



Avances en Investigación Agropecuaria

ISSN: 0188-7890

revaia@ucol.mx

Universidad de Colima

México

Ellis, E. A.; Romero, J. A.; Hernández, I.U.; Gallo, C. A.; Alanís, J. L.
Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz
Avances en Investigación Agropecuaria, vol. 16, núm. 1, 2012, pp. 7-28
Universidad de Colima
Colima, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83723442002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz

Geographical evaluation of areas susceptible to flooding in the Tuxpan River watershed, Veracruz, México

Ellis, E. A.;^{1*} Romero, J. A.;¹ Hernández, I.U.;¹ Gallo, C. A.¹ y Alanís, J. L.²

¹Centro de Investigaciones Tropicales (CITRO)
Universidad Veracruzana. Ex-Hacienda Lucas Martin
Calle Araucarias s/n, Colonia Periodistas
Xalapa, Veracruz, México (C. P. 91019).

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Universidad Veracruzana. México.

*Correspondencia: eellis@uv.mx
ellis_eddie@yahoo.com

Resumen

Existen eventos hidrometeorológicos que, periódicamente, han provocado serias inundaciones en la Cuenca del río Tuxpan, Veracruz (México), dejando severos daños económicos y humanos. El objetivo del presente trabajo fue el de evaluar geográficamente las áreas susceptibles a la inundación en la cuenca con relación a distintos periodos de retorno de precipitación máxima, en 24 horas. Se integraron técnicas de Sistemas de Información Geográfica para el cálculo de gastos máximos, aplicando el método Ven Tè Chow en cada microcuenca o unidad hidrológica. Adicionalmente, se empleó el modelo hidráulico de cauces abiertos, HEC-RAS 4.0, para modelar la superficie inundada. Para los insumos del modelo se emplearon los datos geográficos de la red hidrológica, el modelo de elevación, edafología y vegetación y uso de suelo. Los resultados indican una superficie de inundación que varía entre 522 km² para periodos de retorno de dos años y hasta 554 km² para periodos de retorno de 100 años.

Abstract

Historically and even recently, meteorological events have caused severe floods in the Tuxpan River watershed in Veracruz (Mexico) resulting in severe economic impacts and loss of life. The objective of the present study was to spatially evaluate areas susceptible to flooding in the watershed in relation to different return periods of maximum precipitation in 24 hours. Geographical information systems techniques were integrated in order to calculate maximum channel flows applying the Ven Tè Chow method for each micro-watershed or hydrologic unit. Additionally, the hydraulic model for open channels, HEC-RAS 4.0 was used to model inundated surfaces. Model inputs included geographical data such as the river or drainage network, digital elevation model, soils and vegetation and land use cover. Results indicate that the amount of surfaces inundated vary between 522 km² for return periods of 2 years and up to 554 km² for return periods of 100 years. Areas with greater impacts from flooding

Las áreas con mayor afectación son las agrícolas, con 343 km² y las áreas urbanas, con 15 km² para periodos de retorno correspondientes a 100 años, resultando con severos daños económicos. Las zonas urbanas más afectadas incluyen las ciudades de Álamo-Temapache y Tuxpan. Los modelos aplicados y los resultados obtenidos en esta evaluación aportan información y validan una herramienta útil para la investigación y toma de decisiones sobre las estrategias y medidas de prevención y mitigación de los impactos inundación.

Palabras clave

Inundación, cuenca del río Tuxpan, sistemas de información geográfica, modelación hidráulica.

were of the agricultural type with 253 km² flooded and urban type with 15 km² flooded for return periods of 100 years, implying severe economic losses. Urban areas affected include the cities of Álamo-Temapache and Tuxpan. The results and models generated from this study provide information and a valuable tool for research and decision making regarding strategies and measures of prevention and mitigation of flood impacts.

Key words

Floods, Tuxpan river watershed, GIS, hydraulic modeling.

Introducción

Las inundaciones en México destacan entre los desastres naturales más frecuentes y las que ocasionan mayores pérdidas tanto de vidas como económicas. Los daños económicos causados por inundaciones suman casi la mitad del total de todos los desastres naturales (CENAPRED, 2001; 2007). El estado de Veracruz, en particular, está entre los primeros estados con mayores problemas de inundación, donde se reportan hasta cuatro eventos por año (Garnica-Peña y Alcántara-Ayala, 2004). En los últimos diez años se registraron dos eventos de inundaciones severas en el estado, una en 1999 y otra en 2005. En 1999 hubo inundaciones severas que afectaron directamente a la cuenca del río Tuxpan y ocasionó 200 muertos, 100 desaparecidos y casi 100 mil damnificados, en 83 municipios del estado. Los daños económicos de estas inundaciones resultaron en más de 12,000 viviendas afectadas y alrededor de 25 millones de dólares en daños; encontrándose que las mayores afectaciones fueron a la agricultura, vivienda, comunicaciones y transporte (Salas, 2000; Tejeda-Martínez, 2006). En la cuenca del río Tuxpan, han destacado inundaciones fuertes en 1930, 1944, 1955 y 1999 (Tejeda-Martínez, 2006). Casi todos los años se presentan problemas de inundación dentro de la cuenca, recientemente reportados en la prensa en septiembre de 2007, octubre de 2008 y septiembre de 2009.

Los problemas relacionados con las inundaciones y la vulnerabilidad de la población se han incrementado debido a un desordenado proceso de cambios de uso de suelo, urbanización, asentamientos ilegales y viviendas construidas de manera inadecuadas y en zonas que incrementan el nivel de riesgo (Guarin *et al.*, 2005). A pesar de que las inundaciones han sido recurrentes en el estado de Veracruz, el estudio sistemático de estos fenómenos todavía es escaso y sigue siendo indispensable promover un enfoque de cuencas que incluya una mejor planeación de uso de suelo, así como el desarrollo y manejo de

bases de datos y modelos para la evaluación; e, igualmente, una adecuada toma de decisiones sobre las prevención y remediación de los impactos de las inundaciones (Tejeda-Martínez, 2006). Por ello, las cuencas hidrológicas son unidades idóneas para la planeación del desarrollo socioeconómico y el uso racional de los recursos naturales como el agua, suelo y vegetación (Cotler, 2004). En ese sentido, los análisis de zonas inundables y la evaluación de sus riesgos potenciales son esenciales para las actividades de protección y mitigación contra las afectaciones por inundaciones, obteniendo resultados que orientan hacia una mejor planeación para el desarrollo territorial que prevén los fenómenos meteorológicos y sus riesgos.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) —definido como la captura, manejo y análisis de datos e información geográficamente representados— son amplia y mundialmente implementados por instituciones gubernamentales, no-gubernamentales y académicos, como una herramienta indispensable para la planeación territorial, manejo integrado de cuencas, evaluación y mitigación de desastres, así como para la conservación de recursos naturales (Lang, 1998; Morain, 1999; Brady *et al.*, 2002; INE, 2003; Sánchez *et al.*, 2004; Triviño y Ortiz, 2004). La zonificación de áreas susceptibles a la inundación, por lo general, implica la integración de los SIG; en ésta, se usan datos topográficos, edafológicos, hidrológicos, climáticos, de vegetación y uso de suelo, con la modelación hidrológica e hidráulica; con todo ello se determina espacial y cuantitativamente las áreas inundadas y los riesgos asociados (Rosso y Rulli, 2002; Abdalla *et al.*, 2006).

En la actualidad se pueden distinguir dos principales enfoques al momento de definir la inundación: a) aquella generada por la cuenca con unas determinadas condiciones de escorrentía, ante una tormenta previamente definida; y b) aquella que tiene una determinada probabilidad de no ser superada o, empleando la terminología habitual, un periodo de retorno en años (Ferrer, 1993).

