



Notas Técnicas

Métodos de evaluación de riesgos y amenazas de inundación



Financiado por



© 2016 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial
1818 H St. NW
Washington DC, 20433 EE.UU.
Teléfono: 202-473-1000
Sitio web: www.worldbank.org

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

La presente obra fue publicada originalmente por el Banco Mundial en inglés, con el título *Methods in Flood Hazard and Risk Assessment* en 2016. En caso de discrepancias, prevalecerá el idioma original.

Derechos y autorizaciones

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: pubrights@worldbank.org.

Foto de la portada: Getty Images
Diseño de la portada: FCI Creative

ANTECEDENTES

En esta nota técnica, se proporciona una perspectiva general para las autoridades que desean realizar evaluaciones de riesgos y amenazas de inundación, y que deben desarrollar un plan paso a paso apropiado y viable en el contexto local para llevar a cabo dichas evaluaciones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que muchos aspectos de la evaluación de riesgos y amenazas de inundación requieren conocimientos técnicos específicos y experiencia. No se recomienda llevar a cabo estas evaluaciones si su equipo carece de esta experiencia, y esta nota técnica no proporciona guías específicas, que pueden variar radicalmente dependiendo de las condiciones locales y regionales.

Este documento ha sido producido por Daniel B. Wright, Ph.D., Consultor en Gestión de Riesgos de Desastres, bajo la guía y la supervisión de Fernando Ramirez-Cortés y Oscar A. Ishizawa, Especialistas Sénior en Gestión de Riesgos de Desastres, como parte de las notas técnicas desarrolladas en el marco del Programa de Evaluación Probabilista del Riesgo de Desastres (CAPRA; Probabilistic Risk Assessment Program) para América Latina y el Caribe del Banco Mundial.

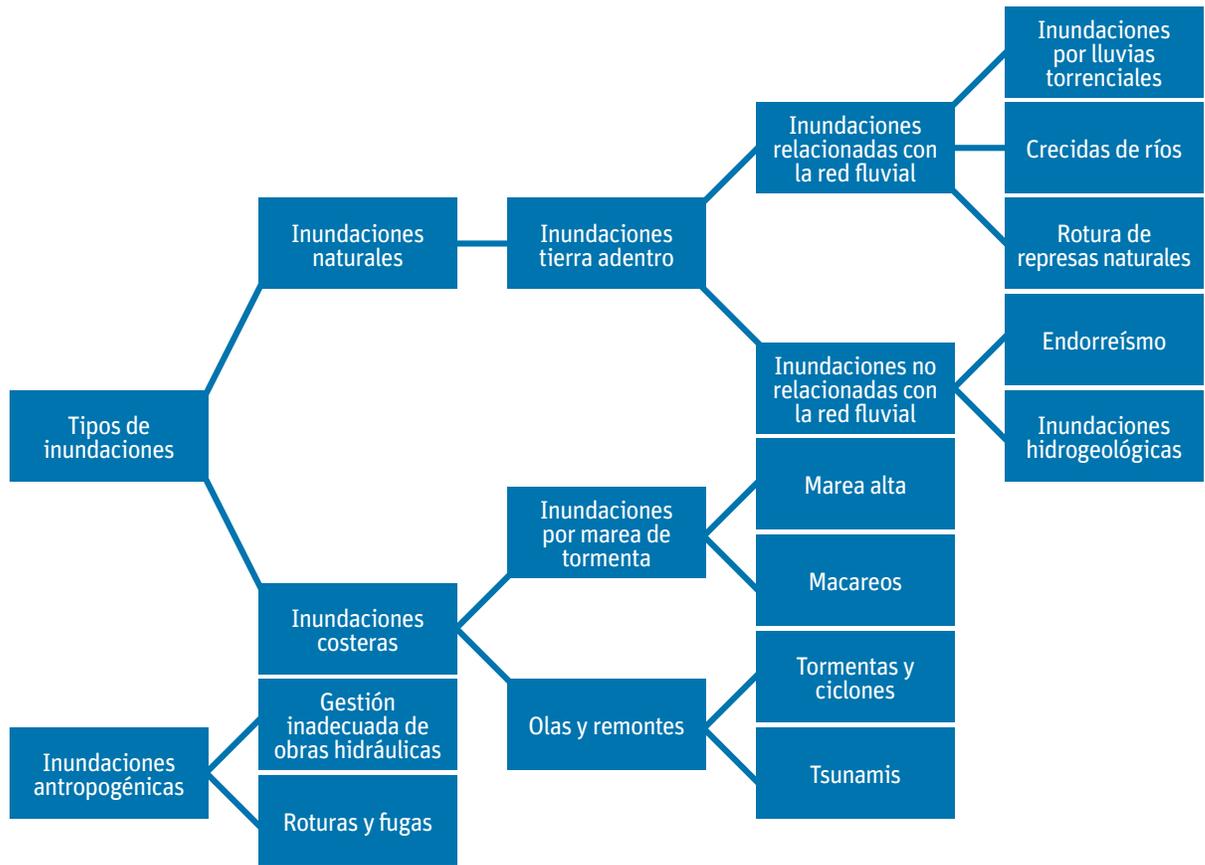
Revisión técnica por María Carolina Rogelis, Consultora Sénior en Evaluación de Riesgos de Inundación.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones se encuentran entre los tipos de desastre más frecuentes y destructivos, causan daños significativos y afectan los medios de subsistencia alrededor del mundo. Existe una gran variedad de métodos de gestión de riesgos de inundaciones que puede reducir esa destrucción, y la gestión de riesgos de inundaciones requiere un cálculo de las amenazas de inundación y de los impactos que estas pueden tener. La estimación correcta del riesgo es un desafío y requiere considerar meticulosamente una variedad de factores, incluidas propiedades de la cuenca hidrográfica como tamaño, topografía y uso del suelo; los tipos y las características de las tormentas que producen precipitaciones e inundaciones en la región; y el número, la ubicación y los tipos de edificación y otros bienes que pueden sufrir daños. Las evaluaciones de riesgos y amenazas mal realizadas pueden dar como resultado malas decisiones de gestión de riesgos, desde protección insuficiente hasta el despilfarro de fondos escasos en protección innecesaria. Por el contrario, las evaluaciones de riesgos y amenazas de inundación llevadas a cabo de manera correcta pueden proporcionar un apoyo valioso para una variedad de decisiones, como la planificación maestra del uso del suelo, el diseño de infraestructura y la preparación de respuestas ante emergencias.

Se pueden encontrar distintos tipos de inundaciones en la figura 1. Antes de realizar una evaluación de amenazas, es necesario determinar qué tipos de inundación son los más comunes o destructivos en el área, ya que, en la mayoría de los casos, la selección de métodos de modelización de riesgos y amenazas varía según el tipo de inundación. En (FEMA, 2003a) pueden encontrarse especificaciones detalladas para la evaluación de amenazas de inundación. Si bien esta nota técnica se centra en **inundaciones fluviales** (es decir, inundaciones en sistemas de ríos), los conceptos generales pueden aplicarse a los otros tipos de inundaciones que se muestran en la Figura 1: Tipos de amenaza de inundación.

Figura 1 Tipos de amenaza de inundación



Adaptado de (Díez-Herrero, Huerta e Isidro, 2009).

EVALUACIÓN DE AMENAZAS DE INUNDACIÓN

Descripción general

Una amenaza natural es un suceso físico, una actividad humana o un fenómeno potencialmente dañino que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, trastornos sociales y económicos, o deterioro del medioambiente (UNISDR, 2004). “Potencialmente dañino” quiere decir que hay elementos expuestos a la amenaza que pueden, pero no necesariamente deben, dañarse (Gouldby y Samuels, 2005).

El objetivo de la evaluación de amenazas de inundación es entender **la probabilidad de que una inundación de una intensidad particular ocurra en un período extendido**. La evaluación de amenazas apunta a estimar esta probabilidad durante períodos que van desde años hasta décadas para apoyar las actividades de gestión de riesgos¹. La intensidad generalmente hace referencia a la combinación de la profundidad y de la extensión horizontal de la inundación, aunque otras medidas de intensidad, como la velocidad del caudal y la duración de la inundación, pueden ser importantes según el caso.

Esta relación entre la probabilidad de una inundación y su intensidad da lugar al concepto de **período de retorno (también conocido como "intervalo de recurrencia")**, representado por el símbolo T y expresado en años. Una inundación de T años es la intensidad de una inundación que tiene una probabilidad de $1/T$ de ser superada en un año determinado. Esta probabilidad se denomina probabilidad de excedencia. Por ejemplo, hay una **probabilidad de excedencia** de $1/10$ (0,10) de que en un año determinado ocurra una inundación superior a la intensidad de inundación de 10 años. Las evaluaciones de amenazas de inundación generalmente apuntan a estimar la intensidad de la inundación para un rango de probabilidades de excedencia, por ejemplo, de 0,1 a 0,001. Es importante destacar que esta definición de período de retorno se opone a lo que parecería significar el término “inundación de 10 años” o “inundación de 100 años” (es decir, la intensidad de una inundación que ocurriría una vez cada diez o cada cien años). Esta es una fuente importante de confusión y malentendidos de la definición de períodos de retorno y puede dar como resultado una estimación o percepción incorrecta de las amenazas y los riesgos.

Estimación del caudal de diseño

Esta sección se centra en los métodos utilizados para estimar el **caudal de diseño**, es decir, la medida del caudal de agua a través del río o la llanura aluvial. Aquí se resumen dos de los enfoques utilizados con más frecuencia: análisis de frecuencia de caudales y modelo de precipitación-escorrentía. Si bien se utilizan otros métodos de manera ocasional, se suelen usar más como complemento que como reemplazo de uno de estos enfoques o de ambos.

