

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS DIRECTAS PROVOCADAS POR INUNDACIÓN. APLICACIÓN DE LAS CURVAS INUNDACIÓN-DAÑOS EN PAÍSES EN DESARROLLO

Angel Ivan Ceballos Bernal

Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México
ivanceballosbernal@gmail.com

José Emilio Baró Suárez

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México
barosuarez@hotmail.com

Carlos Díaz-Delgado

Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México
cdiazd@uaemex.mx

RESUMEN

Las inundaciones son los desastres causados por fenómenos naturales que más daños provocan a diferentes sectores, como son los de la vivienda, comercial, agrícola, turístico e industrial. Este último es un sector que sufre importantes daños, pero que no ha sido estudiado ya que se le consideraba como poco vulnerable y con capacidad de adaptación ante desastres naturales. La implementación de una metodología para calcular los daños directos tangibles en función de la altura de lámina de agua alcanzada vs daños económicos, permite tener estimaciones de las pérdidas económicas causadas por inundaciones. Este trabajo muestra el estado del arte e identifica las investigaciones referentes al cálculo de daños provocados por inundación y su aplicación en países en desarrollo como lo es México.

Palabras clave: inundación; desastres naturales; riesgo por inundación; daños por inundación.

ABSTRACT

Estimate of direct economic losses caused by floods. Application of flood-damage curves in developing countries

Floods are disasters caused by natural phenomena that cause massive damage in different sectors, such as the housing, commercial, agriculture, tourism and industrial sectors. The industrial sector has been considerably affected, but it has not been studied since it was not considered to be very vulnerable owing to its economic characteristics and resilience to disasters, so little is known about the economic damage caused by flooding in industrial areas. The implementation of a methodology for calculating direct tangible damage depending on the high water vs economic damage allows us to estimate the economic damage caused by flooding. Thereby, this work shows the state of the art and identifies research concerning the calculation of flood damage and its application in developing countries such as Mexico.

Key words: Flood; natural hazard; risk of flood; flood damage; assessment of damage due to natural hazard.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son uno de los fenómenos meteorológicos de mayores impactos en la sociedad por sus características en cuanto a la dimensión espacial y temporal del fenómeno. Este riesgo natural origina

un tercio del total las catástrofes naturales que se producen alrededor del mundo en cuanto a pérdidas económicas, y son la causa de al menos más de la mitad de las víctimas humanas (Lopardo y Seoane, 2000).

Cuando se produce un evento extremo de inundación se plantea, especialmente por las autoridades, la necesidad de conocer los daños tanto de atención como de reparación (Francisco y Fernando, 2003). Dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia, así como el grado de vulnerabilidad de una sociedad o ecosistema, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos (Magaña, Méndez, Morales y Millán, 2004). Las medidas que tradicionalmente se han adoptado para mitigar los daños han sido principalmente de tipo estructural, lo que implica importantes costos económicos, que no han sido confrontados en el marco de un análisis costo-beneficio. Ello es debido, como indican Baró, Díaz-Delgado, Esteller y Calderón, (2007) para el caso de México, a que no se cuenta con una metodología adaptada a este tipo de análisis que permita la estimación de daños económicos potenciales provocados por inundación, especialmente en países en vías de desarrollo.

2. ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO PARA EL CÁLCULO DE DAÑOS POR INUNDACIONES. ESTADO DEL ARTE

Para entender el origen de los desastres naturales, de acuerdo con Magaña, *et al.*, (2004), se debe tener en cuenta el factor riesgo como una combinación de la amenaza y de la vulnerabilidad, donde la amenaza conforme al Centro de Estudios para América Latina y el Caribe [CEPAL], (2005) está constituida por el fenómeno peligroso, y éste cuenta con una magnitud y duración de una fuerza o energía que representa un peligro potencial. Por otro lado, la vulnerabilidad que es, en pocas palabras, la incapacidad del socio-ecosistema para absorber los efectos de un determinado cambio en el medio ambiente (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002). Los desastres, entendidos en un sentido amplio como procesos o eventos con resultados o efectos de connotación negativa que, sobre cierto umbral económico-social y/o de percepción, afectan parte o la totalidad del medio ambiente natural o del construido y su funcionalidad (Francisco y Fernando, 2003).

Se ha observado un incremento global considerando el número de inundaciones durante los últimos 20 años dentro del contexto del calentamiento térmico planetario. Los recientes informes dados a conocer del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC) por sus siglas en inglés, confirman que el riesgo de inundaciones se incrementará en frecuencia e intensidad causados por eventos de precipitación, sumando factores que incrementan el riesgo e impacto de las inundaciones tales como el crecimiento de asentamientos humanos, modificación del cauce de ríos y cambio de usos del suelo (Coninx y Bachus, 2007). Las pérdidas económicas por desastres naturales en el 2014 de acuerdo con el Annual Global Climate and Catastrophe Report, fueron encabezadas por inundaciones, ciclones tropicales y tormentas que representan el 72% de las pérdidas globales. Siendo las inundaciones que ocurrieron en la región de Kashmir en septiembre de ese año las que provocaron más daños, con unas cifras superiores a los 18 mil millones de dólares en la India y Pakistán. En mayo del mismo año, se registraron lluvias que dejaron inundaciones importantes a lo largo de los Balcanes en sureste de Europa. Así como inundaciones ocurridas en el Reino Unido, China y Estados Unidos (Annual Global Climate and Catastrophe Report, 2014).

En el año 2013 las inundaciones que causaron más daños económicos se presentaron en Alemania con pérdidas económicas de 16.5 mil millones de dólares, seguidas por Canadá con 4.7 mil millones de dólares (Swiss Re, 2014).