Los modelos hidráulicos son empleados para determinar las zonas susceptibles de ser inundadas, típicamente en función de la probabilidad de ocurrencia o periodo de retorno de un evento de mayor precipitación (Barillas-Cruz *et al.*, 2003; Martín-Vide *et al.*, 2003). Estos modelos matemáticos e hidro-dinámicos toman en cuenta variables hidrológicas como: precipitación, escorrentías, gastos, y también variables hidráulicas como la altura del caudal y la geometría del cauce. Por lo general, comprenden la integración de datos georreferenciados —como los climáticos, topográficos, hidrológicos, edafológicos, de vegetación y uso de suelo— permitiendo modelar y evaluar, espacialmente, la respuesta del caudal bajo distintos escenarios de precipitación o periodos de retorno. Los parámetros hidrológicos —como los de escorrentía y caudales derivados de la precipitación— son primordiales en estos modelos, como insumo de la cantidad de agua que fluye por los cauces. La respuesta de los caudales en la cuenca depende de factores como: la pendiente, la geometría del cauce y el escurrimiento. De esta manera, las cuencas conforman un sistema de procesos y respuestas en donde la escorrentía superficial es de los factores más importantes, relacionados con los desastres naturales y daños de las inundaciones (Triviño y Ortiz, 2004).

Aunque siempre es preferible que se pueda disponer de datos hidrométricos colectados *in situ* de la red hidrológica, la realidad es que usualmente son muy escasos. Los métodos hidrológicos y modelos matemáticos que comúnmente se aplican para los cálculos de escorrentía y gastos incluyen el de Ven Te Chow y tránsito de hidrogramas (Triviño y Ortiz, 2004). Métodos como el Ven Te Chow han sido muy útiles para calcular caudales máximos dentro de pequeñas unidades hidrológicas o microcuencas con grandes rangos de pendientes. El método, introducido en 1964 en la publicación *Handbook of Applied Hydrology* (Chow, 1964), considera la superficie de la unidad hidrológica (cuenca), la longitud y pendiente de los canales abiertos (como los ríos), el tipo de suelo, cobertura de vegetación y uso del suelo para obtener el número de curva (CN) o coeficiente de infiltración y escorrentía, así como la cantidad y duración de precipitación (la entrada de agua) y, de esta manera, derivar el caudal máximo en cada unidad hidrológica (Chow *et al.*, 1994). Estos cálculos son insumos esenciales para la evaluación de áreas inundables usando los modelos hidráulicos. Al integrar técnicas y datos de SIG para calcular los gastos o caudales, es posible su representación espacial, fortaleciendo el uso de estas herramientas para la modelación y manejo de cuencas (Barillas-Cruz *et al.*, 2003; Martín-Vide *et al.*, 2003; Triviño y Ortiz, 2004).

Por otra parte, aplicaciones de modelos hidrológicos —como HEC-HMS, SWAT y otros— también calculan parámetros de precipitación, escorrentía superficial y caudales que puedan ser efectivamente representados, de manera geográfica en la cuenca (Triviño y Ortiz, 2004).

Los modelos hidráulicos analizan los flujos de los ríos y canales por secciones transversales de los cauces, de acuerdo a la escorrentía y caudal del agua en el sistema hídrico. Uno de estos modelos, el más utilizado alrededor del mundo, es el HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Assessment System*), desarrollado por el *United States Army Corps of Engineers*. HEC-RAS es un modelo unidimensional de régimen permanente, gradualmente variado, que genera como resultado el perfil de la superficie libre de agua, calculando el nivel y velocidad del agua y el “área mojada” en cada tramo o sección transversal del río (Martín-Vide, 2003; Triviño y Ortiz, 2004). Para las evaluaciones de inundación, aplicando el HEC-RAS, se requiere de información sobre la fisiografía y los caudales del sistema fluvial, que son sistematizados en el modelo como datos geométricos (secciones transversales del cauce), flujos de agua o aforos, así como las especificaciones para la simulación de escurrimiento superficial y áreas inundadas, relacionados con los periodos de retorno de precipitación.

El objetivo de este estudio es el de integrar las técnicas de SIG con la modelación hidrológica e hidráulica para evaluar las áreas susceptibles a la inundación dentro de la Cuenca del río Tuxpan.

Materiales y métodos

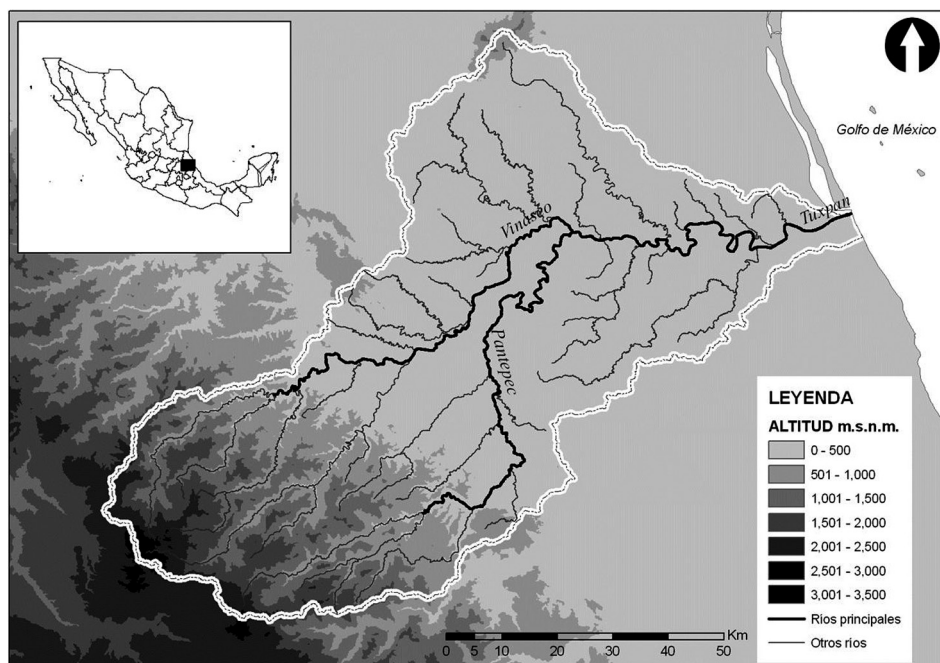
El estudio que se presenta comprende la integración de datos georreferenciados en un SIG para el análisis y cálculo de los caudales en pequeñas unidades hidrológicas o microcuencas, para distintos periodos de retorno. Adicionalmente, se integran las técnicas de SIG para la modelación hidráulica, desarrollando la geometría del sistema fluvial (red hidrográfica y secciones transversales) y simulando los escenarios de los caudales y las áreas susceptibles de inundarse para los distintos periodos de retorno.

Zona de estudio

La cuenca del río Tuxpan comprende una superficie de 5,824.08 km² y forma parte de la vertiente del Golfo de México, en el norte del estado de Veracruz (México), y en la región denominada La Huasteca (figura 1). La cuenca se origina en la vertiente Este de la Sierra Madre Oriental y se caracteriza, en la parte alta, por tener una topografía accidentada con elevaciones de los 500 a los 3,000 msnm (relieve moderado en la parte media, con elevaciones de 200 a 500 msnm) y una extensa planicie costera, en la parte baja, con elevaciones menores a los 200 msnm (figura 1). En el límite Noreste de la cuenca se ubica la Sierra de Otontepec, una serranía que alcanza los 1,300 msnm, la cual se encuentra separada de todo el macizo rocoso que da origen a la cuenca.

