

INUNDACIONES DE LO GENERAL A LO PARTICULAR UNA ESTRATEGIA PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

FLOODS FROM THE GENERAL TO THE PARTICULAR A STRATEGY FOR LAND USE PLANNING

María Alejandrina Leticia Montes León y Refugio Cervantes Albarrán-Comisión Federal de Electricidad, Centro de Anteproyectos Bajío Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor para correspondencia:
montes.alejandrina@gmail.com*

Fecha de recepción: 13/08/2012
Fecha de aceptación: 24/01/2013

Resumen

En los últimos años el ordenamiento territorial, es sin duda, uno de los mayores problemas que enfrentan las grandes ciudades, producto de su crecimiento y desarrollo. Lo anterior ha causado que el crecimiento sea hacia las zonas rurales o naturales, ocasionando un cambio en el uso de suelo, lo que ha derivado, que muchos asentamientos se encuentren en las zonas más vulnerables de sufrir un daño debido a un desastre natural, como pueden ser las inundaciones. El presente trabajo aborda el peligro de las inundaciones, el primer paso es identificar las zonas suscepti-

bles de ser inundadas en base a la metodología del Índice de Inundación, para posteriormente hacer una clasificación de la manera siguiente: a) que en el área inundada se encuentren asentamientos y/o infraestructura desarrollada, b) que el área inundada sea una zona agrícola y/o ganadera, c) que el área inundada sea una zona donde se pretenda desarrollar nueva infraestructura, o d) que sea una zona libre de peligro por inundación.

Una vez definida esta condición se puede realizar un modelo matemático de la zona de interés a detalle, con la finalidad de dar una solución para la disminución y/o mitigación del daño por inundación.

Palabras clave: Índice de Inundación, vulnerabilidad, ordenamiento territorial

Abstract

In the past few years territorial order without a doubt is one of the biggest problems that big cities have faced because of growth and development that has been generated. The previ-

ous has caused that the growth has affected the natural and rural zones, causing a change in the use of land, what derived many settlements that are found in more vulnerable zones to suffer damaged caused by a natural disaster like floods.

The present job will address the danger of floods, the first step is identifying the susceptible zones of being flooded in the base of methodology of the Flood Index, to then make a classification in this next way: a) that in the flooded area settlements are found and or infrastructure is developed, b) that the flooded area is a farm and/or livestock zone, c) that the flooded area is a zone where new infrastructure will be developed or d) that the free zone is in danger because of flooding.

Once the condition before had been defined a detailed math model can be made in the zone in which one has interest, in the end giving a solution with the decrease and/or mitigation from the damage of floods.

Key words: Flood Index, vulnerability, land use planning.

Introducción

A lo largo de la historia y sin duda hasta nuestros tiempos el flujo de personas hacia las grandes ciudades o de una ciudad a otra, ha generado que estas crezcan en forma desordenada y en la mayoría de los casos sin servicios básicos, lo que antes eran zonas rurales o naturales, ahora forman parte de la ciudad, dando lugar a lo que se conoce como “ciudades estrella” (**Figura 1**) cuyas características principales son que los picos carecen de una trazabilidad adecuada, no cuentan con los servicios más básicos y se tienen altas probabilidades de estar mayormente expuestos a los daños que puedan ocasionar un desastre natural, como es el caso particular de las inundaciones. En los picos de estas ciudades se dan los asentamientos irregulares, en donde al no haber un control en los cambios de uso de suelo, o estar en zonas bajas o de laderas, favorecen su situación ante una mayor exposición a este tipo de riesgos.



Figura 1. Ejemplo de ciudades estrella, Querétaro (izq.) y Pachuca (der.)¹

Son muy frecuentes los cambios de uso de suelo desmedidos, es decir donde antes era una zona agrícola, ahora son nuevos desarrollos habitacionales, o industriales (**Figura 2**), propiciando cambios de régimen en los escurrimientos naturales.