Considerando estos antecedentes se han realizado diversos estudios los cuales la mayor parte corresponden a los países desarrollados y se refieren, sobre todo, al tema de adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático, como son los trabajos de (Georgas y Perissoratis, 1992; Kashiwagi, 1994; Lindh, 1992).

Al hablar de un desastre por inundación en una sociedad, se espera que se deriven una gama de consecuencias, como lo son daños económicos, sociales, políticos, psicológicos, ecológicos y ambientales, por lo que es importante definir una clasificación de los daños provocados por inundación, como lo siguieron autores como (Jonkman, 2007; Nascimento, Machado, Baptista, De Paula y Silva, 2007; Parker, Green y Thompson, 1987; Smith y Greenaway, 1994), quienes clasifican los daños por inundación en daños tangibles y daños intangibles, que pueden ser directos e indirectos. Esta clasificación se divide por

sectores que pueden ser de viviendas, comercio y servicios, industrial, equipamiento público y servicios, infraestructura, patrimonio y el sector cultural e histórico.

De acuerdo con (Messner y Meyer, 2005; Merz, Kreibich, Schwarze y Thieken, 2010) la valoración de los daños por inundación puede clasificarse en diferentes escalas espaciales:

- *Micro-escala*, donde la valoración de los daños está basada en elementos individuales que representan un riesgo. Por ejemplo, con el fin de estimar el daño a una comunidad en caso de un determinado escenario de inundación, los daños pueden calcularse por cada elemento afectado (edificios, infraestructura, etc.).
- *Meso-escala*, donde la valoración de los daños se basa en datos espaciales. Las unidades espaciales de datos más usadas son las unidades de uso de suelo, por ejemplo, para áreas residenciales o zonas industriales.
- Y *macro-escala*; en este caso, el cálculo de los potenciales daños se lleva a cabo para una cobertura espacial a nivel de los municipios. Las principales fuentes de datos para esta evaluación son las estadísticas oficiales.

Según Rose (2004), el costo de daños directos se puede cuantificar con mayor facilidad que los costos indirectos ya que los efectos de la inundación consideran variables de tiempo que pueden ir desde meses a años. Los daños intangibles directos e indirectos de acuerdo con Nascimento, *et al.*, (2007) comprenden un alto grado de complejidad para poder cuantificarlos económicamente, ya que considera factores como la pérdida de vidas humanas, estrés psicológico, estados de ansiedad, daños a la salud a largo plazo, interrupción de servicios, entre otros.

3. APLICACIÓN DE LAS CURVAS DE DAÑOS VS ALTURA DE AGUA ALCANZADO

La aplicación de las curvas de daños como una función del tirante de agua máximo alcanzado por una inundación es un método utilizado normalmente en países desarrollados pero en países en vías de desarrollo está aún en desarrollo. De acuerdo con Booyesen, Viljoen y De Villiers, (1999), la mejor forma de calcular los daños por inundación es con el uso de las curvas de inundación-daños. Con las que es posible desarrollar una función estándar de inundación-daños para algunos usos de suelo.

Nascimento, *et al.*, (2007) en su estudio de daños causados por inundación en Brasil, propusieron una clasificación bastante detallada de los daños para cada sector (vivienda, comercios y servicios, industrial, equipamiento público y servicios, infraestructura y patrimonio cultural e histórico), dividiendo los daños en daños tangibles y daños intangibles, cada uno subdividido en daños directos y daños indirectos para cada uno de los sectores.

En México, Díaz-Delgado y Vega (2001) efectuaron un análisis de las inundaciones en la subcuenca del río Tezapala, donde determinan las zonas de inundación identificadas por la información de la elevación de los niveles máximos de agua obtenidos de los perfiles calculados con el programa HEC-RAS (Vega, 1999).

Baró, *et al.*, (2007) aplican las curvas de daños para calcular los daños provocados por inundaciones en zonas habitacionales tomando como zona de estudio el curso alto del río Lerma. Posteriormente, Baró, Díaz-Delgado, Esteller, Calderón y Cadena (2011) reformularon en su investigación el conjunto de curvas que constituyen un método de evaluación directa de daños provocados por inundación en zonas habitacionales y que fueron diseñados para la República Mexicana. Este desarrollo incluye la formulación de curvas del costo más probable por tipo de vivienda y características socioeconómicas asociadas. La formulación probabilística del costo más probable se logró con el empleo de una función de distribución tipo Beta y la clasificación de tipos de viviendas por características socioeconómicas se hizo en función del índice de marginación (IM) para mayores detalles sobre esta metodología consultar el trabajo de Baró *et al.*, (2012).

Sin embargo, cabe señalar que el IM es una medida-resumen propuesta y publicada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO, México) que permite diferenciar Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) del país según el impacto global de las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación, a los servicios de salud, la residencia en viviendas inadecuadas y la carencia de bienes. El IM está construido con base en la información del Censo 2010 bajo cuatro dimensiones (Educación, Salud, Vivienda y Bienes) y consta de diez indicadores (3 de educación, 2 de salud, 5 de

vivienda y 1 de bienes) con el cual es posible medir el grado en que determinados grupos de población tienen limitaciones para cubrir sus necesidades básicas, como consecuencia de no tener acceso a la educación, los servicios médicos, a una vivienda en condiciones dignas y a bienes de tipo electrodoméstico. El IM ha sido obtenido por el CONAPO bajo el empleo de técnicas estadísticas de componentes principales y una estratificación óptima de tipo Dalenius y Hodges con lo cual se obtuvieron cinco grados del índice (la escala refleja un poder adquisitivo descendente): muy bajo; bajo; medio; alto; y muy alto. Por otro lado, las AGEB's están constituidas por un conjunto de manzanas urbanas delimitadas perfectamente por calles, avenidas o andadores, y por el uso de suelo que puede ser habitacional, industrial, de servicios o comercial. Las AGEB's son, en México, las unidades geográficas con mayor detalle de información económica, social y cultural. El método fue validado y aplicado en una de las cuencas más importantes del centro de México, es decir la cuenca Lerma-Chapala.