La precipitación media anual varía de los 2,000 a 4,000 mm en la parte alta de la cuenca; de los 1,500 a 2,000 mm en la parte media, y de los 1,200 a 1,500 mm en la parte baja. En la cuenca alta, la precipitación puede ocurrir durante todo el año; mientras en la zona media y baja, las lluvias son más frecuentes durante el verano y ocurren periodos secos con meses de precipitación menores a 60 mm (Vidal-Zepeda, 1990). Su hidrología, en la parte alta, consiste en un mayor número de manantiales, arroyos y pequeños ríos que vierten sus aguas a dos corrientes principales, que son los ríos Vinazco y Pantepec; los cuales, descienden por las bruscas pendientes de la cuenca, formando cauces profundos; ello, debido a la geología de la zona. Posteriormente, estas dos corrientes principales se unen en la parte baja de la cuenca dando origen al río Tuxpan, que forma una gran cantidad de meandros y desemboca en el Golfo de México —en las inmediaciones de la ciudad de Tuxpan, Veracruz— muy cerca de la Laguna de Tampamachoco (figura 1).

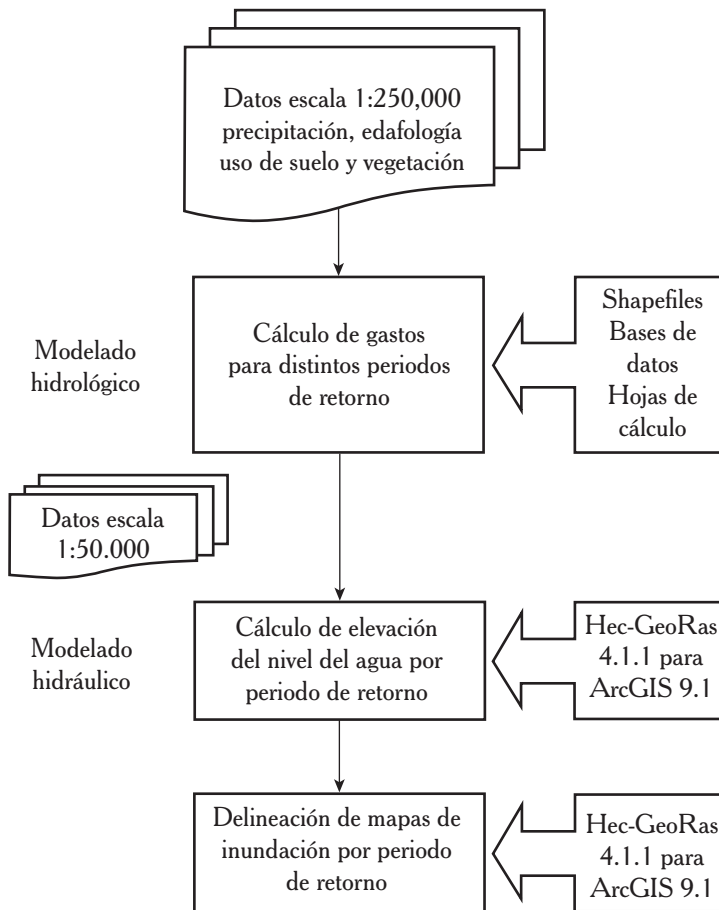
Figura 1
Localización y mapa hipsométrico de la cuenca del río Tuxpan.



Aplicación del Sistema de Información Geográfica

Los datos geográficos usados en el SIG —para la cuenca del río Tuxpan— la modelación hidrológica e hidráulica en la cuenca, incluyen los siguientes: 1) modelo de Elevación (MDE) escala 1:50,000, con una resolución espacial de 30 metros (INEGI, 2011); 2) red hidrológica escala 1:50,000 (INEGI, 2000), modificada y redigitalizada usando MDE e integrando flujos por los autores; 3) delimitación de la cuenca escala 1:250,000 (INEGI-INE-CONAGUA, 2007), modificada usando el MDE y la red hidrológica por los autores; 4) delimitación de unidades hidrológicas o microcuencas escala 1:50,000, basado en el MDE, red hidrológica y aplicando el Watershed Delineation (delineación de cuencas) del *software* Mapwindow GIS®; 5) Edafología escala 1:250,000 (INEGI, 2010 [Serie II]); 6) Vegetación y Uso de Suelo escala 1:250,000 (SEMARNAT, 2001); 7) isoyetas de precipitación máxima en 24 horas para periodos de retorno de 2, 10, 25, 50 y 100 años, generada por el área de hidrometeorología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). El esquema total de la metodología aplicada en el estudio integrando SIG y modelación hidrológica e hidráulica se observan en la figura 2.

Figura 2
Esquema de la metodología integrada de SIG y modelación hidrológica e hidráulica para el estudio de inundación.



Modelación Hidrológica y Cálculo de Caudales Máximos (Ven Te Chow)

Para la evaluación hidrológica y cálculo de caudales máximos, la cuenca es dividida en microcuencas que sirven como unidades de análisis para calcular los caudales para diferentes periodos de retorno; entonces, se opta por evaluar precipitaciones máximas en 24 horas y se consideran periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, periodos que son considerados para la mayoría de los proyectos orientados al desarrollo de ciudades, zonas industriales, evaluación de infraestructura, etcétera. Se estima el escurrimiento superficial máximo en cada microcuenca aplicando la metodología de Ven Te Chow (Chow *et al.*, 1994). Este modelo permite la estimación del caudal aplicando SIG, ya que éste determina con mayor precisión las características físicas de la cuenca, los cauces y las con-

diciones geométricas (como área y pendiente) de la unidad hidrológica. Las principales variables o factores físicos y geográficos que influyen en el escurrimiento y caudal estimado del modelo Ven Te Chow incluyen: la precipitación, el uso de suelo, tipo de suelo, tiempo de retraso, pendiente y longitud del cauce. De esta manera, el modelo permite una aproximación para la estimación de la magnitud y distribución del escurrimiento y gastos de caudal en las unidades hidrológicas dentro de la cuenca.

La propuesta de Chow se orienta a que el gasto “pico” del escurrimiento directo de una cuenca, por efecto de una lluvia, puede calcularse como el producto de lluvia en exceso por el gasto “pico” de un hidrograma unitario. La expresión que resume lo anterior es la siguiente:

$$Q_p = (q_p)(P_e)$$

Donde:

Q_p es el gasto “pico” del escurrimiento directo; q_p es el gasto “pico” de un hidrograma unitario; y P_e es la precipitación en exceso o lámina de escurrimiento. En este último parámetro de precipitación en exceso, es donde puede observarse la diferencia en los resultados obtenidos y la utilidad, empleando un SIG. La expresión para calcular la P_e es la siguiente:

$$P_e = \frac{10\left(\frac{X_a}{10} - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{\frac{X_a}{10} + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Como puede observarse, el modelo involucra la precipitación en la cuenca X_a la cual resulta de un análisis que considera la distribución de la lluvia en el tiempo basado en un modelo que asigna un valor cercano a las curvas de máxima intensidad. El modelo considera valores que dependen del tamaño de la cuenca y del tiempo de concentración que, de acuerdo a Chow *et al.* (1994), puede ser estimado para cuencas pequeñas, con la siguiente expresión:

$$T_c = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

El tiempo de concentración T_c se considera igual al tiempo de retraso para cuencas pequeñas, que nuevamente involucra parámetros que son estimados con mayor precisión por un SIG; en este caso, longitud y pendiente. También, involucra un parámetro conocido como *número de escurrimiento*, denotado por la letra N. El valor que se le asigna, depende del uso del suelo, la condición de la cobertura vegetal y tipo de suelo, básicamente. Con el uso del SIG la superficie que delimita estas tres condiciones, se ob-

tiene mayor precisión, representación cartográfica, y con mayor rapidez. La determinación de estas superficies permite asignar valores a N , con ponderaciones basadas en datos actuales de las condiciones de la cuenca.