Los enfoques de los análisis de frecuencia de caudales se pueden utilizar para estimar el **caudal máximo**, es decir, la medida máxima del caudal de agua que atraviesa una ubicación determinada durante una inundación. El modelo de precipitación-escorrentía puede utilizarse también para estimar el caudal máximo y, por lo general, también el **hidrograma de diseño**, una estimación de la medida del caudal después de una ubicación determinada durante un período específico. La figura 3 demuestra la

1. Esto contrasta con los sistemas de alerta temprana, cuyo objetivo es emitir alertas durante períodos que van desde minutos hasta días para facilitar las acciones de respuesta ante emergencias.

relación entre el hidrograma de caudal y el caudal máximo. Se puede encontrar una revisión detallada de los procedimientos, las herramientas y los datos de evaluación de amenazas de inundación ribereña y costera en (Prinos, 2008).

Análisis estadístico de frecuencia de caudales

Este enfoque depende de la existencia de registros de larga data de mediciones exactas del caudal del río. Por lo general, en el análisis se utiliza el registro del caudal más alto que se haya registrado para cada año. Por ejemplo, si hay 30 años de mediciones diarias de caudal disponibles en una estación de medición determinada, se utilizan 30 puntos de datos en el análisis de frecuencia de caudales, cada uno de los cuales corresponde a la observación del mayor caudal diario de uno de los 30 años registrados. Estos puntos de datos se denominan **caudal máximo anual**. Una vez que se identifican los puntos de datos, el analista ajusta varias distribuciones estadísticas (por ejemplo: distribución logarítmico-normal, distribución de Pearson o distribución generalizada de valores extremos) y selecciona la distribución que describe los datos con mayor precisión. La figura 2 ilustra este tipo de análisis realizado con mediciones de caudales de una estación en Puerto Rico. Se puede encontrar una lista parcial de herramientas para realizar análisis estadístico en (FEMA, 2012). Se debe enfatizar que la aplicación y la interpretación correcta de los procedimientos estadísticos requieren experiencia considerable y conocimientos especializados.

Consideraciones importantes para el análisis de frecuencia de caudales:

- Los registros de caudales deben ser de buena calidad. La medición correcta de caudales requiere el mantenimiento de los equipos para posibilitar la monitorización automática continua de los niveles de agua, así como la verificación por medio de mediciones de campo del caudal y de perfiles transversales del río en un amplio rango de condiciones de caudal, al menos, varias veces al año (Buchanan y Somers, 1969).
- Los registros de caudales deben ser lo suficientemente extensos como para estimar los períodos de retorno que se requieren para el análisis de amenazas de inundación. No existe una única guía al respecto, pero los registros deben abarcar un lapso mínimo de 10 años para realizar cualquier tipo de análisis de frecuencia (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982), y ser más extensos si se desea llevar a cabo estimaciones de probabilidades de excedencia baja.
- La resolución temporal del registro de caudales debe ser lo suficientemente fina para medir las propiedades importantes de las inundaciones en el río. Por ejemplo, las mediciones diarias de caudales son adecuadas para grandes ríos, pero no para cuencas hidrográficas de montañas empinadas ni para pequeñas cuencas urbanas, donde pueden ser necesarias mediciones automatizadas a intervalos de uno a cinco minutos.
- El área río arriba no puede haber sufrido cambios considerables en lo que respecta al uso del suelo, como la urbanización, el desarrollo agrícola o la deforestación durante el período de registro de caudales. Si se han producido cambios considerables, los resultados de los análisis estadísticos estándar no serán válidos. Existen métodos estadísticos más avanzados que intentan tomar en consideración estos desafíos, pero tienen limitaciones significativas y, por lo general, no se recomiendan para la toma de decisiones (Villarini, Smith, Baeck, Sturdevant-Rees y Krajewski, 2010).

Figura 2 A la izquierda, gráfico de observaciones de caudal máximo anual desde 1965 hasta 2011 para la estación de aforo del Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS) en Río Grande de Manatí, cerca de Morovis, Puerto Rico. A la derecha, comparación de modelos estadísticos basados en distribuciones generalizadas de valores extremos y las distribuciones logarítmico-normales para las observaciones del caudal máximo anual en Río Grande de Manatí, cerca de Morovis.

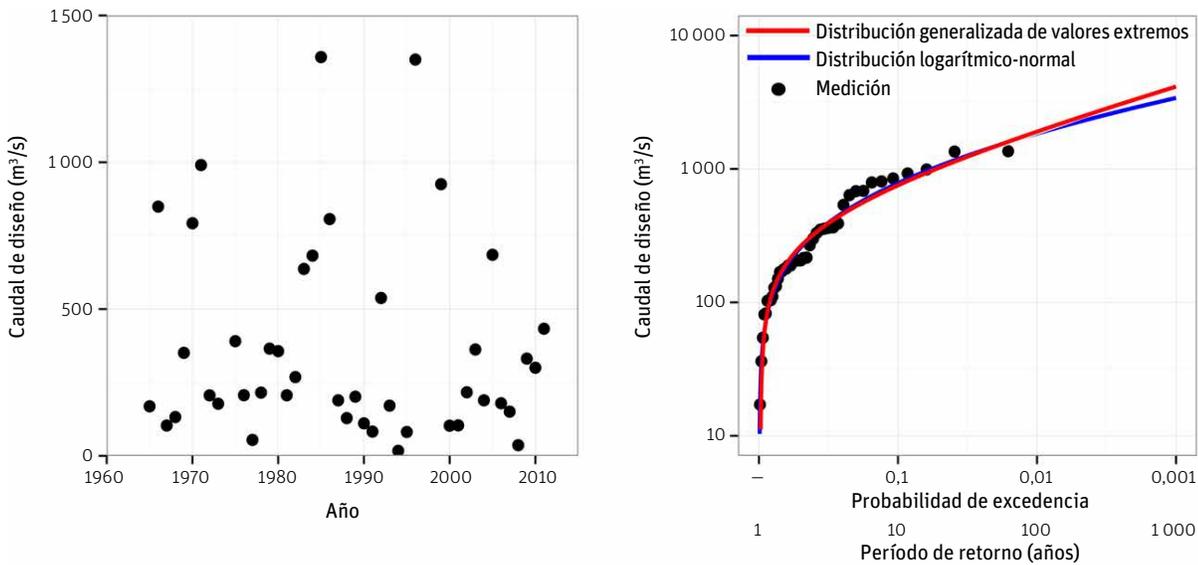
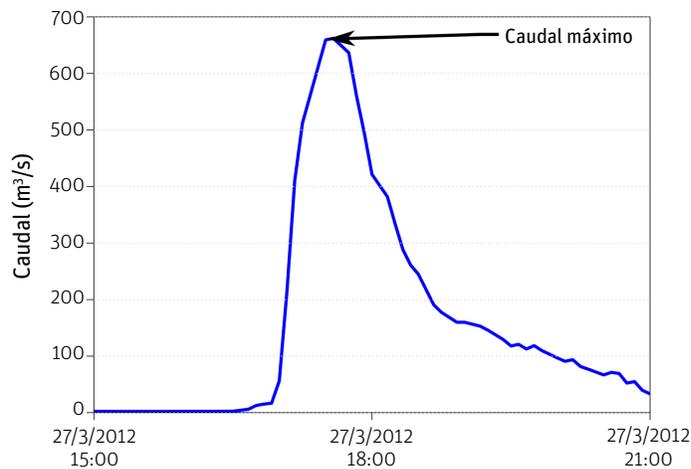


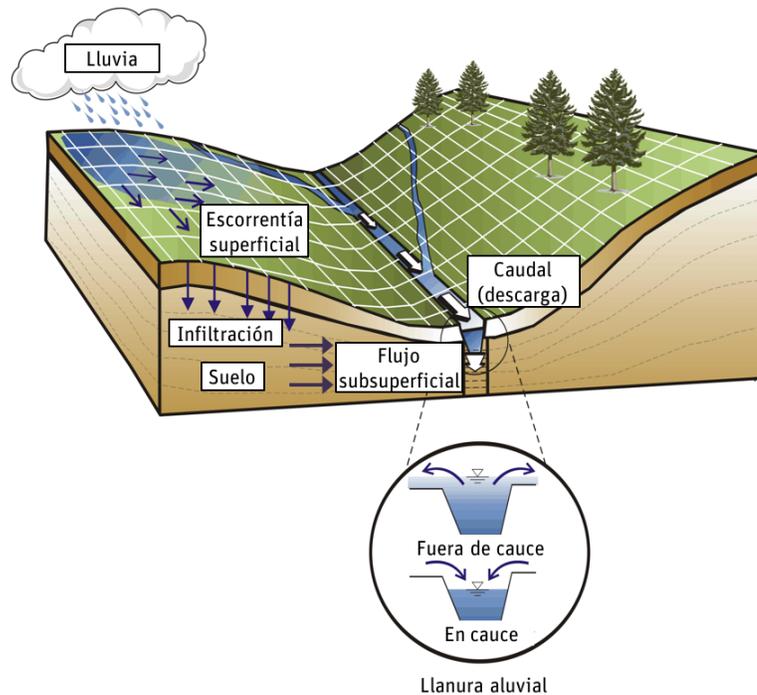
Figura 3 Ejemplo de hidrograma y de valor de caudal máximo de un suceso de precipitación intensa el 27 de marzo de 2012, medido en estación de aforo del Servicio Geológico de los EE. UU. en Río Grande de Manatí, cerca de Morovis, Puerto Rico



Por lo general, un caudal de diseño obtenido del análisis de frecuencia de caudales solo es válido en las inmediaciones de la estación de medición, sobre todo si existen afluentes importantes y otras fuentes de caudal río arriba o río abajo de la estación. Por lo tanto, se necesita un número relativamente grande de estaciones de medición para poder estimar de forma adecuada los caudales de diseño a lo largo de un sistema fluvial grande o complejo.

Modelo de precipitación-escorrentía

Figura 4 En el diagrama, se muestran los componentes generales del modelo de precipitación-escorrentía basado en grillas



Adaptado de http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/TREX%20Web%20Pages/TREX-Home.html (consultado el 6 de enero de 2014).

