

Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador



Juan Pinos¹, Luis Timbe¹ , Daniel Orellana^{1,2} 

¹ Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Víctor Manuel Albornoz y los Cerezos, Campus Balzay, Cuenca, 010207, Ecuador.

² Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Loja, Campus Central, Cuenca, 010203, Ecuador.

Autor para correspondencia: juan.pinosf@gmail.com

Fecha de recepción: 7 de noviembre 2017 - Fecha de aceptación: 14 de diciembre 2017

RESUMEN

Las inundaciones representan uno de los peligros naturales más frecuentes a nivel global, ocasionando considerables pérdidas económicas y sociales en las poblaciones afectadas. En las últimas décadas, las propuestas basadas en la evaluación del riesgo son cada vez más aceptadas e incorporadas en la gestión del riesgo de inundaciones. A pesar del progreso considerable en el desarrollo de herramientas de estimación de pérdidas, éstas aún presentan incertidumbres altas y disparidades que a menudo llevan a cuestionar su calidad. Este trabajo presenta una revisión exhaustiva y actualizada de las diferentes herramientas analíticas y metodológicas incorporadas en varios modelos existentes. El análisis comparativo de las metodologías mostró que los componentes y características incluidas por los diferentes métodos son altamente heterogéneos y la gran mayoría no incorporan una validación explícita de los resultados del modelo. Esta comparación requirió de una profunda comprensión de las estructuras, mecanismos y supuestos subyacentes de cada método. Finalmente, el artículo presenta las características generales y los principales componentes de una propuesta metodológica para la evaluación analítica de estimación de pérdidas por inundación para el Ecuador, a partir de la síntesis de todos los métodos evaluados y en función de la información disponible.

Palabras clave: Riesgo de inundación, modelos de pérdida, daño por inundación, metodología.

ABSTRACT

Floods represent one of the most frequent natural hazards globally, resulting in considerable economic and social losses in affected populations. Approaches based on risk assessment are increasingly accepted and incorporated into flood risk management in recent decades. Despite considerable progress in the development of loss estimation tools, they still present high uncertainties and disparities that often lead to questioning their quality. This work presents an in-depth and updated review of the different analytical and methodological tools incorporated in several existing models. A comparative analysis of the methodologies showed that the components and characteristics included by the different methods are highly heterogeneous and the vast majority do not incorporate an explicit validation of the model results. This comparison required a deep understanding of the structures, mechanisms and underlying assumptions of each method. Finally, the paper presents the general characteristics and the main components of a methodological proposal for the analytical evaluation of flood loss estimates for Ecuador, from the synthesis of all the evaluated methods and based on the available data.

Keywords: Flood risk, loss models, flood damage, methodology.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones provenientes de los sistemas fluviales son parte natural del ciclo hidrológico (Vojtek & Vojteková, 2016). Sin embargo, son el peligro natural más frecuente y costoso, que afecta regularmente a la mayoría de los países del mundo (Zwenzner & Voigt, 2009; Balica, Popescu, Beevers, & Wright, 2013; Vojtek & Vojteková, 2016). En las últimas décadas, la frecuencia de eventos de inundación ha aumentado a escala global (Keating, Campbell, Mechler, Michel-Kerjan, Mochizuki *et al.*, 2014), consecuentemente las pérdidas económicas causadas han sido muy significativas (Güneralp, Güneralp, & Liu, 2015; Tanoue, Hirabayashi, & Ikeuchi, 2016; Glas, Jonckheere, Mandal, James-Williamson, de Maeyer *et al.*, 2017). La mayor parte de este incremento puede atribuirse a la expansión de asentamientos humanos y a una intensa actividad económica (industrial, agropecuaria, de servicios) en las zonas aluviales (planicies) propensas a inundaciones (Baró-Suárez, Díaz-Delgado, Calderón-Aragón, Esteller-Alberich, & Cadena-Vargas, 2011; Keating *et al.*, 2014; Tanoue *et al.*, 2016). Además, a futuro se espera que los cambios en la intensidad y distribución de las lluvias, asociados con el cambio climático, incrementen la extensión y la frecuencia de las inundaciones (Posthumus, Morris, Hess, Neville, Phillips *et al.*, 2009; Güneralp *et al.*, 2015; Arnell & Gosling, 2016). Generalmente, las mayores pérdidas se producen en las zonas residenciales (urbanas), debido a la degradación o destrucción de estructuras, pérdida del contenido de las viviendas y comercios, costos del cierre de negocios, fallos en los sistemas de abastecimiento de servicios básicos, entre otros (Jongman, Kreibich, Apel, Barredo, Bates *et al.*, 2012). En las zonas agrícolas las crecidas también producen pérdidas considerables, la magnitud dependerá del tipo de cultivo y de la fase de desarrollo al momento del evento (Posthumus *et al.*, 2009). Los daños económicos totales debidos a crecidas fluviales en el sector agrícola suelen ser frecuentemente más bajos que los del sector residencial, para el mismo nivel de exposición (Merz, Kreibich, Schwarze, & Thielen, 2010). El incremento de pérdidas por inundaciones en las últimas décadas ha expuesto la necesidad urgente de mejorar la gestión de este riesgo natural.

Para minimizar el costo y las consecuencias de las inundaciones, los gobiernos a nivel mundial han invertido en medidas estructurales para su prevención, como la construcción de diques, barreras y represas (Glas *et al.*, 2017). Además de la construcción de infraestructura civil, un proceso clave es el desarrollo de modelos fiables de estimación de pérdidas para obtener una reducción eficiente del riesgo de inundación. Los métodos de pérdida o modelos de vulnerabilidad de inundación describen la relación entre las métricas de intensidad del peligro, tales como la profundidad, la velocidad, etc., y una relación de pérdidas que puede traducirse en una cantidad monetaria (Gerl, Kreibich, Franco, Marechal, & Schröter, 2016). Las estimaciones del daño potencial se utilizan, por ejemplo, para la planificación territorial, la cartografía del riesgo de inundación y el análisis costo-beneficio de las inversiones requeridas en defensas contra crecidas (Merz *et al.*, 2010). Estos daños dependen de diversas variables, éstas pueden incluir la profundidad del agua, la carga de sedimentos, la velocidad del flujo, la duración del evento, la temperatura del agua, el tiempo de alerta, la presencia de olas, la época del año, el día de la semana, la hora del día, la topografía, el tipo de propiedad en riesgo y muchos otros factores (Messner, Penning-Rowsell, Green, Meyer, Tunstall *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2010; USACE, 2013).

Los daños pueden clasificarse en directos e indirectos. Los directos son aquellos que ocurren debido al contacto físico del agua con infraestructuras, propiedades, personas, cultivos o cualquier otro objeto. Los indirectos son inducidos por los impactos directos y ocurren, en el espacio o en el tiempo, fuera del evento de inundación. Ambos tipos de daños se clasifican además en tangibles e intangibles, dependiendo de si pueden evaluarse o no en valores monetarios. Tangibles son los daños al capital humano o los flujos de recursos que pueden especificarse fácilmente en términos monetarios, mientras que el intangible es el perjuicio a los activos que no se negocian en un mercado y son difíciles de transferir a valores monetarios (Merz *et al.*, 2010; Giupponi, Mojtahed, Gain, Biscaro, & Balbi, 2014).

Agencias gubernamentales, compañías de seguros, universidades e instituciones de investigación han desarrollado y aplicado métodos de evaluación de daño para cuantificar el impacto económico esperado por las inundaciones. En la actualidad, hay una gran variedad de métodos de estimación de pérdidas, diferenciando el propósito, estructura y enfoque regional (Gerl *et al.*, 2016). Generalmente se desarrollan con un enfoque prioritario para el país y/o región correspondiente; como por ejemplo: Hazus-MH (Estados Unidos), Multi-Coloured Manual (Reino Unido), MURL (Alemania), FLEMO

(Alemania), Damage Scanner (Holanda), Rhine Atlas (cuena del Rin), Flemish Model (Bélgica), y el RiskScape (Nueva Zelanda); son modelos establecidos bajo condiciones propias de cada territorio. Las metodologías de evaluación de daños por inundación han sido ampliamente analizadas en términos de comparación, determinando que existe un alto grado de incertidumbre al aplicar diferentes métodos para un mismo caso de estudio (Merz *et al.*, 2010; de Moel & Aerts, 2011; Jongman *et al.*, 2012; Scorzini & Frank, 2015). La profundidad de la inundación se usa como el factor determinante del daño esperado, a veces complementado por otros parámetros como velocidad del flujo, duración, contaminación del agua, tiempo de alerta y de advertencia. Todavía, el método más aceptado y comúnmente usado para la estimación de la pérdida directa a nivel internacional es la aplicación de las funciones profundidad-daño, también llamadas curvas de daño (Messner *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2010). Estas funciones representan relaciones entre la profundidad del agua y la pérdida resultante. La función puede representarse ya sea como un porcentaje de un valor de activo predefinido “función relativa” o directamente en términos económicos “función absoluta” (Merz *et al.*, 2010). Existe un alto grado de incertidumbre en la construcción de éstas curvas (Messner *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2010; de Moel & Aerts, 2011; Jongman *et al.*, 2012). Las diferencias provienen del marco metodológico aplicado por los modelos para la evaluación de pérdidas por inundación, por ejemplo, en la escala espacial, en la zona geográfica, tipo de función de daño (absoluta versus relativa), clases de daño, base de los costos y las características hidráulicas incluidas. Además, mientras que algunos modelos se implementan utilizando datos empíricos, otros se basan en el juicio de expertos, en combinación con escenarios evaluados. Estas funciones varían significativamente entre países y estudios, ambos en términos de pendiente (aumento o disminución del daño en relación con la profundidad) y en estimaciones del daño (pérdidas por unidad de área).

Por lo tanto, el primer objetivo del artículo es proporcionar una revisión exhaustiva de los métodos para la evaluación del riesgo de inundaciones (pérdidas económicas). Se ha realizado una revisión de la literatura para identificar métodos utilizados en diferentes países y para diferentes tipos de inundaciones (costeras, fluviales, pero también aquellas provocadas por tsunamis). Sin embargo, el principal enfoque de esta investigación se centra en los eventos de crecida para sistemas fluviales. Se han identificado diferentes métodos mediante una extensa búsqueda en la literatura revisada por pares e informes de investigación. El segundo objetivo es desarrollar un procedimiento simplificado para la evaluación de este riesgo en zonas urbanas y agrícolas, con un énfasis específico en la situación del Ecuador y Latinoamérica. De acuerdo a Gerl *et al.* (2016) no existe literatura reportada para Latinoamérica sobre la descripción metodológica para la evaluación del riesgo por inundación, siendo una propuesta pionera en esta temática. Todos los años son recurrentes los episodios de inundación (en diferentes escalas de intensidad) en distintas ciudades de Latinoamérica (Aragón-Durand, 2014). Por lo tanto, es de vital importancia describir un cuadro metodológico de referencia.

2. PELIGRO Y RIESGO DE INUNDACIÓN

El peligro (también designado como amenaza) de inundación se define por la relación entre la profundidad de inundación y la probabilidad anual de inundación, mayor que esa profundidad, y se representa en una curva de frecuencia de profundidad (Scawthorn, Flores, Blais, Seligson, Tate *et al.*, 2006). Generalmente, el peligro se estima mediante el uso de modelos hidráulicos. El riesgo se refiere a las pérdidas esperadas de una amenaza particular (p.e. inundación) a un elemento específico en riesgo en un período de tiempo futuro particular. La pérdida puede estimarse en términos de vidas humanas, edificios dañados/destruidos o en términos económicos (Peduzzi, Dao, Herold, & Mouton, 2009). El enfoque más común para definir el riesgo de inundación es la definición de riesgo como producto del peligro, es decir, los aspectos físicos y estadísticos de la inundación real (p.e. el período de retorno, la extensión y la profundidad de la crecida) y la vulnerabilidad, es decir, exposición de personas y bienes a inundaciones, y la susceptibilidad de los elementos en riesgo de sufrir daños por estos eventos (Apel, Aronica, Kreibich, & Thielen, 2009).

Como indica Samuels & Gouldby (2009) el término riesgo tiene varios significados y múltiples dimensiones relacionadas a problemas de seguridad, económicos, ambientales y sociales. A veces se

confunde o se consideran como sinónimos los términos peligro y riesgo. El peligro es una fuente con potencial de daño (p.e. inundación), mientras que el riesgo es la consecuencia, es decir la posibilidad de que el evento/daño ocurra. Por lo tanto, el riesgo está asociado a una probabilidad de ocurrencia. Para entender mejor la relación entre estos dos términos se emplea el concepto de Fuente-Vía-Receptor (F-V-R) (Environmental Agency, 2014), que también puede incluir al final el término Consecuencia (F-V-R-C) (Samuels & Gouldby, 2009). Este modelo nos permite representar los sistemas y procesos que conducen a una consecuencia específica.

Las *fuentes* corresponden a las condiciones físicas sobre el sistema (p.e. la lluvia, niveles de agua) que crean el riesgo. Por lo general, son las entradas o condiciones de contorno en modelos de simulación del sistema. Las *vías* son aquellas que proporcionan las rutas del agua de la crecida para pasar a los receptores. Los *receptores* son las propiedades/infraestructura, las personas, y el medio ambiente ubicados en la llanura aluvial que está en riesgo. Las *consecuencias* son los impactos económicos, sociales, ambientales o culturales que puedan resultar de una inundación.

De acuerdo a Samuels & Gouldby (2009), para el evaluar el riesgo de inundación deben considerarse varios componentes: 1) la naturaleza y la probabilidad del peligro (p), 2) el grado de exposición de los receptores (número de personas y bienes) al peligro (e), 3) la susceptibilidad de los receptores al peligro (s), y 4) el valor de los receptores (v). Por lo tanto, el riesgo será función de (p, e, s, v), siendo la vulnerabilidad una sub-función del riesgo. El término vulnerabilidad engloba las características de un sistema que describe su potencial a sufrir daños. Con lo cual la vulnerabilidad será función de (s, v). Sin embargo, la exposición y la vulnerabilidad son implícitamente evaluadas en las consecuencias, llegando así a una definición simple de Riesgo = Probabilidad x Consecuencia (Kron, 2005). Este término relaciona la posibilidad o probabilidad (exposición) de que ocurra un peligro y las consecuencias adversas de tal evento (Kron, 2005; Samuels & Gouldby, 2009; Environmental Agency, 2014). El componente del peligro de inundación es un análisis bastante común y rutinario en la práctica de la ingeniería hidráulica, por lo que en el presente estudio no será discutido.