Para el caso de la presente evaluación, lo descrito con anterioridad fue parte del proceso de análisis, para lo cual se empleó la P_e determinada por el Área de Hidrometeorología del Centro Nacional de Prevención de Desastres. N es el número de escurrimiento; está en función del tipo y uso de suelo, así como de la cobertura vegetal.

En la determinación del valor N , y para los fines de este trabajo, se separaron de la siguiente manera: tipo "A" (escurrimiento mínimo), incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezcla de ambas; tipo "B", incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo; tipo "C", comprende arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla; tipo "D" (escurrimiento máximo), incluye, principalmente, arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con sub-horizontes casi impermeables cerca de la superficie. Los suelos se clasificaron empleando la cartografía de edafología del Instituto Nacional de Estadística y Geografía escala 1:250,000 (INEGI, 2010 [Serie II]).

Para la determinación de la cobertura vegetal, utilizado para determinar el valor N , se empleó el SIG para la reclasificación del dato geográfico de vegetación y uso de suelo del Inventario Nacional Forestal del año 2000 (SEMARNAT, 2001), apoyado con puntos colectados en campo y, en algunos casos, se recurrió al soporte visual del Google Earth. También se empleó el modelo digital de elevación para generar un mapa de pendientes y apoyarse mejor en la toma de decisión sobre las condiciones de la superficie.

Finalmente, se llevó a cabo la unión de las capas de suelo y cobertura vegetal ya previamente reclasificadas con Arcmap 9.2 para, finalmente, tener el valor del factor N , que es el valor de escurrimiento de cada área dentro de cada subcuenca; es importante mencionar que debido a que dentro de cada subcuenca se presentaron distintos valores de N , se procedió a ponderar, de acuerdo al porcentaje en que se presentaba cada valor, obteniendo un valor de N que diera el peso correspondiente al valor porcentual de cada tipo de valor N presente en la subcuenca. El valor de N es uno de los factores más importantes en el modelo Ven Te Chow, pues al final determinan el valor del gasto de ese río tributario, el cual se verá reflejado en el gasto final del río Tuxpan y en la delineación de las zonas inundables.

El siguiente paso fue calcular el tiempo de retraso (t_r). Este factor se consideró igual al tiempo de concentración (t_c) debido a que la cuenca Tuxpan se dividió en microcuencas, considerándolas a éstas como pequeñas cuencas. Para el cálculo de este tiempo de concentración se utilizó la fórmula de Chow descrita; para ello fue necesario generar el valor de la pendiente del cauce principal.

Posteriormente, se calculó el tiempo "pico" (t_p) y el tiempo de duración (d_e) con las siguientes fórmulas:

$$t_p = t_c^{1/2} + 0.6 t_c \text{ y } d_e = 2(t_c)^{1/2}$$

Con lo anterior, se calculó la relación d_e/t_r , y el valor obtenido indica cómo es la duración con respecto al tiempo de retraso y que, evidentemente, describe parte del comportamiento del hidrograma unitario en cuanto al máximo valor que alcance.

El siguiente paso fue obtener el factor Z (o factor de reducción del “pico”), que relaciona al tiempo que transcurre desde el centro de masa de precipitación al “pico” del hidrograma (t_r), y a la duración efectiva o en exceso; esta función está expresada a través de una curva, la cual se obtuvo del análisis de 60 hidrogramas en 20 cuencas pequeñas de (0.01 a 20 km²) del medio oeste estadounidense (Becker y Serban, 1990). Finalmente, se calculó el gasto con la siguiente fórmula:

$$Q_p = \frac{2.78 A Z P_e}{d_e}$$

Donde:

Q_p = gasto “pico” del hidrograma unitario; A = área de la microcuenca; P_e = precipitación en exceso; y d_e = tiempo de duración. Todos los pasos anteriores se llevaron a cabo de la misma forma para cada uno de los distintos periodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Modelación hidráulica

En lo que respecta al *software* para llevar a cabo la modelación hidráulica de inundación, se emplearon: la extensión de HEC-GEORAS-4.1.1®, con el *software* ArcGIS 9.2®, así como el *software* HEC-RAS versión 4.0®. Uno de los primeros pasos fue la definición de la cuenca y las microcuencas; esto se realizó con el *software* Mapwindow 4.6.602® con su herramienta Watershed Delineation, empleando los datos geográficos de MDE, hidrología y curvas de nivel escala 1:50,000; todos ellos de INEGI. Posteriormente, con la extensión HEC-GEORAS (en ArcGIS) se procesaron los datos geométricos —incluyendo la digitalización de la red hidrológica— con una mayor precisión y tomando como base la cartografía del INEGI, escala 1:50,000. Todos los ríos de tipo perenne fueron digitalizados iniciando del parte-aguas en dirección a la desembocadura de la cuenca y vectorizando tramo por tramo hasta cada intersección con otro río (figura 3).

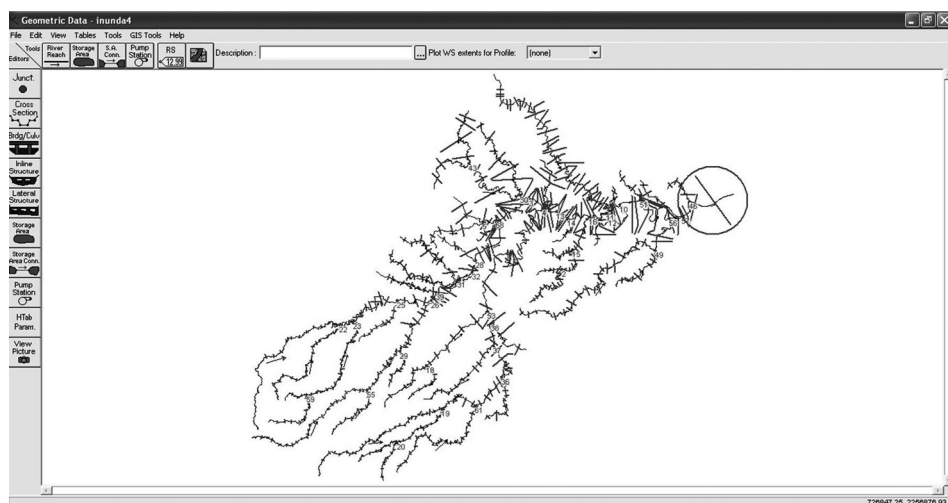
Adicionalmente, se elaboraron secciones transversales (*Cut Lines*) de los ríos en HEC-GEORAS para la aplicación del modelo hidráulico (figura 3). Las secciones transversales también tienen un orden en su construcción, pues necesariamente tienen que ser digitalizadas de izquierda a derecha, en el sentido del río del parte-aguas a la desembocadura del mismo; ninguna de las secciones transversales se debe intersectar y cada sección del río deberá contener, como mínimo, dos secciones transversales y estar lo más perpendicular posible al tramo del río del cual se desee conocer el corte transversal de la sección. Se generaron 533 secciones transversales, cuyas distancias entre ellas fueron de entre 2,500 y 3,000 m en promedio; fue la parte baja de la cuenca donde

se colocaron a distancias más cortas entre ellas; esto, debido a que las partes planas es donde fue más difícil localizar los dos puntos más altos de la sección hidráulica del río.

