industrial, etc.). Por tanto, se dispone de una lista de áreas afectadas (A_{f,1} a A_{f,6}) para cada escenario de inundación, cada una de ellas asociada a un coste referencia.

En general, el porcentaje de daños alcanzado (PD) se estima en función de la severidad de la inundación, tomando como referente el nivel alcanzado por el agua (calado de afección) en el área inundada. En la bibliografía existen multitud de curvas calado-daños que aportan el porcentaje de daños en función del nivel alcanzado por la lámina de agua (Apéndice 5).

c.2.4. Estimación de costes directos, indirectos y totales

Los costes directos (CD) de cada escenario de inundación (incluyendo tanto las pérdidas de beneficio del primer año posterior al evento de inundación, como los costes de recuperación y reposición) se obtienen de la aplicación del coste de referencia (CR) y el porcentaje de daños estimado (PD) a cada una de las afecciones (definidas por superficie inundada (A_f) o como afecciones individuales).

$$CD_i = A_{f,i} \cdot PD_i \cdot CR_i \quad (\text{ec. 5})$$

donde el subíndice *i* indica cada una de las categorías CU de usos del suelo establecidas.

Obtenidos los costes directos para cada afección definida en el apartado c.2.1 se calcula el coste directo total como la suma de los anteriores.

Por tanto, dadas n categorías, el coste directo total asociado al escenario de inundación considerado resulta:

$$CD_T = \sum_{i=1}^n CD_i \quad (\text{ec. 6})$$

En cuanto al cálculo de costes directos, en escenarios de inundación asociados al fallo de la infraestructura de defensa, debe incluirse el coste de reconstrucción de la misma. En la metodología SUFRI se recomienda la estimación de este coste como el valor actual del coste de construcción de la infraestructura, mediante índices de precios o índices económicos, como los valores propuestos por el USBR [8], basados en proyectos de presas desde 1977. En el caso de infraestructuras construidas hace varias décadas, se recomienda el cálculo del coste de construcción actual de una infraestructura de características similares. Como estimación preliminar, en el caso de presas, Ekstrand [16] propone el cálculo de dicho coste en función de la capacidad del embalse, como:

$$CRc = 17.606 + 0.13965 \cdot KAF \quad (\text{ec. 7})$$

donde CRc indica el coste de reconstrucción ($\cdot 10^6$ dólares) y KAF es la capacidad del embalse en pies-acre ($\cdot 10^3$).

En lo referente al cálculo de costes indirectos (incluyendo conceptos como la pérdida de puestos de trabajo debido a la inundación, reducción de capital, restricciones al abastecimiento, disminución del turismo, etc.), éste supone un proceso de estimación complejo pues depende de numerosos factores. Los costes indirectos son efectos difíciles de cuantificar y que sólo se incorporan de forma detallada en casos justificados (tales como zonas urbanas de gran relevancia a nivel regional o estatal, existencia de importantes infraestructuras de transporte, industria, etc.). Por ejemplo, un análisis detallado de los costes indirectos puede resultar necesario en los siguientes casos:

- Inundaciones de larga duración (varias semanas).
- Afección a proporciones elevadas de áreas de interés (región, país).
- Impactos en industria o servicios altamente especializados.
- Afección a puntos nodales de la red de comunicaciones (transporte, energía, información).
- Bajos niveles de stock (escasez de recursos).

En la metodología SUFRI se propone, para el cálculo de los costes indirectos (CI), la adopción de un porcentaje de los costes directos, estableciendo un factor f_c , que en algunas normativas se define en el rango del 0% al 55% de los costes directos (f_c varía entre 0 y 0.55 según PATRICOVA, 2002 [11]), en función de la relevancia de la zona de estudio y la existencia de grandes centros de negocios, infraestructuras de transporte, aeropuertos, etc.

Por tanto:

$$CI_T = f_c \cdot CD_T \quad (\text{ec. 8})$$

Por último, los costes totales de cada escenario de inundación se obtienen de la suma de los costes directos e indirectos, como:

$$CT = CD + CI = (1 + f_c) \cdot CD_T \quad (\text{ec. 9})$$

Por tanto, dados p escenarios de inundación existen p valores de costes totales asociados, que sirven como datos de entrada al modelo de riesgo en los nodos para el cálculo de consecuencias.

La Tabla 1.5.6 incluye un ejemplo del listado a incorporar al modelo de riesgo con datos de consecuencias económicas. Se establece cada escenario de inundación (definido, por ejemplo, por un caudal pico del hidrograma, Q_{\max}), junto con el nivel de pérdidas económicas potenciales estimado (CT).

Tabla 1.

Q	CT
$Q_{\max,1}$	CT_1
$Q_{\max,2}$	CT_2
...	...
$Q_{\max,p}$	CT_p

Tabla 1.5.6. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Costes económicos.

Como resumen, la Figura 1.5.9 muestra un esquema del proceso de obtención de inputs de entrada al modelo en consecuencias económicas.

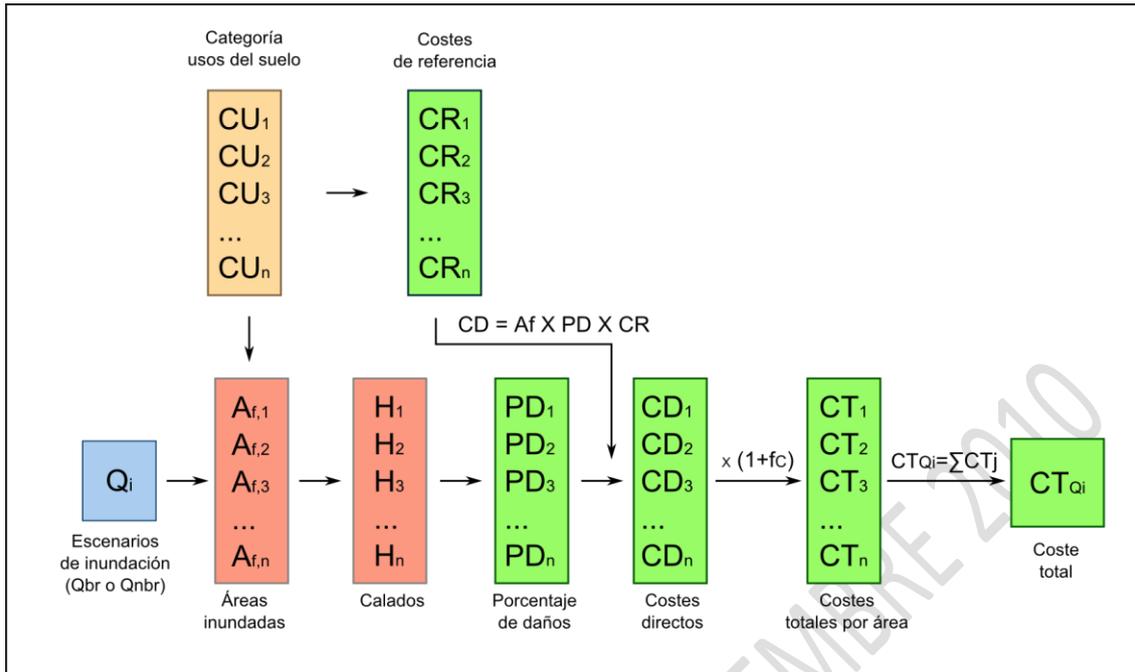


Figura 1.5.9. Variables intervinientes en la obtención de inputs en términos de consecuencias económicas. Inundación fluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

Fase VII. Cálculo del riesgo.

Una vez incluida toda la información necesaria en los nodos del modelo de riesgo, el método de cálculo establecido o la herramienta informática para el cálculo computacional del riesgo debe combinar probabilidad y consecuencias de todos los escenarios planteados. De este modo, se obtienen los resultados en riesgo social y económico representativos del caso base.

Como ejemplo, el software iPresas permite extraer diferentes resultados del modelo de riesgo (número total de ramas del árbol de eventos, resultados en función de variables de entrada, probabilidad anual de rotura de la infraestructura u obra de protección –si existe–, probabilidades condicionales según modos de fallo, etc.), de entre los cuales se consideran especialmente aquellos relacionados con el resultado del cálculo en términos de pérdida potencial de vidas humanas (riesgo social) y pérdidas económicas (riesgo económico).

Fase VIII. Representación de curvas F-N.

Por una parte, el riesgo social existente en el caso-base viene representado por el número de pérdida de vidas en caso de inundación (vidas por año). En cambio, si se consideran las pérdidas económicas por inundación, en dicho caso, se obtiene el riesgo económico asociada al caso-base (euros por año).

Del modelo de riesgo establecido, pueden extraerse los resultados correspondientes a las probabilidades anuales de excedencia (f) de cada nivel de pérdida de vidas (N) o pérdidas económicas (euros) de cada rama que compone el árbol de eventos representativo del caso-base. Estos valores (f - N o f - €) se representan en curvas F- N y F- D tras obtener la probabilidad anual acumulada de excedencia (F) de cada nivel de consecuencias.

La representación de curvas F- N y F- D permite la evaluación del riesgo existente para el caso-base y permite la comparación con otros escenarios con aplicación de nuevas medidas estructurales y/o no estructurales.

La Figura 1.5.10 muestra un ejemplo de curva F- N genérica.

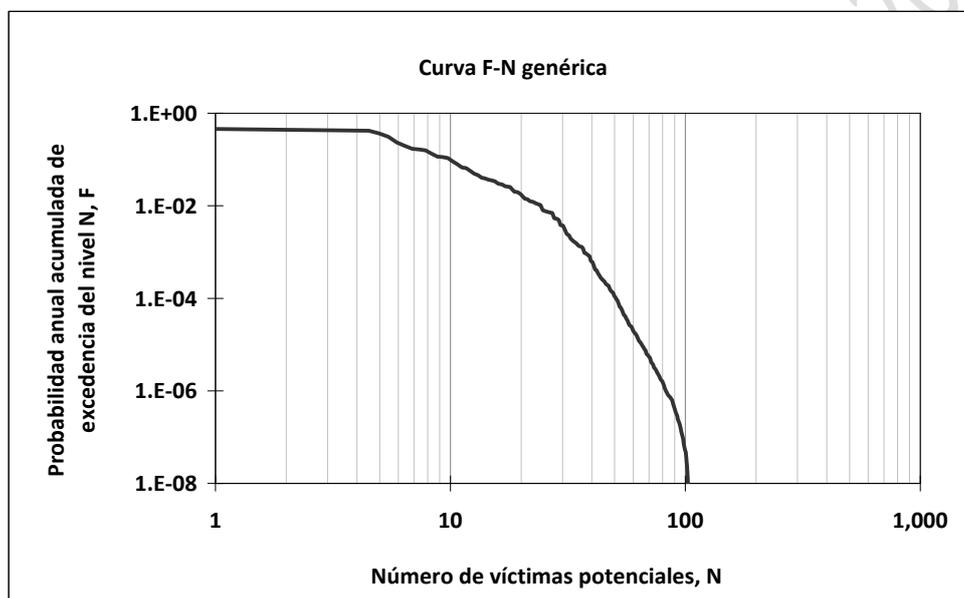


Figura 1.5.10. Ejemplo de curva F- N .

Fase IX. Evaluación del riesgo.

Esta fase se corresponde con la evaluación del riesgo por comparación de los resultados obtenidos para el caso base con límites de tolerabilidad o criterios de riesgo existentes. El Apéndice 8 incluye referencias a criterios de riesgo existentes para la consideración del riesgo social.

Fase X. Incorporación y análisis del efecto de medidas no estructurales.

Una vez evaluado el caso base, se definen diferentes alternativas para el análisis del efecto en reducción del riesgo de medidas no estructurales (sistemas de aviso, formación a la población, instalación de barreras de protección, etc.).

Cada medida no estructural (o conjunto de ellas) modifica la vulnerabilidad del área de estudio en caso de inundación. Las características de cada escenario de inundación

considerado no varían, pero las consecuencias potenciales deben evaluarse de nuevo, considerando la existencia de dichas medidas.

El modelo de riesgo del caso base sirve de apoyo al análisis de estas medidas, empleando las mismas cargas y respuesta del sistema para el modelo (pues las medidas no estructurales no modifican los resultados obtenidos de los estudios hidrológicos e hidráulicos). Las medidas no estructurales están asociadas a nuevos datos de entrada al modelo de riesgo en la información concerniente a la vulnerabilidad de la población (pérdida de vidas y costes económicos).

Por tanto, la fase X consiste en la reevaluación del caso-base, desde la fase IV hasta la fase IX (Figura 1.5.6), analizando todas las posibles variaciones en las variables intervinientes en la estimación de datos de entrada al modelo. De esta forma, se recalcula el modelo para obtener resultados asociadas al nuevo escenario de estudio (con medidas no estructurales) y permitir la representación de curvas F-N y F-D para la comparación con el caso-base.

El apartado 1.5.3.5 incluye las modificaciones a realizar al modelo de riesgo para el análisis del efecto de medidas no estructurales en inundación fluvial.

Para finalizar esta sección, la Tabla 1.5.7 resume las fases planteadas y ejemplos de la información requerida para cada una de ellas (en función del caso de estudio, puede requerirse información adicional).

<i>Fase</i>	<i>Descripción</i>	<i>Información necesaria</i>
<i>I</i>	Definición del ámbito de estudio	Tamaño e importancia de la población. Tiempo y recursos disponibles para el estudio.
<i>II</i>	Revisión de la información existente	<p>USOS DEL SUELO</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapas de usos del suelo. ▪ Estadísticas oficiales sobre la población (demografía, urbanismo, topografía, etc.). ▪ Tipo, altura y edad de las edificaciones. <p>EVENTOS HISTÓRICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inundaciones, daños, etc. en eventos anteriores. <p>HIDROLOGÍA</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pluviometría, aforos, embalses, cuencas, etc.
<i>III</i>	Estudio de la situación actual. Definición del caso base	Medidas estructurales existentes (diques, motas, azudes, encauzamientos, presas, estructuras de protección, pozos, balsas, etc.).
<i>IV</i>	Definición de escenarios de inundación	Periodos de retorno. Escenarios de inundación de estudio y caudales máximos asociados.
<i>V</i>	Arquitectura del modelo de riesgo	Cargas / Respuesta del Sistema/ Consecuencias.
<i>VI</i>	Datos de entrada al modelo de riesgo	<p>CARGAS</p> <p>Datos hidrología. Laminación, niveles previos, compuertas (presa).</p> <p>RESPUESTA DEL SISTEMA</p> <p>Datos de la simulación hidráulica.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Obtención características hidráulicas del flujo: Áreas inundadas, calados, velocidades, caudales, hidrogramas, tiempos de llegada, etc. <p>Modos de fallo de las infraestructuras existentes.</p> <p>CONSECUENCIAS</p> <p>Obtención pérdida de vidas y costes económicos por escenario de inundación.</p>
<i>VII</i>	Cálculo del riesgo	Resultados del modelo en términos PAE-vidas y PAE-euros.
<i>VIII</i>	Representación de curvas F-N	Curvas F-N y F-D para el caso base.
<i>IX</i>	Evaluación del riesgo	Comparación con criterios de riesgo.
<i>X</i>	Incorporación y análisis del efecto de medidas no estructurales	Definición medidas no estructurales (participación pública, formación, avisos, etc.). Incorporación del efecto de las medidas en el modelo de riesgo y obtención de curvas F-N y F-D. Comparación con caso base.

Tabla 1.5.7. Resumen de la información necesaria para el estudio.

1.5.3.4. Descripción de la metodología para el análisis del riesgo de inundación por escorrentía pluvial

El agua de escorrentía resultante en las calles como resultado de la precipitación supone alteraciones en la actividad diaria de los ciudadanos, y, en menor medida que en eventos por inundación fluvial, puede llegar a provocar daños personales, incluso pérdida de vidas para determinados episodios de lluvia.

No obstante, pueden alcanzarse niveles elevados de la velocidad del agua que suponen una amenaza tanto para peatones como para el tráfico rodado. Las condiciones de calado nunca suelen alcanzar niveles similares a los de inundación fluvial, sin embargo, pueden alcanzarse velocidades de varios metros por segundo, especialmente en calles con pendientes pronunciadas para eventos de precipitación severos.

Aunque existen similitudes entre el análisis del riesgo de inundación por causas fluviales y por inundación pluvial, la metodología SUFRI se describe de forma separada, dado que el riesgo social es inferior en inundaciones provocadas por escorrentía pluvial, y está asociado a tasas de mortalidad diferentes.

Sin embargo, los pasos a seguir para la evaluación de consecuencias económicas son idénticos a los descritos para inundación fluvial. En este caso, los calados de inundación son menores que los correspondientes a inundación fluvial por fallo de infraestructuras.

A continuación se describen las fases de la metodología SUFRI para el análisis del riesgo de inundación por escorrentía pluvial (se incluye el diagrama A.2 del Apéndice 2 como herramienta de apoyo a los cálculos).

Fase I. Definición del ámbito de estudio.

Del mismo modo que en inundación fluvial, debe establecerse el ámbito y nivel de detalle del estudio, recopilando la información necesaria acorde con el nivel establecido.

Debe obtenerse toda la información referente al área de estudio (tal y como se ha descrito también para inundación fluvial), atendiendo además a los siguientes aspectos:

- Análisis de las calles y de la superficie de la ciudad (cuencas vertientes, morfología, pendientes, cotas, impermeabilidad, etc.).
- Análisis del sistema de drenaje, incluyendo elementos de captación (rejas, imbornales, etc.), estructuras de detención y elementos de evacuación, principalmente.
- Información de inundaciones previas en el municipio por escorrentía pluvial.

Fase II. Revisión de la información existente.

La información disponible condiciona el grado de detalle de los cálculos y simulaciones que puedan realizarse.

En función de los datos e información obtenidos durante las fases I y II se definen los siguientes aspectos:

- *Núcleos de estudio*: Número de poblaciones a analizar (en el caso de existir más de una población de estudio). Se realiza un modelo de riesgo para cada una, aunque lo habitual es el análisis de una única población.
- *Categorías de tiempo (TC)*: Definición de categorías de tiempo (TC) para capturar las variaciones de población. Por tanto, en función de la variabilidad estacional, diaria, etc. de la población debe establecerse un número 'm' de categorías de tiempo. Asociadas a estas categorías se establecen diversos niveles de población total (PT) existente en la población para la categoría dada o densidad de la población de referencia según categoría de tiempo (se denotan como d_{TC1} , d_{TC2} , ..., d_{TCm}).
- *Categorías de usos del suelo (CU)*: en aquellos núcleos de población en que se considere oportuno pueden distinguirse zonas de la localidad en función del uso del suelo. Estas zonas se caracterizan por presentar diferentes actividades o usos, asociadas a diferentes valores de densidad de población o valor del suelo.
- *Zonas homogéneas*: Dentro de cada categoría de uso del suelo se distinguen diferentes zonas en función de la morfología de las calles y de la red de drenaje existente (zonas en las que el flujo presenta características similares de calado y velocidad).

Fase III. Estudio de la situación actual. Definición del caso base.

Para evaluar la reducción del riesgo de inundación por aplicación de medidas no estructurales debe analizarse en primer lugar la situación actual. Esto incluye el estudio de la red de drenaje existente y del viario urbano para establecer el caso base.

El modelo de riesgo del caso base representa la situación actual de la población, es decir, refleja la existencia del sistema de drenaje actual, tanto superficial como subterráneo.

Fase IV. Definición de escenarios de inundación.

En primer lugar se realiza un modelo de riesgo para el caso base. El modelo incorpora la consideración de un rango de periodos de retorno asociados a diferentes escenarios de inundación.

En general, dado que el nivel de diseño de las redes de drenaje se centra en el entorno de los 10 años, en el caso de periodos superiores deben considerarse dos sistemas de drenaje: el subterráneo (red de drenaje) y el superficial (agua de escorrentía resultante en las calles). Es este último el que sirve de referente para la evaluación de la severidad de la inundación, pues el caudal de escorrentía generado está asociado a determinados niveles de agua y velocidades alcanzadas en superficie, valorando los riesgos asociados a esos valores. Una serie de periodos de retorno tipo sería la formada por periodos de retorno 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Fase V. Arquitectura del modelo de riesgo.

Dentro del modelo de riesgo del caso base, y, en general, para cualquier modelo de riesgo, pueden distinguirse tres partes en el diagrama de influencia:

- *Cargas (Bloque inicial)*. Nodos del diagrama de influencia que recogen las solicitudes o cargas. Contienen información referente a periodos de retorno de los escenarios de inundación de estudio y las probabilidades anuales de excedencia asociadas.
- *Respuesta del sistema (Bloque intermedio)*. Nodos que incluyen la respuesta del sistema. Estos nodos incorporan los pasos del diagrama para la obtención de las probabilidades asociadas a los caudales de afección al núcleo de población o área urbana (caudal máximo de afección resultante de la escorrentía generada por los eventos de precipitación asociados a los periodos de retorno anteriores).
- *Consecuencias (Bloque final)*. Nodos de consecuencias. Estos nodos incorporan la información relativa a la vulnerabilidad de la población frente a los escenarios de inundación determinados (en vidas humanas y costes monetarios) vinculados a los caudales de afección en el núcleo. Los nodos se asocian a listados que relacionan los caudales de escorrentía (o las variables relacionadas con el escenario de inundación) con los valores de vulnerabilidad estimados.

Combinando probabilidad y consecuencias de cada escenario de inundación a partir de la secuencia de nodos establecida en el diagrama de influencia, el modelo de riesgo obtiene los resultados en riesgo del caso-base en términos de riesgo social y económico para el desarrollo de las curvas F-N y F-D.

En el Apéndice 7 se incluye un ejemplo tipo de modelo de riesgo¹³ para el análisis del riesgo de inundación por escorrentía pluvial.

¹³ En el manual del software iPresas (UPV, 2010) [45] puede encontrarse la descripción detallada del modelo de riesgo de una presa con dos modos de fallo en escenario hidrológico.

Fase VI. Datos de entrada al modelo de riesgo.

Una vez se define la arquitectura del modelo de riesgo, deben efectuarse los cálculos previos para obtener los inputs necesarios para su ejecución. Los datos de entrada al modelo de riesgo se organizan siguiendo la misma estructura descrita anteriormente: cargas, respuesta del sistema y consecuencias.

a) Cargas

La información necesaria para los nodos del modelo correspondientes a las cargas del sistema se obtiene de los datos procedentes del estudio hidrológico como, por ejemplo, periodos de retorno.

Por tanto, el *estudio hidrológico* se centra en la determinación de los eventos de precipitación asociados a los periodos de retorno establecidos, para posteriormente obtener los caudales de escorrentía en el núcleo.

Por tanto, el estudio hidrológico incluye diferentes etapas como:

a.1. Información pluviométrica de la zona de estudio

Debe obtenerse toda la información posible de medidas reales de eventos de lluvia registrados sobre la cuenca o, en su defecto, en zonas próximas a la población.

Dependiendo de la información pluviométrica disponible se distingue entre:

- Datos de lluvias históricas registradas, que produjeron serias consecuencias desde el punto de vista de inundación en la cuenca y que dejaron además secuelas en la memoria histórica de la población.
- Series temporales de lluvias, registradas en la zona de estudio, o incluso series sintéticas generadas a partir de métodos estadísticos.
- Lluvias de proyecto, obtenidas a partir de información de lluvia globalizada en curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).

a.2. Definición de eventos de precipitación para cada periodo de retorno

A partir de la información pluviométrica existente se obtienen las curvas IDF, hietogramas y pérdidas de precipitación asociadas a cada periodo de retorno.

a.2.1. Obtención curvas IDF

Para cada periodo de retorno se obtienen las relaciones entre la intensidad de la precipitación (mm/h) y su duración (gráficamente o mediante ecuaciones). En general,

es común encontrar datos de pluviometría basados en precipitaciones acumuladas en 24 horas en lugar de estudios locales. Por tanto, se recomienda recurrir a la obtención de curvas IDF sintéticas.

En España, la expresión más generalizada es la enunciada por la Instrucción de carreteras 5.2.I.C tal que:

$$\frac{I}{I_d} = \frac{I_1}{I_d} \frac{28^{0.1} - D^{0.1}}{28^{0.1} - 1} \quad (\text{ec.10})$$

donde I_d es la intensidad media diaria (mm/h), I es la intensidad media máxima (mm/h), D es la duración de la lluvia (h) y el cociente es la relación entre la intensidad horaria y la intensidad media diaria que depende de la ubicación geográfica. Sin embargo, esta expresión depende de la ubicación geográfica y el cociente I_1/I_d sólo se ha obtenido para regiones situadas en España.

Otros métodos pueden emplearse para la obtención de niveles de precipitación en función de la localización del área de estudio.

a.2.2. Obtención de hietogramas

Las curvas IDF (obtenidas a partir de datos reales o su estimación mediante curvas sintéticas) sirven de base para la obtención de la lluvia de proyecto para cada periodo de retorno. Existen numerosos métodos para la estimación de la lluvia de proyecto (lluvia constante o de bloque, tormenta triangular, etc.). En España es común emplear el método de los bloques alternados (alternating block method, Chow et al, 1988 [10]).

a.2.3. Pérdidas de precipitación. Hietogramas de precipitación neta

El hietograma aporta información en términos de precipitación total. Sin embargo, el agua originada por la precipitación no se transforma al 100% en escorrentía pluvial, pues existe una cierta cantidad que se pierde por fenómenos de evapotranspiración, interceptación, almacenamiento en depresiones o infiltración. En general, los tres primeros fenómenos se consideran despreciables en comparación al último. Por tanto, el hietograma debe modificarse para representar lluvia efectiva (o neta) en lugar de lluvia total.

En zonas urbanas, las pérdidas por infiltración generan hidrogramas que difieren de la situación previa al desarrollo urbanístico. De entre los modelos existentes, las pérdidas de precipitación pueden estimarse a partir del modelo de pérdidas lineales, considerando una abstracción inicial P_0 (volumen por unidad de área) que debe satisfacerse para que empiece la escorrentía, y a continuación considerar unas pérdidas continuas constantes. También pueden emplearse otros modelos de pérdidas de precipitación (p.e. el método del Número de Curva del SCS, el de Horton, etc.).

a.3. Transformación lluvia-escorrentía

Una vez que se ha estudiado el régimen de precipitaciones asociado a la zona de estudio, obtenidas las lluvias de diseño para cada periodo de retorno y estimadas las pérdidas de precipitación para obtener la lluvia neta o efectiva, el paso siguiente es transformar esa lluvia efectiva en escorrentía en el núcleo urbano.

Existen múltiples modelos para la transformación lluvia-escorrentía. Se citan, entre otros, los modelos basados en la utilización del Hidrograma Unitario (método de las isócronas, modelo del SCS, etc. [38]), modelos de depósitos, modelo de la onda cinemática, etc.

b) Respuesta del sistema

Los caudales de escorrentía obtenidos para cada periodo de retorno se asocian a unas características específicas del evento de inundación en la población (calados, velocidades, etc.).

El modelo de riesgo para el caso base en escorrentía pluvial requiere de una variable que identifique cada escenario de inundación (bien periodo de retorno, T , o caudal de escorrentía, Q_{pf}). Sin embargo, resulta necesario analizar las características de cada escenario de inundación en la población para establecer el nivel de vulnerabilidad en términos de pérdida de vidas y costes económicos para el bloque del modelo correspondiente a estimación de consecuencias.

Por tanto, el estudio hidráulico del núcleo urbano aporta la información necesaria para el cálculo de los inputs al modelo del apartado de consecuencias. Este estudio incluye los siguientes aspectos:

b.1. Estudio/modelación de la red de drenaje existente

Estudio de la red de drenaje existente, tanto superficial (geometría de las calles, disposición y tipos de rejillas e imbornales, pendientes longitudinales y transversales, trayectorias del agua, encuentros, secciones transversales, etc.) como subterránea, incluyendo la identificación de puntos conflictivos o zona potencialmente inundables (cruces, estrechamientos, cambios de pendiente, zonas situadas a cotas por debajo del nivel de la calle, etc.).

En aquellos casos de los que se disponga de información detallada puede construirse el modelo de la red de drenaje (todos aquellos elementos que componen la red: ramas, encuentros, bifurcaciones, pendientes longitudinales, secciones, etc.) para la obtención de caudales máximos en cada tramo para cada escenario de inundación, incluyendo la interacción entre los dos sistemas: superficial y subterráneo.

b.2. Obtención de las características hidráulicas de la inundación para cada periodo de retorno

Debe obtenerse información de calados alcanzados por el agua (nivel máximo), velocidades, desarrollo de la inundación (tiempos, ratios de incremento de niveles en el tiempo, etc.) y áreas inundadas.

En este punto se distinguen tres niveles para el grado de caracterización de la inundación en función de la información disponible (Tabla 1.5.8).

<i>Nivel de información existente</i>	<i>Datos disponibles</i>	<i>Zonas</i>
<p>Bajo</p> <p>No existe información topográfica ni modelos o datos del sistema de drenaje. Datos de eventos históricos e inundaciones anteriores</p>	<p>Identificación de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ y_{max} en la población o en zonas inundadas. ▪ Número de víctimas. 	<p>Se considera la población en conjunto.</p> <p>Área única (A_T): P_T.</p>
<p>Medio</p> <p>Topografía (curvas de nivel, cotas,...). Geometría red superficial (longitudes, pendientes de las calles, etc.)</p>	<p>Clasificación de zonas homogéneas (según pendiente y ancho de las calles):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Estimación de escorrentía: Ratio Q/b (b, ancho de calle). ▪ Datos v e y para cada zona. 	<p>Zonas homogéneas: $A_i \rightarrow$ mismas características de la inundación para toda la zona.</p>
<p>Alto</p> <p>Mapas detallados de la topografía urbana. Modelos flujo 1D o modelos del sistema dual (interacción red superficial y sistema de drenaje)</p>	<p>Mapas o cálculos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Q, v, y,... en cada calle o tramo de la red. ▪ Distribución de velocidades y calados. 	<p>Mapas de comparación del núcleo urbano con mapas de resultados de calado y velocidad.</p>

Tabla 1.5.8. Niveles de información para la caracterización de la inundación.

Para los niveles medio y alto deben obtenerse, como mínimo, los siguientes datos:

- Caudales de escorrentía (Q_{pf}).
- Calados de afección (y).
- Velocidades (v).

c) Consecuencias

Para incorporar la información necesaria al tercer bloque del modelo de riesgo debe realizarse el cálculo de las consecuencias potenciales (en términos de pérdida de vidas y costes económicos) asociadas a cada escenario de inundación.

c.1. Pérdida de vidas

El estudio de la vulnerabilidad de la población frente al riesgo de *inundación por escorrentía pluvial* se basa en las causas de pérdida de vidas humanas durante eventos de lluvia extremos, considerando los factores que afectan a la estabilidad peatonal, como son la estabilidad frente al vuelco, deslizamiento o arrastre, y el peligro de quedarse atrapado en el interior de vehículos o edificios (Gómez y Russo, 2009 [21]).

En la metodología SUFRI, la existencia de sistemas de aviso a la población establece la categoría del núcleo de estudio (C_p) para el cálculo de tasas de mortalidad de referencia en escorrentía pluvial (FR_p), que a su vez, varían en función de la severidad de la inundación (S). A diferencia del caso de inundación fluvial, las tasas a emplear y el establecimiento de la severidad de la inundación difieren de los criterios descritos en el punto 1.5.3.3. En escorrentía pluvial, las tasas de mortalidad se basan en los estudios realizados por Jonkman et al [26], Penning-Rowse et al [42] y las recomendaciones del DEFRA [32] para la estimación de pérdida de vidas por inundación pluvial. El nivel de severidad (S) se establece en función del calado y la velocidad del flujo, a partir de diversos criterios presentes en la bibliografía¹⁴ y descritos más adelante.

En la metodología SUFRI, la estimación de la pérdida de vidas potencial en caso de inundación pluvial se basa en los siguientes pasos:

c.1.1. *Definición de la categoría para la obtención de tasas de mortalidad de referencia*

En primer lugar, se establece una clasificación de tres categorías (C_p) en función de la existencia de sistemas de aviso (Tabla A.2.1, Apéndice 2). En el caso-base, el caso de estudio se corresponde con un nivel de la clasificación establecida (Tabla 1.5.9).

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
C_{p1}	No existen sistemas de aviso.
C_{p2}	Existen sistemas de aviso pero son limitados.
C_{p3}	Sistemas de aviso efectivos y comprobados (p.e. Planes de actuación frente a emergencias).

Tabla 1.5.9. Categorías de formación-aviso para el establecimiento de tasas de mortalidad.

c.1.2. *Cálculo de la población en riesgo*

La exposición a la inundación depende de si la población se encuentra en el exterior, en un vehículo o en el interior de un edificio.

¹⁴ El Apéndice 3 recoge algunos de los criterios de vulnerabilidad existentes para escorrentía pluvial.

La población se encuentra más o menos expuesta en función de la tipología del edificio. Por ello, se propone un factor para la reducción de la población de cálculo con respecto a la población total en el área inundada (ver Apéndice 2), de modo que se plantea la utilización de un valor de densidad de cálculo, d_c , que depende de la altura media de los edificios existentes.

Por tanto, en primer lugar, debe estimarse la población en riesgo (PR) en función de la tipología de edificación de la zona (aplicando el factor corrector d_c , según altura media del edificio, a la población total existente).

Posteriormente, se considera que la población expuesta puede dividirse en dos grupos: una fracción de la población permanecerá en el interior de viviendas o edificios, en cambio, el resto se encontrará en el exterior durante la inundación.

Por tanto, deben obtenerse dos valores que caracterizan ambos sectores de la población en riesgo: f_{out} para la población que se encuentra en el exterior y f_{in} para la población que permanece en el interior de edificios o viviendas. De modo que se obtienen dos valores de población expuesta a la inundación:

$$PR_{out} = f_{out} \cdot PR = f_{out} \cdot d_c \cdot A \quad (\text{ec. 11})$$

$$PR_{in} = f_{in} \cdot PR = f_{in} \cdot d_c \cdot A \quad (\text{ec. 12})$$

Estos valores pueden obtenerse para cada área homogénea y categoría de tiempo.

En aquellos núcleos de población en los que exista un alto índice de instalaciones o establecimientos situados bajo el nivel del suelo (es decir, parkings, zonas comerciales, etc.), así como redes de infraestructuras de transporte (metro, tren, pasos inferiores, etc.), debe estimarse el valor de población en riesgo incorporando dichas características, pues su existencia supone una mayor vulnerabilidad frente a un posible evento de inundación. La incorporación de dichos aspectos al cálculo puede efectuarse a partir de indicadores de ocupación, uso, frecuencias de paso o juicio de experto.

c.1.3. Definición de la severidad de la inundación

Existen diferentes factores a la hora de analizar la severidad de la inundación debido a escorrentía pluvial. Debe considerarse la estabilidad peatonal frente al deslizamiento, el arrastre o el vuelco por la fuerza ejercida por el flujo sobre el peatón, incluyendo la posibilidad de atrapamiento en el interior de vehículos o edificios anegados.

Pueden distinguirse diferentes criterios de vulnerabilidad en función de la variable de estudio:

- Calado máximo de afección (y)¹⁵
- Velocidad máxima (v)
- Estabilidad al vuelco (representada por el parámetro $v \cdot y$)
- Estabilidad al deslizamiento (representada por el parámetro $v^2 \cdot y$)

¹⁵ Definido como H en inundación fluvial.

En la metodología SUFRI, los niveles de severidad de la inundación (S) se definen en función de las características de la inundación, a partir de la combinación de diversos criterios de vulnerabilidad (Gómez y Russo [21], Reiter [43], Nanía et al [38], etc.), estableciendo cinco zonas de severidad de la inundación, delimitadas por determinados valores de velocidad y calado para diferentes grados de estabilidad peatonal y resistencia al flujo.

Por tanto, se establecen en esta metodología cinco niveles de severidad atendiendo a las características del flujo. La Tabla 1.5.10 recoge los criterios para la definición de la severidad de la inundación.

Nivel de severidad (S)		Calado $y(m)$	Velocidad $v(m/s)$	Parámetro Vuelco $v \cdot y (m^2/s)$	Parámetro Deslizamiento $v^2 \cdot y (m^3/s^2)$
S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50	<1.23
S1	<i>Severidad leve.</i> Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad. Dificultades para caminar.	<0.80	<1.60	<1.00	<1.23
S2	<i>Severidad media.</i> Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia, pueden llegar a flotar.	<1.00	<1.88	<1.00	<1.23
S3	<i>Severidad elevada.</i> Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre.	>1.00	>1.88	>1.00	>1.23
S4	<i>Severidad extrema.</i> Daños estructurales a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00	>1.23

Tabla 1.5.10. Niveles de severidad para inundaciones por escorrentía pluvial.

Las características de la inundación (calado y velocidad) para cada escenario de inundación y área identificada (según uso del suelo y/o características del viario) definen el nivel de severidad correspondiente. Por ejemplo, el nivel de severidad extrema, S4, está asociado a la existencia de elevados daños estructurales en viviendas y edificios.

Dado que existen dos estimaciones de la población expuesta a la inundación (PR_{out} y PR_{in}), que se corresponden con niveles diferentes de exposición a las características de la inundación, deben obtenerse los niveles de severidad correspondientes a cada uno.

Por ejemplo, el nivel de severidad para la población que se encuentra en el exterior, PR_{out} , puede obtenerse de la consideración de las características hidráulicas de la inundación (calado y velocidad), y el correspondiente a la fracción de la población en riesgo situada en el interior, PR_{in} , asumiendo el mismo calado de inundación pero velocidad $v=0$ m/s (viéndose afectados por la profundidad pero no por la acción de la corriente).

