

<http://amh.org.mx/cursos-modelacion-hidraulica/>

La Modelación Numérica en Hidráulica. Una Herramienta en la Planeación del Territorio

Aragón H. José Luis
De Luna C. Faustino
Vélez M. Laura
Fuentes M. Oscar
Rubio G. Horacio

La Modelación Numérica en Hidráulica. Una Herramienta en la Planeación del Territorio

ARAGON HERNANDEZ. José Luis.
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México,
JAragonH@iingen.unam.mx

DE LUNA CRUZ. Faustino.
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México,
FLunaC@iingen.unam.mx.

VELEZ MORALES. Laura.
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México,
LVElezM@iingen.unam.mx.

FUENTES MARILES. Oscar Arturo.
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México,
ofm@pumas.iingen.unam.mx

RUBIO GUTIERREZ. Horacio.
Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos,
Comisión Nacional del Agua, México,
horacio.rubio@conagua.gob.mx

Resumen— Se realiza la modelación numérica integrada hidrológica-hidráulica de una cuenca con población rural y urbana, con la finalidad de presentar y aplicar una metodología para determinar mapas de peligro y de riesgo por inundación. Se utiliza el modelo matemático bidimensional Flubidi, el cual utiliza un esquema en diferencias finitas explícito para resolver las ecuaciones de aguas someras. El resultado son valores máximos de la profundidad y la velocidad del flujo en cada celda de la malla en que se discretiza el dominio de cálculo. Los mapas de peligro se determinan con el nomograma de Dorrigo. Para la estimación del riesgo (Daño Anual Esperado) por inundación, solamente se considera la vulnerabilidad y el costo de los daños interiores de las viviendas expuestas. Con los resultados obtenidos en forma de mapas de peligro y de riesgo por inundación, se puede tener una primera panorámica de la situación actual, también en corto plazo se puede planear la ejecución de obras estructurales y la puesta en marcha de las no estructurales para el beneficio de la población y finalmente, a mediano y largo plazo dichos resultados se pueden utilizar en la planeación del territorio.

Palabras clave— Flujo bidimensional, modelación numérica integrada hidrológica-hidráulica, peligro, vulnerabilidad, riesgo, daño anual esperado

Abstract— Integrated hydrologic-hydraulic numerical modeling of a basin with rural and urban populations, in order to present and apply a methodology for determining hazard maps and flood risk is performed. The Flubidi dimensional mathematical model, which uses an explicit finite difference scheme for solving the shallow water equations, is used. The results are maximum values of depths and flow velocities at each grid cell in which the computational domain is discretized. Hazard maps are determined with the Dorrigo nomogram. To estimate the flood risk (Expected Annual Damage) only the vulnerability and the cost of inside damage of the exposed housing is considered. With the results in the form of hazard maps and flood risk, it can get a first overview of the current situation; even in the short term can plan the execution of structural works and the implementation of non-structural for benefit of the people, and finally the medium and long term these results can be used in land use planning.

Keywords— Two dimensional flow, integrated hydrologic-hydraulic numerical modeling, hazard, vulnerability, risk, expected annual damage

1. Introducción

Una inundación es el fenómeno natural que ocurre cuando una zona que habitualmente se encuentra seca, es cubierta temporalmente con un volumen de agua. La inundación de terreno natural, zonas agrícolas, industriales o urbanas, puede generar daños en la ganadería, agricultura, infraestructura y en la población, causando grandes pérdidas económicas e inclusive la pérdida de vidas humanas.

Entre los factores que condicionan las consecuencias de las inundaciones están la distribución espacial y temporal de la lluvia, la topografía, pendiente del terreno, el tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, las características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca, las características físicas de los cauces de los arroyos y ríos y la ubicación de las estructuras hidráulicas. De esta forma, de acuerdo a su origen las inundaciones se clasifican en pluviales (lluvias extremas), fluviales (desbordamiento de ríos) y costeras (marea de tormenta), y en función del tiempo de respuesta, estas pueden ser lentas (varias horas o días) o rápidas (minutos a unas cuantas horas) (Salas y Jiménez 2004).

El crecimiento acelerado de la población asentándose en zonas aledañas de los cuerpos de agua en combinación con un incremento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos, provocan efectos que pueden ser devastadores y se magnifican por una elevada vulnerabilidad y exposición de bienes, que se deriva entre otros, de la insuficiencia de medidas preventivas y de mitigación, falta de ordenamiento para los

asentamientos humanos y el inadecuado manejo y planeación de las cuencas hidrológicas, teniendo como consecuencia cuantiosos daños materiales y la pérdida de vidas humanas no solo a nivel mundial sino también en México.

Para prevenir y mitigar futuros desastres en estos sitios y en muchos otros, es indispensable emprender acciones de protección tanto estructurales (construcción de obras) como no estructurales (informar oportunamente de la ocurrencia de un evento). El objetivo de éstas, es reducir los daños materiales y evitar la muerte de personas. Para ello, se hace necesario el conocimiento de las inundaciones, que permitan generar información, por una parte para evaluar las condiciones actuales relacionadas con el riesgo por inundación y por la otra la planeación de acciones que ayuden a mitigar sus efectos.

El estudio de las inundaciones, conlleva el uso de modelos matemáticos para conocer la variación espacial y temporal de las variables hidráulicas. Para ello, actualmente es posible utilizar modelos numéricos comerciales o libres con aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) y tridimensionales (3D), y distintos esquemas numéricos (Chaudhry, 2008). Actualmente, con el avance de la tecnología y la capacidad de cálculo de los equipo de cómputo es posible emplear modelación integrada hidrológica-hidráulica, cuyas ventajas residen en la simplicidad al utilizar un único modelo y en algunos aspectos clave como pueden ser las condiciones de contorno que permite una mejor aproximación (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

El resultado de dichos modelos son profundidades y velocidades del flujo en cada celda en que se discretiza el dominio de cálculo para cada instante de tiempo. La cantidad de información es tan alta, que el proceso de datos, la interpretación de resultados y la visualización de los mismos no son sencillos, por lo que se hace necesario el apoyo de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados permiten generar distintos tipos de mapas encaminados a una mejor prevención y planeación del territorio.