Esta propuesta de curvas también fue utilizada por Díaz-Delgado, Baró, Bedolla y Díaz Espíritu, (2011) para estimar el costo de los daños provocados por inundaciones en zonas habitacionales en la colonia del Valle de Chalco Solidaridad en el Estado de México, (México), causados por una ruptura en el borde del canal La Compañía, validando de esta forma la propuesta de curvas propuesta por Baró y colaboradores.

Para complementar estas investigaciones, Gómez-Albores, Díaz-Delgado, Baró, Esteller, Sánchez y Fabela, (2011) desarrollaron un módulo geomático en un SIG para evaluar el costo de las inundaciones, utilizando como información de salida del módulo los resultados obtenidos del proyecto "costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México" (Baro, *et al.*, 2011), este módulo geomático resulta útil para la solicitud de apoyos del FONDEN (Fondo de Desastre Naturales), así como otros recursos orientados a la prevención, mitigación, recuperación y reconstrucción de áreas afectadas.

Por otro lado, Vázquez (2013) construyó un modelo que permite cuantificar los daños provocados por una inundación en zonas comerciales, la cual se aplicó en las zonas inundables de la cuenca alta del río Lerma en el Estado de México, estimando los daños económicos para la temporalidad 2009-2011.

Por su parte, Booyesen, *et al.*, (1999) hacen uso también de curvas de daños para calcular tanto las de carácter tangibles como intangibles provocados por inundaciones en zonas industriales, y aplica estas curvas en Verreniging, Sudáfrica como respuesta a la estimación de costes provocados por las inundaciones que se presentaron a finales de 1995 y principios de 1996 y que causaron grandes impactos a la sociedad y en zonas industriales. En esta investigación se incluye la identificación de las industrias que están expuestas al riesgo de inundación utilizando la herramienta de cartografía hidrológica para determinar cuáles industrias están situadas en un área inundable así como la profundidad máxima de la lámina del agua. En este sentido se enfatiza que no es posible desarrollar una función estándar de curvas de daños-altura de lámina de agua para las industrias. La mejor opción es completar cuestionarios para cada una de las industrias afectadas por la inundación para calcular los daños económicos correspondientes.

Por todo ello Salzano y Cozzani (2012) proponen que el procedimiento convencional para la evaluación cuantitativa de riesgos de instalaciones industriales o áreas industriales, así como la planeación del uso del suelo en relación con los principales peligros deberían incluir escenarios de accidentes o desastres generados por factores externos de riesgos. Olsen, Belgin, Lambert y Haimés, (1998) proponen que la evaluación económica de los daños por inundaciones debe ser realizada por regiones más que por áreas individuales de inundación, ya que las actividades económicas de una llanura de inundación dada están conectadas con las actividades que se llevan a cabo en otra llanura de inundación y con áreas no afectadas por la inundación.

De acuerdo con Penning-Rowsell y Catterton (1997) hay dos métodos básicos para el cálculo de daños en industrias por inundación. El primer método consiste en proyectar el daño de inundaciones históricas para obtener la profundidad estándar vs daños económicos. El problema con este primer método es que no siempre existe esta información histórica o simplemente no está disponible.

El segundo método consiste en hacer uso del conocimiento que los gerentes de las industrias tienen sobre como las empresas han sido afectadas por inundaciones (Smit and Greenaway, 1994). La principal desventaja de este método es que los daños son estimados sin la ocurrencia de una inundación, y que la información es por lo tanto de una naturaleza hipotética.

Complementariamente, el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se ha vuelto un soporte para la modelación de aguas superficiales y en el análisis de daños por inundaciones (Baró, 2010). Los SIG unidos a modelos de simulación hidrológica-hidráulica, se utilizan para el almacenamiento de datos,

el cálculo de parámetros de entrada, el tratamiento de datos y el proceso de los datos de salida. Así que la aplicación de los SIG se ha vuelto un factor importante para evaluar los impactos de los daños producidos por inundaciones. Algunos ejemplos son los trabajos de (Boyle, Tsanis y Kanaroglou, 1998; Brimicombe y Bartlett, 1996; Merz, Kreibich, Thieken y Schmidtke, 2004; Renyi y Nan, 2002) en los cuales se utiliza un modelo de elevación digital de la superficie del suelo y otro de la superficie de la lámina del agua generada por la inundación que permiten calcular la extensión y la profundidad de la inundación.

Cabe igualmente resaltar que la CEPAL ha propuesto una metodología para valorar los daños económicos por desastres naturales para los sectores de vivienda, salud, energía, agua potable y saneamiento, transporte y comunicaciones, industria y comercio y daños en el medio ambiente, en su manual "*Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres, Tomo I, II, III Y IV*", con el fin de determinar los daños ambientales, en los sistemas de zonas de vida (CEPAL, 2003).