Adicionalmente pocas ciudades, cuentan hasta ahora, con un plan de ordenamiento territorial para los próximos años, lo que dificulta aún más lograr un crecimiento ordenado. Aunado a ello, varias de las instituciones gubernamentales, bancarias y empresas encargadas de realizar desarrollos habitacionales e industriales no cuentan

con las herramientas que les permitan conocer si sus inversiones están en situación de riesgo, así como el patrimonio de las personas.

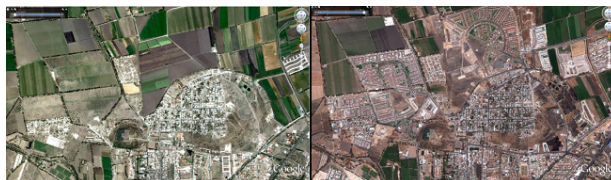


Figura 2. Ejemplo del cambio de uso de suelo de 2004 (izq.) a 2011 (der.), en el municipio de Villa Corregidora, Querétaro.

Es por ello, que el propósito de este trabajo es mostrar una metodología que sirva como apoyo para una mejora del ordenamiento territorial, en base a mapas de riesgo, tal como el de inundación, y así dar pie para que los nuevos desarrollos e infraestructura que se construyan, sea en las zonas libres de este riesgo, o con las medidas estructurales y no estructurales adecuadas para la mitigación del mismo.

De la misma manera se muestra una herramienta aplicada al estado de Querétaro, donde se determinaron las afectaciones por inundación en los municipios de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan, a partir de estas se identificó infraestructura que sufre daños por inundación y se realizó un modelo más detallado con la solución propuesta para la mitigación del daño por inundación.

Metodología

El objetivo de la construcción de un mapa mediante la técnica de Índice de Inundación (Uribe y col. 2010), desarrollada en 2008, y a la que se le han realizado diversas mejoras, consideradas en este trabajo (Montes, 2011), es conocer las áreas susceptibles de ser inundadas ante un determinado periodo de retorno, o la replicación de algún evento en especial. Con esta metodología, es posible cuantificar la extensión de la afectación ante la ocurrencia del evento mencionado, para posteriormente realizar un estudio más detallado de alguna zona en especial y proponer las soluciones

más adecuadas para mitigar el efecto de inundación. En la **Figura 3**, se muestra el procedimiento más a detalle necesario para la obtención de un escenario mediante el Índice de Inundación.

La construcción del mapa de Índice de Inundación se realiza con base en el concepto de acumulación de flujo, que es definido como el área de

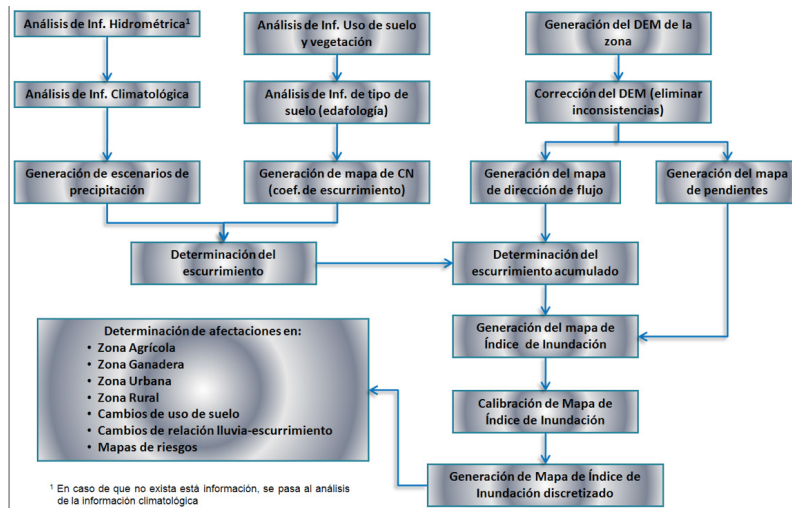


Figura 3. Metodología para la obtención de escenarios con el método de Índice de Inundación. (Creación propia)

drenaje parcial “aguas arriba” hacía un punto en particular. Dicho concepto es combinado con los mapas de precipitación (con diferentes probabilidades de recurrencia) y el método de “Curva Numérica” para estimación de escurrimiento. De manera que es posible determinar la cantidad total de agua que escurre hasta un punto dado así como su probabilidad de ocurrencia.

