

Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac

• Rubén Ernesto Hernández-Uribe • Héctor Barrios-Piña* •
• Aldo I. Ramírez •

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México

*Autor para correspondencia

Resumen

Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (mayo-junio, 2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 5-25.

En este trabajo se presenta una metodología de análisis de riesgo por inundación aplicable a cuencas urbanas y va dirigida a los tomadores de decisiones para mitigar daños. La metodología se aplica a la cuenca urbana del río Atemajac, Jalisco, México, donde cada año hay graves problemas de inundación por el desbordamiento del cauce principal, originando severos daños. La metodología se fundamenta en dos vertientes que son complementarias: la del enfoque determinista, basado en modelación numérica y determinación de daños; y la del enfoque paramétrico, donde se tratan de homologar los factores que intervienen en la vulnerabilidad, a través de índices adimensionales normalizados por los componentes de índoles social, económico, físico y ambiental. Los resultados muestran las zonas de riesgo y de alta vulnerabilidad por tramos del río Atemajac, definidos de acuerdo con las características que presenta el río a lo largo de su cauce. A partir del modelo determinista se generaron mapas de inundación y daños para 50 y 100 años de periodo de retorno, donde se identifican las zonas que se encuentran en riesgo de moderado a alto a lo largo del río. Los índices de vulnerabilidad por inundación obtenidos con el modelo paramétrico son consistentes con los resultados del modelo determinista, integrando a los indicadores más significativos que definen los grados de exposición, susceptibilidad y resiliencia a lo largo y ancho de la cuenca en estudio de una forma fácil de interpretar para los tomadores de decisiones.

Palabras clave: manejo del riesgo por inundación, vulnerabilidad a las inundaciones, cuencas urbanizadas, modelo determinista, modelo paramétrico.

Abstract

Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (May-June, 2017). Flood risk analysis: Methodology and application to the Atemajac basin. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(3), 5-25.

This paper shows a methodology of flood risk analysis applicable to urban basins and is addressed to decision makers for the mitigation of damages. The methodology is applied to the urban basin Atemajac, Jalisco, Mexico, where serious problems of flooding by overflowing of the main stream happen, causing severe damages. The methodology is based on two points of view that are complementary: the deterministic model, based on numerical modeling and damage determination; and the parametric model, where the parameters involved in vulnerability are homologated through dimensionless normalized indices, by social, economic, physical and environmental components. The results show zones under risk and high vulnerability by sections of the Atemajac River, defined according to the characteristics the river shows throughout it. From the deterministic model, flood and damage maps for 50 and 100 years return period were created, where zones under moderated to high risk along the river are identified. The Flood Vulnerability Index obtained with the parametric model are consistent with the results of the deterministic model, integrating the most significant indicators that define the degree of exposure, susceptibility and resilience, throughout the basin under study, in an easy way to understand for the decision markers.

Keywords: Flood risk management, flood vulnerability, urban basins, deterministic model, parametric model.

Recibido: 12/01/2016
Aceptado: 12/10/2016

Introducción

En el mundo, las inundaciones son consideradas como el desastre natural más dañino y peligroso (Douben, 2006). Según datos de la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, 2002), de los desastres que se presentan en el orbe relacionados con el agua, 50% corresponde a inundaciones, por encima de hambrunas, sequías y epidemias. El número de eventos ha crecido a una velocidad vertiginosa, particularmente en áreas urbanas, impactando de manera negativa el funcionamiento normal de los sectores social, de servicio, económico y financiero, entre otros, dejando en mayor vulnerabilidad a la población con menos recursos (Benjamin, 2008). Las inundaciones en México son un tema de fondo, pues en la actualidad son el fenómeno que causa más daños económicos en el país. Cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) muestran que cerca de 41% del territorio nacional y 31 millones de personas están expuestas a fenómenos hidrometeorológicos (Cervantes-Jaimes, Alcocer-Yamanaka, Arreguín-Cortés, Saavedra-Horita, & Rubio-Gutiérrez, 2012).

La determinación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, debido principalmente a la planeación urbana y a la mitigación de desastres. Cuantificar el riesgo por inundación es una tarea compleja por las variables involucradas y su estado evolutivo. En general, las metodologías de análisis de riesgo por inundación se pueden dividir en dos grupos: deterministas o cuantitativos, y paramétricos o cualitativos (Balica, Popescu, Beevers, & Wright, 2012).

La base de los modelos deterministas es el uso de la modelación numérica para reproducir la física de las inundaciones bajo diferentes escenarios. Los resultados de los modelos numéricos se complementan con un análisis de costos de los daños causados por las inundaciones y los resultados se integran en mapas de riesgo a través de sistemas de información geográfica (SIG). El avance de herramientas computacionales, como los modelos numéricos (Chen, Hill,

& Urbano, 2009; Notaro *et al.*, 2013; Foudi, Osés-Eraso, & Tamayo, 2014) y los SIG ha permitido caracterizar y representar al riesgo de una forma más integral y visual, ayudando con ello a los tomadores de decisiones (Fedeski & Gwilliam, 2007; Sarhadi, Soltani, & Modarres, 2012; Zhaoli, Hongliang, Chengguang, & Haijuan, 2012). Existen varios tipos de modelos numéricos: unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales; la selección de uno u otro dependerá de las necesidades de precisión, los tiempos de elaboración y la capacidad de cómputo, principalmente. Determinar los costos de los daños por inundación no es algo trivial, dado que el precio de los bienes materiales está supeditado a las condiciones del entorno socioeconómico, geográfico, político, ambiental o incluso cultural de la zona en conflicto. Para el caso de México, existen algunos trabajos que han focalizado esfuerzos para calcular los costos de daños por inundación a través de funciones logarítmicas (Díaz-Delgado *et al.*, 2012; Salas-Limón, 2015). Es posible obtener los costos de daños por inundación que estiman las compañías aseguradoras o los gobiernos, aunque esta información no suele ser pública. El modelo determinista ofrece un alto nivel de certidumbre, sin embargo, su implementación es compleja, dada la cantidad de información y el conocimiento especializado que se requiere para su aplicación.

Los modelos paramétricos o cualitativos surgen en virtud de la complejidad al aplicar los modelos deterministas, buscando en un principio simplificar la tarea para estimar el riesgo. En esencia, los modelos paramétricos se basan en la estimación de la vulnerabilidad de un sistema a través de índices, denotados como FVI por sus siglas en inglés (Flood Vulnerability Index). La vulnerabilidad es, sin duda, lo que hace al riesgo complejo, por la cantidad de factores que la definen, y según Wisner, Blanikie, Cannon y Davis (2004) es la causa fundamental para la ocurrencia de un desastre. A grandes rasgos, los FVI se definen por componentes, y a cada uno se le incorporan indicadores de escalas y magnitudes diferentes, que a su vez conceptualizan a la vulnerabilidad (Connor,

2005; Balica, 2007). Los modelos paramétricos fueron empleados por primera vez en la década de 1980 (Little & Rubin, 1983) y su aplicación ha ido creciendo de manera importante durante los últimos años. Balica (2007) desarrolló una metodología basada en la estimación de cuatro FVI, que correspondieron a los componentes social, económico, ambiental y físico, integrados en un FVI normalizado que identificó como *total*. La metodología de Balica (2007) se aplicó para analizar la vulnerabilidad ante inundaciones de los ríos Danubio, Rin y Mekong, considerando tres escalas espaciales: cuenca, subcuenca y área urbana. Sebald (2010) desarrolló índices de vulnerabilidad por inundación integral (IFVI, por sus siglas en inglés), considerando cuatro componentes: social, económico, ecológico y físico, a través de mapas de vulnerabilidad sobre una escala de baja, media y alta en Ingolstadt, Alemania. Balica (2012) adaptó su metodología desarrollada anteriormente (Balica, 2007) a las condiciones particulares de diferentes ciudades costeras del mundo, logrando representar la vulnerabilidad a través de gráficas de barras con índices normalizados entre 0 y 1. Greco y Martino (2016) construyeron índices de vulnerabilidad aplicados al litoral de la región de Basilicata, al sur de Italia, generando mapas de vulnerabilidad asociados con cuatro clases: muy alta, alta, moderada y baja. Kwabena *et al.* (2015) desarrollaron índices para evaluar el grado y la magnitud de la vulnerabilidad por inundación en comunidades al norte de Ghana mediante cuatro categorías: socio-económico, ecológico, ingeniería y político, a través de mapas que agrupan el número de ciudades vulnerables. Villordon y Gourbesville (2016) aplicaron la metodología de Balica (2012) en las ciudades costeras de Filipinas, donde se generó un mapa con una escala de colores, indicando el grado de vulnerabilidad asociado con las inundaciones. A pesar de que los modelos paramétricos buscan simplificar la tarea de estimar el riesgo, en comparación con los modelos deterministas, su implementación no deja de ser compleja por la gran cantidad y variabilidad de indicadores que se incluyen. Sin embargo, los resultados que se

derivan de un modelo paramétrico suelen ser de fácil interpretación, dada la simplicidad en la presentación de los índices de vulnerabilidad, que suele variar en una escala de 0 a 1, siendo los valores cercanos a 0 los que representan una vulnerabilidad casi nula, y los valores cercanos a 1 los que indican una vulnerabilidad alta.

