

ELABORACIÓN DE ESTUDIOS HIDRÁULICOS PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE CARRETERAS Y SUS PUENTES

Tania Paola Robles Montero, Guillermo Leal Báez y Juan Carlos García Salas

Inesproc, S.A. de C.V., México.

E-mail: tania.robles@inesproc.mx, guillermo.leal@inesproc.mx, juancarlos.garcia@inesproc.mx

Antecedentes

La ingeniería es un reto constante a la capacidad intelectual del ser humano: ningún problema es exactamente igual a otro. En este sentido, tampoco lo son las metodologías para encontrar una solución.

El diseño de carreteras es un ejemplo claro de lo anterior, dado que la complejidad de su diseño va mucho más allá de unir una localidad con otra. Desde el punto de vista hidráulico, se debe diseñar su sistema de drenaje superficial y subterráneo, así como los cruces con ríos o cuerpos de agua. Para ello es necesario analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca o las cuencas que atraviesa y, especialmente, el peligro de inundación de la zona y las elevaciones de superficie libre del agua (SLA) asociadas a él, además de las velocidades del flujo.

Con el propósito de garantizar que los proyectos carreteros tomen en cuenta lo anterior, algunos países han desarrollado sus propios lineamientos para la elaboración de los estudios hidrológicos e hidráulicos necesarios para un diseño adecuado. Por ejemplo, en México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha establecido las normas que rigen la elaboración de los estudios requeridos para el diseño de puentes carreteros, y regulan desde los trabajos en campo y procesamiento de la información, hasta su presentación (SCT, 2000).

Aunque estos lineamientos han sido de gran utilidad para mejorar el diseño hidráulico de carreteras y puentes, en general, sólo establecen los requisitos mínimos que deben cumplir los estudios hidrológicos e hidráulicos; dejando al proyectista la decisión sobre su nivel de detalle ante la posible necesidad de estudios con un mayor rigor técnico. Esto puede conducir a diseños deficientes; ya sea porque no garantizan la seguridad estructural de la carretera, o bien, en el otro extremo, porque sobreestiman las obras y elevan su costo de construcción de una forma importante e innecesaria.

Por otra parte, el desarrollo tecnológico de los equipos de cómputo y de los programas de modelación hidrológica e hidráulica proporciona herramientas de gran utilidad para optimizar el diseño de carreteras y puentes carreteros.

Objetivo

Evidenciar que el diseño de carreteras y cruces puede requerir de distintos tipos de estudios hidráulicos que, más allá de cumplir con la normativa que los rige, deben adecuarse a las características propias de la cuenca, sus cauces y la dinámica de inundación y drenaje de sus planicies, así como responder a las necesidades del proyecto; para lo cual se deben aprovechar las herramientas que existen actualmente para facilitar su elaboración y mejorar la precisión de sus resultados.

Desarrollo

Para demostrar el planteamiento de este trabajo, se presenta un análisis de los estudios hidráulicos elaborados para la construcción de un tramo de la autopista Tuxpan-Tampico, en la planicie costera del golfo de México: desde las causas que los motivaron y las metodologías empleadas en ellos, hasta las conclusiones y decisiones tomadas a partir de sus resultados.

Dichos estudios fueron realizados con distintos propósitos: el análisis de diferentes alternativas de trazo, la definición de la elevación de su rasante, el análisis de la influencia del cuerpo carretero en la dinámica de inundación y drenaje de la planicie y el diseño hidráulico del Puente Tuxpan.

Estudios de la autopista Tuxpan-Tampico

La autopista Tuxpan-Tampico comunicará directamente dos de los puertos más importantes de México: Tuxpan, en el estado de Veracruz, y Tampico, en el estado de Tamaulipas; por lo que es fundamental para el desarrollo económico y social del país. Para ello, cruzará en su parte baja el río Tuxpan, que es uno de los cauces más importantes del territorio nacional, con una cuenca de aportación, hasta su cruce con la autopista, de 5 686 km².

El anteproyecto geométrico del tramo que trata este trabajo, Tuxpan-Ozuluama, fue realizado por la SCT, con el fin de integrarlo a la licitación de la construcción, operación y mantenimiento del proyecto, el cual fue concesionado en 2014.

Estudios elaborados previamente

Para realizar el diseño del Puente Tuxpan, sobre el río homónimo, la concesionaria solicitó un estudio hidrológico-hidráulico del río a una empresa consultora, la cual conformó un modelo unidimensional que abarcaba tanto el cauce como la planicie de inundación del río, en un tramo de 40 km de longitud.