En la estimación del riesgo intervienen diferentes conceptos como son: amenaza, peligro, exposición y vulnerabilidad, los cuales tienen que ser evaluados de alguna manera. En los últimos años diversos autores han propuesto expresiones para definir una escala de peligro, ya sea teórica o experimental en función de los valores máximos de la profundidad, la velocidad o una combinación de los mismos, tanto para zonas rurales (Belleudy, 2004; Témez, 1992), como para zonas urbanas (CCRC, 1999; Gómez, 2008).

Para evaluar los daños potenciales (directos) por inundación y con ello evaluar la vulnerabilidad de los bienes expuestos se han desarrollado principalmente curvas que permiten determinar el grado o porcentaje de afectación de un bien, en función principalmente de la profundidad de inundación (Baró et al., 2012; Eslava et al., 2006; FEMA, 2001).

En este trabajo se presenta una descripción general de los elementos a considerar en la modelación numérica bidimensional integrada hidrológica-hidráulica, con la finalidad de generar mapas de peligro por inundación y la estimación del riesgo por inundación o daño anual esperado (DAE), haciendo una aplicación a la cuenca del río Palizada. El trabajo se estructura con la actual introducción, la metodología, una aplicación, resultados y su análisis y finalmente, las conclusiones.

2. Metodología

La metodología empleada para la estimación del riesgo por inundación se esquematiza en la figura 1. En dicho esquema, destacan los datos que sirven de entrada al modelo numérico, y la relación existente entre los conceptos de peligro-vulnerabilidad-riesgo y los elementos asociados para su evaluación. En

este apartado se expondrá brevemente cada uno de ellos.

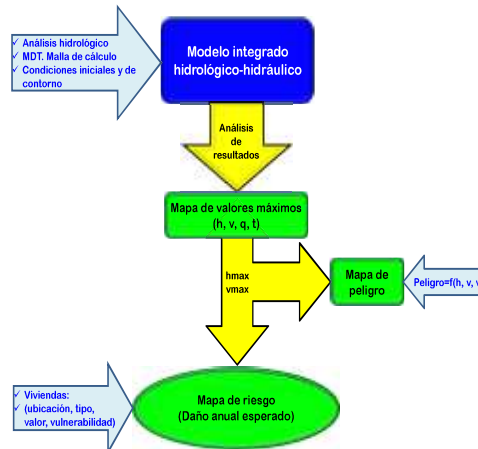


Figura 1: Elementos que intervienen en la estimación del riesgo.

Fuente: Autores

Modelos numéricos

Para conocer la evolución espacial y temporal de las variables hidráulicas del flujo de agua sobre la superficie, se han desarrollado modelos numéricos ya sea académicos, libres o comerciales que permiten representar la realidad de forma simplificada empleando ecuaciones con aproximación en 1D, 2D e incluso en 3D, empleando esquemas en diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos para su resolución (Tabla 1). Cada uno de ellos tiene ventajas e inconvenientes, relacionados principalmente con su dimensionalidad, ecuaciones empleadas, la cantidad de información requerida y el tiempo de cálculo (Chaudhry, 2008). Por ejemplo, los modelos en 1D son recomendables en tramos de ríos donde el flujo se mantiene dentro del cauce y la velocidad predominante del flujo se puede considerar en la dirección del eje del río, en cambio, cuando existe desbordamiento del flujo hacia las llanuras de inundación, es necesario el uso de modelos en 2D, debido a que se presentan velocidades en dos dimensiones en el plano horizontal. Cuando el flujo es complejo y se desea conocer la estructura del flujo, los modelos en 3D son los indicados.

Modelo	Aproximación	Tipo	Esquema numérico
HEC-RAS	1D, quasi2D	Libre	Diferencias finitas
Flubidi	2D	Académico	Diferencias finitas
Iber	2D	Libre	Volúmenes finitos
InfoWorks	1D, 2D, 3D	Comercial	Volúmenes finitos
Mike	1D, 2D, 3D	Comercial	Volúmenes finitos
Sobek	1D, 2D, 3D	Comercial	Volúmenes finitos
Fluent	3D	Libre	Volúmenes finitos
Flow 3D	3D	Comercial	Volúmenes finitos
Telemac	1D, 2D, 3D	Libre	Elementos finitos

Tabla 1: Tipo y aproximación de modelos matemáticos
Fuente: Autores

Según lo anterior, el aumento en la precisión de la aproximación empleada, por un lado incrementa de forma sustancial el tiempo de cálculo, al mismo tiempo disminuye la superficie de aplicación, y por el otro se hace indispensable información topográfica de mejor calidad. Así, con la capacidad de cálculo de los equipos de cómputo con que se dispone actualmente, un modelo en 1D se puede aplicar en tramos largos de ríos, por su parte los modelos en 3D solamente se puede utilizar para modelar fenómenos locales de estructuras hidráulicas.

En un punto intermedio se encuentran los modelos en 2D. Estos modelos permiten modelar dominios de flujos diversos, con variaciones de velocidad o flujos transversales. Además, requieren de un esfuerzo computacional mayor que los modelos en 1D pero bastante menor que los modelos en 3D, así como de preparación de información espacial, para la generación de una malla de cálculo proveniente de un Modelo Digital de Terreno (MDT) lo suficientemente precisa. En este trabajo, debido a que se trata con flujo en ríos y llanuras de inundación donde la velocidad del flujo es predominante en dos direcciones espaciales, se describirá y utilizará un modelo en 2D.

En los flujos en lámina libre cuando el valor de las variables cambia poco en una misma vertical o el valor medio es suficiente para los objetivos perseguidos, se pueden hacer simplificaciones y obtener ecuaciones válidas cuando el flujo que se quiere representar tiene velocidades verticales pequeñas, distribución hidrostática de presiones en la vertical, dimensiones horizontales predominantes sobre la vertical y pendiente del fondo suave. Así, las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D se pueden escribir en forma conservativa como (Bladé et al., 2012):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = r - i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad [1]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + g\frac{h^2}{2}\right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

Donde h el calado, u la componente de la velocidad en dirección del eje x , v la componente de la velocidad en dirección del eje y , S_{0x} la pendiente del terreno en la dirección x , S_{0y} la pendiente del terreno en la dirección y , r la lluvia, i la infiltración, S_{fx} la pendiente de fricción o motriz en la dirección x , S_{fy} la pendiente de fricción o motriz en la dirección y ; las dos últimas se expresan como:

$$S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}}$$

$$S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}} \quad [2]$$

Donde n es el coeficiente de fricción de Manning.