En México, la institución que ha realizado propuestas metodológicas para estimar el riesgo por inundación es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), donde se enfatiza que para un diagnóstico adecuado del riesgo, primero es necesario tener el conocimiento científico de los fenómenos involucrados que afectan a una determinada región, para poder así estimar las posibles consecuencias del fenómeno, en función de las características físicas, socioeconómicas y geomorfológicas de los asentamientos humanos en el área de análisis, de tal forma que sea posible plantear un procedimiento general en la elaboración de un Atlas de Riesgo (Cenapred, 2006, 2013). En México existen autores comprometidos con la generación y actualización de mapas de riesgo a través de SIG (Alcocer-Yamanaka, 2011; Alcocer-Yamanaka & Rodríguez, 2013), aunque no ha sido suficiente, dada la enorme problemática de las inundaciones en el país. Llaguno-Gilberto (2014) menciona que en México las mayores aportaciones en esta materia se generan a partir de tesis de maestría.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología de análisis de riesgo por inundaciones en una cuenca urbanizada, para que los resultados puedan ayudar a los tomadores de decisiones a generar proyectos que mitiguen o minimicen los daños causados por las inundaciones. La metodología considera los dos enfoques mencionados anteriormente, el determinista y el paramétrico, logrando con ello un análisis de riesgo complementario. La aplicación del modelo determinista permite cuantificar el riesgo a través de la estimación de daños, cuya base es la simulación numérica de escenarios de inundación para diferentes periodos de retorno a una escala local. Por otro lado, el modelo paramétrico permite conceptualizar

a la vulnerabilidad, debido a su complejidad, a través del cálculo de índices adimensionales que consideran factores que difícilmente se podrían representar explícitamente a través de un análisis determinista, como son los aspectos asociados con la actividad socioeconómica de la región en estudio, principalmente. El modelo paramétrico conjunta indicadores a diferentes escalas y magnitudes, que proporcionan una visión integral y regionalizada de la zona de estudio. La metodología se aplica a la cuenca de Atemajac del área metropolitana de Guadalajara (AMG), Jalisco, México, donde año con año se registran pérdidas humanas y económicas por las inundaciones. Se espera que la metodología aquí propuesta pueda ser replicable para casos con problemas de inundación vinculados con cuencas urbanizadas.

Caso de estudio

Como ya se mencionó, el caso de estudio donde se aplica la metodología de análisis de riesgo

por inundaciones es la cuenca Atemajac. Esta cuenca se ha caracterizado por el crecimiento paulatino de la mancha urbana, que cada año la hace altamente vulnerable a inundaciones, principalmente en zona baja. El AMG se extiende por siete cuencas hidrográficas que drenan hacia el río Santiago, ubicado al norte, como se muestra en la figura 1. Estas siete cuencas, delimitadas por la Secretaría de Desarrollo Urbano de Jalisco (SIAPA, 2007), forman el Valle de Atemajac, donde descansa la mayor concentración urbana del AMG, y de las cuales, una de ellas es la cuenca Atemajac.

La cuenca Atemajac forma parte de la cuenca hidrográfica Río Santiago, que desemboca en el océano Pacífico, en la costa de Nayarit, México. A su vez, la cuenca hidrográfica Río Santiago pertenece a la región hidrológica 12 Lerma-Santiago y se encuentra bajo la dirección de la Región Administrativa VIII (Conagua, 2012). La cuenca Atemajac comparte los municipios de Guadalajara al suroeste y de Zapopan al noreste, en el marco de las coordenadas latitud $20^{\circ} 43' 12''$ N,

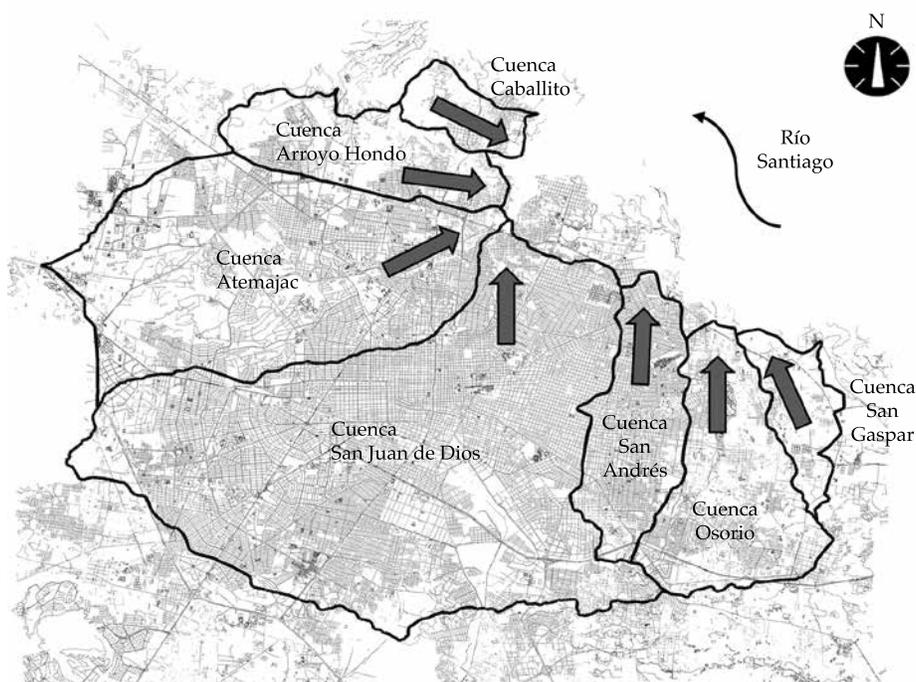


Figura 1. Cuencas hidrológicas del área metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México.

longitud 103° 27' 44" O, y latitud 20° 41' 34" N, longitud 103° 22' 37" O; cuenta con una superficie aproximada de 7 500 ha; obedece a una pendiente poniente-oriente, y está situada entre las altitudes 1 515 y 1 640 msnm. Su cauce principal es el río Atemajac y cuenta con cinco afluentes principales: arroyo Agua Prieta, arroyo de la Campana, arroyo de Ocotán, el arroyo Belenes y arroyo Barranca Ancha. Actualmente, el río Atemajac tiene una longitud aproximada de 8 700 m y una pendiente promedio de 0.8%. Desde su modificación en la última década por el desarrollo de nuevos fraccionamientos habitacionales, el río Atemajac comienza formalmente de aguas arriba hacia aguas abajo como canal Patria en el cruce de las avenidas vehiculares Acueducto y Patria; sigue su trayectoria por el eje de la avenida Patria hacia el oriente hasta su descarga en el río Santiago. La cuenca Atemajac se integra por ocho microcuencas que generan las principales aportaciones pluviales del río y cuyos rasgos fisiográficos se muestran en el cuadro 1.

Metodología

La metodología que se aplicó en el presente trabajo se divide en dos etapas principales: la etapa de determinación del riesgo por inundación a través del modelo determinista y la etapa de determinación de los índices de vulnerabilidad por medio del desarrollo del modelo paramétrico. Ambas se describen a detalle en las subsecciones siguientes.

Determinación del riesgo por inundación a través del modelo determinista

El desarrollo del modelo determinista fue la primera etapa del estudio. Durante ésta, se generaron simulaciones numéricas del tránsito de avenidas extraordinarias en el río Atemajac para definir áreas y tirantes de inundación. Con los resultados de las simulaciones numéricas se estimaron los costos de los daños causados por las inundaciones, para finalmente crear los mapas que señalan zonas de riesgo por inundaciones a lo largo del río Atemajac a la escala urbana, basados en los costos de daños.

Para aplicar el modelo determinista, el río Atemajac se dividió en cuatro tramos, definidos conforme las características geométricas de la sección y con base en los rasgos socioeconómicos de las zonas aledañas al río (ver figura 2). El tramo T1, con una longitud aproximada de 3 300 m, presenta secciones amplias de tipo trapezoidal, con revestimientos intermitentes de mampostería sobre lecho rocoso, de anchos que fluctúan entre 30 y 15 m, con profundidades superiores a los 3 m. Este tramo drena al río San Juan de Dios (otro de los principales ríos del AMG), poco antes de descargar en el río Santiago. El tramo T2 tiene una longitud aproximada de 1 700 m, presenta secciones trapezoidales desde los 8 hasta los 0.5 m de base y 2 m de profundidad, llegando a ser casi de sección triangular, reduciendo su capacidad notablemente con respecto a la del tramo T1. El tramo T3 está entubado por la construcción

Cuadro 1. Rasgos fisiográficos principales de las microcuencas de la cuenca Atemajac.

| Microcuenca | Área | Elevación | | Longitud de escurrimiento |
|--------------|----------|------------|------------|---------------------------|
| | (ha) | Máx (msnm) | Mín (msnm) | (km) |
| Acueducto | 915.29 | 1 679.00 | 1 537.00 | 7.736 |
| Las Palmas | 1 259.90 | 1 665.00 | 1 532.00 | 8.992 |
| Colomos | 363.17 | 1 638.00 | 1 532.00 | 4.106 |
| Plaza Patria | 260.53 | 1 585.10 | 1 520.00 | 2.840 |
| Country | 1 641.95 | 1 695.00 | 1 513.00 | 10.486 |
| Zapopan | 2 079.01 | 1 665.00 | 1 507.00 | 12.640 |
| El Batán | 2 533.01 | 1 567.00 | 1 501.00 | 4.498 |
| Periférico | 406.53 | 1 547.00 | 1 485.00 | 4.343 |

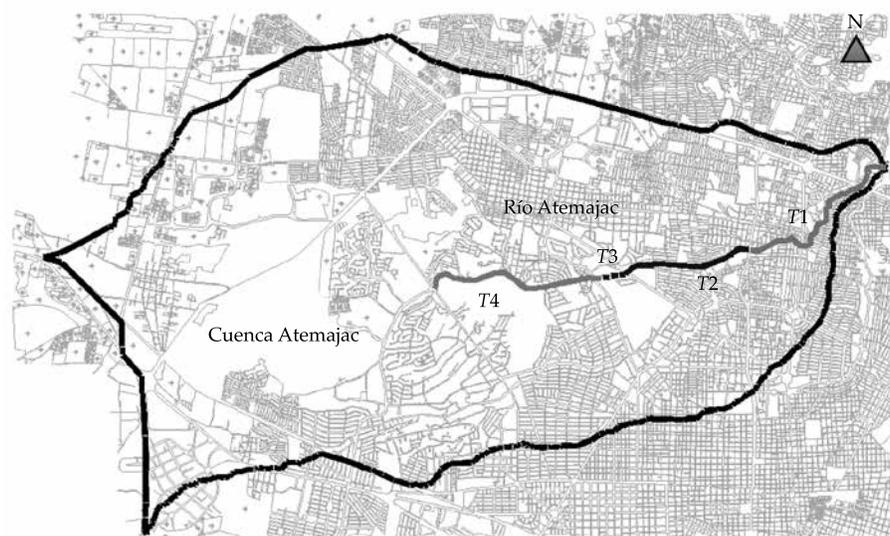


Figura 2. Cuenca Atemajac y su cauce principal dividido en cuatro tramos específicos.

del Centro Comercial Plaza Patria, que se asentó sobre el propio río. El entubamiento de dicho tramo consta de un colector de mampostería en sección tipo herradura de 2.6 m de diámetro y 700 m de longitud, aproximadamente. Por último, el tramo T4 presenta secciones de tipo trapezoidal con paredes revestidas de mampostería y plantilla sin revestimiento, tiene 14 m de base, 2.5 m de profundidad y 3 000 m de longitud de manera aproximada.