Una vez generados estos insumos del modelo, con la extensión de ArcGIS, HEC-GEO-RAS, se importan al modelo hidráulico HEC-RAS para iniciar con la revisión, pues el programa detecta errores en los ríos por fallas en la intersección, nombres de los ríos y tramos o tramos no unidos correctamente. Una vez detectados y corregidos los errores geométricos, en el modelo HEC-RAS se ingresan valores como el coeficiente de “n” de *manning* y los gastos expresados en m³/s para cada una de las secciones de ríos y subcuencas, así como para cada periodo de retorno; todo ello previamente calculado en el modelamiento hidrológico, aplicando el método Ven Te Chow. El coeficiente de rugosidad “n” de *manning* es derivado tanto de las características de cobertura de vegetación y uso de suelo como de las propiedades edafológicas en las subcuencas y se relaciona con el factor N (o valor de escurrimiento en el modelo Ven Te Chow) que se describe arriba.

Como se mencionó anteriormente, HEC-RAS es un modelo unidimensional de régimen permanente, gradualmente variado, que genera como resultado el perfil de la superficie libre de agua calculando el nivel y velocidad de agua y el “área mojada” en cada tramo o sección transversal del río (Martín-Vide, 2003; Triviño y Ortiz, 2004). Los datos ya procesados por el modelo hidráulico HEC-RAS 4.0 se exportan en formato CAD, los cuales se importaran en el *software* ArcGIS 9.2, para convertirlos a *Shapefile* (SHP). Se generarán capas geográficas correspondientes a las superficies inundadas y la profundidad de inundación con las que se pueden crear mapas mostrando las zonas susceptibles de inundación y analizar superficies e impactos de áreas inundadas. Finalmente, hay que mencionar que HEC-RAS no arroja parámetros estadísticos correspondientes a la variación, margen de error o certidumbre de las superficies y profundidades de inundación generada por el modelo hidráulico.

Figura 3
Red hidrológica y secciones transversales en ríos de la cuenca del
río Tuxpan generados para el modelo hidráulico HEC-RAS.



Corroboración y validación de modelos

Los modelos hidrológicos se corroboran, ideal y preferiblemente, con datos medidos *in situ*; como son: los gastos o caudales de los escurrimientos, la profundidad y áreas inundadas. Como se indicó con anterioridad, la carencia de estaciones hidrométricas y datos hidrológicos para la Cuenca del río Tuxpan, dificulta la validación de los resultados de estos modelos. Para la validación del modelo hidrológico, integrando SIG y aplicando el modelo Ven Te Chow, se compararon con los gastos reportados en las dos estaciones hidrométricas (Sombrerete y Álamo); y en la desembocadura de la cuenca con los gastos calculados por el modelo en las mismas ubicaciones (CONAGUA, 2004; 2007). Los gastos registrados para las estaciones hidrométricas se obtuvieron de la base de datos BANDAS (CONAGUA, 2004) y de la CONAGUA (2007). Adicionalmente, se comparó —estadísticamente— la relación de los gastos generados por nuestro modelo hidrológico con los gastos calculados por el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) desarrollado por INEGI (2010).

Las superficies y zonas inundadas que generó el modelo hidráulico HEC-RAS fueron corroboradas, en parte, con el uso de una imagen satelital LANDSAT TM de 1999 que muestra las zonas inundadas después de la severa inundación de este año. Como complemento, datos puntuales sobre la localización de sitios inundados en la Cuenca del río Tuxpan, derivados de diversas fuentes de información (por ejemplo, registros de Protección Civil del estado de Veracruz y notas de prensa)

y verificaciones en campo, fueron evaluados para corroborar el modelo. Como el presente estudio de inundación se enmarca dentro de un proyecto de manejo integrado de cuencas, en donde se colectaron datos en campo sobre las características del paisaje, y se realizaron tanto encuestas socioeconómicas como de percepción de riesgo en localidades que fueron verificadas en campo (como sitios propensos a inundación), también se consultó esta información como fuente de corroboración de los resultados del modelo hidráulico.

Resultados

Modelación hidrológica

El objetivo principal de la integración de SIG en la modelación hidrológica de la cuenca fue la de derivar el gasto o caudal Q (m^3/s) en cada tramo de río de cada unidad hidrológica o subcuenca en el área de drenaje de la cuenca del río Tuxpan. Este cálculo de gasto es un insumo primordial para determinar las zonas inundadas en el modelo hidráulico HEC-RAS para cada periodo de retorno; se relaciona, física y matemáticamente, con: la pendiente y longitud del tramo de río, la cantidad e intensidad de precipitación, y la “rugosidad” del escurrimiento en la subcuenca (de acuerdo a la cobertura de vegetación y usos de suelo y la edafología). En ese sentido, los gastos representan un parámetro o indicador óptimo para corroborar y validar el funcionamiento y acercamiento del modelo hidrológico al mundo real.

En el cuadro 1, se comparan los gastos promedios anuales reportados en la desembocadura de los ríos Tuxpan y Pantepec, en las estaciones de Álamo y Sombrerete, con los gastos correspondientes al periodo de retorno de dos años calculados por el modelo hidrológico para los mismos tramos.

Cuadro 1

Gastos generados por el modelo hidrológico del estudio (periodo de retorno de dos años) comparado con gastos (promedio anual) *in situ* de CONAGUA en tres ubicaciones de la cuenca.

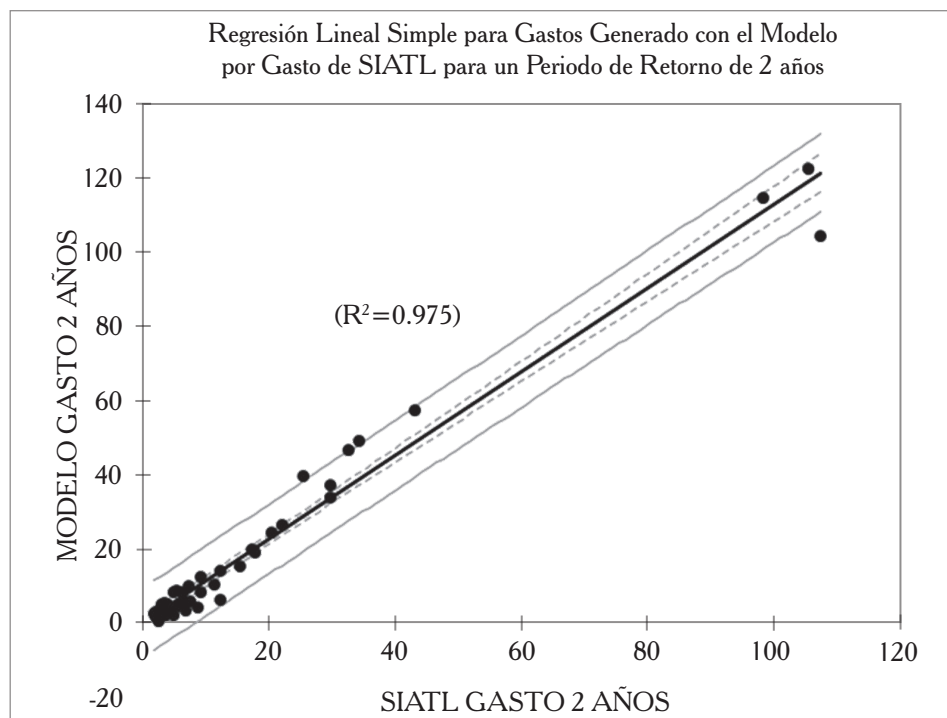
Gastos (m^3/s)	Desembocadura río Tuxpan	Álamo río Pantepec	Sombrerete río Pantepec
Modelo PR 2 años	105.33	99.25	38.8
CONAGUA	82.8	79.48 (1957-1969)	47.885 (1986 - 1995)

La relación entre los gastos calculados por el modelo hidrológico de este estudio y los gastos generados por el modelo SIATL se aprecian en la figura 4, mostrando la cercanía y similitud de los valores generados por los dos modelos. La prueba estadística de regre-

sión lineal comprueba una fuerte correlación ($R^2 = 0.975$, $n = 46$, $P < 0.0001$) entre los caudales que se calculan con los dos modelos hidrológicos diferentes.

