

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SANTIAGO, CHILE, AGOSTO 2014**

**INTERACCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA  
CON FLUJOS DE INUNDACIÓN**

*López López Marco Rodrigo, Laverde Barajas Miguel Ángel, Pedrozo-Acuña Adrián*

*Instituto de Ingeniería de la UNAM, México*

*mlopezlo@ii.unam.mx; mlaverdeb@ii.unam.mx; apedrozoa@ii.unam.mx*

**RESUMEN:**

Las inundaciones ocasionadas por el desbordamiento de ríos, han tenido una repercusión muy negativa en el ámbito económico y social en diversas regiones del mundo (EM-DAT.2011). La dificultad asociada a la predicción de este tipo de fenómenos, hace necesario el realizar estudios a un mayor detalle, a través de los cuales es posible proponer nuevas estrategias de mitigación y adaptación ante estos eventos (Michel-Kerjan, 2012). Tal como lo señala Pedrozo-Acuña (2012), la nueva estrategia mundial para el manejo del riesgo generado por estos eventos extremos, recae no solamente en la construcción de obras de defensa, como bordos, compuertas de derivación y dragado de los ríos, sino también en la incorporación de otras medidas de mitigación que permiten reducir la severidad de los daños asociados a estos fenómenos (ej. adaptación de carreteras, cambios en el uso de suelo, etc.). Para ello, es necesario considerar la interacción entre los flujos de inundación, con la infraestructura carretera, bajo condiciones de un clima que está cambiando. La primordial motivación del trabajo propuesto, consiste en dar respuesta concreta a la pregunta fundamental de cómo se debería desarrollar la infraestructura carretera de una manera sustentable, de tal suerte que permita el transporte de nutrientes a zonas de alto valor ecológico (ej. humedales) y se minimicen los daños a los caminos y a la población asentada en llanuras de inundación.

**ABSTRACT:**

The floods caused by the overflow of rivers, have had a very negative impact on economic and social fields in various regions of the world (EM-DAT.2011). The difficulty associated with predicting such phenomena, makes it necessary to perform a more detailed study, through which is possible to propose new mitigation and adaptation strategies to these events (Michel-Kerjan, 2012). As noted by Pedrozo-Acuña (2012), the new global strategy for the management of the generated risk by these extreme events, lies not only in the construction of defense works, as dikes, diverter gates and dredging of rivers; but also in the incorporation of other mitigation measures that reduce the severity of damage associated to these phenomena (e.g. roads adaptation, changes in land use, etc.). For this, it is necessary to consider the interaction between flood flows, with the road infrastructure, under conditions of a changing climate. The primary motivation of the proposed work is to give a concrete answer to a fundamental question, how should develop the road infrastructure in a sustainable way, in such a way to allow the transport of nutrients to high ecological value areas (e.g. wetlands) and minimize the damage to roads and the population settled in floodplains.

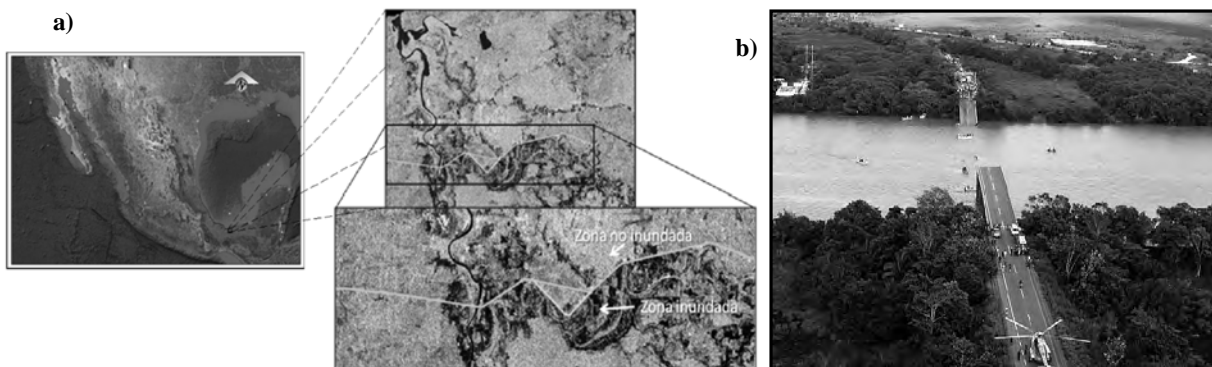
**PALABRAS CLAVES:** Inundación, Carreteras, Hidrodinámica.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura carretera, así como la utilización de nuevas tecnologías en la construcción de caminos, han tenido un gran avance, como respuesta a la necesidad de tener un transporte terrestre más eficiente y así poder comunicar a las ciudades con base en una estrategia que favorezca el desarrollo económico de los países. El aumento en la construcción de caminos trae consigo nuevas oportunidades para expandir el turismo, el transporte de materiales, productos y la creación de empleos, por lo cual, la infraestructura carretera es un ámbito que seguirá siendo explotado a causa de las múltiples ventajas que representa.