Este índice se apoya en lo que se conoce como Índice Topográfico (Beven y Kirkby, 1979), el cual, se emplea por primera vez en 1979, cuando se definió un índice para identificar humedales conocidos como zonas perennes y efímeramente saturadas o inundadas a partir de datos de topografía. El índice de Inundación que se propone tiene como base la siguiente información:

- Topografía: Determina el movimiento (dirección) y distribución del escurrimiento.
- Precipitación: Determina la cantidad y distribución de la precipitación para un evento determinado.
- Edafología, vegetación, y uso de suelo: Determina la respuesta del suelo a eventos de precipitación

en función de la Curva Numérica (CN).

- División fisiográfica de las 37 regiones hidrologicas en las que está dividido el país.

A diferencia del índice topográfico, el Índice propuesto permite distinguir cuencas con características climatológicas, con tipo y uso de suelo diferentes, que es indispensable dada la diversidad del país.

El Índice de Inundación (II) se determinó de acuerdo con la expresión siguiente:

$$II = In \left[\frac{\text{Acumulación de Escurrimiento}}{\tan s} \right] = In \left[\frac{Ac Q}{\tan s} \right]$$

donde:

- II Índice de Inundación
- Ac Q acumulación de escurrimiento
- tan s tangente del ángulo de la pendiente

Una vez que se aplica el algoritmo anterior a la

región hidrológica o cuenca en estudio, el resultado obtenido debe ser calibrado y/o validado, lo cual puede lograrse mediante varias opciones como: imagen satelital, imagen de radar, modelo matemático o fotografías aéreas (**Figura 4**), teniendo en cuenta que se debe tener la información sobre la distribución de lluvia asociada a dicho evento, así como su periodo de retorno. En algunos casos cuando no se cuenta con información al respecto, se sugiere realizar encuestas y recorridos en campo para ubicar la extensión de las afectaciones y corroborar estas con las personas que habitan la zona. El dato que se obtiene con esta calibración es el valor umbral a partir del cual se considera que alguna región es susceptible de ser inundada (Montes, 2011).

Una vez determinado el umbral (validación) es posible generar diversos escenarios, asociados a diferentes eventos o periodos de retorno, para determinar la magnitud de la problemática en la que se encuentra la zona de interés y pueden ser cualquiera de las cuatro que se mencionan a continuación:

- que en el área inundada se encuentren asentamientos y/o infraestructura desarrollada,
- que el área inundada sea una zona agrícola y/o ganadera,
- que el área inundada sea una zona donde se pretenda desarrollar nueva infraestructura,
- que sea una zona libre de peligro por inundación.

En cualquiera de los tres primeros casos será necesario realizar una modelación matemática más detallada y así sugerir la solución más adecuada a la mitigación del riesgo por inundación, la cual puede incluir acciones estructurales (bordes, desvíos, etc) o acciones no estructurales (reforestación, restricción en los cambios de uso de suelo, etc).