El modelo que se utilizó para las simulaciones es el HEC-RAS, que permite caracterizar el tránsito de avenidas en una dimensión de una manera relativamente sencilla y rápida, considerando rasgos como topografía, infraestructura vial y obras hidráulicas.

Los hidrogramas que se impusieron en el HEC-RAS se calcularon a través de un estudio hidrológico, donde se aplicaron los métodos empíricos de Burklie-Ziegler, Mc Math y el Racional, y los métodos hidrológicos del hidrograma unitario instantáneo (HUI), del hidrograma unitario sintético (HUS) y del hidrograma unitario triangular (HUT). Se calcularon los volúmenes de escurrimiento de las ocho microcuencas que drenan al río Atemajac para diferentes periodos de retorno (ver figura 3). Estos volúmenes se

consideraron en las simulaciones, sin restar gastos de captación de la red de alcantarillado, debido a que toda el agua de lluvia finalmente drena al río Atemajac. Las precipitaciones que se analizaron se obtuvieron del Programa de Manejo Integral de Aguas Pluviales del AMG (Promiap) del SIAPA, que es el organismo operador de agua potable y alcantarillado del AMG (SIAPA, 2007). Algunos modelos arrojaron gastos conservadores y otros tendieron a sobreestimar. Los resultados del método HUT se posicionan aproximadamente como la media del resto, además de que, a diferencia de los otros métodos, en este método se considera la distribución temporal de la lluvia desde la primera hora hasta la hora 24, en intervalos de una hora las primeras seis horas, después un intervalo de seis horas, y por último un intervalo de 12 h. Por ello, se seleccionaron las avenidas máximas calculadas con este método (ver cuadro 2 y figura 3).

A partir de estos gastos se construyeron los hidrogramas en cada punto de control PC mostrados en la figura 4, para alimentar al HEC-RAS. De acuerdo con el Manual para el Control de Inundaciones (Cenapred, 2011), los periodos de diseño para los cuales debe calcularse

Cuadro 2. Resumen de los gastos pico obtenidos con el método HUT en los puntos de confluencia de las tributarias de las ocho microcuencas en el río Atemajac.

| Puntos de Control PC | Q _{máx} (m ³ /s) | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | Tr = 5 años | Tr = 10 años | Tr = 20 años | Tr = 25 años | Tr = 50 años | Tr = 100 años |
| PC1 Acueducto | 33.11 | 44.90 | 55.04 | 56.56 | 67.97 | 78.45 |
| PC2 Las Palmas | 72.99 | 98.88 | 121.24 | 131.11 | 148.51 | 170.56 |
| PC3 Colomos | 89.54 | 121.49 | 149.16 | 161.46 | 184.51 | 213.01 |
| PC4 Plaza Patria | 104.63 | 141.67 | 174.59 | 189.60 | 217.35 | 251.81 |
| PC5 Country | 173.66 | 231.95 | 282.99 | 307.62 | 345.99 | 396.40 |
| PC6 Zapopan | 251.37 | 332.45 | 402.33 | 434.95 | 485.06 | 551.01 |
| PC7 El Batán | 285.82 | 377.33 | 456.78 | 493.16 | 551.01 | 625.88 |
| PC8 Periférico | 313.10 | 412.74 | 499.60 | 538.90 | 602.70 | 684.42 |

la avenida de diseño para una estructura de protección contra inundaciones es de entre 50 y 100 años, para protección a poblaciones entre pequeñas y medianas, que es el caso de la población de la cuenca baja del río Atemajac, por lo que sólo se consideraron en este estudio los gastos correspondientes a los periodos de diseño de 50 y 100 años.

La topografía detallada del río Atemajac se obtuvo del Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IIEG, 2012), y en algunas partes fue necesario complementar y afinar las curvas de nivel con mediciones de campo. A lo largo del río Atemajac existen diez pasos vehiculares, donde se disminuye de forma considerable la capacidad hidráulica del río. Las estructuras hidráulicas que conforman estos pasos vehiculares se consideraron en las simulaciones, junto con el entubamiento, a lo largo del tramo T3.

Para implementar el modelo HEC-RAS, el río Atemajac se discretizó en 1 832 secciones transversales, con separación de 5 m entre cada una. Las secciones transversales tienen un ancho de 500 m, de los cuales 250 m son para la margen izquierda y 250 m son para la margen derecha, a partir del eje del río, siguiendo la dirección del flujo. Las simulaciones se corrieron para régimen no permanente, con una duración total de 5 h cada una y un paso de tiempo de 1 s. La duración total de las simulaciones se fijó tomando como referencia el mayor tiempo base de los hidrogramas que se impusieron en los

puntos de control PC de la figura 4. A manera de ejemplo, la figura 5 ilustra la pantalla del HEC-RAS con los ocho hidrogramas impuestos en los puntos de control PC como condición de frontera para el periodo de retorno de 50 años. Como condición de frontera a la salida del río, se impuso un tirante normal en la última sección aguas abajo.

El modelo se calibró para el caso de estudio con simulaciones donde se impusieron las condiciones hidrológicas para un periodo de retorno de dos años (el periodo de retorno de dos años es aproximado al periodo de retorno de 2.33 años, que es igual a la media de los caudales máximos en la distribución de Gumbel) y se compararon los resultados con las condiciones reales, en especial en las zonas donde de manera típica año con año se registran desbordamientos del cauce principal. Dado que no existen aforos ni datos medidos en las zonas de desbordamiento, se realizaron encuestas a comerciantes y vecinos, junto con recorridos, para estimar los tirantes máximos alcanzados y poder contrastar con los cálculos del modelo. Se ajustaron los coeficientes de rugosidad de Manning en cada tramo del río Atemajac hasta obtener los tirantes que se determinaron en los estudios de campo, quedando de la siguiente manera: 0.035 para el tramo T1; 0.015 para el tramo T2; 0.014 para el tramo T3, y 0.025 para el tramo T4.

Para estimar los costos de daños por inundación, una vez obtenidos los escenarios

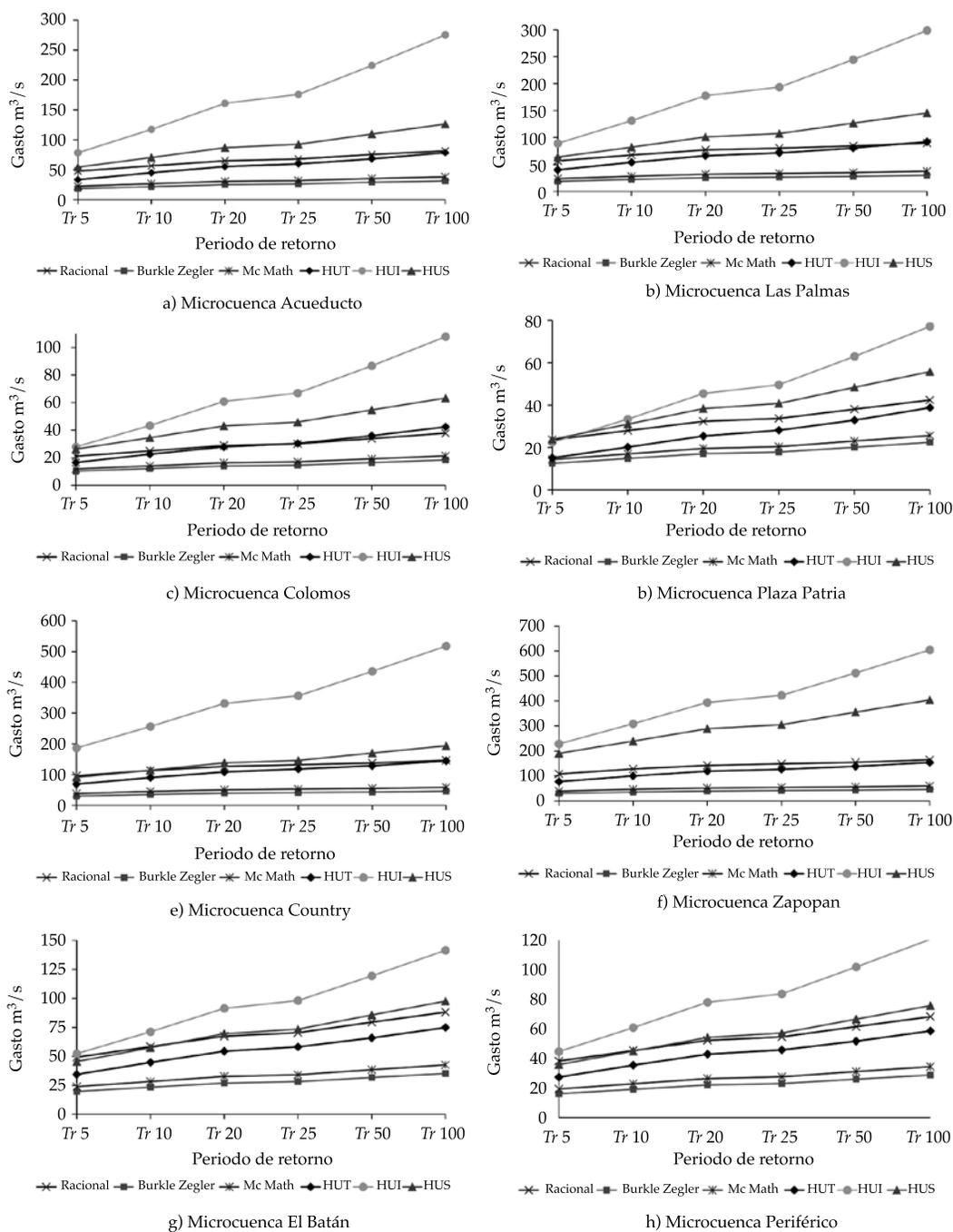


Figura 3. Curvas de gasto-periodo de retorno obtenidas de los métodos lluvia-escorrentamiento en las microcuencas que componen la cuenca Atemajac.