Una carretera consiste en la obstrucción artificial de la zona en la que se ubica, constituyendo una barrera física (ocasionada por el terraplén) que divide al terreno natural y genera diversos tipos de impacto ambiental, en los cuales se afecta la topografía del terreno, así como el sistema de drenaje natural de las cuencas y sub-cuencas. Las carreteras y puentes pueden modificar los drenajes superficiales que se dan de forma natural en una llanura o cuenca. En este sentido, es de vital importancia evaluar la interacción entre infraestructura carretera y flujos de inundación en aquellas regiones donde existan antecedentes. Uno de los casos más emblemáticos, se presentó en noviembre de 2009, en la carretera federal 180 Coatzacoalcos-Villahermosa que comunica al centro con el sureste de México, en donde, para el mismo año aconteció el colapso del puente “Tonalá I”, debido a las intensas lluvias.

La Figura 1 presenta la imagen de radar correspondiente al 9 de noviembre de ese año, fecha en que se registró una inundación importante en la cuenca del río Tonalá, como se observa en la imagen. Existe una clara división de flujos por la presencia de la carretera federal, lo que impide el drenaje natural hacia la desembocadura del río.



**Figura 1.-** a) Imagen de Radar de la carretera Federal Coatzacoalcos-Villahermosa en su tramo del km 36+000.00 al km 45+000.000, durante el evento de inundación de 2009. b) Colapso del Puente Tonalá, 2009.

En este sentido, para este trabajo se utilizó el evento mencionado anteriormente, como caso de estudio real. En él se considera el modelado hidrológico de la amenaza para condiciones extremas de diseño, a fin de determinar la avenida de diseño asociada a un periodo de retorno de 100 años. Se utilizó un modelo hidrodinámico bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras (DHI, 2011). Esto permitió establecer los niveles y áreas de afectación bajo el forzamiento de esta avenida y en diferentes escenarios de construcción de la carretera. La metodología incorpora la utilización de un modelo digital de elevaciones de alta calidad y precisión, generado a partir de una nube de puntos LiDAR (INEGI, 2008), así como datos de diversas estaciones climáticas en la región propiedad del Sistema Meteorológico Nacional.

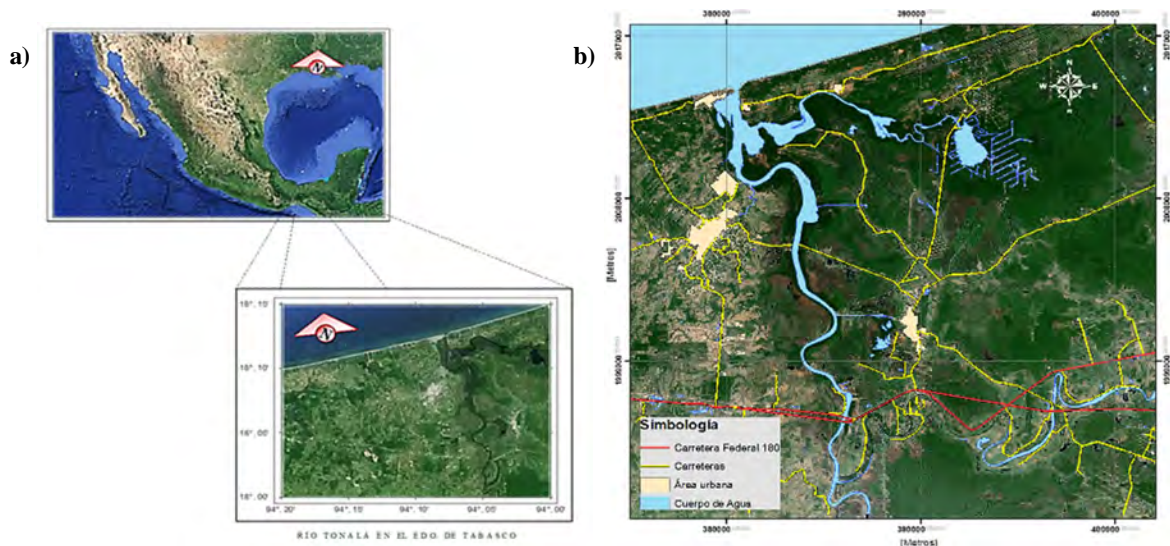
Los escenarios fueron seleccionados a fin de evaluar las variaciones presentadas en los niveles de inundación y áreas de inundación en la llanura, de tal suerte que fuera posible establecer la alteración del drenaje natural por la presencia de la carretera. Los tres escenarios de simulación del flujo de inundación en esta región fueron los siguientes:

- 1.-Simulación de la llanura de inundación con carretera integrada al Modelo Digital de Elevación (DEM);
- 2.-Simulación de la llanura de inundación considerando el cuerpo carretero sin alcantarillas (elevación de la rasante); y
- 3.-Simulación de la llanura de inundación considerando la carretera y sus obras de drenaje existentes.

El objetivo principal de este trabajo consiste en analizar la interacción entre un flujo de inundación ocasionado por el desbordamiento del río Tonalá, en el estado de Tabasco, en México, y el terraplén de la carretera Federal 180 y su sistema de drenaje. De tal manera que los resultados permitan evaluar el sistema, establecer la funcionalidad de la carretera ante una inundación y por último, analizar la socavación que provocó el colapso del puente “Tonalá I”.