A partir de este modelo, dicha empresa concluyó que la rasante del anteproyecto geométrico se situaba por debajo de la cota de inundación asociada a una avenida de 100 años de periodo de retorno; es decir, por debajo del Nivel de Aguas de Diseño (NADI). También concluyó que el puente Tuxpan, propuesto en el anteproyecto con una longitud de 300 m, provocaba una sobre elevación de 1.56 m aguas arriba de la autopista y una velocidad promedio en el cruce de 4.55 m/s. Bajo estos argumentos, recomendó modificar los niveles de la rasante de la autopista y extender la longitud del puente a 1200 m.

No obstante, las modificaciones recomendadas elevaban tanto el costo de la autopista, que su construcción dejaba de ser factible económicamente. Por otra parte, existía un problema social con los pobladores y agricultores de la zona, quienes no estaban de acuerdo con la construcción de la autopista en la planicie; puesto que suponían que el cuerpo de la carretera agravaría la magnitud de las inundaciones.

Dadas las circunstancias, la concesionaria propuso una modificación al trazo, de modo que, aunque aumentara su longitud y costo de construcción, ésta continuara siendo viable.

Estudio bidimensional del río Tuxpan y su planicie

Lo anterior llevó a la necesidad de realizar un nuevo estudio, con el fin de revisar los resultados del antes mencionado y, por lo tanto, evaluar las elevaciones de diseño de la autopista. Por otro lado, se debía analizar cuál era la mejor de las alternativas de trazo desde el punto de vista hidráulico, y cuál sería su influencia en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Debido a que el estudio a realizar era fundamental para la toma de decisiones y resolver la problemática del proyecto, se propuso analizar la dinámica de desbordamiento del río Tuxpan mediante un modelo bidimensional que representara el cauce y su planicie de inundación, bajo condiciones actuales y de proyecto.

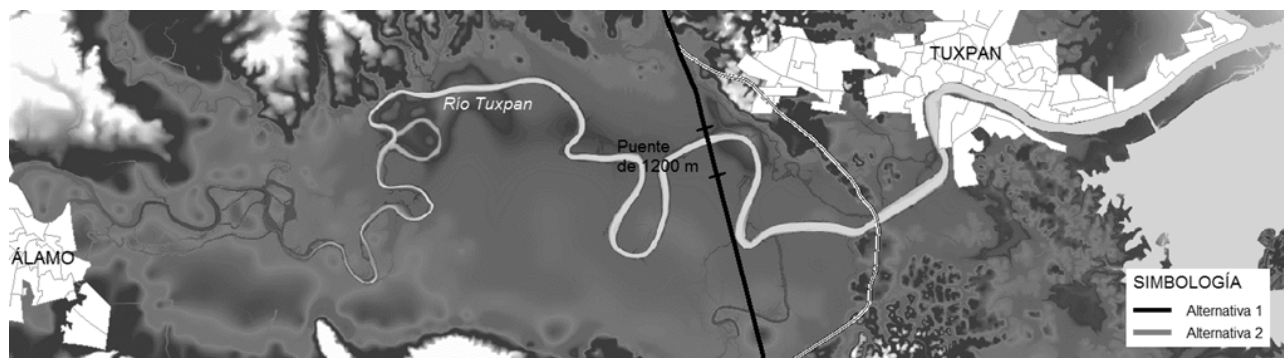


Figura 1.- Zona de análisis en el modelo bidimensional del río Tuxpan y su planicie de inundación, para el diseño de la Autopista Tuxpan-Tampico.

Para el análisis del cauce en sí, se realizó el levantamiento topográfico de un tramo de 60 km del río Tuxpan. En cuanto a la representación de la planicie de inundación, se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) de 3 m de resolución horizontal, construido por restitución fotogramétrica y empleando, como datos adicionales, curvas de nivel a cada 10 m y la red hidrográfica nacional. Con la integración de esta información, se construyó un nuevo MDE de 25 m de resolución horizontal y una extensión de 38.3 x 10.6 km; el cual se muestra en la Figura 1, así como el trazo propuesto en el anteproyecto (Alternativa 1), el propuesto por la concesionaria (Alternativa 2) y, como referencia, la extensión que tendría el puente sobre el río Tuxpan de 1200 m.

Los hidrogramas de entrada al modelo se definieron mediante el análisis hidrológico de la cuenca del río Tuxpan, dividida en 31 subcuencas para construir un modelo hidrológico de parámetros semidistribuidos (en SWMM), con el fin de simular los procesos lluvia-escurrimiento de las partes altas, medias y bajas de la cuenca; este modelo se basó en los registros pluviométricos de 13 estaciones climatológicas y fue calibrado con los datos registrados en dos estaciones hidrométricas.