Figura 4

Relación y regresión lineal entre los gastos calculados por el modelo hidrológico del estudio y los gastos calculados por el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas (SIATL) (INEGI, 2010).



Modelación hidráulica

El resultado principal de este estudio, derivado del esquema metodológico que se describe anteriormente (figura 2), consiste en la zonificación de las áreas susceptibles a la inundación para los periodos de retorno de 2, 10, 25, 50 y 100 años.

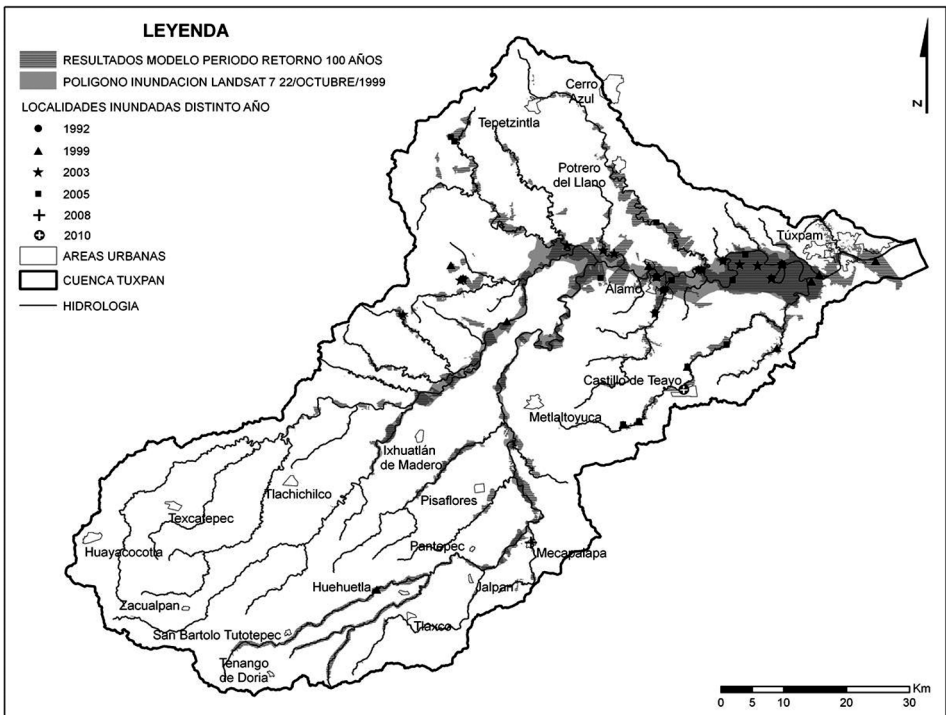
La figura 5 muestra la totalidad de las potenciales zonas inundadas para el periodo de retorno de 100 años dentro de la totalidad de la cuenca. De acuerdo a los resultados del modelo hidrológico e hidráulico, la superficie inundable en toda la cuenca varía de los 52,201 ha (8.9% de la cuenca) —para periodos de retorno de dos años— hasta las 55,454 ha (9.5% de la cuenca), para periodos de retorno de 100 años. Naturalmente, la mayoría de las áreas susceptibles a inundación se presentan en la parte baja de la cuenca o en la planicie costera y, principalmente, relacionado con el río Tuxpan, después de la unión de sus principales tributarios, los ríos Vinazco y Pan-

tepec (figura 5). Sin embargo, también se observan zonas inundables en la parte media de la cuenca asociados con el río Pantepec (figura 5).

Adicionalmente, los resultados del modelo de inundación señalan áreas susceptibles a inundación en la región noreste de la cuenca asociado con tributarios en la cuenca baja del río Vinazco y tributarios del río Tuxpan que fluyen de norte a sur de la Sierra de Otontepec (figura 5). Por consecuencia, se deduce una mayor influencia de inundación en el río Tuxpan (ubicado en la planicie costera), originados por los escurecimientos que provienen principalmente del tributario del río Pantepec y de la zona de la Sierra de Otontepec.

Figura 5

Resultados de la modelación hidráulica de la superficie de zonas inundables para periodos de retorno de 100 años, comparado con las zonas inundadas en 1999 y localidades registradas con eventos de inundación en distintos años.



La figura 5 muestra la sobreposición de las superficies inundables generadas por el modelo HEC-RAS con la imagen LANDSAT 7 TM, mostrando las superficies inundadas en 1999; en ella se indica una muy cercana conformación geográfica de las zonas inundables en la parte baja de la cuenca. Adicionalmente se observan, en esa misma figura, los resultados de la comparación de la distribución de los puntos de localidades

con registros de inundación en la cuenca. De nuevo, los resultados generados por el modelo HEC-RAS coinciden con los datos de inundación obtenidos por estas fuentes de corroboración.

Mediante la aplicación de técnicas de SIG se evaluaron los potenciales impactos socioeconómicos relacionados con las áreas susceptibles a la inundación derivados de la modelación hidráulica.

El cuadro 2 indica las superficies inundables de acuerdo a los tipos de uso de suelo y vegetación presentes en la cuenca. Es evidente que la mayor superficie de áreas inundables se presenta en las zonas agrícolas, principalmente las aledañas al río Tuxpan en la planicie costera. Las superficies agrícolas inundables varían entre 32,730.15 ha (62.7% del total de la superficie inundable) en periodos de retorno de dos años y 34,327.12 ha (61.9% del total de la superficie inundable) en periodos de retorno de 100 años (cuadro 2).

Cuadro 2

Áreas susceptibles a la inundación en hectáreas por uso de suelo y vegetación para los distintos periodos de retorno en cuenca del río Tuxpan.

Periodo de Retorno	Total	Agríc.	Pastiz.	Urbano	Mangle	Bosque	Selva	Agua y Hidrof.
2 años	52,201.02	32,730.15	14,304.23	781.91	597.92	1,011.87	1,533.13	1,241.81
10 años	52,740.78	32,987.94	14,599.96	736.13	598.10	1,012.16	1,487.58	1,318.91
25 años	54,135.26	33,836.50	15,024.82	812.56	613.25	1,011.84	1,563.79	1,272.5
50 años	54,809.86	34,112.47	15,331.45	843.22	628.58	1,027.19	1,579.12	1,287.83
100 años	55,453.72	34,327.12	15,699.40	889.22	643.92	1,027.19	1,548.46	1,318.41

Grandes extensiones de pastizales también se verían afectadas por inundaciones, variando entre los 14,304.23 ha (27.40% de la superficie inundable) y los 15,699.4 ha (28.31% de la superficie inundable). Estos pastizales inundables se observan con mayor frecuencia en la parte media de la cuenca, asociados con el río Pantepec y en el noreste de la cuenca.

Los resultados también indican el grado de inundación en las zonas urbanas que pueden reflejar graves impactos socioeconómicos en la cuenca. El cuadro 3 presenta las superficies inundables en las zonas urbanas dentro de la cuenca Tuxpan, la ciudad de Álamo-Temapache (con 23,540 habitantes) así como por donde pasa el río Pantepec y la ciudad de Tuxpan (con 78,523 habitantes), en la desembocadura del río Tux-

pan, son las áreas urbanas de mayor tamaño, población y superficie inundable, ubicadas en la parte baja de la cuenca.