En muchas situaciones, las mediciones de caudal o bien son inexistentes, o bien son pocas o de calidad insuficiente como para poder llevar a cabo un análisis de frecuencia de caudales como el descrito en la sección 2.2.1. En dichos casos, se puede utilizar una herramienta de la amplia clase de **modelos de precipitación-escorrentía** (también conocidos como **modelos hidrológicos**) para convertir estimaciones de precipitaciones extremas en estimaciones de caudal de diseño y en hidrogramas de diseño. Para ello, deben representar el movimiento del agua por el entorno (un proceso conocido como **escorrentía**) y en el canal fluvial. Algunos de los procesos hidrológicos básicos que estos modelos toman en consideración se muestran en la figura 4. Existen muchos modelos diferentes de precipitación-escorrentía, y cada uno tiene ciertas ventajas y desventajas según un rango de factores como la aplicación, el marco geográfico, la disponibilidad de datos y el nivel de conocimiento del usuario. Se puede encontrar una lista de los modelos más aceptados para las aplicaciones de inundaciones en (FEMA, 2014). Es sumamente importante considerar estos factores cuando se selecciona un modelo de precipitación-escorrentía. Mientras que algunos de estos modelos son muy sencillos y pueden implicar simples cálculos manuales, la mayoría son complejos e informatizados, y requieren conocimiento especializado para usarlos correctamente. Las dos clases principales de modelos de precipitación-escorrentía son los siguientes:

- **Concentrados:** Los modelos concentrados tratan la cuenca hidrográfica como una unidad. Los cálculos se realizan utilizando procesos simplificados y con parámetros espaciales promediados. La estimación de caudal resultante solo se aplica al desagüe de la cuenca hidrográfica (el punto modelado más río

abajo de la red fluvial). Los modelos concentrados más conocidos incluyen TR-55 y otros métodos basados en hidrogramas unitarios.

- **Distribuidos:** Los modelos distribuidos utilizan entradas de datos espaciales diversos para procesos como precipitaciones, infiltraciones, interceptaciones, flujos subsuperficiales y descargas estimadas del caudal base u otras variables. Este tipo de modelo requiere más datos que los modelos concentrados, pero es más flexible y puede ser más preciso. Los modelos distribuidos se suelen usar en un rango particular de escalas, como en pequeñas cuencas hidrográficas urbanas (SWMM, GSSHA, Vflo, OpenLISEM) o grandes cuencas fluviales (VIC). Si se utilizan correctamente, la mayoría de los modelos distribuidos pueden proporcionar estimaciones de caudal en varias ubicaciones a lo largo de la red fluvial.

Algunos modelos muy difundidos, como HEC-HMS, discretizan la cuenca hidrográfica en un número de subcuencas, cada una de las cuales se representa utilizando un modelo de precipitación-escorrentía concentrado. Los resultados de los modelos concentrados individuales pueden combinarse de este modo para estimar la respuesta de la cuenca hidrográfica en varios puntos. De este modo, pueden combinarse algunas de las ventajas de los modelos concentrados y los distribuidos.

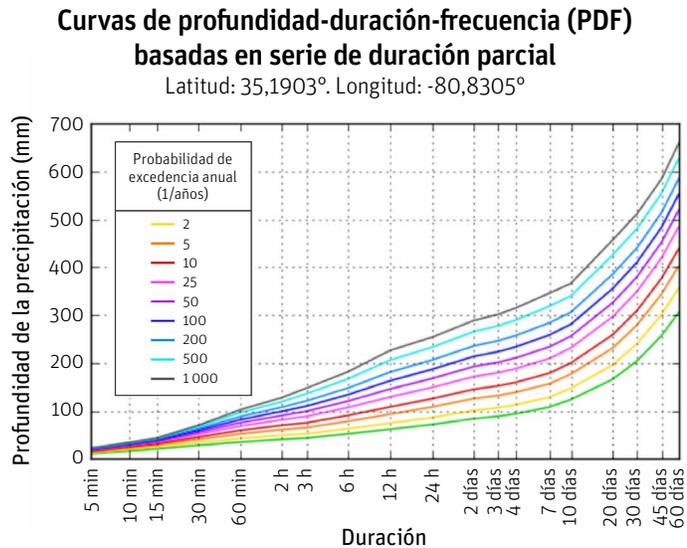
Además de la selección de un modelo de precipitación-escorrentía apropiado, la adecuación de este enfoque para la evaluación de amenazas de inundación depende de la disponibilidad de conjuntos de datos de alta calidad de precipitaciones locales o regionales y de otra información para caracterizar la cuenca hidrográfica, como mapas topográficos o modelos digitales de elevaciones (MDE), información sobre el suelo y la cobertura terrestre, y la ubicación y las propiedades de los canales fluviales y otros cuerpos de agua. También es fundamental contar con mediciones de precipitación y de caudal o extensión de inundación de una o más inundaciones del pasado a fin de que el modelo pueda verificarse y ajustarse para contemplar las condiciones locales. El proceso de verificación contra mediciones locales se denomina **validación**, mientras que el proceso de ajuste de varios componentes del modelo para que los resultados simulados correspondan mejor a las mediciones locales se denomina **calibración**.

Una vez que un modelo ha sido calibrado y validado, puede utilizarse para estimar los caudales de diseño. Mientras que existen enfoques más sofisticados, el punto de partida habitual es realizar un análisis de frecuencia de precipitaciones basado en la precipitación máxima anual. El procedimiento de análisis de frecuencia de precipitaciones es similar al descrito para el análisis de frecuencia de caudales en la sección 3.2.1, y está sujeto a muchos de los mismos desafíos generales. Un componente importante adicional en el análisis de frecuencia de precipitaciones es que también debe seleccionarse la duración de la precipitación. La selección apropiada de la **duración** de la precipitación es muy importante, ya que las inundaciones en cuencas hidrográficas pequeñas urbanizadas o montañosas son el resultado de precipitaciones extremas cuya duración va de varios minutos a varias horas, mientras que en los sistemas fluviales extensos la inundación puede ser el resultado de precipitaciones cuya duración va de varios días a varias semanas. Por lo tanto, la selección incorrecta de la duración de las precipitaciones puede dar como resultado una estimación deficiente del caudal de la inundación. En la mayoría de los textos de introducción a la Ingeniería Hidrológica, puede encontrarse orientación acerca de la selección de la duración de las precipitaciones (véase, por ejemplo, (McCuen, 2005)).

Ya se han llevado a cabo análisis de frecuencia de precipitaciones en algunas áreas. En esos casos, los resultados se presentan como curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF, también denominada “intensidad-frecuencia-duración”). En la figura 5, se muestra un ejemplo de curvas de IDF. Idealmente, se proporcionan curvas de IDF para diversas duraciones y para un amplio rango de períodos de retorno. Si la duración deseada de las precipitaciones o el retorno se encuentra entre dos curvas de IDF,

la intensidad apropiada de las precipitaciones puede interpolarse linealmente a partir de las curvas publicadas. Estas curvas pueden facilitar el análisis de precipitación-escorrentía, pero tienen limitaciones importantes, sobre todo en cuencas hidrográficas grandes y para precipitaciones de larga duración (nótese, por ejemplo, que las precipitaciones que se muestran en la figura 5 solo se extienden durante 60 minutos). Existen alternativas más fiables, pero no son ampliamente utilizadas (véase, por ejemplo, (Wright, Smith y Baeck, 2014)).

Figura 5 Ejemplo de curvas de IDF



Fuente: Bonnin, G. M., Martin, D., Lin, B., Parzybok, T., Yekta, M., Riley, D., (2006), NOAA, Atlas 14 Precipitation-Frequency Atlas of the United States Volume 2, Version 3.0: Delaware, District of Columbia, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, New Jersey, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, South Carolina, Tennessee, Virginia, West Virginia, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Spring, Maryland.

Una vez que se estima la intensidad de la precipitación para un período de retorno determinado, normalmente se supone que, cuando se utiliza como una entrada del modelo de precipitación-escorrentía, el caudal simulado resultante tiene el mismo período de retorno. Por ejemplo, si se estima una duración de 12 horas para la intensidad de precipitación de 100 años para la región donde se encuentra una cuenca hidrográfica y después se la utiliza para el modelo de precipitación-escorrentía de la cuenca hidrográfica, se supone que el resultado del caudal máximo simulado es una estimación apropiada del caudal máximo de 100 años. Esta hipótesis no es del todo válida por varias razones y se pueden utilizar métodos más avanzados para evitarla, pero está generalmente aceptada en la práctica estándar de análisis de amenazas de inundación (Wright, Smith y Baeck, 2014).

Existen varias consideraciones importantes cuando se estima el caudal de diseño mediante modelos de precipitación-escorrentía:

- Los registros de precipitaciones deben ser de buena calidad. Las mediciones de precipitación adecuadas requieren una instalación apropiada, así como el mantenimiento frecuente de los equipos y su entorno (Curtis, 1996; Sieck, Burges y Steiner, 2007).
- Los registros de precipitaciones deben ser lo suficientemente extensos como para estimar los períodos de retorno necesarios para el análisis de amenazas de inundación. No existe una única guía al respecto,

pero los registros deben abarcar un lapso mínimo de 10 años para realizar cualquier tipo de análisis de frecuencia (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982) y ser más extensos si se desean llevar a cabo estimaciones de probabilidades de excedencia muy baja.