3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

La necesidad de diseñar y mejorar metodologías de evaluación de riesgo por inundación ha aumentado en las últimas décadas, consecuentemente han sido áreas activas de investigación. El avance tecnológico ha permitido desarrollar técnicas que integran varios componentes de análisis al mismo tiempo. Esta variedad de nuevas adiciones a las metodologías clásicas, apuntan principalmente a mejorar la correcta estimación de la pérdida económica e incorporar aspectos anteriormente ignorados (p.e. nuevos tipos de infraestructura, vulnerabilidad social, medio ambiente) en los análisis. La compilación de información que se presenta en este documento proporciona detalles sobre la filosofía general de los modelos en términos de componentes de análisis, variables de entrada requeridas y otras características del modelo. La selección incluyó artículos de revisión, artículos científicos y reportes de proyectos.

La revisión está basada en el método denominado “Revisión Sistemática de la Literatura” (SLR por sus siglas en inglés Systematic Literature Review) propuesto por Kitchenham & Charters (2007). La metodología consiste en un análisis textual cualitativo sistemático mediante la revisión crítica de la bibliografía primaria, secundaria y la literatura académica. Su principio se basa en la desintegración de los textos y su síntesis para su posterior reinserción con elementos similares en categoría que forman nuevos textos, y que reúnen los aspectos esenciales del objeto de análisis (Osses, Sánchez, & Ibáñez, 2006).

En una visión general los modelos de pérdida por inundaciones han sido desarrollados como herramientas que ayudan a mejorar la gestión integral de riesgos, estos varían a través de las necesidades particulares de los distintos países. Los modelos pueden abarcar una amplia gama de componentes a evaluar en daño físico directo, indirecto, tangible e intangible (Giupponi *et al.*, 2014). Una característica importante para la especificación de los métodos de pérdida es su enfoque o filosofía. Hay dos enfoques que se utilizan normalmente en el desarrollo de las funciones de pérdida, que pueden ser empíricos o sintéticos/ingeniería. El enfoque empírico utiliza datos de pérdida recopilados después de eventos de inundación, mientras que el enfoque sintético/ingeniería utiliza datos de pérdida recopilados a través de

encuestas de condiciones hipotéticas (what-if-questions), o puede existir una combinación de ambos tipos (Gerl *et al.*, 2016).

Esta investigación se limita a evaluar modelos para cuantificar la pérdida económica por inundaciones para los componentes de zonas urbanas y agrícolas. La Tabla 1 muestra en síntesis los modelos correspondientes a diferentes países, tipo de desarrollo (conceptualización) y los componentes físicos de interés que incorporan. Cabe mencionar que cada modelo incluye una serie de características propias, dependiendo del componente a evaluar. Merz *et al.* (2010) en su investigación describen las diferencias por componente de varios modelos como: tipo de desarrollo, tipo de función de daño, parámetros, escala, componentes de pérdida, entre otros.

Tabla 1. Características de varios modelos de evaluación del riesgo por inundación.

Modelo (referencia)	País	Tipo de desarrollo del modelo	Componentes de daño físico
Hazus-MH Flood Model (Scawthorn <i>et al.</i> , 2006)	Estados Unidos	empírico-sintético	edificaciones, agricultura
Flood and Coastal Erosion Risk Management (Penning-Rowsell <i>et al.</i> , 2017)	Reino Unido	sintético	edificaciones, agricultura
LATIS (Glas <i>et al.</i> , 2017)	Bélgica	sintético	edificaciones, agricultura
INSYDE (Dottori <i>et al.</i> , 2016)	Italia	sintético	edificaciones
RAM (NRE, 2000)	Australia	empírico-sintético	edificaciones
ICPR (ICPR, 2001)	Alemania	empírico-sintético	edificaciones, agricultura
Mathematical Model (Dutta <i>et al.</i> , 2003)	Japón	empírico	edificaciones
Agricultural flash flood (Vozinaki <i>et al.</i> , 2015)	Grecia	sintético	agricultura
Flood risk assessment and mapping for the Lebanese watersheds (Abdallah & Hdeib, 2016)	Líbano	empírico	edificaciones, agricultura

En las siguientes secciones se sintetiza una descripción de varias metodologías existentes obtenidas de la revisión.

3.1. Hazus Multi-Hazard

Fuente: Scawthorn *et al.* (2006). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Flood Model (en línea)

Hazus-MH es una herramienta de análisis de riesgos naturales (terremotos, inundaciones, tsunamis y huracanes) basada en sistemas de información geográfica, desarrollada y distribuida libremente por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) de los Estados Unidos, a través de su página oficial www.fema.gov. El objetivo del componente de inundaciones es proporcionar una herramienta analítica de apoyo en la toma de decisiones informadas sobre el uso del suelo en las zonas propensas a inundaciones. Está diseñado para producir estimaciones de pérdidas para uso de gobiernos federales, estatales, regionales y locales, y empresas privadas en la planificación de mitigación de riesgos, preparación para emergencias, respuesta y recuperación (se desarrolló para su aplicación en los Estados Unidos). El módulo de inundaciones consiste en dos procesos analíticos básicos: análisis del peligro y análisis de estimación de pérdida. En la fase de análisis de peligro se usan características tales como la frecuencia de ocurrencia, el caudal y la elevación del suelo para modelar la variación espacial de la profundidad y la velocidad del flujo. Durante la fase de estimación de pérdidas, los daños estructurales y económicos se calculan sobre la base de los resultados del análisis del peligro, mediante el uso de curvas de daño. Las curvas están en función de la profundidad y de la velocidad del agua para todos los componentes estructurales, en cuanto a pérdidas en la agricultura, se aplica una fórmula empírica que

depende de otros factores (p.e. duración de la crecida, área cultivada, rendimiento, entre otros). Los componentes de análisis incorporados en este módulo de Hazus son los siguientes:

- Daño Físico Directo: edificaciones, instalaciones esenciales, sistemas de transporte, sistemas de suministro, sector agrícola y vehículos.
- Daño Físico Indirecto: escombros.
- Pérdidas económicas directas/sociales: refugios/albergues, grupos vulnerables, pérdidas humanas y logística para la respuesta al evento (p.e. actividades de limpieza).
- Pérdidas económicas indirectas: niveles de aumento y reducción potencial en importaciones y exportaciones respectivamente, inventarios de suministros y productos y tasas de desempleo.

3.2. *Flood and Coastal Erosion Risk Management - Handbook and Data for Economic Appraisal*

Fuente: Penning-Rowsell, Priest, Parker, Morris, Tunstall *et al.* (2017).

Este libro-guía es muy empleado como referencia de los beneficios de la gestión del riesgo de inundaciones fluviales y costeras. Producido por el Flood Hazard Research Center de la Universidad de Middlesex (Londres-Inglaterra), con el apoyo del Department for Environment Food & Rural Affairs (Defra) y la Environment Agency (entidades gubernamentales de Reino Unido). Este libro es un sucesor y complemento del manual “Flood and Coastal Erosion Risk Management - A Manual for Economic Appraisal – 2013”. Este a su vez, se basa en un libro anterior conocido como el “Multi-Coloured Manual – 2005”, que fue una síntesis de los manuales de Blue (1977), Red (1987) y Yellow (1992). El libro-guía proporciona una serie simplificada de técnicas de evaluación de los beneficios de la gestión del riesgo de inundación y consta de tres partes clave. En primer lugar, proporciona métodos y datos que pueden utilizarse para la evaluación práctica de planes y políticas. En segundo lugar, describe una nueva investigación para actualizar los datos y mejorar las técnicas. En tercer lugar, explica las limitaciones y las complicaciones del análisis costo-beneficio, para guiar la toma de decisiones sobre la inversión en esquemas de gestión del riesgo fluvial y costero. El libro-guía es de libre acceso en la página oficial www.mcm-online.co.uk. El documento considera los componentes de:

- Propiedades residenciales y factores sociales: tipo de vivienda, vehículos, información socio-económica, costos de desplazamiento.
- Propiedades no residenciales: comercios e industrias.
- Otras pérdidas por inundación: utilidades públicas, servicios públicos, transporte, infraestructura crítica.
- Agricultura.

El libro-guía considera más aspectos de relevancia como: guía para la toma de decisiones, gestión de riesgos de inundación (teoría y práctica), erosión costera (pérdidas potenciales y beneficios), ganancias y pérdidas recreativas, aspectos ambientales (beneficios y costos), los cuales no fueron considerados en el sumario por su amplio alcance. La pérdida se estima tanto para estructura como para contenido. Todas las estimaciones se realizan en función de las curvas de daño relativas, las cuales incorporan la profundidad y el tiempo de duración de la crecida. En la metodología se considera daños directos e indirectos, así como tangibles e intangibles. Cabe recalcar que la guía hace énfasis en el análisis de las pérdidas indirectas debido a las inundaciones.

3.3. *LATIS*

Fuente: Glas *et al.* (2017).

Este método se basa en estimar el riesgo ante una probabilidad de evento. Esta herramienta se ha implementado con éxito en Bélgica y Jamaica, e identifica las áreas de alto riesgo para las inundaciones fluviales y calcula el costo anual esperado. En el esquema metodológico, se desarrollan dos mapas: un mapa de daños y un mapa de vulnerabilidad, que al combinarse para diferentes periodos de retorno de eventos de crecida se obtiene el mapa de riesgo económico y el mapa de riesgo social respectivamente. Este último da una visión general de las bajas de un evento por sector estadístico (p.e. género, edad, barrio, etc.). El primero presenta una visión general del costo material total producido por una crecida. Mediante el uso de múltiples mapas de peligro de inundación para diferentes periodos de retorno, los mapas de daños de salida se pueden combinar en un mapa de riesgo económico, mostrando el costo

promedio anual por inundación, y los mapas de vulnerabilidad se combinan en un mapa de riesgo social, mostrando el grado de resiliencia de la población.

Para obtener el mapa de daños, se requiere como entrada mapas de uso del suelo. Estos mapas definen los aspectos físicos del área de investigación. No sólo son indispensables los datos de uso del suelo de la zona, sino también la información de carreteras, ferrocarriles y edificios críticos (p.e. estaciones de bomberos, escuelas, hospitales). Además, se pueden añadir las zonas correspondientes a infraestructuras, residencias y cultivos específicos de cada región, con el fin de lograr un mayor nivel de detalle de los datos de entrada. Debido a que este nivel de detalle determina la exactitud de la salida, se deben conseguir tantos datos de uso del suelo como sea posible. Los valores de reemplazo se deben calcular y añadir a la evaluación. Estos valores representan el costo de reemplazar un elemento en riesgo en caso de destrucción total. Para determinar estos valores, se pueden usar mapas de valor de la tierra, y costos promedio de edificios y cultivos. Al combinar los valores de reemplazo con los datos de uso del suelo, se genera un mapa de pérdidas máximo. Este mapa contiene el costo en caso de destrucción total. Finalmente, el mapa de daños máximo se combina con los mapas de peligro de inundación para diferentes períodos de retorno, incorporando funciones de daño. Estas son funciones que muestran el porcentaje de daño a un elemento en riesgo para diferentes profundidades del agua. Para cada período de retorno, se genera un mapa de daños. Estos mapas se combinan en un mapa de riesgos, que muestra el costo por año.

Para crear un mapa de vulnerabilidad, se necesitan datos de población. Dado que teóricamente la población se distribuye por igual en una determinada región, los mejores resultados se calculan con datos de población para sectores estadísticos pequeños. Además, los datos deben estar actualizados para mejorar la precisión del mapa de vulnerabilidad. Al combinar un mapa de densidad de población con los mapas de riesgo de inundación, utilizando un factor de mortalidad, se genera un mapa de vulnerabilidad para cada período de retorno. Estos se combinan en un mapa de riesgo de vulnerabilidad para cada año.

3.4. *Vozinaki - Agricultural flash flood*

Fuente: Vozinaki, Karatzas, Sibetheros, & Varouchakis (2015).

Este trabajo presenta una metodología para la estimación de pérdidas económicas en el sector agrícola por inundaciones repentinas en el sector rural, adecuada para áreas con datos limitados o sin datos. El método fue aplicado a un caso de estudio en la cuenca del Río Koiliaris en Creta, Grecia. El esquema propuesto utiliza la profundidad del agua, la velocidad de flujo, así como la época de la crecida (con respecto a la fase de crecimiento del cultivo), como entradas a un modelo de estimación de pérdidas monetarias. Las curvas de daño son generalmente derivadas de un análisis de regresión de registros históricos de datos o estimadas a partir de datos sintéticos estandarizados. Debido a la falta de registros históricos, las curvas de daño sintéticas se generan aplicando la regresión logística a los datos sintéticos de profundidad-velocidad-daño, producidos mediante un proceso de Monte Carlo, a través de los datos de pérdidas recogidos mediante encuestas.

La metodología consiste en 4 procesos fundamentales: 1) mapas de peligro (profundidad y velocidad), 2) funciones de daño, 3) mapas de uso del suelo y 4) construcción del modelo de pérdida económica. La metodología, mediante la aplicación de lenguaje de programación (Python), modelación hidráulica (MIKE FLOOD) y un sistema de información geográfica GIS (ArcGIS), determina la pérdida monetaria en términos de costo/celda. El mapa de peligro, que contienen la profundidad máxima de inundación y la velocidad de flujo en cada celda, se incorpora en ArcGIS. Posteriormente mediante la programación en Python se puede leer los datos de profundidad y velocidad, utilizando las coordenadas de cada celda de procesamiento, la información sobre el uso del suelo se recupera del archivo con el mapa respectivo y se combina con los datos de profundidad y velocidad. Posteriormente, el modelo de estimación de pérdidas utiliza el mes de ocurrencia de la inundación para identificar la superficie de daño adecuada y calcula la pérdida en cada celda. El daño total para todo el polígono de estudio se calcula sumando los valores de todas las celdas.

3.5. *Xiaosheng & Jieyun - Spatial Information Grid*

Fuente: Xiaosheng & Jieyun (2013).

En esta investigación la metodología para evaluación de la pérdida se basa en una malla de información espacial con datos socio-económicos. Este método ha sido implementado exitosamente en la cuenca del Lago Poyang, en Jiangxi, China, después de analizar las deficiencias de varias investigaciones anteriores. La metodología consiste en delimitar el área de inundación, establecer una malla con información socio-económica y una malla con las características de la crecida. Cada celda de las mallas posee un código de identificación, mediante SIG se superponen las mallas para establecer clases o categorías y así obtener los valores de pérdida monetaria. La información socio-económica consiste en el tipo de uso de suelo, producción agrícola, población, vías, actividades económicas, producto interno bruto, topografía y ubicación. Mediante la aplicación de tecnología SIG de análisis espacial y métodos estadísticos matemáticos, se determinó la distribución de los coeficientes de la información socio-económica en las celdas de la malla. Las características de la inundación consisten en la profundidad, duración, velocidad, sedimentos y contaminantes. Se concluye que para mejorar la precisión de la estimación se debe explorar la adecuada selección del tipo de mallado, tamaño de la malla y considerar la dinámica hidrológica.

3.6. *FLEMO*

Fuente: Thielen, Olschewski, Kreibich, Kobsch, & Merz (2008); Kreibich, Seifert, Merz, & Thielen (2010).