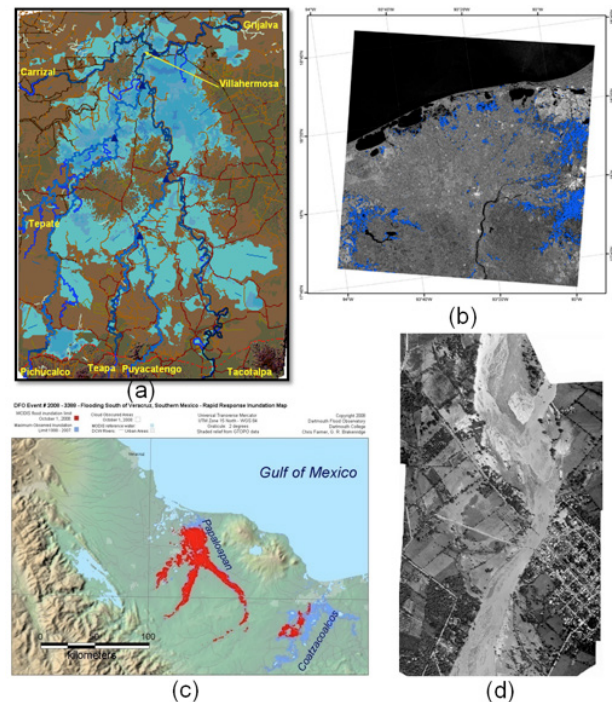


Figura 4. Fuentes para poder realizar calibraciones confiables: a) modelación matemática, b) imagen de radar, c) imagen satelital, d) fotografía aérea.

Evaluación de Resultados

La metodología del Índice de Inundación se aplicó en la Región Hidrológica 26 (RH-28) llamada Pánuco y en la Región Hidrológica 12 (RH-12) llamada Lerma-Santiago, ya que en conjunto cubren la superficie del estado de Querétaro (**Figura 5**), que es donde se desea obtener el mapa de zonas susceptibles de ser inundadas.

Para la aplicación de la metodología se utilizó la información siguiente:

- Topografía² : SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución de de 90 m.
- Edafología: serie II de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Esc. 1:250,000.
- Uso de Suelo y Vegetación: serie III de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Esc. 1:250,000.

Primero se obtuvo el mapa del riesgo por inundación asociado a un período de retorno de 100 años, para realizar la calibración con el polígono de afectaciones provocado por el Huracán Gert

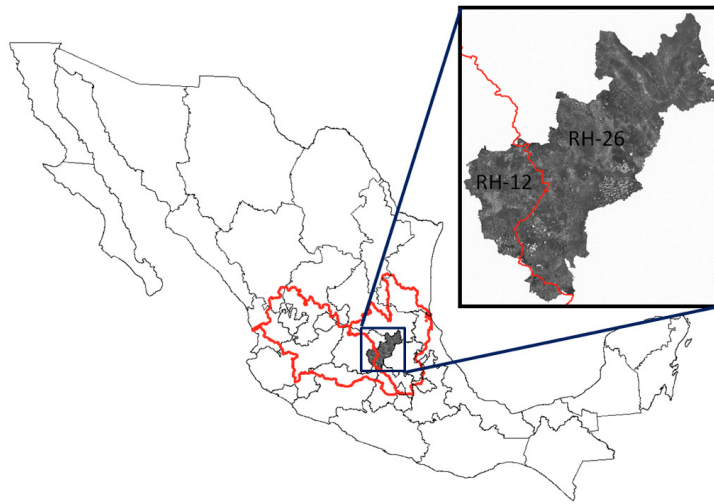


Figura 5. Regiones hidrológicas que cubre la superficie del estado de Querétaro. (Creación propia)

ocurrido en septiembre de 1993, cuya trayectoria puede observarse en la **Figura 6**, donde se muestra que cruza el estado de Querétaro, así como la RH-12 y la RH-26.

El mapa obtenido mediante el Índice de Inundación se calibró con una modelación matemática más detallada realizada en el programa Isis Flow, dicho modelo fue alimentado por una serie de secciones transversales de los cauces, zonas de regulación, hidrogramas, entre los más importantes. En la Figura 7, es posible observar el polígono de las afectaciones por inundación, que se obtiene con el modelo.

De acuerdo a las afectaciones obtenidas con la aplicación de la metodología del Índice de Inundación, y comparándolo con la modelación matemática (**Figura 7**), se considera que el Índice de Inundación reproduce de manera adecuada el polígono, tomando un valor umbral de 10.53, por otro lado, en la **Figura 8** se puede observar la distribución de los resultados, la parte correspondiente a la RH-12 la se calibró preguntando en zonas cercanas al estado como fueron Celaya, y el tramo carretero federal 45 Qro-Celaya a la