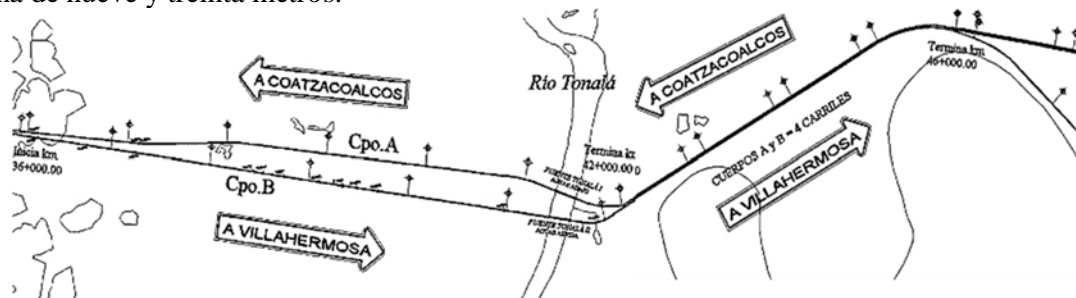
## ARÉA DE ESTUDIO

El río Tonalá se localiza en los  $18^{\circ} 13' n$  (UTM 2014528) y  $17^{\circ} 23' n$  (UTM 1922318) y  $94^{\circ} 08' o$  (UTM 380163) y  $93^{\circ} 45' o$  (UTM 420330). El río tiene su desembocadura en el Golfo de México, en la barra inmediata al poblado de Tonalá, en el estado de Veracruz.



**Figura 2.-** a) Ubicación de la zona de estudio. b) Río Tonalá, en el estado de Tabasco, en México.

La carretera “Coatzacoalcos-Villahermosa” forma parte de la carretera Federal y Estatal. Este tramo es de gran importancia para el transporte terrestre, ya que comunica a los estados de Veracruz y Tabasco, generando el incremento de la actividad económica. El tramo con riesgo de inundación es el que corre del km 36+000.00 al km 56+000.000. Este tramo cuenta con anchos de corona de nueve y treinta metros.



**Figura 3.-** Vista en planta del tramo carretera en estudio.

## DRENAJE

Conocer el tipo de alcantarillas y su ubicación a lo largo del tramo de estudio fue fundamental para el análisis del funcionamiento de la carretera. Dentro del reconocimiento de obras de drenaje se obtuvo un conteo final de 47 alcantarillas, de las cuales se tienen veintiséis alcantarillas tubulares con diámetros de 1.20 y 1.50 metros, doce losas de drenaje y nueve cajones de concreto armado. En la carretera existe un canal triangular entre los cuerpos A y B que corre del km 42+160.00 hasta el km 44+460.00 (Tomando como referencia el cuerpo A). Este canal triangular funciona como drenaje pluvial, transportando por gravedad el agua de lluvia a la obra de drenaje transversal más próxima; con el fin de dar alivio al agua acumulada en la superficie de rodamiento del camino.

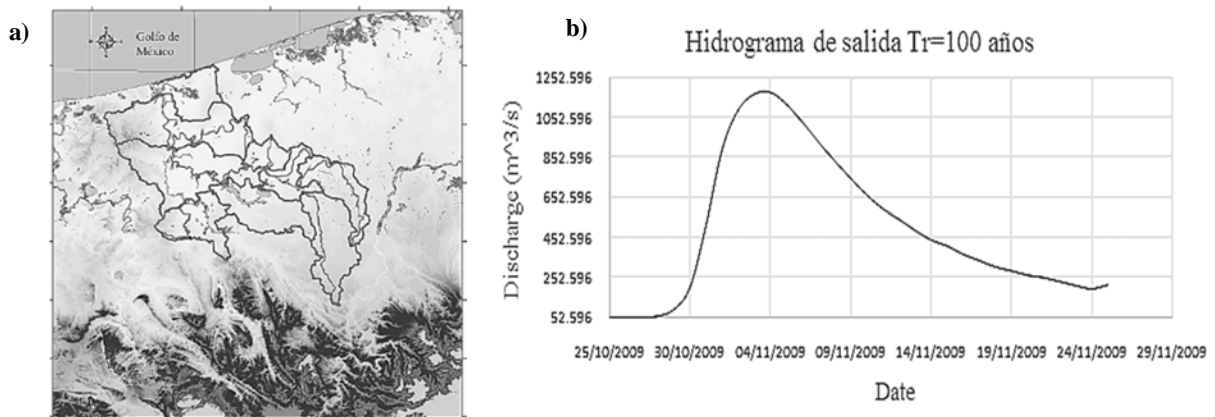


**Figura 4.-** Obras de drenaje de la Carretera Villahermosa-Coatzacoalcos. a) Cajón de drenaje. b) Tubo doble. c) Losa doble de drenaje

## MODELO HIDROLÓGICO

El diseño hidrológico de las obras de drenaje en carreteras es limitado, como consecuencia de la falta de información y sobre todo de tiempo para su diseño. Esta situación genera que los flujos hidrológicos en la proyección de carreteras contengan un alto grado de incertidumbre. Es por eso que para la cuenca del río Tonalá, se realizó un análisis de escurrimiento con el objetivo de encontrar el caudal que se generó en la cuenca hidrográfica para el evento de precipitaciones extraordinarias del 2009. Para el desarrollo del modelo hidrológico, se usó el Modelo para Pronóstico de Escurrimiento (MPE) desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este modelo se desarrolló con el objeto de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos (Domínguez et al, 2008).