La Figura 1.5.11 muestra las categorías establecidas en la tabla 1.5.10 en un gráfico calado-velocidad (también incluido en Apéndice 2), que incorpora todos los límites de velocidad, calado, etc. que definen los diferentes niveles.

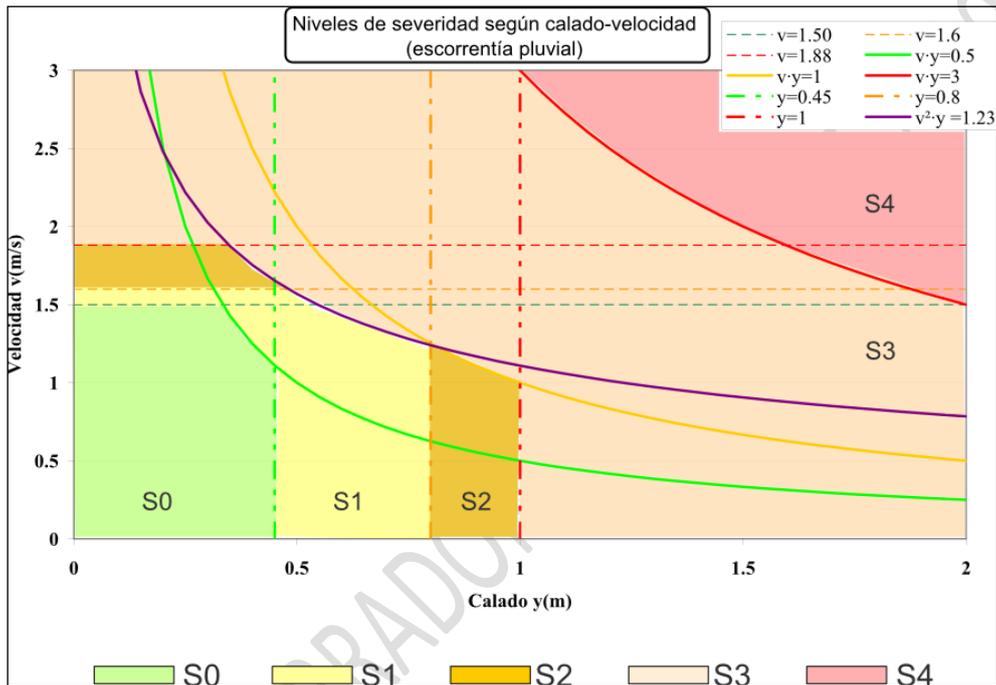


Figura 1.5.11. Niveles de severidad en escorrentía pluvial en función del calado y la velocidad de la inundación (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

c.1.4. Estimación de tasas de mortalidad

Dados los bajos niveles de caudal generalmente asociados a inundaciones por escorrentía pluvial, las tasas de mortalidad a aplicar no son las mismas que las presentadas en la metodología SUFRI para el cálculo en inundación fluvial (basadas en datos históricos de rotura de presas).

Las tasas a emplear en inundación pluvial se basan en los estudios publicados en Jonkman et al, 2003 [26] y Penning-Rowse et al, 2005 [42], a partir de datos estadísticos de mortalidad en inundaciones pasadas y otras herramientas de estimación existentes en la bibliografía (HR Wallingford Ltd., 2006 [32]).

El Apéndice 4 incorpora el procedimiento establecido para la obtención de tasas de mortalidad en función del nivel de severidad de la inundación y la categoría C_p (C_{p1} a C_{p3}).

Cada categoría C_p está asociada a unas tasas de mortalidad para inundación por escorrentía pluvial (FR_p). Dentro de cada categoría se propone un valor promedio y un rango para la tasa de mortalidad en función de la severidad de la inundación (Tabla 1.5.11).

Establecida la categoría C_p de la población correspondiente al caso base, se obtienen las tasas de mortalidad (FR_p) a aplicar de la Tabla 11 (Tabla A.2.2, Apéndice 2).

<i>Categoría C_p</i>	<i>Nivel de severidad</i>	<i>Tasa, FR_p (Valor propuesto)</i>	<i>Rango para FR_p (Valores mínimo y máximo)</i>
C_{p1}	S0	0.0003	0 - 0.0009
	S1	0.0021	0.001 - 0.003
	S2	0.0038	0.0015 - 0.0045
	S3	0.0105	0.006 - 0.04
	S4	0.0448	0.01 - 0.11
C_{p2}	S0	0.0003	0 - 0.0008
	S1	0.0018	0.0012 - 0.0024
	S2	0.0033	0.0014 - 0.0037
	S3	0.0090	0.005 - 0.035
	S4	0.0384	0.01 - 0.095
C_{p3}	S0	0.0002	0 - 0.00065
	S1	0.0015	0.001 - 0.002
	S2	0.0027	0.001 - 0.003
	S3	0.0075	0.004 - 0.028
	S4	0.0320	0.009 - 0.08

Tabla 1.5.11. Tasas de mortalidad en escorrentía pluvial.

Para el cálculo de tasas de mortalidad se han establecido valores estándar para caracterizar la vulnerabilidad de la población (Penning-Rowse et al, 2005 [42]). En casos de estudio con elevados porcentajes de población con más de 75 años o un alto índice de grupos especialmente vulnerables (como enfermos crónicos, niños, etc.) debe aplicarse un coeficiente corrector a los valores recogidos en la Tabla 1.5.11. Dicho coeficiente viene dado por el ratio $Y/0.5$, donde Y se obtiene según la Tabla 1.5.12 (las tasas propuestas en la metodología SUFRI se han estimado para un valor $Y=0.5$).

		$Y=P1+P2$		
		%Población con enfermedades crónicas o especialmente vulnerable, P2		
		<i>Superior a la media (0.50)</i>	<i>Similar a la media (0.25)</i>	<i>Inferior a la media (0.10)</i>
Población con edad superior a 75 años, P1	<i>Superior a la media nacional (0.50)</i>	1	0.75	0.6
	<i>Similar a la media nacional (0.25)</i>	0.75	0.5	0.35
	<i>Inferior a la media nacional (0.10)</i>	0.6	0.35	0.2

Tabla 1.5.12. Índices de corrección de tasas de mortalidad por vulnerabilidad poblacional (Penning-Rowse et al, 2005 [42])

c.1.5. Cálculo del número de víctimas potenciales

El último paso para la estimación de la pérdida potencial de vidas humanas para escenarios de inundación pluvial consiste en el cálculo del número de víctimas (N).

Por tanto, para cada área identificada se obtiene el número de víctimas (N_i) como el producto de la tasa de mortalidad (FR_{p,i}), función del nivel de severidad, asociada a cada escenario de inundación y categoría de población expuesta (PR_{out} o PR_{in}) para cada escenario, según el área afectada, y categoría de tiempo.

$$N(T,TC) = \sum_{i=0}^n N_i = \sum_{i=0}^n PR_{out}(T,TC)_i \cdot FR_{p,out}(T)_i + PR_{in}(T,TC)_i \cdot FR_{p,in}(T)_i \quad (\text{ec. 13})$$

donde *n* es el número de áreas identificadas.

Por tanto, dadas *m* categorías de tiempo y *p* escenarios de inundación asociados a *p* periodos de retorno, existen *m·p* estimaciones del número potencial de víctimas.

Los *m·p* valores de víctimas potenciales deben integrarse al modelo de riesgo. La Tabla 1.5.13 muestra un ejemplo de clasificación de los datos de entrada al modelo de riesgo, donde se establece cada categoría de tiempo (TC) y escenario de inundación (definido por un caudal de escorrentía, Q_{pf}), junto con el nivel de pérdida de vidas estimado.

TC	Q	N
TC ₁	Q _{pf,1}	N ₁₁
...	Q _{pf,2}	N ₁₂

TC ₁	Q _{pf,p}	N _{1p}
TC _i	Q _{pf,1}	N _{i1}
...	Q _{pf,2}	N _{i2}

TC _i	Q _{pf,p}	N _{ip}
TC _m	Q _{pf,1}	N _{m1}
...	Q _{pf,2}	N _{m2}

TC _m	Q _{pf,p}	N _{mp}

Tabla 1.5.13. Ejemplo del listado de incorporación de datos al modelo. Pérdida de vidas.

La Figura 1.5.12 resume las variables fundamentales del cálculo para la obtención de los inputs de consecuencias en pérdida de vidas para el modelo de riesgo por inundación por escorrentía pluvial.

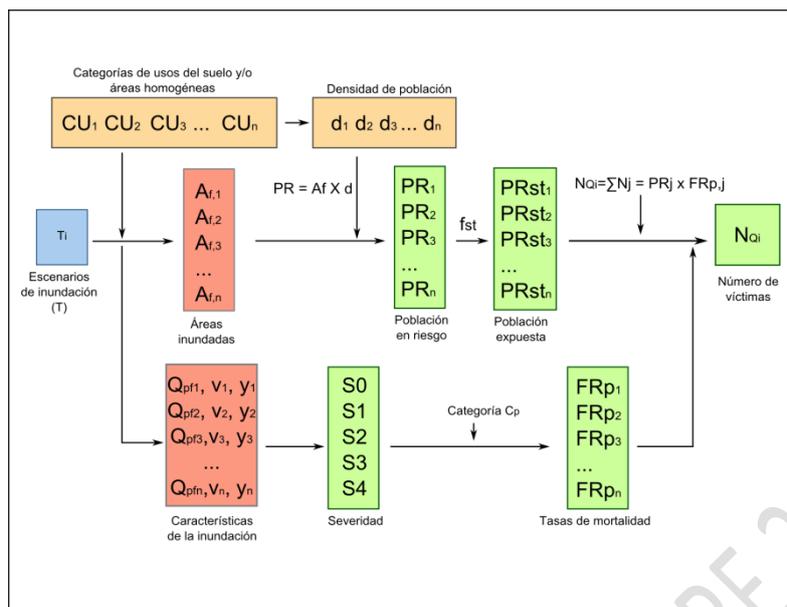


Figura 1.5.12. Variables intervinientes en la obtención de inputs en términos de consecuencias en pérdida de vidas. Inundación pluvial (Gráfico desarrollado específicamente para la metodología SUFRI)

El modelo de riesgo en iPresas (como ayuda a la computación, en caso de utilizar dicha herramienta) emplea la cabecera de las columnas del listado de inputs de consecuencias para la asignación de consecuencias a cada probabilidad de ocurrencia dada por el modelo.

El Apéndice 6 incluye hojas-tipo para la organización de los cálculos y la obtención de los datos necesarios para los listados de inputs al modelo en el bloque de consecuencias.

c.2. Costes económicos

El proceso a seguir para el cálculo de consecuencias económicas en el modelo de riesgo por escorrentía pluvial es idéntico al establecido para inundación fluvial (ver apartado 1.5.3.2).

Fase VII. Cálculo del riesgo.

Una vez obtenida toda la información necesaria para el modelo de riesgo, se ejecuta el programa y se obtienen los resultados del caso base, representativo de la situación existente (red de drenaje actual).

Fase VIII. Representación de curvas F-N.

Para la construcción de las curvas F-N y F-D asociadas al caso base, se obtienen las relaciones 'vidas - probabilidad anual de excedencia' (f-N) y 'euros - probabilidad anual de excedencia' (f-€) del modelo de riesgo en iPresas.

Fase IX. Evaluación del riesgo.

La comparación de los resultados obtenidos para el caso base con límites de tolerabilidad o criterios de riesgo existentes permite evaluar el riesgo de inundación por escorrentía pluvial de la población de estudio.

Fase X. Incorporación y análisis del efecto de medidas no estructurales.

Para el análisis del efecto de medidas no estructurales (sistemas de aviso, formación a la población, instalación de barreras de protección, etc.) en el riesgo de inundación por escorrentía pluvial deben realizarse ciertas modificaciones en el modelo de riesgo del caso-base.

El modelo de riesgo del caso base sirve de partida para el análisis de estas medidas, empleando las mismas cargas y respuesta del sistema para el modelo (pues las medidas no estructurales no modifican los resultados obtenidos de los estudios hidrológicos e hidráulicos para la transformación lluvia-escorrentía).

Se analiza la situación con las medidas no estructurales y se definen las variaciones en los inputs de entrada al modelo de riesgo en términos de vulnerabilidad de la población (pérdida de vidas y costes económicos) frente a los escenarios de inundación considerados. En el caso de considerar el efecto de nuevas medidas estructurales (modificaciones en la red de drenaje o en la tipología de las calles) deben estimarse de nuevo las características hidráulicas de cada escenario de inundación.

El apartado 1.5.3.3 incluye las modificaciones a realizar al modelo de riesgo para el análisis del efecto de medidas no estructurales en escorrentía pluvial.

1.5.3.5. Incorporación de medidas no estructurales al modelo de riesgo

En este apartado se incluyen algunos ejemplos para la incorporación de medidas no estructurales en el análisis del riesgo de inundación mediante la metodología SUFRI. El caso-base debe compararse con diferentes alternativas para la evaluación del efecto en riesgo de las medidas consideradas.

Se describen a continuación algunas de las recomendaciones para la incorporación de modificaciones al caso-base para el análisis de medidas no estructurales.

Pérdida de vidas

Una o varias variables de la metodología SUFRI pueden modificarse para analizar la situación con medidas no estructurales a partir del caso-base. Al analizar el riesgo de inundación fluvial o pluvial, la existencia de medidas no estructurales puede estudiarse mediante la estimación de las consecuencias potenciales del nuevo escenario de estudio. Por tanto, diversos parámetros de la metodología pueden verse modificados en la nueva situación, de modo que se obtienen nuevos datos de entrada al modelo que aportan resultados para la representación de curvas F-N y F-D para el caso con medidas no estructurales.

Por ejemplo, el efecto de una medida no estructural basada en políticas de planeamiento urbanístico puede incluirse en el modelo a través de la reducción de la población en riesgo (PR). Esta modificación puede plantearse tanto en inundación fluvial como en pluvial. Sin embargo, si se considera la implementación de un sistema de aviso a la población en caso de inundación, esta nueva situación debe analizarse de forma diferente, pues la metodología SUFRI integra la existencia de sistemas de aviso en el cálculo de consecuencias de forma distinta para inundación fluvial y pluvial, mediante la clasificación del caso de estudio para la estimación de tasas de mortalidad: dentro de los niveles C (fluvial) o C_p (pluvial). Por ello, se describen a continuación algunos ejemplos por separado.

Inundación fluvial

Para el análisis del riesgo de inundación con la aplicación de medidas no estructurales deben emplearse las simulaciones realizadas para el caso base y la misma arquitectura del modelo de riesgo. Sin embargo, la consideración de estas medidas supone ciertas modificaciones en los datos de entrada al modelo, principalmente en dos puntos:

- *Definición de la categoría para el cálculo de tasas de mortalidad en pérdida de vidas*

La categoría (C) a asignar al área o núcleo de población en estudio, para el cálculo de las tasas de mortalidad de referencia (RFR) varía en función del nivel de formación a la

población, medios de comunicación existentes, sistemas de aviso, implantación del Plan de Emergencia de la presa, realización de simulacros, etc. Por tanto, una medida no estructural relacionada con una mejora de la formación, comunicación, etc. implica la definición de una categoría superior a la del caso base (siendo $C_1 < C_2 < \dots < C_{10}$).

- *Definición de tiempos de aviso*

En la realización de modelos de riesgo que integren la existencia de una presa aguas arriba de la población, la definición de los tiempos de aviso depende de la implantación o no del Plan de Emergencia de la presa, de la tipología de la misma (formación de la brecha, modos de fallo), etc. En aquellos casos en los que el Plan esté implantado, deben considerarse tiempos de aviso diferentes a los estimados para el modelo del régimen natural o en la situación previa a la existencia de la presa (Tabla A.1.4., Apéndice 1). En el caso general, el tiempo de aviso se define en función del intervalo de tiempo entre los caudales de alerta y de daños definidos en la fase VI.

Inundación por escorrentía pluvial

- *Definición de la categoría para el cálculo de tasas de mortalidad en pérdida de vidas y tiempos de aviso*

Del mismo modo que en inundación fluvial, puede definirse una categoría diferente, C_p , para analizar el efecto de medidas no estructurales en escorrentía pluvial. Se establecen tres categorías (C_p) para la asignación de tasas de mortalidad en inundación por escorrentía pluvial. Por tanto, una medida no estructural relacionada con la implantación o mejora de la red de sistemas de aviso implica una variación en la categoría C_p con respecto al caso base (correspondiéndose C_{p1} con la no existencia de sistemas de aviso).

- *Definición de la población en riesgo*

En la consideración de medidas de formación a la población, puede asumirse que la formación deriva en una reducción de la población en riesgo en el área de estudio. Por tanto, esta reducción puede estimarse en base a datos de efectividad del programa de formación o juicio de experto.

Costes económicos

Inundación fluvial y escorrentía pluvial

En la metodología SUFRI, se recomienda que la reducción de los potenciales costes económicos por la existencia de avisos previos a la población debe aplicarse en aquellos casos en los que también se haya realizado formación a la población en

materia de riesgo de inundación. De esta forma, puede establecerse que la existencia de avisos y formación puede derivar en la implantación de barreras u obstáculos al paso del agua, lo que supone un porcentaje de reducción de daños materiales.

La reducción de costes de la inundación puede incluirse en el cálculo mediante dos factores: RD (reducción de daños) y K_{TC} (factor de estacionalidad). El porcentaje de reducción de daños puede estimarse a partir de diversos estudios existentes en la bibliografía, en función del calado de la inundación y el tiempo de aviso (Parker et al, 2005 [41]). El factor de estacionalidad, K_{TC} , se incluye para captar el porcentaje de segundas residencias existente en la población (en cuyo caso, sólo puede asumirse reducción de daños durante el verano, cuando la población reside en el lugar).

Los costes económicos de la inundación tras la aplicación de medidas no estructurales se obtienen a partir de los resultados obtenidos para el caso-base, empleando los dos factores anteriores:

$$CT_{N-S} = CT_{base} \cdot (1 - RD \cdot K_{TC}) \quad (\text{ec.14})$$

donde CT_{N-S} indica costes totales con la existencia de sistemas de aviso y formación a la población, y CT_{base} indica costes totales del caso base.

A continuación se incluyen ejemplos para la obtención del porcentaje de reducción de daños (RD).

Zonas residenciales

En 1970, Day (Elsner et al, 2003 [17]) establece una estimación de los beneficios que los sistemas de aviso en caso de inundación pueden representar, en función del tiempo de aviso disponible. Se propone un porcentaje máximo de reducción del 35% respecto de los costes totales. Desde 1970, investigaciones llevadas a cabo en Reino Unido evidencian los efectos de los sistemas de aviso en la reducción de daños económicos por inundación (Penning-Rowse et al, 1978 y Parker et al, 1991) [41].

En la Figura 1.5.10 se muestran las curvas recogidas por Parker et al, 2005 [41] para la determinación del porcentaje de reducción de los daños potenciales totales en función del calado de la inundación y del intervalo del tiempo de aviso (inundaciones de duración inferior a 12 horas).

La reducción de los daños se estima para cuatro niveles del tiempo de aviso (2, 4, 6 y 8 horas) y cinco niveles de calado (0.1, 0.3, 0.6, 0.9 y 1.2 m). Se distinguen dos rangos de duración de la inundación (menor o mayor a 12 horas), aunque las diferencias entre ambas categorías no son significativas. Los valores del porcentaje de reducción frente al total de daños potenciales varían del 25% al 45%.

Para niveles del agua (calados de afección) superiores a 1.2 m se recomienda no efectuar reducciones en la estimación de costes económicos potenciales.

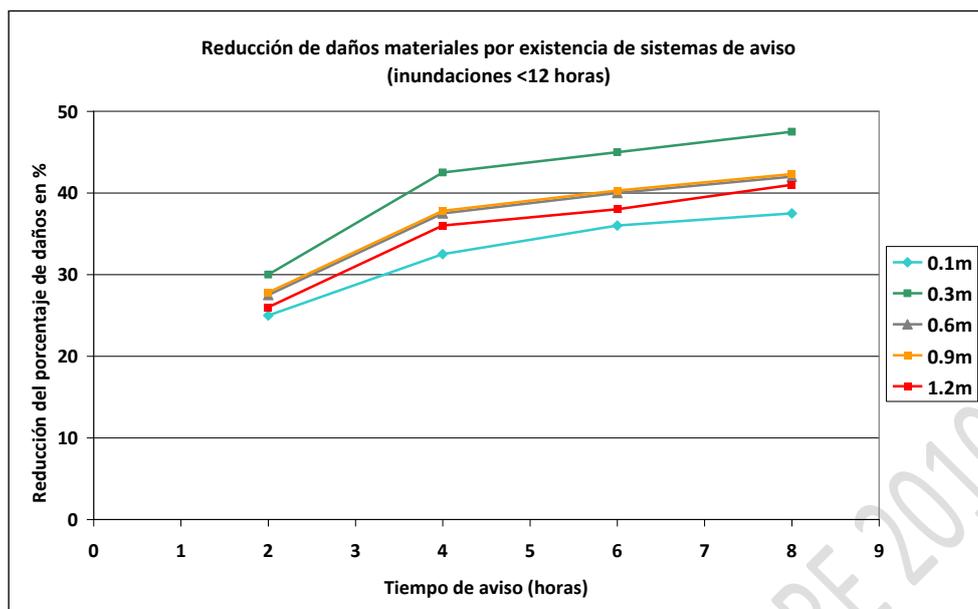


Figura 1.5.13. Reducción de daños según tiempo de aviso. Adaptado de Parker et al, 2005 [41].

Zonas no residenciales

Existen estimaciones de reducción de daños por sistemas de aviso para usos del suelo no residenciales. Recientes estudios llevados a cabo por la FHRC (Flood Hazard Research Centre, UK) aportan información más detallada sobre acciones realizadas para reducir el daño en usos del suelo no residenciales (Parker et al, 2005 [41]).

1.6. CONCLUSIONES

La metodología SUFRI, presentada en este documento, aporta una herramienta de apoyo para la caracterización del riesgo de inundación en áreas urbanas, que puede emplearse para informar a autoridades, entidades locales y agentes intervinientes a la hora de definir estrategias para la reducción del riesgo.

La representación de curvas F-N y F-D permite analizar el riesgo social y económico de forma sencilla y comprensible, siendo de gran utilidad para la evaluación del riesgo existente y el análisis del efecto de medidas no estructurales. Aunque estas curvas no representan la distribución del riesgo en el área de estudio, permiten la comparación de la situación existente con criterios de tolerabilidad.

Como se ha descrito en la metodología, estas curvas son la base para representar la cuantificación del riesgo y evaluar el efecto de diversas medidas en el riesgo actual frente a inundaciones de un área urbana.

Por una parte, la metodología puede tanto orientar los trabajos como en última instancia beneficiarse de los resultados de actividades como las preconizadas en la Directiva 2007/60/EC, en particular:

- Identificación de áreas potencialmente vulnerables.
- Identificación de rutas de acceso y vías de evacuación.
- Creación de mapas de riesgo.
- Evaluaciones preliminares de riesgo de inundación.
- Etc.

Por otro lado, aporta una información de gran valor añadido para la toma de decisiones en actuaciones también contempladas en la Directiva 2007/60/EC, tales como:

- Creación de Planes de Gestión de riesgo de inundación.
- Planificación territorial y urbanística.
- Establecimiento de medidas no estructurales.
- Implantación de sistemas de alerta.
- Implantación de protocolos de actuación en emergencias.
- Diseño, construcción y explotación de infraestructuras de protección.
- Priorización de inversiones.
- Diseño de planes de formación a la población.
- Etc.

La metodología se basa en la identificación de todos los factores intervinientes para la cuantificación del riesgo de inundación: desde las posibles fuentes de riesgo (inundaciones de origen fluvial, ineffectividad del sistema de drenaje, escorrentía pluvial, posible fallo de estructuras de retención y defensa, etc.) hasta el grado de vulnerabilidad de la población frente a posibles eventos de inundación.

La integración de medidas estructurales y no estructurales, partiendo del caso base (representativo de la situación actual del núcleo urbano, es decir, el riesgo existente) y evaluando el efecto en riesgo que su aplicación supone en el contexto actual, se lleva a cabo mediante la utilización de curvas F-N para la comparación de las diferentes alternativas consideradas, a partir de los resultados procedentes de modelos de riesgo creados para la cuantificación del riesgo.

Por tanto, se propone una herramienta que permite la comparación del efecto en riesgo de diferentes medidas no estructurales, sirviendo de apoyo a la hora de priorizar acciones en materia de riesgo de inundación.

Cabe reseñar que la metodología de cálculo propuesta en este documento considera la evaluación del riesgo total por inundación, a diferencia de los análisis de riesgo llevados a cabo en seguridad de presas, en los que se considera el riesgo incremental, asociado a los daños producidos por la rotura de la presa respecto de la situación resultante si su fallo no tuviera lugar.

El nivel de detalle del análisis viene condicionado por la información existente y el grado de esfuerzo necesario para el cálculo. No obstante, se plantea una metodología capaz de asistir al proceso de evaluación y análisis del riesgo para diferentes niveles de detalle, desde el conocimiento básico de la situación del núcleo urbano para la obtención de conclusiones generales que permitan apoyar la toma de decisiones a corto plazo, hasta el estudio detallado de la zona urbana, permitiendo el análisis de áreas o sectores con mayor precisión. En aquellos casos en los que el nivel de información disponible sea insuficiente, las estimaciones deben realizarse desde un punto de vista conservador, en particular, en lo referente a la población en riesgo y a las características de la inundación. Sin embargo, debe tenerse presente la resiliencia de la población frente a posibles eventos de inundación, pues en ocasiones, el número de víctimas es inferior al esperado.

REFERENCIAS

- [1] ACA (Agència Catalana de l'Aigua). *INUNCAT - Pla Especial d'Emergències per Inundacions*, 2009.
- [2] ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams Inc.). *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams, October 2003.
- [3] ARC (Atlanta Regional Commission). *Georgia Stormwater Management Manual. Technical Handbook*, August 2001.
- [4] Richard Ashley, Dennis Parker, Louise Hurley, and Adrian Cashman. Flooding: Engineering resilience. Technical report, Flood Hazards Research Centre, February 2008.
- [5] David Balmforth, Cristopher Digman, Richard Kellagher, and David Butler. *Designing for exceedance in urban drainage - good practice*. CIRIA C635, 2006.
- [6] David S. Bowles and Maged Aboelata. Evacuation and life-loss estimation model for natural and dam break floods. *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*, pages 363–383, 2007.
- [7] Dam Bramer. Weather forecasting, online meteorology guide, 2010.
- [8] Bureau of Reclamation (USBR). *Risk Based Profiling System*. Technical Service Center, January 2001.
- [9] Bureau of Reclamation (USBR). *Dam safety risk analysis methodology Version 3.3.1*. U.S. Department of Interior, 2003.
- [10] Ven Te Chow, David R. Maidment, and Larry W. Mays. *Applied Hydrology*. February 1988.
- [11] COPUT (Conselleria D'Obres Públiques Urbanisme i Transports Generalitat Valenciana). *Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA)*, 2002.
- [12] W.R. Dawson. Generic depth-damage relationships for residential structures with basements. *Economic Guidance Memorandum (EGM) 04-01*, USACE, 2003.
- [13] Manuel G. de Membrillera Ortuño, Ignacio Escuder Bueno, Javier González Pérez, and Luis Altarejos García. *Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas*. 2005.
- [14] Jose María de Ureña Francés and Luis Carlos Teixeira Gurbindo. Ordenación fluvial, usos del suelo y construcción de infraestructuras. *Ingeniería y territorio*, (68):32–41, 2004.

- [15] DEFRA Department for Environment, Food and Rural Affairs). *Draft Flood and Water Management Bill*. Welsh Assembly Government, 2009.
- [16] E. R. Ekstrand. Estimating economic consequences from dam failure in the safety dams program. *U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation*, EC-2000-01, 2000.
- [17] Anne Elsner, Stephan Mai, Claus Zimmermann, and Volker Meyer. Integration of flood risk in coastal hinterland management. In *International Conference on CoastGis, Genua, Italy*, 2003.
- [18] European Parliament. Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*, October 2007.
- [19] FEAT (Flood Emergency Action Team). *Legal Guidelines for Flood Evacuation*. Governor's Office of Emergency Services of California, 1997.
- [20] Miguel Ángel Gago Lara. Jornada: "urbanismo y zonas inundables". 2005.
- [21] Manuel Gómez and Beniamino Russo. Criterios de riesgo asociados a escorrentía urbana. *Jornadas de Ingeniería del Agua*, Octubre 2009.
- [22] Wayne J. Graham. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. *U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation*, DSO-99-06, 1999.
- [23] HSE (Health and Safety Executive). *Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process*. 2001.
- [24] Institution of Civil Engineers. *The State of the Nation: Defending Critical Infrastructure*. Institution of Civil Engineers, 2008.
- [25] S. N. Jonkman. *Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications*. PhD thesis, Civil Engineering Faculty, Technical University of Delft, 2007.
- [26] S.N. Jonkman, A.J.M. van Gelder, and Vrijling J.K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, A99:1–30, 2003.
- [27] S.N. Jonkman and J.K. Vrijling. Loss of life due to floods. *Flood Risk Management*, 1:43–56, 2008.
- [28] R. Kates. Industrial flood losses: Damages estimation in the Lehigh Valley. *Department of Geography Res. University of Chicago*, 98:37, 1965.
- [29] Paul Kovacs. The role of insurance in promoting non-structural mitigation of natural disasters. *Non-structural measures for water management problems*, pages 264–272, October 2001.
- [30] H. Kreibich, A. H. Thielen, Th. Petrow, M. Müller, and B. Merz. Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures - Lessons learned

from the Elbe flood in August 2002. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5:117–126, 2005.

[31] Z. W. Kundzewicz. Non-structural flood protection and sustainability. *Non-structural measures for water management problems*, pages 8–27, October 2001.

[32] HR Wallingford Ltd. *Flood Risks to People. Phase 2. FD2321/TR2. Guidance Document*. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), Environment Agency, UK, 2006.

[33] HR Wallington Ltd. Guidelines for socio-economic flood damage evaluation. *Integrated flood risk analysis and management methodologies.*, FLOODsite, 2006.

[34] Raúl Medina and Fernando J. Méndez. Inundación costera originada por la dinámica marina. *I.T.N.*, (74):68–75, 2006.

[35] Justo Mora Alonso-Muñoyerro. Avenidas e inundaciones: gestión de riesgos. *Ingeniería y territorio*, (68):52–55, 2004.

[36] Maria Luisa Moreno Santaengracia, Eduardo García Salette, and Antonio Linares Sáez. Sistema de ayuda a la decisión para la explotación de la cuenca del ebro: Eficaz herramienta de prevención. *Revista Cauce 2000*, 129:15–19, 2005.

[37] Dale F. Munger, David S. Bowles, Douglas D. Boyer, Darryl W. Davis, David A. Margo, David A. Moser, and Patrick J. Regan. Interim tolerable risk guidelines for US Army Corps of Engineers Dams. *USSD Conference*, 2009.

[38] L. Nanía. Métodos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de caudales. Hidrología superficial y subterránea. *Universidad de Granada*, 2002.

[39] NEAA (Netherlands Environmental Assessment Agency). Dutch dikes and risk hikes, a thematic policy evaluation of risks of flooding in the Netherlands. *National Institute for Public Health and the Environment (RIVM)*, May 2004.

[40] I. Oleagordia-Montaña, R. Rodríguez-García, J. Navarro-Hevia, and V. del Castillo-Novo. Estudio hidrológico del río arlanzón a su paso por el término municipal de burgos. 2009.

[41] D. Parker, S. Tunstall, and T. Wilson. Socio-Economic Benefits of Flood Forecasting and Warning. *Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, Queensway, Enfield, EN3 4SF, London, UK.*, 2005.

[42] E. Penning-Rowsell, D. Floyd, P. Ramsbottom, and S. Surendran. Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Natural Hazards*, 36:43–64, 2005.

[43] P. Reiter. RESCDAM loss of life caused by dam failure, the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki. *Water Consulting Ltd.*, 2001.

- [44] C. Scawthorn. HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II. Damage and Loss Assessment, ASCE. 2006.
- [45] A. Serrano-Lombillo. *iPresas software. User Guide. Version 0.9.1*. Universidad Politécnica de Valencia (UPV, Spain), 2010.
- [46] Javier Sánchez. Guía para la aplicación del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. In Agència Catalana de l'Aigua, editor, *Jornada Retos y Oportunidades sobre evaluación y gestión de los riesgos de inundación*. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.
- [47] J. R. Témez. *Extended and Improved rational method*. Highways Administration of Spain, xxiv congress madrid edition, 1991.
- [48] United Nations World Water Assessment Programme. *Global Trends in Water-Related Disasters an insight for policymakers*. United Nations, 2009.
- [49] USACE (U. S. Army Corps of Engineers). Generic depth-damage relationships. *Economic Guidance Memorandum (EGM)*, 01-03, 2000.
- [50] J. K. Vrijling. Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. *Reliability engineering and system safety*, 74:337–344, 2001.
- [51] B Woods-Ballard, R Kellagher, P Martin, C Jefferies, R Bray, and P Shaffer. *The SuDS manual*. CIRIA, 2007.

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

APÉNDICES

- APÉNDICE 1. DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL.
- APÉNDICE 2. DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL.
- APÉNDICE 3. CRITERIOS DE VULNERABILIDAD EN INUNDACIÓN PLUVIAL
- APÉNDICE 4. ESTIMACIÓN DE TASAS DE MORTALIDAD EN INUNDACIÓN PLUVIAL
- APÉNDICE 5. COSTES DE REFERENCIA Y CURVAS CALADO-DAÑOS PARA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS
- APÉNDICE 6. PLANTILLAS PARA EL CÁLCULO
- APÉNDICE 7. ESQUEMAS PARA EL MODELO DE RIESGO
- APÉNDICE 8. CRITERIOS DE TOLERABILIDAD EN RIESGO POR INUNDACIÓN
- APÉNDICE 9. CASO PRÁCTICO

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

APÉNDICE 1

DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL

El apéndice 1 incluye el diagrama de flujo para el desarrollo de la metodología SUFRI y estimación de datos de entrada al modelo de riesgo en inundación fluvial. El apéndice 1 presenta los siguientes contenidos:

1A – Diagrama A.1.

1A*- Esquemas auxiliares al diagrama A.1.

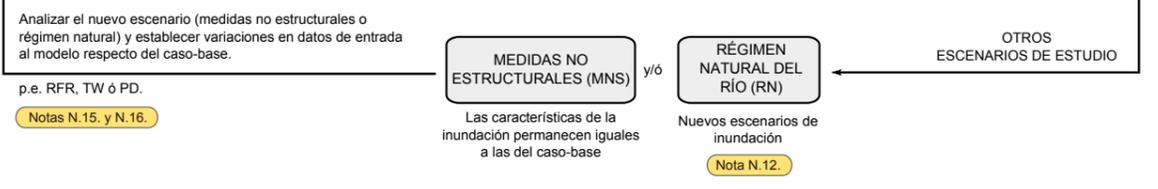
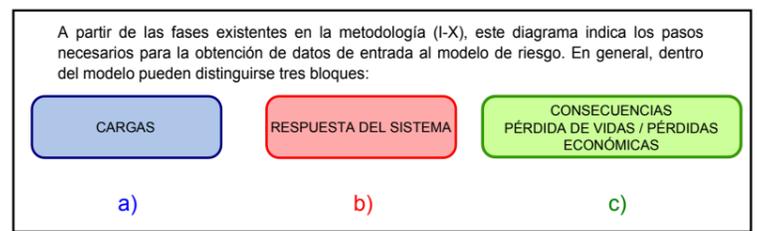
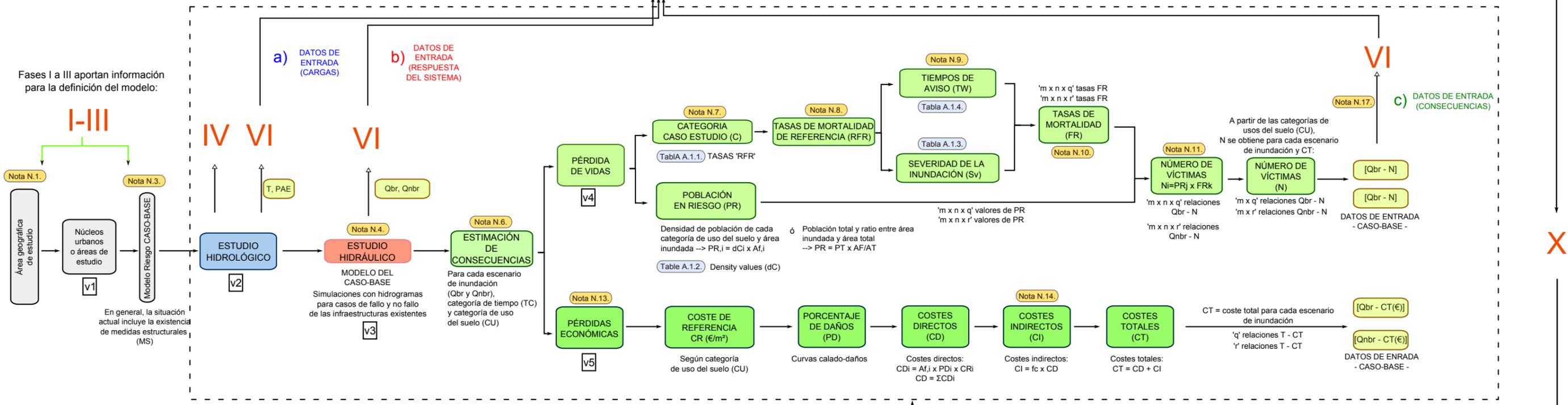
1B – Tablas y definición de parámetros para el diagrama A.1.