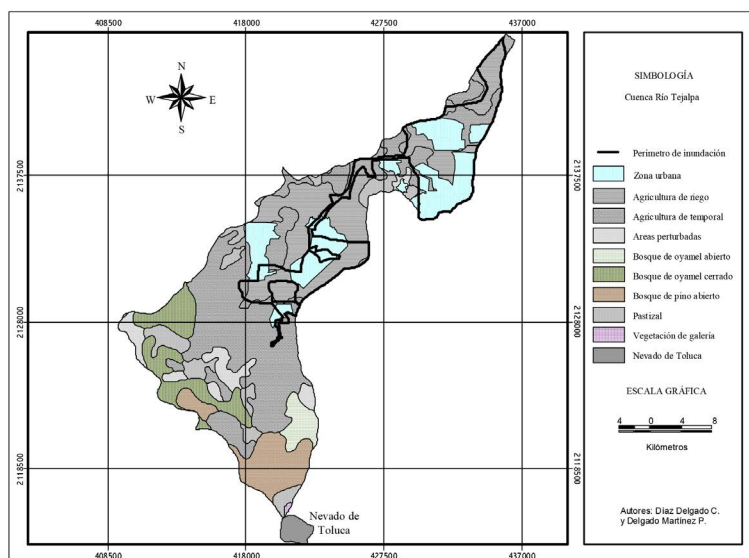
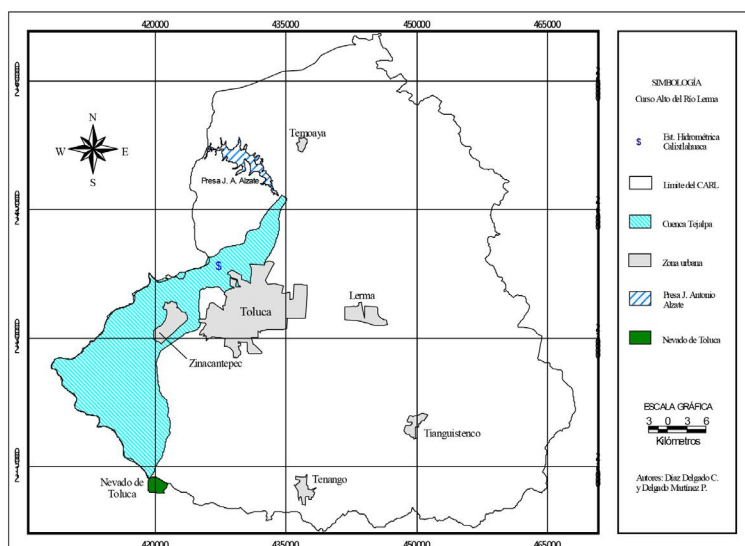
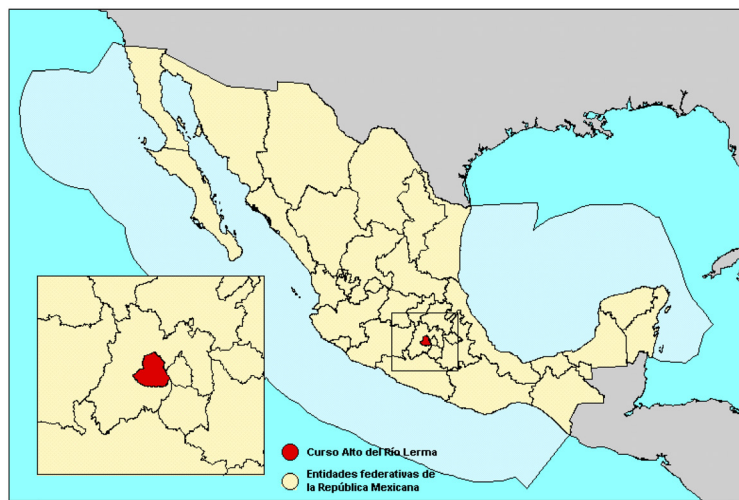
Por lo anterior, es observable que la valoración de daños ha ganado más importancia dentro del contexto de la toma de decisiones en la gestión del riesgo de inundación. De acuerdo con Merz, *et al.*, (2010) la valoración de daños por inundación es importante para:

- *Evaluar de la vulnerabilidad del socio-ecosistema ante inundaciones.* Los elementos bajo riesgo en las áreas propensas a inundación varían en su vulnerabilidad de acuerdo con su ubicación en la zona inundable. El conocimiento acerca de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo es necesario para detectar las medidas de reducción de riesgo apropiadas, por ejemplo, el desarrollar un plan de emergencia e implementar simulacros de emergencia.
- *Construir mapas de riesgo por inundación.* Los mapas de riesgo por inundación son un elemento esencial para la gestión de riesgo y tareas de comunicación.
- *Optimar decisiones en las medidas de mitigación de inundaciones.* La seguridad ante inundaciones requiere de grandes inversiones. Por lo tanto se debe asegurar que estas inversiones sean bien utilizadas social y ambientalmente. Esto implica que el riesgo de inundación actual debe ser estimado, las opciones de reducción de riesgo deben ser determinadas y los beneficios y costos asociados de diferentes opciones deben de ser cuantificadas y comparadas.
- *Analizar y comparar propuestas orientadas a la reducción de riesgos.* En un contexto más amplio, la reducción de riesgo por inundación es competencia de varias áreas administrativas que se ocupan de la reducción de riesgos. Por ejemplo, un municipio puede estar propenso a diferentes riesgos naturales. La comparación cuantitativa de los diferentes riesgos dentro de una comunidad o una región, como son riesgos por inundación, tormentas de viento o terremotos.
- *Valorar impactos financieros en el sector de re-aseguros.* Para el cálculo de la prima de seguros y para garantizar la solvencia, tienen que ser calculados los daños económicos esperados y la pérdida máxima probable de la cartera de las aseguradoras.
- *Evaluar opciones financieras durante y después de las inundaciones.* En el caso de los eventos de inundación, los gobiernos necesitan evaluar los daños por inundación, con el fin de tomar las decisiones presupuestarias acerca de las indemnizaciones por los daños causados.