El hidrograma de diseño obtenido se utilizó para simular el flujo en el área de estudio. La Figura 5 muestra el hidrograma de diseño resultado del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 100 años.



**Figura 5.-** a) Cuenca del río Tonalá. b) Hidrograma de Salida Tr=100 años.

## MODELO HIDRODINÁMICO

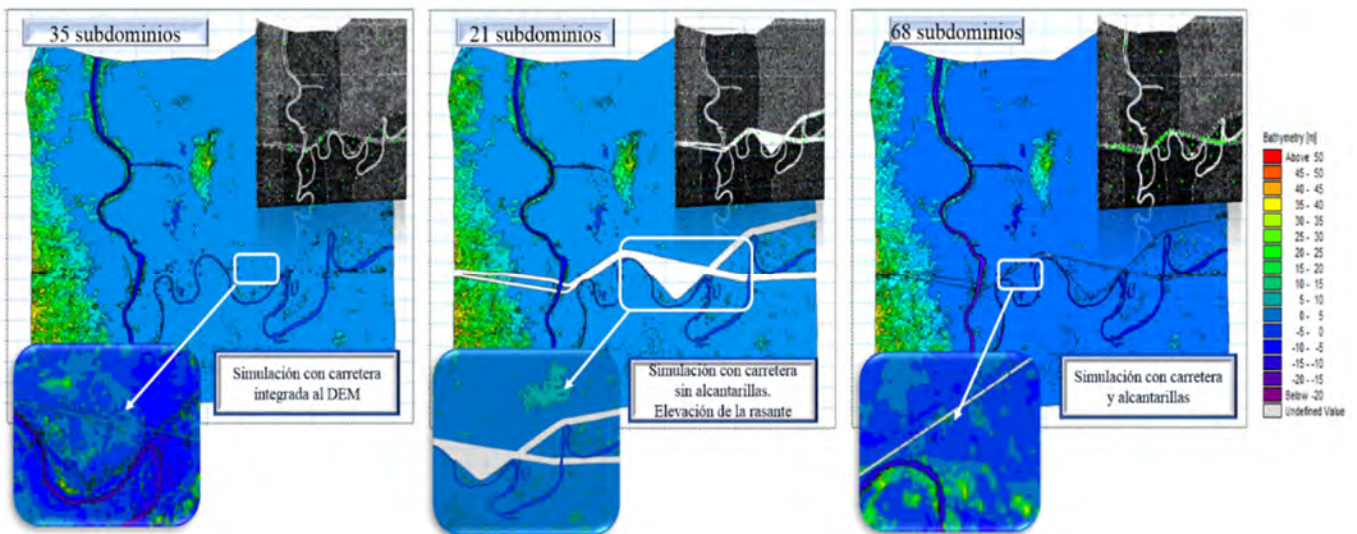
A fin de determinar las consecuencias en la llanura de inundación, asociadas a una avenida con periodo de retorno de 100 años, se utilizó un modelo hidrodinámico bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras (DHI, 2011). Esto permitió establecer los niveles y áreas de afectación bajo el forzamiento de esta avenida y en diferentes escenarios de construcción de la carretera. Adicionalmente, la metodología incorpora la utilización de un modelo digital de elevaciones de alta calidad y precisión, generado a partir de una nube de puntos LiDAR (INEGI, 2008).

En este trabajo se utilizó el Modelo Hidrodinámico Bidimensional MIKE 21 desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute). Este modelo utiliza un mallado flexible y ha sido desarrollado para ambientes oceanográficos, costeros y estuarinos. El modelo está basado en la solución de las ecuaciones de aguas someras (2D-Shallow Water Equations). Consiste en ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad y densidad.

Para la puesta a punto del modelo, las líneas que definen las carreteras fueron obtenidas de archivos tipo *shape* del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). El polígono que integra al tramo carretero en estudio, se construyó de acuerdo a los anchos de corona correspondientes a los diferentes tramos de la carretera Federal 180 (SCT). La representación de las alcantarillas, tomando en cuenta sus dimensiones y funcionamiento, se realizó utilizando la herramienta FLOW MODEL del programa MIKE 21. En la interfaz del FLOW MODEL se cuenta con la opción de introducir estructuras, en este caso “culverts”. La localización de las estructuras fue definida por un par de puntos geo-referenciados, los cuales al unirse forman una polilínea. La longitud de la polilínea define el ancho de la estructura (width), la cual es perpendicular a la dirección del flujo.

Una vez definido el dominio de estudio con los datos de entrada, se construyeron los polígonos correspondientes al tramo carretero. Adicionalmente se agregó la información del modelo digital de elevación (DEM) en forma de datos coordinados XYZ para generar la triangulación y calcular la malla. Terminado el proceso anterior, se interpoló la malla para generar la topografía, con la cual trabaja MIKE 21.

La malla del modelo fue construida a través de distintos subdominios, mediante elementos triangulares, como se muestra en la Figura 6. El número de subdominios, al igual que la resolución de los mismos, fue diferente para cada una de las tres simulaciones realizadas. La resolución máxima fue dada al cauce y al polígono que corresponde a la carretera.