El sistema de ecuaciones anterior forma un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales las cuales no tienen solución analítica salvo para tipos de flujo y casos específicos, por lo que es necesario recurrir a un método numérico.

Datos de entrada

Para realizar modelación numérica de una zona en particular, es necesario disponer de cierta información. La calidad de la misma repercutirá en los resultados. Entre la información necesaria se tiene:

1. Estudio hidrológico: El estudio hidrológico implica un análisis de frecuencias de las series de tiempo tanto de lluvia como de escurrimiento, además, es necesario hacer una validación tanto de la cantidad como de la calidad de las mismas para tener resultados con la menor incertidumbre posible.
2. Topografía y batimetría: La topografía puede provenir de diferentes fuentes, desde curvas de nivel, modelos digitales con distinta resolución espacial hasta información tipo LiDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*) con resolución espacial de hasta 1 m. Con cualquiera

de estas fuentes y el apoyo de un SIG se puede formar un MDT. Cuando en los cauces o lagunas existe la presencia de aguas se hace necesario un estudio de batimetría.

3. Malla de cálculo: El procesamiento del MDT lleva a una malla de cálculo. La forma, tipo y tamaño de los elementos de la misma, juega un papel importante en la modelación numérica. La forma y tipo puede tener ciertas repercusiones sobre la dirección de la velocidad del flujo. El tamaño puede tener consecuencias en el tiempo de cálculo, por ejemplo, elementos muy pequeños pueden generar una malla con un número elevado de elementos y longitud de los lados pequeña, en ambos casos, se puede tener un incremento sustancial del tiempo de cálculo. También, se deben evitar elementos con longitud de los lados desproporcionados. Las mallas de cálculo pueden ser estructuradas (elementos de tipo cuadrilátero que dan lugar a mallas ordenadas y eficientes) y no estructuradas (se adaptan a geometrías complejas pero requieren de una estructura de datos robusta y requerimientos de memoria altos). La malla deberá de ser más densa y precisa en aquellas zonas donde se producen fuertes cambios en el flujo y más gruesa en aquellas de menor interés (Blazek, 2005).
4. Condiciones iniciales y de contorno: Para resolver una ecuación diferencial y el sistema de ecuaciones [1] no es la excepción, son indispensables unas condiciones iniciales y unas condiciones de contorno. Las primeras son para indicarnos las condiciones de las variables al inicio de los cálculos, y las segundas, indican las condiciones del flujo en los límites del sistema físico, ya que estos tienen un tamaño finito.
5. Pérdidas de carga: Las pérdidas de carga por efecto de la fricción se estiman mediante fórmulas empíricas. La más empleada en hidráulica de ríos es la ecuación de Manning. El coeficiente de fricción de Manning se puede determinar a partir de valores teóricos de la literatura técnica en función de la rugosidad de la zona de estudio, o también puede emplearse como un parámetro de calibración (Chow, 1994a).
6. Localización y tipo de bienes expuestos: En

la estimación del riesgo por inundación es necesario conocer la localización y tipo de cualquier bien expuesto, ya sea, ganado, cultivos, infraestructura (carretera, ferroviaria, hospitalaria, educativa, industrial, urbana, etc.), hasta las propias personas. Incluir las todas no es sencillo, debido a que no se cuenta con la información necesaria y en algunos casos dichos bienes son dinámicos (rotación de cultivos, movimiento de ganado, vehículos, personas).

Peligro, vulnerabilidad y riesgo

El riesgo R es función del peligro P (relacionado con la ocurrencia de una amenaza), la vulnerabilidad V y costo C de los bienes expuesto, el cual se puede definir de forma general como:

$$R = f(C, P, V) \quad [3]$$

En función del área de aplicación, la ecuación puede tener diferentes interpretaciones.

La estimación del riesgo expresado en valor de cada bien expuesto o en valor total de la zona de estudio, está asociada un periodo de retorno o probabilidad de excedencia de la amenaza. La evaluación del riesgo para diferentes periodos de retorno da lugar a una curva de daños-probabilidad de excedencia. El área bajo dicha curva corresponde al DAE y representa el costo de daño total en promedio anual que puede ocasionar la ocurrencia de una amenaza, el cual se puede expresar como:

$$DAE = \int_0^1 Ddp \quad [4]$$

Donde D es el daño total y p es la probabilidad de ocurrencia.

Para entender en su conjunto los conceptos anteriores, es también necesario incluir el significado de la amenaza, la cual desencadena la evaluación de éstos. De esta forma se tienen las definiciones siguientes:

- Amenaza: Comúnmente corresponde al nombre del efecto del fenómeno natural ó antropogénico que causa daños.
- Peligro: Probabilidad de que uno de los efectos de la amenaza sea de cierta magnitud en un sitio específico.
- Vulnerabilidad: Susceptibilidad de cierto bien expuesto sea dañado, cuando se presenta una

- amenaza de determinada intensidad. Es la proporción del costo total de los daños a dichos bienes cuando ocurre una amenaza.

El costo total de los daños materiales D se calcula con la siguiente expresión:

$$D = \sum_{j=1}^n C_j V_j \quad [5]$$

Donde C_j y V_j son el costo y la vulnerabilidad del bien expuesto (valor entre 0 y 1) y n los bienes expuestos.

- Riesgo: Corresponde a la esperanza matemática o valor esperado del costo total de los daños D , producidos por la ocurrencia de una amenaza de origen natural o antropogénico, sobre los bienes expuestos, el cual se puede definir cómo:

$$R = E(D) = C_1 P_1 V_1 + C_2 P_2 V_2 + \dots + C_n P_n V_n = \sum_{j=1}^n C_j P_j V_j \quad [6]$$

Donde P_j es el peligro o probabilidad de ocurrencia del evento con periodo de retorno Tr .