1C – Notas al diagrama A.1.

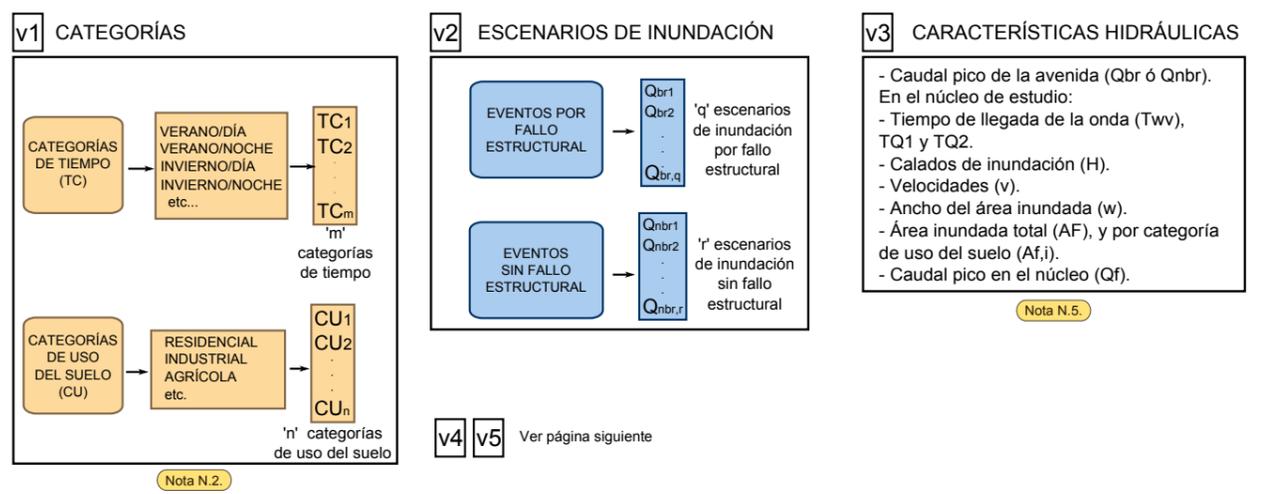
VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

VII - VIII - IX

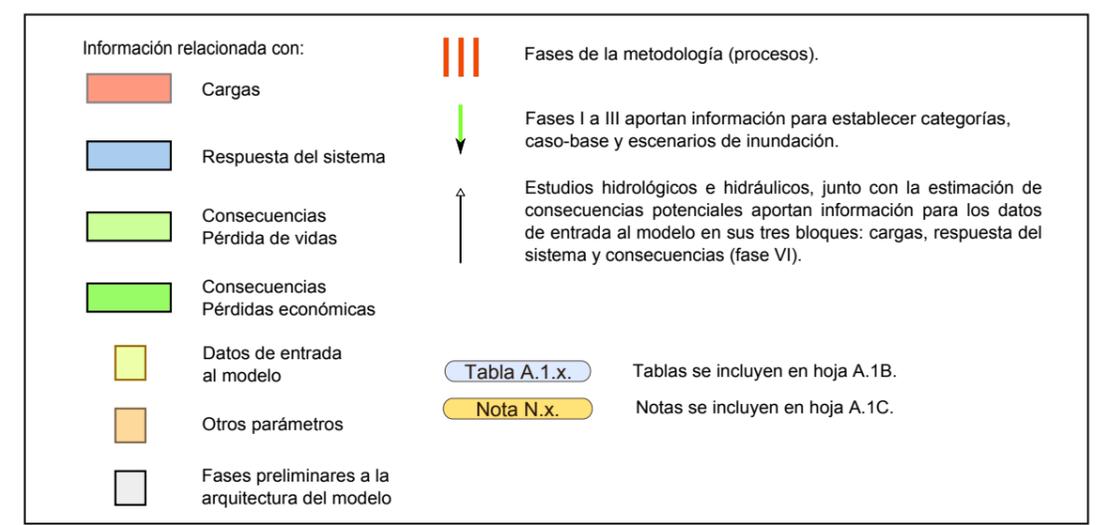
Datos de entrada al modelo en iPresas (modelo de riesgo)



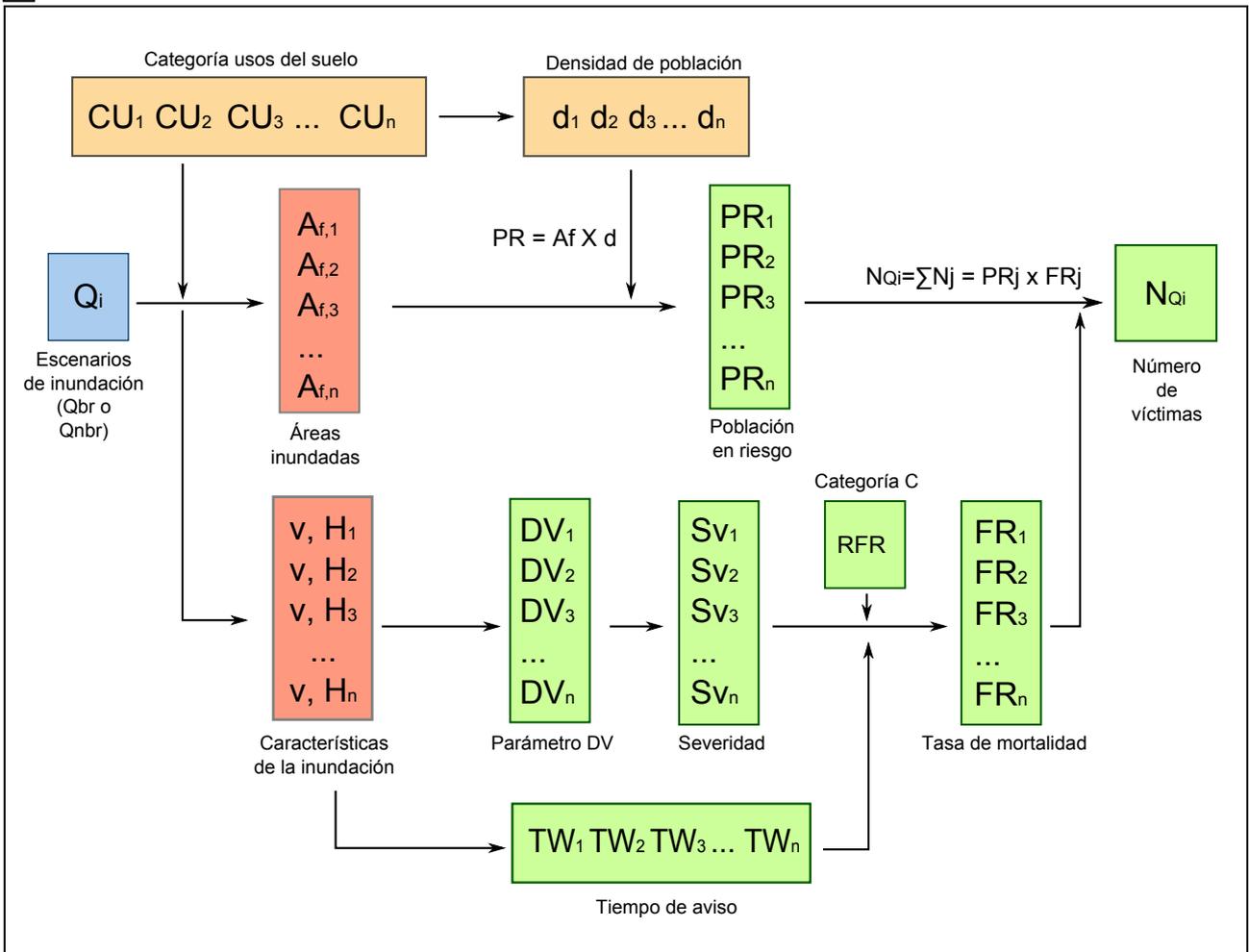
VARIABLES EMPLEADAS EN LA METODOLOGÍA SUFRI



LEYENDA



v4 PÉRDIDA DE VIDAS



v5 PÉRDIDAS ECONÓMICAS

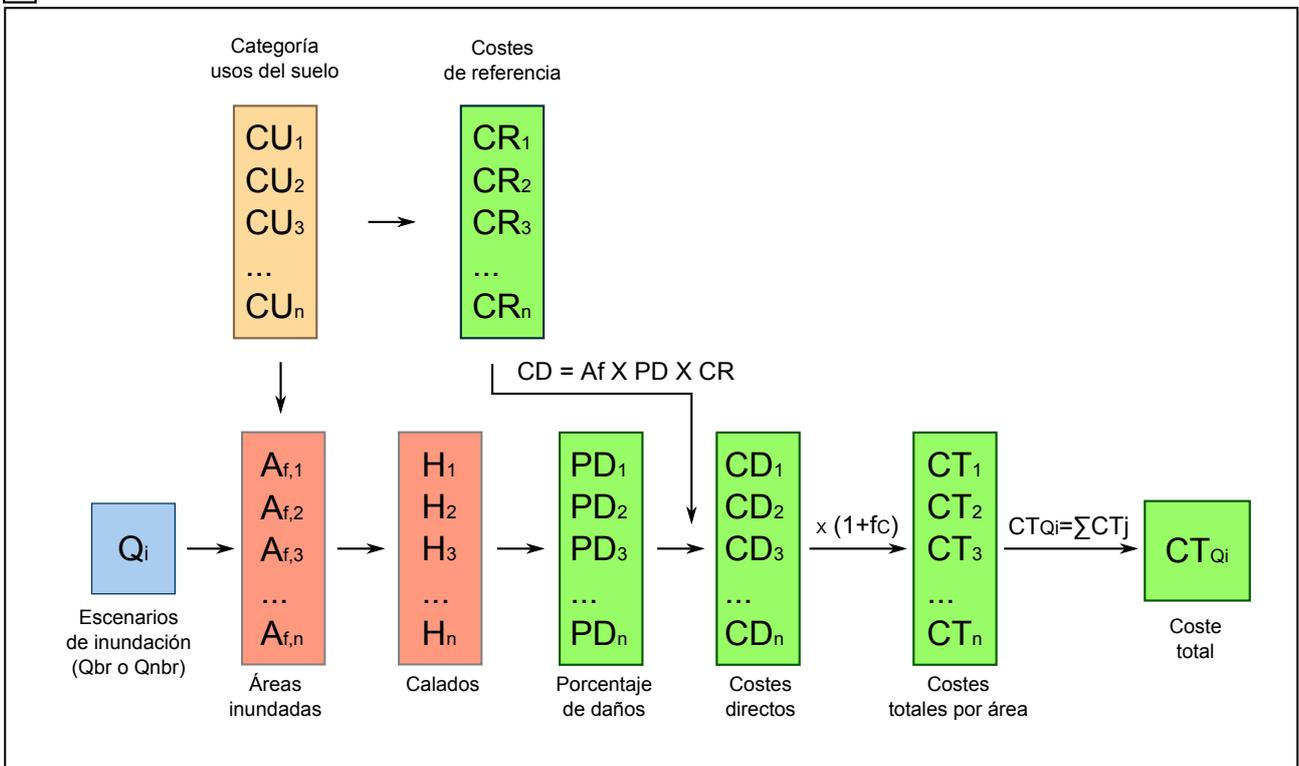


DIAGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO EN INUNDACIÓN FLUVIAL

HOJA A.1B. TABLAS DEL DIAGRAMA A.1.

A.1.1. DEFINICIÓN DE LA CATEGORÍA ASOCIADA A CADA NÚCLEO DE ESTUDIO PARA LA ASIGNACIÓN DE TASAS DE MORTALIDAD DE REFERENCIA (RFR) (Fuentes: [4],[11])

TABLA A.1.1. TASAS DE MORTALIDAD DE REFERENCIA SEGÚN CATEGORÍA.

Categoría (C)	t aviso TW (h)	Severidad (Sv)			
		Alta (3)	Media (2)	Baja (1)	
C1 - No existe formación a la población. - No se dispone de sistemas de aviso ni PEP. - No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - No existen medios de comunicación a la población.	0	0.9	0.3	0.02	RN
	0.25	0.9	0.3	0.02	
	0.625	0.7	0.08	0.015	
	1	-	0.06	0.0006	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C2 - No existe formación a la población. - No se dispone de PEP , aunque existen otros sistemas de aviso. - No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - No existen medios de comunicación a la población.	0	0.9	0.3	0.02	PEP No formación
	0.25	0.9	0.3	0.02	
	0.625	0.675	0.075	0.014	
	1	-	0.055	0.00055	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C3 - No existe formación a la población. - Existe PEP, pero no se ha implantado . - Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades (no existen protocolos). - No existen medios de comunicación a la población.	0	0.9	0.3	0.02	PEP No formación
	0.25	0.85	0.2	0.015	
	0.625	0.6	0.07	0.012	
	1	-	0.05	0.0005	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C4 - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes . - Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades, protocolos de comunicación. - No existen medios de comunicación a la población.	0	0.9	0.3	0.02	PEP No formación
	0.25	0.75	0.15	0.01	
	0.625	0.5	0.04	0.007	
	1	-	0.03	0.0003	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C5 - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población (sin comprobar).	0	0.9	0.3	0.02	PEP No formación
	0.25	0.75	0.15	0.01	
	0.625	0.5	0.0375	0.0065	
	1	-	0.0275	0.000275	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C6 - No existe formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados .	0	0.9	0.3	0.02	PEP No formación
	0.25	0.75	0.15	0.01	
	0.625	0.475	0.035	0.006	
	1	-	0.025	0.00025	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C7 - Formación a la población. - PEP implantado con sistemas de aviso. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados. ***Si se produce rotura sin avenida en 'C8', 'C9' y 'C10'.	0	0.9	0.3	0.02	Rot. Sin Avenida
	0.25	0.65	0.1	0.0075	
	0.625	0.4	0.02	0.002	
	1	-	0.01	0.0002	
	1.5	-	0.0002	0.0002	
C8 - Formación a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.	0	0.9	0.3	0.02	Rot. Sin Avenida
	0.25	0.55	0.06	0.006	
	0.625	0.35	0.01	0.0015	
	1	-	0.005	0.00015	
	1.5	-	0.0002	0.00015	
C9 - Formación a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.	0	0.9	0.3	0.02	Rot. Sin Avenida
	0.25	0.55	0.06	0.006	
	0.625	0.35	0.008	0.0015	
	1	-	0.004	0.000125	
	1.5	-	0.0002	0.0001	
C10 - Planes de formación continua a la población. - PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev. - Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades. - Medios de comunicación a la población implantados.	0	0.9	0.3	0.02	Mejor escenario
	0.25	0.5	0.03	0.005	
	0.625	0.3	0.005	0.001	
	1	-	0.002	0.0001	
	1.5	-	0.0002	0.0001	
	24	-	0.0002	0.0001	

Variación de la categoría en función de medidas no estructurales.

A.1.2. CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA POBLACIÓN EN RIESGO (PR)

Datos necesarios:
- Densidad del núcleo de población o área de estudio (d). En su defecto, población total del núcleo y área del núcleo urbano (puede diferir del área del término municipal).
- Altura promedio de los edificios (hm) o número de plantas promedio (np).
- Niveles de agua (calado de afección, H).

Siempre que np >2 ó hm >6.6m (ciudades con edificaciones elevadas y porcentaje considerable de edificios de más de dos plantas).

TABLA A.1.2. OBTENCIÓN DENSIDAD DE POBLACIÓN DE CÁLCULO (dC)

	Caso	dC
Número de plantas promedio (np)	h < h1p*	dC = d / np
	h1p < h < h2p	dC = d x 2 / np
	h > h2p	dC = d x (h/hp)/np
Altura promedio de los edificios (hm)	h < h1p	dC = d x h1p / hm
	h1p < h < h2p	dC = d x h2p / hm
	h > h2p	dC = d x h / hm

*donde h1p= 3.3m, h2p= 6.6m y hp = altura de una sola planta

(Fuente: Elaboración propia)

NOTA: En caso de existir varios núcleos (numerosas poblaciones de menor entidad), se recomienda calcular np ó hm de tres núcleos de diferente población total y emplear los valores como referencia, dividiendo en tres rangos (p.e. población(x): x<10,000; 10,000<x<100,000 y x>100,000).

A.1.3. CÁLCULO DE LA SEVERIDAD DE LA INUNDACIÓN (Sv)

Como norma general se establece la definición de categorías para la severidad de la inundación a partir del parámetro DV.

Datos necesarios:
- Caudal de afección en el punto de estudio (Qaf). $DV = \frac{Qaf - Q2.33}{b}$
- Caudal medio anual en el río en el punto de estudio (Q2.33).
- Ancho máximo alcanzado por el área inundada en dirección transversal al cauce en el punto de estudio (b).

En caso de no disponer de los datos anteriores pueden establecerse las categorías en función del calado de afección (H).

TABLA A.1.3. OBTENCIÓN CATEGORÍAS SEVERIDAD (Sv)

	DV	H
Categoría de Severidad (Sv)	Baja (1)	< 4.6 m ² /s < 3.3 m
	Media (2)	> 4.6 m ² /s > 3.3 m
	Alta (3)	Áreas cercanas a la presa**

(Fuente: [4])

**DSO-99-06 no incluye recomendaciones específicas para clasificar la transición entre severidad media y alta. Por tanto, salvo justificación, se establece severidad alta en aquellos núcleos que son totalmente devastados por la onda de avenida y no disponen de refugio (zonas elevadas, edificios, etc.) ni medios de evacuación.

Fuentes:
[3] Risk Based Profiling System (USBR, 2001) [6] PATRICOVA (2002)
[4] USACE (2008) [11] DSO-99-06 Procedure (Graham, 1999)
[22] Parker et al (2005)

A.1.4. FORMULACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO DE AVISO (TW) PARA CADA ESCENARIO DE INUNDACIÓN (AVENIDA DE ESTUDIO) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LA ONDA Y OTROS FACTORES DEPENDIENTES DEL DESARROLLO DE LA BRECHA, DEL ESCENARIO DE SOLICITACIÓN, LA EXISTENCIA DE PLAN DE EMERGENCIA Y LA CONSIDERACIÓN DE ROTURA / NO ROTURA DE LA PRESA.

-- TIEMPO DE AVISO PARA MODELOS CON RÉGIMEN NATURAL DEL CAUCE Y MEDIDAS ESTRUCTURALES (EXCEPTO PRESAS).

TW = TD = tQ2 - tQ1

donde TD es la diferencia de tiempo entre el alcance del caudal de alerta (capacidad del cauce, Q1) y el caudal de afección (primeras afecciones, Q2).

Día: TW = TD = tQ2 - tQ1
Noche: TA (h) = TD (h) - 0.25 (es 15 minutos inferior al tiempo de aviso de día)

-- TIEMPO DE AVISO PARA MODELOS CON PRESA AGUAS ARRIBA

Factor Modo Fallo (FMF)

Formación Brecha	TBR (h)	TBR (min)
Rápida	0.25	15
Media	0.75	45
Lenta	1.25	75

(Fuente: [3])

Factor Modo Fallo (FMF)

Modo de Fallo	VALOR MEDIO		DÍA		NOCHE	
	FMF (h)	FMF (min)	FMF (h)	FMF (min)	FMF (h)	FMF (min)
Sísmico	0.375	15-30	0.25	15	0.5	30
Erosión interna	0.375	15-30	0.25	15	0.5	30
Hidrológico	0.125	0-30	0	0	0.25	30

(Fuente: [3])

Factor Modo Fallo (FMF)

TA = Tiempo Onda (TO) + Tiempo Formación Brecha (TBR) - Factor Modo Fallo (FMF) - FPE

*Para el caso de No Rotura se considera la diferencia de tiempo entre el alcance del caudal de alerta y del caudal de afección, denominado TD. Debe restarse un factor FPE =30min por no tener Plan.

p.e. TBR=0.25h y FPE=0.5h. Datos y factores en horas.

ESCUENARIO	DÍA		NOCHE	
	TA= TO - 0.5	TA= TO - 0.75	TA= TO - 0.25	TA= TO - 0.5
SIN PLAN DE EMERGENCIA	Sísmico	TA= TO - 0.5	TA= TO - 0.75	TA= TO - 0.5
	Erosión interna	TA= TO - 0.5	TA= TO - 0.75	TA= TO - 0.5
	Hidrológico	TA= TD	TA= TD - 0.25	TA= TD - 0.5
	No rotura*	TA= TO - 0.25	TA= TO - 0.5	TA= TO - 0.5
	Rotura	TA= TO - 0.25	TA= TO - 0.5	TA= TO - 0.5

(Fuente: Elaboración propia)

Factor Modo Fallo (FMF)

TA = Tiempo Onda (TO) + Tiempo Formación Brecha (TBR) - Factor Modo Fallo (FMF)

**Para el caso de No Rotura se considera la diferencia de tiempo entre el alcance del caudal de alerta y del caudal de afección, denominado TD.

p.e. TBR=0.25h. Datos y factores en horas.

ESCUENARIO	DÍA		NOCHE	
	TA= TO	TA= TO - 0.25	TA= TD + 0.5	TA= TD + 0.25
PLAN DE EMERGENCIA	Sísmico	TA= TO	TA= TD + 0.5	TA= TD + 0.25
	Erosión interna	TA= TO	TA= TD + 0.5	TA= TD + 0.25
	Hidrológico	TA= TD + 0.5	TA= TD + 0.25	TA= TO
	No rotura**	TA= TO + 0.25	TA= TO + 0.25	TA= TO
	Rotura	TA= TO + 0.25	TA= TO + 0.25	TA= TO

(Fuente: Elaboración propia)

HOJA A.1C. NOTAS AL DIAGRAMA A.1.

CÓDIGO	NOTA
N.1.	Estudio del núcleo de población con riesgo de inundación, incluyendo zonas industriales u otros núcleos con víctimas potenciales. Datos de demografía, usos del suelo, tipologías de edificación, mapas, estadísticas, registros históricos de eventos anteriores, índices económicos, etc.
N.2.	Estudio de la variabilidad poblacional según: Momento del día, día de la semana, estación, eventos especiales, etc. p.e. Motivos de estudio, trabajo, período vacacional, etc. Para reducir el volumen de cálculos en casos de estudio con numerosas afecciones pueden obtenerse los resultados de consecuencias para dos categorías (p.e. verano/día y verano/noche) y después aplicar un factor de proporcionalidad para el resto de categorías de tiempo ($N_j = N_i \times PR_j / PR_i$)
N.3.	Se debe crear el modelo de riesgo para la situación actual, incluyendo las medidas estructurales existentes (caso base). No obstante, si se dispone de información, puede establecerse el modelo de riesgo para estudiar también el régimen natural (RN) como fase X. Una vez realizado el caso base, se plantean el análisis de medidas no estructurales (MNE) en la fase XI.
N.4.	Se efectúa el modelo hidráulico que aportará los datos necesarios de cada escenario de inundación. Se debe elegir un modelo que se ajuste a las características del cauce. Debe ser hidráulico, completo y dinámico, capaz de calcular en régimen supercrítico, subcrítico y sus transiciones, siendo preferibles los modelos unidimensionales a los bidimensionales (pues requieren de menor volumen de datos). El modelo debe ser capaz de modelar el régimen rápidamente variable producido por la onda de rotura. En general, será de lecho fijo, salvo excepciones. Algunos ejemplos son los modelos MIKE 11(DHI), SOBEK (Deltares) o HEC-RAS (USACE)
N.5.	Se define como caudal de alerta, Q1, el caudal que alcanza la capacidad del cauce, estableciéndose como umbral en el que la población puede percibir los primeros indicios de una posible avenida. Se define como caudal de afección, Q2, el caudal que genera afecciones a las primeras edificaciones (viviendas). La diferencia entre Q1 y Q2 dependerá de la distancia de las viviendas a la margen del cauce.
N.6.	El cálculo de inputs para el bloque de consecuencias del modelo de riesgo se divide en dos partes: pérdida de vidas y costes económicos.
N.7.	La categoría (C) para el cálculo de tasas de mortalidad de referencia (RFR) se establece en función de: (Tabla A.1.1.) - Entendimiento y formación a la población. - Comunicación. - Coordinación Servicios Emergencia y autoridades. - Implantación del PEP.
N.8.	Para una categoría dada (C), las TASAS DE REFERENCIA dependen de la severidad de la inundación (Sv) y del tiempo de aviso (TW). - Severidad (Sv): Alta, Media o Baja. - Tiempo de aviso (TW) : 0h, 0.25h, 0.625h, 1h, 1.5h y 24h. Cada categoría presenta 15 tasas de referencia.
N.9.	Los TIEMPOS DE AVISO varían en función de la situación correspondiente al caso base (existencia de diques, motas, balsas de retención, etc., con o sin presa aguas arriba) y de la existencia de medidas no estructurales (como PEP). En el caso de existir presa aguas arriba se define una expresión diferente, función del desarrollo de la brecha, de la implantación de PEP, etc. Debe distinguirse un valor del tiempo de aviso distinto para categorías de tiempo (TC) que difieran en día o noche. (Tabla A.1.4.)
N.10.	Para cada escenario de inundación considerado, las TASAS DE MORTALIDAD (FR) se obtienen de la interpolación de los valores de referencia (RFR) a partir del tiempo de aviso obtenido (TW) según el grado de severidad de la inundación (Sv). (Tabla A.1.3.)
N.11.	El NÚMERO POTENCIAL DE VÍCTIMAS (N) se obtiene para cada escenario de inundación, categoría de tiempo (TC) y uso del suelo (CU) como el producto de las tasas de mortalidad estimadas (FR) y la población en riesgo existente (PR): $N = PR \times FR$. Como regla de buena práctica, los resultados obtenidos en número de víctimas potenciales inferiores a la unidad se mayoran a 1.
N.12.	Para casos base correspondientes al régimen natural, el modelo de riesgo empleará como datos de entrada para el cálculo de consecuencias los pares de valores $Q_{max}-N$, donde Q_{max} es el caudal máximo del hidrograma asociado a cada periodo de retorno (sirve de identificador del escenario de inundación o avenida) y N, el número potencial de víctimas para dicho caudal Q_{max} .
N.13.	Los COSTES ECONÓMICOS asociados a cada escenario de inundación (suma de costes directos e indirectos) se obtienen de la estimación de un coste referencia por metro cuadrado (CR) según uso del suelo (CU). El coste se obtiene en función del porcentaje de daños (PD) en el área de inundación (curvas calado-daños).
N.14.	Los costes indirectos pueden establecerse como un porcentaje de los costes directos, estableciendo un factor fC. Este factor dependerá de cada núcleo de estudio en función del tipo de población, servicios, infraestructuras, etc. Puede definirse en un rango del 0% al 55% [6].
N.15.	En caso de realizar los cálculos para rotura instantánea de la presa (rotura sin avenida), deben emplearse los valores del Factor Modo Fallo (FMF, tabla A.2.4.) dados para escenario sísmico.
N.16.	La aplicación de medidas no estructurales puede suponer un porcentaje de reducción de los daños materiales producidos por la inundación. Este porcentaje puede estimarse a partir de curvas 'tiempo de aviso'-'porcentaje de reducción' ([22]), para calados de afección inferiores a 1.2 m (la severidad de la avenida es baja, cuando pueda realizarse una estimación adecuada del efecto de dichas medidas).
N.17.	La obtención de los inputs para el bloque de consecuencias aporta los listados que recogen los datos de pérdida de vidas y costes económicos asociados a cada escenario de inundación: Q_{max} (T) para régimen natural, Q_{br} para rotura y Q_{nbr} para no rotura. Estos listados se incluirán en el modelo de riesgo correspondiente.

Fuentes:

[3] Risk Based Profiling System (USBR, 2001)
[4] USACE (2008)

[6] PATRICOVA (2002)

[11] DSO-99-06 Procedure (Graham, 1999)
[22] Parker et al (2005)

NOTAS AL DIAGRAMA PARA LA
OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA
AL MODELO DE RIESGO EN
INUNDACIÓN FLUVIAL

Hoja A.1C.

NOTAS

APÉNDICE 2

DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO POR INUNDACIÓN PLUVIAL

El apéndice 2 incluye el diagrama de flujo para el desarrollo de la metodología SUFRI y estimación de datos de entrada al modelo de riesgo en inundación pluvial. El apéndice 2 contiene:

2A – Diagrama A.2.

2A*- Esquemas auxiliares al diagrama A.2.

2B – Tablas y notas al diagrama A.2.

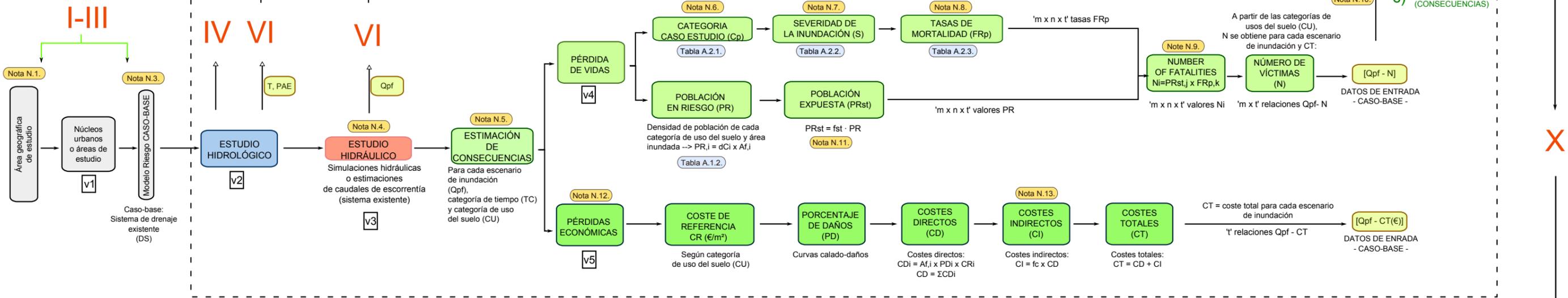
VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

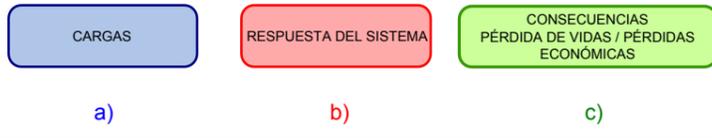
VII - VIII - IX

Datos de entrada al modelo en iPresas (modelo de riesgo)

Fases I a III aportan información para la definición del modelo:



A partir de las fases existentes en la metodología (I-X), este diagrama indica los pasos necesarios para la obtención de datos de entrada al modelo de riesgo. En general, dentro del modelo pueden distinguirse tres bloques:



Analizar el nuevo escenario (medidas estructurales o no estructurales) y establecer variaciones en datos de entrada al modelo respecto del caso-base.

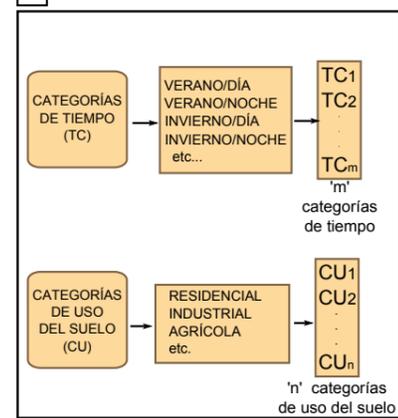
p.e. Categoría Cp, S, PR, PD...

Nota N.14



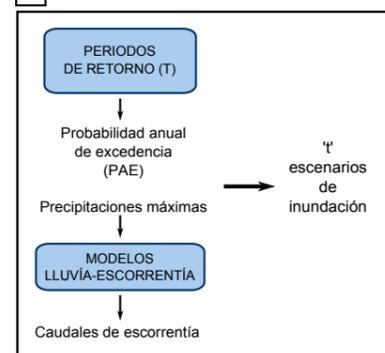
VARIABLES EMPLEADAS EN LA METODOLOGÍA SUFRI

v1 CATEGORÍAS



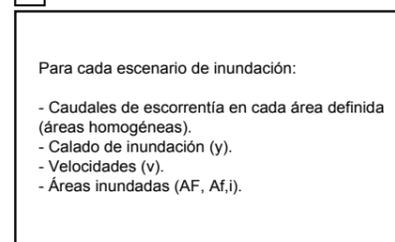
Nota N.2

v2 ESCENARIOS DE INUNDACIÓN



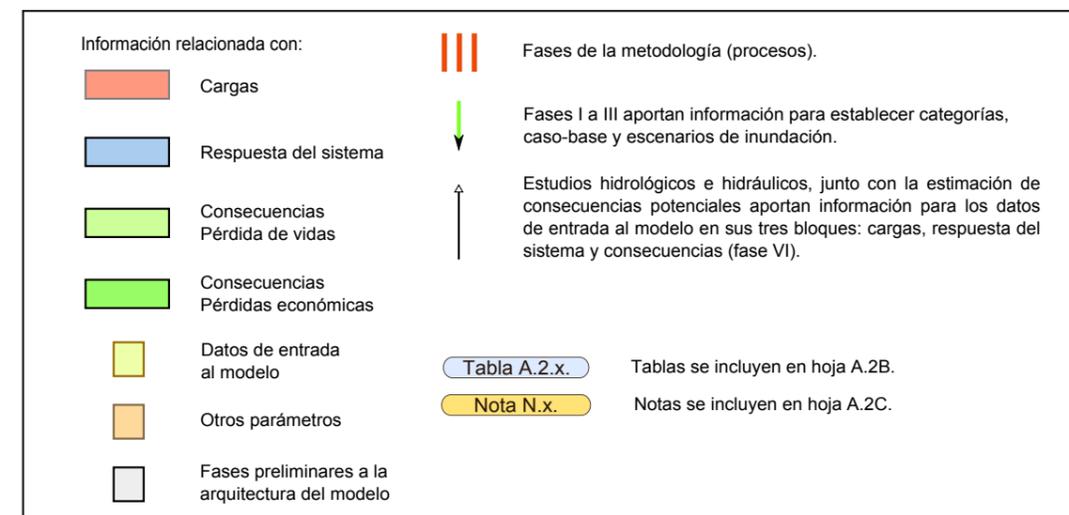
v4 v5 Ver página siguiente

v3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

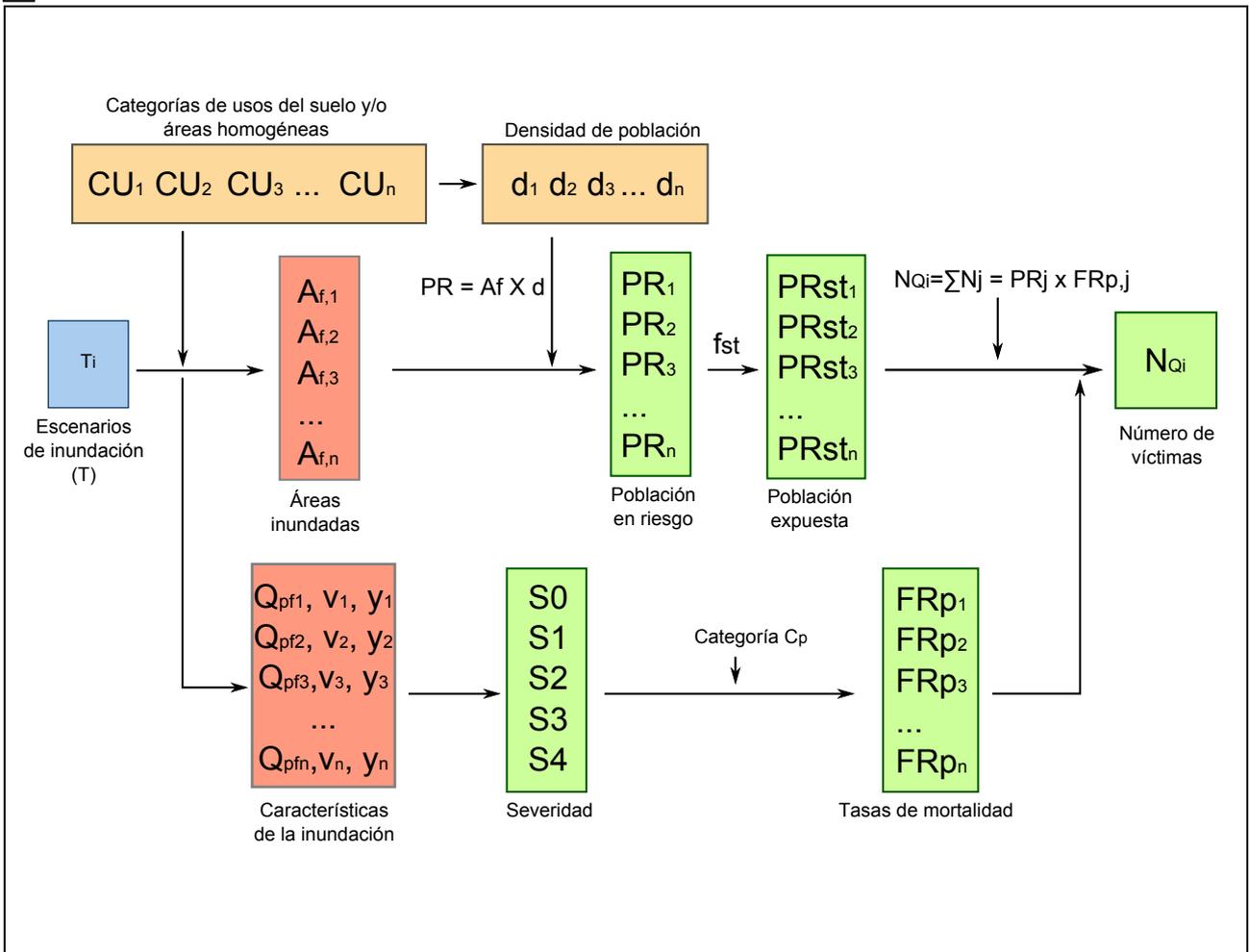


Nota N.4

LEYENDA



v4 PÉRDIDA DE VIDAS



v5 PÉRDIDAS ECONÓMICAS

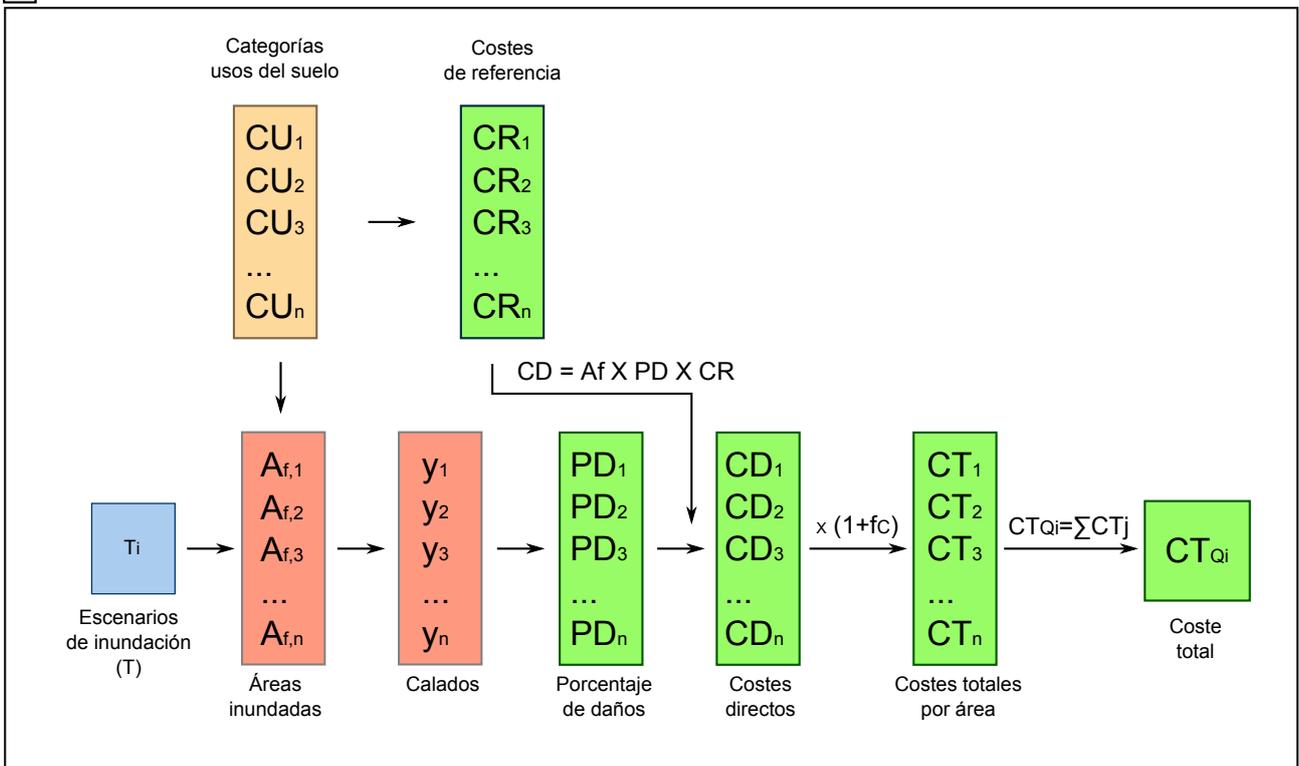


DIAGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO EN INUNDACIÓN PLUVIAL

Hoja A.2A*

VARIABLES

TABLA A.2.1. TABLA PARA LA DEFINICIÓN DE LA CATEGORÍA Cs ASOCIADA A CADA NÚCLEO DE ESTUDIO PARA LA ASIGNACIÓN DE TASAS DE MORTALIDAD(Fuentes:[23])