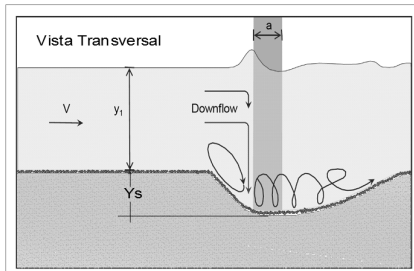


**Figura 6.-** Malla e interpolación de los tres escenarios de simulación.

## ANÁLISIS POR SOCAVACIÓN BAJO LAS PILAS DEL PUENTE “TONALÁ I”

Cuando se presenta una avenida, aumenta la velocidad del cauce en la sección del cruce del puente, por ser generalmente menor el área hidráulica en esa zona. El aumento de la velocidad provoca un incremento en la capacidad de arrastre de la corriente, por lo que el fondo del cauce se degrada. Si el nivel del fondo descende, el área hidráulica comienza a incrementar paulatinamente hasta que el valor medio de la velocidad y la capacidad de arrastre alcanzan un equilibrio.

Dentro de las ecuaciones existentes para evaluar la socavación, se encuentra una, propuesta por la Universidad de Colorado (CSU), en Estados Unidos de Norteamérica, la cual involucra varios aspectos importantes, tales como las características del material del fondo, la configuración del cauce, las características del flujo, la geometría de la pila y la cimentación (HEC-18.2012). Matemáticamente, se expresa mediante la Ecuación 1.



$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0k_1k_2k_3 \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad [1]$$

**Figura 7.-** Socavación bajo pila.

Donde  $y_s$ , es la profundidad de socavación, en m;  $y_1$ , es el tirante inmediatamente aguas arriba de la pila, en m;  $k_1$ , es un factor de corrección para pilas con distintas formas;  $k_2$ , es el factor de corrección debido al ángulo de llegada del flujo;  $k_3$ , es el factor de corrección para tomar en cuenta las condiciones del fondo del cauce;  $a$ , es el ancho de la pila, en m;  $L$ , es la longitud de la pila, en m y  $Fr$ , es el número de Froude directamente aguas arriba de la pila.

**Tabla 1.-** Factor de corrección  $k_1$

Forma de la punta de la pila	$k_1$
(a) Punta Cuadrada	1.1
(b) Punta Redonda	1.0
(c) Cilindro	1.0
(d) Grupo de cilindros	1.0
(e) Punta afilada	0.9

**Tabla 2.-** Factor de corrección  $k_2$

Ángulo	L/a=4	L/a=8	L/a=12
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.8	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Ángulo= ángulo de ataque del flujo  
L=Longitud de la pila

**Tabla 3.-** Factor de corrección  $k_3$

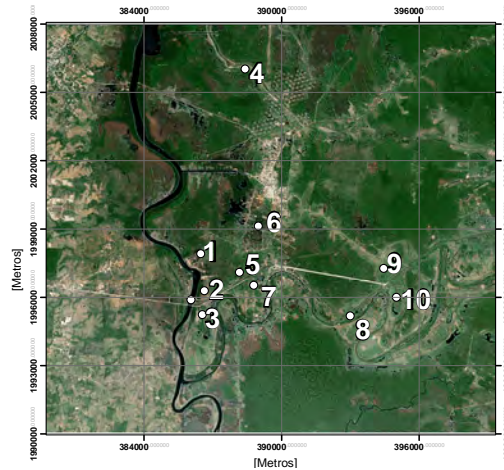
Bed Condition	Dune Height ft	$K_3$
Clear-Water	N/A	1.1
Plane bed and Antidune Flow	N/A	1.1
Small Dunes	10> H > 2	1.1
Medium Dunes	30>H>10	1.2 to 1.1
Large Dunes	H>30	1.3

El factor de corrección  $k_1$  deberá determinarse por la Tabla 1 para ángulos de ataque del flujo de hasta 5 grados. Para ángulos mayores, domina  $k_2$ , y el factor  $k_1$  deberá ser considerado como 1.0. Si L/a es mayor a 12, usar el valor L/a=12 como máximo para la Tabla 2.