Figura 2: Localización de la zona de estudio
Fuente: Autores

Datos de entrada:

En primer lugar se realizó un estudio hidrológico (O. A. Fuentes et al., 2013). Para el análisis de lluvia se utilizaron tres estaciones climatológicas (EC) con datos de lluvia acumulada en 24 horas (CLICOM, 2014) y la estación meteorológica automática (EMA) con datos de lluvia a cada 10 minutos (EMAs, 2014) de Ciudad del Carmen, Campeche. Con las primeras se determinaron los hietogramas asociados a diferentes periodos de retorno. La duración (10 días) y la distribución diaria de los mismos se determinaron en función de los registros de lluvia más extremos. La distribución horaria se obtuvo

3. Aplicación. Cuenca del Río Palizada

La aplicación de la metodología descrita en el apartado anterior, se realiza en la cuenca del río Palizada. Los detalles se describen a continuación.

Localización:

La cuenca del río Palizada se localiza en el sureste de la República Mexicana, y más concretamente en el estado de Campeche. Dicha área pertenece al organismo de cuenca Península de Yucatán y a la región hidrológica Palizada. La cuenca analizada tiene un área de 2,385 km² y sus afluentes principales son el río Palizada, río Blanco, río las Piñas, y el río el Este. Los primeros tres ríos se unen en la laguna el vapor, aguas abajo, en la laguna Santa Gertrudis se une por la margen derecha el río Este, posteriormente se forma la laguna el Viento; todo el sistema desemboca a la laguna de Términos (Figura 2). En la zona de estudio el número de viviendas de tipo rural son mayores a las urbanas.

partir de un análisis de las tormentas extremas registradas en la EMA. Las pérdidas de lluvia se estimaron con el método del número de curva del SCS (Chow, 1994b). De forma similar, se realizó un análisis de niveles con la estación hidrométrica (EH), localizada sobre el río Palizada (BANDAS, 2014), a partir del cual se obtuvieron limnigramas asociados a distintos periodos de retorno. Finalmente, dado que la cuenca tiene salida al mar, se utilizó el pronóstico de marea para la estación maregráfica (EM) de ciudad del Carmen, Campeche, estimado por el Servicio Mareográfico Nacional (SMN, 2014). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.

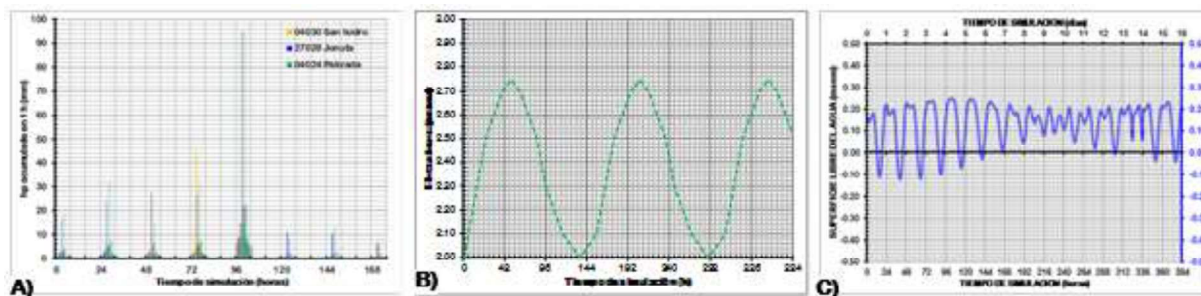


Figura 3: Condiciones de contorno a) Hietograma de precipitación. b) Limnigrama para un periodo de retorno de 100 años. c) Pronostico de marea
Fuente: Autores

Para representar la topografía se cuenta con información tipo LiDAR con resolución espacial de 5 m proveniente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2014). En la figura 2 se puede observar que la zona presenta poca pendiente (elevaciones de 0 a 13 msnm), lo que da lugar a zonas de flujo con velocidad baja y por lo tanto la existencia de lagunas. Dicha información fue discretizada en 376,376 celdas cuadradas de 100 m por lado.

Para representar la fricción del terreno se utilizaron coeficientes de fricción distintos, siendo estos de $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ en el cauce, y $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ en el resto del dominio de cálculo. Como condiciones iniciales se consideró una profundidad de agua de 0.10 msnm; como condición de contorno se utilizaron los hietogramas, hidrogramas y marea, información resultado del estudio hidrológico.

Con la información anterior se realizó una modelización integrada hidrológica-hidráulica empleando el modelo matemático Flubidi desarrollado originalmente por Fuentes y Franco (1997) y adaptado a las necesidades actuales por Fuentes y De Luna (2012). El modelo emplea las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D (ecuación), las cuales son resueltas a través del método de diferencias finitas con el esquema de McCormack (Chaudhry, 1993). En el caso de estudio, la hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios.

Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras en 2D son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables, y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes.

4. Resultados

La información generada por la aplicación de la metodología descrita, es cuantiosa e imposible mostrarla en su totalidad, por lo que es necesario emplear medios visuales para representarla de forma compacta, ello se logra a través de mapas. En los siguientes apartados por la disposición de espacio se presenta los resultados obtenidos correspondientes únicamente al periodo de retorno de 100 años.

Mapas de valores máximos:

Los resultados de modelación numérica son profundidades y velocidades para cada periodo de retorno, para cada celda y para cada instante de tiempo. Los resultados que se presentan en la figura 4 corresponden al valor máximo de la variable, que se presenta en cada una de las celdas en todo el tiempo de cálculo.