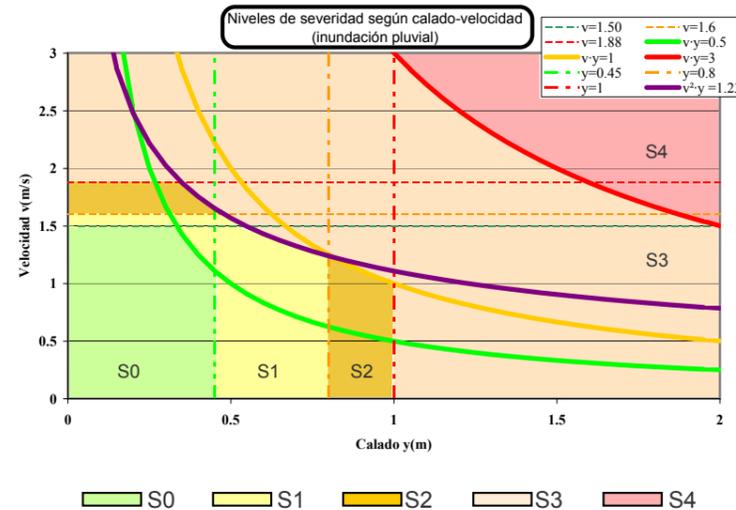
Categoría Cp	Descripción
Cp1	No existen sistemas de aviso.
Cp2	Existen sistemas de aviso pero son limitados.
Cp3	Sistemas de aviso efectivos y comprobados (p.e. Planes de actuación frente a emergencias).

TABLA A.2.3. TASAS DE MORTALIDAD EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DEL CASO DE ESTUDIO Y LA SEVERIDAD DE LA INUNDACIÓN.

Categoría Cp	Nivel de severidad S	Tasa,FRp	Rango para FRp
		(Valor propuesto)	(Valores mínimo y máximo)
Cp1	S0	0.0003	0 - 0.0009
	S1	0.0021	0.001 - 0.003
	S2	0.0038	0.0015 - 0.0045
	S3	0.0105	0.006 - 0.04
Cp2	S4	0.0448	0.01 - 0.11
	S0	0.0003	0 - 0.0008
	S1	0.0018	0.0012 - 0.0024
	S2	0.0033	0.0014 - 0.0037
Cp3	S3	0.009	0.005 - 0.035
	S4	0.0384	0.01 - 0.095
	S0	0.0002	0 - 0.00065
	S1	0.0015	0.001 - 0.002
Cp3	S2	0.0027	0.001 - 0.003
	S3	0.0075	0.004 - 0.028
	S4	0.032	0.009 - 0.08

TABLA A.2.2. NIVELES DE SEVERIDAD DE LA INUNDACIÓN (S).

Nivel de severidad (S)		Calado y(m)	Velocidad v(m/s)	Parámetro Vuelco v-y (m²/s)	Parámetro Deslizamiento v²-y (m³/s²)
S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50	<1.23
S1	<i>Severidad baja</i> Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad. Dificultades para caminar.	<0.80	<1.60	<1.00	<1.23
S2	<i>Severidad media</i> Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia, pueden llegar a flotar.	<1.00	<1.88	<1.00	<1.23
S3	<i>Severidad alta</i> Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre.	>1.00	>1.88	>1.00	>1.23
S4	<i>Severidad extrema</i> Daños estructurales a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00	>1.23



CÓDIGO	NOTA
N.1.	Estudio del núcleo de población con riesgo de inundación, incluyendo zonas industriales u otros núcleos con víctimas potenciales. Datos de demografía, usos del suelo, tipologías de edificación, mapas, estadísticas, registros históricos de eventos anteriores, índices económicos, etc.
N.2.	Estudio de la variabilidad poblacional según: Momento del día, día de la semana, estación, eventos especiales, etc. p.e. Motivos de estudio, trabajo, período vacacional, etc. Para reducir el volumen de cálculos en casos de estudio con numerosas afecciones pueden obtenerse los resultados de consecuencias para dos categorías (p.e. verano/día y verano/noche) y después aplicar un factor de proporcionalidad para el resto de categorías de tiempo (Nj=Ni x PRj/PRi)
N.3.	Se debe crear el modelo de riesgo para la situación actual, incluyendo la red de drenaje existente (caso base). Una vez realizado el caso base, se plantean alternativas para analizar medidas estructurales o no estructurales ME o (MNE).
N.4.	Se efectúa el modelo hidráulico que aportará los datos necesarios de cada escenario de inundación para los periodos de retorno establecidos. Se debe elegir un modelo que se ajuste a las características de la red de drenaje.
N.5.	El cálculo de inputs para el bloque de consecuencias del modelo de riesgo se divide en dos partes: pérdida de vidas y costes económicos.
N.6.	La categoría (Cp) para el cálculo de tasas de mortalidad en escorrentía pluvial se establece en función de la existencia de sistemas de aviso: (Tabla A.2.1.).
N.7.	El nivel de severidad de la inundación en inundación pluvial se divide en cinco niveles atendiendo a las características del flujo (calado y velocidad). Se establecen por tanto cinco niveles: S0 a S4.
N.8.	Para una categoría dada (Cp), las tasas de mortalidad (FRp) dependen de la severidad de la inundación (S).
N.9.	El NÚMERO POTENCIAL DE VÍCTIMAS (N) se obtiene para cada escenario de inundación, categoría de tiempo (TC) y uso del suelo (CU) como el producto de las tasas de mortalidad estimadas (FRp) y la población expuesta (PRst): N = PRst x FRp. Como regla de buena práctica, los resultados obtenidos en número de víctimas potenciales inferiores a la unidad se mayoran a 1.
N.10.	Para el caso base, el modelo de riesgo empleará como datos de entrada para el cálculo de consecuencias los pares de valores T-N, donde T es el periodo de retorno estudiado (sirve de identificador del escenario de inundación o avenida) y N es el número potencial de víctimas para dicho escenario.
N.11.	Los COSTES ECONÓMICOS asociados a cada escenario de inundación (suma de costes directos e indirectos) se obtienen de la estimación de un coste referencia por metro cuadrado (CR) según uso del suelo (CU). El coste se obtiene en función del porcentaje de daños (PD) en el área de inundación (curvas calado-daños).
N.12.	Los costes indirectos pueden establecerse como un porcentaje de los costes directos, estableciendo un factor fC. Este factor dependerá de cada núcleo de estudio en función del tipo de población, servicios, infraestructuras, etc. Puede definirse en un rango del 0% al 55% [6].
N.13.	La aplicación de medidas no estructurales puede suponer un porcentaje de reducción de los daños materiales producidos por la inundación. Este porcentaje puede estimarse a partir de curvas 'tiempo de aviso'-'porcentaje de reducción' ([22]), para calados de afección inferiores a 1.2 m (la severidad de la avenida es baja, cuando pueda realizarse una estimación adecuada del efecto de dichas medidas).

Fuentes: [6] PATRICOVA (2002)
[22] Parker et al (2005)
[23] Penning-Rowsell et al (2005)

APÉNDICE 3

CRITERIOS DE VULNERABILIDAD ASOCIADOS A INUNDACIÓN EN MEDIO URBANO

A continuación se muestran algunos de los criterios de vulnerabilidad asociados a inundación que se han desarrollado en las últimas décadas. Se clasifican en función de la variable de estudio considerada:

Criterios basados en el calado máximo ($y_{máx}$)

Criterio de Denver

Criterio definido en función de la cota máxima de la lámina de agua que no produzca la inundación de la planta baja de edificios. El umbral se establece en 0.45 m sobre el nivel mínimo de la calle.

Criterio de Mendoza

Similar al criterio de Denver con la definición del umbral en 0.30 m.

Criterio de Témez (1992)

Establece un valor de calado límite de 1 m [47] para la zona de inundación no peligrosa, con independencia de la velocidad del flujo.

Criterios basados en la velocidad máxima ($v_{máx}$)

Criterio de Témez (1992)

Establece un valor de velocidad límite de 1 m/s [47] para la zona de inundación no peligrosa, con independencia del calado de afección.

Criterio de Gómez y Russo (2009)

En 2009, Gómez y Russo [21] realizan un estudio experimental de un modelo físico a escala para la obtención de criterios de riesgo en medio urbano. Las conclusiones del estudio establecen tres niveles de riesgo en función de la velocidad del flujo:

- Riesgo leve: El individuo presenta problemas de estabilidad y dificultades para andar.
- Riesgo medio: Significativas pérdidas de estabilidad y de maniobrabilidad.

-Riesgo grave: El individuo es arrastrado por el agua y existe clara pérdida de maniobrabilidad.

La tabla A.3.1 muestra los rangos de velocidad asociados a las categorías anteriores.

<i>Categoría</i>	<i>v (m/s)</i>
Zona de seguridad	$v < 1.51$
Riesgo leve	$1.51 < v < 1.56$
Riesgo medio	$1.56 < v < 1.88$
Riesgo alto	$v > 1.88$

Tabla A.3.1. Categorías de riesgo en función de la velocidad. Gómez y Russo, 2009 [21]

Criterios basados en la estabilidad al vuelco ($[v \cdot y]_{m\acute{a}x}$)

Criterio de Témez (1992)

Establece un valor máximo del producto velocidad-calado igual a 0.50 m²/s para la zona de inundación no peligrosa.

FEMA (1979)

Establece un valor máximo del producto velocidad-calado igual a 0.56 m²/s a partir del cual un adulto comenzaría a presentar pérdida de estabilidad.

Reiter (2001)

En 2001, Reiter [43] establece una clasificación de la severidad de la inundación en función del producto calado-velocidad, distinguiendo 5 categorías.

<i>Categoría</i>	<i>v · y (m²/s)</i>
Severidad baja. Se espera que no haya víctimas.	0-0.5
Severidad alta. Población en peligro. Vehículos flotan.	0.5-1
Severidad baja para edificios, alto riesgo para la población que se encuentra en el exterior.	1.0-3.0
Severidad media para edificios (daños estructurales)	3.0-7.0
Severidad alta para edificios (destrucción)	>7.0

Tabla A.3. 2. Categorías de severidad en función del producto calado-velocidad. Reiter, 2001 [43].

Criterios basados en la estabilidad al deslizamiento ($[v^2 \cdot y]_{m\acute{a}x}$)

Nanía (1999)

Este criterio evalúa la capacidad del peatón para mantener la estabilidad al deslizamiento. Se obtiene del desarrollo teórico tras considerar igualdad de fuerzas entre la fuerza de fricción con el suelo y la fuerza de arrastre del agua. Tomando valores habituales del coeficiente de rozamiento y de arrastre, para un adulto de 60 kg

se obtiene un valor de $v^2 \cdot y = 1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$ [17]. Este valor puede adaptarse al peso y tamaño del peatón.

Criterios basados en calado y frecuencia ($v_{m\acute{a}x}$ y T)

Criterio de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad del Agua (DGOHCA) (Ministerio de Medio Ambiente, España, 2000) (Citado por Oleagordia et al [40]).

La clasificación de las zonas de riesgo en la llanura de inundación se establece en base a tres categorías:

- *Zonas de riesgo bajo o reducido*: aquéllas con calado inferior a 0.4 m para el periodo de retorno de 500 años.
- *Zonas de riesgo medio*: aquéllas comprendidas entre riesgo bajo y alto.
- *Zonas de riesgo alto*: aquéllas con calado superior a 0.4 m para el período de retorno de 50 años.

PATRICOVA (2002)

Atendiendo al calado de afección (como variable descriptora de la magnitud de la inundación) y a la frecuencia de la inundación (probabilidad anual de ocurrencia, obtenida como la inversa del periodo de retorno), el *Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana* (PATRICOVA, 2002) [11] propone seis niveles de peligrosidad.

<i>Nivel de calado</i>	<i>Frecuencia Baja</i> <i>T = 100 a 500 años</i>	<i>Frecuencia Media</i> <i>T = 25 a 100 años</i>	<i>Frecuencia Alta</i> <i>T < 25 años</i>
<i>Bajo (< 0.80 m)</i>	6 (BAJO)	4 (MEDIO)	3 (MEDIO)
<i>Alto (> 0.80 m)</i>	5 (BAJO)	2 (ALTO)	1 (ALTO)

Tabla A.3.3. Categorías de riesgo en función del producto calado y la frecuencia. PATRICOVA, 2002 [11].

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

APÉNDICE 4

CRITERIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE TASAS DE MORTALIDAD EN ESCORRENTÍA PLUVIAL

Introducción

Para la estimación de tasas de mortalidad en inundación por escorrentía pluvial se ha empleado la herramienta de cálculo propuesta por Penning-Rowse et al [42], en la que se define un valor estimado de pérdida de vidas en función de las características de la inundación (calado y velocidad), la vulnerabilidad del área de estudio (sistemas de aviso, desarrollo del evento de inundación y tipología de edificación) y la vulnerabilidad de la población, donde la vulnerabilidad de la población se mide por la edad de sus habitantes.

Por tanto, para cada nivel de severidad establecido en la presente metodología (S0 a S4) se han obtenido los valores de las tasas de mortalidad correspondientes siguiendo la herramienta propuesta por Penning-Rowse et al [42].

Procedimiento

La herramienta de cálculo propuesta por Penning-Rowse et al [42] presenta las siguientes variables:

Calado de la inundación:	y
Velocidad del agua:	v
Ratio calado-velocidad, HR:	$HR = y \cdot (v + 1.5)$
Vulnerabilidad del área, AV:	$AV = FW + SO + NA$

donde FW es el parámetro para incorporar la existencia o no de sistemas de aviso, SO representa la rapidez con que se produce el inicio de la inundación y NA incorpora la tipología de edificación.

Factor exposición, X (%):	$X (\%) = AV \cdot HR$
Población en el área de inundación:	$N(Z)$
Población expuesta al riesgo, N(ZE):	$N(ZE) = X \cdot N(Z)$

Factor P1, índice edad de la población:	P1
Factor P2, índice población altamente vulnerable:	P2
Vulnerabilidad de la población, Y (%):	$Y(\%) = P1+P2$
Número de afectados:	$N(ZE) \cdot Y$
Ratio víctimas/afectados (%):	$2 \cdot HR$
Número de víctimas:	$2 \cdot HR \cdot N(ZE) \cdot Y$

Para la estimación de tasas de mortalidad por escorrentía pluvial se han definido los siguientes valores:

- En cuanto a la vulnerabilidad del área de estudio:

Se establecen valores medios para la caracterización del desarrollo de la inundación ($SO=2$ de un rango de 1 a 3) y la tipología de edificación ($NA=2$ de un rango de 1 a 3).

Para la consideración o no de la existencia de sistemas de aviso, se establece la variable FW en niveles del 1 al 3, tal y como se propone en la herramienta de cálculo [27], siendo $FW=3$ el nivel correspondiente a la situación sin sistemas de aviso (es decir, para C_{p1} el valor de la variable FW es 3).

Por tanto, dados $SO=2$ y $NA=2$, el parámetro AV de vulnerabilidad del área varía de 5 a 7 para las categorías C_{p3} a C_{p1} , respectivamente.

- En cuanto a la vulnerabilidad de la población:

Se considera un valor intermedio para la edad de la población en riesgo ($Y=50\%$ de un rango de 0 a 100%). Este valor se corresponde con una edad media poblacional igual a la edad media nacional.

Por tanto, sustituyendo las variables descritas anteriormente, el número de víctimas es igual a:

$$\text{Víctimas} = 2 \cdot HR \cdot N(ZE) \cdot Y = 2 \cdot HR \cdot [N(Z) \cdot AV \cdot HR] \cdot Y$$

Tomando $Y=0.5$ (50%) y considerando que la tasa de mortalidad, FRp en la metodología SUFRI, es igual al cociente entre el número de víctimas y la población en riesgo, $N(Z)$:

$$FR_p = \frac{2 \cdot HR \cdot [N(Z) \cdot AV \cdot HR] \cdot Y}{N(Z)} = 2 \cdot HR^2 \cdot AV \cdot Y$$

$$FR_p = 2 \cdot (y \cdot (v + 1.5))^2 \cdot AV \cdot 0.5 \cdot 10^{-4} = y^2 \cdot (v + 1.5)^2 \cdot AV \cdot 10^{-4}$$

donde y se expresa en m, v en m/s, y AV adquiere los valores $AV = 5$ para C_{p3} , $AV = 6$ para C_{p2} y $AV = 7$ para C_{p1} . Las variables $2 \cdot HR$ y $N(Z)$ se expresan en tanto por cien, por ello, se incorpora un factor 10^{-4} en la formulación para la obtención de las tasas de mortalidad.

La obtención de las tasas de mortalidad, FR_p , se ha efectuado considerando los valores intermedios de calado y velocidad del flujo para cada nivel de severidad de la inundación (S0 a S4). Siendo estos valores:

	$y(m)$	$v(m/s)$	$y \cdot v(m^2/s)$
S0	0.3	0.8	0.24
S1	0.65	1.15	0.75
S2	0.9	1.1	0.99
S3	1.25	1.6	2
S4	2	2.5	5

Tabla A.4.1. Valores de calado y velocidad para obtención de tasas.

Los rangos de valores mínimos-máximos de FR_p estimados se han obtenido a partir de un análisis de sensibilidad de los resultados empleando los calados máximos posibles dentro de cada nivel de severidad, fijando el valor de la velocidad en 1 m/s. Del mismo modo, se procede para analizar la sensibilidad al valor de la velocidad, tomando $y = 0.45$ m.

Por tanto, para cada categoría de población, C_p , se han obtenido tasas de mortalidad para las siguientes características de inundación

Severidad	$y(m)$	$v(m/s)$	$y \cdot v(m^2/s)$	Severidad	$y(m)$	$v(m/s)$	$y \cdot v(m^2/s)$
S0	0.44	1	0.44	S0	0.45	1	0.45
S1	0.79	1	0.79	S1	0.45	1.59	0.72
S2	0.99	1	0.99	S2	0.45	1.87	0.84
S3	2.99	1	2.99	S3	0.45	5	2.25
S4	5	1	5	S4	0.45	8	3.6

Tabla A.4.2. Valores de calado y velocidad para obtención de rangos.

De los resultados obtenidos del cálculo para las características descritas en las Tablas A.4.1 y A.4.2, se establece la siguiente clasificación:

Categoría	Nivel de severidad	Tasa, FR_p (Valor propuesto)	Rango para FR_p (Valores mínimo y máximo)
C_{p1}	$S0$	0.0003	0-0.0009
	$S1$	0.0021	0.001-0.003
	$S2$	0.0038	0.0015-0.0045
	$S3$	0.0105	0.006-0.04
	$S4$	0.0448	0.01-0.11
C_{p2}	$S0$	0.0003	0-0.0008
	$S1$	0.0018	0.0012-0.0024
	$S2$	0.0033	0.0014-0.0037
	$S3$	0.0090	0.005-0.035
	$S4$	0.0384	0.01-0.095
C_{p3}	$S0$	0.0002	0-0.00065
	$S1$	0.0015	0.001-0.002
	$S2$	0.0027	0.001-0.003
	$S3$	0.0075	0.004-0.028
	$S4$	0.0320	0.009-0.08

Tabla A.4.3. Tasas de mortalidad en inundación pluvial propuestas en la metodología SUFRI.

APÉNDICE 5

COSTES DE REFERENCIA Y CURVAS CALADO-DAÑOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS ECONÓMICAS

Valor económico de referencia

Los datos para asignar los valores del coste de referencia para cada categoría del uso del suelo considerada pueden obtenerse de estadísticas oficiales, datos de aseguradoras, estudios de mercado, etc.

Se incluyen en este apartado dos ejemplos: en primer lugar, la tabla de referencia propuesta por PATRICOVA [11], y, en segundo lugar, los valores incluidos por la *International Commission for the protection of the Rhine (IKSR 2001, recogidos por HRWallingford Ltd. [33])*, estableciendo valores aproximados para diferentes usos del suelo. Estos valores, por ser procedentes de estudios realizados en Alemania, deben ajustarse en función del caso de estudio según índices del PIB, comparando con los niveles del país o región en cuestión.

Código	Denominación Uso	Magnitud	
		Alta	Baja
00	Residencial general	68.7	22.9
01	Residencial de baja densidad	68.7	22.9
02	Residencial de media densidad	56.3	18.8
03	Residencial de alta densidad	75.0	25.0
04	Residencial de muy alta densidad	100.0	33.3
05	Acampadas-caravanas, prefabricados	68.7	22.9
00 a 04	Uso comercial en residencial	51.8	17.3
06	Industrial, almacenes, talleres	16.9	5.6
07	Industrial, almacenes, ... baja densidad	16.9	5.6
08	Industrial, almacenes, ... alta densidad	23.7	7.9
09	Equipamientos, servicios, infraestructuras	51.8	17.3
10	Terciario	51.8	17.3
11	Mixto	51.8	17.3
12	Otros y sin definir	0	0
20	Regadío hortícolas	0.89	
21	Regadío cereales	0.34	
22	Regadío arrozal	0.34	
23	Regadío frutales	0.56	
24	Regadío cítricos	0.86	
25	Otros	0.34	
36-40	Secano herbáceos	0.34	
	Secano viña, olivo, frutales	0.56	
Resto		0	

Tabla A.5.1. Costes de referencia según usos del suelo (PATRICOVA, 2002) [11].

<i>Categoría Uso del suelo</i>	<i>Valor para bienes fijos (€/m²)</i>	<i>Valor para bienes móviles (€/m²)</i>	<i>Total (€/m²)</i>
Zonas residenciales	231	59	289
Zonas industriales	231	80	311
Viaro urbano	263	2	265
Zonas agrícolas	-	-	9
Zonas forestales	-	-	1

Tabla A.5.2. Costes de referencia según usos del suelo (IKSR, 2001) [33].

Curvas calado-daños

Las curvas calado-daños son gráficos que representan el calado de la inundación frente al porcentaje de daños en bienes materiales, en función del uso del suelo, la categoría del tipo de edificación y/o su contenido.

A continuación se muestran algunas de las curvas calado-daños presentes en la bibliografía:

Curvas calado-daños genéricas

Estas curvas no distinguen entre usos del suelo o tipos de edificación. Por ejemplo, los ratios calado-daños sugeridos por el PATRICOVA [11] no hacen distinción entre daños a la estructura o al contenido y se definen para un uso genérico. La clasificación del uso del suelo (incluyendo densidad) se incorpora en la aplicación de un coste o valor económico diferente para cada categoría del uso del suelo.

La Tabla A.5.3 incluye los valores de la curva calado-daños propuesta por PATRICOVA en 2002 [11], representados en la Figura A.5.1.

<i>Calado (m)</i>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<i>Daños (%)</i>	1%	2.50%	5%	14%	40%	60%	67%	71%	75%	77%

Tabla A.5.3. Ratios calado-daños recogidos por el PATRICOVA, 2002 [11].

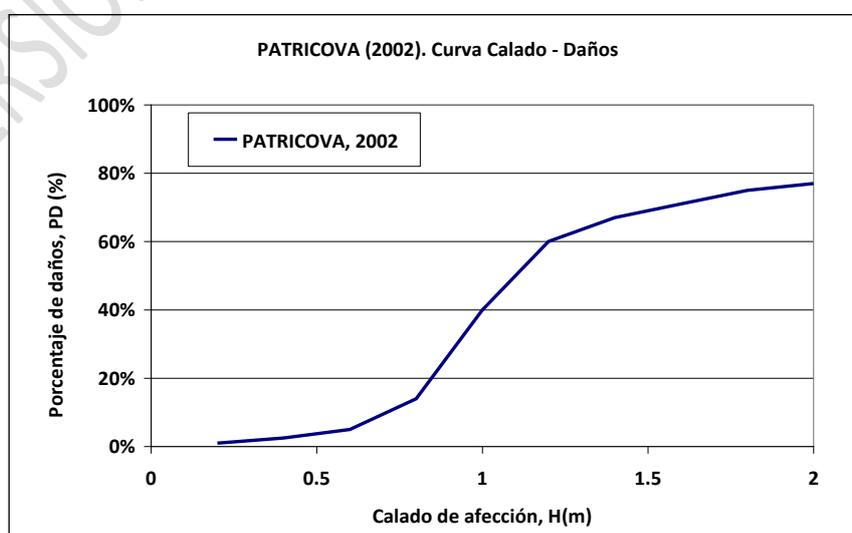


Figura A.5.1. Curva calado-daños. Adaptado de PATRICOVA, 2002 [11].

Curvas calado-daños para edificaciones

Existen curvas calado-daños propuestas por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE 2000, 2003) que distinguen los siguientes aspectos [49]:

- *Valor de la estructura.* Dato inicial para la estimación del valor del contenido.
- *Relación calado-daños* para la estructura. Nivel de daños como porcentaje del valor de la estructura. Depende del número de plantas y de la existencia o no de sótano.
- *Ratio contenido-estructura.* *Estimación del valor económico del contenido.* Debe establecerse un tipo de ocupación para la estructura.
- *Relación calado-daños* para el contenido. Nivel de daños como porcentaje del valor del contenido. También depende del número de plantas y de la existencia o no de sótano.

Las curvas calado-daños propuestas por USACE [49] consideran como calado de afección cero el nivel de la planta baja (es decir, cuando el agua alcanza un calado de 4 significa que se encuentra a 4 pies¹⁶ sobre dicho nivel).

		Sin sótano							
		Estructura				Contenido			
		Una planta.		Dos o más plantas.		Una planta.		Dos o más plantas.	
Calado (ft)	Calado (m)	Daños (%)	SD ¹⁷	Daños (%)	SD	Daños (%)	SD	Daños (%)	SD
-2	-0.7	0%	0.00%	0%	0.00%	0%	0.00%	0%	0.00%
-1	-0.3	2.50%	2.70%	3.00%	4.10%	2.40%	2.10%	1.00%	3.50%
0	0.0	13.40%	2.00%	9.30%	3.40%	8.10%	1.50%	5.00%	2.90%
1	0.3	23.30%	1.60%	15.20%	3.00%	13.30%	1.20%	8.70%	2.60%
2	0.7	32.10%	1.60%	20.90%	2.80%	17.90%	1.20%	12.20%	2.50%
3	1.0	40.10%	1.80%	26.30%	2.90%	22.00%	1.40%	15.50%	2.50%
4	1.3	47.10%	1.90%	31.40%	3.20%	25.70%	1.50%	18.50%	2.70%
5	1.7	53.20%	2.00%	36.20%	3.40%	28.80%	1.60%	21.30%	3.00%
6	2.0	58.60%	2.10%	40.70%	3.70%	31.50%	1.60%	23.90%	3.20%
7	2.3	63.20%	2.20%	44.90%	3.90%	33.80%	1.70%	26.30%	3.30%
8	2.6	67.20%	2.30%	48.80%	4.00%	35.70%	1.80%	28.40%	3.40%
9	3.0	70.50%	2.40%	52.40%	4.10%	37.20%	1.90%	30.30%	3.50%
10	3.3	73.20%	2.70%	55.70%	4.20%	38.40%	2.10%	32.00%	3.50%
11	3.6	75.40%	3.00%	58.70%	4.20%	39.20%	2.30%	33.40%	3.50%
12	4.0	77.20%	3.30%	61.40%	4.20%	39.70%	2.60%	34.70%	3.50%
13	4.3	78.50%	3.70%	63.80%	4.20%	40.00%	2.90%	35.60%	3.50%
14	4.6	79.50%	4.10%	65.90%	4.30%	40.00%	3.20%	36.40%	3.60%
15	5.0	80.20%	4.50%	67.70%	4.60%	40.00%	3.50%	36.90%	3.80%
16	5.3	80.70%	4.90%	69.20%	5.00%	40.00%	3.80%	37.20%	4.20%

Tabla A.5.4. Ratios calado-daños recogidos por USACE, 2000 [49].

¹⁶ Las unidades empleadas en las curvas originales se expresan en pies (ft), donde 3.3m=10pies.

¹⁷ Desviación estándar (SD) del valor del porcentaje de daños aportado para cada calado de afección.

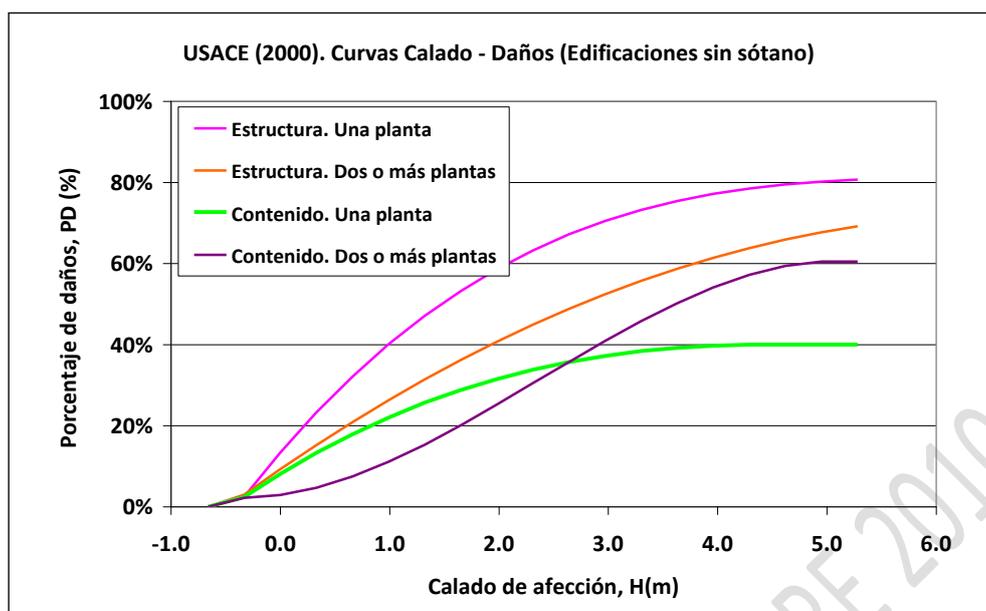


Figura A.5.2. Curva calado-daños para edificios sin sótano. Adaptado de USACE, 2000 [49].

		Con sótano							
		Estructura				Contenido			
		Una planta.		Dos o más plantas.		Una planta.		Dos o más plantas.	
Calado (ft)	Calado (m)	Daños (%)	SD	Daños (%)	SD	Daños (%)	SD	Daños (%)	SD
-8	-2.6	0%	0.00	2%	2.70	0%	1.60	0%	0.00
-7	-2.3	0.70%	1.34	1.70%	2.70	0.80%	1.16	1.00%	2.27
-6	-2.0	0.80%	1.06	1.90%	2.11	2.10%	0.92	2.30%	1.76
-5	-1.7	2.40%	0.94	2.90%	1.80	3.70%	0.81	3.70%	1.49
-4	-1.3	5.20%	0.91	4.70%	1.66	5.70%	0.78	5.20%	1.37
-3	-1.0	9.00%	0.88	7.20%	1.56	8.00%	0.76	6.80%	1.29
-2	-0.7	13.80%	0.85	10.20%	1.47	10.50%	0.74	8.40%	1.21
-1	-0.3	19.40%	0.83	13.90%	1.37	13.20%	0.72	10.10%	1.13
0	0.0	25.50%	0.85	17.90%	1.32	16.00%	0.74	11.90%	1.09
1	0.3	32.00%	0.96	22.30%	1.35	18.90%	0.83	13.80%	1.11
2	0.7	38.70%	1.14	27.00%	1.50	21.80%	0.98	15.70%	1.23
3	1.0	45.50%	1.37	31.90%	1.75	24.70%	1.17	17.70%	1.43
4	1.3	52.20%	1.63	36.90%	2.04	27.40%	1.39	19.80%	1.67
5	1.7	58.60%	1.89	41.90%	2.34	30.00%	1.60	22.00%	1.92
6	2.0	64.50%	2.14	46.90%	2.63	32.40%	1.81	24.30%	2.15
7	2.3	69.80%	2.35	51.80%	2.89	34.50%	1.99	26.70%	2.36
8	2.6	74.20%	2.52	56.40%	3.13	36.30%	2.13	29.10%	2.56
9	3.0	77.70%	2.66	60.80%	3.38	37.70%	2.25	31.70%	2.76
10	3.3	80.10%	2.77	64.80%	3.71	38.60%	2.35	34.40%	3.04
11	3.6	81.10%	2.88	68.40%	4.22	39.10%	2.45	37.20%	3.46
12	4.0	81.10%	2.88	71.40%	5.02	39.10%	2.45	40.00%	4.12
13	4.3	81.10%	2.88	73.70%	6.19	39.10%	2.45	43.00%	5.08
14	4.6	81.10%	2.88	75.40%	7.79	39.10%	2.45	46.10%	6.39
15	5.0	81.10%	2.88	76.40%	9.84	39.10%	2.45	49.30%	8.08
16	5.3	81.10%	2.88	76.40%	12.36	39.10%	2.45	52.60%	10.15

Tabla A.5.5. Ratios calado-daños recogidos por USACE, 2003 [49].