4. APLICACIÓN DE MÉTODO DE EVALUACIÓN DE DAÑOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TEJALPA, UBICADA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA, MÉXICO

Un caso de estudio exitoso en un país en vías de desarrollo y en específico en México, es el de Baró, Díaz-Delgado, Calderón, Esteller, Cadena y Franco, (2012), quienes desarrollaron y aplicaron una metodología para cuantificar los daños potenciales tangibles provocados por inundaciones en zonas habitacionales y zonas agrícolas en la subcuenca del río Tejalpa ubicada en el curso alto del río Lerma (México). Así mediante el uso de curvas altura de inundación-daños para el caso de zonas urbanizadas y de curvas de duración de la inundación-daños para el caso de zonas agrícolas se estimaron los costos potenciales para caudales con diferentes periodos de retorno. La metodología empleada es utilizable para toda la República Mexicana ya que toma como base un conjunto de datos disponibles con cobertura nacional y de fácil acceso a través de dependencias federales, estatales y municipales.

Mapa 1, 2 y 3. Localización Subcuenca del Río Tejalpa



Fuente: Sistema de Información Geográfica, Curso Alto del Río Lerma (modificado de Díaz Delgado y Vega, 2001).

Para este estudio los daños potenciales tangibles se dividieron en directos e indirectos para cada uno de los sectores, siendo los primeros, los que se producen por contacto con el agua o su inmersión, y los indirectos son aquellos causados por la interrupción del tráfico, pérdidas de salarios y beneficios en los negocios, etcétera (James y Lee, 1971).

En el caso de las zonas urbanizadas toma en cuenta el índice de marginación (IM) y los bienes contenidos en las viviendas que han sido clasificadas en una base de datos por áreas geoestadísticas básicas (AGEB's), obteniendo un total de 183 Unidades Geográficas (UG): dentro de las cuales se contabilizaron 125 AGEB's con un IM muy alto, 126 con IM alto, 106 con IM medio, 65 con IM bajo y 29 con IM muy bajo.

Para la obtención de este índice de marginación se partió de la información obtenida del SCINCE (Sistema de Consulta de Información Censal), considerando los resultados del segundo conteo de población y vivienda efectuado en el 2005 y el informe sobre el índice de marginación urbana 2005 de la CONAPO (Comisión Nacional de Población).

Los indicadores socioeconómicos empleados en la CONAPO (2002, 2007) son:

- Grado de instrucción de la población
- Porcentaje de población de 15 y más analfabeta
- Porcentaje de la población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
- Porcentaje de la población de 15 años y más sin instrucción
- Promedio de ocupantes por cuarto en viviendas particulares
- Viviendas particulares habitadas
- Con piso de tierra
- Sin agua entubada
- Sin drenaje
- Sin energía eléctrica
- Población ocupada en el sector primario.

Estos indicadores definen el índice de marginación de la población que comprende los grados: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

El cálculo del índice de marginación con los intervalos para su clasificación según los indicadores mencionados anteriormente fue realizado por la *Metodología de Estimación del Índice de Marginación 2005* de la CONAPO.

En esta metodología presenta la estimación del índice de marginación urbana 2005. En la primera sección se describen los criterios de delimitación del número de AGEB para el cálculo del índice de marginación urbana. En la segunda se revisan los conceptos y variables censales involucrados en la construcción de los once indicadores considerados y se describe el cálculo de cada uno de ellos. En la tercera se presenta la estimación del índice de marginación mediante el método de componentes principales y se muestran los resultados estadísticos que califican al índice como una medida capaz de diferenciar las AGEB urbanas según el impacto global de las carencias que padece la población. Por último, en la cuarta sección, se describe la técnica utilizada para estratificar al índice de marginación urbana en cinco grupos.

Con esta información y con la obtenida en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), se elaboró una base de datos en función del IM, el número de identificación de la AGEB, número de viviendas habitadas, y de bienes existentes, concretamente, radios, radiograbadoras, televisiones, videos, licuadoras, refrigeradores, lavadoras, teléfonos, calentadores, automóviles y computadoras, mobiliario de cocina, comedor, sala y recámara, ropa y calzado y se obtuvo una familia de curvas de daños tangibles potenciales provocados por inundación que muestran el costo máximo, mínimo y más probable para una altura de lámina de agua alcanzada en una vivienda (Tabla 1).

En la tabla 2 se muestran los daños en salarios mínimos (SM) para cada una de las AGEB afectadas en la zona de estudio para un periodo de retorno de 10, 20, 50 y 100 años según el tránsito de caudales efectuado por Díaz-Delgado y Vega (2001). A manera de ejemplo, los daños para un periodo de retorno de 10 años oscilan entre 5,279,766 SM como costo mínimo, 5,995,270 SM como costo máximo y 5,890,480 SM como costo más probable.

Tabla 1. Modelos matemáticos de daños tangibles directos en zona habitacional ocasionados por inundación

Índice de marginación	Modelo matemático (costo en no. salarios mínimos)
Muy alto	$DDH_{max} = 247.63 \text{ Ln}(h) + 668.44$ $DDH_{min} = 141.36 \text{ Ln}(h) + 382.45$ $DDH_{mp} = 156.92 \text{ Ln}(h) + 424.33$
Alto	$DDH_{max} = 289.63 \text{ Ln}(h) + 801.56$ $DDH_{min} = 228.58 \text{ Ln}(h) + 637.93$ $DDH_{mp} = 280.51 \text{ Ln}(h) + 777.60$
Medio (1 planta)	$DDH_{max} = 709.63 \text{ Ln}(h) + 1976.04$ $DDH_{min} = 544.93 \text{ Ln}(h) + 1546.60$ $DDH_{mp} = 685.51 \text{ Ln}(h) + 1913.15$
Medio (2 plantas)	$DDH_{max} = 549.55 \text{ Ln}(h) + 1345.57$ $DDH_{min} = 405.03 \text{ Ln}(h) + 965.27$ $DDH_{mp} = 528.39 \text{ Ln}(h) + 1289.88$
Bajo (1 planta)	$DDH_{max} = 877.28 \text{ Ln}(h) + 2479.23$ $DDH_{min} = 797.24 \text{ Ln}(h) + 2233.19$ $DDH_{mp} = 865.56 \text{ Ln}(h) + 2443.20$
Bajo (2 plantas)	$DDH_{max} = 666.15 \text{ Ln}(h) + 1632.94$ $DDH_{min} = 595.33 \text{ Ln}(h) + 1409.03$ $DDH_{mp} = 605.70 \text{ Ln}(h) + 1441.82$
Muy bajo (1 planta)	$DDH_{max} = 1521.80 \text{ Ln}(h) + 4051.63$ $DDH_{min} = 1210.14 \text{ Ln}(h) + 3321.20$ $DDH_{mp} = 1255.78 \text{ Ln}(h) + 3428.17$
Muy bajo (2 plantas)	$DDH_{max} = 1230.35 \text{ Ln}(h) + 2850.34$ $DDH_{min} = 939.78 \text{ Ln}(h) + 2221.33$ $DDH_{mp} = 1187.79 \text{ Ln}(h) + 2758.22$

Donde h: profundidad máxima alcanzada de inundación (m); DDH_{max}: Daños directos en zona habitacional (Costo máximo); DDH_{min}: Daños directos en zona habitacional (Costo mínimo); DDH_{mp}: Daños directos en zona habitacional (Costo más probable); Ln(h): Logaritmo natural de la altura máxima de agua alcanzada en la inundación.

Fuente: Baró, et al., 2012.

Tabla 2. Daños totales económicos potenciales directos en zonas habitacionales para diferentes periodos de retorno (SM salarios mínimos)

T (años)	Localidad	AGEB	Lámina de agua (m)	Costo mínimo DDH _{min} No. (S.M.)	Costo máximo DDH _{max} No. (S.M.)	Costo más probable DDH _{mp} No. (S.M.)
10	Calixtlahuaca	175-2	1.3	72,992	93,414	90,423
		008-3	1.08	2,772,390	3,077,112	3,032,488
	San Miguel Zinacantepec	007-9	1.08	1,668,135	1,851,485	1,824,635
		010-0	0.37	256,779	324,676	314,733
		011-5	0.9	416,003	531,119	514,261
	San Juan de las Huertas	005-A	0.58	93,465	117,465	113,949
	TOTAL			5,279,766	5,995,270	5,890,489
20	Calixtlahuaca	175-2	1.48	76,047	97,390	94,264
		008-3	1.12	2,807,422	3,111,660	3,070,522
	San Miguel Zinacantepec	007-9	1.12	1,689,214	1,874,679	1,847,520
		010-0	0.39	395,144	500,041	484,679
		011-5	0.96	301,316	384,874	372,637
	San Fco Tlacilalcalpan	014-5	1.24	26,085	28,941	28,522
	San Juan de las Huertas	005-A	0.61	99,908	125,576	121,815
TOTAL			5,395,136	6,127,161	6,019,959	

50	Calixtlahuaca	175-2	1.53	92,589	118,594	114,786	
		008-3	1.17	2,849,493	3,161,955	3,116,198	
	San Miguel Zinacantepec	007-9	1.17	1,714,527	1,902,534	1,875,003	
		010-0	0.42	417,663	529,116	512,794	
		011-5	0.99	317,219	405,273	392,377	
	San Fco Tlacilalcalpan	014-5	1.29	39,917	44,283	43,643	
	San Juan de las Huertas	005-A	0.65	223,872	281,422	272,986	
	TOTAL			5,655,281	6,443,177	6,327,788	
	100	Calixtlahuaca	175-2	1.57	105,133	134,677	130,350
			008-3	1.2	2,873,881	3,188,791	3,142,676
San Miguel Zinacantepec		007-9	1.2	1,729,202	1,918,682	1,890,934	
		010-0	0.44	429,938	545,017	528,164	
		011-5	1.04	322,745	412,469	399,330	
San Fco Tlacilalcalpan		014-5	1.34	53,605	59,461	58,603	
San Juan de las Huertas		005-A	0.65	317,612	399,286	387,311	
TOTAL				5,832,114	6,658,383	6,537,369	

Fuente: Baró, *et al.*, (2012).

Para el caso de zonas agrícolas se identificaron los diferentes cultivos de la zona, siendo los cultivos de maíz grano bajo riego, maíz forrajero bajo riego, maíz grano temporal y maíz forrajero temporal los que se localizaron en la zona de estudio, además se consideraron datos como disminución o pérdida de la cosecha, la duración de la inundación, la época en que se produce la inundación, así como el área que ocupa el cultivo. La evaluación de los daños se realiza a partir del ingreso de los agricultores, el cual se ve afectado una vez producida una inundación. La tabla 3 presenta los modelos matemáticos para la estimación de pérdidas en zonas agrícolas (Baró, *et al.*, 2007). Es importante señalar que estos modelos son aplicables cuando la planta es mayor a 30 cm de altura, en caso contrario la pérdida de la cosecha puede considerarse del 100%.