Estas superficies inundables varían, de 633 a 844 ha en periodos de retorno de 2 y 100 años, respectivamente, en la ciudad de Tuxpan; y de 530 a 540 ha en periodos de retorno de 2 y 100 años, respectivamente, en la ciudad de Álamo (cuadro 3). Las pérdidas económicas en la ciudad de Tuxpan pueden ser considerables, tomando en cuenta su importancia económica como puerto marítimo y principal ciudad en la región. También se presentan áreas urbanas pequeñas en la Cuenca del río Tuxpan, con zonas inundables (incluyendo Tepetzintla y Potrero de Llano en las laderas del río Potrero, que baja de la Sierra de Otontepec); Castillo de Teayo, por donde cursa el río Cañas en la zona sur y baja de la cuenca; Mecapalapa, en las laderas del río Pantepec en la zona alta de la cuenca, en el estado de Puebla; y Huehuetla, en el estado de Hidalgo, en la parte alta de la cuenca. Aunque estas superficies presentan zonas inundadas de menos de 50 ha, comprenden proporciones relativamente grandes de la zona urbana total (cuadro 3).

Cuadro 3
Áreas urbanas susceptibles de inundación en hectáreas para
cada periodo de retorno en la cuenca del río Tuxpan.

<i>Estado</i>	<i>Municipio</i>	<i>Localidad</i>	<i>PR 2 años</i>	<i>PR 10 años</i>	<i>PR 25 años</i>	<i>PR 50 años</i>	<i>PR 100 años</i>
Veracruz	Tuxpan	Tuxpan	633.28	671.16	738.16	788.24	844.04
Veracruz	Tepetzintla	Tepetzintla	14.64	15.32	14.92	17.52	18.6
Veracruz	Temapache	Potrero del Llano	36.6	37.32	38.2	39.64	40.32
Veracruz	Temapache	Álamo	530.98	537.12	539.36	540.68	540.68
Veracruz	Castillo de Teayo	Castillo de Teayo	52.76	52.76	52.76	52.76	52.76
Puebla	Pantepec	Mecapalapa	25.36	25.36	25.48	25.52	25.36
Hidalgo	Huehuetla	Huehuetla	23.36	23.36	23.48	23.48	23.48

Discusión

Los recurrentes eventos de inundación y sus relacionados impactos socioeconómicos en la Cuenca del río Tuxpan son de los principales problemas presenciados en esta región del estado de Veracruz (Garnica *et al.*, 2004; Tejeda-Martínez, 2006). Sin embargo, la investigación sobre el fenómeno de inundación en la cuenca y la aplicación de métodos y herramientas —como los SIG y modelos hidrológicos e hidráulicos para evaluar sus afectaciones— son escasas y de gran necesidad en el estado (Tejeda-Martínez, 2006). Los resultados derivados de este estudio comprueban la utilidad y la aplicabilidad de estas herramientas y modelos para la planeación y ordenamiento territorial, de manera que se puedan reducir y mitigar los impactos ambientales y socioeconómicos relacionados con eventos de inundación.

Los modelos hidrológicos e hidráulicos han sido extensiva y exitosamente utilizados para evaluar los impactos de inundación (Guarin *et al.*, 2005; Barillas-Cruz *et al.*, 2003; Martín-Vide *et al.*, 2003; Triviño y Ortiz, 2004). En la cuenca del río Samalá en Guatemala se aplicaron para zonificar las amenazas de inundación y evaluar la vulnerabilidad y riesgo de la población (Guarin *et al.*, 2005 y Barillas-Cruz *et al.*, 2003). Similarmente, se aplican para evaluar zonas inundables en la cuenca del Río Tajo (Martín-Vide *et al.*, 2003) y ríos mediterráneos (Triviño y Ortiz, 2004) en España.

Considerando la falta de datos de estaciones hidráulicas en la cuenca, que en el presente sólo cuenta con tres (dos en la parte media en el río Pantepec y otra en la desembocadura al mar), los modelos hidrológicos e hidráulicos permiten derivar el escurrimiento y el comportamiento de los cauces bajo distintos escenarios meteorológicos. La capacidad de poder simular y predecir escenarios de inundación con estas herramientas, representan un apoyo eficiente y de bajo costo para los fines de investigación, planeación y manejo de cuencas. Sin embargo, se sugiere que se instalen más estaciones hídricas en la cuenca, incluyendo la parte alta y baja; ya que éstas proporcionan datos valiosos tanto para validar y mejorar estos modelos, así como para implementar sistemas de monitoreo y alerta de inundación en la cuenca. Más aún: se recomienda un eficiente sistema de acceso y difusión de datos generados por las estaciones hídricas.

Debido a la poca disponibilidad de datos hidrométricos, para corroborar y validar el modelo de este estudio, se recurrió al simulador de flujos SIATL, desarrollado por INEGI (2010), el cual es una herramienta de análisis hidrológico de escurrimientos y flujos superficiales en cuencas y subcuencas de todo México. Se calcularon los gastos para áreas (subcuencas) y puntos de drenaje que coinciden con tramos y microcuencas del modelo hidrológico desarrollado. El cálculo de gasto que genera SIATL es mediante el método racional; se asemeja y usa los mismos principios que se describen para el cálculo de gastos, aplicando el método Ven Te Chow de este estudio. La similitud entre los valores y patrones de los gastos calculados en la cuenca con el modelo hidrológico de este estudio y el SIATL, anudado con a la conformación de los gastos calculados por el modelo con los gastos *in situ*, reportados en tres sitios de la cuenca (cuadro 1), nos da la certeza acerca de la validez de los resultados de cálculo de gastos. Más aún: reafirman la aplica-

ción e integración de los gastos calculados para la modelación hidráulica de zonas inundables usando el modelo HEC-RAS.

Samarasinghe *et al.* (2010) demuestran la efectividad de utilizar imágenes satelitales como método de validación de zonas inundables derivados de modelos como HEC-RAS. En este estudio se confirma la utilidad de las imágenes LANDSAT 7 para identificar y verificar zonas inundadas en cuencas. La coincidencia geográfica de áreas inundables generadas por el modelo, con las áreas inundadas en 1999 identificadas en la imagen satelital, muestra geográficamente la validez del modelo y la aplicabilidad de integrar técnicas de teledetección como complemento y corroboración de estudios de inundación.

Adicionalmente, es muy importante considerar la corroboración del modelo y zonas inundables con datos de campo e información de fuentes secundarias. Éstos pueden incluir datos sobre vegetación y uso de suelo, gastos y aforos, niveles de inundación reportados, notas de prensa de localidades inundadas, entre otros. La validación de los modelos con datos de campo e información secundaria es esencial para su posterior utilidad para la toma de decisiones sobre la planeación y mitigación de daños. En este estudio corroboramos zonas inundables con datos de localidades inundadas obtenidos de Protección Civil y de notas de prensa.

Todos los municipios y áreas urbanas con mayor presencia de zonas inundables identificadas en el modelo fueron corroborados en ser afectados por inundaciones en los últimos 12 años. Por ejemplo, además de la severa inundación de 1999, los municipios de Huehuetla, San Bartolo Tutotepec y Tenango de Doria (en la parte alta y media de la cuenca, en el estado de Hidalgo), han sufrido inundaciones en 2008 y, recientemente, en 2010. En los municipios de Pantepec y Francisco Z. Mena, del estado de Puebla, se reportaron inundaciones en 2008. En Veracruz, las afectaciones de inundaciones en los municipios de Tuxpan, Temapache, Castillo del Teayo e Ixhuacán de Madero, han sido muy frecuentes; destacando, recientemente, en la región los años 1999, 2005, 2008 y 2010.