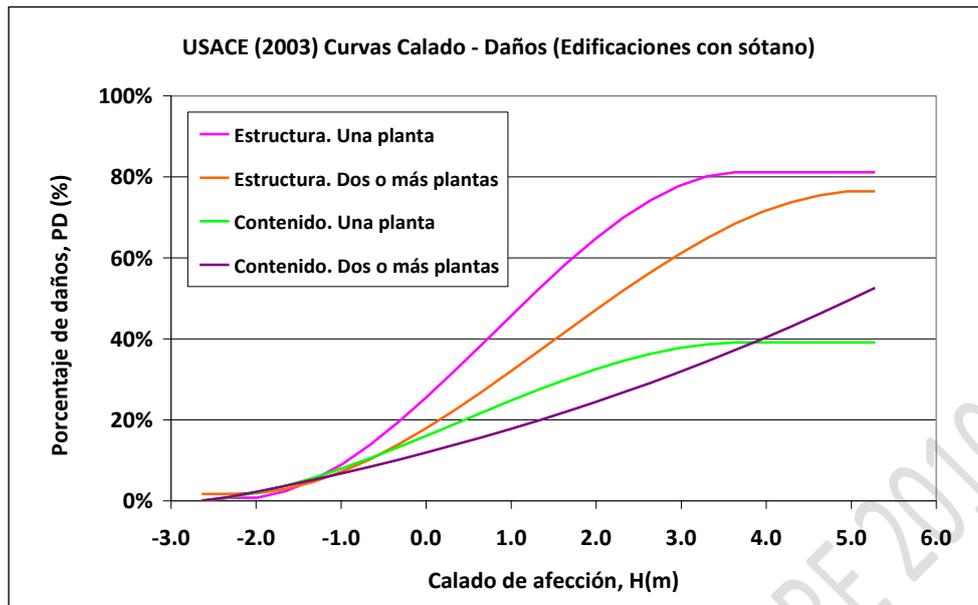


Figura A.5.3. Curva calado-daños para edificios con sótano. Adaptado de USACE, 2003 [49].

Curvas calado-daños para múltiples categorías

Existen funciones calado-daños para diferentes categorías de bienes (Elsner et al en 2003 [17], basado en Klaus y Schmidtke, 1990).

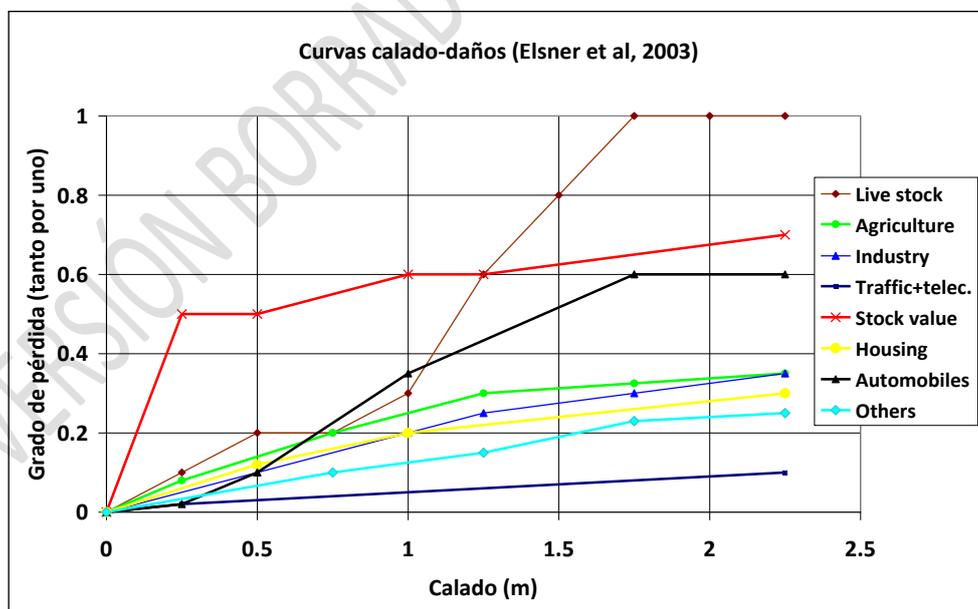


Figura A.5.4. Curva calado-daños. Elsner et al, 2003 [17]

Relaciones calado-daños para viario urbano

En el caso de considerar daños en vías de comunicación, puede definirse un valor de calado crítico a partir del cual se seleccionan los tramos de vía afectados con calados superiores a dicho valor y se realiza el sumatorio de la longitud total de vía afectada (INUNCAT, 2009 [1] propone como calado crítico un valor de 0.30 m, calado a partir del cual los vehículos pierden adherencia, se desestabilizan y pueden comenzar a flotar).

Curvas calado-daños para vehículos

Existen también curvas calado-daños para la estimación de costes en el parque de vehículos (Scawthorn et al, 2006 [44]).

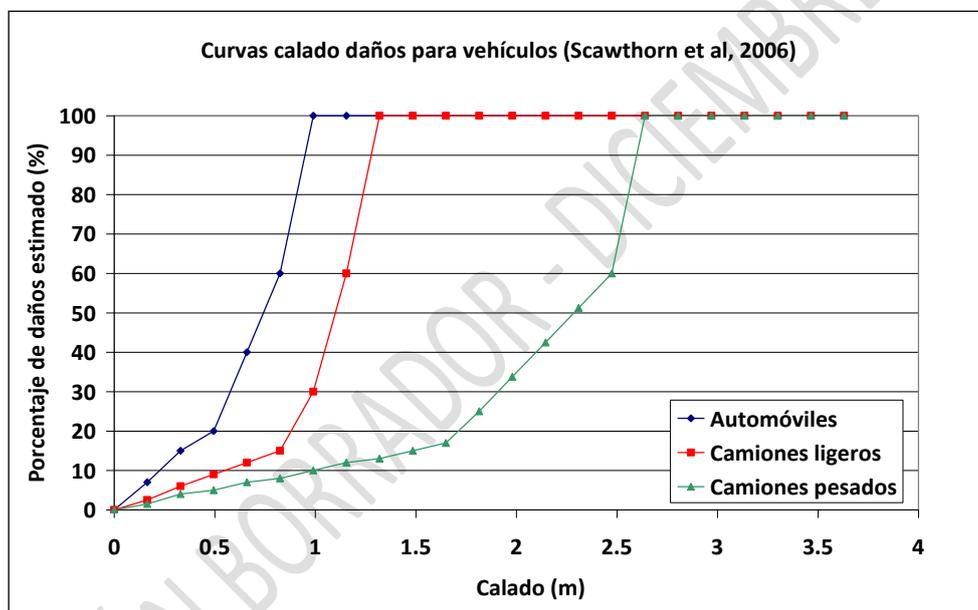


Figura A.5.5. Curva calado-daños para vehículos. Adaptado de Scawthorn et al, 2006 [44].

APÉNDICE 6

PLANTILLAS-TIPO PARA EL CÁLCULO

(Las plantillas-tipo se incorporan en un CD junto con los archivos del caso práctico descrito en el Apéndice 9)

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010

APÉNDICE 7

ESQUEMAS-TIPO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE RIESGO

Como ya se ha descrito en la metodología SUFRI, el esquema del modelo de riesgo puede dividirse, generalmente, en tres bloques de nodos: cargas, respuesta del sistema y consecuencias.

El esquema del modelo de riesgo depende de las características de cada caso de estudio y de las medidas estructurales existentes. La arquitectura del modelo puede requerir un diagrama más complejo en aquellos casos en los que deban analizarse varias infraestructuras de defensa (p.e. grandes presas, diques, balsas de retención, encauzamientos, etc.)

En este apéndice se incluyen algunos ejemplos de esquemas-tipo para la arquitectura del modelo de riesgo en inundación fluvial y pluvial.

Régimen Natural

Como ejemplo de construcción del modelo de riesgo con el software iPresas para el cálculo del riesgo de inundación asociado al régimen natural de un río, se muestra en la Figura A.7.1 un esquema genérico para el modelo a desarrollar en iPresas.

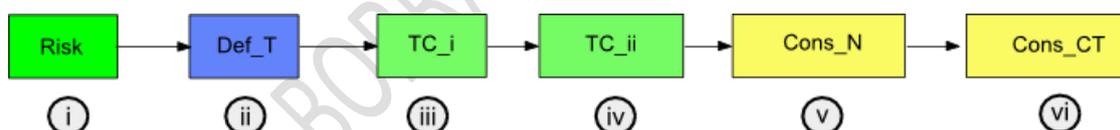


Figura A.7. 1. Esquema genérico modelo de riesgo para inundación fluvial para régimen natural.

La Figura A.7.1 muestra la estructura general que podría asociarse al modelo de riesgo del régimen natural de un río. Los nodos del modelo se corresponden con la siguiente información:

- i. *Risk*. Este nodo se incluye al inicio del diagrama para permitir el cálculo del riesgo social y económico total. Sólo requiere de la definición de una variable (p.e. 'risk'), con una única opción (p.e. 'total') de probabilidad igual a 1.
- ii. *Def_T*. Este nodo incorpora los periodos de retorno establecidos (T) y las probabilidades asociadas a los mismos ($f=1/T$). Cada periodo de retorno está asociado a un caudal máximo del hidrograma.

- iii. *TC_i*. Este nodo incluye la información necesaria para distinguir entre las categorías de tiempo establecidas para la variabilidad estacional y las probabilidades asociadas a cada periodo (p.e. considerando como estación estival los meses de julio y agosto, resultan probabilidades de ‘verano’=0.167 e ‘invierno’=0.833).
- iv. *TC_ii*. Este nodo incorpora la información concerniente a la distinción entre día y noche (p.e. una probabilidad de 0.6 para día y 0.4 para noche).
- v. *Cons_N*. Este nodo se vincula a los archivos que contienen la información procedente de la estimación de consecuencias en pérdida de vidas (relaciones T-N: periodos de retorno y estimación en pérdida de vidas para el caudal representativo de la avenida, asociado a dicho T).
- vi. *Cons_CT*. Este nodo se vincula a los archivos que contienen la información procedente de la estimación de consecuencias en términos económicos (relaciones T-CT: periodos de retorno y estimación de costes potenciales para el caudal representativo de la avenida, asociado a dicho T).

Medidas estructurales (presa)

En este punto se muestra como ejemplo la arquitectura del modelo de riesgo genérico para el cálculo del riesgo de inundación asociado a la existencia de una presa aguas arriba del núcleo de estudio.

La Figura A.7.2 muestra el esquema genérico del modelo de riesgo de una presa con dos modos de fallo en escenario hidrológico¹⁸. De forma resumida, los nodos del modelo presentado contienen la siguiente información:

- i. *Niv_prev*. Contiene las probabilidades asociadas a cada uno de los rangos de niveles existentes en la presa, extraídas del estudio de niveles previos del embalse.
- ii. *Op_Comp*. Aporta la información resultante del estudio de fiabilidad de compuertas.
- iii. *AEP*. Probabilidades anuales de excedencia de las avenidas consideradas, a partir del estudio hidrológico.
- iv. *Laminación*. Información de niveles máximos y caudales a partir de los datos de entrada anteriores.
- v. *MF*. Establecimiento de modos de fallo y probabilidades de rotura.
- vi. *Qrot*. Relación de caudales de rotura de la presa a partir de los niveles máximos alcanzados.

¹⁸ Manual de usuario, iPresas [45].

vii. *Nodos de consecuencias en vidas y euros.* Información referida a la estimación de consecuencias económicas y en pérdida de vidas para los casos de no rotura, rotura y riesgos incrementales.

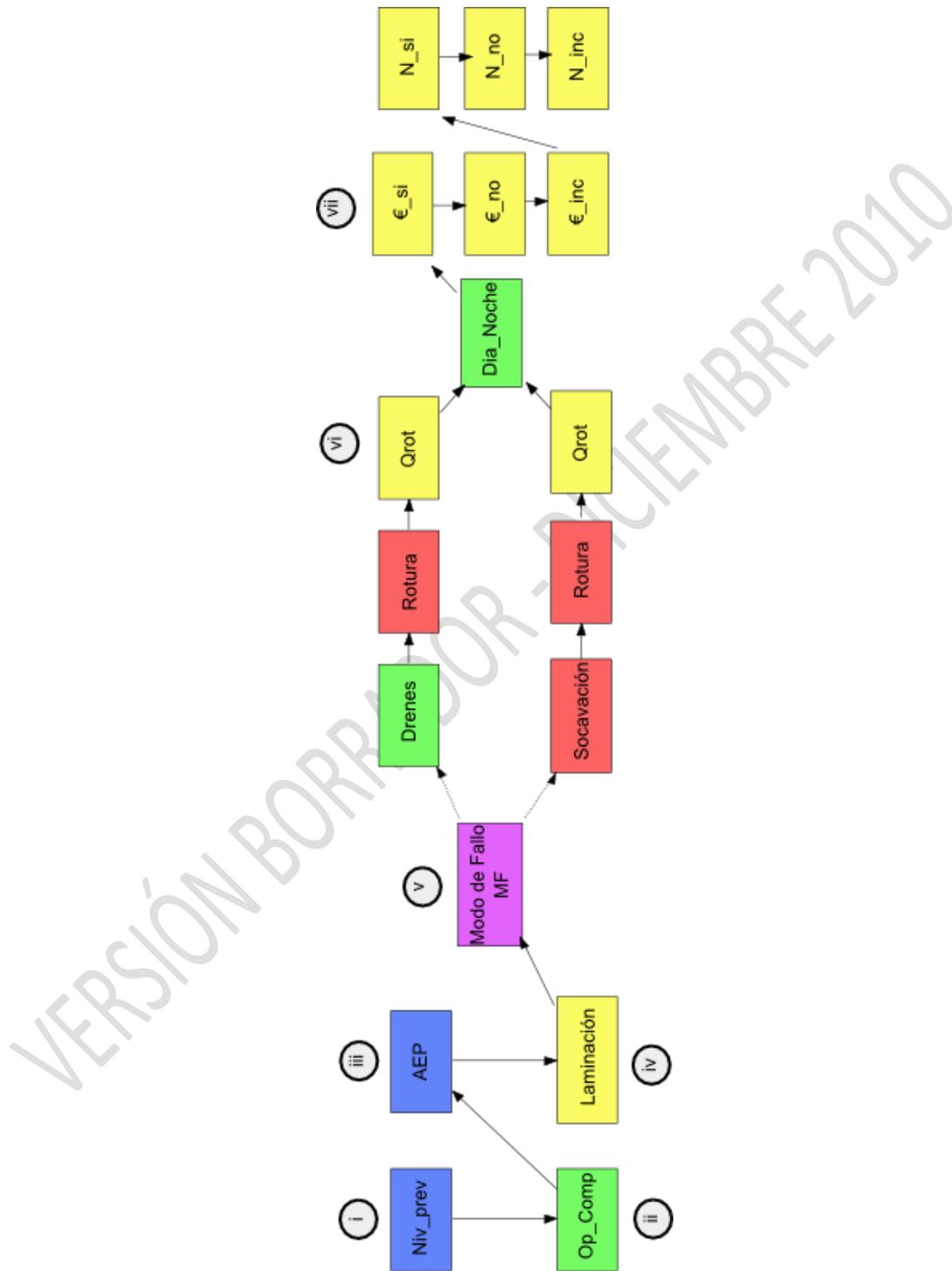


Figura A.7.2. Esquema genérico modelo de riesgo para inundación fluvial con presa aguas arriba de la población de estudio.

Medidas no estructurales

A continuación, se muestra el ejemplo para la arquitectura del modelo de riesgo genérico para el cálculo del riesgo de inundación asociado a la existencia de una presa aguas arriba del núcleo de estudio y la aplicación de medidas no estructurales. La Figura A.7.3 muestra el esquema del modelo de riesgo con medidas estructurales e indica los nodos que incluyen modificaciones por aplicación de medidas no estructurales.

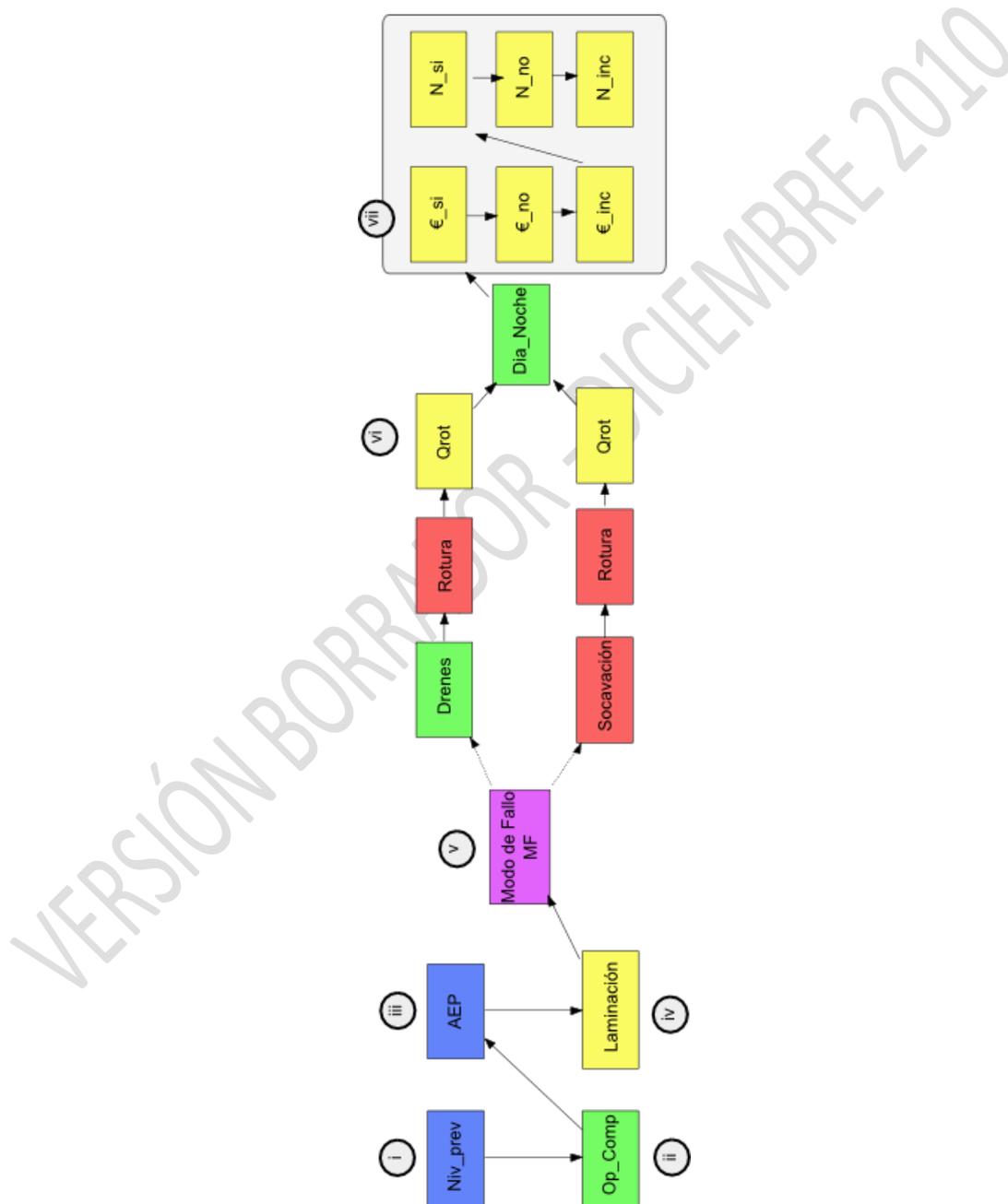


Figura A.7.3. Esquema genérico modelo de riesgo para inundación fluvial considerando medidas no estructurales.

La aplicación de medidas no estructurales implica una serie de modificaciones en el proceso de estimación de consecuencias (en vidas y en euros) que se incorporan al modelo de riesgo en los nodos sombreados de la Figura A.7.3.

Inundación pluvial

La arquitectura del modelo de riesgo para el análisis de inundación por inundación pluvial presenta una estructura similar al caso presentado para inundación fluvial por régimen natural del cauce.

Las diferencias radican en el contenido de los nodos, donde se deben especificar los archivos con los datos necesarios para el modelo: nodo de inicio para el cálculo de riesgo social y económico total (nodo *PF*), periodos de retorno estudiados y sus probabilidades de excedencia (nodo *Flood*), variabilidad estacional (*TC_i*), diaria (*TC_ii*), caudales de escorrentía (*Runoff*) y estimación de consecuencias (*Cons_N* y *Cons_CT*) para cada periodo de retorno (en función de las características hidráulicas de la escorrentía generada por cada evento de precipitación asociado a un determinado T).



Figura A.7.4. Esquema genérico modelo de riesgo para inundación por inundación pluvial.

Curvas F-N

Una vez se ejecuta el programa pueden obtenerse los resultados necesarios para la representación de curvas F-N.

Para ello, debe efectuarse la siguiente secuencia en iPresas (UPV, 2010 [45]): *Archivo* → *Exportar F-N...* y seleccionar del cuadro de diálogo el identificador del resultado de consecuencias ('vidas'¹⁹ para riesgo social y 'euros' para riesgo económico). Se genera un listado con valores de consecuencias (en 'vidas' o en 'euros') y los valores de probabilidad anual de excedencia asociados. Estos valores pueden representarse en un gráfico de ejes logarítmicos tal y como se muestra en la Figura A.7.5.

El eje de abscisas muestra el nivel de consecuencias (en pérdida de vidas, N, o costes potenciales, €) y el eje de ordenadas representa la probabilidad anual de excedencia acumulada (tomando como dato los resultados del listado procedente del programa).

¹⁹ El identificador será la etiqueta con que se haya identificado a la pérdida de vidas, N, en los listados de datos de entrada.

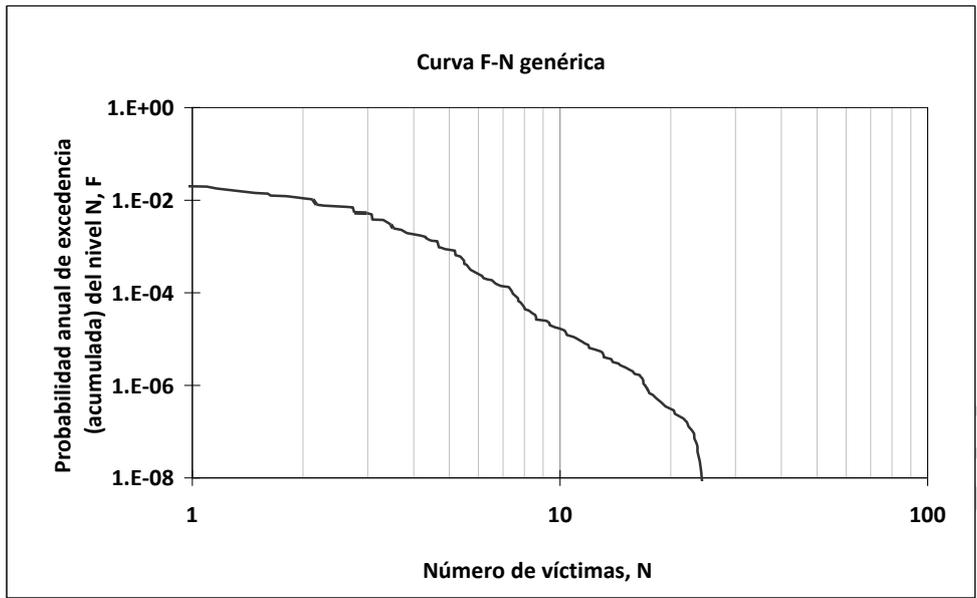


Figura A.7.5. Ejemplo de curva F-N.

APÉNDICE 8

CRITERIOS DE TOLERABILIDAD FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIÓN

La definición de criterios de tolerabilidad para el riesgo de inundación es la base para la gestión del riesgo de inundación, ya que el concepto de riesgo tolerable es fundamental para la toma de decisiones (Munger et al, 2009 [37]).

En general, se pueden definir tres rangos generales de tolerabilidad. La primera región es la región de no aceptación, donde el riesgo existente solo puede ser justificado en circunstancias extraordinarias. La segunda región es el rango de tolerabilidad, donde el riesgo se encuentra bajo el límite de tolerabilidad. En esta región el riesgo debe ser analizado ya que solo es aceptado por la sociedad si cumple el principio ALARP (tan bajo como sea razonablemente posible). Por lo tanto, el riesgo solo es tolerable si su reducción es impracticable o si los costes de su reducción son desproporcionados. Por último, la región de amplia aceptación comprende el riesgo que puede ser considerado insignificante, ya que puede ser controlado adecuadamente.

La Figura A.8.1 muestra esquemáticamente los rangos descritos anteriormente.

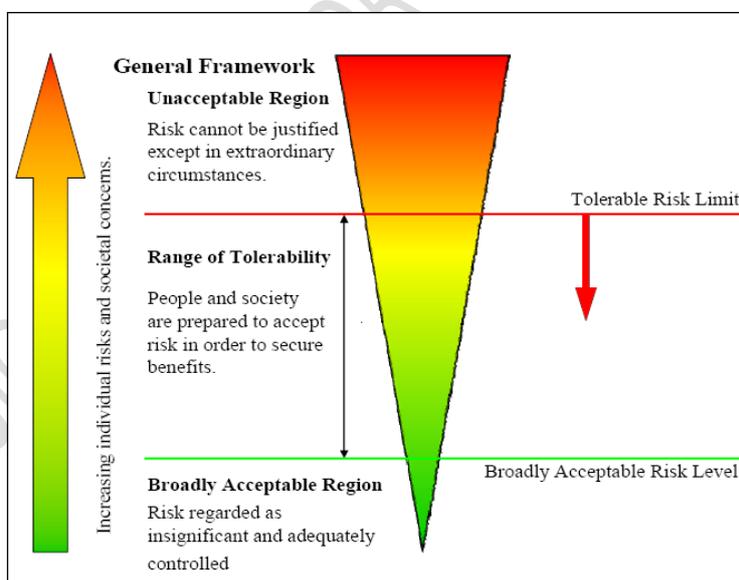


Figura A.8.1. Representación conceptual de los rangos de tolerabilidad de riesgos (HSE, 2001) [23].

Sin embargo, en la mayoría de países no se han desarrollado criterios legales para la tolerabilidad de los riesgos de inundación. En general, los pocos criterios desarrollados se pueden dividir en los que hacen referencia a la tolerabilidad del riesgo individual

(riesgo que asume la persona más expuesta) y los que la hacen a la tolerabilidad del riesgo social.

Riesgo individual

Respecto a la tolerabilidad del riesgo individual, Holanda es el país con una legislación más avanzada, limitando este riesgo según un factor que depende de la voluntariedad para asumir el riesgo (Vrijling, 2001 [50]). Otras normas de este tipo, aunque menos desarrolladas, son las que limitan la probabilidad anual de ocurrencia de una inundación en zonas urbanas.

Respecto a los criterios para limitar el riesgo social, el más conocido es el desarrollado por Vrijling en 2001 [50]. Este criterio introduce unas rectas en las curvas F-N que permiten delimitar el límite de tolerabilidad en estas curvas. Para ello utiliza diversos parámetros en función de la aceptación del riesgo y de las características de la población.

Además, desde el Comité Técnico para la Construcción de Infraestructuras de Defensa en Países Bajos propone una limitación del riesgo individual (IR) igual a:

$$IR < \beta \cdot 10^{-4}$$

donde β es un factor que varía en función del grado de voluntariedad en relación a la participación en la actividad. Se proponen valores situados entre 0.01 (para acciones involuntarias) y 10 (para acciones con el propósito de obtener beneficio personal). La Figura A.8.2 muestra valores tipo del factor β , situado entre 0.1 y 1 en el caso de diques de protección en zonas urbanas.

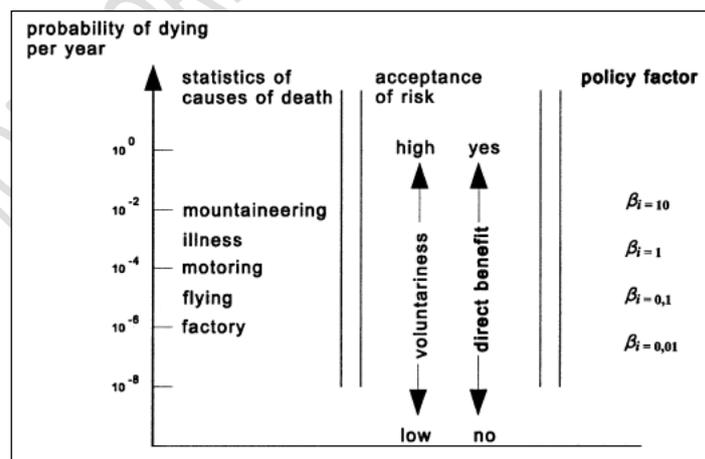


Figura A.8.2. Riesgo individual en países occidentales [50].

Riesgo social

En general, los criterios de riesgo individual deben ser coherentes con límites de riesgo social.

El riesgo social es la relación entre la frecuencia y el número de víctimas en una población a partir de la consecución de amenazas específicas, como es el caso del riesgo de inundación. El riesgo social se evalúa normalmente mediante curvas F-N que representan la relación entre la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y el número de víctimas.

Con respecto a la consideración del riesgo social existen formulaciones que establecen criterios de comparación para la evaluación del riesgo existente. La representación de estos criterios limitan las zonas de aceptabilidad de la curva F-N.

En Jonkman et al (2008) [27], se establece que el riesgo social aceptable a escala nacional (en Países Bajos) puede limitarse a partir de la siguiente ecuación:

$$1 - F_N(n) < C_N / n^\alpha$$

donde $F_N(n)$ es la función de distribución acumulada del número de víctimas, C_N es una constante que determina la posición vertical de la curva F-N límite a escala nacional ($\text{yr}^{-1}\text{fat}^{-\alpha}$), y α es el coeficiente de aversión al riesgo que determina la pendiente de la curva F-N ($\alpha = 1$ refleja riesgo neutral).

El valor de C_N puede obtenerse de la fórmula propuesta por Vrijling et al [50]:

$$C_N = \left(\frac{\beta \cdot 100}{k} \right)^2$$

donde se propone un valor de $k=3$ y un valor del factor $\beta=0.1$.

Cuando se emplea la ecuación anterior para el estudio de una única instalación, en lugar de un análisis a escala nacional, el valor C_N se denota como C_i .

La Figura A.8.3 muestra los niveles de tolerabilidad asociados a $C_N=4$ y $C_N=100$ para la curva F-N de la provincia de South Holland, en Países Bajos.

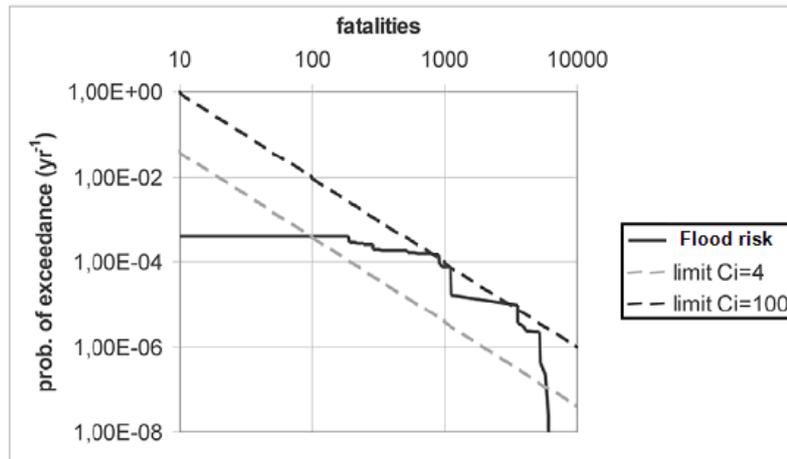


Figura A.8.3. Ejemplo de aplicación de distintos criterios de tolerabilidad en South Holland sobre curvas F-N (Jonkman, 2007 [25]).

Existen criterios de tolerabilidad adicionales, desarrollados para el análisis del riesgo incremental por existencia de grandes presas. Estos criterios también emplean curvas F-N, como son los criterios propuestos por ANCOLD [2]. Sin embargo, no pueden emplearse para evaluar el riesgo social total por inundación como es el caso del método propuesto por Vrijling [50].

En resumen, las curvas F-N pueden ser una herramienta muy útil para la evaluación del riesgo social por inundación, aunque deben desarrollarse diferentes criterios para cada país en función de las características a escala nacional. Además, el desarrollo de criterios de tolerabilidad para el análisis del riesgo económico puede facilitar el estudio de casos en los que existen elevadas consecuencias económicas pero bajos niveles de pérdida de vidas humanas.

APÉNDICE 9

CASO PRÁCTICO

La metodología SUFRI se aplica a un caso práctico ficticio para mostrar los pasos a seguir para el análisis del riesgo de inundación fluvial y pluvial en un núcleo urbano. Este caso práctico se fundamenta en información de un núcleo urbano real en España, sin embargo, se han efectuado algunas simplificaciones para esta aplicación inicial de la metodología SUFRI, permitiendo un mejor entendimiento de la herramienta.

INTRODUCCIÓN

El caso práctico se basa en una localidad ubicada en el norte de España, cuyo núcleo urbano es dividido en dos zonas por el curso de un río. La localidad está situada 8 Km aguas abajo de una presa (Figura A.9.1). El área urbana se compone principalmente de zonas residenciales, además de un pequeño polígono industrial al sureste de la misma (Figura A.9.2).

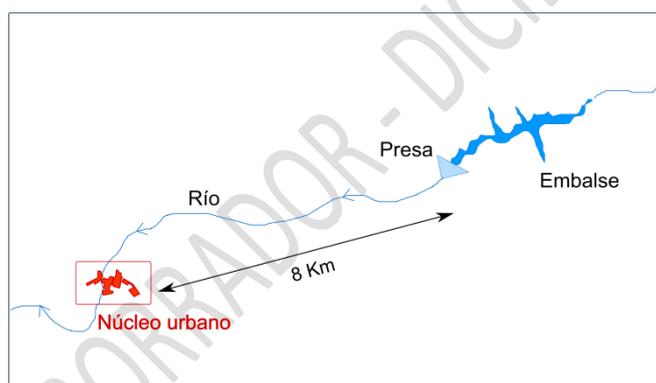


Figura A.9.1. Esquema situación ciudad-presa.

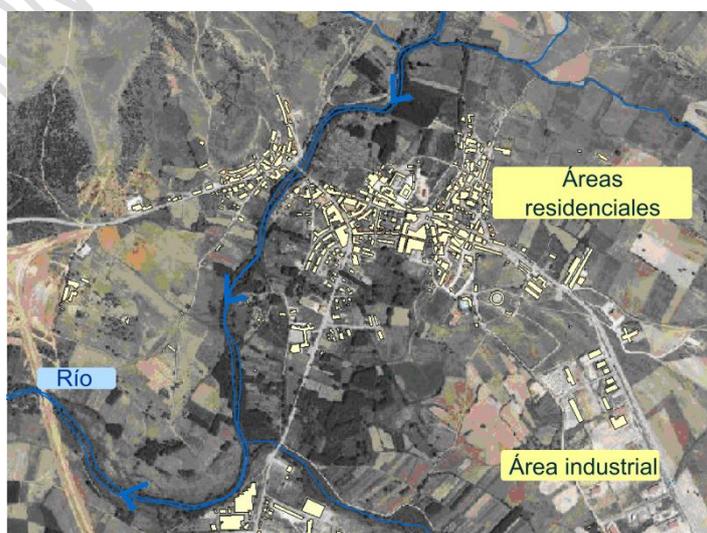


Figura A.9.2. Vista aérea del núcleo urbano y situación de la zona industrial.

En primer lugar, se analizar el riesgo de inundación de origen fluvial y pluvial por separado, para posteriormente, efectuar el análisis conjunto del caso práctico a partir de la combinación de ambas situaciones.

INUNDACIÓN FLUVIAL

FASE I. ÁMBITO DEL ESTUDIO

En este caso práctico se definen tres escenarios de estudio para el núcleo urbano:

- Situación actual (correspondiente a la existencia de la presa y de un encauzamiento, denominado caso-base),
- Situación con medidas no estructurales (para analizar el efecto de la implantación de un Programa de Formación a la población en materia de Riesgo de inundación, denominado caso-PFR), y,
- Situación sin ningún tipo de medidas (para la comparación con las dos situaciones anteriores, correspondiente al régimen natural del río, denominado caso-RN).

El propósito de este apartado consiste en el análisis del riesgo existente por inundación fluvial y el efecto en reducción del riesgo que puede obtenerse por la aplicación de medidas de formación.

FASE II. REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Una vez se establecen los objetivos del análisis del caso práctico debe obtenerse toda la información necesaria relacionada con el núcleo urbano y las infraestructuras existentes para realizar el modelo de riesgo del caso-base.

En este punto se enumeran algunos ejemplos de la documentación o información obtenida tras la recopilación de datos:

- Información de eventos de inundación anteriores.
- Modelo Digital del Terreno.
- Mapas de usos del suelo.
- Demografía y estadísticas de población
 - Población total: 1986 habitantes.
 - Variabilidad diaria: 256 habitantes.
 - Variabilidad estacional: 800 habitantes.