## RESULTADOS

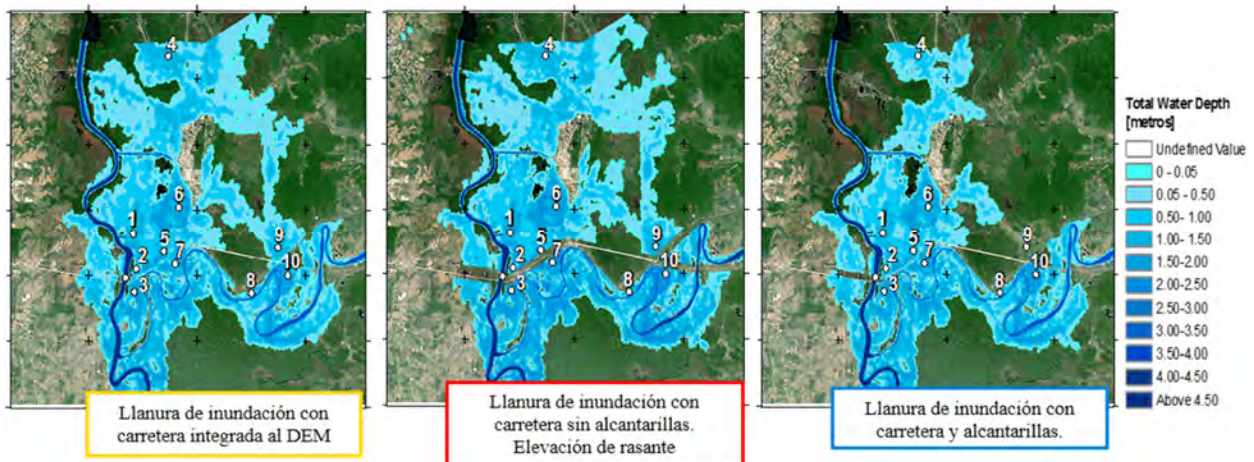
En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones, asociadas a un periodo de retorno de 100 años. Para las tres simulaciones, se consideraron 27 de días de duración correspondientes al gasto de diseño resultado del modelo hidrológico. En las simulaciones realizadas se fijaron 2 diferentes parámetros de estudio: *Profundidad total del agua en metros* y *Velocidad del flujo en metros por segundo*. Para obtener un margen de comparación y realizar un análisis más objetivo de los resultados obtenidos, se seleccionaron diez diferentes puntos sobre el dominio; así se establecen referencias que sirven como base para analizar los dos parámetros en las

tres simulaciones realizadas. En la Figura 8, se muestra el dominio y la ubicación de los puntos de referencia, para comparación, enumerados del 1 al 10. Los puntos fueron seleccionados con base en la necesidad de conocer los niveles y el comportamiento del flujo en esas zonas y de acuerdo a las simulaciones respectivas.

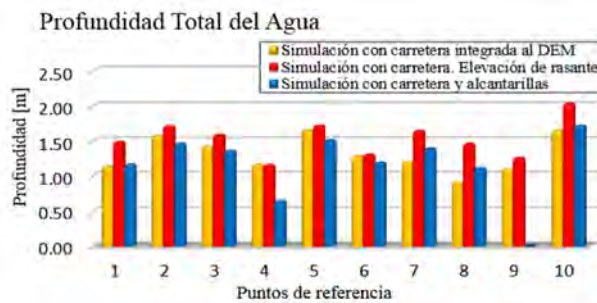


**Figura 8.-** Puntos de Referencia para comparación de resultados

Uno de los parámetros medidos en las simulaciones realizadas fue la profundidad total del agua (Total Water Depth). Para este punto se muestran los valores máximos de profundidad del agua en cada uno de los escenarios de simulación. Se realizó una comparación de los valores obtenidos, para demostrar que el terraplén genera remanso e incrementa los niveles de inundación en la zona.



**Figura 9.-** Escenario de inundación Tr=100 años. Profundidad Total del Agua.



**Figura 10.-** Gráfica. Profundidad Total del Agua.

**Tabla 4.-** Área de la mancha de inundación.

Área	ESCENARIO DE SIMULACIÓN		
	Simulación con carretera integrada al DEM	Simulación con carretera. Elevación de rasante	Simulación con carretera y alcantarillas
Total [ha]	4052.74	4819.00	3436.79

Al considerar los puntos de referencia 5, 6 y 7 (Figuras 9 y 10), se observa que los niveles en la profundidad en los casos de simulación 1 y 3 no tienen mucha variación; sin embargo, en ese tramo de carretera se está presentando inundación del camino para el caso en que no se colocaron alcantarillas (simulación 2); a diferencia de la simulación con alcantarillas en la cual se restringe el paso del agua sobre el terraplén y se logra disminuir el nivel del agua.

En los puntos 7 y 8 (Figuras 9 y 10), el nivel del agua aumenta para la simulación con alcantarillas, en comparación con el primer escenario; esto es debido a que el afluente del río Tonalá, que también desborda, produce un remanso aguas arriba del terraplén. En este tramo, las alcantarillas conducen el agua hacia el canal de drenaje pluvial que corre a lo largo del tramo carretero, con lo cual no se logra dar alivio a la zona, ya que las alcantarillas funcionan como vasos comunicantes únicamente. Con base en la Tabla 4, la presencia de alcantarillas, ocasiona la reducción del área de la mancha de inundación en un 28.68% en relación con el caso más desfavorable (simulación con carretera. Elevación de rasante); demostrando que el sistema de drenaje permite una mejor regulación del flujo.

Durante una avenida se presentan fuerzas estáticas, dinámicas y de subpresión que pueden dañar puentes carreteros. En este sentido, es importante realizar un estudio de estas acciones para el diseño de puentes (ej. Puente Tonalá I). Para llevar a cabo el análisis de velocidad del flujo (Figura 11) en la zona del puente, se añadió un punto extra de referencia (Punto 11). Este parámetro permitió estimar la socavación originada en la cimentación del puente Tonalá I.