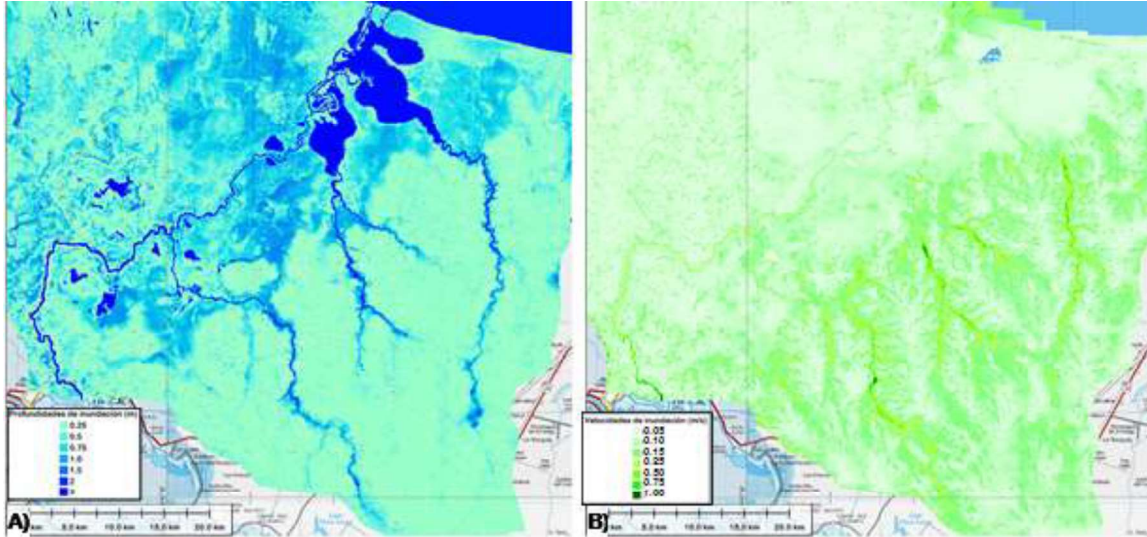


Figura 4: Mapas de valores máximos para un periodo de retorno de 100 años. a) Profundidad, b) Velocidad de Flujo
Fuente: Autores

Mapas de peligro:

Para calcular el peligro por inundación a partir de los valores máximos de la profundidad y la velocidad de inundación o una combinación de estas, descritos en el apartado anterior y como se vio en su momento existen diversas alternativas. En este trabajo se utiliza una propuesta del Gobierno de Nueva Gales del Sur, Australia, a partir de delimitar las áreas propensas a inundaciones en tres categorías (*floodways*, *flood storage* y *flood fringe*) en función de una relación profundidad-velocidad derivada a partir de pruebas de laboratorio y condiciones de inundación que causan daños, además, categorizando dichas áreas en peligro bajo,

transición y alto (DIPNR, 2005). Dicha metodología fue puesta en práctica en el estudio de inundaciones de Dorrigo (Paterson, 2007) resultando el nomograma que se muestra en la Figura 5, y adaptandolo a nuestros resultados y necesidades (O. A. Fuentes et al., 2013). Así, con los valores máximos tanto de la profundidad como de la velocidad de inundación de cada celda, se determina el grado de peligro al cual pertenece (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto). Los resultados obtenidos se muestran en forma de mapa en la figura 6.

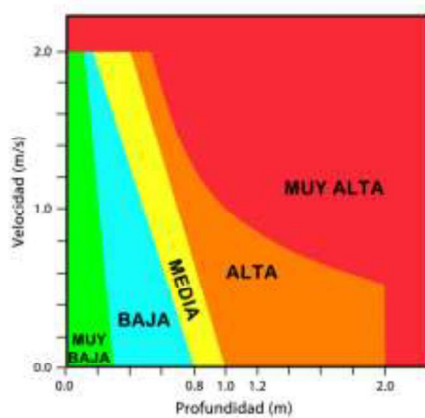


Figura 5: Nomograma de Dorrigo
Fuente: Paterson (2007)

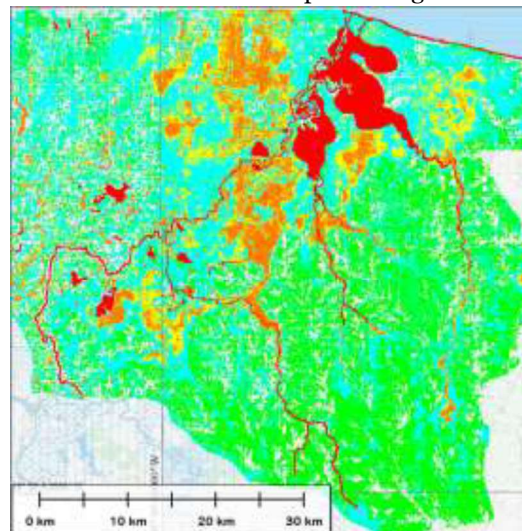


Figura 6: Mapa de Peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años. Fuente: Autores.

Estimación del riesgo

La estimación del riesgo implica conocer tres fuentes de información: localización, tipo, curvas de vulnerabilidad de las viviendas expuestas, a partir de las cuales se determina el costo de los daños en función de la profundidad de la inundación. La localización espacial de las viviendas se obtuvo de la

base de datos de localidades amanzanadas y números exteriores de INEGI (INEGI, 2010), resultando 1,500 viviendas urbanas y 2,600 viviendas rurales. Dado que no se dispone de información detallada de las mismas, solamente se distingue entre viviendas rurales (Figura 7A) y viviendas urbanas (figura 7B).