de inundación del HEC-RAS se aplican las curvas de daños de Díaz-Delgado *et al.* (2012). Estas curvas proporcionan los costos máximo, mínimo y más probable de los daños causados por inundación en salarios mínimos, en función

del tirante de inundación y del índice de marginación de la zona afectada. De acuerdo con los índices de marginación del INEGI, se identifican tres niveles en las zonas aledañas a los linderos del río Atemajac: alto, medio y bajo, con casas

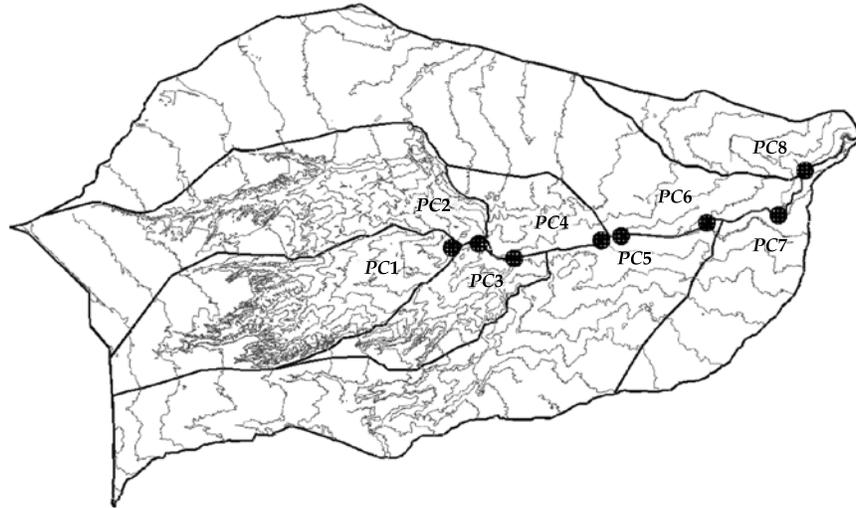


Figura 4. Puntos de confluencia de las tributarias correspondientes a las ocho microcuencas en el río Atemajac.

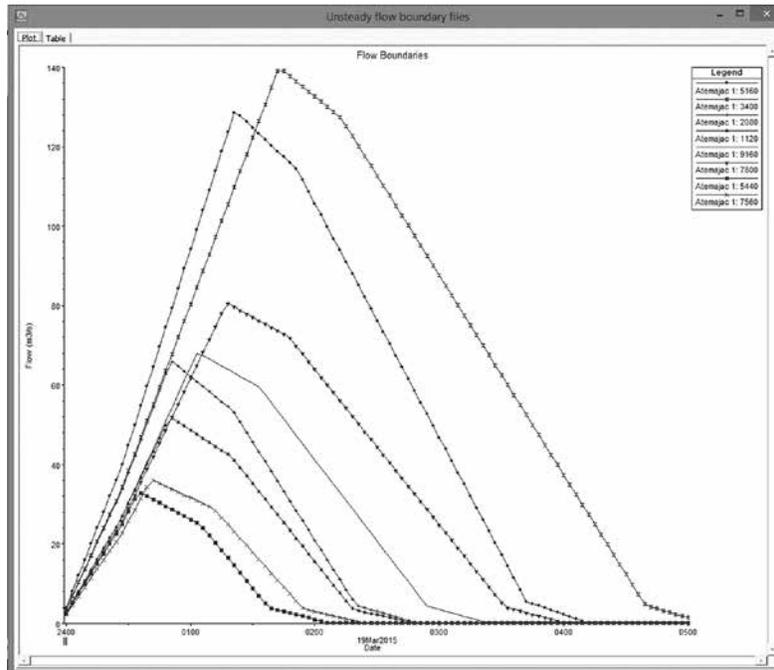


Figura 5. Pantalla de captura de los hidrogramas para $T_r = 50$ años impuestos en los ocho puntos de control PC como condición de frontera.

en su mayoría de dos plantas, por lo que las curvas que se aplicaron según Díaz-Delgado *et al.* (2012) fueron las que se indican en el cuadro 3. En este trabajo, los costos se representan en

dólares, considerando un salario mínimo de \$70.10, según lo establecido por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público en 2015, y una paridad de \$15.81 pesos mexicanos por dólar.

Cuadro 3. Funciones de daños por inundación de Díaz-Delgado et al. (2012) aplicadas en la metodología. Donde h es el tirante de inundación en m; DDH es el costo de daños directos en zona habitacional en salarios mínimos; los subíndices máx, mín y mp significan costo máximo, mínimo y más probable, respectivamente; y R^2 es el coeficiente de determinación de la función.

| Índice de marginación | Modelo matemático (salarios mínimos) | R^2 |
|-----------------------|--|-------|
| Alto | $DDH_{máx} = 289.63\ln(h) + 801.56$ | 0.85 |
| | $DDH_{mín} = 228.58\ln(h) + 637.93$ | 0.80 |
| | $DDH_{mp} = 280.51\ln(h) + 777.60$ | 0.84 |
| Medio Dos plantas | $DDH_{máx} = 549.55\ln(h) + 1\,345.57$ | 0.88 |
| | $DDH_{mín} = 405.03\ln(h) + 965.27$ | 0.80 |
| | $DDH_{mp} = 528.39\ln(h) + 1\,289.88$ | 0.87 |
| Bajo Dos plantas | $DDH_{máx} = 666.15\ln(h) + 1\,632.94$ | 0.85 |
| | $DDH_{mín} = 585.33\ln(h) + 1\,409.03$ | 0.82 |
| | $DDH_{mp} = 605.70\ln(h) + 1\,441.82$ | 0.82 |

Modelo paramétrico basado en índices de vulnerabilidad por inundación

$$FVI_{Físico} = \frac{T_r P_r}{\frac{E_v}{R_{ainfall}}, \frac{D_{sc}}{V_{year}}, D_l} \quad (4)$$

La segunda etapa del estudio fue el desarrollo del modelo paramétrico para caracterizar la vulnerabilidad. La metodología adoptada fue la propuesta de Balica (2012) para los cuatro componentes generales: social, económico, ambiental y físico. La metodología considera tres escalas espaciales: cuenca, subcuenca y área urbana. Por las características de la cuenca Atemajac, la escala que se aplica es la escala de área urbana. En cada FVI se consideran los tres conceptos fundamentales que definen la vulnerabilidad: exposición (E), susceptibilidad (S) y resiliencia (Res), a través de las siguientes expresiones:

$$FVI_{Social} = \frac{P_{fa} U_a disc C_m}{P_e AP C_{pr} W_s E_r HDI} \quad (1)$$

$$FVI_{Económico} = \frac{L_u U_m I_{neg} U_a}{L_{ei} F_i A_{minv} \frac{D_{sc}}{V_{year}} P_e} \quad (2)$$

$$FVI_{Ambiental} = \frac{U_g R_{ainfall}}{E_v L_u} \quad (3)$$

En los cuadros 4, 5, 6 y 7 se definen cada uno de los indicadores junto con sus valores. En ciertos casos, algunos indicadores que determinan a los FVI de la metodología de Balica (2012) se redefinieron (o regionalizaron), dadas las características propias de la cuenca en estudio y por la información disponible, teniendo cuidado de que los nuevos indicadores representaran los conceptos fundamentales E, S y Res. Los valores de los indicadores se obtuvieron de 208 áreas geoestadísticas básicas (AGEB) del INEGI, del último CENSO 2010, que son las que abarcan las ocho microcuencas que componen la cuenca Atemajac. Otras fuentes de información fueron los gobiernos locales y encuestas que se aplicaron de forma directa a la población involucrada.

Al igual que con el modelo determinista, la metodología paramétrica también se aplicó considerando los cuatro tramos del río Atemajac de la figura 2, para comparar los resultados obtenidos de ambos modelos y desarrollar un análisis de riesgo complementario.

Los FVI se normalizan a través de la siguiente expresión:

$$FVI = \frac{FVI_j}{\max_{i=1}^n (FVI_i)} \quad (5)$$

donde el subíndice i denota cada FVI de los componentes social, económico, ambiental y físico; y el subíndice j se refiere al FVI del componente a normalizar.

Los valores de los distintos componentes son englobados a través de la siguiente expresión:

$$FVI_{\text{Total}} = FVI_{\text{Social}} + FVI_{\text{Económico}} + FVI_{\text{Ambiental}} + FVI_{\text{Físico}} \quad (6)$$

donde FVI_{Total} es el índice de vulnerabilidad total.