Tabla 3. Modelos matemáticos de daños tangibles directos en zona agrícola ocasionados por inundación

Tipo de cultivo	Modelo matemático (costo en no. salarios mínimos)
Maíz grano temporal	$DDAmgt = 117.31 \ln(t) - 61.201$
Maíz grano bajo riego	$DDAmgr = 148.99 \ln(t) - 77.73$
Maíz forrajero temporal	$DDAmft = 563.43 \ln(t) - 293.94$
Maíz forrajero bajo riego	$DDAmfr = 593.4 \ln(t) - 309.58$

Fuente: Baró, *et al.*, 2007.

La aplicación de esta metodología en la subcuenca del río Tejalpa permitió cuantificar los daños en zonas habitacionales y agrícolas, siendo los daños habitacionales las de mayor porcentaje con un 94% del total de los daños y un 6% de los daños para zonas agrícolas.

5. CONCLUSIONES

La estimación de daños económicos causados por inundación está tomando importancia así como el análisis de los riesgos de inundación está tomando interés en los gobiernos tanto de países desarrollados como en países en vías de desarrollo (Baró, 2010; Merz, *et al.*, 2010).

Sin duda alguna, las inundaciones pueden causar grandes estragos a la sociedad por lo que necesitan ser prevenidos, el modelo para el cálculo de daños provocados por desastres naturales es un elemento crucial para la toma de decisiones así como el desarrollo de políticas en el campo del desarrollo de desastres naturales y los planes de adaptación ante el cambio climático (Coninx and Bachus, 2007; Merz, *et al.*, 2010).

La implementación de las curvas de daños permite conocer cuáles son los daños ocasionados por una inundación dependiendo de una determinada altura de lámina del agua. De acuerdo con Baró, (2010) este modelo permitirá:

- El análisis del costo beneficio respecto a las medidas estructurales y no estructurales a considerar en términos preventivos y de reducción de riesgo.
- Permitirá un análisis más objetivo y aterrizado de las pólizas de seguros.
- Facilitará un mejor ordenamiento y planificación del territorio en términos de uso de suelo.

También la aplicación de este modelo puede ayudar a la formulación de recomendaciones que orienten el diseño de medidas preventivas, orientadas a la mitigación o abatimiento de los picos de crecidas. Así como el costo máximo, mínimo y más probable ocasionado por una inundación para una altura de lámina alcanzada de agua.

La estimación de las pérdidas económicas utilizando las curvas de daños potenciales por inundación en México, debe ser ampliada además de los trabajos de (Baró, 2010; Vazquéz, 2013) quienes han hecho un aporte importante aplicando las curvas de daños para valorar las pérdidas económicas en el sector vivienda, agricultura y comercio, pero debe ser completada con otras curvas que permitan el cálculo de daños en otros sectores económicos como el industrial con el objeto de obtener una cuantificación más precisa de las afectaciones.

REFERENCIAS

- Ayala-Carcedo, F. y Olcina, J. (2002). Introducción al análisis y gestión de los riesgos. En F.J. Ayala Carcedo, y J. Olcina Cantos, (Coords). *Riesgos naturales* (pp.133-144). Barcelona: Ariel.
- Baró, J.E. (2010). *Conceptualización, desarrollo y validación de una metodología para la valoración económica de los daños potenciales tangibles provocados por una inundación*. Tesis de Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baró, J.E., Díaz-Delgado, C., Calderón, G., Esteller, V., Cadena, E. y Franco R. (2012). *Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Baró, J. E., Díaz-delgado, C., Esteller, V. y Calderón, G. (2007). *Curvas de daños provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México, Parte I. Propuesta metodológica. Ingeniería Hidráulica en México. Volumen XXII (1)*. 91-103. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277313735_Curvas_de_danos_economicos_provocados_por_inundaciones_en_zonas_habitacionales_y_agricolas_de_Mexico_Parte_I_propuesta_metodologica
- Baró, J.E., Díaz-Delgado, C., Esteller, M.V., Calderón, G. y Cadena, E. (2011). *Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México, Revista tecnológica y Ciencias del Agua antes Ingeniería Hidráulica en México Volumen II, (3)*. 201-218. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300013
- Booyesen, H. J., Viljoen, M. F., De Villiers, Gdut. (1999). *Methodology for the calculation of industrial flood damage and its application to an industry, Vereeniging, Water SA, 25 (1)*, 41-46, January Journal.
- Boyle, S.J., Tsanis, I.K., Kanaroglou, P.S. (1998). Developing Geographic Information Systems for land use impacts assessment in flooding conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123, 89-98.
- Brimmicombe, A. J., Bartlett, J. M. (1996). *Linking geographical information system with hydraulic simulation modelling for flood risk assessment: the Hong-Kong approach. GIS and Environmental Modeling M.F* 165-168. Goodchild: ed Oxford University Press New York.
- Comisión económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (2005). Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socionaturales, cuatro experiencias en América Latina y el Caribe. *Cuadernos de la CEPAL, 91*. México: CEPAL-Banco Mundial.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (2003). *Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres, Tomo III*. México: CEPAL-Banco Mundial.
- Consejo Nacional de Población, CONAPO (2005). *Índice de Marginación Urbana 2005*. México: Secretaría Nacional del Consejo Nacional de Población