- Además de tener registros de precipitaciones suficientemente extensos de la duración apropiada, es necesario contar con numerosos pluviómetros en la región o cuenca hidrográfica, ya que puede haber variaciones espaciales significativas en la intensidad de la precipitación dentro de tormentas individuales. Contar con varios pluviómetros permite caracterizar esta variación e interpolar la precipitación para los espacios vacíos entre pluviómetros. No existen pautas simples que indiquen cuántos pluviómetros se necesitan o cómo se deben llenar esos vacíos. Tomar en cuenta la variación espacial de la precipitación supone un especial desafío en las áreas montañosas debido a las influencias topográficas en el movimiento de las tormentas y la generación de precipitaciones. Cuando están disponibles, pueden utilizarse las estimaciones de precipitaciones de radares o satélites meteorológicos para evaluar las variaciones espaciales de las precipitaciones, pero se necesita contar con gran experiencia para utilizar de manera correcta dichos conjuntos de datos para aplicaciones de inundación.
- La resolución temporal del registro de precipitaciones debe ser lo suficientemente buena como para medir la precipitación en las duraciones que causan inundaciones en la cuenca hidrográfica. Por ejemplo, las mediciones de precipitación una vez por hora son insuficientes para estimar la precipitación de corta duración que provoca inundaciones en cuencas hidrográficas de montañas empinadas o en áreas urbanas pequeñas (Schilling, 1991; Berne, Delrieu, Creutin y Obled, 2004), pero pueden ser adecuadas para ríos más extensos.
- Dependiendo de la región y del modelo de precipitación-escorrentía seleccionado, se requiere información adicional detallada. Esta información puede incluir datos de la cobertura terrestre, de la ubicación y de las características de los canales fluviales, e información para caracterizar los suelos y el caudal de aguas subterráneas.
- Es difícil llevar a cabo la modelización de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas muy reguladas (por ejemplo, con controles artificiales de caudal de los ríos mediante embalses y otra infraestructura hidráulica). Algunos modelos de precipitación-escorrentía proporcionan la capacidad de incluir estos efectos con distintos niveles de detalle. Sin embargo, aunque el modelo seleccionado tenga esa capacidad, es raro que el modelador tenga información sobre cómo se operará esa infraestructura durante las condiciones de inundación.
- Si se requieren estimaciones de riesgos y amenazas de inundación en varios puntos de una gran cuenca hidrográfica, es necesario realizar numerosas simulaciones con diferentes propiedades de precipitación (es decir, diferentes duraciones e intensidades de precipitación). Esto se debe a que la duración y la intensidad de la precipitación que provoca inundaciones en el río principal es diferente de la duración e intensidad que provoca inundaciones en los pequeños afluentes río arriba (Wright, Smith y Baeck, 2014).

Estos desafíos asociados a la modelización de precipitación-escorrentía apuntan a la necesidad de hidrólogos formados, preferentemente con experiencia previa en la región y en el modelo específico de precipitación-escorrentía que se haya seleccionado.

Modelización hidráulica y mapeo de llanuras aluviales

Una vez que se estima el caudal de diseño (ya sea un valor del caudal máximo o un hidrograma), este se transforma en una estimación de la elevación del agua de inundación —denominada **etapa de inundación**— y de la velocidad utilizando un modelo hidráulico (también denominado “**modelo hidrodinámico**”). En el pasado, estos modelos solían ser modelos físicos a pequeña escala, pero ahora son, casi siempre, producto de un software computarizado de simulación. Existen muchos modelos hidráulicos con complejidades y requisitos de datos muy diversos. Se puede encontrar una lista de los modelos más comúnmente utilizados en (FEMA, 2014). Un modelador experimentado puede seleccionar el modelo más apropiado sobre la base en la ubicación, la necesidad de la evaluación de riesgos y los datos disponibles. Las dos clases de modelos hidráulicos más comunes son las siguientes:

- **Unidimensional (1D):** Los modelos 1D son modelos simplificados que caracterizan el terreno utilizando una serie de secciones transversales. En cada sección transversal, se computa la profundidad del caudal y la velocidad perpendicular al corte transversal. Estos modelos son muy apropiados para las áreas donde la dirección del caudal está bien definida. El modelo 1D más conocido es HEC-RAS, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Puede descargar gratuitamente HEC-RAS en <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.
- **Bidimensional (2D):** Los modelos 2D calculan el caudal en forma paralela y no paralela al caudal principal. Son útiles para la modelización de áreas de topografía compleja, como llanuras aluviales más amplias o estuarios extensos, pero necesitan datos de gran calidad y pueden requerir tiempos prolongados de cálculo. Algunos ejemplos de modelos 2D incluyen TELEMAC 2D, SOBEK 1D2D y Flo2D. Debido a su mayor complejidad, la mayoría de los modelos 2D no se encuentran disponibles de manera gratuita.

Algunos modelos, como LISFLOOD-FP, se denominan “cuasi-2D” y combinan algunos de los beneficios de los modelos 2D con algunas de las simplicidades de los modelos 1D. Existen también modelos tridimensionales (3D) que, en el pasado, rara vez se utilizaban para las evaluaciones de amenazas de inundación debido a su complejidad y costo. Sin embargo, el uso de modelos 3D como Delft3D es cada vez más frecuente, sobre todo para la simulación de inundaciones costeras debidas a marejadas ciclónicas.

Los modelos hidráulicos pueden ejecutarse de dos maneras diferentes, según la aplicación y la naturaleza del caudal de diseño de entrada. Si el caudal de diseño es una estimación del caudal máximo, los modelos deben ejecutarse en un modo de caudal constante. Este es el modo menos intensivo desde el punto de vista informático. Si bien el modo de caudal constante se utiliza con frecuencia en las evaluaciones de amenazas de inundación, puede no captar la complicada dinámica de flujo en terrenos complejos como llanuras aluviales urbanas. Si el caudal de diseño es un hidrograma completo, los modelos pueden ejecutarse en modo inestable, en el que las medidas de caudal y los niveles de agua a lo largo del área modelo pueden variar en el tiempo. Las simulaciones inestables pueden requerir recursos informáticos significativos en algunos casos, particularmente cuando se utilizan los modelos 2D y 3D.

La modelización hidráulica apropiada requiere información detallada relativa al canal fluvial y a la llanura aluvial. Algunos modelos hidráulicos, como el cuasi-2D LISFLOOD-FP, dependen de un solo **modelo digital de terreno (MDT)** que consta de “celdas” de grilla cuadradas de tamaño uniforme en las que se representan el canal y la llanura aluvial.

La mayoría de los modelos 2D también utilizan datos de un MDT, pero requieren la conversión de una grilla cuadrada regular a una malla triangular antes de la simulación. Como ya se mencionó, la mayoría de los modelos 1D, como HEC-RAS, utilizan numerosas secciones transversales que son perpendiculares a la dirección predominante del caudal y que incorporan la geometría tanto del canal fluvial como de la llanura aluvial. Esta geometría puede provenir de levantamientos del terreno o de instrumentos montados en aeronaves. Dadas las dificultades de realizar levantamientos topográficos del terreno de grandes áreas a nivel del suelo, los instrumentos montados en aeronaves, como el método de detección y medición de distancias por luz LiDAR (*Light Detection and Ranging*), son los métodos más comunes para reunir información topográfica de llanuras aluviales para actividades de modelización de inundaciones a gran escala. Para secciones de ríos más cortas, sin embargo, se siguen utilizando normalmente los reconocimientos topográficos. Debe tenerse en cuenta que la obtención y preparación de estos datos puede ser bastante costosa y requiere conocimientos técnicos especializados. En (FEMA, 2003b) puede encontrarse un procedimiento detallado para encomendar un relevamiento LiDAR. La información geométrica del río —o del lecho de un lago o del fondo marino—, denominada **batimetría**, requiere reconocimientos topográficos o relevamientos LiDAR, y puede ser difícil de reunir para cuerpos de agua grandes o profundos. En algunos casos, los datos batimétricos no son necesarios para la modelización hidráulica de inundaciones en ríos porque las características del canal pueden ser representadas de manera apropiada por formas rectangulares o trapezoidales idealizadas. Esta decisión solo debe tomarla un modelador hidráulico experimentado.

Mientras que la precisión requerida del MDT varía según la ubicación y el nivel de detalle específicos requeridos por el estudio, la precisión vertical debe ser de 1 a 2 metros o superior. En algunos casos, la precisión vertical debe ser de 5 a 10 centímetros. Por lo tanto, los conjuntos de datos topográficos disponibles en forma gratuita basados en observaciones satelitales como SRTM o ASTER GDEM no son adecuados para la modelización hidráulica en muchos ámbitos. La resolución horizontal requerida depende en gran medida de la aplicación específica y de las condiciones locales, y puede variar de alrededor de un metro a cien metros o más.

Además de la información topográfica y batimétrica, los modelos hidráulicos necesitan la especificación de **rugosidad hidráulica** o “resistencia al flujo” del canal fluvial y de la llanura aluvial. La rugosidad es baja en los canales fluviales de lecho de roca que están libres de vegetación o detritos, y es alta en los ríos llenos de detritos o en llanuras aluviales que tienen vegetación espesa o edificaciones. La estimación de la rugosidad hidráulica generalmente se basa en la evaluación experta de relevamientos visuales o fotografías aéreas. Las estructuras artificiales como puentes, obras de desagüe y diques, o las características geológicas como formaciones rocosas que pueden impedir el flujo de inundaciones pueden ser muy importantes para la modelización hidráulica y, generalmente, requieren reconocimientos topográficos.

Al igual que en el modelo de precipitación-escorrentía, la calibración y la validación son pasos fundamentales en la modelización hidráulica. Por lo general, esto consiste en ajustar los parámetros del modelo (normalmente, de rugosidad hidráulica) mientras se simulan inundaciones pasadas en un intento de recrear las elevaciones de agua observadas y las extensiones de las inundaciones. Por lo tanto, es importante registrar las ubicaciones inundadas y los niveles máximos de agua durante los reconocimientos topográficos de daños posteriores a la inundación o mediante fotografía aérea o satelital (Gaume y Borga, 2008; Abhas, Bloch y Lamond, 2012).

Una vez que el modelo hidráulico está configurado, calibrado y validado de manera apropiada, puede ser utilizado para el mapeo de extensión de la inundación. En la figura 6 Figura 6: Ejemplo de un mapa de extensión de inundación de 100 años del río Eden en Carlisle, Reino Unido., se muestra un ejemplo de un mapa de extensión de una inundación de 100 años. En este ejemplo, solo se muestra la extensión de la inundación. En situaciones donde la velocidad del caudal es alta, se deben producir mapas tanto de profundidad de la inundación como de velocidad. Por fortuna, todos los modelos hidráulicos calculan fácilmente el nivel del agua y la velocidad.