Resultados y discusión

Mapas de riesgo por inundación en la cuenca Atemajac

En la figura 6 se muestran las áreas de inundación obtenidas a lo largo del río Atemajac con el HEC-RAS, para los periodos de retorno de 50 y 100 años. El tono más oscuro denota el cauce del río, mientras que el más claro muestra las zonas inundables. Se observa que no hay diferencia significativa entre los resultados de ambos periodos de retorno en cuanto a la superficie que abarcan las zonas inundables. Esto se debe principalmente a la configuración topográfica del área de estudio, pues existen pocas zonas de planicie en los linderos del río y barreras naturales que impiden el crecimiento de las manchas de inundación. La infraestructura hidráulica de los retornos viales también es un factor preponderante en el comportamiento del escurrimiento, ya que al verse rebasada su capacidad hidráulica funcionan como controladores del flujo hacia aguas abajo de éstas. La superficie de inundación para el periodo de retorno de 50 años es de unos 0.68 km², mientras que para 100 años la mancha es de unos 0.73 km².

A pesar de que las manchas de inundación no crecen de forma significativa en la superficie,

la profundidad es mayor en las zonas inundables para el caso del periodo de retorno de 100 años, siendo de 1.00 m como máximo; mientras que para 50 años, los tirantes de inundación alcanzan como máximo 0.80 m. La profundidad es un parámetro determinante para establecer los costos de daños por las inundaciones con base en las curvas logarítmicas del cuadro 3. Como resultado del análisis de costos de daños por inundación se muestra la figura 7, donde se ilustra el número de casas afectadas por inundaciones y los costos más probables en miles de dólares de acuerdo con los índices de marginación, por tramo del río y por cada periodo de retorno. El tramo T2 es el más afectado en profundidad y extensión de inundación, el cual cuenta con índices de marginación de medio a bajo según el INEGI, y los costos de daños causados por las inundaciones en casa habitación resultan ser los más altos en suma, en comparación con los otros tramos. Para un periodo de retorno de 50 años, para los tres índices de marginación, los costos más probables son superiores, en suma, al millón de dólares, mientras que para 100 años llegan a superar los 1.77 millones de dólares. El tramo con menor afectación en cuanto a costos y número de casas afectadas es el T4, con costos que no rebasan los 45 mil dólares para 50 años y los 200 mil dólares para 100 años. Para el tramo T3 no se cuenta con el cálculo de costos de daños por inundación, dado que es el tramo donde el río está entubado y por tanto no hay desbordamientos en las zonas aledañas.

Las figuras 8 y 9 muestran los mapas de riesgo por inundación en la zona aledaña al río Atemajac, cuantificado a través de rangos de costos de daños. La figura 8 corresponde al mapa de riesgo el periodo de retorno de 50 años, y la figura 9 concierne a 100 años de periodo de retorno.

Los 10 pasos viales que cruzan el río a través de entubamientos y el tramo entubado T3 generan cuellos de botella en las secciones donde se localizan. A través de la escala de grises se observa que el tramo de mayor riesgo es el T2, donde el tono más oscuro es predominante para ambos periodos de retorno. Para un periodo de

Cuadro 4. Indicadores del componente social de los FVI.

| FVI social (FVI _s) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|---|--------------------------------|
| Indicador | Abreviación | Concepto | t1 | t2 | t3 | t4 | Unidad | Descripción | Fuente |
| Población en área de inundación | Pfa | E | 1 268 | 2 559 | 2 | 466 | Personas | Número de personas viviendo en área de inundación | Método determinista |
| % de área urbanizada | Ua | E | 91.12 | 85.43 | 89.20 | 61.36 | % | % de área urbanizada | AGEB |
| % de viviendas en abandono | dis | E | 10.52 | 14.25 | 11.97 | 18.85 | % | % de viviendas en abandono en función de las viviendas totales | AGEB |
| Experiencias de aprendizaje | Pe | S | 951 | 1279 | 2 | 466 | Personas | Número de personas que han sido afectadas por inundación en función de la población | Encuesta / método determinista |
| Mortalidad infantil | Cm | S | 6.91 | 5.06 | 5.33 | 4.58 | Personas | Número de niños fallecidos menores a 12 años de edad | AGEB |
| Acceso a medios de información | Cpr | S | 77.73 | 85.58 | 88.65 | 87.35 | % | % de viviendas con radio, TV e Internet | AGEB |
| Índice de desarrollo humano | HDI | S | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | adim | Índice de desarrollo humano | coepo.jalisco.gob.mx |
| Sistemas de alarma | Ws | Res | 1 | 1 | 1 | 1 | adim | Si no existen, el valor es 1 | Encuesta |
| Rutas de evacuación | Er | Res | 100 | 100 | 100 | 100 | % | % de calles pavimentadas | Visita <i>in situ</i> |
| Conciencia/preparación | AP | Res | 7.5 | 8.3 | 9.2 | 9.1 | adim | Número que representa el nivel de conciencia, rango entre 1 y 10 | Encuesta |

Cuadro 5. Indicadores del componente económico de los FVI.

| FVI económico (FVI _e) | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|----------------|---|-----------------------|
| Indicador | Abreviación | Concepto | t1 | t2 | t3 | t4 | Unidad | Descripción | Fuente |
| Uso de suelo | Lu | E | 8.88 | 14.57 | 10.8 | 38.64 | % | % de áreas verdes | AGEB |
| % de área urbanizada | Ua | E | 91.12 | 85.43 | 89.20 | 61.36 | % | % de área urbanizada | AGEB |
| Desempleo | Um | S | 3.58 | 2.82 | 2.49 | 2.29 | % | % de personas desempleadas de la población económicamente activa | AGEB |
| Desigualdad | Ineq | S | 0.70 | 0.48 | 0.40 | 0.44 | adim | Número entre 0 y 1, en función de la educación; 0 significa baja vulnerabilidad | AGEB |
| Volumen de lluvia anual | Vyear | S | 602 | 485 | 185 | 185 | m ³ | Volumen de lluvia escurrido para un periodo de retorno de Tr 50 años | Método determinista |
| Expectativa de vida | Lei | S | 75.4 | 75.4 | 75.4 | 75.4 | adim | Años de expectativa de vida | cuéntame.inegi.org.mx |
| Inversión gubernamental | Amlnv | Res | 12.37 | 12.37 | 12.37 | 12.37 | \$ | Inversión estimada anual para mantenimiento, en millones de pesos | SIOP |
| Capacidad de regulación | Dsc | Res | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | m ³ | Capacidad de vasos reguladores según el organismo operador | SIAPA |
| Seguros contra inundación | Fi | Res | 0 | 0 | 0 | 0 | \$ | Monto de las viviendas aseguradas | Encuesta |
| Experiencias de aprendizaje | Pe | Res | 0.75 | 0.50 | 1.00 | 1.00 | adim | % de personas que cuenta con experiencia en inundación | Encuesta |

Cuadro 6. Indicadores del componente ambiental de los FVI.

| FVI Ambiental (FVI _A) | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|------------------------------------|----------------------|
| Indicador | Abreviación | Concepto | t1 | t2 | t3 | t4 | Unidad | Descripción | Fuente |
| Uso de suelo | Lu | E | 8.88 | 14.57 | 10.8 | 38.64 | % | % de áreas verdes | Método determinista |
| Crecimiento urbano | Ug | S | 20.97 | 23.52 | 17.24 | 20.36 | % | % de crecimiento urbano en 10 años | Ayuntamiento GDL-ZPN |
| Lluvias | Rainfall | S | 977.8 | 977.8 | 977.8 | 977.8 | mm/año | Promedio de precipitación anual | Conagua |
| Evaporación | Ev | S | 1 705.8 | 1 705.8 | 1 705.8 | 1 705.8 | mm/año | Tasa de evaporación anual | Conagua |

Cuadro 7. Indicadores del componente físico de los FVI.

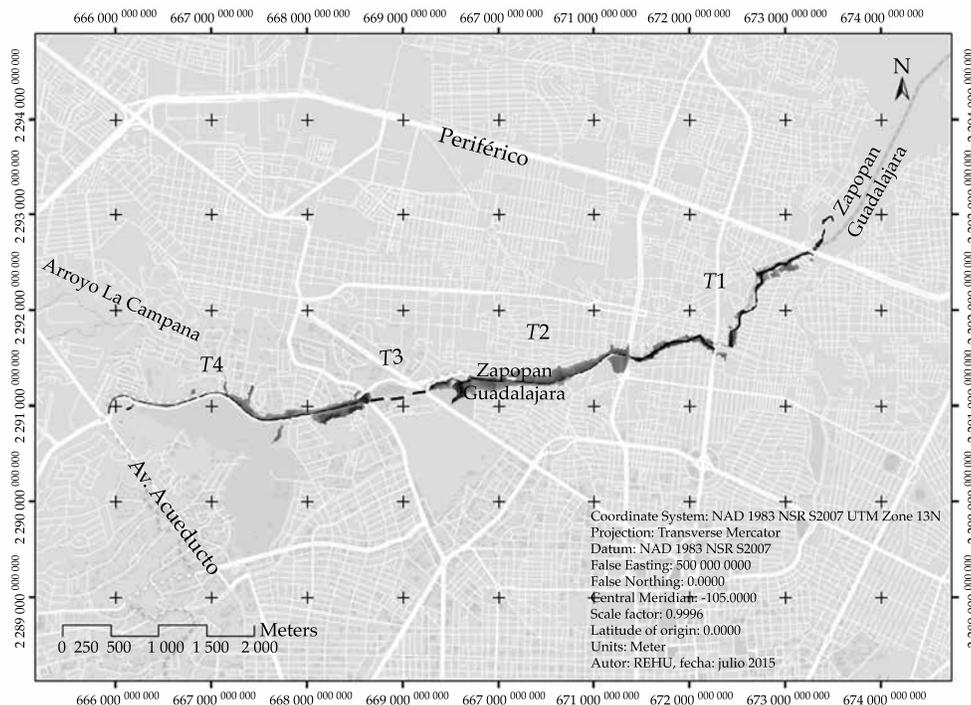
| FVI Físico (FVI _F) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|----------|---------|---------|---------|---------|----------------|--|---------------------|
| Indicador | Abreviación | Concepto | t1 | t2 | t3 | t4 | Unidad | Descripción | Fuente |
| Topografía de cauces | T | E | 13.27 | 51.98 | 18.25 | 18.25 | adim | Pendiente promedio al millar en las microcuencas relacionadas con el tramo | Método determinista |
| Proximidad al río | Pr | E | 35.0 | 25.0 | 0.01 | 35.0 | m | Distancia promedio al eje del río | Método determinista |
| Tasa de evaporación | Ev | E | 1 705.8 | 1 705.8 | 1 705.8 | 1 705.8 | mm/año | Tasa de evaporación al año | Conagua |
| Lluvias | Rainfall | E | 977.8 | 977.8 | 977.8 | 977.8 | mm/año | Promedio de precipitación al año | Conagua |
| Volumen anual | Vyear | E | 602 | 485 | 184 | 184 | m ³ | Volumen de lluvia escurrido para un periodo de retorno de T_r 50 años | Método determinista |
| Capacidad de regulación | Dsc | Res | 0 | 0 | 0 | 0 | m ³ | Capacidad de vasos reguladores | SIAPA |
| Diques | DI | Res | 0 | 0 | 0 | 0 | km | Longitud de la estructura rompepicos | Visitas de campo |

retorno de 50 años, los tonos claros prevalecen, lo cual se interpreta como zonas de menor riesgo por inundación; para 100 años se observa la aparición de zonas con un riesgo de moderado a alto, en tonos oscuros, justo en la parte aledaña al tramo T2 del río Atemajac.

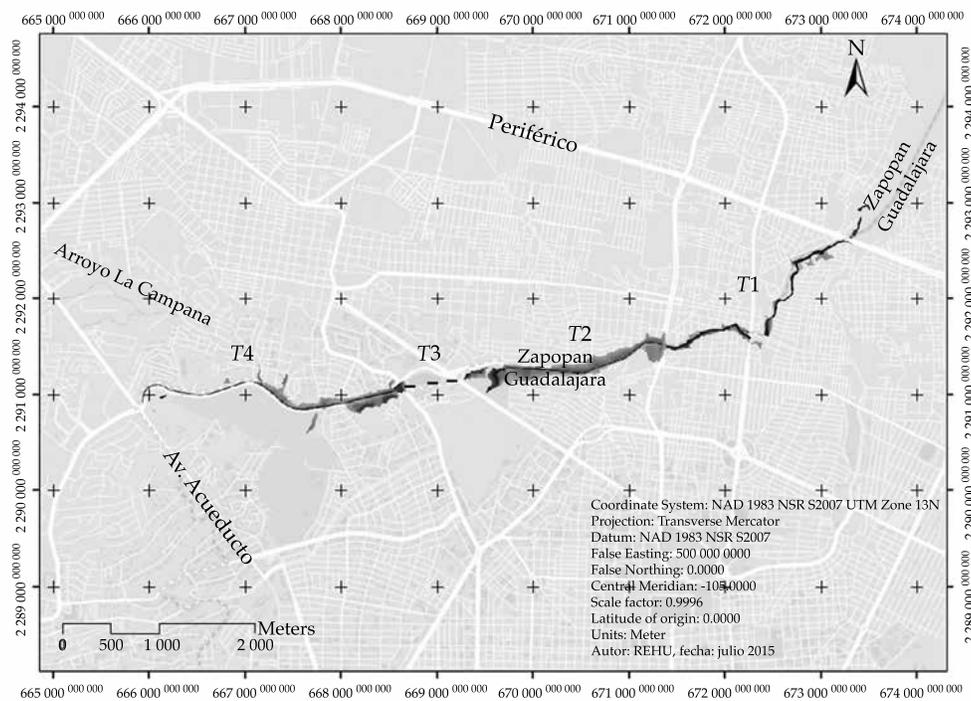
Índices de vulnerabilidad por inundación en la cuenca Atemajac

Los FVI normalizados mediante la ecuación (5) de las cuatro componentes se muestran en la figura 10 por tramo. El FVI social señala al

tramo T2 como el más vulnerable. El tramo T2 cuenta con la mayor concentración de población y mayor porcentaje de viviendas abandonadas, también tiene el segundo índice más alto de mortalidad infantil y el penúltimo índice de acceso a medios de comunicación en relación con los otros tramos. Los tramos T3 y T4 son los menos vulnerables debido a la baja población residente, mayores índices de conciencia ante el peligro de las inundaciones, menor mortalidad infantil y mayores índices de acceso a medios de comunicación. Los tramos T1 y T2 prácticamente son similares para el FVI económico, que se



a) Escenario para $T_r = 50$ años



b) Escenario para $T_r = 100$ años

Figura 6. Predicción de las zonas inundables a lo largo del cauce del río Atemajac en el área metropolitana de Guadalajara.

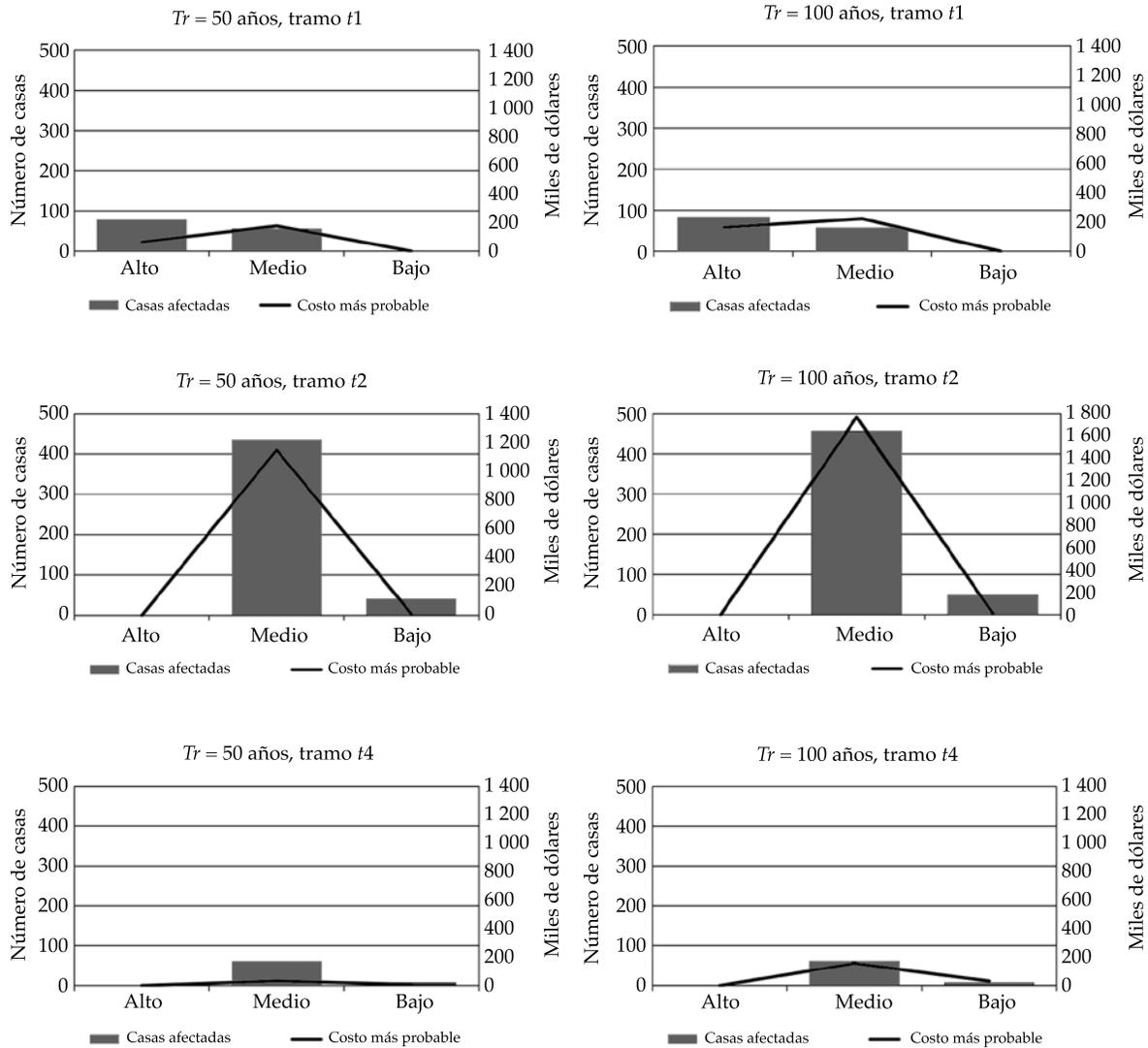


Figura 7. Costo de daños por inundación de acuerdo con el índice de marginación.

ve afectado en particular por los volúmenes de lluvia esperados, pues el volumen que escurre en estos tramos es el acumulado de los tramos de aguas arriba. En el tramo T1 se presentan los mayores índices de urbanización, porcentaje de personas desempleadas, desigualdad y menor porcentaje de áreas verdes. El tramo T2 cuenta con el menor índice de personas con experiencias de inundación con base en las encuestas realizadas, lo que lo hace ligeramente más vulnerable que el tramo T1.

Los tramos T3 y T4 se encuentran menos vulnerables en la componente económica, pues la población ahí tiene los menores índices de desempleo, lo que genera una mayor resiliencia, además de que cuentan con más áreas verdes que propician la infiltración. Para el FVI ambiental se observa que el tramo T1 es el más vulnerable, pues las microcuencas que escurren directamente en él muestran un menor porcentaje de áreas verdes. En el caso del tramo T3, su vulnerabilidad ambiental se puede asociar

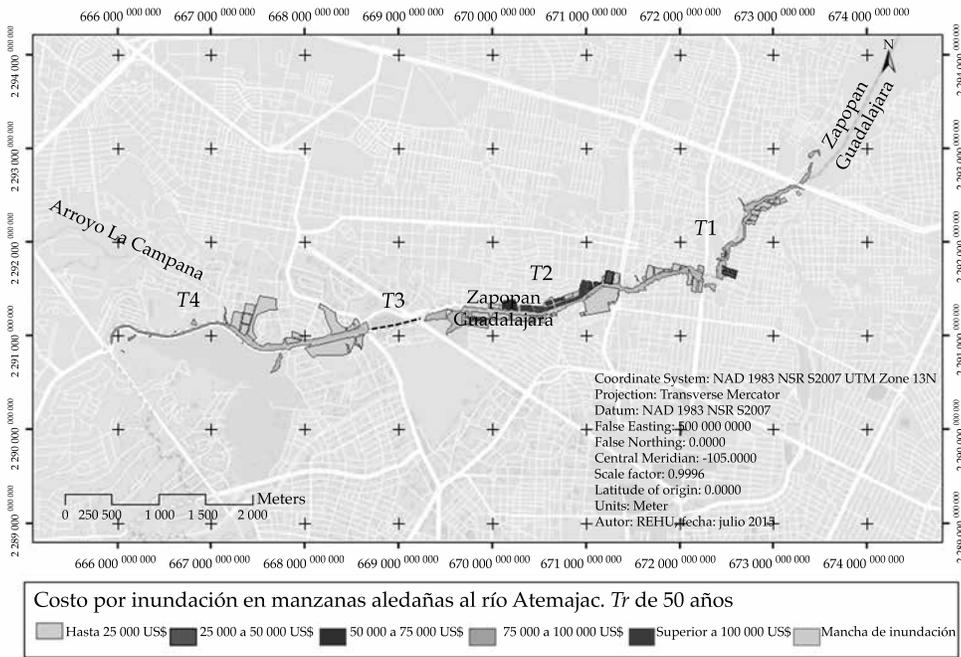


Figura 8. Mapa de riesgo por inundación en la zona aledaña al río Atemajac para un $Tr = 50$ años.

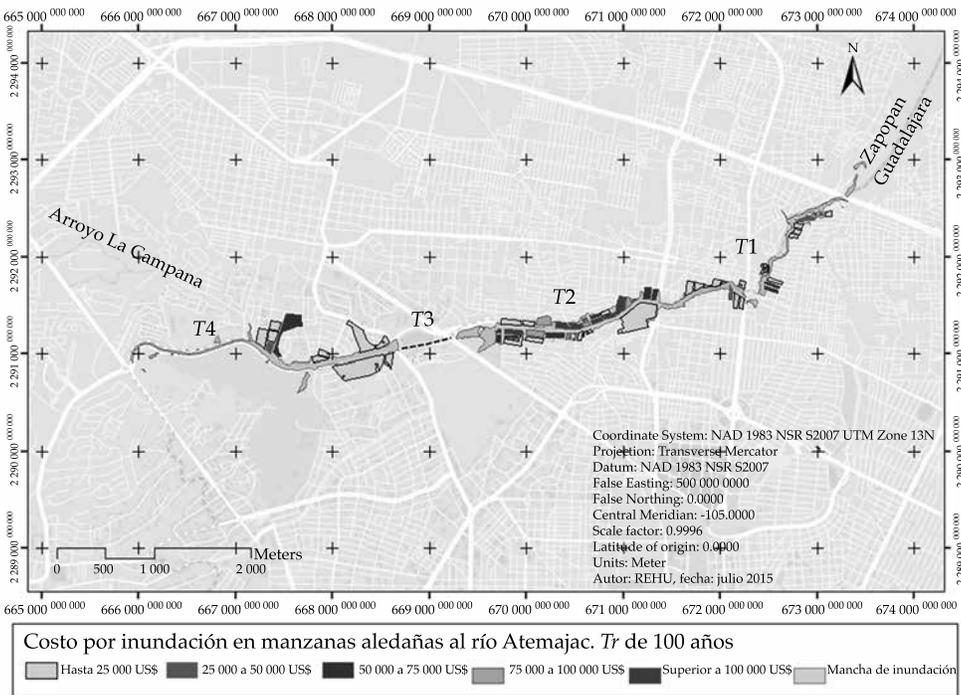


Figura 9. Mapa de riesgo por inundación en la zona aledaña al río Atemajac para un $Tr = 100$ años.

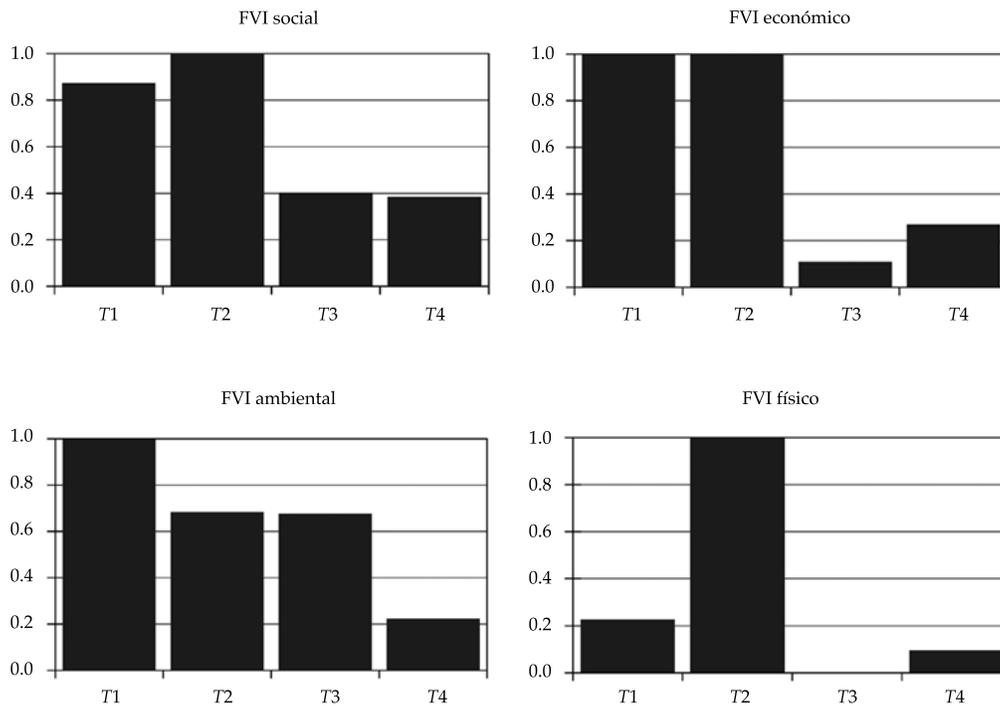


Figura 10. Índices de vulnerabilidad por inundación (FVI) normalizados, por componente y por tramo.

con el impacto que originó la invasión de las áreas verdes y del cauce del río Atemajac por la construcción del Centro Comercial Plaza Patria a lo largo del tramo. Todos los tramos presentan variaciones significativas en el porcentaje de áreas verdes, siendo el tramo T4 el que tiene más área verde en las microcuencas que escurren en él, sobre todo gracias a la presencia del bosque Colomos, en la margen derecha del tramo. Por último, en cuanto al FVI físico, el tramo T2 es el más vulnerable. Este resultado refleja la poca capacidad hidráulica del río en ese tramo, lo que permite desbordamientos ante la ocurrencia de tormentas incluso normales. Asimismo, se observa que el tramo T2 tiene en promedio viviendas más cercanas a los hombros del río. Los tramos T1 y T4 presentan valores de vulnerabilidad más bajos que el T2 debido a su capacidad hidráulica en las secciones del cauce del río Atemajac. Por último, el tramo T3 genera casi vulnerabilidad nula al estar entubado.

En la figura 11 se muestran los FVI totales por cada tramo en su forma normalizada. De los cuatro tramos, el T2 es el más vulnerable, comparado con los otros tres. Los FVI social y físico son los más determinantes en el resultado. La vulnerabilidad total del tramo T2 se debe en especial a dos rasgos cruciales: es el tramo con mayor población en áreas propensas a inundarse y su sección hidráulica es limitada. El FVI del tramo T1 no se queda tan atrás en relación con el T2, también denota una alta vulnerabilidad que se atribuye a las tasas de desempleo, mortalidad infantil, desigualdad y marginación, que son importantes. Asimismo, este tramo T1 recibe el acumulado del escurrimiento de la cuenca y los habitantes exhiben poca conciencia ante la presencia de inundaciones potenciales. Los factores que reducen la vulnerabilidad en el tramo T1 son la pobre capacidad de generación de escurrimiento de sus microcuencas, además de que existe un menor número de habitantes

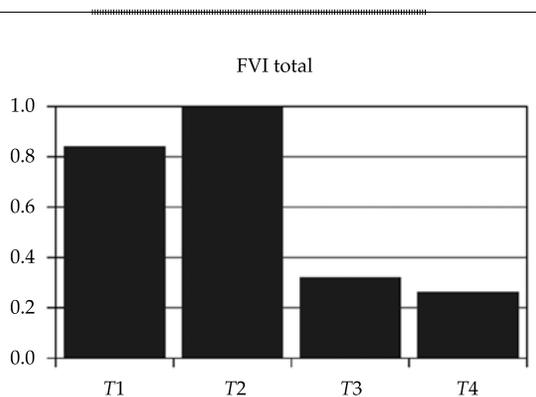


Figura 11. Índices de vulnerabilidad por inundación totales (FVI) normalizados por tramo.

propenso a sufrir daños por inundaciones por la topografía de la zona. Los tramos T3 y T4 se mantienen como los menos vulnerables gracias a los siguientes indicadores: presentan la menor desigualdad económica; menor marginación; mayor índice de penetración de

información; más cantidad de áreas verdes (en el caso de tramo T4); menor desempleo; mayor conciencia del peligro y, sobre todo, están en la parte alta del río Atemajac.