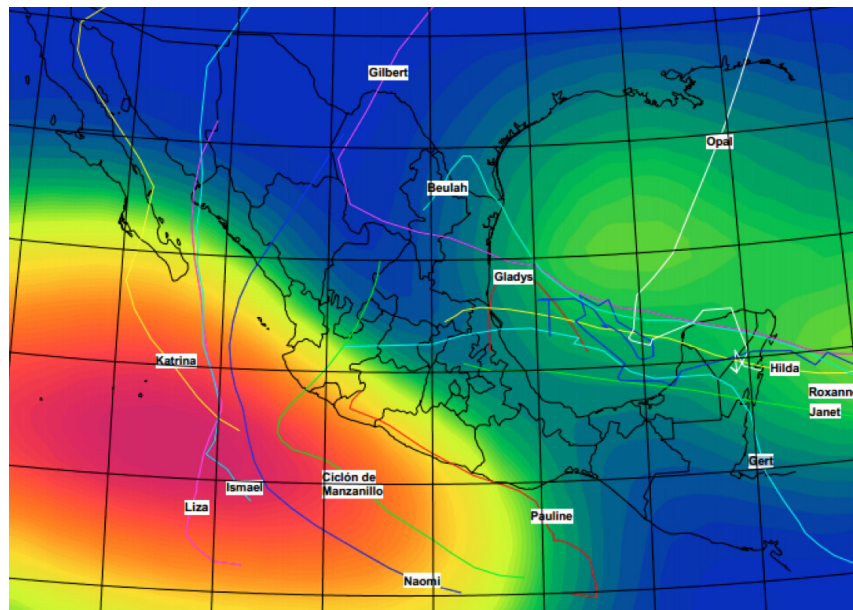


Figura 6. Trayectorias históricas de huracanes. (CENAPRED, 2001)

altura de Mariscala, y el valor umbral obtenido fue de 9.87. Cabe destacar que cada zona en específico tiene su propio valor umbral, por ejemplo para otras zonas donde se ha hecho la calibración como lo es la región RH-30 Grijalva-Usumacinta el valor umbral es de 2.32.

Una vez determinado el valor umbral, se aplicó el algoritmo del Índice de Inundación para ambas regiones hidrológicas con una distribución de precipitación asociada a un periodo de retorno de 25 años, una vez obtenido el mapa se realizó la discretización a partir del valor umbral, y en la **Figura 9** se puede observar el resultado acotado para el estado de Querétaro. Una característica que se debe destacar del Índice de Inundación es que reconoce los cauces naturales y la mayoría de los almacenamientos, debido a las características de la metodología. A pesar de que sólo se muestra el estado de Querétaro, no se debe perder de vista que el problema debe resolverse en conjunto con las entidades dentro de cada una de las regiones hidrológicas. Por ejemplo en el caso de la RH-12 el escurrimiento va de Querétaro a Guanajuato, pero en la RH-26 el escurrimiento va de Guanajuato hacia Querétaro. Aunque cabe destacar que se pueden realizar acciones locales a nivel cuenca o microcuenca.

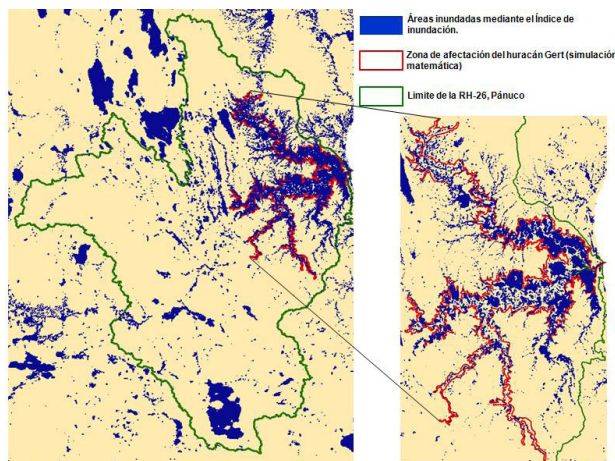


Figura 7. Calibración del Índice de Inundación II vs modelación matemática (Creación propia)