También se verificó que grandes extensiones de áreas inundables se encuentran en zonas agrícolas, principalmente con cultivos para el mercado como los cítricos, que destacan en su importancia económica a nivel regional, nacional y hasta internacional, debido a su exportación (SEDESOL, 2004).

Mientras que los modelos hidrológicos e hidráulicos pueden proporcionar herramientas vitales para el desarrollo sustentable y un manejo integrado de cuencas en el estado de Veracruz, es de suma importancia tomar en cuenta los datos empleados para realizar estos modelos. La modelación y análisis de riesgo de inundación se basan en datos topográficos, edafológicos, hidrológicos, climáticos y de uso de suelo para determinar espacialmente el potencial de inundación y los daños o riesgos asociados (Guarin *et al.*, 2005; Abdalla *et al.*; 2006, Rosso y Rulli, 2002). En las simulaciones, la escala y/o precisión de los datos utilizados posteriormente afectarán los resultados derivados de los modelos. Por esta razón, se recomienda que los datos usados sean congruentes con la escala de análisis. Por ejemplo, un modelo de inundación para determinar impactos más específicos en áreas urbanas va requerir datos geográficos más detallados.

Conclusiones

El estudio demostró la factibilidad y utilidad de aplicar los SIG y la modelación para evaluar zonas inundables en cuencas del estado de Veracruz, y así, señalando su eficiencia en costo y tiempos para estos tipos de análisis. Los resultados indican la distribución geográfica de la superficie inundable en la cuenca, mayormente en la parte baja o planicie costera, y los potenciales impactos asociados. Las zonas agrícolas con pastizales y cítricos se ven mayormente afectadas, y adicionalmente se detectaron áreas susceptibles de inundación en las áreas urbanas principales, indicando las graves implicaciones sociales como económicas que pueden traer los fenómenos de inundación en la cuenca del río Tuxpan.

La información generada, tanto los SIG como los modelos hidrológicos e hidráulicos aplicados en este análisis, contribuyen a las necesidades de disponer de herramientas efectivas y eficientes —considerando la escasez de datos hidrométricos e hidrológicos *in situ*— para los propósitos de apoyar ordenamientos territoriales y la toma de decisiones sobre el desarrollo urbano y rural, la planeación del uso de suelo y la conservación en la región, para prever los riesgos de la inundación.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado como parte del proyecto “Sistemas de Información para el Manejo de Cuencas (SIMAC) y el Análisis Geográfico de Riesgo de Inundaciones en las Cuencas del río Tuxpan y Coatzacoalcos”, financiado y apoyado por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Veracruzana (Convocatoria DGI-2007). Agradecemos también al Ing. Alejandro León Ponce por su apoyo y consejos sobre la metodología de cálculos de caudales con el modelo Ven Te Chow.

Literatura citada

- Abdalla, R.; Tao, V.; Wu, H. y Maqsood, I. (2006). A GIS-supported approach for flood risk assessment of the Q'Appelle River, southern Saskatchewan. *Int. J. Risk Assessment and Management*. 6:440-455.
- Barillas-Cruz, M.; ven Westen, C.; Orozco, E.; Thonon, I.; Lira, E.; Guarín, G. P. y Tax, P. (2003). Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala. *GEOS*. 23(1):17-24.
- Becker, A. y Serban, P. (1990) Hydrological models for water resources system design and operation. *Operational. Hydrol. Report 34*, WMO, Geneva, Switzerland.
- Brady, L. M.; Gray, F.; Castaneda, M.; Butman, M. y Bolm, K. S. (2002). *Preliminary United States-Mexico Border Watershed Analysis, Twin Cities Area of Nogales, Arizona and Nogales, Sonora*. Open File Report 02-112. United States Geological Survey. Tucson, Arizona. 48 pp.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Secretaría de Gobernación. México, D. F. 225 pp.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2007). *Serie Fascículos: Inundaciones*. Secretaría de Gobernación. México, D. F. 55 pp.
- Chow, V.T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology: A compendium of Water-Resources Technology*. McGraw-Hill Book Company. New York. 1468 pp.
- Chow, V.T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, 584 pp.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2004). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm> (Consultada el 11 de julio de 2011).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). *Estadísticas del agua en México*. (Edición 2007). SEMARNAT. México, D. F. 233 pp.
- Cotler, H. (2004). *El manejo Integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política Ambiental*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México, D.F. 264 pp.
- Ferrer, F.J. (1993). *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. CEDEX. Madrid. 76 pp.
- Garnica-Peña, R. J. y Alcántara-Ayala, I. (2004). Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 55:23-45.
- Guarin, G. P.; van Westen, C. J. y Montoya, L. (2005). Community-Based Flood Risk Assessment Using GIS for the Town of San Sebastián, Guatemala. *Human Security & Development*. 1(1):31-51.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); Instituto Nacional de Ecología (INE) y Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). (2007). Mapa de cuencas hidrográficas de México. Escala 1:250.000. Basado en Priego, A.G.; Isunza, E.; Luna, N.; Pérez, J. L. 2003. Mapa de cuencas hidrográficas de México. Escala 1: 250.000. INE México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2011). Continuo de Elevaciones Mexicano. (CEM 2.0). Escala 1:50,000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas 2.0*. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/ (Consultada el 11 de julio de 2011).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2000). Conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas F14D34, F14D43, F14D44, F14D45, F14D53, F14D54, F14D55, F14D56, F14D62, F14D63, F14D64, F14D65, F14D72, F14D73, F14D74. Escala 1:50000. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2003). *Diagnóstico bio-físico y socioeconómico de la cuenca Lerma-Chapala*. Dirección de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas y Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. México, D. F. 285 pp.
- Lang, L. (1998). *Managing Natural Resources with GIS*. ESRI Press. Redlands, California. 118 pp.
- Martín-Vide, J. P.; López-Querol, S.; Martín-Moreta, P.; Simarro-Grande, G. y Benito-Fernández, G. (2003). Uso de modelos uni y bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina. *Ingeniería del agua*. 10:49-58.
- Morain, S. (1999). *GIS Solutions in Natural Resource Management: Balancing the Technical-Political Equation*. On Word Press. Santa Fe, New Mexico. 392 pp.
- Rosso, R. y Rulli, M. C. (2002). An integrated simulation method for flash-flood risk assessment: 2. Effects of changes in land-use under a historical perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(3):285-294.
- Salas, M. A. (2000). Evaluación del impacto económico de las lluvias torrenciales ocurridas en octubre de 1999 en el estado de Veracruz. *Cuaderno de Investigación no. 50, cap. III, octubre*. CENAPRED.
- Sánchez, K.; Jiménez, F.; Velásquez, S.; Piedra, M. y Romero, E. (2004). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 41: 88-95.
- Samarasinghea, S. M. J. S.; Nandalalb, H. K.; Weliwitiyac, D. P.; Fowzed, J. S. M.; Hazarikad, M. K. y Samarakoond, L. (2010). Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: a case study at Kalu-Ganga river, Sri Lanka. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. 38(8):110-115.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2004). *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (PEOT)*. CIESAS-Golfo. Xalapa, Veracruz. CD-ROM.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2001). *Inventario Nacional Forestal 2000*. México, D. F., México.
- Tejeda-Martínez, A. (2006). Panorámica de las inundaciones en el estado de Veracruz durante 2005. En: Tejeda-Martínez, A. y C. Welsh-Rodríguez (Eds.). *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. pp. 9-20.

- Triviño, A. P. y Ortiz, S. R. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas*. 35:67-83.
- Vidal-Zepeda, R. (1990). *Precipitación media anual en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México*. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Recibido: Agosto 30, 2010

Aceptado: Enero 23, 2012