- Tipología de edificaciones, número de viviendas, etc.
 - o Altura media de los edificios: 2.1 plantas/vivienda.
- Identificación de áreas vulnerables (zonas de acampada, hospitales, etc.): No existen.
- Índices económicos y valor de bienes inmuebles.
 - o Costes de referencia: Uso residencial, 49.29 €/m², y uso industrial, 14.3 €/m².
- Información sobre características del río:
 - o Hidrogramas del régimen natural para periodos de retorno de 2 a 10,000 años.
 - o Caudal medio anual: $Q_{2.33}=29.3 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - o Caudal pico que alcanza la capacidad del cauce a su paso por el núcleo urbano: $Q_1 = 150 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - o Caudal pico que afecta a las primeras viviendas o edificios del núcleo urbano: $Q_2=200 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Características de la presa, estudio de operatividad de compuertas, niveles previos, laminación, posibles modos de fallo, hidrogramas de rotura, etc.
 - o Caudales pico de los hidrogramas de salida de la presa por laminación de avenidas, Q_{nbr} : 121.5 m³/s, 244.6 m³/s, 351.6 m³/s, 632.7 m³/s y 782.6 m³/s.
 - o Caudales pico de los hidrogramas de rotura de la presa, Q_{br} : 15,034 m³/s, 37,629 m³/s, 56,878 m³/s, 81,039 m³/s, 107,162 m³/s, 116,871 m³/s y 121,323 m³/s.
- Plan de Emergencia de la presa.
- Modelo hidráulico del cauce para simular escenarios de inundación.
- Mapas de inundación a partir del modelo, para el régimen natural y la situación existente: caudales procedentes de la laminación y también en rotura.

Definición de categorías de tiempo

Se definen cuatro categorías de tiempo, TC, a partir de la variabilidad diaria y estacional de la población existente en el núcleo.

La población total es 1986 habitantes, cuyo valor aumenta durante el día en 256 personas por motivos de trabajo. En verano, la población aumenta en 800 personas debido a la existencia de segundas residencias.

Por tanto, las categorías de tiempo quedan definidas en la Tabla A.9.1 de la forma siguientes:

Categorías de tiempo	Verano/día (TC ₁)	Verano/noche (TC ₂)	Invierno/día (TC ₃)	Invierno/noche (TC ₄)
Habitantes	3,044	2,788	2,244	1,988
Rango Verano/Invierno	Verano: Desde el 1 de Julio al 15 de septiembre Invierno: Resto del año			
Rango Día/noche	Día: 8:00 a.m. - 10:30 p.m. Noche: 10:30 p.m. - 8:00 a.m.			

Tabla A.9.1. Categorías de tiempo.

Definición de categorías de uso del suelo

Se definen dos categorías de uso del suelo: residencial (CU₁) e industrial (CU₂).

FASE III. ESTUDIO DE LA SITUACIÓN EXISTENTE. DEFINICIÓN DEL CASO-BASE

El caso-base represente la situación existente del núcleo urbano frente al riesgo de inundación (en este punto, inundación fluvial). Esta situación comprende la existencia de la presa y la implantación del correspondiente Plan de Emergencia de la misma.

Por tanto, para el análisis del riesgo por inundación fluvial de este caso práctico, debe realizarse el modelo de riesgo representativo del caso-base.

Modelo de riesgo "1". Inundación fluvial: caso-base.

FASE IV. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN

Tras el análisis de los hidrogramas resultantes del estudio de laminación y de la consideración de la posible rotura de la presa, debe establecerse una serie de escenarios de inundación que sirven de base para la estimación de consecuencias por inundación en el área urbana.

Se establecen dos tipos de escenarios de inundación: escenarios procedentes de la laminación de avenidas (casos de no rotura) y escenarios resultantes del fallo de la presa (casos de rotura de la presa).

En general, puede establecerse el mismo número de escenarios de cada tipo, debiendo contemplar todo el rango de eventos posibles. En este caso práctico, cinco escenarios de inundación engloban los posibles eventos de inundación por laminación de avenidas (identificados por caudales pico de los hidrogramas de salida, Q_{nbr}) y siete escenarios representan los eventos de inundación por rotura de la presa (identificados por los caudales pico del hidrograma en rotura, Q_{br}).

Las Tablas A.9.2 y A.9.3 recogen los caudales pico de los hidrogramas correspondientes a cada escenario de inundación.

Escenarios de inundación (casos no-fallo)	Q_{nbr} (m ³ /s)
Q_{nbr1}	121.5
Q_{nbr2}	244.6
Q_{nbr3}	351.6
Q_{nbr4}	632.7
Q_{nbr5}	782.6

Tabla A.9.2. Caudales pico de los hidrogramas de salida por laminación de avenidas (no-fallo).

Escenarios de inundación (casos fallo)	Q_{br} (m ³ /s)
Q_{br1}	15,034
Q_{br2}	37,629
Q_{br3}	56,878
Q_{br4}	81,039
Q_{br5}	107,162
Q_{br6}	116,871
Q_{br7}	121,323

Tabla A.9.3. Caudales pico de los hidrogramas de salida por rotura de la presa (fallo).

Los escenarios de inundación anteriores son la base para la estimación de consecuencias por inundación fluvial en el núcleo urbano.

FASE V. ARQUITECTURA DEL MODELO DE RIESGO

El modelo de riesgo para el caso-base representa la situación actual del área urbana en caso de inundación fluvial. En general, se divide en tres partes: (a) cargas, (b) respuesta del sistema y (c) consecuencias.

Los nodos del modelo referentes a cargas y respuesta del sistema recogen la información correspondiente a probabilidades de ocurrencia de cada escenario de inundación a partir de los datos de entrada asociados a periodos de retorno, operatividad de compuertas, niveles previos, laminación, etc., así como posibles modos de fallo y probabilidades asociadas. Los nodos referentes al bloque de consecuencias contienen información de los daños potenciales en pérdida de vidas humanas y costes económicos de cada escenario de inundación.

La Figura A.9.3 muestra el esquema del modelo de riesgo para el caso-base (modelo "1"). El diagrama de influencia del modelo del caso-base generado en iPresas presenta diferentes nodos para cada una de las tres partes citadas anteriormente. La Tabla A.9.4 recoge el nombre de cada nodo, descripción, archivo asociado con datos de entrada al modelo y las variables que identifican cada fase del cálculo.

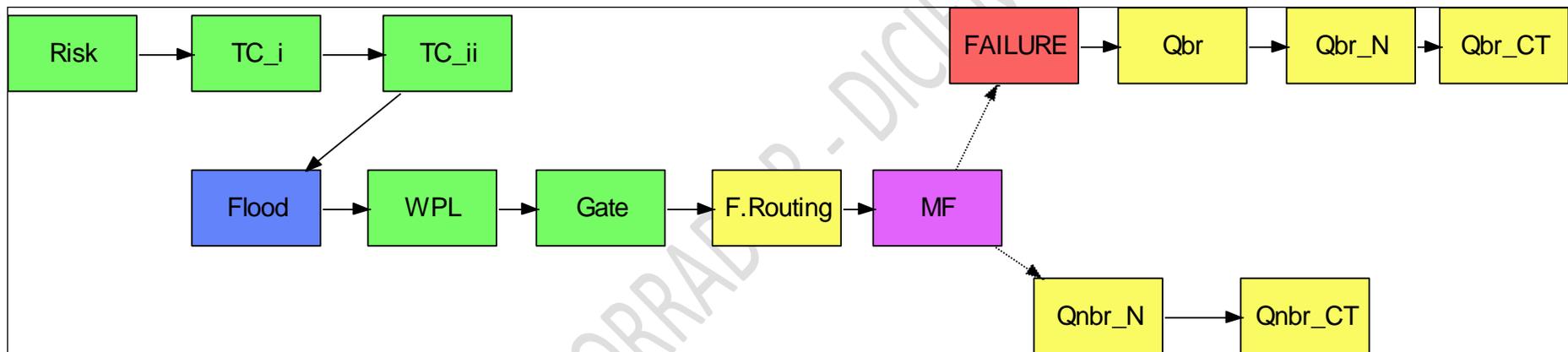


Figura A.9.3. Modelo de riesgo "1". Inundación fluvial. Caso-base.

Nodo	Bloque	Descripción	Archivo datos de entrada	Variable
<i>Risk</i>	-	Nodo inicial para el cálculo del riesgo total: social o económico.	<i>risk.txt</i>	prob (probabilidad=1)
<i>TC_i</i>	-	Define probabilidades de cada estación del año. p.e. verano=0.2084; invierno=0.7916 (resto del año)	<i>season.txt</i>	season (identifica categorías de tiempo)
<i>TC_ii</i>	-	Define probabilidades día-noche. p.e. día=0.6; noche=0.4	<i>daynight.txt</i>	moment (identifica categorías de tiempo)
<i>Flood</i>	a	Probabilidad anual de excedencia de cada escenario de inundación	<i>flood.txt</i>	AEP (probabilidad anual de excedencia)
<i>WPL</i>	a	Distribución de niveles previos y probabilidad de excedencia.	<i>wpl.txt</i>	NP (niveles previos)
<i>Gate</i>	a	Operatividad de compuertas	<i>gate.txt</i>	Op_gate (si las compuertas no funcionan, entonces Op_gate es 0)
<i>F.Routing</i>	a	Este nodo relaciona las variables anteriores con un nivel máximo en el embalse, un caudal de descarga y sobrevertido, en su caso.	<i>floodrouting.xls</i>	NMax (nivel máximo), Qnbr (caudal laminado)
<i>MF</i>	b	Une el nodo anterior con dos ramas: fallo y no-fallo.	-	-
<i>Failure</i>	b	Define las probabilidades de fallo de la presa	<i>prob_br.xls</i>	prob_br (valor de probabilidad)
<i>Qbr</i>	b	Define los caudales de salida en caso de rotura para cada nivel máximo en el embalse.	<i>Qbr.txt</i>	NMax, Qbr (caudal salida en rotura)
<i>Qbr_N, Qbr_CT</i>	c	Define las consecuencias de cada escenario de inundación en casos de no rotura (identificados por caudales Q_{nbr})	<i>Qbr_lives.xls</i> <i>Qbr_euros.txt</i>	Qbr, N Qbr, euros
<i>Qnbr_N, Qnbr_CT</i>	c	Define las consecuencias de cada escenario de inundación en casos de rotura (identificados por caudales Q_{br})	<i>Qnbr_lives.xls</i> <i>Qnbr_euros.txt</i>	Qnbr, N Qnbr, euros

Tabla A.9.4. Nodos del modelo de riesgo 1. Inundación fluvial. Caso-base.

FASE VI. DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO

El proceso de obtención de datos de entrada al modelo de riesgo se clasifica en tres apartados a partir de los tres bloques descritos anteriormente: cargas, respuesta del sistema y consecuencias.

a) Cargas

Los datos de entrada al modelo en la parte referente a cargas se obtiene del estudio hidrológico del cauce. Debe obtenerse información de la cuenca vertiente al embalse, además de la distribución histórica de niveles previos en el embalse (ver archivo wpl.txt) y los hidrogramas de salida de la presa. El estudio de laminación aporta los niveles máximos en el embalse y caudales de salida en función de la operatividad de compuertas y niveles previos establecidos (ver floodrouting.txt).

b) Respuesta del sistema

A partir del estudio de los potenciales modos de fallo de la presa (juicio de experto, auscultación, visitas de campo, etc.), se establece una serie de probabilidades de fallo de la misma para cada nivel máximo dado en el embalse (ver prob_br.xls).

Se realizan simulaciones hidráulicas, mediante el software MIKE11, a partir del modelo digital del terreno y las características de la presa, para cada uno de los escenarios de inundación definidos en las Tablas A.9.2 y A.9.3 (procedentes de caudales laminados y en rotura). Los resultados obtenidos, en términos de características hidráulicas del flujo y áreas inundadas, se emplean para la estimación de consecuencias de cada escenario de inundación.

c) Consecuencias

La obtención del riesgo social y económico existente requiere de la estimación de las consecuencias potenciales de cada escenario de inundación, en términos de pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas. De este modo, los valores estimados se incluyen en el modelo para el cálculo del riesgo.

En la metodología SUFRI, la estimación de consecuencias se divide en dos partes: pérdida de vidas y pérdidas económicas.

c.1. Pérdida de vidas

c.1.1. Definición de la categoría del caso de estudio y tasas de mortalidad de referencia (C y RFR)

A partir de la clasificación propuesta en la metodología SUFRI (Apéndice 1, Tabla A.1.1), el núcleo urbano estudiado corresponde a la categoría C4 para el caso-base (existencia de Plan de Emergencia de la Presa). Por tanto, las tasas de mortalidad de referencia a emplear en los cálculos para el caso-base se muestra en la Tabla A.9.5.

Tiempo de aviso, TW (h)	Severidad, Sv		
	Alta (3)	Media(2)	Baja (1)
0	0.9	0.3	0.02
0.25	0.85	0.2	0.015
0.625	0.6	0.07	0.012
1	-	0.05	0.0005
1.5	-	0.0002	0.0002
24	-	0.0002	0.0001

Tabla A.9.5. Tasas de mortalidad de referencia para la categoría C4. Caso-base.

Estas tasas de mortalidad de referencia (RF) se emplean para la estimación de la tasa de mortalidad correspondiente a cada escenario de inundación en función del tiempo de aviso disponible y la severidad de la inundación.

c.1.2. Población en riesgo (PR)

A partir de la comparación de los mapas de usos del suelo del núcleo y de los mapas de inundación obtenidos de la simulación hidráulica, se calcula el área inundada para cada escenario de inundación. Para cada escenario, la población en riesgo se obtiene multiplicando la población existente (Tabla A.9.1) en el núcleo por el cociente entre el área inundada (A_f) y el área total (A_T). Se obtiene un valor de población en riesgo (PR) por categoría de tiempo y escenario de inundación.

Las Tablas A.9.6 y A.9.7 muestran los valores de población en riesgo para cada escenario de inundación.

Q_{nibr} (m ³ /s)	Área total, A_T (m ²)	588,358	Población en riesgo, PR			
	Área inundada, A_f (m ²)	A_f/A_T (%)	Categoría de tiempo, TC			
			TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
121.5	0	0.00%	0	0	0	0
244.6	12500	2.12%	65	59	48	42
351.6	17656	3.00%	91	84	67	60
632.7	63097	10.72%	326	299	241	213
782.6	77325	13.14%	400	366	295	261

Tabla A.9.6. Población en riesgo. Inundación fluvial. Escenarios de no-fallo.

Q _{br} (m ³ /s)	Área total, A _T (m ²)	588,358	Población en riesgo, PR			
	Área inundada, A _f (m ²)	A _f /A _T (%)	TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
15,034	73,580	12.51%	381	349	281	249
37,629	151,566	25.76%	784	718	578	512
56,878	349,273	59.36%	1,807	1,655	1,332	1,180
81,039	469,472	79.79%	2,429	2,224	1,790	1,586
107,162	514,569	87.46%	2,662	2,438	1,962	1,738
116,871	525,001	89.23%	2,716	2,487	2,002	1,774
121,323	544,303	92.51%	2,816	2,579	2,076	1,839

Tabla A.9. 7. Población en riesgo. Inundación fluvial. Escenarios de fallo.

c.1.3. Tiempos de aviso (TW)

Según la metodología SUFRI, el tiempo de aviso para escenarios de no-fallo se define como la diferencia de tiempo (TD) entre el caudal de alerta, Q₁, y el caudal de daños, Q₂, para cada escenario de inundación. En este caso práctico, los valores de Q₁ y Q₂ son 150 m³/s y 200 m³/s, respectivamente.

El tiempo de aviso durante la noche se reduce en 15 minutos respecto de la diferencia de tiempo obtenida (TD) para cada escenario.

La Tabla A.9.8 muestra los valores del tiempo de aviso para escenarios de no-fallo.

Q _{nbr} (m ³ /s)	TC ₁ , TC ₃ (día) TW=TD (horas)	TC ₂ , TC ₄ (Noche) TW=TD-0.25 (horas)
121.5	-	-
244.6	3.25	3
351.6	1.4	1.15
632.7	1.3	1.05
782.6	1.25	1

Tabla A.9.8. Tiempos de aviso. Escenarios de no-fallo.

En el primer caso, Q_{nbr} = 121.5 m³/s es menor que Q₁ = 150 m³/s, por lo que no se produce inundación en el área urbana.

Para escenarios de inundación por fallo de la presa, dado que existe Plan de Emergencia, el valor del tiempo de aviso se obtiene de la formulación incluida en la metodología SUFRI (Apéndice 1, Tabla A.1.4). Por tanto, el tiempo de aviso viene dado por:

$$TW = T_{wv} + TBR - FMF$$

Donde T_{wv} es el tiempo de llegada de la onda, TBR es el tiempo de formación de la brecha (formación rápida, 0.25 horas) y FMF es el factor de modo de fallo (igual a 0 horas, durante el día, y, 0.15 horas, durante la noche).

La Tabla A.9.9 recoge los valores obtenidos del tiempo de aviso para cada escenario de inundación por fallo de la presa.

Q_{br} (m ³ /s)	TC ₁ , TC ₃ (Día) TW (horas)	TC ₂ , TC ₄ (Noche) TW (horas)
15,034	0.750	0.500
37,629	0.650	0.400
56,878	0.600	0.350
81,039	0.580	0.330
107,162	0.550	0.300
116,871	0.537	0.287
121,323	0.537	0.287

Tabla A.9.9. Tiempos de aviso. Escenarios de no-fallo.

Los tiempos de aviso mostrados en las Tablas A.9.8 y A.9.9 se emplean posteriormente para el cálculo de tasas de mortalidad para cada escenario de inundación.

c.1.4. Severidad de la inundación (*Sv*)

La severidad de la inundación depende de las características del flujo. Para la definición de la severidad de cada escenario se emplea el parámetro DV (Apéndice 1, Tabla A.1.3.) propuesto por Graham (1999). Se distinguen tres niveles de severidad (alta, media y baja) en función del valor estimado de DV para cada escenario.

Dado que el núcleo urbano se sitúa a 8 Km de la presa, no se considera la categoría de severidad alta (asociada a núcleos situados justo aguas abajo). Se establece severidad baja para valores de DV inferiores a 4.6 m²/s.

Las Tablas A.9.10 y A.9.11 incluyen los valores estimados de DV para cada escenario en función del caudal pico (Q_{nbr} o Q_{br}) y el caudal medio anual del río (29.3 m³/s).

c.1.5. Tasas de mortalidad (*FR*)

Las tasas de mortalidad para cada escenario de inundación y categoría de tiempo se obtienen por interpolación de los valores de referencia (Tabla A.9.5) a partir de los tiempos de aviso estimados y la severidad de cada escenario.

Las Tablas A.9.10 y A.9.11 incluyen las tasas de mortalidad obtenidas para cada escenario de inundación.

c.1.6. Número de víctimas (N)

El número de víctimas potenciales se obtiene por multiplicación de las tasas de mortalidad de cada escenario y la población en riesgo existente, según cada categoría de tiempo.

Las Tablas A.9.10 y A.9.11 recogen todos los resultados empleados para la estimación del número de víctimas por inundación fluvial para el caso-base.

Q _{nbr} (m ³ /s)	Tiempo de aviso, TW		DV	Severidad, Sv	Tasa, FR Día	Tasa, FR Noche	Número de víctimas, N			
	Día (h)	Noche (h)					Categoría de tiempo			
							TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
121.5	-	-	0.00	1	-	-	-	-	-	-
244.6	3.25	3	1.99	1	0.00019	0.00019	0.01	0.01	0.01	0.01
351.6	1.4	1.15	2.69	1	0.00022	0.00027	0.02	0.02	0.01	0.02
632.7	1.3	1.05	3.77	1	0.00024	0.00029	0.08	0.09	0.06	0.06
782.6	1.25	1	3.97	1	0.00025	0.00030	0.10	0.11	0.07	0.08

Tabla A.9.10. Número de víctimas potenciales, N. Escenarios de no-fallo. Inundación fluvial. Caso-base.

Q _{br} (m ³ /s)	Tiempo de aviso, TW		DV	Severidad, Sv	Tasa, FR Día	Tasa, FR Noche	Número de víctimas, N			
	Día (h)	Noche (h)					Categoría de tiempo			
							TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
15,034	0.750	0.500	18.77	2	0.037	0.077	13.96	26.73	-	-
37,629	0.650	0.400	38.81	2	0.039	0.106	30.84	76.12	10.29	19.06
56,878	0.600	0.350	45.53	2	0.047	0.121	85.52	199.69	22.73	54.28
81,039	0.580	0.330	59.41	2	0.053	0.127	129.20	281.46	63.04	142.38
107,162	0.550	0.300	74.77	2	0.062	0.135	165.04	329.95	95.24	200.68
116,871	0.537	0.287	80.71	2	0.066	0.139	178.74	346.12	121.66	235.26
121,323	0.537	0.287	83.32	2	0.066	0.139	185.31	358.85	131.76	246.79

Tabla A.9. 11. Número de víctimas potenciales, N. Escenarios de fallo. Inundación fluvial. Caso-base.

A partir de los resultados obtenidos (Tablas A.9.10 y A.9.11) se crean los archivos de datos de entrada al modelo de riesgo con las relaciones Q_{br}-N y Q_{nbr}-N.

c.2. Pérdidas económicas

En este punto se describe la estimación de pérdidas económicas por inundación fluvial para el caso-base.

c.2.1. Categorías de uso del suelo (CU)

En este caso práctico, se distinguen dos categorías de usos del suelo: residencial e industrial. En inundación fluvial, las áreas inundadas se corresponden con áreas residenciales (CU₁).

c.2.2. Costes de referencia (CR)

El coste de referencia para la categoría de uso residencial se obtiene de la Tabla A.5.1, incluida en el Apéndice 5. Se opta por un valor del 75% del ratio máximo propuesto por PATRICOVA (2002) para uso residencial de media densidad. Este valor, correspondiente a 42 €/m², equivale a un valor actual (2010) de 49.29 €/m².

c.2.3. Porcentaje de daños (PD)

El porcentaje de daños para cada escenario de inundación se estima a partir del calado de inundación en el área inundada y la curva calado-daños propuesta por PATRICOVA y recogida en el Apéndice 5.

La Tabla A.9.12 incluye los valores del calado de inundación empleados para la estimación del porcentaje de daños en cada escenario.

Q _{nbr} (m ³ /s)	Calado H (m)	Q _{br} (m ³ /s)	Calado H (m)
121.5	0.000	15,033.7	6.9
244.6	0.530	37,628.9	11.9
351.6	0.975	56,878.4	14.7
632.7	1.850	81,038.8	17.5
		107,161.7	20.5
782.6	2.030	116,870.6	21.4
		121,323.1	21.8

Tabla A.9.12. Valores del calado alcanzado por la inundación.

c.2.4. Estimación de costes directos, indirectos y totales (CD, CI y CT).

Los costes directos se obtienen por multiplicación del coste de referencia por el área inundada y el porcentaje de daños asociado a cada escenario de inundación.

En la metodología SUFRI, se propone el cálculo de los costes indirectos como una fracción de los costes directos por inundación. En este caso práctico, se establece como un porcentaje del 27% de los costes directos.

Por tanto, los costes totales para cada escenario de inundación se obtienen agregando costes directos e indirectos.

Las Tablas A.9.13 y A.9.14 muestran los resultados obtenidos tras la estimación de costes económicos por inundación fluvial para el caso-base.

Q_{nbr} (m ³ /s)	Calado H (m)	Coste de referencia CR (€/m ²)	Porcentaje de daños PD (%)	Costes directos CD (€)	Costes indirectos CI (€)	Costes totales CT (€)
121.5	0.000	49.29	0.00%	0	0	0
244.6	0.530	49.29	4.12%	25,415	6,862	32,277
351.6	0.975	49.29	36.75%	319,822	86,352	406,174
632.7	1.850	49.29	75.50%	2,348,089	633,984	2,982,073
782.6	2.030	49.29	77.00%	2,934,739	792,380	3,727,118

Tabla A.9.13. Pérdidas económicas. Escenarios de no-fallo. Inundación fluvial. Caso-base.

Q_{br} (m ³ /s)	Calado H (m)	Coste de referencia CR (€/m ²)	Porcentaje de daños PD (%)	Costes directos CD (€)	Costes indirectos CI (€)	Costes totales CT (€)
15,034	6.9	49.29	77.00%	2,792,604	754,003	3,546,607
37,629	11.9	49.29	77.00%	5,752,430	1,553,156	7,305,586
56,878	14.7	49.29	77.00%	13,256,063	3,579,137	16,835,200
81,039	17.5	49.29	77.00%	17,818,012	4,810,863	22,628,875
107,162	20.5	49.29	77.00%	19,529,592	5,272,990	24,802,581
116,871	21.4	49.29	77.00%	19,925,520	5,379,891	25,305,411
121,323	21.8	49.29	77.00%	20,658,095	5,577,686	26,235,781

Tabla A.9.14. Pérdidas económicas. Escenarios de fallo. Inundación fluvial. Caso-base.

FASE VII. CÁLCULO DEL RIESGO

Una vez realizados todos los cálculos necesarios para la obtención de datos de entrada al modelo de riesgo, cada nodo se vincula a un archivo que contiene la información necesaria. El modelo de riesgo se ejecuta con el software iPresas [45] tal y como se muestra en la Figura A.9.4, mediante el comando *Analysis* → *Run analysis*.

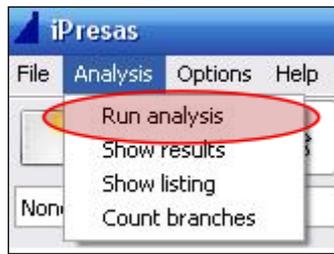


Figura A.9.4. Vista del menú en iPresas para la ejecución del modelo de riesgo.

Tras ejecutar el modelo para el caso-base, se obtienen resultados mediante el menú *Analysis* → *Show results* o empleando el icono que se muestra en la Figura A.9.5.



Figura A.9.5. Vista del menú en iPresas para la obtención de resultados del modelo de riesgo.

FASE VIII. REPRESENTACIÓN DE CURVAS F-N Y F-D

La siguiente fase de la metodología SUFRI consiste en la representación de las curvas F-N y F-D asociadas al caso-base. Para ello, se obtienen resultados en términos de pérdida de vidas o pérdidas económicas a través de la opción *Analysis* → *Export F-N*.

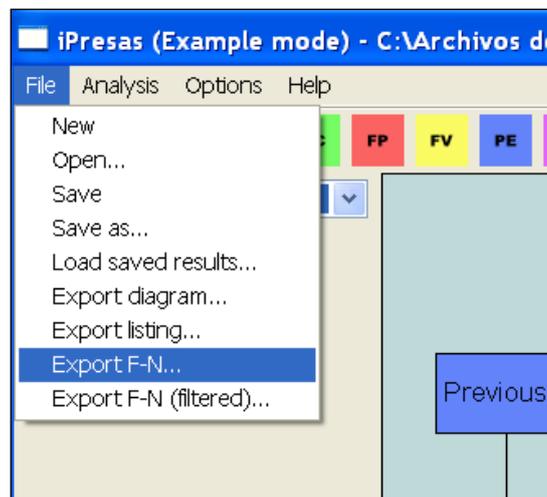


Figura A.9.6. Vista del menú en iPresas para la obtención del listado f-N o f-€.

El programa genera un archivo de texto con un listado de probabilidades anuales de excedencia (f) y el número de víctimas (o total de pérdidas económicas) asociado a cada valor de probabilidad.

A partir del listado anterior, se crea la curva F-N para el caso-base, incluida en la Figura A.9.7. La curva F-N muestra la probabilidad anual de excedencia acumulada (F) del nivel de víctimas potenciales (N) para el caso-base. La Figura A.9.8 muestra la curva F-D tras representar el nivel de pérdidas económicas para el caso-base.

Las curvas F-N y F-D representadas en las Figuras A.9.7 y A.9.8 muestran el resultado del riesgo social y económico para la situación actual (caso-base).

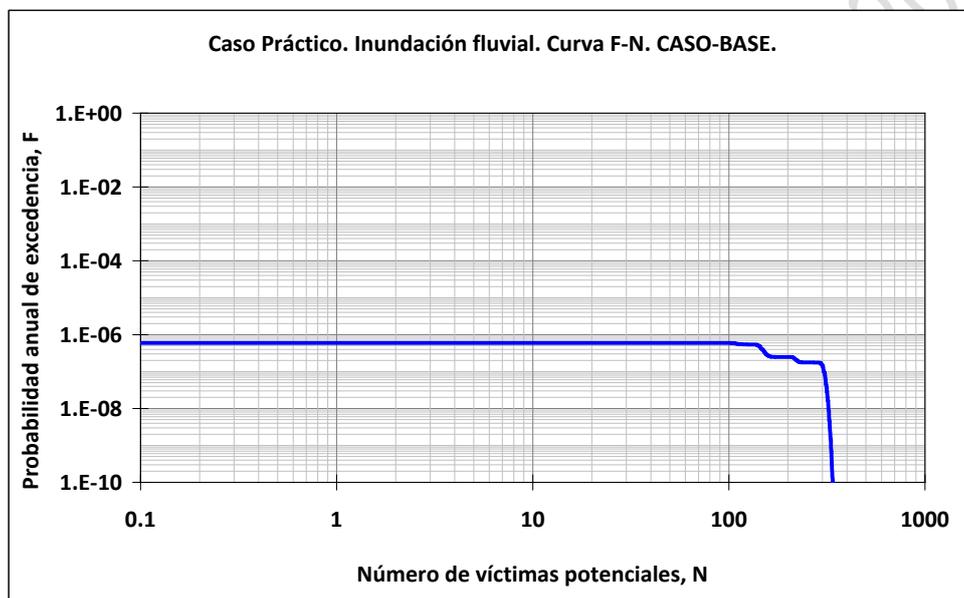


Figura A.9.7. Curva F-N. Inundación fluvial. Caso-base.

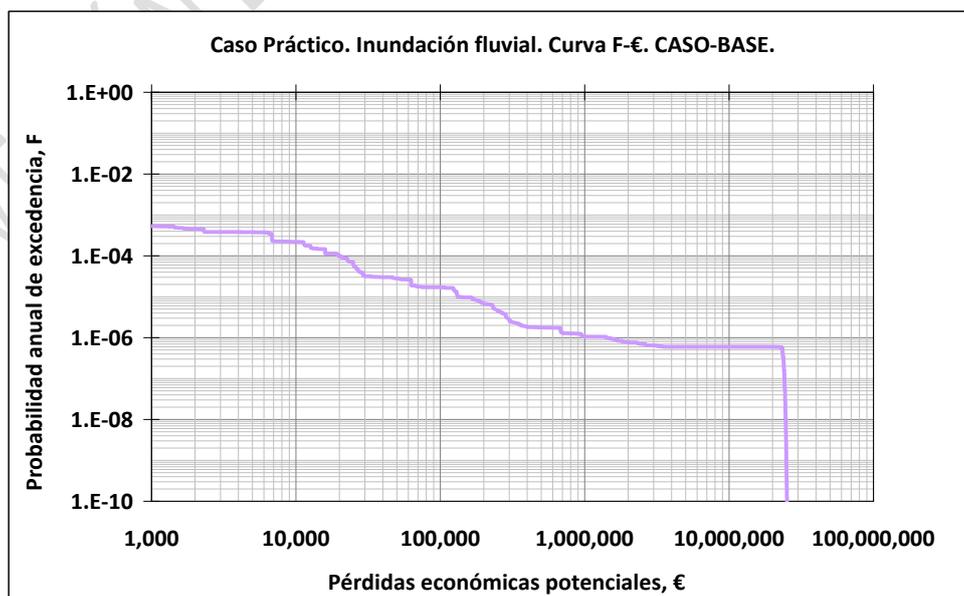


Figura A.9.8. Curva F-€. Inundación fluvial. Caso-base.

FASE IX. EVALUACIÓN DEL RIESGO

A partir de las curvas obtenidas, se observa que la rotura de la presa produce un número máximo de víctimas igual a 304 personas para una probabilidad anual de excedencia de $1 \cdot 10^{-7}$, aproximadamente. Las pérdidas económicas potenciales asociadas a una probabilidad anual de excedencia de $1 \cdot 10^{-6}$ ascienden a 1,409,378 €, alcanzando un valor máximo de 25,688,517 € en caso de rotura de la presa.

FASE X. INCORPORACIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Una vez analizado el caso-base, la última fase de la metodología SUFRI se basa en el análisis de la situación con medidas no estructurales.

En este caso práctico, se evalúan dos situaciones adicionales:

- Situación con medidas no estructurales (para analizar el efecto de la implantación de un Programa de Formación a la población en materia de Riesgo de inundación, denominado caso-PFR), y,
- Situación sin ningún tipo de medidas (para la comparación con las dos situaciones anteriores, correspondiente al régimen natural del río, denominado caso-RN).

Caso-PFR

En primer lugar se analiza la situación con medidas no estructurales (caso-PFR). Dado que la aplicación de medidas no estructurales de formación a la población no modifican las características de la inundación, pues actúan en la parte concerniente a la vulnerabilidad de la población frente a la inundación, el análisis del caso-PFR sólo requiere de la modificación de datos de entrada al modelo del caso-base en términos de consecuencias.

Por tanto, se emplea el modelo de riesgo del caso-base (modelo 1, Figura A.9.3) y debe evaluarse de nuevo la fase VI de la metodología SUFRI para la obtención de datos de entrada al modelo en los nodos relacionados con el cálculo de consecuencias.

En este caso, se plantea como medida no estructural la implantación de un programa de formación a la población en materia de riesgo de inundación para la mejora del conocimiento del riesgo existente, aportando información y formación en relación a procedimientos de actuación, evacuación y refugio en caso de emergencia.

La aplicación de esta medida se evalúa en la metodología SUFRI a través de las siguientes modificaciones al caso-base:

Pérdida de vidas

- *Definición de la categoría del caso práctico (C)*

La implantación de un programa de formación a la población da lugar a la consideración de una nueva categoría para el caso de estudio. La clasificación propuesta en la metodología SUFRI (Apéndice 1, Tabla A.1.1), dividida en diez niveles (C1 a C10), recoge la situación con plan de formación como el mejor escenario posible, por lo que la categoría para el caso-PFR corresponde al nivel C10.

Por tanto, las tasas de mortalidad de referencia a emplear para el cálculo del número potencial de víctimas (RFR) difieren de las tasas empleadas en el caso-base (asociadas a la categoría C4). La Tabla A.9.15 muestra las tasas de referencia para el caso-PFR (categoría C10).

Tiempo de aviso, TW (h)	Severidad, Sv		
	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)
0	0.9	0.3	0.02
0.25	0.5	0.03	0.005
0.625	0.3	0.005	0.001
1	-	0.002	0.0001
1.5	-	0.0002	0.0001
24	-	0.0002	0.0001

Tabla A.9.15. Tasas de mortalidad de referencia. Caso-PFR. Categoría C10.

El resto de variables para la estimación del número de víctimas (población en riesgo, tiempos de aviso, severidad de la inundación, etc.), a excepción de las tasas de mortalidad a emplear, permanecen como en el caso-base.

Pérdidas económicas

- *Reducción de daños materiales (PD)*

Se considera que la implantación de un programa de formación aporta un mayor nivel de conocimiento y capacidad de actuación de la población en caso de inundación, como es el caso de la instalación de barreras provisionales para impedir la entrada del agua en viviendas y locales. Existen estudios que estiman el porcentaje de reducción de daños materiales en función del tiempo de aviso disponible y el nivel alcanzado por el agua (Parker et al, 2005 [41]).

En la metodología SUFRI se propone la reducción del porcentaje de daños (PD) en el proceso de estimación de pérdidas económicas. Dadas las características de los escenarios de inundación establecidos en caso de no-fallo, se propone una reducción en daños con respecto al caso-base igual al 25% (Parker et al, 2005 [41]).

Sin embargo, esta reducción no puede considerarse para calados de inundación superiores a 1.2 m, pues la instalación de barreras al paso del agua pierde efectividad.

El resto de variables intervinientes en el cálculo de costes totales por inundación fluvial permanecen iguales a los valores empleados en el caso-base.

Las Tablas A.9.16 a A.9.9 incluyen los resultados en número de víctimas potenciales y pérdidas económicas para la situación con medidas no estructurales (caso-PFR) para los dos tipos de escenarios de inundación considerados (fallo y no-fallo). Se indican en color verde los valores de los parámetros que varían con respecto al caso-base.

(m ³ /s)	Tiempo de aviso, TW		DV	Severidad, Sv	Tasa, FR Día	Tasa, FR Noche	Número de víctimas potenciales, N			
	Día (h)	Noche (h)					Categoría de tiempo			
							TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
121.5	-	-	0.000	-	-	-	-	-	-	-
244.6	3.25	3	1.994	1	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.00	0.00
351.6	1.4	1.15	2.686	1	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01
632.7	1.3	1.05	3.771	1	0.0001	0.0001	0.03	0.03	0.02	0.02
782.6	1.25	1	3.965	1	0.0001	0.0001	0.04	0.04	0.03	0.03

Tabla A.9.16. Número de víctimas potenciales, N. Escenarios de no-fallo. Inundación fluvial. Caso-PFR.

Q _{br} (m ³ /s)	Tiempo de aviso, TW		DV	Severidad, Sv	Tasa, FR Día	Tasa, FR Noche	Número de víctimas potenciales, N			
	Día (h)	Noche (h)					Categoría de tiempo			
							TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
15,034	0.750	0.500	18.77	2	0.004	0.013	1.52	4.65	1.12	3.31
37,629	0.650	0.400	38.81	2	0.005	0.020	3.76	14.36	2.77	10.24
56,878	0.600	0.350	45.53	2	0.007	0.023	12.05	38.61	8.88	27.53
81,039	0.580	0.330	59.41	2	0.008	0.025	19.43	54.87	14.32	39.12
107,162	0.550	0.300	74.77	2	0.010	0.027	26.62	65.01	19.62	46.36
116,871	0.537	0.287	80.71	2	0.011	0.028	29.51	68.49	21.76	48.83
121,323	0.537	0.287	83.32	2	0.011	0.028	30.60	71.01	22.56	50.63

Tabla A.9.17. Número de víctimas potenciales, N. Escenarios de fallo. Inundación fluvial. Caso-PFR.

Q_{nbr} (m ³ /s)	Calado H (m)	Coste de referencia CR (€/m ²)	Porcentaje de daños PD (%)	Costes directos CD (€)	Costes indirectos CI (€)	Costes totales CT (€)
121.5	0.00	49.29	0.00%	0	0	0
244.6	0.53	49.29	3.09%	19,061	5,147	24,208
351.6	0.98	49.29	27.56%	239,867	64,764	304,631
632.7	1.85	49.29	56.63%	1,761,066	475,488	2,236,554
782.6	2.03	49.29	57.75%	2,201,054	594,285	2,795,339

Tabla A.9.18. Pérdidas económicas. Escenarios de no-fallo. Inundación fluvial. Caso-PFR.

Q_{br} (m ³ /s)	Calado H (m)	Coste de referencia CR (€/m ²)	Porcentaje de daños PD (%)	Costes directos CD (€)	Costes indirectos CI (€)	Costes totales CT (€)
15,034	6.9	49.29	77.00%	2,792,604	754,003	3,546,607
37,629	11.9	49.29	77.00%	5,752,430	1,553,156	7,305,586
56,878	14.7	49.29	77.00%	13,256,063	3,579,137	16,835,200
81,039	17.5	49.29	77.00%	17,818,012	4,810,863	22,628,875
107,162	20.5	49.29	77.00%	19,529,592	5,272,990	24,802,581
116,871	21.4	49.29	77.00%	19,925,520	5,379,891	25,305,411

Tabla A.9.19. Pérdidas económicas. Escenarios de no-fallo. Inundación fluvial. Caso-PFR.

De este modo, se obtienen nuevas relaciones Q_{nbr-N} , $Q_{nbr-€}$, Q_{br-N} y $Q_{br-€}$ para la modificación de los archivos de datos de entrada al modelo de riesgo.

Tras realizar de nuevo la fase VII, cálculo del riesgo mediante el modelo de riesgo en iPresas, en este punto, para el caso-PFR, se obtienen nuevos resultados para la representación de curvas F-N y F-D.

Las Figuras A.9.9 y A.9.10 muestran las curvas asociadas a la situación con medidas no estructurales.

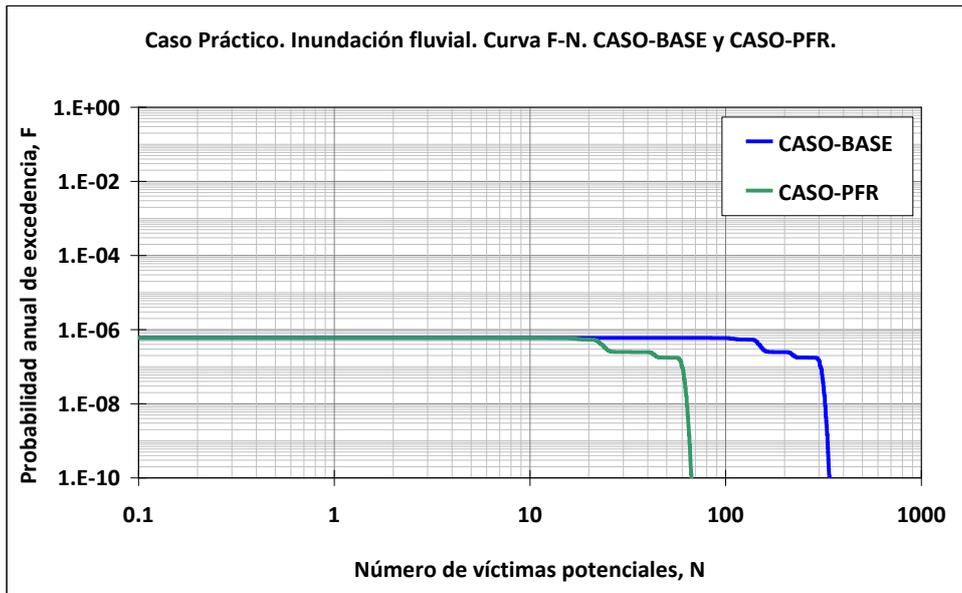


Figura A.9.9. Curva F-N. Inundación fluvial. Caso-PFR.

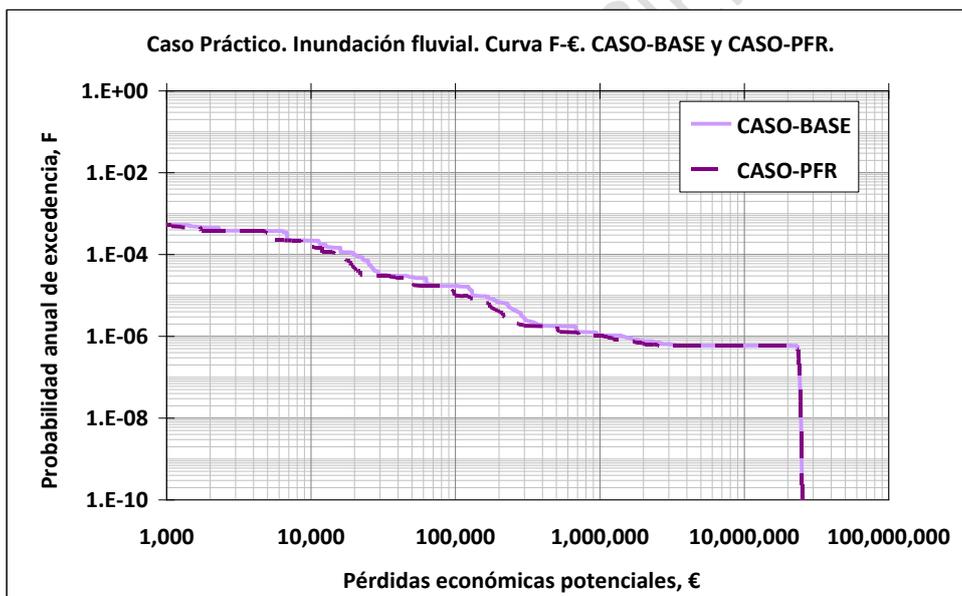


Figura A.9.10. Curva F-N. Inundación fluvial. Caso-PFR.

Caso-RN (Régimen Natural del Río)

En tercer lugar se considera el estudio de la situación sin ningún tipo de medidas estructurales, es decir, el análisis del riesgo en el núcleo urbano por inundaciones debidas al régimen natural del río. Esta situación se corresponde con el riesgo existente en el caso de que no se hubieran efectuado las infraestructuras de defensa actuales (encauzamiento y presa).

A diferencia de la situación con medidas no estructurales, el análisis del régimen natural del río requiere evaluar todas las fases de la metodología SUFRI desde la fase

IV hasta la fase VIII, pues resulta necesario desarrollar un nuevo modelo de riesgo y evaluar las características de eventos de inundación a partir de los hidrogramas del régimen natural, estimando las consecuencias potenciales de dichos eventos.

Por tanto, en este punto, se evalúan de nuevo las fases IV a VIII de la metodología SUFRI para la obtención de las curvas F-N y F-D asociadas al caso-RN.

FASE IV. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN PARA EL CASO-RN

Los escenarios de inundación para el régimen natural se establecen a partir del estudio hidrológico del río. De los datos procedentes del estudio se obtienen los hidrogramas y caudales pico asociados a periodos de retorno desde 2 a 10,000 años. Para la comparación posterior de las curvas F-N de las tres situaciones estudiadas (caso-base, caso-PFR y caso-RN) se amplía el rango de hidrogramas mediante una función GEV. De este modo, pueden obtenerse estimaciones de eventos de inundación asociados a probabilidades inferiores a 10^{-4} .

Los caudales máximos de los hidrogramas del régimen natural se muestran en la Tabla A.9.20.

Periodo de retorno T (años) (Est. hidrológico)	2	5	10	25	50	100	500	1,000	5,000	10,000
Q_{max} (m ³ /s)	94	166	214	274	319	364	466	511	613	658
Periodo de retorno T (años) (Función GEV)	50,000		100,000		500,000		1,000,000		10,000,000	
Q_{max} (m ³ /s)	759		803		905		950		1,097	

Tabla A.9.20. Caudales máximos de los hidrogramas del régimen natural.

Los hidrogramas asociados a los periodos de retorno presentados en la Tabla A.9.20 se emplean para la simulación hidráulica del cauce en régimen natural. Las características del flujo y los mapas de inundación obtenidos sirven de base para la estimación de consecuencias en el caso-RN.

FASE V. ARQUITECTURA DEL MODELO DE RIESGO PARA EL CASO-RN

El modelo de riesgo del caso-RN debe representar la situación anterior a la construcción de las infraestructuras de defensa actuales.

La Figura A.9.11 muestra el esquema del modelo de riesgo construido en iPresas para la evaluación del régimen natural del río (modelo 2).

Modelo de riesgo "2". Inundación fluvial: caso-RN.

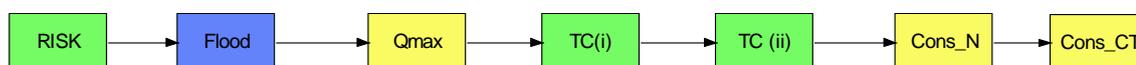


Figura A.9.11. Modelo de riesgo "2". Inundación fluvial. Caso-RN.

Nodo	Bloque	Descripción	Archivo datos de entrada	Variable
Risk	-	Nodo inicial para el cálculo del riesgo total: social o económico.	totalrisk.txt	risk
Flood	a	Periodos de retorno y probabilidades anuales de excedencia de cada escenario de inundación	flood.txt	T, AEP (probabilidad annual de excedencia)
Qmax	b	Caudales máximos de los hidrogramas de cada escenario de inundación	Qmax.txt	T, Qmax
TC (i)	-	Define probabilidades de cada estación del año. p.e. verano=0.2084; invierno=0.7916 (resto del año)	tc_i.txt	season = summer, winter (identifica categorías de tiempo)
TC (ii)	-	Define probabilidades día-noche. p.e. día=0.6; noche=0.4	tc_ii.txt	moment = day, night (identifica categorías de tiempo)
Cons_N	c	Define consecuencias en pérdida de vidas de cada escenario de inundación (identificados por caudales Q_{max})	RN_lives.xls	Qmax, lives
Cons_CT	c	Define consecuencias en pérdidas económicas de cada escenario de inundación (identificados por caudales Q_{max})	RN_euros.txt	Qmax, euros

Tabla A.9.21. Nodos del modelo de riesgo 2. Inundación fluvial. Caso-RN.

FASE VI. DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO PARA EL CASO-RN

a) Cargas

Los escenarios de inundación establecidos en la Tabla A.9.20 (definidos por un periodo de retorno y una probabilidad anual de excedencia asociada) representan las cargas para el modelo de riesgo.

b) Respuesta del sistema

El modelo de riesgo del régimen natural no requiere de datos de entrada en lo referente a respuesta del sistema, salvo la identificación de los caudales máximos asociados a cada periodo de retorno (Q_{max}).

Sin embargo, las características de cada escenario de inundación, obtenidas de la simulación hidráulica del cauce, se emplean para la estimación de datos de entrada para los nodos del bloque de consecuencias.

c) Consecuencias

Del mismo modo que en el caso-base y el caso-PFR, la estimación de consecuencias se divide en pérdida de vidas y pérdidas económicas.

A continuación se describen los pasos de la metodología SUFRI para la obtención de datos de entrada al modelo.

c.1. Pérdida de vidas

c.1.1. Definición de la categoría del caso práctico (C)

En la clasificación propuesta en la metodología SUFRI (Apéndice 1, Tabla A.1.1), para la categoría del caso de estudio en función de las medidas de formación, coordinación, comunicación y aviso existentes, dividida en diez niveles (C1 a C10), la situación correspondiente al régimen natural del río pertenece al nivel C1.

Por tanto, las tasas de mortalidad de referencia (RFR) a emplear para el cálculo del número potencial de víctimas difieren de las tasas empleadas en el caso-base (asociadas a la categoría C4). La Tabla A.9.22 muestra las tasas de referencia para el caso-RN (categoría C1).

Tiempo de aviso, TW (h)	Severidad, Sv		
	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)
0	0.9	0.3	0.02
0.25	0.9	0.3	0.02
0.625	0.7	0.08	0.015
1	-	0.06	0.0006
1.5	-	0.0002	0.0002
24	-	0.0002	0.0001

Tabla A.9.22. Tasas de mortalidad de referencia. Caso-RN. Categoría C1.

c.1.2. Población en riesgo (PR)

Del mismo modo que en el caso-base, se obtiene el área inundada dentro del núcleo urbano para cada escenario de inundación y se calcula la población en riesgo para cada categoría de tiempo (Tabla A.9.23).

Q_{max} (m ³ /s)	Área total, A_T (m ²)	588,358	Población en riesgo, PR			
	Área inundada, A_f (m ²)	A_f/A_T (%)	Categoría de tiempo			
			TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
94	2,949	0.50%	15	14	11	10
166	11,693	1.99%	60	55	45	39
214	13,783	2.34%	71	65	53	47
274	21,366	3.63%	110	101	81	72
319	39,032	6.63%	202	185	149	132
364	51,236	8.70%	265	243	195	173
466	70,390	11.96%	364	333	268	238
511	88,745	15.07%	459	420	338	300
613	97,817	16.61%	506	463	373	330
658	102,313	17.38%	529	484	390	345
759	126,530	21.49%	654	599	482	427
803	142,497	24.20%	737	675	543	481
950	241,571	41.03%	1,249	1,144	921	816
1,097	258,919	43.98%	1,338	1,226	987	874

Tabla A.9.23. Población en riesgo. Inundación fluvial. Caso-RN.

c.1.3. Tiempos de aviso (TW)

A partir de la formulación descrita en la Tabla A.1.4 del Apéndice 1, se establece el tiempo de aviso como la diferencia de tiempo entre los caudales Q_1 (150 m³/s) y Q_2 (200 m³/s) para cada escenario de inundación.

La Tabla A.9.24 muestra los valores obtenidos del tiempo de aviso para el caso-RN.

Q_{max} (m ³ /s)	TC ₁ , TC ₃ (día) TW=TD (horas)	TC ₂ , TC ₄ (Noche) TW=TD-0.25 (horas)
94	-	-
166	-	-
214	3.00	2.75
274	1.75	1.50
319	1.50	1.25
364	1.25	1.00
466	1.25	1.00
511	1.10	0.85
613	1.10	0.85
658	1.00	0.75
759	0.90	0.65
803	0.90	0.65
950	0.85	0.60
1,097	0.80	0.55

Tabla A.9.24. Tiempos de aviso. Caso-RN.

c.1.4. Severidad de la inundación (Sv)

La severidad de la inundación se obtiene a partir del parámetro DV para cada escenario en función del caudal máximo de la avenida y el ancho del área inundada (ver Tabla A.9.25).

c.1.5. Tasas de mortalidad (FR)

Las tasas de mortalidad a aplicar se obtienen de la interpolación de los valores de referencia para la categoría C1 (Tabla A.9.22) en función de la severidad de la inundación y del tiempo de aviso existente, según sea día o noche (ver Tabla A.9.25).

c.1.6. Número de víctimas (N)

La Tabla A.9.25 muestra los valores estimados del número potencial de víctimas para cada escenario de inundación en el caso-RN, en función del tiempo de aviso (TW), severidad de la inundación (Sv), tasa de mortalidad (TR) y población en riesgo (Tabla A.9.23).

Q _{max} (m ³ /s)	Tiempo de aviso, TW		DV	Severidad, Sv	Tasa, FR Día	Tasa, FR Noche	Número de víctimas potenciales, N			
	Día (h)	Noche (h)					Categoría de tiempo			
							TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
94	-	-	1.43	-	-	-	-	-	-	-
166	-	-	2.28	-	-	-	-	-	-	-
214	3.00	2.75	2.17	1	5.73E-04	5.78E-04	0.0	0.0	0.0	0.0
274	1.75	1.50	2.22	1	5.96E-04	6.00E-04	0.1	0.1	0.0	0.0
319	1.50	1.25	2.32	1	6.00E-04	7.80E-03	0.1	1.4	0.1	1.0
364	1.25	1.00	2.31	1	7.80E-03	1.50E-02	2.1	3.6	1.5	2.6
466	1.25	1.00	2.43	1	7.80E-03	1.50E-02	2.8	5.0	2.1	3.6
511	1.10	0.85	2.19	1	1.21E-02	1.70E-02	5.6	7.1	4.1	5.1
613	1.10	0.85	2.12	1	1.21E-02	1.70E-02	6.1	7.9	4.5	5.6
658	1.00	0.75	1.93	1	1.50E-02	1.83E-02	7.9	8.9	5.8	6.3
759	0.90	0.65	1.85	1	1.63E-02	1.97E-02	10.7	11.8	7.9	8.4
803	0.90	0.65	1.82	1	1.63E-02	1.97E-02	12.0	13.3	8.9	9.5
950	0.85	0.60	1.90	1	1.70E-02	2.00E-02	21.2	22.9	15.6	16.3
1,097	0.80	0.55	2.09	1	1.77E-02	2.00E-02	23.6	24.5	17.4	17.5

Tabla A.9.25. Número de víctimas potenciales, N. Inundación fluvial. Caso-RN.

c.2. Pérdidas económicas

Del mismo modo que en la descripción para el caso-base, las pérdidas económicas se estiman como la suma de costes directos e indirectos por inundación.

La Tabla A.9.26 incluye los resultados del cálculo, considerando las áreas inundadas para cada escenario del régimen natural y el coste de referencia igual 49.29 €/m².

Q _{max} (m ³ /s)	Calado H (m)	Coste de referencia CR (€/m ²)	Porcentaje de daños PD (%)	Costes directos CD (€)	Costes indirectos CI (€)	Costes totales CT (€)
94	0	49.29	0.00%	0	0	0
166	0	49.29	0.00%	0	0	0
214	1.6	49.29	71.48%	485,609	131,115	616,724
274	1.8	49.29	74.74%	787,109	212,520	999,629
319	1.8	49.29	74.94%	1,441,761	389,276	1,831,037
364	1.8	49.29	75.09%	1,896,340	512,012	2,408,351
466	2.0	49.29	76.87%	2,667,022	720,096	3,387,118
511	2.1	49.29	77.00%	3,368,166	909,405	4,277,570
613	2.2	49.29	77.00%	3,712,478	1,002,369	4,714,847
658	2.2	49.29	77.00%	3,883,116	1,048,441	4,931,557
759	2.3	49.29	77.00%	4,802,231	1,296,602	6,098,833
803	2.4	49.29	77.00%	5,408,231	1,460,222	6,868,454
950	2.5	49.29	77.00%	9,168,417	2,475,472	11,643,889
1,097	2.6	49.29	77.00%	9,826,830	2,653,244	12,480,075

Tabla A.9.26. Pérdidas económicas. Inundación fluvial. Caso-RN.

FASE VII. CÁLCULO DEL RIESGO PARA EL CASO-RN

A partir del modelo de riesgo definido para el caso-RN (modelo 2) y los datos de entrada anteriores (relaciones Q_{max}-N y Q_{max}-CT) se obtienen los resultados en riesgo asociados al régimen natural del río.

Las curvas F-N y F-D se representan en el siguiente apartado, junto con el caso-base y la situación con medidas no estructurales.

Resumen: Inundación fluvial

Una vez obtenidos los resultados del modelo de riesgo para cada situación planteada (caso-base, caso-PFR y caso-RN), el siguiente paso consiste en la representación de las curvas F-N y F-D de forma conjunta para las tres situaciones.

La Figura A.9.12 muestra las curvas F-N obtenidas para el caso práctico en relación al riesgo social por inundación fluvial (el tramo continuo de la curva F-N para el régimen natural refleja el límite de los resultados obtenidos con el modelo de riesgo).

En la Figura A.9.13 se representan las curvas F-D para la evaluación del riesgo económico por inundación fluvial.

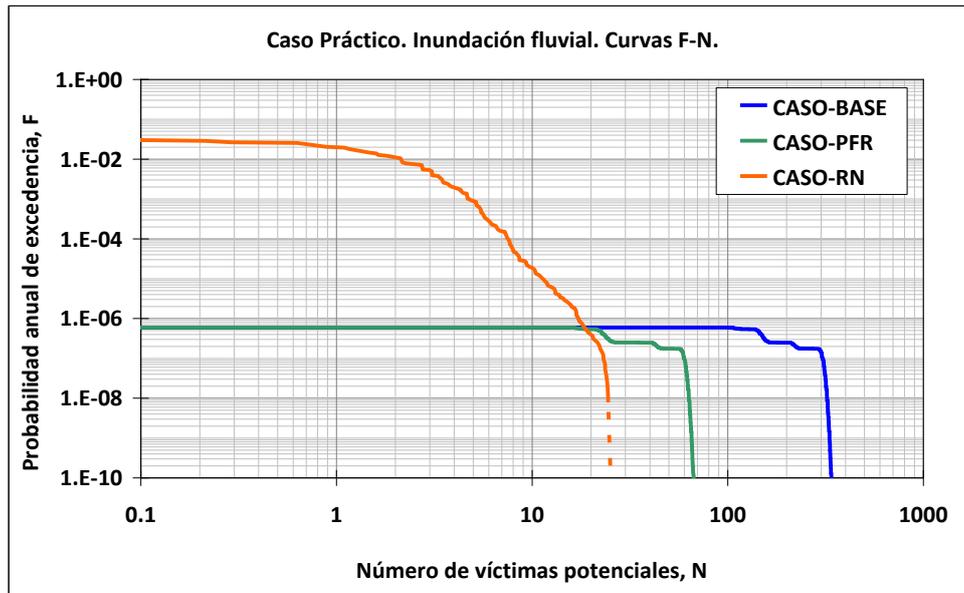


Figura A.9.12. Curvas F-N. Inundación fluvial.

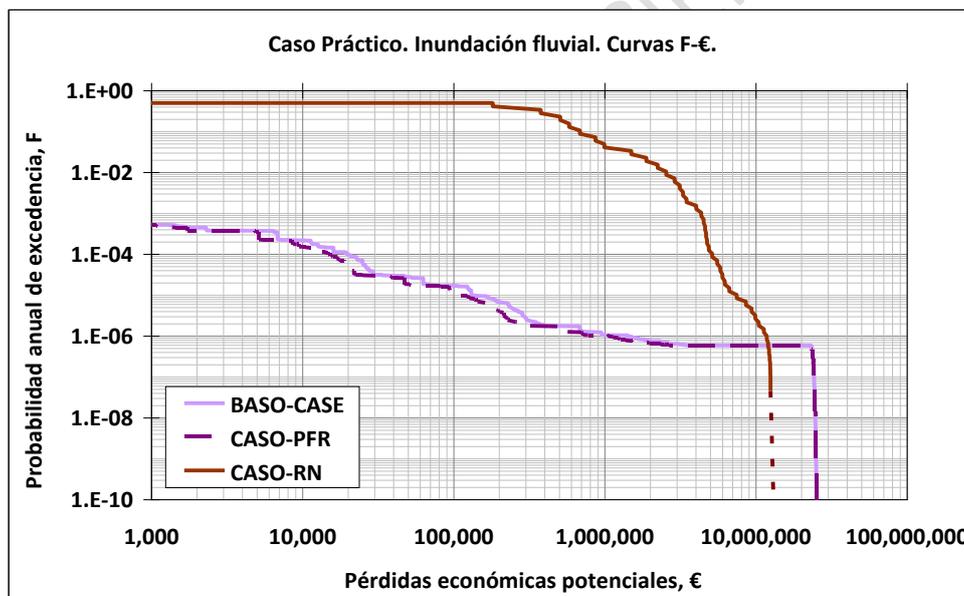


Figura A.9.13. Curvas F-D. Inundación fluvial.

Las figuras A.9.12 y A.9.13 muestran el efecto en reducción del riesgo de inundación por la existencia de medidas estructurales, por comparación del caso-base y el caso-RN para probabilidades superiores a 10^{-6} . Sin embargo, la posible rotura de la presa, para una probabilidad anual de excedencia de $2 \cdot 10^{-7}$, produciría consecuencias muy superiores a las asociadas al régimen natural.

El efecto de la implantación de medidas no estructurales de formación puede apreciarse por un notable descenso del número de víctimas potenciales en la Figura A.9.12. El número máximo de víctimas potenciales en el caso-base asciende a un valor de 351 personas, a diferencia del caso-PFR, que se encuentra en el entorno de 70

víctimas. El efecto de las medidas no estructurales en relación al riesgo económico solamente es apreciable en el tramo de la curva F-D correspondiente a eventos de inundación sin fallo de la infraestructura.

La Tabla A.9.27 muestra algunos de los puntos principales de las curvas F-N para inundación fluvial.

Número potencial de víctimas, N			
F	Caso-base	Caso-PFR	Caso-RN
2.00E-02	-	-	1
6.00E-07	9	1	18
1.00E-08	321	63	25

Tabla A.9.27. Resumen de resultados de las curvas F-N para inundación fluvial.

INUNDACIÓN PLUVIAL

En este apartado se analiza el núcleo urbano del caso práctico frente al riesgo por inundación pluvial (resultante de la escorrentía directa generada en el área urbano en caso de precipitación).

De forma análoga al análisis descrito anteriormente para inundación fluvial, las fases de la metodología SUFRI se aplican en este caso para estudiar el riesgo existente por inundación pluvial y la comparación con la situación con medidas no estructurales.

FASE I. ÁMBITO DEL ESTUDIO

Se definen tres escenarios de estudio para el núcleo urbano en caso de inundación pluvial:

- Situación actual (correspondiente a la existencia del sistema de drenaje actual, denominado caso-base),
- Situación con medidas no estructurales (para analizar el efecto de la implantación de un Programa de Formación a la población en materia de Riesgo de inundación y de sistemas de aviso en caso de emergencia por inundación pluvial, denominado caso-PFR+WR), y,
- Situación sin ningún tipo de medidas (para la comparación con las dos situaciones anteriores, correspondiente al caso en que no se dispone de ningún tipo de sistema de drenaje o captación de aguas pluviales, caso-NDS).

FASE II. REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Del mismo modo que en inundación fluvial, debe analizarse toda la información existente en relación a datos de demografía, usos del suelo, estudios hidrológicos de la cuenca urbana, estudios hidráulicos, características del sistema de drenaje, viario urbano, índices económicos, etc.

Se establecen las mismas categorías de tiempo y de usos del suelo que en inundación fluvial.

Categoría del uso del suelo	Tipo	Área total (m ²)
CU ₁	Residencial	517,755
CU ₂	Industrial	70,603

Tabla A.9.28. Categorías de usos del suelo.

Dadas las dos categorías anteriores, la población en riesgo existente en el núcleo urbano se muestra en la Tabla A.9.29.

Población en riesgo	Verano/día (TC ₁)	Verano/noche (TC ₂)	Invierno/día (TC ₃)	Invierno/noche (TC ₄)
CU ₁	2,839	2,788	2,039	1,988
CU ₂	205	0	205	0
TOTAL	3,044	2,788	2,244	1,988

Tabla A.9.29. Población en riesgo.

En el análisis del riesgo por inundación pluvial se distinguen cuatro zonas dentro del núcleo urbano en función de las características geométricas del viario urbano (ancho y pendiente de las calles). Las características de la inundación en cada una de estas zonas difieren para cada evento de precipitación considerado.

La Figura A.9.14 muestra la localización de las cuatro áreas consideradas en el mapa del núcleo urbano de estudio y la Tabla A.9.30 recoge las principales características de cada área.

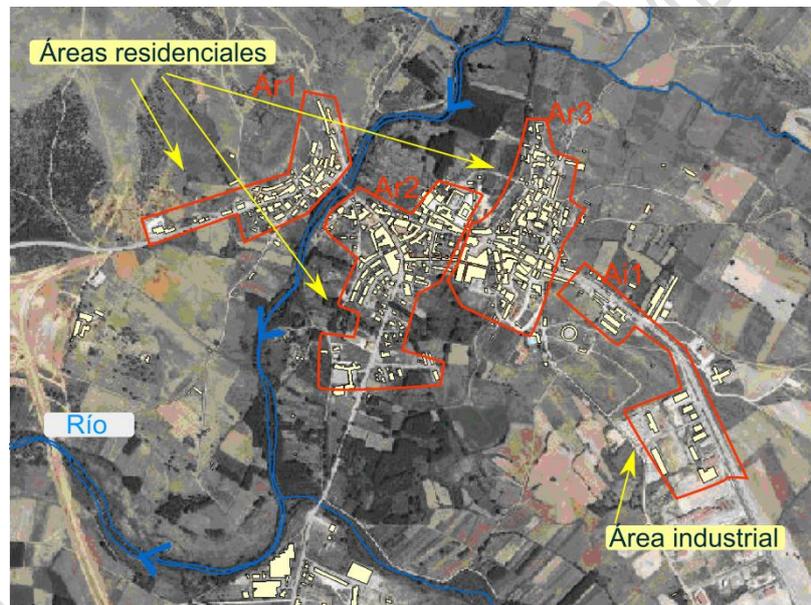


Figura A.9.14. Identificación de áreas con características homogéneas.

	ID	Ancho, b (m)	Pendiente, l(m/m)	Área total (m ²)
CU ₁	Ar1	7	0.0434	103,551
	Ar2	7	0.0060	232,990
	Ar3	5	0.0556	181,214
CU ₂	Ai1	10	0.0050	70,603

Tabla A.9.30. Áreas definidas en el núcleo urbano.

FASE III. ESTUDIO DE LA SITUACIÓN EXISTENTE. DEFINICIÓN DEL CASO-BASE

El estudio de la situación actual se centra en las características de la red de drenaje existente.

El modelo de riesgo del caso-base debe representar la situación actual a partir de las inundaciones producidas por la escorrentía generada por los posibles eventos de precipitación.

FASE IV. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN

Se establecen cinco escenarios de inundación a partir de una serie de retorno desde 5 a 100 años. A partir del estudio hidrológico de la región de estudio se obtienen los índices de precipitación máxima para cada periodo de retorno, recogidos en la Tabla A.9.30.

ID	Periodo de retorno, T (años)	Precipitación (mm)
T1	5	70.8
T2	10	84.1
T3	25	101.0
T4	50	113.4
T5	100	125.8

Tabla A.9. 31. Valores de precipitación máxima para cada periodo de retorno.

FASE V. ARQUITECTURA DEL MODELO DE RIESGO

El modelo de riesgo representativo del caso-base para el análisis del núcleo urbano en inundación pluvial (modelo "3") se muestra en la Figura A.9.15.

Modelo de riesgo "3". Inundación pluvial. Caso-base.



Figura A.9. 15. Modelo de riesgo 3. Inundación pluvial. Caso-base.

La Tabla A.9.32 identifica y describe brevemente cada uno de los nodos del esquema.

Nodo	Bloque	Descripción	Variable
PF	-	Nodo inicial para el cálculo del riesgo total: social o económico.	risk
TC_i	-	Define probabilidades de cada estación del año. p.e. verano=0.2084; invierno=0.7916 (resto del año)	season = summer, winter (identifica categorías de tiempo)
TC_ii	-	Define probabilidades día-noche. p.e. día=0.6; noche=0.4	moment = day, night (identifica categorías de tiempo)
Flood	a	Periodos de retorno y probabilidades anuales de excedencia de cada escenario de inundación	T, AEP (probabilidad anual de excedencia)
Runoff	b	Caudal de escorrentía para cada periodo de retorno establecido.	Q_{pf}
Cons_N	c	Define consecuencias en pérdida de vidas de cada escenario de inundación (identificado por el caudal de escorrentía, Q_{pf})	Q_{pf} , N
Cons_CT	c	Define consecuencias en pérdidas económicas de cada escenario de inundación (identificado por el caudal de escorrentía, Q_{pf})	Q_{pf} , CT

Tabla A.9. 32. Nodos del modelo de riesgo 3. Inundación pluvial. Caso-base.

FASE VI. DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE RIESGO

Los nodos definidos en el esquema del modelo de riesgo para el análisis del caso-base por inundación pluvial requieren de datos de entrada referentes a respuesta del sistema y consecuencias (pues las solicitudes se corresponden con los escenarios de precipitación establecidos para cada periodo de retorno).

b) Respuesta del sistema

Deben estimarse los caudales de escorrentía en el área urbana a partir de los índices de precipitación asociados a cada periodo de retorno.

La metodología SUFRI resume en el apartado 3.1.5.4 algunos de los métodos existentes para la transformación lluvia-escorrentía en cuencas urbanas. En este caso práctico se emplea el Método Racional propuesto por Témez [47].

Los valores empleados de las variables principales del método para el cálculo del caudal de escorrentía se muestran en la Tabla A.9.33.

		Periodos de retorno, T (años)				
		5	10	25	50	100
Precipitación máxima diaria (mm/día)	Pd	70.8	84.1	101	113.4	125.8
Umbral de escorrentía (mm)	Po	4				
Intensidad media diaria (mm/h)	Id	2.95	3.50	4.21	4.73	5.24
Factor	I ₁ /I _d	9				
Intensidad media de la tormenta (mm/h)	I	66.05	78.46	94.23	105.80	117.37
Coefficiente de escorrentía	C	0.39	0.43	0.48	0.52	0.54
Coefficiente de uniformidad temporal	K	1.80				

Tabla A.9.33. Variables del Método Racional.

La Tabla A.9.34 muestra los valores estimados del caudal de escorrentía en las cuatro áreas identificadas en el núcleo urbano, a partir de los valores descritos en la Tabla A.9.32:

ID	Cuenca (km ²)	Tiempo de concentración, t _c (min)	Caudal de escorrentía, Q _{runoff} (m ³ /s)				
			Periodo de retorno, T (años)				
			5	10	25	50	100
Ar1	0.7	6	8.94	11.89	15.95	19.09	22.36
Ar2	0.85	7.1	10.86	14.44	19.36	23.18	27.15
Ar3	0.55	5	7.03	9.34	12.53	15.00	17.56
Ai1	0.6	6.2	7.66	10.19	13.67	16.37	19.16

Tabla A.9.34. Caudales de escorrentía para cada periodo de retorno y área.

El sistema de drenaje existente es capaz de captar la escorrentía generada hasta el periodo de retorno de 5 años, por tanto, los caudales de escorrentía a considerar para la estimación de las características de la inundación se obtienen mediante la resta de los valores asociados al periodo T=5 años con respecto a los resultados mostrados en la Tabla A.9.34.

La Tabla A.9.35 recoge los valores del caudal de escorrentía a emplear (Q_{pf}) para los cálculos del régimen hidráulico de cada escenario de inundación.

Q _{pf} (m ³ /s)
Periodo de retorno, T (años)

ID	5	10	25	50	100
Ar1	-	2.95	7.00	10.15	13.41
Ar2	-	3.58	8.50	12.33	16.29
Ar3	-	2.32	5.50	7.98	10.54
Ai1	-	2.53	6.00	8.701	11.50

Tabla A.9. 35. Caudales de escorrentía para el cálculo del caso-base.

Una vez conocidos los caudales de escorrentía en el área urbana, pueden efectuarse modelos hidráulicos para simular la respuesta del área urbana a los eventos de precipitación establecidos. No obstante, si no se dispone de información suficiente para la creación del modelo, pueden estimarse las características del flujo a partir de la geometría de las calles para cada área definida en la Tabla A.9.31.

Dados los caudales de escorrentía anteriores, se estiman los valores de velocidad y calado de la inundación considerando las características geométricas del viario urbano en cada área identificada (A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} y A_{i1}).

La Tabla A.9.36 muestra las características de la inundación (calado y velocidad), para cada escenario de inundación y área, en el caso-base.

Área	v (m/s)					y (m)				
	Escenario de inundación					Escenario de inundación				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Ar1	-	3.87	5.43	6.27	6.98	-	0.11	0.18	0.23	0.27
Ar2	-	2.28	3.17	3.65	4.04	-	0.22	0.38	0.48	0.58
Ar3	-	4.31	6.03	6.95	7.72	-	0.11	0.18	0.23	0.27
Ai1	-	1.68	2.32	2.67	2.97	-	0.15	0.26	0.33	0.39

Tabla A.9.36. Características de la inundación. Caso-base.

c) Consecuencias

Para la obtención de datos de entrada al modelo de riesgo se emplea el diagrama incluido en el Apéndice 2.

c.1. Pérdida de vidas

c.1.1. Definición de la categoría del caso práctico (C_p)

La definición de la categoría para el análisis del caso-base depende de la existencia de sistemas de aviso a la población (Tabla A.2.1, Apéndice 2). El caso-base corresponde con la categoría C_{p1} .

Las tasas de mortalidad a emplear en los cálculos se muestran en la Tabla A.9.37.

Severidad	C _{p1}				
	S0	S1	S2	S3	S4
Tasas de mortalidad, FR _p	0.0003	0.0021	0.0038	0.0105	0.0448

Tabla A.9.37. Tasas de mortalidad. Inundación pluvial. Caso-base.