Los coeficientes de rugosidad fueron definidos usando la metodología de la Guía para la selección de coeficientes de rugosidad de Manning para canales naturales y planicies de inundación, del *U.S. Geological Survey* y la *Federal Highway Administration* (1984).

Dado que se modeló el río hasta su desembocadura, se empleó como condición de frontera una serie de tiempo que describe el comportamiento de la marea astronómica, afectada por la presencia de un huracán (condición crítica).

Finalmente, mediante el software MIKE 21, se simularon cuatro escenarios: condiciones actuales, trazo original con un puente de 1200 m, trazo original con un puente de 400 m y la alternativa de trazo propuesta por la concesionaria.

De este estudio se concluyó que el trazo original de la autopista no interfería con la dinámica general de desbordamiento y drenado de la llanura de inundación y que el trazo alternativo no generaba ventajas importantes. Con base en lo anterior y en el análisis de las cotas y velocidades alcanzadas en cada escenario, la concesionaria decidió continuar con el trazo del anteproyecto y se definieron los niveles de diseño; además, se determinó que la longitud del Puente Tuxpan sería únicamente de 400 m.

Estudios topohidráulicos para el diseño de puentes

Por otra parte, se realizaron los estudios topohidráulicos de cuatro puentes ubicados en el mismo tramo: Chijolar, Estero, Tuxpan y Juana Moza. De acuerdo con los lineamientos de la SCT, estos estudios proporcionan al proyectista los datos hidráulicos necesarios para el diseño estructural de un puente. Se conforman de la recopilación de información fisiográfica e hidrológica, el reconocimiento de campo, el levantamiento topográfico, el procesamiento de la información y los análisis hidrológicos e hidráulicos que definen el comportamiento del flujo en el cauce. Por lo tanto, se trata de estudios localizados que se enfocan al

análisis del flujo sólo en el tramo en el que se ubicará el cruce.

En estos cuatro estudios se definieron los niveles de SLA para avenidas de diferentes periodos de retorno, el nivel de diseño y el gálibo de cada puente, así como las velocidades del flujo.

Por ejemplo, en el caso del puente Tuxpan, se determinó que el NADI se encuentra en la cota 6.94 m y deja libre un gálibo de 2.05 m; incluso, para $Tr = 1000$ años (Nivel de aguas Máximas Extraordinarias, NAME), el nivel de SLA es 7.92, por lo que el gálibo, en este caso, es de 1.07 m.

Conclusiones

El establecimiento de lineamientos que regulen la elaboración de estudios hidráulicos para el diseño de vías terrestres y puentes carreteros ha servido, hasta el momento, para su estandarización; es decir, para que en ellos se apliquen, al menos, metodologías comúnmente aceptadas por su amplio uso en ingeniería.

No obstante, sería necesario resaltar en dichos lineamientos que, en ocasiones, las características propias de una cuenca, un río, su planicie de inundación o el proyecto en sí, ameritan la elaboración de estudios hidráulicos más detallados. Éstos tendrían que considerar factores que permitieran obtener resultados más próximos a la realidad, desde la extensión y resolución de la topografía, hasta el tipo de modelo hidráulico utilizado en el análisis y tránsito de avenidas.

Las herramientas que existen hoy en día deberían cambiar con mayor facilidad el paradigma existente sobre cuáles son los mejores métodos para la elaboración de estos estudios.

Por supuesto, un estudio más detallado es más costoso que uno que sólo cumple con el mínimo necesario establecido por las instituciones que revisan los proyectos carreteros; sin embargo, esta diferencia puede ser insignificante en relación al costo del subdimensionamiento de las estructuras, que podría derivar en cuantiosos daños e, incluso, en la pérdida de vidas humanas.

En el caso contrario, el costo del sobredimensionamiento podría ser tan alto, que hiciera inviable un proyecto, como en la autopista Tuxpan-Tampico; en la que el análisis bidimensional de la dinámica de inundación del cauce y su llanura evitó cambiar el trazo de la autopista, así como sobre elevar 2 m el cuerpo carretero; también permitió concluir que, dada la dinámica de inundación, un puente de 400 m de longitud, funcionaba prácticamente igual que uno de 1200 m.

Por lo tanto, los estudios hidráulicos deben proporcionar al proyectista los elementos necesarios para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de su proyecto, sin un sobrecosto.

Referencias bibliográficas

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2000). *N-PRY-CAR-1-06-001/00, 001 Ejecución de estudios hidráulico-hidrológicos para puentes.*