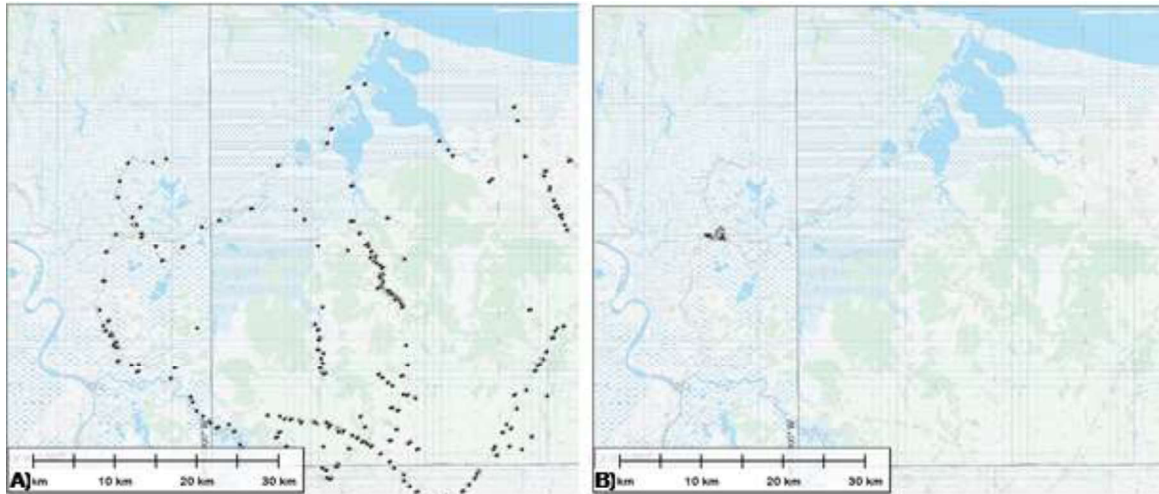
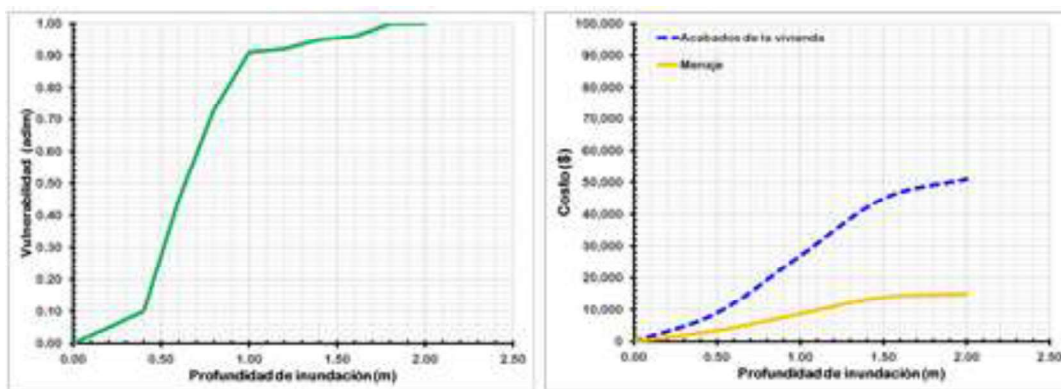


Figura 7: Localización de viviendas. A) Rurales. B) Urbanas.
Fuente: Autores.

Para estimar la vulnerabilidad de las viviendas, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) propuso diferentes tipos de viviendas en función de diferentes configuraciones de muebles y enseres domésticos y con ello determinó diferentes curvas de vulnerabilidad (Eslava et al., 2006). En la figura 8A se presentan las curvas de vulnerabilidad correspondientes a las viviendas rurales y urbanas, denominadas tipo I y II respectivamente. Para

estimar los costos de los daños en las viviendas, en función de la profundidad de la inundación, a partir de un estudio de mercado se obtuvo el costo promedio de las viviendas y se estimó el costo correspondiente al menaje y de acabados de las mismas (Velez, Fuentes, Rubio, & De Luna, 2014). Con dichos costos y las curvas de vulnerabilidad, se determinaron curvas de costos por daño por inundación para menaje y acabados (Figura 8B).



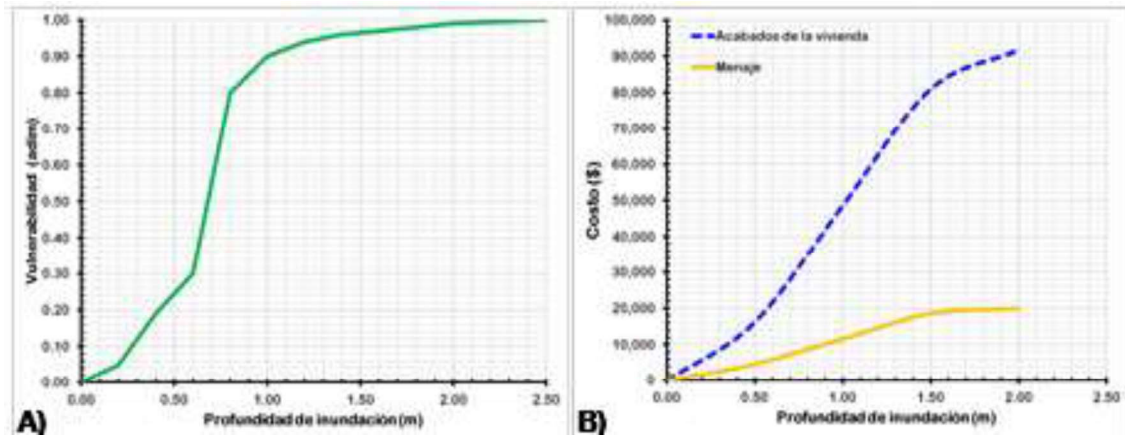


Figura 8: Curvas de vulnerabilidad y costos por inundación para viviendas tipo I y II
Fuente: Eslava et al. (2006) y Autores.

Finalmente, para determinar el riesgo por inundación, el procedimiento aplicado consiste en:

Para cada tipo de vivienda (I y II):

- Obtener la localización espacial de la vivienda Para cada periodo de retorno.
- Buscar el elemento de la malla de cálculo, donde se ubica la vivienda.
- Determinar la profundidad máxima del flujo de dicho elemento.
- Con la curva de costos correspondiente y la profundidad del flujo, se determina el costo tanto de acabados como de menaje y el costo

total.

- Se evalúa el riesgo, según la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- El DAE se estima como el área bajo la curva formada por el riesgo total obtenido para cada periodo de retorno (ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**).

El resultado de este proceso, es un mapa de riesgo como el mostrado en la figura 9, el cual ilustra el DAE para cada una de las viviendas del área de estudio (1 USD= \$13.50 MX).

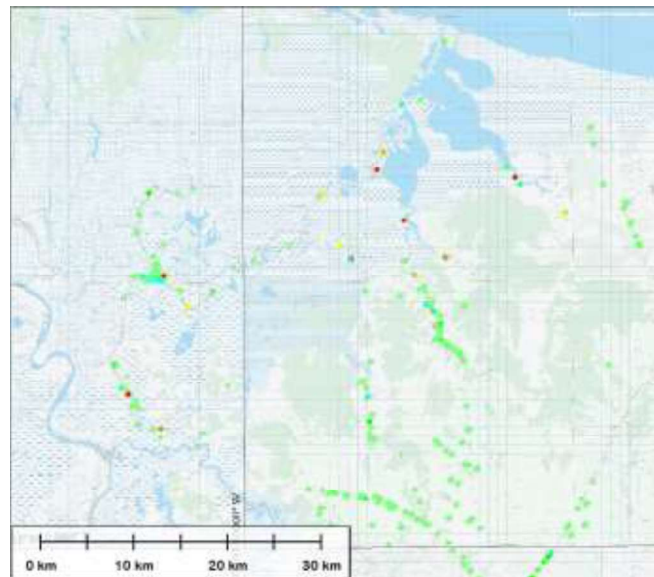


Figura 9: Mapa de riesgo por inundación
Fuente: Eslava et al. (2006) y Autores.

5. Análisis de Resultados

Los mapas de valores máximos, de peligro y de riesgo por inundación corresponden al periodo de retorno de 100 años. En ellos, de forma general se puede observar que los valores más desfavorables de profundidades, velocidades y peligro se localizan en los cauces y llanuras de inundación aledañas; como consecuencia de ello, el riesgo mayor para las viviendas también tiene el mismo comportamiento. Los resultados correspondientes a otros periodos de retorno (2, 5, 10 y 50 años) no mostrados por

cuestiones de espacio, tiene un comportamiento similar teniendo en cuenta la magnitud del evento.

La estimación del riesgo para cada uno de estos periodos de retorno, da lugar a una curva de daños en función de la probabilidad de excedencia de la inundación (Figura 10). El área bajo esta curva representa el DAE para la zona de estudio y las condiciones utilizadas, siendo este de \$1,708,104 MX/año (1 USD= \$13.50 MX).



Figura 10: Daño anual estimado para la zona de estudio
Fuente: Autores.

Del procesamiento de la información mostrada, además, se pueden obtener ciertos indicadores útiles en la toma de decisiones, entre ellos se encuentran, el tipo y total de viviendas afectadas (Figura 11A), la profundidad promedio de la inundación (Figura 11B). Por ejemplo para el periodo de retorno de 100

años de las 4,146 viviendas en el áreas de estudio se vieron afectadas 3,229 (78 %), de las cuales 1,729, fueron rurales y 1,500 urbanas, en éstas, en promedio se presentó una inundación con una profundidad promedio de 0.24 m.

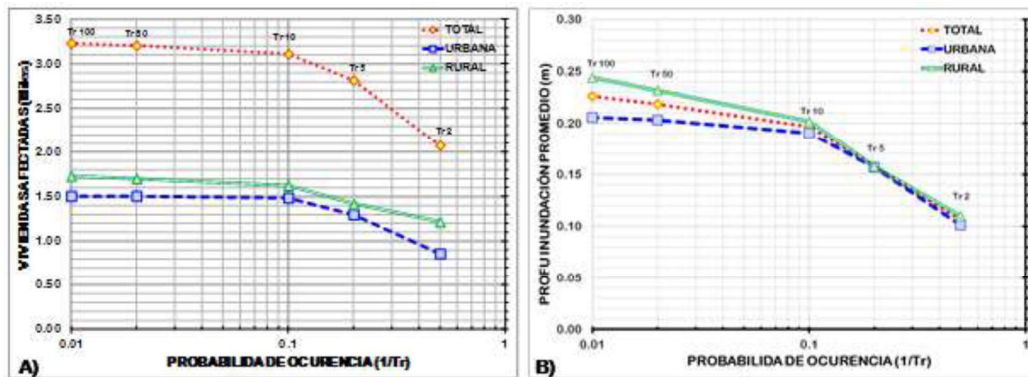


Figura 11: Viviendas afectadas y profundidad de inundación media para el estudio
Fuente: Autores.

También es posible obtener el tiempo de residencia de la inundación, lo cual puede ser útil, para que en un futuro se incorpore como variable para estimar los daños en los bienes expuestos. Así, en la figura 12

se muestran los tiempos de residencia para profundidades del flujo mayores a 0.25, 0.50 y 2.00 m, correspondientes a un periodo de retorno de 100 años.

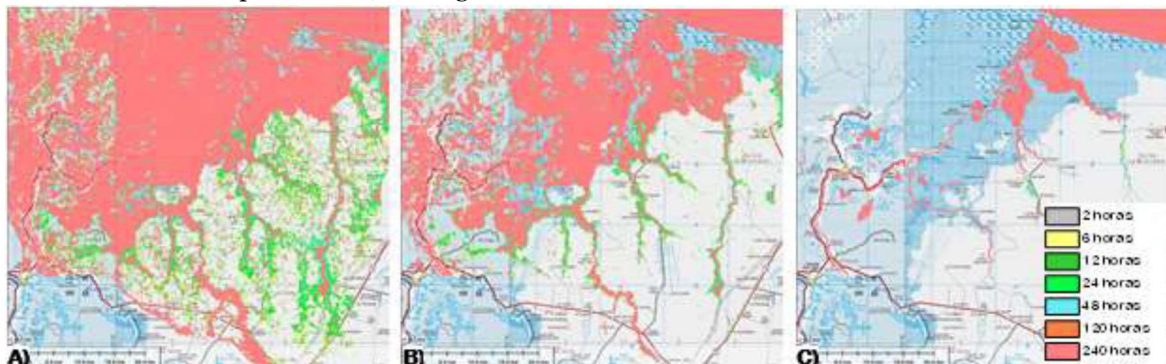


Figura 12: Tiempo de residencia de la inundación para el periodo de retorno de 100 años. a) $h > 0.25\text{m}$. b) $h > 0.50\text{m}$, c) $h > 2.0\text{m}$
Fuente: Autores.

6. Conclusiones

Como se pone de manifiesto en este trabajo, es posible determinar mapas de los valores máximos de profundidad y velocidad, mapas de peligro y mapas de riesgo por inundación utilizando modelación numérica integrada hidrológica-hidráulica. En el caso de la aplicación, solamente se estimaron los daños directos de los interiores de las viviendas empleando como variable la profundidad del flujo. Aun así, estos resultados pueden ser empleados para tener un panorama actual del riesgo al que se encuentra expuesta la población, se pueden emplear para la implementación de acciones encaminadas a mejorar el bienestar minimizando riesgos asociados a inundaciones y para la planeación del territorio.

En los estudios de este tipo, existen diversos factores que deben ser considerados, por un lado se tienen los relacionados con la modelación numérica y por el otro con la estimación del peligro y el riesgo.

En los últimos años, el avance de la tecnología ha dado un gran impulso a la capacidad de cálculo y almacenamiento a los equipos de cómputo y a la disposición y manejo de MDTs de gran precisión, lo que hace factible realizar modelación numérica integrada empleando modelos hidrológicos distribuidos y modelación hidráulica con las ecuaciones completas de aguas someras en 2D, pero los tiempos de cálculo aún son muy altos para ser prácticos (el tiempo de cálculo debería ser menor o al menos igual al tiempo del evento). Si no se quieren asumir estos tiempos tan altos, existen dos alternativas, una encaminada al uso de artificios que

permitan utilizar mallas gruesas y ecuaciones simplificadas en zonas de captación de lluvia con profundidades pequeñas (por ejemplo, menores a 0.10 m) y mallas finas y las ecuaciones correspondientes en zonas de transporte de flujo con profundidades importantes (mayores a 0.10 m), la segunda consiste en disponer de modelos que exploren la programación paralela ya sea en tarjetas gráficas o procesadores.

Para definir una escala de peligro por inundación, existen distintas propuestas que emplean valores de profundidad, velocidad o una combinación de los mismos. Incluir el uso de suelo y las características de los bienes expuestos, sin duda llevaría a una mejor comprensión de las inundaciones y sus posibles consecuencias.

En este trabajo para la estimación del riesgo se evaluaron los daños al interior de las viviendas en función de la profundidad de la inundación, sin embargo, para hacer una mejor cuantificación de los daños por inundación, se debe de incluir todos los bienes expuestos (ganadería, agricultura, infraestructura), incluso, las consecuencias sobre las personas y su entorno social (daños intangibles). Además, las curvas de vulnerabilidad deben incluir el efecto de otras variables hidráulicas como el tiempo de residencia, la velocidad del flujo que además puede generar erosión y el transporte de sólidos, ya que tienen influencia en los daños de los bienes expuestos y no son considerados.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el invaluable apoyo y colaboración en el procesamiento y análisis de los datos de lluvia y escurrimiento al M. I. José Alberto Sánchez Cruz, la construcción del MDT con la precisión necesaria a Ing. Germán Adrián Aguilar Martínez, la visualización en SIGs, creación de figuras y mapas de los resultados a la M. en C. Griselda Berenice Hernández Cruz y el apoyo del Lic. Arturo Ramos Bueno en la recopilación de información del INEGI.

8. Referencias

- BANDAS. (2014). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. *Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Comisión Nacional del Agua*. Acceso Febrero 01, 2014, www.conagua.gob.mx
- Baró, J. E., Díaz, C., Calderón, G., Esteller, M. V., Cadena, E., & Franco, R. (2012). *Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles por inundación* (p. 167). Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Belleudy, P. (2004). *Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations / risque, aléa et vulnérabilité / DDS-TUE364/ 9*.
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 71–82.
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Dolz, J., Aragón-Hernández, J. L., Corestein, G., & Sánchez-Juny, M. (2012). Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels. *Advances in Water Resources*, 42, 17–29.
- Blazek, J. (2005). *Computational fluid dynamics: principles and applications* (Second ed., p. 470). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- CCRCD. (1999). *Hydrological criteria and drainage design manual. Hydrological criteria and drainage design manual*. Clark County, USA.
- Chaudhry, M. H. (1993). *Open channel flow* (p. 483). New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow* (p. 523). New York, USA: Springer Verlag.
- Chow, V. T. (1994a). *Hidráulica de canales abiertos* (p. 667). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994b). *Hidrología aplicada* (p. 584). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- CLICOM. (2014). Climatología Computarizada. *Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua*. Acces Febreroy 01, 2014, www.smn.conagua.gob.mx
- DIPNR. (2005). *Floodplain development Manual: the management of flood liable land*. Sydney, New South Wales, Australia.
- EMAs. (2014). Estaciones Meteorológicas Automáticas. *Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua*. Acceso Febrero 01, 2014, <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
- Eslava, H., Jiménez, M., Salas, M. A., García, F., Vázquez, M. T., Baeza, C., & Mendoza, D. R. (2006). Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones y avenidas súbitas en zonas rurales, con arrastre de sedimentos. In *Atlas nacional de Riesgos. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos* (p. 485). México, D. F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- FEMA. (2001). *Understanding your risks. Identifying hazards and estimating losses*.
- Fuentes, O. A., & De Luna, F. (2012). *Modelo para la relación lluvia-escurrimiento considerando métodos hidráulicos en la cuenca del río Mezcalapa hasta la bifurcación y localidades afectadas en la zona intramuros del dren Samaria-Golfo (tramo EH Samaria-Oxiacaque)* (p. 146). México, D. F.
- Fuentes, Ó. A., & Franco, L. E. (1997). *Modelo matemático de áreas de inundación* (p. 25). México, D. F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Fuentes, O. A., Franco, V., De Luna, F., Velez, L., Sánchez, J. A., Hernández, G. B., & Ramos, J. G. (2013). *Estudio de inundaciones fluviales y mapas de peligro para el atlas nacional de riesgos por inundación* (p. 150).
- Gómez, M. (2008). *Curso de hidrología urbana* (p. 407). Barcelona: Alfambra.
- INEGI. (2010). Localidades amanzanadas y números exteriores. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Acceso Febrero 02, 2010, www.inegi.org.mx
- INEGI. (2014). Modelos digitales del terreno tipo LIDAR. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Acceso Febrero 01, 2014, www.inegi.org.mx
- Paterson, K. W. (2007). *Dorrigo flood study*. Bellingen Shire Council, New South Wales, Australia.
- Salas, M. A., & Jiménez, M. (2004). *Inundaciones* (p. 53). México, D. F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- SMN. (2014). Pronóstico de mareas. *Servicio Mareográfico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*. Acceso Febrero 01, 2014, <http://www.mareografico.unam.mx:8080/Mareografico/>

-
- Témez, J. R. (1992). Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. En J. Dolz, M. Gómez, & J. P. Martín (Eds.), *Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano*. Madrid, España: CICCIP Monografías.
 - Vélez, L., Fuentes, O. A., Rubio, H., & De Luna, F. (2014). Mapas de peligro por inundación como herramienta para la evaluación del riesgo de daño de viviendas. In *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica* (p. 1-7). Puerto Vallarta, Jalisco, México.