En el caso de los modelos 2D, la extensión de la inundación, la profundidad y la velocidad se pueden visualizar directamente en el resultado del modelo. Para los modelos 1D, por lo general, es necesario proyectar los niveles estimados de agua de inundación en un MDT para estimar la extensión y la profundidad de la inundación. Este MDT suele ser el mismo que se utiliza para configurar el modelo. Si no es así, los dos MDT deben compartir datos comunes de elevación, y se aplican los mismos requisitos de resolución horizontal y precisión ya mencionados.

La información histórica de grandes inundaciones también puede utilizarse para producir mapas de amenazas de inundación. Estos mapas pueden ser el resultado de reconocimientos topográficos meticulosos, fotografía aérea o, más recientemente, imágenes satelitales. Para estimar la frecuencia de la amenaza de inundación, hay mapas de extensión de numerosas inundaciones del pasado disponibles. Estos mapas no existen en muchas ubicaciones, por lo tanto, en la práctica, se utilizan más comúnmente mapas de extensión de inundaciones e imágenes para la calibración de los modelos hidráulicos.

Figura 6 Ejemplo de un mapa de extensión de inundación de 100 años del río Eden en Carlisle, Reino Unido



Extraído de <http://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/index.htm> (consultado el 6 de enero de 2014). Consultar https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads/teaching_materials/Licence.pdf para obtener información sobre los derechos de autor.

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD

Descripción general

El otro componente principal del riesgo de inundaciones, aparte de la amenaza de inundación, es la **vulnerabilidad** a la inundación. El objetivo de la evaluación de vulnerabilidad es entender cómo se verá afectado por las inundaciones el sistema. Los ejemplos de posibles sistemas pueden incluir estructuras físicas como casas y puentes que pueden sufrir daños o destrucción, una tienda o servicio cuya cadena de suministro puede enfrentar una interrupción o una comunidad que puede sufrir muertes, pérdidas materiales e impactos negativos en la salud en el período posterior a la inundación.

Existen diferentes clases de vulnerabilidad. Algunas de estas clases se presentan en forma breve a continuación, pero este documento se centra principalmente en la vulnerabilidad física —es decir, la vulnerabilidad del entorno edificado a las inundaciones—. El foco en la vulnerabilidad física radica en que es la clase de vulnerabilidad más evidente y fácil de cuantificar debido a que, en muchas situaciones, constituye una gran parte de la vulnerabilidad total a las inundaciones. Para simplificar, los estudios de riesgo de inundaciones y los esfuerzos de gestión relacionados a menudo solo consideran una o varias de estas clases. Independientemente de la clase de vulnerabilidad considerada, el mapeo es un elemento central de cualquier evaluación. Por ello, el conocimiento técnico de herramientas de mapeo, como los sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning Systems*) es fundamental.

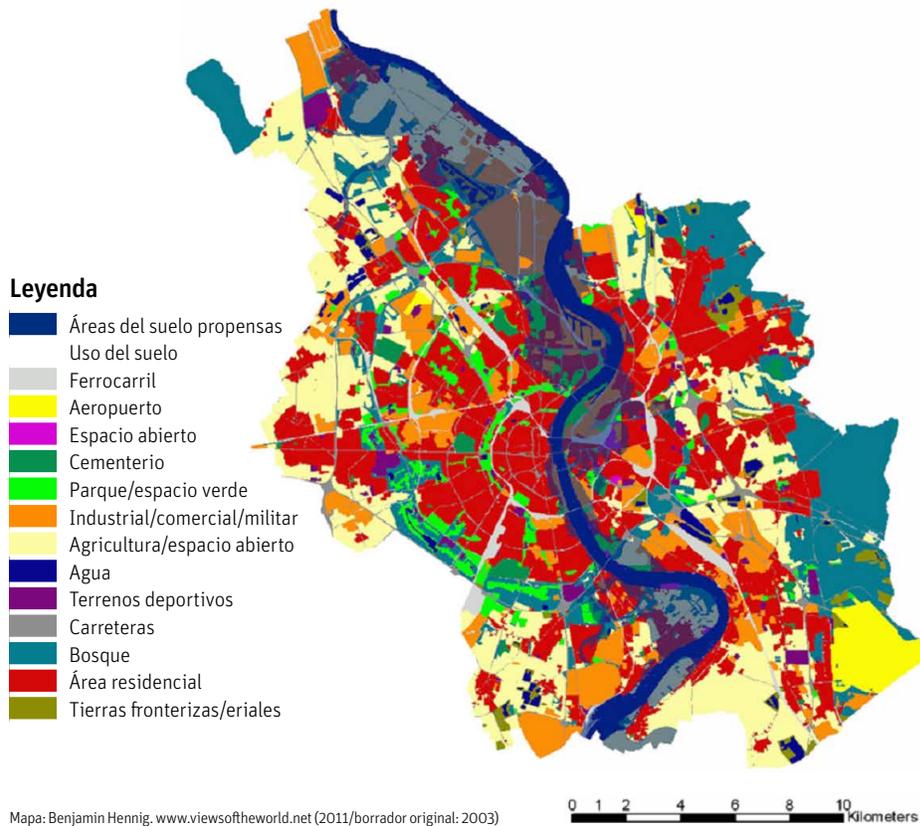
A pesar de su importancia, la evaluación de la vulnerabilidad a inundaciones y a otros desastres naturales ha recibido menos atención que la evaluación de amenazas (Changnon, 2003). Ha habido pocos esfuerzos para estandarizar las mediciones de vulnerabilidad y las técnicas de estimación, sobre todo en países en vías de desarrollo y en lo relacionado con medidas no económicas. Según el contexto, sin embargo, las consideraciones no económicas pueden ser en extremo importantes. Debido a esto, es importante que participen expertos en vulnerabilidad a inundaciones, preferentemente con experiencia previa local o regional. En general, una evaluación de vulnerabilidad a escala más fina proporciona estimaciones más exactas del riesgo de inundaciones, pero con un costo mayor.

Exposición

El área inundada que se muestra en un mapa de amenaza de inundación no suele incluir las viviendas, fábricas ni otras construcciones inundadas, ni sus respectivas características. El análisis de **exposición**, por lo tanto, apunta a examinar los recursos y actividades económicos cubiertos por la inundación (Kang, Su y Chang, 2005). La exposición consta de un mapeo geoespacial de los tipos de recursos económicos de interés relativos a la amenaza de inundación (es decir, la extensión de la inundación). Además, la información de exposición debe incluir, al menos, algunas características básicas de los recursos en cuestión. Por ejemplo, una evaluación de riesgos de construcciones residenciales requiere la exposición de datos sobre la ubicación de las propiedades, el tipo, la cantidad de pisos, la superficie del suelo, etcétera.

Figure 7 Ejemplo de mapa de uso del suelo para análisis de exposición a inundaciones en Colonia con áreas propensas a inundaciones superpuestas

Uso del suelo y riesgo de inundaciones en Colonia, Alemania



Benjamin Hennig, <http://www.viewsoftheworld.net/> (2011), consultado el 28 de mayo de 2014.

*Fe de erratas: Áreas propensas a inundaciones.

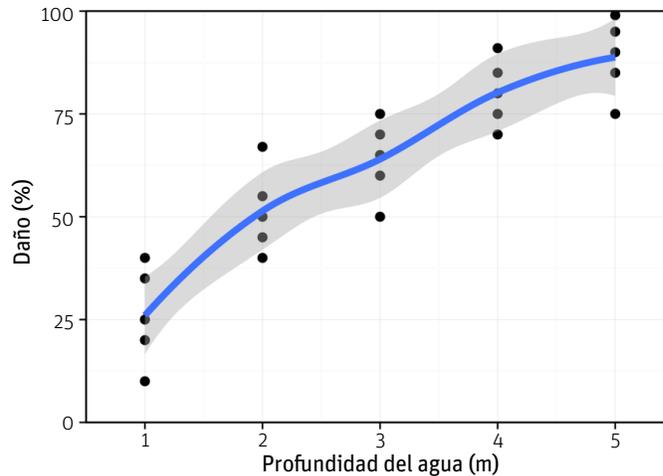
La escala a la cual se debe realizar el mapa de exposición a inundaciones varía según las necesidades de una evaluación de riesgos de inundación determinada. El mapeo detallado en áreas urbanas puede realizarse a escala de edificios individuales utilizando un GPS portátil, o bien con fotografías aéreas o satelitales. Para llanuras aluviales más extensas, podría ser preferible modelar la vulnerabilidad a la escala de grandes unidades administrativas, como lotes o secciones censales, o utilizar mapas de uso del suelo existentes. Independientemente del método elegido, los datos se introducen en una base de datos geoespaciales mediante una interfaz de SIG.

Vulnerabilidad física

Una consecuencia importante de las inundaciones es el daño a estructuras físicas como edificios, puentes, carreteras y servicios públicos. El daño puede definirse como la cantidad de dinero que se necesita para restaurar el área a su condición original anterior al desastre (Kang, Su y Chang, 2005) y puede ser causado por fuerzas de presión lateral, fuerzas de velocidad, subpresión, erosión de los cimientos, debilitamiento gradual debido a encharcamiento y otros efectos (Kelman y Spence, 2004).

Figura 8 Ejemplo de una curva de daños de inundación basada en observaciones

La línea azul es lo que más se ajusta a las observaciones. El área gris es una estimación de incertidumbre (el 95 % de los límites de confianza).



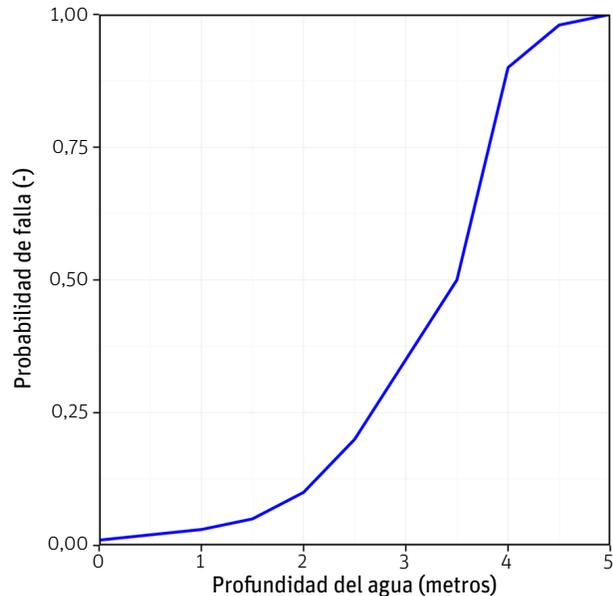
Es importante comprender y representar los impactos de las fuerzas de inundación en las estructuras. Estos impactos normalmente son descritos por **curvas de daños** (también denominadas “funciones de daño” o “funciones de vulnerabilidad”), como en los ejemplos que se muestran en las figuras 8 y 9. En la figura 8, se muestra una curva de daños para una estructura. Esta curva va del 0 % (sin daños) al 100 % (destrucción total), y describe la relación entre el daño y características de la inundación como la profundidad y la velocidad del agua.

En el caso de obras de mitigación de inundaciones como diques, la resistencia y la efectividad de la infraestructura puede ser representada por **curvas de fragilidad** (también denominadas “funciones de fragilidad”). En la figura 9, se muestra una curva de fragilidad para el dique de control de inundaciones, en la cual la probabilidad de falla va del 0,0, a profundidad del agua cero, al 1,0, a la altura máxima del dique (punto en el que el dique falla debido al rebosamiento). Entre estos dos niveles de agua, la probabilidad de falla es mayor de 0,0, pero inferior a 1,0 debido a los diferentes modos de falla, como fallas rotacionales, tuberías, derrumbios, etcétera (Allsop, Kortenhaus y Morris, 2007). Se debe señalar que una estructura de mitigación de inundaciones puede sufrir daños incluso si la estructura propiamente dicha no falla. Por ejemplo, un dique debe someterse a reparaciones después de una inundación debido al daño de tuberías o de derrubio incluso si el dique no se rebosó. Estos costos de reparación pueden representarse como una función de la altura (o de la duración de la inundación) en una curva de daños adicional.

Las curvas de daño y de fragilidad normalmente se asignan a una clase determinada de recursos económicos o tipos de construcciones. Por ejemplo, deben desarrollarse funciones de daños separadas para edificios residenciales, edificios industriales, etcétera. Del mismo modo, las casas de ladrillos requieren funciones de daños diferentes que las casas de adobe o de madera. Asimismo, los muros de contención de inundaciones hechos de mampostería requieren curvas de fragilidad diferentes que los diques de tierra. Determinar estas funciones es un desafío importante, ya que puede haber variaciones significativas en el tipo y en la calidad de las construcciones incluso dentro de la misma clase de estructura. Además, por lo general existen muy pocas mediciones de daño basadas en los materiales y las prácticas de construcción locales en las que pueden basarse estas funciones. El análisis estructural y la opinión experta pueden ser de ayuda en el desarrollo de las funciones de daños (Schultz, Goulby,

Simm y Wibowo, 2010). Las estimaciones de pérdidas económicas, por lo general, son muy sensibles a las funciones de daño seleccionadas.

Figura 9 Ejemplo de una curva de fragilidad para una sección de un dique de control de inundaciones



El impacto económico directo más evidente es el costo asociado con la reparación o el reemplazo de edificios e infraestructura dañados. Estos impactos pueden estimarse combinando las funciones de daño con los costos estimados de reemplazo. Los costos de reemplazo de contenido como el inventario de una tienda o posesiones familiares pueden ser significativos y deben incluirse en el análisis.

Vulnerabilidad no física

Además de la vulnerabilidad física de los edificios y la infraestructura, existen otras clases importantes de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad no física más comúnmente contemplada es la pérdida económica. Existen muchas maneras en las que las inundaciones pueden tener impactos económicos, sobre todo en lo relacionado con la interrupción de varias actividades que, luego, tiene como resultado consecuencias económicas. Estos impactos económicos indirectos muchas veces son más difíciles de estimar que los impactos directos en las estructuras y el contenido de los edificios. Los impactos económicos indirectos posibles incluyen lo siguiente:

- pérdida de actividad comercial debido a la interrupción del suministro de servicios públicos, como agua o electricidad;
- pérdida de actividad comercial debido a la interrupción de la cadena de suministro a causa de grandes inundaciones;
- descomposición de productos agrícolas debido a daños en la red de transporte;
- pérdida de salarios para los empleados debido a cualquiera de los impactos antes mencionados.

En Merz, Kreibich, Schwarze y Thieken, 2010, pueden encontrarse una revisión detallada de los tipos de daños económicos, varias técnicas de estimación y otros desafíos.

La vulnerabilidad social puede ser otra clase importante de vulnerabilidad. Las inundaciones pueden provocar la muerte directamente por ahogamiento, traumatismos físicos o efectos secundarios como la falla de los servicios de agua y saneamiento, la diseminación de enfermedades de transmisión hídrica y la nutrición insuficiente (Abhas, Bloch y Lamond, 2012). Incluso cuando no provocan la muerte, las inundaciones pueden causar heridas, trauma psicológico, impactos negativos en la salud y estrés por la pérdida de la vivienda y el trabajo. Estos impactos pueden afectar a personas, familias y hasta a comunidades enteras. A menudo, estos impactos se concentran entre los pobres, quienes tienden a vivir en áreas propensas a inundaciones, tienen poco acceso a las alertas de inundación y a los servicios de evacuación y, por lo general, tienen menos recursos y servicios en los que apoyarse para recuperarse de una inundación. Debido a que la vulnerabilidad social tiene muchas dimensiones diferentes, existen muchas métricas que pueden utilizarse para cuantificarla. En (Tapsell, Penning-Rowell, Tunstall y Wilson, 2002), puede encontrarse una revisión de potenciales vulnerabilidades sociales a inundaciones y algunas formas de medir esas vulnerabilidades. Los impactos de las inundaciones en la salud se analizan en (Few, Ahern, Franziska y Kovats, 2004) y en (Ahern, Kovats, Wilkinson, Few y Matthies, 2005). Sin embargo, no se suele incluir la vulnerabilidad social en las evaluaciones cuantitativas de riesgo porque puede ser muy difícil de cuantificar. Esta omisión puede dar como resultado una subestimación significativa del riesgo general.

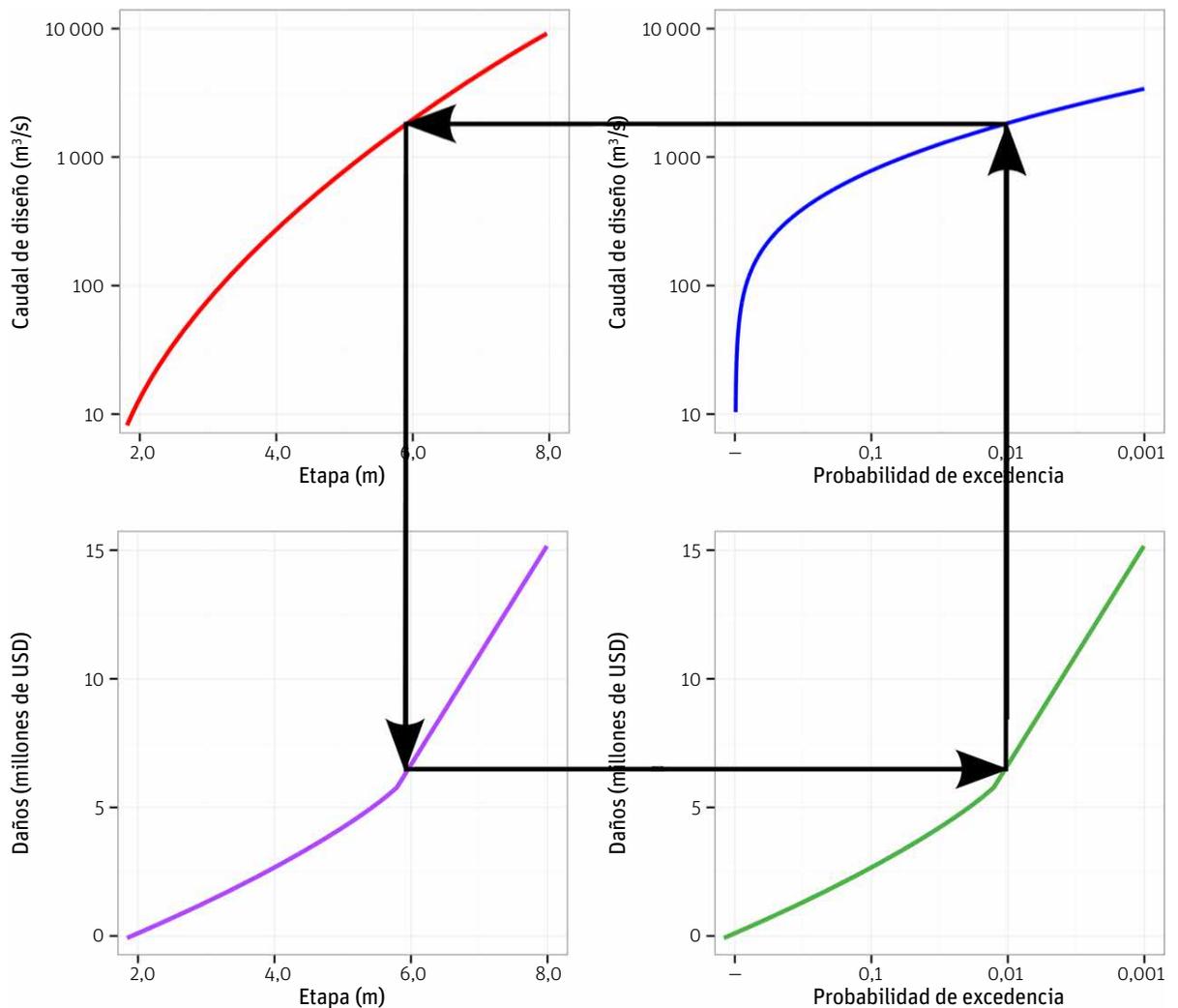
Las inundaciones también pueden tener impactos significativos en el entorno natural. Como el entorno natural se ha adaptado al acaecimiento de inundaciones a lo largo de miles de años, estos impactos ambientales a veces pueden ser beneficiosos. Por ejemplo, los ríos pueden transportar grandes cantidades de sedimentos durante las inundaciones, que pueden ayudar a reconstruir regiones de deltas, áreas de desove de peces y suelos agrícolas. Las inundaciones ayudan a reponer los suministros de aguas subterráneas, y las inundaciones estacionales son una señal para que los peces y otros organismos se reproduzcan o migren. En las áreas en las que las inundaciones son causadas o agravadas por la actividad humana, sin embargo, pueden tener impactos ambientales muy negativos. Esto se debe a que los impactos humanos como el desarrollo urbano o agrícola puede alterar las características de las inundaciones y hacerlas más intensas y destructivas de lo que habrían sido sin influencia humana. Por ejemplo, el desarrollo urbano y agrícola tiende a incrementar la velocidad de inicio de las inundaciones porque el agua se mueve más rápido a través de lotes, calles y sistemas de drenaje. El agua que se mueve más rápido puede arrastrar más sedimento, lo que aumenta los efectos de derrubio en las estructuras y causa una inusual acumulación de sedimentos en ciertas áreas, y erosión intensa y derrumbes en otras. La deforestación puede agravar aún más estos problemas al limitar la capacidad del entorno para retener el suelo y absorber el agua.

Los proyectos de gestión de riesgos de inundaciones pueden restaurar las características de la inundación a condiciones más naturales o, al menos, minimizar los impactos ambientales negativos adicionales. Los expertos en impacto ambiental y los ecologistas pueden ayudar a identificar posibles impactos ambientales negativos y positivos, y a lidiar con esos impactos.

EVALUACIÓN DE RIESGOS

Una vez que se han completado las evaluaciones de vulnerabilidad y de amenazas de inundación, es relativamente simple llegar a una estimación de riesgo de inundaciones. En la figura 10, se muestra un ejemplo de la relación entre los diferentes pasos. En primer lugar, el modelo estadístico o de precipitación-escorrentía se utiliza para estimar el caudal de diseño para varias probabilidades de excedencia, lo que se muestra en la parte superior derecha. Después, estos caudales de diseño pueden convertirse en elevaciones de inundación (también conocidas como “etapas de inundación”), como se muestra en la parte superior izquierda, por medio de un modelo hidráulico y un mapeo de llanuras aluviales. En la parte inferior izquierda, se muestran los daños asociados con diferentes etapas de inundación. Por último, el riesgo económico se muestra en la parte inferior derecha representado por el daño monetario para varias probabilidades de excedencia. Puede utilizarse un procedimiento similar para estimar los riesgos sociales, estructurales o económicos en tanto pueden cuantificarse de manera adecuada los diferentes pasos.

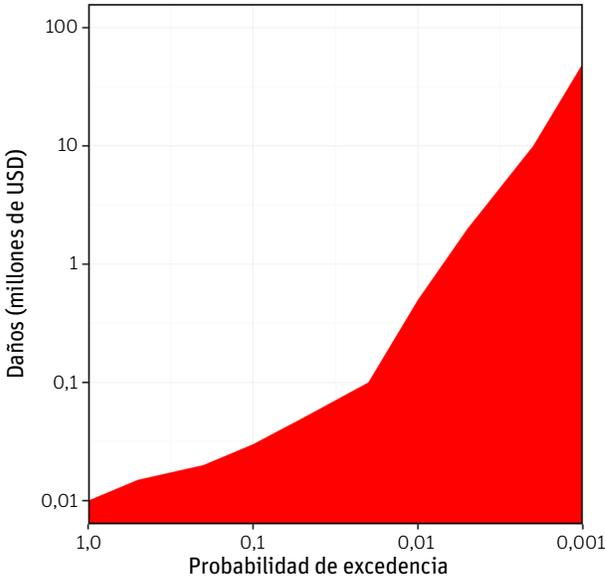
Figura 10 Diagrama conceptual de cómo las estimaciones de caudal se convierten en estimaciones de etapas y de daño económico en una probabilidad de excedencia determinada



El resultado del último paso en la figura 10 en la parte inferior derecha) es un ejemplo de lo que se denomina **curva de probabilidad de excedencia**. Otro ejemplo de la curva de probabilidad de excedencia se muestra en la figura 11. Esta curva es muy conveniente para propósitos de toma de decisiones porque permite la estimación de varias cantidades útiles. La más importante de estas cantidades es la **pérdida anual promedio** (también conocida como “pérdida anual esperada”): la pérdida promedio que tiene lugar por año durante un largo período. La pérdida anual promedio se calcula al encontrar el valor esperado de pérdida en todos los períodos de retorno. La curva de excedencia también puede ayudar a guiar decisiones para reducir riesgos de inundaciones intensas y poco frecuentes. Nótese que las curvas de probabilidad de excedencia y las pérdidas anuales promedio también pueden desarrollarse para daños no estructurales. Por ejemplo, se puede calcular la curva de probabilidad de excedencia para la pérdida anual promedio de existencias debido a inundaciones o para el promedio anual de personas desplazadas debido a inundaciones.

Resulta claro que solo pueden obtenerse cálculos de riesgo completamente “correctos” cuando la probabilidad y la magnitud de la pérdida pueden estimarse con total exactitud. Esto es imposible en la práctica debido a la cantidad limitada de información y el nivel de precisión de esta. Existen muchas situaciones en las que la amenaza de inundación, la vulnerabilidad o ambos son muy difíciles de cuantificar debido a la falta de información suficiente. En dichos casos, se puede tratar de reunir información adicional para estimar la amenaza y la vulnerabilidad, o bien intentar tomar decisiones de gestión de riesgos sin esa información. Tomar decisiones de gestión de riesgos de inundaciones con poca información o sin ella puede dar como resultado una protección insuficiente o excesiva. Si hay muy poca protección, los ciudadanos o los recursos económicos afrontan una exposición continua a los efectos de la inundación, mientras que demasiada protección significa que hubo un gasto de dinero innecesario en protección superflua. En (Medina, 2006) y en (Johnson, Hansen, Warren, Reynolds, Foley y Fulton, 1988), pueden encontrarse procedimientos para evaluar los costos y beneficios de las medidas de gestión de riesgos de inundaciones.

Figura 11 Ejemplo de una curva de probabilidad de excedencia



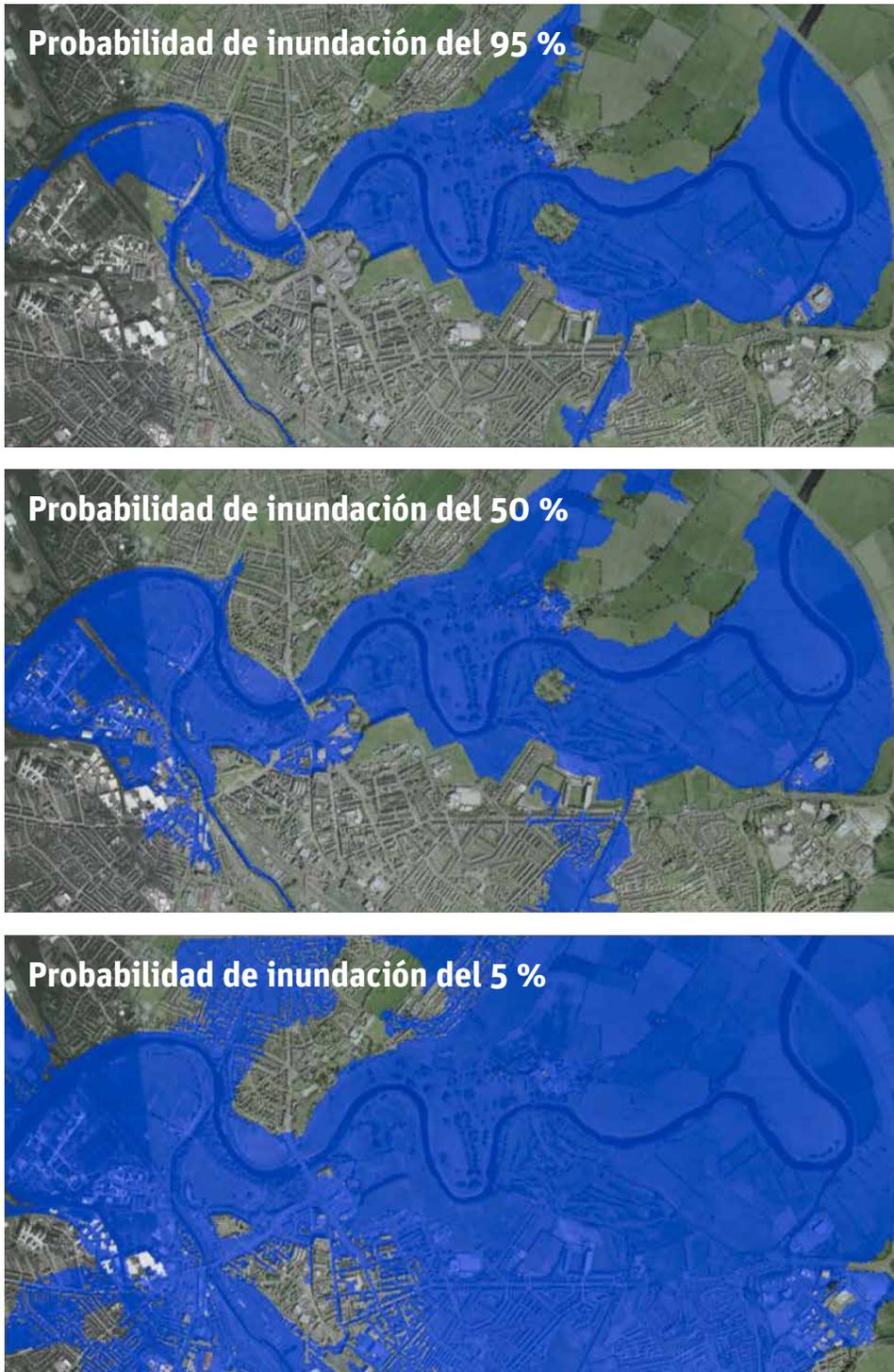
INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN DE RIESGOS Y AMENAZAS DE INUNDACIÓN

Incluso cuando hay buena información disponible, esta nunca capta todos los detalles de la amenaza de inundación y de la vulnerabilidad a ella. Un desafío muy importante en la evaluación de riesgos y amenazas de inundación es entender las incertidumbres que existen en cada etapa del proceso y decidir cómo incorporar dichas incertezas en las decisiones de gestión de riesgos subsiguientes.