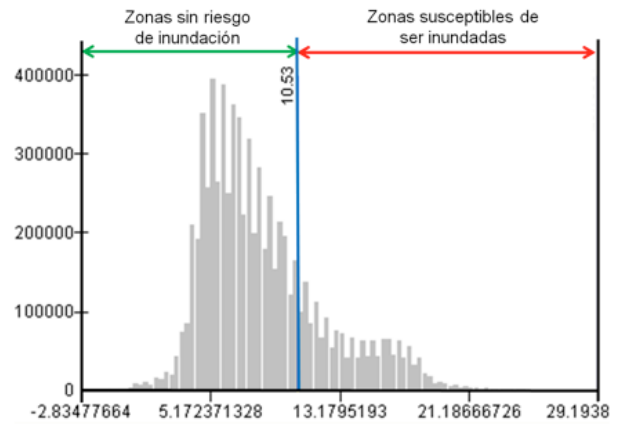


Figura 8. Distribución del resultado del Índice de Inundación para la RH-26. (Creación propia)

En la **Figura 10** se muestra el municipio de Querétaro, y en el recuadro la zona suroeste de la Ciudad, en donde se observa que existen problemas serios de inundación y en las zonas más expuestas se encuentran desarrollos habitacionales.

En la **Figura 11**, se hace un acercamiento del municipio de San Juan del Río, el cual en los últimos años ha sufrido pérdida de infraestructura, así como daños a desarrollos habitacionales, como las ocurridas en septiembre del año 2010.

Por otro lado también se muestra el municipio de Tequisquiapan (**Figura 12**), el cual presentó graves problemas de inundación en agosto de 2008.

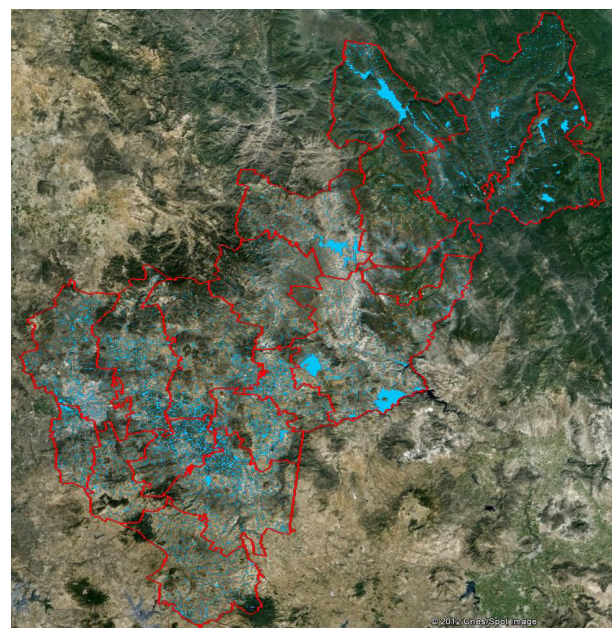


Figura 9. Mapa de Índice de Inundación para el Estado de Querétaro.

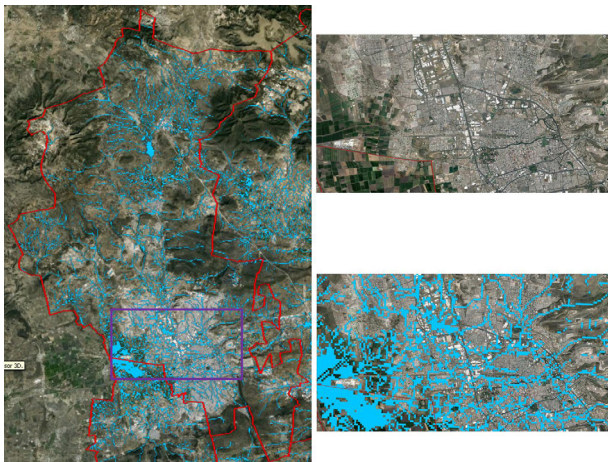


Figura 10. Mapa de Índice de Inundación del Municipio de Querétaro.

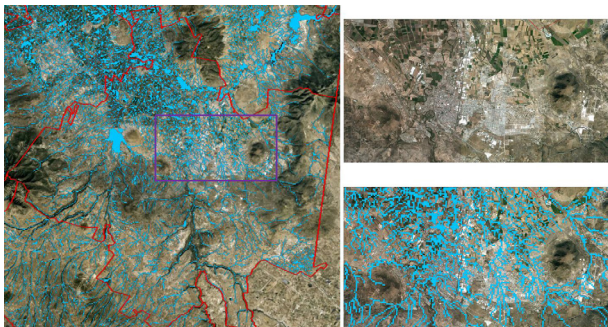


Figura 11. Mapa de Índice de Inundación del Municipio de San Juan del Río.

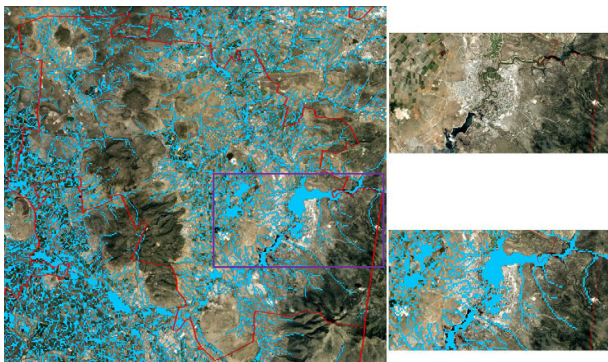


Figura 12. Mapa de Índice de Inundación del Municipio de Tequisquiapan.

Una vez que se obtuvo el mapa del índice de inundación para el estado de Querétaro, se reconoce cierta infraestructura del gobierno federal que presenta afectaciones debido a inundación como puede observarse en la **Figura 13**, esto quiere decir que se encuentra en el caso (a) de los cuatro planteados inicialmente, es decir in-

fraestructura que ya se encuentra construida y se inunda. En la **Figura 14** se puede observar con más detalle las condiciones actuales de la zona.

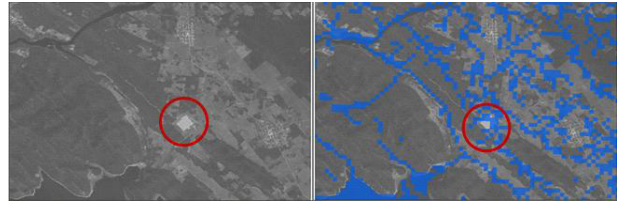


Figura 13. Afectaciones por inundación identificadas en el mapa del Índice de Inundación.



Figura 14. Condiciones actuales de la zona de estudio.

Posteriormente se obtuvo la información topográfica detallada de la zona y se generó un nuevo modelo matemático en un software especializado, en donde permite realizar la simulación de las condiciones actuales y las condiciones futuras de acuerdo al tipo de obra e infraestructura que se sugieren para mitigar el efecto por inundación, en este caso se sugiere que se construyan dos canales de sección trapecial a los costados de la zona afectada para captar los escurrimiento antes de que estos lleguen a la zona, posteriormente estos son dirigidos al canal ya existente, al cual se le hizo una corrección a la pendiente, y finalmente la prolongación de este canal hasta que desembogue con un cauce natural cercano a la zona. En la **Figura 15** se puede ver la ubicación de las obras antes señaladas.

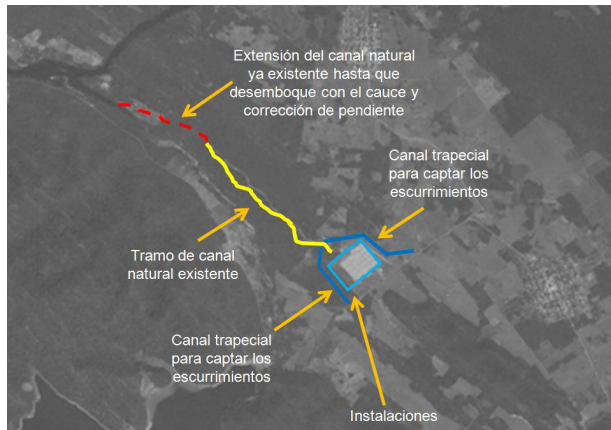


Figura 15. Ubicación de las obras sugeridas.