Los modelos FLEMO han sido desarrollados por el German Research Centre for Geoscience, principalmente para el análisis científico del riesgo de inundación desde la escala local a la nacional (Alemania). Contiene el cálculo multifactorial de la estimación de la pérdida por inundaciones (Flood Loss Estimation Model) basado en dos componentes: 1) FLEMOps para la estimación de los daños tangibles directos a los edificios residenciales y contenido de los hogares (sector privado); 2) FLEMOcs para la estimación de daños tangibles directos a edificios comerciales, equipos y bienes de las empresas (sector comercial).

FLEMOps calcula el daño causado utilizando categorías de nivel del agua, tipo de edificios, clases de calidad de construcción, contaminación y precaución. FLEMOcs tiene una estructura similar, calcula la pérdida usando categorías de nivel del agua, sectores económicos, clases de tamaño de empresa con respecto al número de empleados, así como contaminación y precaución. Los modelos están basados en la información empírica obtenida mediante encuestas telefónicas sobre los daños específicos producidos por tres eventos de inundación en los años 2002, 2005 y 2006, en Alemania. Para estudios locales, los modelos son aplicables a nivel de edificaciones (microescala). Para aplicaciones de nivel regional a nacional (mesoescala) los modelos han sido adaptados usando datos de censo, geo-marketing y usos del suelo.

3.7. *Meyer - Multicriteria Approach*

Fuente: Meyer, Scheuer, & Haase (2009).

En esta investigación se desarrolló un enfoque multi-criterio de evaluación de riesgo por inundación basado en SIG y cartografía. El método fue aplicado en un área piloto en el río Mulde Vereinigte en el estado federal de Sajonia (Alemania). El criterio de riesgo económico de daños se calcula mediante un enfoque de evaluación a meso-escala. El esquema metodológico de manera general incorpora: 1) el valor total de los activos en riesgo y su distribución espacial se calculan en base a los datos estadísticos oficiales, que se asignan a las correspondientes categorías de uso de suelo, y 2) las curvas relativas de profundidad-daño. Dichas funciones de daño muestran la susceptibilidad media de cada sector frente a la profundidad de la inundación.

Las incertidumbres metodológicas en la evaluación se muestran aplicando: 1) diferentes valoraciones de los activos correspondientes a las diferentes categorías de uso del suelo y 2) diferentes conjuntos de curvas de profundidad-daño obtenidos de otros estudios. Para cada celda de la malla se puede calcular un daño medio basado en las curvas escogidas, así como un valor mínimo y máximo. Se calcula un daño promedio anual por celda basándose en las diferentes estimaciones para eventos de

crecida con diferentes probabilidades de excedencia (es decir, diferentes periodos de retorno). Esto se lleva a cabo tanto para la media como para las estimaciones de daño mínimo y máximo, de manera que la salida final se obtiene una pérdida media anual, mínima y máxima por celda de la malla.

3.8. *Ernst - Decision-Support-System*

Fuente: Ernst, Dewals, Archambeau, Detrembleur, Erpicum *et al.* (2008).

La metodología propuesta en este estudio sobre evaluación económica de daños causados por inundaciones fue aplicada al caso de estudio del río Ourthe (cuenca del Río Mosa, Bélgica). El método se basa en cuatro pasos fundamentales. El primer paso de la metodología es identificar el elemento en riesgo (es decir, los potenciales activos que pueden ser afectados por un evento de crecida). Esto se puede hacer combinando el mapa de inundación y las bases de datos geográficas de uso del suelo. El segundo paso consiste en seleccionar el tipo de curvas de daño (absoluta o relativa) y su fuente (p.e. Rhine Atlas, FLEMO). Además, el enfoque requiere la estimación del valor de los elementos en riesgo por unidad de superficie (denominado: valor específico). Después de evaluar los parámetros económicos (funciones de daño relativas y valores específicos de los activos) relacionados a cada uso de suelo y tipo de edificio, el siguiente paso es calcular el daño relativo de cada activo afectado por inundación; y el último paso es la evaluación de pérdidas económicas. Como las funciones aplicadas son relativas, es decir, se calculan en porcentaje (%), se necesita emplear la información del valor económico de los activos afectados por la inundación. El mapa de daño absoluto se calcula como el producto del daño relativo (%) por el valor específico (costo/unidad de superficie) definido, y por la superficie de malla computacional (unidad de superficie).

3.9. *Doughnut Structure*

Fuente: Zhai, Fukuzono, & Ikeda (2005).

Los autores desarrollaron el modelo conceptual *doughnut structure* de daños por inundación a casas y contenido de las casas, y una base matemática para explorar los factores determinantes del daño. El modelo se obtuvo a partir del análisis de un evento post-inundación en Tokai, Japón. El modelo incorpora la distribución del daño causado por el evento y el efecto de las características del edificio y la preparación de los residentes. El modelo *doughnut structure* tiene tres conceptos fundamentales. El primero es la probabilidad de daños en el hogar (PDH), que es la probabilidad de que la residencia individual sea afectada en una crecida. El segundo es el valor del daño aplicado a un hogar, que es el valor monetario que los hogares pueden perder debido a una crecida. Si el valor de la pérdida se divide para el valor de la propiedad total (es decir, la relación de daños a una profundidad de inundación dada) se obtiene la función de daño. Por lo tanto, el modelo puede considerarse como una función de daño particular, o modelo de daño de micro-inundación. El tercer concepto es que el daño puede seguir una distribución logarítmica normal (lognormal).

El modelo *doughnut structure* indica el cambio en la proporción entre los hogares con y sin daños y el daño con la profundidad progresiva de la inundación, así como la distribución para cada profundidad. Se determinó que, cuanto más profunda es la inundación, menor es la proporción de hogares no afectados y mayor es el daño promedio. En otras palabras, a una profundidad dada, hay una región que indica la frecuencia de los hogares sin daños y otra región que indica los hogares que tienen daños. El modelo puede usarse para explorar las funciones de daño de inundación, como: la probabilidad de daño, la función de valor de daño y la función de fracción de daño.

3.10. *Nicholas - UK Domestic Properties*

Fuente: Nicholas, Holt, & Proverbs (2001).

Modelo conceptual para evaluar los daños causados por inundaciones en las propiedades domésticas del Reino Unido (UK por sus siglas en inglés). El modelo se origina a partir de una crítica del conocimiento existente en el campo y de las discusiones sostenidas con los encargados de examinar y de recomendar estrategias para la reparación de tales características. El modelo es específico para propiedades domésticas de Reino Unido, debido a que los métodos de construcción y materiales usados

en Reino Unido son distintos a los de otros países y además las propiedades domésticas tienen características diferentes a los comercios e industrias (p.e. tamaño físico, uso, contenido, etc.).

El modelo considera el complejo sistema para recuperar las condiciones habitables después de un evento de crecida. Esto incluye los procesos de reparación/reemplazo, secado de los edificios inundados, entre otros. El método incluye variables climáticas que influyen en gran medida en el proceso de secado, como: temperatura, velocidad del aire y humedad relativa.

La propuesta incorpora dos factores independientes: Daño por inundación = f (características de la inundación + características de las edificaciones). La pérdida se calcula en términos monetarios. La razón de las unidades monetarias permite realizar comparaciones entre pérdidas causadas a diferentes propiedades, ambos en términos de ubicación de la propiedad, tipo de propiedad (p.e. bungalow, adosada, compartida, etc.), la condición de reparación de la vivienda, y la influencia de varias características de la inundación. La estimación del daño como una variable dependiente también puede ser comparada a lo largo del tiempo, si se toma en cuenta la inflación.

Las características de la inundación son: la velocidad del flujo ($m\ s^{-1}$) en contacto con una vivienda en particular (a mayor velocidad mayor probabilidad de daño de la estructura), el contenido de contaminante en el flujo ($g\ m^{-3}$) (a mayor cantidad de contaminante y contenido residuos peligrosos, mayor el gasto de limpieza de las edificaciones antes que los trabajos de reparación puedan ser ejecutados) y el tiempo de duración del evento (horas, minutos) (cuanto más dure el flujo de inundación mayor cantidad de agua será absorbida por el edificio, entonces el proceso de secado será más demorado y costoso).

Las características de las edificaciones incorporadas son: la frecuencia con que la vivienda sufre inundación (número de veces en un periodo determinado), cuando más frecuente sea, tiende a ser menor el daño, ya que la edificación suele estar mejor adaptada para soportar las consecuencias de las inundaciones y los ocupantes están preparados generalmente para mover mobiliarios y guarniciones necesarias; los materiales de construcción del edificio (diferentes materiales absorben diferentes cantidades de fluido en un tiempo dado), de aquí surgen dos categorías: a) el material puede ser secado a su estado original y b) el material tiene que ser reemplazado económicamente. Por lo tanto, para el proceso de secado de los materiales es necesario considerar el método económico más apropiado y la condición del edificio previo al evento de inundación. A futuro los autores proponen desarrollar el modelo incorporando más categorías y clasificaciones.

3.11. Metodologías adicionales

Previamente se han descrito los métodos más destacados para el propósito de esta investigación. Debido a la gran cantidad de literatura de metodologías en esta temática, también se analizaron otras técnicas que se describen brevemente a continuación:

- KULTURisk (Giupponi *et al.*, 2014; Ronco, Gallina, Torresan, Zabeo, Semenzin *et al.*, 2014): La metodología KULTURisk considera los siguientes receptores: 1) Población, 2) Actividades económicas incluyendo: i) edificios, ii) infraestructuras, iii) agricultura, 3) Sistemas naturales y semi-naturales, y 4) Patrimonio cultural.
- INSYDE (Dottori, Figueiredo, Martina, Molinari, & Scorzini, 2016): En este trabajo, se presenta un nuevo modelo sintético de pérdidas por inundaciones basado en un análisis componente por componente del daño físico a los edificios.
- CAPRA (Cardona, Ordaz, Reinoso, Yamín, & Barbat, 2012): CAPRA es una herramienta para análisis probabilísticos físicamente basados para la gestión de riesgos. Considera diferentes componentes de desastres naturales incluyendo inundaciones. CAPRA produce informes sobre la situación de riesgo (pérdidas esperadas anuales, primas de riesgo, curvas de excedencia de pérdidas y pérdidas máximas probables) para propósitos de planificación espacial, evaluaciones de costo-beneficio o estudios de primas de seguros. CAPRA está integrado en varios programas para los diferentes componentes, los cuales se tienen acceso mediante su plataforma virtual www.ecapra.org.
- RAM (NRE, 2000): El método de evaluación rápida (RAM por sus siglas en inglés Rapid Appraisal Method), derivado de una estimación rápida de los daños producidos por las inundaciones a las empresas australianas, asigna un valor base de pérdida promedio a los

edificios individuales, independientemente del daño que pueda influir de las características de la crecida.

- Flood simulation scenarios and a GIS platform (Pistrika, 2010): Presenta una estimación basada en escenarios de simulación de inundaciones y una plataforma de SIG para daños directos a áreas urbanizadas y áreas agrícolas.
- Mathematical Model (Dutta, Herath, & Musiaka, 2003): El modelo de estimación de pérdidas se formula en base de relaciones de daño de escenario entre diferentes parámetros de inundación y características de uso del suelo. Los valores de los edificios residenciales son estimados como el producto del área de la unidad con el valor de la estructura por unidad de área y el valor del contenido por unidad de área, respectivamente.
- DAMAGE PROJECT: Desarrollado para las regiones del Mediterráneo occidental de Europa. Elaborado en el marco de cooperación internacional entre España, Francia, Grecia e Italia. (<http://www.uib.cat/secc6/lsig/webdamage/index.en.html>).
- Flood risk assessment and mapping for the Lebanese watersheds (Abdallah & Hdeib, 2016): El proyecto fue diseñado para Líbano, elaborando una metodología para evaluar los daños físicos directos tangibles causados por inundaciones. Mientras que los daños indirectos e intangibles están fuera del alcance del proyecto.
- Vulnerability of Building Types (Schwarz & Maiwald, 2008): El estudio presenta el desarrollo de un modelo de predicción de daños y pérdidas basado en un sistema de evaluación de ingeniería de edificios sometidos a diferentes amenazas naturales, aplicado al caso de inundaciones.
- ICPR (ICPR, 2001): Este modelo fue desarrollado para su aplicación en Alemania a nivel de meso-escala. El modelo evalúa los daños producidos para el sector comercial (pérdidas de edificaciones, contenidos e inventario). Se basa en el uso de funciones relativas de profundidad-daño en conjunto con los mapas de uso del suelo (CORINE Land Cover).
- National Flood Damage Evaluation Methods (Meyer & Messner, 2005): Una revisión de métodos aplicados a Inglaterra, Holanda, República Checa y Alemania.

4. DISCUSIÓN Y PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA

El análisis de 21 métodos de pérdida por inundaciones de esta revisión, reveló que éstos incorporan características altamente heterogéneas. Mientras la gran mayoría de ellos se basan en modelos deterministas, los métodos basados en modelos probabilísticos parecen estar recibiendo cada vez más atención. La mayoría de los modelos se basan, al menos en parte, en datos empíricos. Los modelos multi-variable están empezando a extenderse en la literatura. Típicamente consisten en una selección de funciones de pérdida uni-variable, diferenciadas por el uso del edificio, tipo, etc. Se tiene de forma equitativa modelos que usan funciones de daño relativas o absolutas. En general, la estimación de daño potencial en todos los métodos se realiza mediante relaciones entre la profundidad de la inundación y el daño por unidad de área, en combinación con información de tipo de uso del suelo del área inundada.

La mayoría de los modelos de revisión enfocan su aplicación al sector residencial; claramente hay menos modelos disponibles para otros sectores como la industria, agricultura y la infraestructura (p.e. carreteras). Un aspecto de especial relevancia es la falta de procesos de validación en la mayoría de modelos. Ciertamente, la validación siempre será post-evento, pero sigue siendo una herramienta que complementa la fiabilidad de cada modelo. La gran mayoría de modelos coinciden que su aplicación se desarrolla en un entorno SIG y comparten similitud en cuanto a los principales requerimientos de entrada (mapa de peligro de inundación y mapa de uso del suelo).

La revisión de métodos de pérdida por inundación que se presenta constituye un primer paso crítico en Latinoamérica para el desarrollo, calibración y adaptación de modelos dependiendo del objetivo de análisis (residencial, industrial, social, etc.) o el alcance (regional, local, etc.). La evaluación comparativa de modelos es una tarea difícil y compleja, ya que requiere una profunda revisión de las estructuras, los mecanismos y los supuestos subyacentes de cada uno. El enfoque más prometedor para lograr una comparación cuantitativa de modelos heterogéneos probablemente sea utilizar variables que

son comunes en los modelos. Este trabajo ha establecido las bases para comenzar este ejercicio de armonización, fundamental para la validación de modelos de pérdida de activos en un marco común. Uno de los objetivos de la revisión literaria de metodologías fue sintetizar toda la información para la propuesta de un método local, considerando las características comunes, ventajas, desventajas y limitaciones de los modelos previamente descritos.

La metodología propuesta ha sido desarrollada a partir del análisis, integración y simplificación de las metodologías expuestas anteriormente empleando análisis multi-criterio. Su aplicación está basada en sistemas de información geográfica (SIG). El enfoque del análisis multi-criterio está basado dentro del marco nacional de la disponibilidad de información o la factibilidad de levantamiento de información (p.e. modelado hidráulico, catastros urbanos, mapas de uso de suelo, información económica, etc.), aplicando el principio de austeridad económica de los recursos disponibles por parte de las unidades ejecutoras de la gestión del riesgo. La metodología propuesta será de fácil aplicación para gobiernos locales/municipales para la gestión del riesgo de inundación y se limita a un nivel local, es decir, no es viable la aplicación a nivel regional o nacional, debido a la divergencia y heterogeneidad de la información.

La metodología tiene un enfoque prioritario para Ecuador y con proyección para su posterior aplicación a casos de estudio en Latinoamérica. El modelo incorpora sistemáticamente todos los componentes tradicionales de cualquier metodología de análisis de riesgo de inundación (Figura 1).

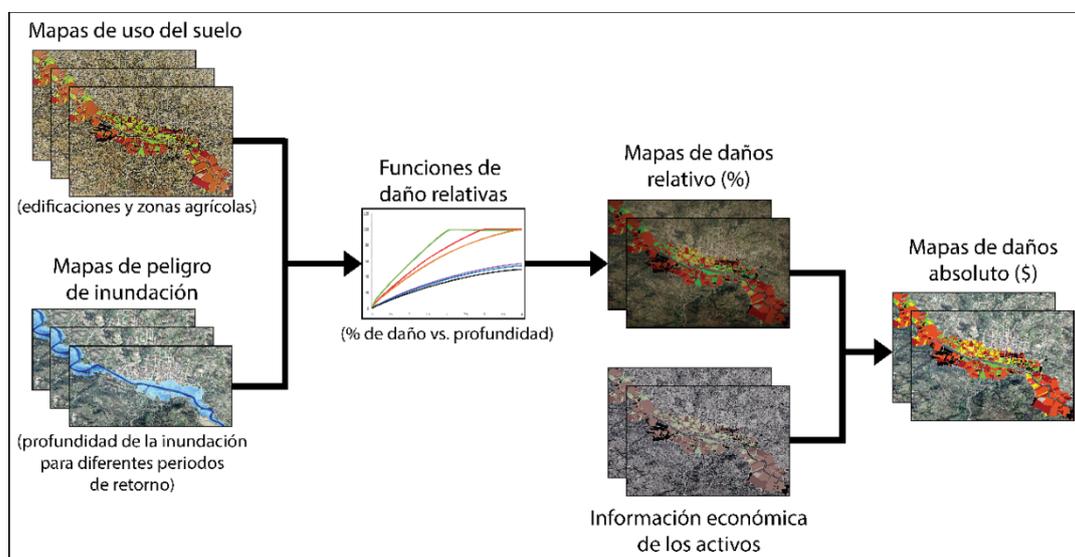


Figura 1. Esquema general de la metodología propuesta para evaluación del riesgo (daño) de inundación.

Como se describió anteriormente, el nivel información requerida por los modelos es un factor limitante debido a la generalmente baja resolución de información y a la escasa o inexistente disponibilidad de datos en nuestro país. Con este antecedente, se incorporó el menor número de requerimientos de entrada, sin comprometer una correcta estimación de la pérdida económica. La metodología hace una estimación económica a partir de daños directos causados a edificaciones y zonas agrícolas, empleando funciones de daño relativas. Las funciones fueron elaboradas en base a la relación profundidad-porcentaje de daño para diferentes tipos de clasificaciones correspondiente al uso de suelo. Estas funciones fueron derivadas a través de un análisis de regresión y una posterior adaptación técnica. Sobreponiendo los diferentes mapas de entrada, se determina el daño relativo y este se integra junto al mapa económico de los activos para obtener el daño absoluto, es decir, en términos económicos. La visualización de los resultados se desarrolla en un ambiente GIS, el cual nos provee una distribución espacial del daño esperado de los activos en las áreas inundadas para diferentes periodos de retorno.

5. CONCLUSIONES

Este estudio contribuye a mejorar la visión global de las metodologías existentes para la evaluación del riesgo por inundación, describiendo en síntesis sus ventajas, desventajas y limitaciones. Hasta la fecha no se ha descrito una metodología para la estimación de pérdidas económicas por desastres naturales en Latinoamérica, por esto, la incorporación de una metodología local es imprescindible. Se ha confirmado que a futuro existirá una mayor exposición a inundaciones fluviales en muchas regiones ecuatoriales (Hirabayashi, Mahendran, Koirala, Konoshima, Yamazaki *et al.*, 2013; Arnell & Gosling, 2016). La evaluación del riesgo de inundación, mediante la aplicación de los diferentes modelos, está sujeta a un amplio rango de incertidumbre. El nivel de incertidumbre aumenta al aplicar modelos internacionales que incorporan características ajenas al medio local. En muchos casos se pueden sobreestimar o subestimar considerablemente, ya que las condiciones, activos y metodologías varían entre países y consecuentemente entre modelos. El nivel y cantidad de información requerida por lo modelos internacionales (p.e. Hazus) está fuera del alcance en las diferentes localidades de los países Latinoamericanos, y realizar un levantamiento de la información requerida sería poco viable técnica y económicamente. Se concluye que existen grandes limitaciones (p.e. recursos, información) para desarrollar metodologías complejas que integren varios componentes de análisis a nivel general en Latinoamérica y específicamente en Ecuador.

A partir de la exhaustiva revisión bibliográfica, se introduce una propuesta para estimar el riesgo inundaciones mediante una descripción metodológica. El modelo limita los requerimientos de información de entrada y se describe como un procedimiento de evaluación rápida ante eventos de crecida. Las principales ventajas del modelo son: el bajo requerimiento de información de entrada (la información generalmente se encuentra disponible en los municipios), baja inversión económica, fácil implementación (no se requiere capacitación muy especializada), y estimación efectiva de los activos en riesgos para eventos pre-inundación o post-inundación. Su aplicación ayudará a la toma de decisiones en cuanto a planes de gestión de riesgos a nivel local.

Se debe considerar que el detalle de la estimación de los activos depende en gran medida del tamaño del área de estudio, de los datos de entrada disponibles y de la precisión requerida para la evaluación del riesgo. Esta introducción metodológica es una primera aproximación enfocada en la valoración de pérdida económica por inundaciones (sin considerar el aspecto social y ambiental). A futuro, es indispensable una metodología desarrollada a detalle y su validación a un caso de estudio real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca a través del proyecto “Evaluación del riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara”. También agradecemos a la SENAGUA - Demarcación Hidrográfica del Santiago y al Municipio de Gualaceo.

REFERENCIAS

- Abdallah, C., Hdeib, R. (2016). *Flood risk assessment and mapping for the Lebanese watersheds*. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria, Vol. 18, p. 9588.
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyse-how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79-98, doi:10.1007/s11069-008-9277-8
- Aragón-Durand, F. (2014). *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina*. Soluciones Prácticas, Lima, Perú. Available at <http://www.solucionespracticas.org.pe/>.
- Arnell, N. W., Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401, doi:10.1007/s10584-014-1084-5

- Balica, S. F., Popescu, I., Beevers, L., Wright, N. G. (2013). Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: a comparison. *Environmental modelling & software*, 41, 84-92, doi:10.1016/j.envsoft.2012.11.002
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M. V., Cadena-Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 201-218.
- Cardona, O. D., Ordaz, M., Reinoso, E., Yamín, L. E., Barbat, A. (2012). *CAPRA-comprehensive approach to probabilistic risk assessment: international initiative for risk management effectiveness*. In: Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- de Moel, H., Aerts, J. (2011). Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards*, 58(1), 407-425, doi:10.1007/s11069-010-9675-6
- Dottori, F., Figueiredo, R., Martina, M. L., Molinari, D., Scorzini, A. R. (2016). INSYDE: a synthetic, probabilistic flood damage model based on explicit cost analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2577-2591, doi:10.5194/nhess-16-2577-2016
- Dutta, D., Herath, S., Musiak, K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, 277(1), 24-49, doi:10.1016/S0022-1694(03)00084-2
- Environmental Agency. (2014). *Framework and tools for local flood risk assessment*. Project report, Project Number: SC070059, 60 pp.
- Ernst, J., Dewals, B., Archambeau, P., Detrembleur, S., Erpicum, S., Piroton, M. (2008). *Integration of accurate 2D inundation modelling, vector land use database and economic damage evaluation*. In: Proceedings of the European Conference on Flood Risk Management - FloodRisk 2008, Rotterdam, Netherlands, pp. 1643-1653.
- Gerl, T., Kreibich, H., Franco, G., Marechal, D., Schröter, K. (2016). A review of flood loss models as basis for harmonization and benchmarking. *PloS one*, 11(7), e0159791, doi:10.1371/journal.pone.0159791
- Giupponi, C., Mojtahed, V., Gain, A. K., Biscaro, C., Balbi, S. (2014). *Integrated risk assessment of water related disasters*. In: Paron, P. and Di Baldassarre, G., Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, pp. 163-200.
- Glas, H., Jonckheere, M., Mandal, A., James-Williamson, S., de Maeyer, P., Deruyter, G. (2017). A GIS-based tool for flood damage assessment and delineation of a methodology for future risk assessment: case study for Annotto Bay, Jamaica. *Natural Hazards*, 88, 1867-1891, doi:10.1007/s11069-017-2920-5
- Güneralp, B., Güneralp, İ., Liu, Y. (2015). Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, 31, 217-225, doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.002
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821, doi:10.1038/nclimate1911
- ICPR (International Commission for the Protection of the Rhine). (2001). *Rhine-Atlas*. ICPR, Koblenz. Available at www.iksr.org
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J., Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(12), 3733-3752, doi:10.5194/nhess-12-3733-2012
- Keating, A., Campbell, K., Mechler, R., Michel-Kerjan, E., Mochizuki, J., Kunreuther, H., Bayer, J., Hanger, S., McCallum, I., See, L., Williges, K., Atreya, A., Botzen, W., Collier, B., Czajkowski, J., Hochrainer, S., Egan, C. (2014). *Operationalizing resilience against natural disaster risk: Opportunities, barriers and a way forward*. Zurich Flood Resilience Alliance.

- Kitchenham, B., Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*. EBSE Technical report (Version 2.3). Keele University and University of Durham, United Kingdom.
- Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B., Thielen, A. H. (2010). Development of FLEMOcs—a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Sciences Journal* 55(8):1302-1314, doi:10.1080/02626667.2010.529815
- Kron, W. (2005). Flood risk= hazard• values• vulnerability. *Water International* 30(1): 58-68, doi:10.1080/02508060508691837
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724, doi:10.5194/nhess-10-1697-2010
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., van der Veen, A. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODsite Report Number T09-06-01, Delft University of Technology, Netherlands.
- Meyer, V., Messner, F. (2005). *National flood damage evaluation methods: A review of applied methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany*. Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Germany.
- Meyer, V., Scheuer, S., Haase, D. (2009). A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural hazards*, 48(1), 17-39, doi:10.1007/s11069-008-9244-4
- Multi-hazard Loss Estimation Methodology Flood Model* (en línea). Hazus-MH Technical Manual, Washington, United States. Retrieved from: https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-8292/hzmmh2_1_fl_tm.pdf
- Nicholas, J., Holt, G. D., Proverbs, D. G. (2001). Towards standardising the assessment of flood damaged properties in the UK. *Structural Survey*, 19(4), 163-172, doi:10.1108/02630800110406667
- NRE (Victorian Department of Natural Resources and Environment, Victoria). (2000). *Rapid Appraisal Method (RAM) for floodplain management*. Report prepared by Read Sturgess and Associates, Melbourne, Australia.
- Osses, S., Sánchez, I., Ibáñez, F. M. (2006). Investigación cualitativa en educación: hacia la generación de teoría a través del proceso analítico. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, 32(1), 119-133.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1149-1159.
- Penning-Rowsell, E., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., Chatterton, J., Owen, D. (2017). *Flood and coastal erosion risk management - Handbook and data for economic appraisal*. Middlesex University. London, United Kingdom.
- Pistrika, A. (2010). Flood damage estimation based on flood simulation scenarios and a GIS platform. *European Water*, 30, 3-11.
- Posthumus, H., Morris, J., Hess, T. M., Neville, D., Phillips, E., Baylis, A. (2009). Impacts of the summer 2007 floods on agriculture in England. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 182-189, doi:10.1111/j.1753-318X.2009.01031.x
- Ronco, P., Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Semenzin, E., Critto, A., Marcomini, A. (2014). The KULTURisk Regional Risk Assessment methodology for water-related natural hazards-Part 1: Physical-environmental assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5399-5414, doi:10.5194/hess-18-5399-2014
- Samuels, P., Gouldby, B. (2009). *Language of risk - Project definitions* (2 ed.). Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies. FLOODsite, 55 pp.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., Lawrence, M. (2006). HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II.

- Damage and loss assessment. *Natural Hazards Review*, 7(2), 72-81, doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7:2(72)
- Schwarz, J., Maiwald, H. (2008). *Damage and loss prediction model based on the vulnerability of building types*. In: 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Toronto, Canada, pp. 6-8.
- Scorzini, A. R., Frank, E. (2015). Flood damage curves: new insights from the 2010 flood in Veneto, Italy. *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 381-392, doi:10.1111/jfr3.12163
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y., Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports*, 6, 36021, doi:10.1038/srep36021
- Thieken, A. H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., Merz, B. (2008). Development and evaluation of FLEMOPs-a new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 118, 315-324, doi:10.2495/FRIAR080301
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2013). *Flood risk management*. IWR Report 2013-R-05. USA.
- Vojtek, M., Vojteková, J. (2016). Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1973-1992, doi:10.1080/19475705.2016.1166874
- Vozinaki, A. E., Karatzas, G. P., Sibetheros, I. A., Varouchakis, E. A. (2015). An agricultural flash flood loss estimation methodology: the case study of the Koiliaris basin (Greece), February 2003 flood. *Natural Hazards*, 79(2), 899-920, doi:10.1007/s11069-015-1882-8
- Xiaosheng, L., Jieyun, Z. (2013). Flood loss evaluation based on spatial information grid of socio-economic data. *Journal of Applied Sciences*, 13, 4550-4554, doi:10.3923/jas.2013.4550.4554
- Zhai, G., Fukuzono, T., Ikeda, S. (2005). Modeling flood damage: case of Tokai Flood 2000. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(1), 77-92, doi:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03719.x
- Zwenzner, H., Voigt, S. (2009). Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 567-576, doi:10.5194/hess-13-567-2009