- Coninx I. & Bachus K. (2007). *Integrating social vulnerability to floods in a climate change context*, Higher Institute for Labour Studies. Belgic: Catholic University of Leuven, Park-sstraat 47, B-3000 Leuven.
- Díaz-Delgado, C. y Vega, G. (2001). Análisis de gran visión de las inundaciones en la Cuenca Alta del Río Lerma: caso de la Sub cuenca del Río Tejalpa, Estado de México, México. *Ingeniería Hidráulica en México XVI* (1), 73-86.
- Díaz-Delgado, C., Baró Suárez J.E., Bedolla, S. y Díaz Espíritu, J.C. (2011). Estimación de costos de daños directos por inundación en zonas habitacionales con empleo de curvas costo versus altura de agua alcanzada. Caso de estudio Valle de Chalco Solidaridad. En X.A. Némiga y S.L. Hernández-Zetina, (comp.), *La innovación geotecnológica como soporte a la toma de decisiones en el desarrollo territorial*. (pp. 471-489). México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Francisco J. y Fernando A. (2003). En torno a los desastres naturales: Tipología, conceptos y reflexiones. *Revista INVI*, 18 (47), 15-31.
- Georgas D. y Perissoratis, C. (1992). *Implications of future climatic changes on the Inner Thermaikos Gulf*. En *Climatic Chance and the Mediterranean*.
- Gómez-Albores, M.A., Díaz-Delgado, C., Baró Suarez J.E., Esteller Alberich M.V., Sánchez Plores, O. y Fabela Estrada, A. (2011). Desarrollo de un módulo hidro-geomático para la estimación de costos de daños por inundación: Aplicación en la cuenca Lerma-Chapala (México). En X.A. Némiga y S.L. Hernández-Zetina, (comp.), *La innovación geotecnológica como soporte a la toma de decisiones en el desarrollo territorial* (pp. 519-533). México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2001). *Climate change 2001*. En *Impacts, Adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panel of Climate change- WNO-UNEP*.
- James, L. D. y Lee, R. R. (1971). *Economics of Water Resources Planning*. New York: McGraw-Hill.
- Jonkman, S.N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment*, Ph.D. thesis. Delft University, The Netherlands.
- Kashiwagi, T. (1994). *Mitigation options, Industry*. IPCC Working Group II: subgroup A.
- Lindh, G. (1992). Hydrological and water resources impact of climate chances. *Climatic Chance and the Mediterranean*, 58-93.
- Lopardo, R. y A., Seoane, R., (2000). Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones. *Ingeniería del agua*, 7(1), 11-21. Doi: <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2000.2833>
- Magaña, V., Méndez, J.M., Morales, R., Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En J. Martínez y A. Fernández (Eds). *Cambio climático: una visión desde México*. (pp. 203-213). México: INE-SEMARNAT.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). *Assessment of economic flood damage*. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, (10), 1697-1724. Recuperado de <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/1697/2010/nhess-10-1697-2010.pdf>
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A. & Schmidtke, R. (2004). Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, (4), 153-163. Recuperado de <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/4/153/2004/nhess-4-153-2004.pdf>
- Messner, F. y Meyer, V. (2005). *Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research*. En *UFZ Discussion Paper 13/2005*. 24. Recuperado de https://www.ufz.de/export/data/2/26222_Disk_Papiere_2005_13.pdf
- Nascimento, N., Machado M.L., Baptista, M., De Paula E. y Silva, A. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, Volumen 4 (3), 195-210. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15730620701466591>
- Olsen, J.R., Belgin, P.A., Lambert, J.H. and Haines, Y.C. (1998). Input Output economic evaluation of system of levees. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(5), 237-245. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1998\)124:5\(237\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:5(237))
- Parker, D. J., Green, C. H., y Thompson, P. M. (1987). *Urban flood protection benefits: A project appraisal guide*. En *Gower Technical Press*. Recuperado de <http://www.abebooks.com/9780291397072/Urban-Flood-Protection-Benefits-Project-0291397077/plp>

- Penning-Rowsell, E.C. and Chatterton, J.B. (1997). The benefits of flood alleviation. A manual of assessment techniques. U.K. *Belhaven Technical Press*, 4(2), 251-252. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-7717.1980.tb00279.x/abstract>
- Renyi, L. and Nan, L. (2002). Flood area and damage estimation in Zhejiang, China. *Journal of Environmental Management*, 66(1), 1-8. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147970290544X>
- Rose, A. (2004). Economic Principles, Issues, and Research Priorities in Natural Hazard Loss Estimation. In Y. Okuyama, and S. Chang, Springer, Heidelberg (eds.), *Modeling the Spatial Economic Impacts of Natural Hazards* (pp. 13-36). Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-24787-6_2
- Salzano, E. y Cozzani, V. (2012). Introducing external hazard factors in quantitative risk analysis. *Revista de Ingeniería*, 37, 55-56. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0121-49932012000200009>
- Swiss, R. (2014). *Natural Catastrophes and Man-made disasters in 2013: large losses from flood and hail; Haiyan hits the Philippines*. Retrieved from http://www.swissre.com/media/news_releases/nr_20140326_sigma_insured_losses_in_2013.html
- Smith, D. I. and Greenaway, M. A. (1994). Tropical Storm Surge, Damage Assessment and Emergency Planning: A Pilot Study for Mackay, Queensland. *Resource and Environmental Studies*. Australian National University, Canberra, Australia, Centre for Resource and Environmental Studies, 8, 49-50. Retrieved from <http://catalogue.nla.gov.au/Record/1907905>
- Vázquez, I. (2013). *Modelo para la estimación de costos de daños directos por inundación en establecimientos comerciales en las zonas inundables del río Lerma, Estado de México 2009-2012*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Geografía, México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Vega, G. (1999). *Evaluación del riesgo de inundación en la Cuenca Alta del Río Lerma: Caso de la subcuenca del Río Tejalpa. Estado de México*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. México. Universidad Autónoma del Estado de México.