Una vez realizada la simulación con las obras propuestas puede observarse el efecto de ellas en la **Figura 16**, en donde se ve que la zona queda libre de afectaciones y los escurrimientos son dirigidos al cauce natural.

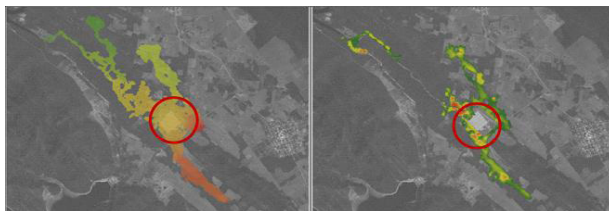


Figura 16. Esquema de la modelación de las condiciones actuales, y el esquema con las obras propuestas.

Comentarios y recomendaciones

- La metodología propuesta en este trabajo es una herramienta sencilla y económica, con aplicación en todo el país, que permite estimar en forma preliminar los sitios susceptibles de ser inundados, ya que la información necesaria para generar los escenarios, está al alcance y disponibilidad de las instituciones.
- Actualmente la metodología del Índice de Inundación se ha aplicado a todo el territorio nacional, pero cabe aclarar que es necesario calibrar aún algunas regiones hidrológicas, además de que se sugiere que las instituciones (municipales, estatales y federales) lo tomen en cuenta para una primera toma de decisiones en lo que respecta al

ordenamiento territorial para evitar autorizar la construcción y desarrollo de zonas habitacionales y de infraestructura en lugares susceptibles de sufrir inundaciones.

- En las regiones donde el modelo ya ha sido calibrado se sugiere que se desarrollen los mapas de afectaciones por inundación para diferentes periodos de retorno.
- Se debe observar que este tipo de riesgos deben ser manejados en conjunto no sólo a nivel municipal, si no a nivel estados pues los límites de los parteaguas abarcan varios de ellos.
- Sería importante que las instituciones que otorgan créditos puente o hipotecarios, contaran con esta herramienta para decidir si se autoriza el crédito, y/o la construcción de nuevos desarrollos, o para diseñar el tipo de obras más adecuado que se deba construir para evitar exponer a las personas y su patrimonio ante un evento de inundación.
- Se recomienda que la metodología se replique tomando como base la topografía del SRTM con una resolución más alta, con la finalidad de obtener resultados más detallados que los obtenidos con la del pixel de 90 m, que fue utilizada en el presente trabajo, por ejemplo se podría usar el SRTM de 30 m.

NOTAS

¹Las imágenes y/o resultados fueron montados en Google Earth (Keyhole, 2012) y en imágenes SPOT (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra o Satélite Para la Observación de la Tierra) de 2008, para obtener una mejor visualización de resultados.

²Se realizaron pruebas con la topografía de diversas fuentes entre ellas: ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), CEM (Continuo de Elevaciones Mexicano) de INEGI, SRTM con resolución de 90m, obteniendo mejores resultados con esta última

Referencias Bibliográficas.

- Beven, K.J., Kirkby, M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, pp. 24, 43-69.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México, Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. Primera Edición. Secretaría de Gobernación, CENAPRED.

Keyhole, Inc. y Google. Google earth. Versión 6.2.2. 20 de abril de 2012. [En línea] Disponible: <<http://www.google.com/earth/index.html>>

Montes, L. M. A. L. (2011) Mapas de riesgo: Inundación y erosión. Seminarios de Actualización en Ciencias Ambientales. bril de 2011 [En línea] Disponible: <<http://www.sacauaq.info>> 4 de abril de 2011.

Uribe, A.E.M, Montes, L. M. A. L, García, C. E. (2010) Mapa Nacional de Índice de Inundación. Tecnología y Ciencias del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Vol. I, No. 2, Abril 2010, pp. 73-87.