Finalmente, en la figura 12 se muestra el mapa de vulnerabilidad por tramo del río Atemajac, donde los tonos oscuros denotan una vulnerabilidad alta y, por el contrario, los tonos más claros denotan una vulnerabilidad baja, según los FVI totales de cada tramo. Haciendo una contrastación entre estos mapas y los mapas de riesgo de las figuras 9 y 10, es posible observar que ambas metodologías, tanto la determinista como la paramétrica, son consistentes, identificándose al tramo T2 como el de mayor riesgo y el más vulnerable a las inundaciones, seguido del tramo T1, que presenta también algunas zonas aledañas al río en riesgo, con vulnerabilidad relativamente alta.

Los FVI generados para el caso de la cuenca Atemajac logran reducir la complejidad ligada con la vulnerabilidad por la cantidad de



Figura 12. Mapa de vulnerabilidad trazado conforme los FVI por tramo.

indicadores que intervienen en su definición, tal como lo realizaron Balica (2012), y Villordon y Gourbesville (2016), entre otros autores.

Por otro lado, en el presente trabajo se adaptaron las formulaciones de los FVI a las condiciones particulares de la cuenca en estudio, es decir, escala, calidad y cantidad de información, condiciones socioeconómicas, condiciones físicas y geográficas, y aspectos culturales, entre otros, logrando con ello formulaciones únicas.

Conclusiones

Se desarrolló una metodología de análisis de riesgo por inundación aplicable a cuencas urbanas conformada por modelos que son complementarios: el determinista y el paramétrico. Mientras que el modelo determinista permitió generar mapas de riesgo donde se ilustran posibles daños asociados con las inundaciones por zonas y por periodo de retorno, el modelo paramétrico conceptualizó la vulnerabilidad en los aspectos social, económico, físico y ambiental, solventando la complejidad de los factores que la definen.

Como resultado de la aplicación de esta metodología en la cuenca urbana Atemajac, se observó que el tramo T2 agrupa las condiciones idóneas para que exista un alto riesgo y una alta vulnerabilidad por inundación. El modelo determinista evidenció importantes zonas de inundación para los dos periodos de retorno analizados, 50 y 100 años. Además, el análisis del costo de daños confirmó que ante la ocurrencia de inundaciones severas, el tramo T2 representaría mayores costos y, por tanto, un mayor riesgo. Al describir la vulnerabilidad con el modelo paramétrico, se confirmó que el tramo T2 es el más vulnerable, en particular en cuanto a rasgos sociales, económicos y físicos.

Con la parametrización de 30 indicadores que describen la vulnerabilidad, de escalas y variabilidad diferentes, que dan cuenta de aspectos asociados con el desarrollo de un sector de la población, ha sido posible proporcionar una mayor cantidad de elementos de juicio, en específico para los tomadores de decisiones.

Varios de estos indicadores difícilmente se podrían visualizar sólo con mapas de riesgo, pues algunos resultan hasta intangibles, como es el caso de los indicadores que cuantifican las experiencias de aprendizaje de la población en relación con las inundaciones o la conciencia ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos. Existen otros indicadores que sólo se pueden definir averiguando en la población, como el acceso a medios de información, la existencia de sistemas de alarma y rutas de evacuación; u otros indicadores de tipo económico, que a partir de datos de las dependencias gubernamentales o del INEGI se pueden cuantificar, como desempleo, expectativa de vida de la población, o inversiones de los gobiernos en obras de mitigación o protección. Todos estos indicadores forman parte de la vulnerabilidad y por tanto son determinantes en la estimación del riesgo.

Este enfoque permite generar información complementaria que minimiza la incertidumbre en la estimación del riesgo y la metodología es replicable para cuencas urbanizadas donde existen daños asociados con las inundaciones por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos.

Referencias

- Alcocer-Yamanaka, V. (2011). *Construcción de mapas de riesgo e inundaciones en la región del Soconusco*. Tercer Seminario de Potamología-José Antonio Álvarez, 25 y 26 de agosto, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Alcocer-Yamanaka, V., & Rodríguez, J. (2013). *Mapas de riesgo de inundación*. Tercera reunión del grupo de trabajo de aguas urbanas UNESCO-PHI/LAC de Agosto, Buenos Aires, Argentina.
- Balica, S. (2007). *Development and application of flood vulnerability index methodology for various spatial scale*. MSc thesis. Delft, Netherlands: UNESCO-IHE Delft University and Technology.
- Balica, S. (2012). *Development and application of flood vulnerability index methodology for various spatial scale*. PhD thesis. Delft, Netherlands: UNESCO-IHE Delft University and Technology.
- Balica, S., Popescu, I., Beevers, L., & Wright, N. (2012). 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.
- Benjamin, M. (2008). *Investigating physical and social dimensions*. MSc thesis. Cape Town, South Africa: University of Cape Town.
- Cenapred (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgo: conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*. México, DF: Secretaría de Gobernación.
- Cenapred (2011). *Manual para el control de inundaciones*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cenapred (2013). *Metodologías propuestas por el Cenapred para elaborar mapas de riesgo por inundación*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cervantes-Jaimes, C., Alcocer-Yamanaka, V., Arreguín-Cortés, F., Saavedra-Horita, R., & Rubio-Gutiérrez, H. (2012). *Generación de mapas de riesgo de inundación*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, 7-9 de noviembre, Acapulco, Guerrero, México.
- Chen, J., Hill, A., & Urbano, L. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, 373, 184-192, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.021.
- Conagua (2012). *Regiones hidrológicas*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>.
- Connor, R. (2005). *Flood Vulnerability Index*. Recovered from: http://www.oieau.fr/mexico/Session_5-13/comms/09-WWF4_FVI.pdf.
- Díaz-Delgado, C., Baró-Suárez, J. E., Esteller-Alberich, M. V., Bedolla-Lara, S., Díaz-Espíritu, J. C., & Sánchez-Flores, O. (2012). Valoración económica de daños directos por inundación en Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México (pp. 157-176). En: *La importancia de las inundaciones en la gestión integrada de los recursos hídricos en México*. González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C., Guerra Cobián, V. H., Gutiérrez López, M. A., & Ramos Salinas, N. M. (eds.). Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Douben, N. (July, 2006). Characteristics of river floods and flooding: A global overview, 1985-2003. *Irrigation and Drainage*, 55(S1), S9-S21, DOI: 10.1002/ird.239.
- Fedeski, M., & Gwilliam, J. (November, 2007). Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and Urban Planning*, 83(1), 50-61, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.05.012.
- Foudi, S., Osés-Eraso, N., & Tamayo, I. (2014). Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy*, 42, 278-292, DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.08.002.
- Greco, M., & Martino, G. (2016). Vulnerability assessment for preliminary flood risk mapping and management in coastal areas. *Natural Hazards*, 82(1), 7-26.
- IIEG (2012). *Zonas con mayor riesgo de inundación*. Recuperado de <http://www.iieg.gob.mx/general.php?id=7&idg=42>.
- Kwabena, E., Boakye-Danquah, J., Barima, A., Kofi, S., Mensah, R., Agyeman, Y., & Toloo, P. (2015). Community vulnerability assessment index for flood prone Savannah agro-ecological zone: A case study of Wa West District, Ghana. *Weather and Climate Extremes*, 10, 56-69.
- Little, R., & Rubin, D. (1983). On jointly estimating parameters and missing data by maximizing the complete-data likelihood. *The American Statistician*, 37(3), 218-220.
- Llaguno-Gilberto, O. (2014). *Generación de mapas de riesgo considerando la topografía urbana, aplicado a la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca*. M.I. Tesis. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Notaro, V., De Marchisa, M., Fontanazza, C. M., La Loggiab, G., Puleob, V., & Frenia, G. (2013). The effect of damage functions on urban flood damage appraisal. *Procedia Engineering*, 70(2014), 1251-1260.
- Salas-Limón, D. (2015). *Análisis de los efectos indirectos e intangibles asociados a riesgos por inundación en la ciudad de Monterrey, México*. Tesis de doctorado. San Nicolás de los Garza, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Sarhadi, A., Soltani, S., & Modarres, R. (2012). Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 458-459, 68-86.
- Sebald, C. (2010). *Towards an integrated flood vulnerability index – a flood vulnerability assessment*. MSc thesis. Southampton, UK: University of Southampton.
- SIAPA (2007). *Programa de manejo integral de aguas pluviales de la zona metropolitana de Guadalajara PROMIAP*. Guadalajara, México: Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado.
- UNESCO (2002). *Gestionar los riesgos*. Recuperado de http://webworld.unesco.org/water/wwap/facts_figures/gestionar_riesgos.shtml.
- Villordon, M. B. B., & Gourbesville, P. (2016). Community-based flood vulnerability index for urban flooding: Understanding social vulnerabilities and risks. *Advances in Hydroinformatics, Springer Water*, 75-96.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *Natural hazards people's vulnerability and disaster*. London: Routledge.
- Zhaoli, W., Hongliang, M., Chengguang, L., & Haijuan, S. (2012). Set pair analysis model based on GIS to evaluation for flood damage risk. *Procedia Engineering*, 28, 196-20.

Dirección institucional de los autores

M.C. Rubén Ernesto Hernández-Urbe

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Guadalajara
Av. General Ramón Corona 2514
45201 Zapopan, Jalisco, México
Teléfono: +52 (33) 3669 3000, ext. 2474
ernesto.huribe@itesm.mx

Dr. Héctor Barrios-Piña

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey, Campus Guadalajara
Av. General Ramón Corona 2514
45201 Zapopan, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (33) 3669 3000, ext. 2300
hector.barrios@itesm.mx

Dr. Aldo I. Ramírez

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey
Av. Eugenio Garza Sada 2501
64700 Monterrey, Nuevo León, MÉXICO
Teléfono: +52 (81) 8358 2000, ext. 5561, ext. 104
aldo.ramirez@itesm.mx