Como se describe en la metodología SUFRI, las tasas propuestas se basan en valores promedio de edad poblacional y presencia de grupos altamente vulnerables (enfermos, discapacitados, etc.). En este caso práctico se considera que la población se corresponde con niveles próximos a la media nacional.

c.1.2. Severidad de la inundación (S)

La severidad de la inundación en el análisis del riesgo por inundación pluvial se basa en la clasificación recogida en la Tabla 1.5.10 y el Apéndice 2.

El nivel de severidad de cada escenario de inundación se obtiene considerando los valores de calado y velocidad en cada área, descritos en la Tabla A.9.36. La Tabla A.9.37 resume los resultados, empleando el código de colores propuesto en la Figura 1.5.7. (ver también Apéndice 2).

ID	Severidad de la inundación				
	T1	T2	T3	T4	T5
Ar1	-	S3	S3	S3	S3
Ar2	-	S3	S3	S3	S3
Ar3	-	S3	S3	S3	S3
Ai1	-	S2	S3	S3	S3

Tabla A.9.38. Severidad de la inundación. Caso-base.

c.1.3. Población expuesta (PR_{out}/PR_{in})

Las tasas de mortalidad se aplican a un nivel de población expuesta a la inundación. La población en riesgo puede variar para cada escenario de inundación. En este caso se considera que la población en riesgo (PR) es igual a la población total en el núcleo.

La exposición de la población en riesgo depende de la ubicación de la persona afectada en el momento de la inundación (en el exterior o en el interior de edificios). En este ejemplo, se considera sólo la fracción de la población en riesgo que se encuentra en el exterior durante el evento de inundación, PR_{out} .

El valor de PR_{out} se estima como el 10% de la población existente durante el día y el 1% durante la noche.

La Tabla A.9.39 muestra los valores estimados de población expuesta para el caso-base.

ID		Población expuesta, PR _{out}			
		Categoría de tiempo			
		TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄
CU ₁	Ar1	57	6	41	4
	Ar2	128	13	92	9
	Ar3	99	10	71	7
	TOTAL CU ₁	284	28	204	20
CU ₂	Ai1	21	0	21	0

Tabla A.9.39. Población expuesta. Caso-base.

c.1.4. Número potencial de víctimas (N)

El número de víctimas potenciales para cada escenario de inundación se obtiene mediante la multiplicación de las tasas de mortalidad, asociadas a la categoría C_{p1}, por la población expuesta.

La Tabla A.9.40 recoge los resultados obtenidos por escenario de inundación (T) y categoría de tiempo (TC).

	Número de víctimas potenciales, N ²⁰															
	TC ₁				TC ₂				TC ₃				TC ₄			
	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5
CU ₁	3.0	3.0	3.0	3.0	0.3	0.3	0.3	0.3	2.1	2.1	2.1	2.1	0.2	0.2	0.2	0.2
CU ₂	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL	3.1	3.2	3.2	3.2	0.3	0.3	0.3	0.3	2.2	2.4	2.4	2.4	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabla A.9.40. Número de víctimas potenciales, N. Inundación pluvial. Caso-base.

Los resultados obtenidos pueden ordenarse en un archivo Excel en el que se lista el número de víctimas (N) por cada escenario de inundación (T) y categoría de tiempo (TC).

c.2. Pérdidas económicas

c.2.1. Costes de referencia (CR)

Se definen los mismos costes de referencia que en inundación fluvial: 49.29 €/m² para uso residencial y 14.23 €/m² para uso industrial.

²⁰ TC=categoría de tiempo, T=periodo de retorno.

c.2.2. Porcentaje de daños (PD)

Del mismo modo, se emplea la curva calado-daños recogida en el Apéndice 5 para la obtención del porcentaje de daños para cada escenario de inundación a partir de los valores de calado descritos en la Tabla A.9.36.

La Tabla A.9.41 muestra los valores estimados del porcentaje de daños en cada área.

ID	Área inundada, A_f (m ²)	Calado, y (m)				Porcentaje de daños, PD (%)			
		T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5
Ar1	103,551	0.11	0.18	0.23	0.27	0.5%	0.9%	1.2%	1.6%
Ar2	232,990	0.22	0.38	0.48	0.58	1.2%	2.4%	3.5%	4.7%
Ar3	181,214	0.11	0.18	0.23	0.27	0.5%	0.9%	1.2%	1.5%
Ai1	70,603	0.15	0.26	0.33	0.39	0.8%	1.4%	1.9%	2.4%

Tabla A.9.41. Porcentaje de daños. Caso-base.

c.2.3. Costes directos, indirectos y totales (CD, CI y CT)

Los costes directos se obtienen mediante el producto del coste de referencia por el área inundada y el porcentaje de daños. Se estima que los costes indirectos suponen un 27% de los costes directos por inundación.

La Tabla A.9.42 muestra los costes totales (en euros) para cada escenario de inundación.

ID	Área inundada, A_f (m ²)	Costes directos, CD (€)			
		T2	T3	T4	T5
Ar1	103,551	27,737	47,008	63,029	79,632
Ar2	232,990	135,415	272,152	406,248	540,068
Ar3	181,214	47,947	81,508	109,169	138,321
Ai1	70,603	7,641	14,710	19,774	24,435
Costes totales CT (€), $CT = (1+fc) \cdot CD$		277,800	527,531	759,740	993,719

Tabla A.9.42. Costes totales por inundación pluvial. Caso-base.

FASE VII. CÁLCULO DEL RIESGO

Las relaciones $T-Q_{pf}$, $Q_{pf}-N$ y $Q_{pf}-CT$ se agrupan en los archivos de datos de entrada al modelo de riesgo para el caso-base (modelo 3).

FASE VIII. REPRESENTACIÓN DE CURVAS F-N Y F-D

Los resultados obtenidos para el caso-base se representan en las Figuras A.9.16 y A.9.17.

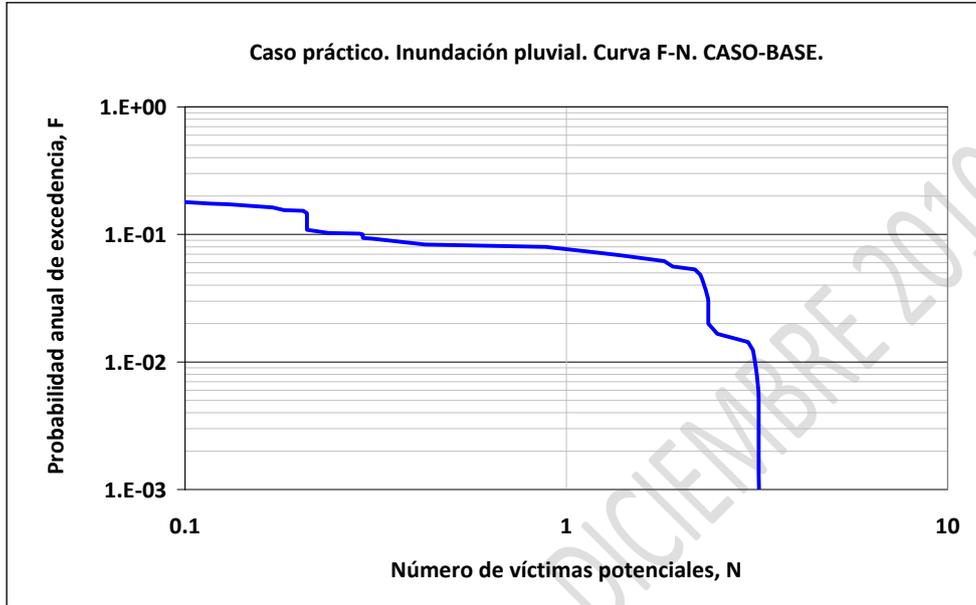


Figura A.9.16. Curva F-N. Inundación pluvial. Caso-base.

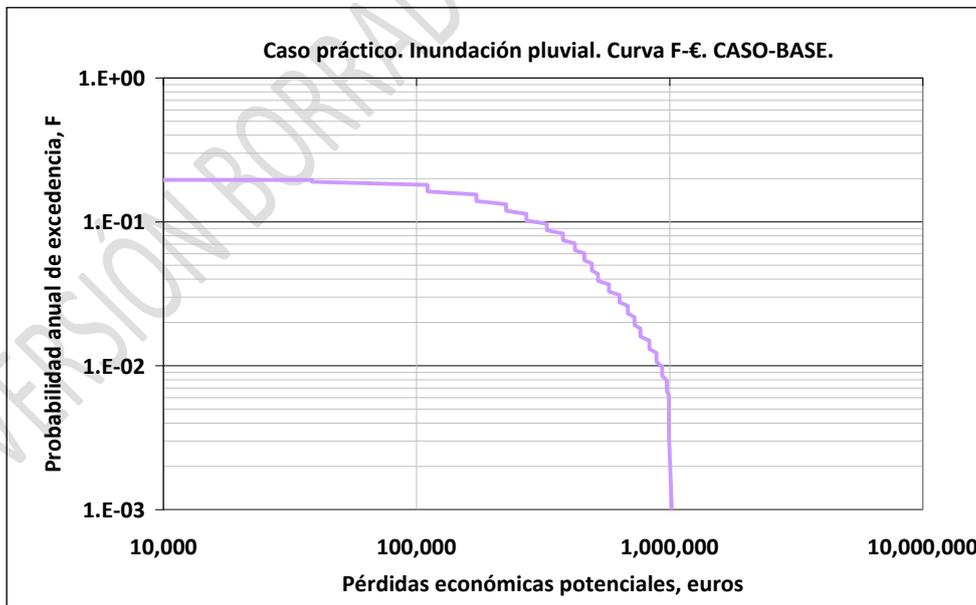


Figura A.9.17. Curva F-D. Inundación pluvial. Caso-base.

FASE IX. EVALUACIÓN DEL RIESGO

Previamente a la evaluación del riesgo existente, se procede a la obtención de las curvas F-N y F-D para las situaciones con medidas no estructurales y la situación sin ningún tipo de medidas (sin sistema de drenaje).

FASE X. INCORPORACIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

En primer lugar se estudia la situación con medidas no estructurales (caso-PFR+WS) y posteriormente, se procede al cálculo del riesgo en caso de no existir ningún tipo de sistema de drenaje.

Caso-PFR+WS (medidas no estructurales)

Para el análisis de la situación con medidas no estructurales se emplea el modelo de riesgo del caso-base, así como las características hidráulicas de cada escenario de inundación. Por tanto, deben definirse los cambios a efectuar en el proceso de estimación de datos de entrada al modelo en términos de pérdida de vidas y pérdidas económicas.

Pérdida de vidas

- *Definición de la categoría del caso práctico (C_p)*

La situación con medidas no estructurales incluye la implantación de un sistema de aviso a la población en caso de inundación pluvial. Por tanto, la categoría debe modificarse hasta el nivel C_{p3} , de modo que las tasas a emplear corresponden con los valores de la Tabla A.9.43.

	C_{p3}				
Severidad	S0	S1	S2	S3	S4
Tasas de mortalidad, FR_p	0.0002	0.0015	0.0027	0.0075	0.0320

Tabla A.9.43. Tasas de mortalidad. Caso-PFR+WS.

- *Población expuesta (PR_{out})*

La implantación de un programa de formación a la población en materia de riesgo de inundación se establece en la metodología SUFRI como una reducción del número de personas expuestas a la inundación. En este caso práctico, se propone una reducción del 50% de los niveles de población expuesta obtenidos para el caso-base.

ID	Población expuesta, PR _{out}				
	Categoría de tiempo				
	TC ₁	TC ₂	TC ₃	TC ₄	
CU ₁	Ar1	29	3	21	2
	Ar2	64	7	46	5
	Ar3	50	5	36	4
	TOTAL CU ₁	143	15	103	11
CU ₂	Ai1	11	0	11	0

Tabla A.9.44. Población expuesta. Caso-PFR+WS.

Pérdidas económicas

- Porcentaje de daños (PD)

La implantación de un programa de formación a la población junto con la existencia de sistemas de aviso se incorpora en la metodología SUFRI como un porcentaje de reducción de los daños materiales causados por la inundación por la instalación de barreras al paso del agua por parte de los propios ciudadanos. Este porcentaje de reducción, RD, puede obtenerse tal y como se ha descrito anteriormente en inundación fluvial. Sin embargo, puede considerarse una modificación a dicho porcentaje de reducción en función de la categoría de tiempo, pues no puede considerarse que existe protección en aquellas viviendas que solamente se habitan durante el verano (segundas residencias), en cuyo caso puede emplearse la siguiente ecuación:

$$CT_{PFR+WR} = CT_{caso-base} \cdot (1 - K_{TC} \cdot RD)$$

donde K_{TC} es el ratio entre población existente en invierno y población en verano.

Las Tablas A.9.45 y A.9.46 muestran los resultados obtenidos para el caso-PFR+WS.

	Número de víctimas potenciales, N															
	Categoría de tiempo															
	TC ₁				TC ₂				TC ₃				TC ₄			
	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5	T2	T3	T4	T5
CU ₁	1.1	1.1	1.1	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1
CU ₂	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL	1.1	1.1	1.1	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabla A.9.45. Número de víctimas potenciales, N. Inundación pluvial. Caso-PFR+WS.

Costes totales, CT (€)	Escenario de inundación			
	T2	T3	T4	T5
Caso-base	277,800	527,531	759,740	993,719
Caso-PFR+WS(TC ₁ , TC ₂)	208,350	395,648	569,805	745,289
Caso-PFR+WS(TC ₃ , TC ₄)	227,921	432,811	623,327	815,294

Tabla A.9.46. Costes totales por inundación pluvial. Caso-PFR+WS.

Las Figuras A.9.18 y A.9.19 muestran la representación de las curvas F-N y F-D para el caso-PFR+WS tras la introducción de los nuevos datos de entrada al modelo de riesgo (Tablas A.9.45 y A.9.46) en el bloque de consecuencias.

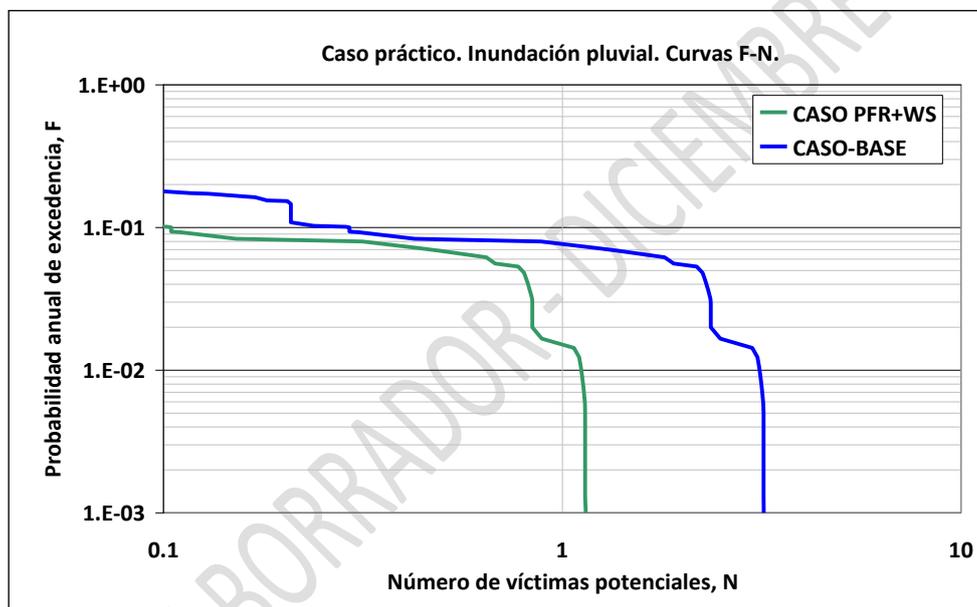


Figura A.9.18. Curva F-N. Inundación pluvial. Caso-PFR+WS.

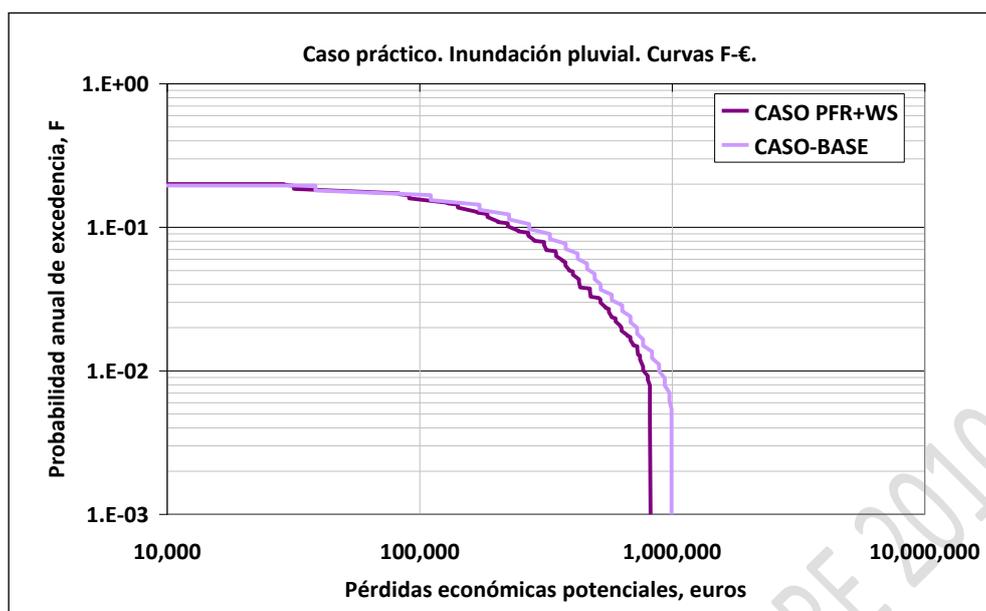


Figura A.9. 19. Curva F-D. Inundación pluvial. Caso-PFR+WS.

Caso-NDS

El estudio de la situación sin ningún tipo de medidas (es decir, la situación sin la existencia del sistema de drenaje actual) emplea el esquema del modelo de riesgo del caso-base (modelo “3”), pero requiere del cálculo de nuevas condiciones del flujo para cada escenario de inundación.

Para el análisis del caso-NDS se utilizan los caudales de escorrentía obtenidos por aplicación del Método Racional, sin efectuar la resta de los valores asociados al periodo de retorno de 5 años (pues en esta situación no se dispone de ningún sistema de captación del agua de escorrentía).

La Tabla A.9.47 muestra los valores del caudal de escorrentía a emplear para el caso-NDS.

ID	Cuenca (km ²)	Tiempo de concentración, t _c (min)	Caudal de escorrentía, Q _{runoff} (m ³ /s)				
			Periodo de retorno, T (años)				
			5	10	25	50	100
Ar1	0.7	6	8.94	11.89	15.95	19.09	22.36
Ar2	0.85	7.1	10.86	14.44	19.36	23.18	27.15
Ar3	0.55	5	7.03	9.34	12.53	15.00	17.56
Ai1	0.6	6.2	7.66	10.19	13.67	16.37	19.16

Tabla A.9.47. Caudales de escorrentía. Caso-NDS.

Los nuevos valores del caudal de escorrentía en cada área y escenario de inundación requieren la estimación de las nuevas características hidráulicas (calado y velocidad) asociadas a la situación sin medidas estructurales.

La Tabla A.9.48 muestra los niveles de severidad resultantes en el caso-NDS.

ID	Severidad, S				
	T1	T2	T3	T4	T5
Ar1	S3	S3	S3	S3	S3
Ar2	S3	S3	S3	S4	S4
Ar3	S3	S3	S4	S4	S4
Ai1	S3	S3	S3	S3	S3

Tabla A.9.48. Severidad de la inundación. Caso-NDS.

A partir de los niveles de severidad anteriores y empleando las tasas de mortalidad de la categoría C_{p1} (pues no existe sistema de aviso), se obtiene el número de víctimas para cada escenario de inundación y categoría de tiempo para el caso-NDS.

	Número de víctimas potenciales, N																			
	Categoría de tiempo																			
	TC ₁					TC ₂					TC ₃					TC ₄				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
CU ₁	3.0	3.0	12.7	12.7	12.7	0.3	0.3	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	9.1	9.1	9.1	0.2	0.2	0.9	0.9	0.9
CU ₂	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL	3.2	3.2	12.9	12.9	12.9	0.3	0.3	1.2	1.2	1.2	2.4	2.4	9.3	9.3	9.3	0.2	0.2	0.9	0.9	0.9

Tabla A.9.49. Número de víctimas potenciales, N. Inundación pluvial. Caso-NDS.

La existencia de nuevos calados de inundación para cada área y escenario de inundación supone el cálculo del porcentaje de daños a emplear para la estimación de pérdidas económicas.

La Tabla A.9.50 presenta los valores estimados del porcentaje de daños para el caso-NDS. Los costes totales por inundación pluvial se muestran en la Tabla A.9.51.

ID	Área inundada, A_f (m ²)	Calado, y (m)					Porcentaje de daños, PD (%)				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Ar1	103,551	0.21	0.25	0.31	0.34	0.38	1.1%	1.4%	1.8%	2.1%	2.3%
Ar2	232,990	0.45	0.53	0.64	0.72	0.80	3.1%	4.2%	7.0%	10.5%	14.0%
Ar3	181,214	0.21	0.25	0.30	0.34	0.38	1.1%	1.4%	1.8%	2.1%	2.3%
Ai1	70,603	0.30	0.36	0.43	0.48	0.53	1.8%	2.2%	2.9%	3.5%	4.1%

Tabla A.9.50. Porcentaje de daños. Caso-NDS.

ID	Área inundada, A_f (m ²)	Costes directos, CD (€)				
		T1	T2	T3	T4	T5
Ar1	103,551	56,392	72,089	91,511	105,364	118,885
Ar2	232,990	353,072	479,123	798,551	1,206,137	1,606,662
Ar3	181,214	97,539	125,064	159,238	183,690	207,618
Ai1	70,603	17,911	22,318	29,302	35,782	42,107
Costes totales CT (€), $CT = (1+fc) \cdot CD$		666,641	887,215	1,369,825	1,944,337	2,508,596

Tabla A.9.51. Costes totales por inundación pluvial. Caso-NDS.

A continuación se muestra el resumen de las tres situaciones analizadas para el análisis del riesgo por inundación pluvial en el núcleo urbano de estudio.

Resumen: Inundación pluvial

Las Figuras A.9.19 y A.9.20 muestran las curvas F-N y F-D de las tres situaciones analizadas: situación actual (caso-base), situación con medidas no estructurales (caso-PFR+WS) y situación sin ningún tipo de medidas (caso-NDS).

La Tabla A.9.52 recoge los resultados de los puntos principales de la curva F-N.

F	Número potencial de víctimas, N		
	Caso-base	Caso-PFR+WS	Caso-NDS
1.00E-01	0	0	1
1.00E-02	3	1	9
1.00E-03	3	1	13

Tabla A.9.52. Resumen de resultados de las curvas F-N para inundación pluvial.

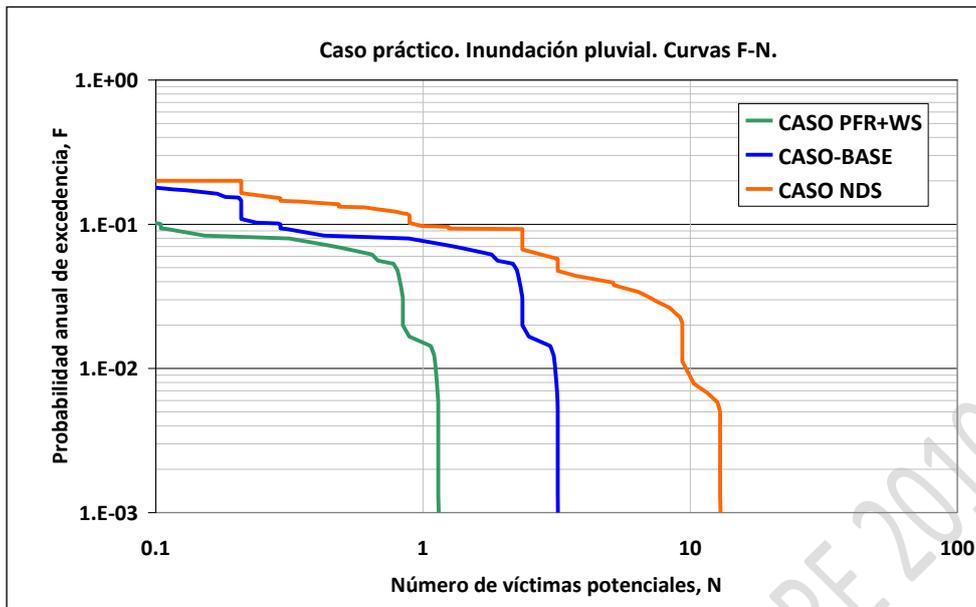


Figura A.9.20. Curvas F-N. Inundación pluvial.

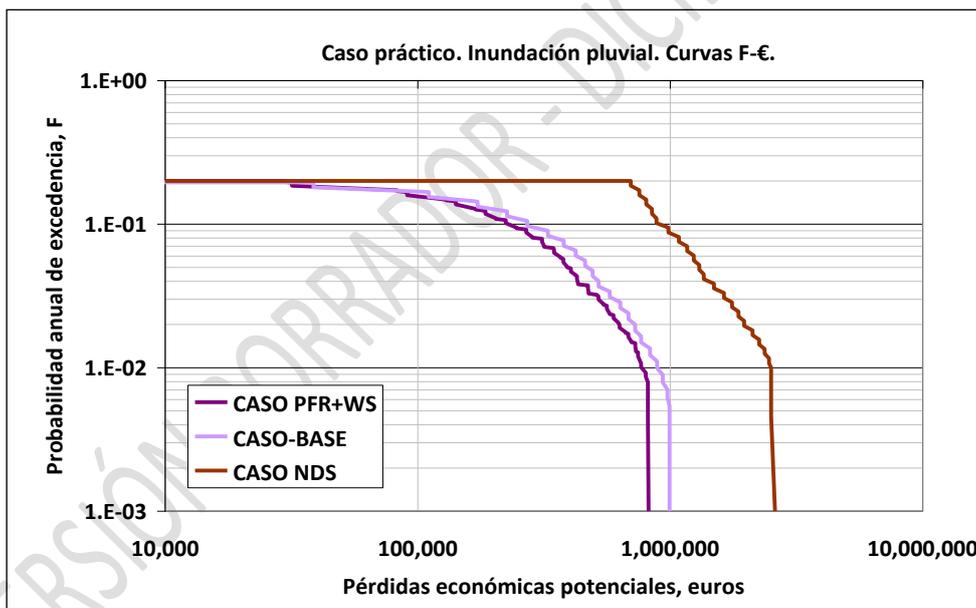


Figura A.9.21. Curvas F-D. Inundación pluvial.

RIESGO TOTAL: INUNDACIÓN FLUVIAL + PLUVIAL

Por último, una vez analizado el riesgo social y económico tanto en caso de inundación fluvial como pluvial, la fase final se basa en la creación de las curvas conjuntas F-N y F-D del caso de estudio. Las curvas conjuntas representan el riesgo de inundación existente total, agregando tanto el riesgo por inundación fluvial como el riesgo por inundación pluvial.

El análisis de la situación sin ningún tipo de medidas se plantea mediante la combinación de los casos RN y NDS, de modo que se emplea el modelo de riesgo "2", utilizando como datos de entrada para el bloque de consecuencias los valores agregados de ambos casos en términos de pérdida de vidas y costes económicos, es decir:

$$N_{\text{situación sin medidas}} = N_{\text{RN}} + N_{\text{NDS}}$$

$$CT_{\text{situación sin medidas}} = CT_{\text{RN}} + CT_{\text{NDS}}$$

Para la situación actual (caso-base) y la situación con medidas no estructurales, se crea un modelo de riesgo conjunto (modelo "4"). Este modelo conjunto surge de la combinación de los modelos "1" y "3". El esquema resultante se muestra en la Figura A.9.22.

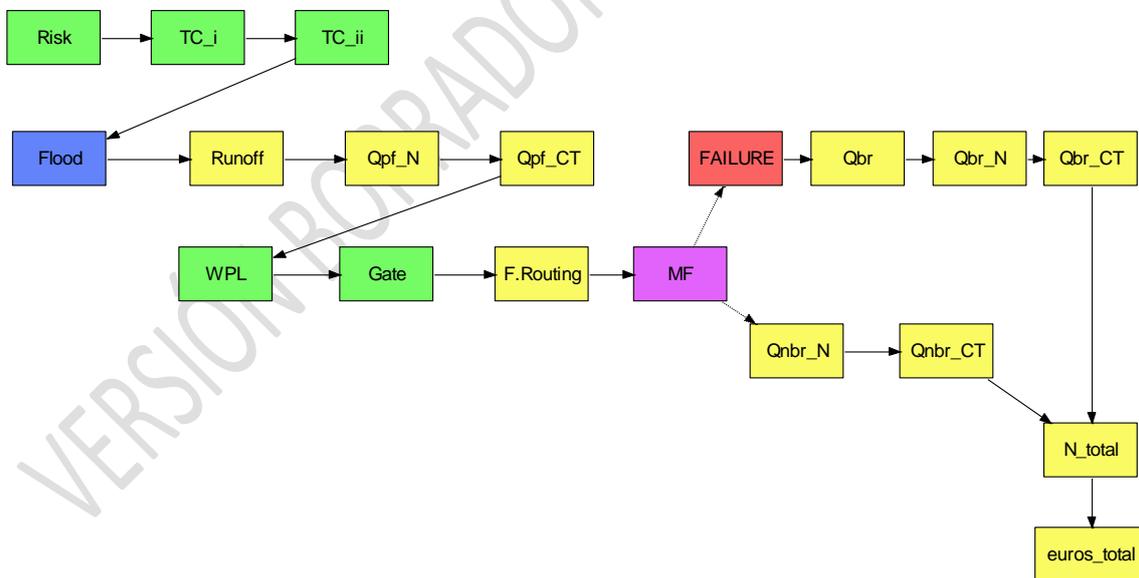


Figura A.9.22. Modelo de riesgo "4". Esquema conjunto. Inundación fluvial+pluvial.

Finalmente, las curvas F-N y F-D del caso práctico se representan en las Figuras A.9.23 y A.9.24., permitiendo la evaluación conjunta de las tres situaciones estudiadas.

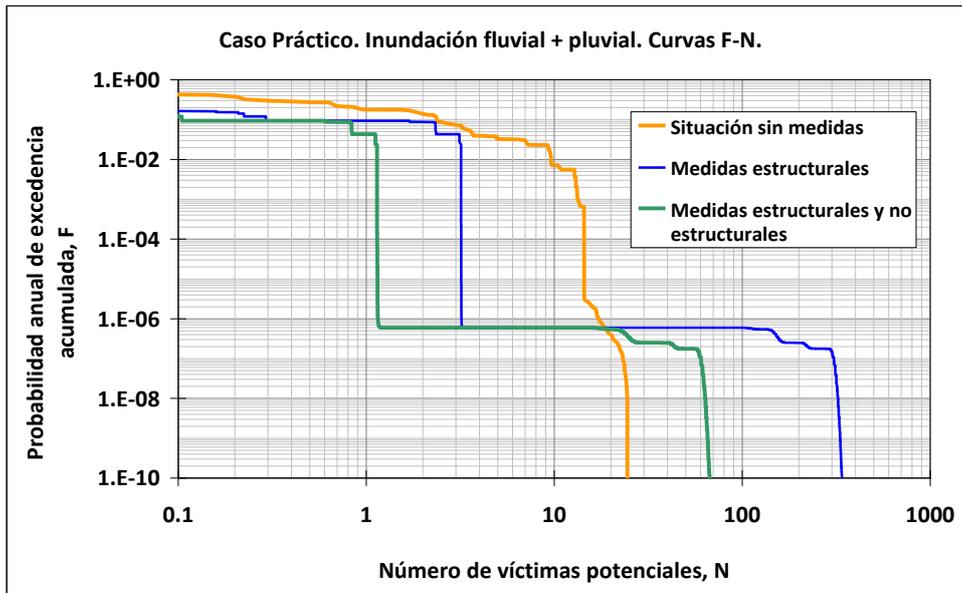


Figura A.9.23. Curvas F-N. Inundación fluvial + pluvial.

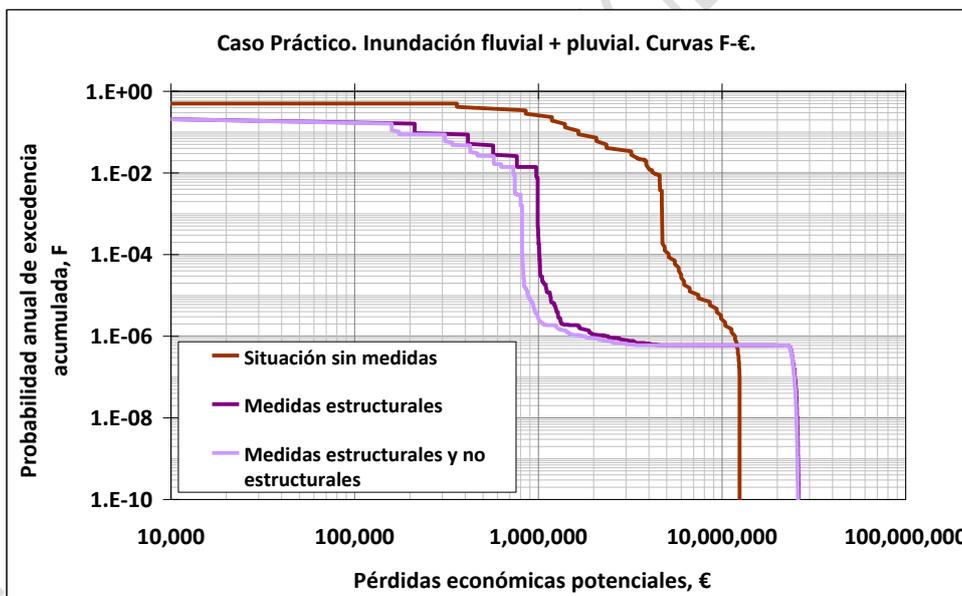


Figura A.9.24. Curvas F-D. Inundación fluvial + pluvial.

Las Tablas A.9.53 y A.9.54 muestran los valores en riesgo social y económico de los puntos más representativos de las curvas del análisis conjunto.

Número potencial de víctimas, N			
F	Sin medidas	Medidas estructurales	Medidas estructurales y no estructurales
1.00E-01	2	0	0
1.00E-02	10	3	1
1.00E-04	14	3	1
1.00E-08	25	321	63

Tabla A.9.53. Resumen de resultados de las curvas F-N para inundación fluvial+pluvial.

Pérdidas económicas potenciales, €			
F	Sin medidas	Medidas estructurales	Medidas estructurales y no estructurales
1.00E-01	1,654,634	212,068	174,241
1.00E-02	4,019,919	975,811	732,039
1.00E-07	12,477,470	24,758,006	24,758,006

Tabla A.9.54. Resumen de resultados de las curvas F-D para inundación fluvial+pluvial.

Como ejemplo final, se incluye en la Figura A.9.25 la representación conjunta de las curvas F-N del caso práctico junto con los límites de tolerabilidad propuestos por Vrijling, 2001 [50], para los índices $C_N=4$ y $C_N=100$, correspondientes a valores $k=3$, $\alpha=2$ y $\beta=0.06$, para el primer caso, y $\beta=0.3$ en el segundo caso (ver Apéndice 8).

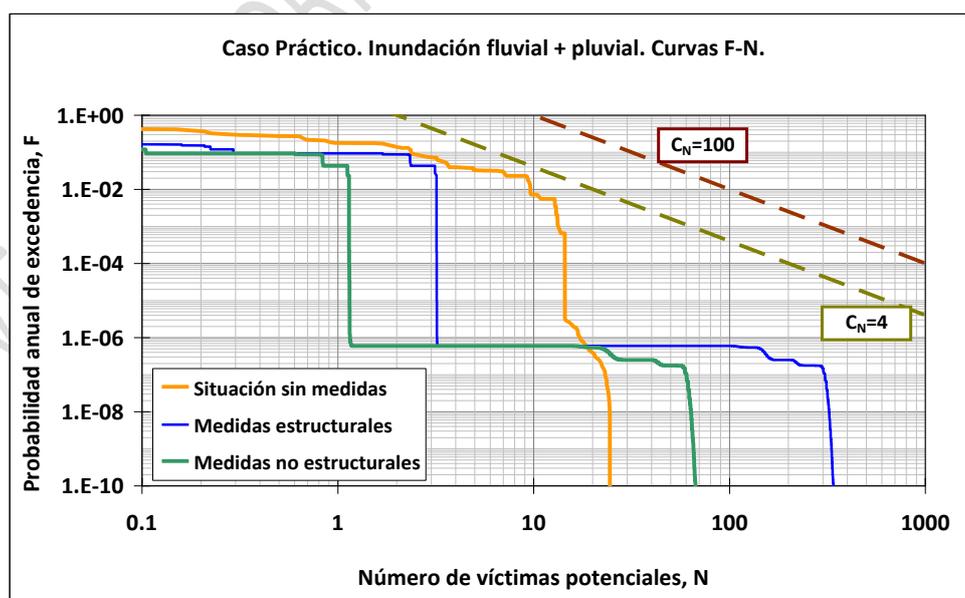


Figura A.9.25. Representación de límites de tolerabilidad.

VERSIÓN BORRADOR - DICIEMBRE 2010