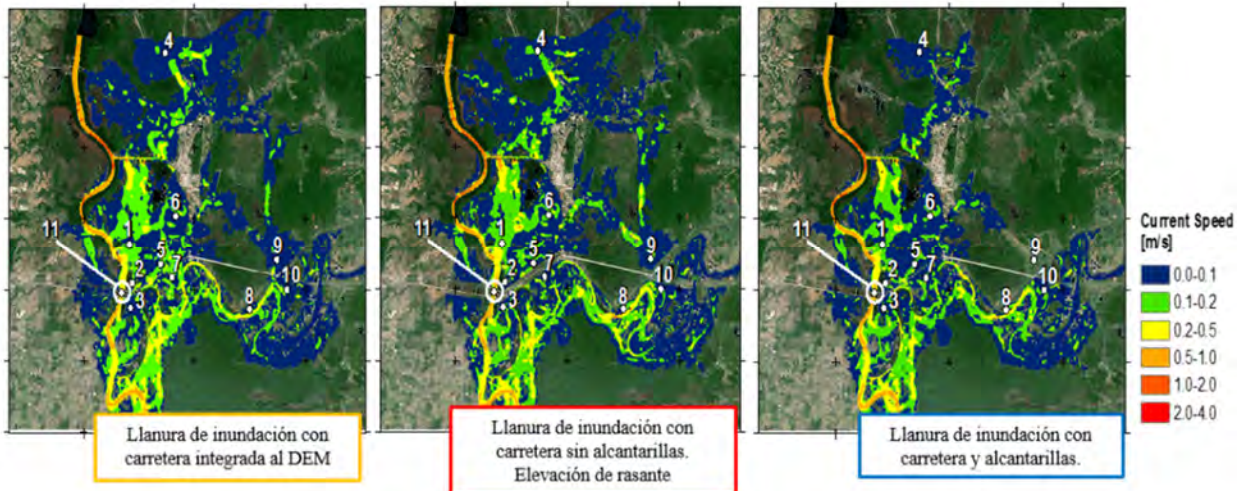


Figura 11.- Escenario de inundación Tr=100 años. Velocidad Máxima Promedio del Flujo.

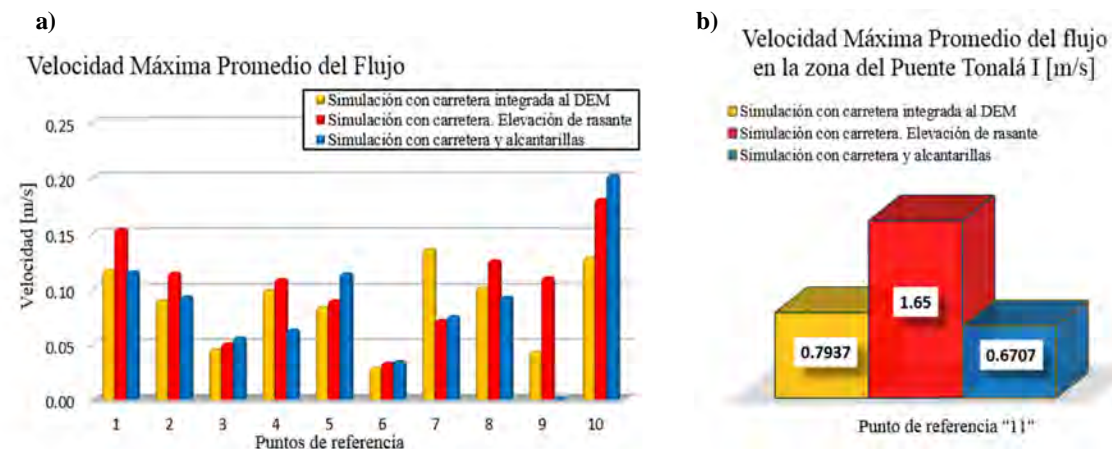
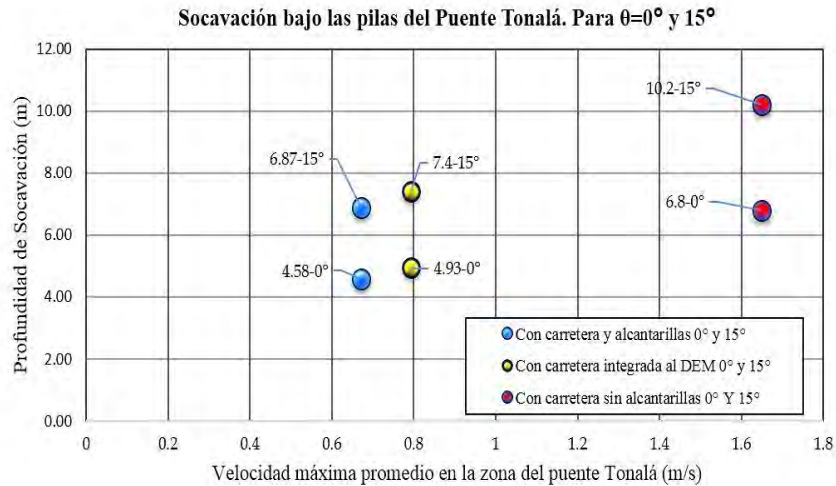


Figura 12.- a) Gráfica de Velocidad Máxima Promedio del Flujo. b) Velocidad Máxima Promedio en la zona del Puente Tonalá I (Punto 11)



En la Figura 12 se muestra la gráfica de los valores de velocidad máxima promedio del flujo para los puntos de referencia. En el punto 7 se hace notar que la velocidad del flujo incrementa para la primera simulación, ya que se produce el desbordamiento del flujo sobre el terraplén; adicionalmente, para el punto 10 se observa el incremento de la velocidad en el tercer caso de simulación, en el cual influye la presencia de alcantarillas, a diferencia de los casos de simulación 1 y 2 en donde la velocidad se ve disminuida por el remanso ocasionado por la presencia del terraplén.