Por ejemplo, la estimación de caudales de diseño, ya sea que se realice con métodos estadísticos o de precipitación-escorrentía, siempre depende del uso de numerosas suposiciones, conjuntos de datos incompletos y modelos imperfectos. Esto da como resultado errores en los caudales de diseño, lo que, a su vez, tiene por consecuencia errores en los niveles de agua estimados utilizando un modelo hidráulico, que se combinarán con las imperfecciones en dicho modelo y afectarán la extensión espacial prevista de la inundación. Del mismo modo, existen incertidumbres importantes en la evaluación de vulnerabilidad. Por ejemplo, las variaciones en las características de cada edificio individual no pueden captarse mediante una sola función de daño, pero no es práctico crear funciones de daño precisas para cada vivienda o tienda que puede verse afectada. Por lo tanto, la incapacidad de caracterizar los impactos de las inundaciones en los edificios se traduce en errores en las estimaciones resultantes de daños y pérdidas económicas.

Incluso los análisis más cuidadosos llevados a cabo por expertos destacados no pueden evitar dichas incertidumbres. Aunque esas incertezas no pueden eliminarse, su importancia y su efecto en el proceso de toma de decisiones pueden y deben examinarse. De hecho, los expertos en riesgos y amenazas de inundación hacen un gran esfuerzo para entender las diferentes incertidumbres y cómo pueden afectar las estimaciones de riesgos. Se muestra un ejemplo en la figura 12. Estos mapas se tomaron de una demostración realizada por el Consorcio de Investigación de Gestión de Riesgo de Inundaciones (FRMRC) del Reino Unido (<http://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc>) y muestran cómo puede variar la extensión de una inundación de probabilidad de excedencia de 0,01 (100 años) para distintos niveles de incertidumbre. Como se muestra en la figura, las incertidumbres en la información de entrada para el proceso de mapeo de llanuras aluviales pueden dar como resultado grandes variaciones en la extensión estimada de la inundación. Estas variaciones pueden traducirse en diferencias significativas en las estimaciones de pérdidas y daños económicos y de otro tipo por inundaciones. Estas diferencias implican una incertidumbre significativa en la toma de las decisiones necesarias para reducir esos daños. La incertidumbre debe ser cuidadosamente considerada al evaluar inversiones de gestión de riesgos. (Rogelis, 2012) proporciona una explicación más detallada de las diferentes fuentes de incertidumbre y de cómo pueden incorporarse en la evaluación de riesgos y amenazas de inundación.

Figura 12 Ejemplo de cómo la consideración de la estimación de incertidumbres de amenazas puede afectar la extensión de inundación de 100 años prevista



Extraído de <http://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/index.htm> (consultado el 6 de enero de 2014, consulte https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads/teaching_materials/Licence.pdf para obtener información sobre los derechos de autor).

REFERENCIAS

- Abhas, K., Bloch, R. y Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. Washington, D.C., EE. UU. The World Bank.
- Ahern, M., Kovats, S. R., Wilkinson, P., Few, R. y Matthies, F. (2005). Global Health Impacts of Floods: Epidemiologic Evidence. *Epidemiologic Reviews*, 27, 36–46.
- Allsop, W., Kortenhaus, A. y Morris, M. (2007). *Failure Mechanisms for Flood Defence Structures*.
- Berne, A., Delrieu, G, Creutin, J. D. y Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299 (3–4), 166–179.
- Bonin, G. M., Martin, D., Lin, B., Parzybok, T., Yekta, M., Riley, D., (2006), NOAA Atlas 14 Precipitation-Frequency Atlas of the United States Volume 2 Version 3.0: Delaware, District of Columbia, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, New Jersey, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, South Carolina, Tennessee, Virginia, West Virginia, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Silver Spring, Maryland
- Buchanan, T. y Somers, W. (1969). *Discharge measurements at gaging stations*. Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chap A8. U.S. Geological Survey.
- Changnon, S. D. (2003). Measures of Economic Impacts of Weather Extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1231–1235.
- Curtis, D. (1996). Inadvertent Rain Gauge Inconsistencies and Their Effect on Hydrologic Analysis. *California-Nevada ALERT Users Group Conference*, 4.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA. (2003a)). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners*. [En línea] Obtenido de: [http://www.fema.gov/media-library-data/1387813361938-357e4d59ca3aaaa54864ff45946808ae/Guidelines+and+Specifications+for+Flood+Hazard+Mapping+Partners+-+Reference+Pages+\(April+2003\).pdf](http://www.fema.gov/media-library-data/1387813361938-357e4d59ca3aaaa54864ff45946808ae/Guidelines+and+Specifications+for+Flood+Hazard+Mapping+Partners+-+Reference+Pages+(April+2003).pdf). [Consultado el 14 de enero de 2014].
- Federal Emergency Management Agency (FEMA. (2003b)). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners – Appendix A: Guidance for Aerial Mapping and Surveying*. [En línea] Obtenido de: [http://www.fema.gov/media-library-data/1387568629763-85712b7052d5e0ec91e395ce975370c1/Guidelines+and+Specifications+for+Flood+Hazard+Mapping+Partners+Appendix+A-Guidance+for+Aerial+Mapping+and+Surveying+\(Feb+2002\).pdf](http://www.fema.gov/media-library-data/1387568629763-85712b7052d5e0ec91e395ce975370c1/Guidelines+and+Specifications+for+Flood+Hazard+Mapping+Partners+Appendix+A-Guidance+for+Aerial+Mapping+and+Surveying+(Feb+2002).pdf). [Consultado el 09.07.14].
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2012). *Numerical Models Meeting the Minimum Requirement of the National Flood Insurance Program – Current Nationally Accepted Statistical Models*. [En línea] Obtenido de: Numerical Models Meeting the Minimum Requirement of the National Flood Insurance Program – Current Nationally Accepted Statistical Models. [Consultado el 14 de enero de 2014].
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2014). *Numerical Models Meeting the Minimum Requirements of the National Flood Insurance Program – Current Nationally Accepted Models*. [En línea] Obtenido de: <http://www.fema.gov/national-flood-insurance-program-flood-hazard-mapping/numerical-models-meeting-minimum-requirements>. [Consultado el 14 de enero de 2014].

- Few, R., Ahern, M., Franziska, M. y Kovats, S. (2004). *Floods, health and climate change: a strategic review*. Tyndall Center for Climate Change Research.
- Gaume, E. y Borga, M. (2008). Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations. *Journal of Flood Risk Management*, 1, 175–189.
- Gouldby, B. y Samuels, P. (2005). *Language of Risk-Project Definitions*. HR Wallingford.
- Interagency Advisory Committee on Water Data. (1982). *Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin 17B*. Reston: U.S. Dept. of the Interior, USGS, Office of Water Data Coordination.
- Johnson, N. B., Hansen, W. J., Warren, J., Reynolds, F. R., Foley, C. O. y Fulton, R. L. (1988). *National Economic Development Procedures Manual Urban: Flood Damage*. Institute for Water Resources. Fort Belvoir: U.S. Army Corps of Engineers.
- Kang, J., Su, M. y Chang, L. (2005). Loss functions and framework for regional flood damage estimation in residential areas. *Journal of Marine Science and Technology*, 193–199.
- Kelman, I. y Spence, R. (2004). An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology*, 73 (3–4), 297–309.
- McCuen, R. (2005). *Hydrologic Analysis and Design*, Pearson Prentice Hall.
- Medina, D. (2006). *Benefit-Cost Analysis of Flood Protection Measures*. Technical Memorandum, CH2M Hill.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. y Thielen, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 1697–1724.
- Prinos, P. (2008). *Review of Flood Hazard Mapping*. European Community Sixth Framework Programme for European Research and Technological Development. FLOODsite.
- Rogelis, M. (2012). *Advances in Probabilistic Flood Hazard Assessment*. CAPRA. Washington D.C.: The World Bank.
- Schilling, W. (1991). Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research*, 27 (1–3), 5–21.
- Schultz, M. T., Goulby, B. P., Simm, J. D. y Wibowo, J. L. (2010). *Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability*. Engineer Research and Development Center. Washington, D. C.: US Army Corps of Engineers.
- Sieck, L., Burges, S. J. y Steiner, M. (2007). Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resources Research*, 43, W01420.
- Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M. y Wilson, T. L. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 360, 1511–1525.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). (2004). *Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives*. 429 p.
- Villarini, G., Smith, J. A., Baeck, M. L., Sturdevant-Rees, P. y Krajewski, W. F. (2010). Radar analyses of extreme rainfall and flooding in urban drainage basins. *Journal of Hydrology*, 381 (3–4), 266–286.
- Wright, D. B., Smith, J. A. y Baeck, M. L. (2014). Flood Frequency Analysis Using Radar Rainfall Fields and Stochastic Storm Transposition. *Water Resources Research*.



GRUPO BANCO MUNDIAL
Desarrollo Social, Urbano y Rural y Resiliencia



Financiado por



GFDRR
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



Australian Government
Department of Foreign Affairs and Trade