Utilizando la Ecuación 1 y el valor de la velocidad máxima obtenida en la zona del Puente Tonalá I (Figura 12 b), se obtuvieron los resultados de socavación bajo las pilas para los tres escenarios de simulación. Los valores de socavación fueron calculados para dos ángulos de ataque del flujo sobre las pilas ( $0^\circ$  y  $15^\circ$ ).



**Figura 13.-** Gráfica. Socavación bajo las pilas del puente “Tonalá I”

Con base en los valores obtenidos, se observa que la profundidad de socavación es muy sensible en función del ángulo de ataque del flujo. Estudios realizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) acerca de este suceso, muestran una altura de socavación de 11 m bajo las pilas asentadas en lo más profundo del río, la cual es similar a la altura de socavación obtenida para la simulación con carretera igual a 10.20 m (Figura 13). Los resultados permiten establecer que la estrangulación del flujo, por la presencia de la carretera así como por la falta de mantenimiento de las alcantarillas, agrava considerablemente el efecto de socavación bajo las pilas, siendo causa importante del colapso del puente Tonalá I.

## CONCLUSIONES

Se demostró que la deficiencia del sistema de drenaje y la elevación del terraplén, produjeron el incremento de los niveles de inundación; tal situación, ocasionó el aumento en la velocidad del flujo del río Tonalá, generando socavación en las pilas del puente. El colapso del puente no fue un suceso aislado a la presencia de la carretera. El terraplén contribuyó a la estrangulación del flujo, provocando el colapso del puente.

Con base en los resultados, es evidente que un proyecto adecuado de drenaje en carretera ayuda a regular de manera más eficiente los flujos de inundación. La falta de proyección de alcantarillas en la carretera federal 180 Coatzacoalcos-Villahermosa, deriva de la hipótesis de que el terreno desciende hacia ambos lados del camino, por lo cual no sería necesaria la construcción de

obras de drenaje; sin embargo, el planteamiento de esa teoría no considera una inundación de proporciones tales como la sucedida en 2009 en Tabasco.

Las alcantarillas que se comunican con el canal central de drenaje (canal triangular) pluvial no son suficientes para desalojar el agua. Es necesario construir obras de drenaje que tengan la pendiente adecuada para que el agua pueda fluir a través del camino y no se estanque.

Se recomienda llevar a cabo estudios hidrodinámicos para proyectos de carreteras ubicados sobre llanuras de inundación. En el caso del drenaje de carreteras, utilizar modelos hidrológicos distribuidos a fin de determinar el gasto de diseño de manera más confiable.

Es necesario renovar el sistema de drenaje de la carretera federal 180. De acuerdo a las normas de diseño actuales de la SCT, debe existir una obra de drenaje por lo menos cada 500 metros de carretera; lo cual no se cumple para este caso. Las 47 obras localizadas son escasas para los 20 kilómetros pertenecientes al tramo de estudio de este trabajo.

En este trabajo se hizo la suposición de que las alcantarillas funcionaban de forma correcta y en condiciones tales que no se encontraran obstruidas o azolvadas; y aun así, el sistema de drenaje es deficiente. Por lo tanto, se recomienda dar un mantenimiento continuo a esta infraestructura.

De acuerdo con la SCT, ya existe una propuesta para la renovación del tramo carretero en estudio, que incluye la elevación de la rasante y la ampliación a 8 carriles. Este trabajo puede servir como base para un futuro diseño de acuerdo con los procesos hidrológicos del medio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al Instituto de Ingeniería por el apoyo para llevar a cabo este proyecto, así como al M.I Pedro Noé Paredes Victoria por su asesoría en el manejo de software y construcción del modelo numérico utilizado en este trabajo.

## **REFERENCIAS**

- Dominguez et al., 2008.** Dominguez M. R., Esquivel G. G., Mendez A. B., Mendoza R. A., Arganis J. M. L., Carrizosa E. E., 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 978-607-2-00316-3.
- DHI, 2011.** MIKE21 – Flow model Hydrodynamic module, Scientific documentation, 60pp.
- EM-DAT (2011).** OFDA/CRED Base de datos Internacional de desastres (International Disaster Database), Universite Catholique de Louvain, Brussels, <http://www.cred.be/emdat>.
- HEC-18 (2012).** Hydraulic Engineering Circular No. 18. “**Evaluating Scour at Bridges**”. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Fifth Edition.
- INEGI, 2008.** Nube de Puntos LIDAR ajustada al Terreno, Bloque conformado por las cartas 1:50,000: E15A75, E15A76, E15A85, E15A86 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Michel-Kerjan, E., (2012)** How resilient is your country? Nature 491, 497 (22 November 2012) doi:10.1038/491497a
- Pedrozo-Acuña A., (2012).** Inundaciones: Evaluación y manejo del riesgo. AGUA en Quintana Roo, Año 2, No.2, Enero-Marzo 2012. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo.