

Estudio numérico de zonas susceptibles de inundación en los municipios de Abasolo y Salamanca usando Iber

Numerical study of flood-prone areas in the municipalities of Abasolo and Salamanca using Iber

Jair Alejandro Rangel Minguela¹, Vanesa Jocelyn Gaviña Amezcua¹, Humberto Esqueda Oliva², Salvador Botello Rionda³

¹ Estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato.

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

³ Centro de Investigación en Matemáticas A.C.

ja.rangelminguela@ugto.mx, vj.gavinaamezcua@ugto.mx, h.esqueda@ugto.mx, botello@cimat.mx

Resumen

Las inundaciones son fenómenos de origen natural que resultan ser desastrosos para las zonas que las padecen, por las cuantiosas pérdidas económicas que conllevan además de lamentables pérdidas de vidas humanas. La evaluación de los riesgos ante tales fenómenos es un asunto muy importante a considerar en el planeamiento urbano, así como en programas de prevención y mitigación de sus efectos. En el estado mexicano de Guanajuato existen varias zonas susceptibles a sufrir estos fenómenos, dos de las cuales son el objeto de interés de este trabajo debido a que han presentado inundaciones severas desde el año 2000: la zona urbana de Salamanca, y las comunidades de Huitzatarito y Santa Cecilia en el municipio de Abasolo. Se presentan aquí un estudio numérico del fenómeno de inundación para cada zona mediante el programa Iber, partiendo de información geoespacial disponible en bases de datos públicas y simulando una combinación de escenarios a partir de las cuales se pretende entender cómo se desarrolla el fenómeno, cuáles son las variables más significativas y las zonas más afectadas, comparándolas con las que se han presentado en el pasado.

Palabras clave: Modelado de inundaciones; Iber; Salamanca; Abasolo.

Introducción

En el estado de Guanajuato, en los últimos 25 años se han presentado varios fenómenos de inundaciones en varios municipios, algunos con fuerte impacto social y económico y otros con cierta recurrencia. Dos de los más severos se presentaron en la zona urbana de la ciudad de Salamanca en el 2003, y en la comunidad de Huitzatarito (perteneciente al municipio de Abasolo) en el 2021. Este trabajo es el principio de una serie de estudios que se pretenden hacer en dichas zonas para tratar de entender cómo se desarrollan las inundaciones y cuáles son los factores más significativos, lo cual a largo plazo puede conducir a mejores medidas de prevención y mitigación de sus efectos. Ambas zonas se encuentran dentro de la cuenca del río Lerma, el más largo e importante de los ríos interiores del centro de México con 708 kilómetros de longitud y que abarca un área de 48,132 km² (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020). El Lerma pasa por ambos municipios, cruzando Salamanca de este a oeste cerca del centro dividiendo a la ciudad en dos, mientras que en el caso de Abasolo pasa por el sur del municipio, sirviendo de límite natural entre los estados de Guanajuato y Michoacán.

En el caso de Salamanca, la zona de estudio corresponde a una gran área urbana del centro de la ciudad aledaña al río Lerma, y que es una región que históricamente ha presentado múltiples reportes de inundaciones, generalmente vinculadas a episodios de lluvias intensas y al incremento del caudal del río. En septiembre de 2003, dos semanas de precipitaciones intensas provocaron un gasto elevado en el caudal del Lerma, el cual se desbordó afectando a numerosas colonias y sus habitantes (Durán, 2023).

Para el caso de Abasolo, en septiembre de 2021 se registró una severa inundación en las comunidades de Huitzatarito, Santa Cecilia y Estación Abasolo, la cual se prolongó por varias semanas y que tuvo su origen en las intensas lluvias que se presentaron en ese mes (Espinoza, 2021). La acumulación extraordinaria de agua provocó el desbordamiento del Dren Abasolo, una infraestructura hidráulica compleja que conecta con el río Turbio (afluente importante del Lerma), y el propio río Lerma.

Para realizar el análisis de riesgo por inundaciones existen diversas metodologías (Bellos, 2012; Mudashiru *et. al.*, 2021), que dependiendo del tipo de datos que utilizan y el procesamiento de los mismos se pueden clasificar en deterministas o cuantitativas, y paramétricas o cualitativas. Las metodologías deterministas intentan simular el fenómeno físico de la inundación propiamente dicho, y tienen la gran ventaja de que sus resultados son relativamente fáciles de visualizar e interpretar, proporcionando una serie de imágenes y animaciones que muestran cómo evoluciona la inundación en el tiempo, además de que permite reproducir eventos reales pasados, como simular eventos futuros variando la información de entrada.

Una de las metodologías deterministas utilizadas en numerosos trabajos consiste en simular el flujo del agua sobre la superficie del terreno mediante la solución de las ecuaciones de aguas someras (García-Navarro *et. al.* 2019), también llamadas ecuaciones de Saint-Venant. Existen numerosas variantes de dichas ecuaciones según los términos y variables que consideran, así como de métodos numéricos para su solución y programas de cómputo que las implementan. Además del tiempo de preparación que implica realizar el modelo de cálculo necesario para este tipo de métodos, una de sus desventajas es el tiempo de cálculo que se requiere para simular un solo escenario, pudiendo consumir días o hasta semanas en una computadora convencional.

En este trabajo en particular se empleó Iber (Bladé *et. al.*, 2014), un software de licencia de uso libre que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant mediante volumen finito (Cea y Bladé. 2015) y que incorpora un esquema de cómputo paralelo basado en GPU, lo cual permite reducir el tiempo de cálculo. Esto es muy importante porque una de las desventajas de las metodologías deterministas es precisamente el tiempo que implica correr un modelo completo, y se vuelve más relevante cuando se quieren realizar múltiples pruebas sobre una misma región de interés (Esqueda *et. al.* 2022).

Metodología de análisis

Para cada zona de estudio, se realizaron una serie de simulaciones con Iber suponiendo escenarios diferentes, partiendo de información geoespacial contenida en bases de datos públicas y variando datos hidráulicos e hidrológicos para tratar de entender cómo se produce la inundación, cuál de estos dos factores es el más influyente, y cuáles son las zonas que resultan más afectadas en todos los casos. Para realizar una sola simulación en Iber se requiere preparar un modelo de cálculo, para lo cual se necesita la siguiente información esencial:

- Mapas de tipo de uso de suelo en la región a estudiar. El tipo de terreno determina la resistencia que presenta al flujo del agua sobre su superficie, y que se caracteriza mediante un coeficiente de rugosidad. Con esa información se genera un modelo geométrico de la zona de estudio, a partir del cual se define una malla de triángulos para discretizar el dominio completo, que a su vez permite resolver las ecuaciones de Saint-Venant mediante métodos numéricos (en este caso el método del volumen finito).
- Caracterización del relieve topográfico, plasmados en Modelos de Elevación Digital (conocidos por los acrónimos en inglés DTM o DEM). El relieve topográfico define los cauces por los cuales el agua fluye a través del terreno, así como las zonas en que ésta puede acumularse si aumenta la entrada de agua al dominio. De manera típica, los Modelos de Elevación Digital se representan mediante una cuadrícula con coordenadas planas y las alturas del terreno en el centro de los cuadros, siendo un formato relativamente sencillo de leer en muchos tipos de software para sistemas de información geográfica. La información plasmada en los archivos DEM permite modificar las elevaciones de los puntos definidos en la malla bidimensional de cálculo, resultando entonces una superficie tridimensional.
- Entradas de flujo de agua en el dominio, caracterizados por hietogramas de precipitación pluvial e hidrogramas del flujo de agua a la entrada de los cauces que crucen el área de interés. Los datos de lluvia se aplican sobre áreas, y los datos de flujo de entrada se aplican en los bordes del dominio de cálculo por donde el agua ingresa a la zona de interés.

Además de lo anterior, es necesario asignar condiciones de frontera que indiquen la manera en que el agua puede salir del dominio de cálculo, pudiendo ser borde cerrado o borde libre. También se deben asignar condiciones iniciales de altura de agua en caso de que se tengan embalses permanentes en el interior del dominio. Si bien se puede considerar la infiltración del agua en el terreno, eso no se tomó en cuenta en este trabajo. Una vez que se tienen todos los datos asignados, se define el tiempo total que se desea simular (en segundos), así como los intervalos de tiempo en que se desea visualizar los resultados. A medida que se aumenta el tiempo total a representar en la simulación, se aumenta también el tiempo de cómputo que requiere el modelo para completar su ejecución en el programa.

Para simular distintos escenarios del fenómeno de inundación en el mismo dominio de cálculo se cambian los valores de los datos de entrada de agua, realizando variaciones a partir de información encontrada en bases de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] y la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. En este caso se varió tanto la precipitación pluvial, como el flujo a la entrada de los cauces que cruzan la región en estudio (el río Lerma en Salamanca, y el río Turbio y dos drenes de riego en el caso de Abasolo).

Debido a que el interés se centró en estudiar periodos de tiempo de una hasta 2 semanas en cada escenario por región de interés (partiendo de los registros de las inundaciones citadas y del análisis de los datos de precipitación pluvial en esas fechas), el tiempo de simulación total fue de 604800 a más de 1296000 segundos. En una computadora convencional el tiempo de cómputo para completar la ejecución de un solo escenario tomaría más de una semana, lo que se puede reducir mucho si se ejecuta Iber en una tarjeta gráfica habilitada para cálculo con CUDA. En este caso, se tuvo acceso a los equipos del Laboratorio de Supercómputo del Bajío administrado por el Centro de Investigación en Matemáticas [CIMAT A.C.], el cual tiene computadoras con tarjetas gráficas muy potentes para cálculo. Con esto, el tiempo de ejecución de una sola prueba se redujo de varios días a unas pocas horas, siendo posible además ejecutar varias pruebas al mismo tiempo en diferentes máquinas.

Caso de estudio: centro urbano de la ciudad de Salamanca

La zona de estudio se delimitó a las inmediaciones del río Lerma a su paso por la ciudad de Salamanca. El mapa de uso de suelo utilizado para esta simulación fue generado a partir de una serie de archivos proporcionados por el Instituto Municipal de Planeación de Salamanca (IMPLAN, 2023), los cuales contenían la zonificación completa del municipio actualizada hasta el año 2022. Del mapa original se delimitó el área de interés y se depuró para obtener la geometría necesaria para construir el modelo de cálculo en Iber. Se utilizó información topográfica disponible en el sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, a) (INEGI, b). En particular, se emplearon modelos de elevación digital generados mediante escáneres láser de alta resolución (LIDAR por su acrónimo en inglés), teniendo una resolución de 5 metros para el área de estudio. Estos datos están disponibles en diferentes formatos y años de edición; en este caso se empleó la edición del 2012. Para cubrir toda el área de estudio se emplearon las cartas F14C63D2, F14C63D4, F14C63E1, F14C63E2, F14C63E3 y F14C63E4. En la figura 1 se representa la información topográfica empleada para la construcción del modelo de cálculo.

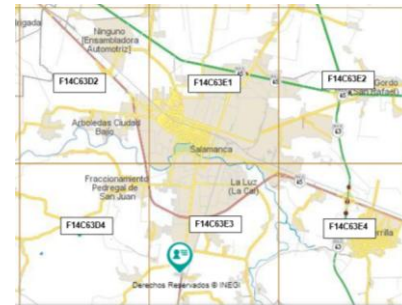
Para los datos hidráulicos del río Lerma se emplearon los datos mostrados en la figura 2, del renglón correspondiente a la estación hidrométrica de Salamanca. Dicha tabla contiene los caudales del río Lerma que se deben emplear en estudios hidráulicos para puentes y otras infraestructuras que crucen el río a su paso por el estado de Guanajuato, calculados con la información reunida en estaciones hidrométricas que ahí figuran, para diferentes periodos de retorno. De acuerdo con la tabla, para un periodo de retorno igual o menor a dos años el gasto del río a considerar es de $133 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para un periodo de retorno de 100 años el caudal de diseño alcanza los $546 \text{ m}^3/\text{s}$. Con base en estos valores, se construyeron varios hidrogramas para simular diferentes escenarios de comportamiento del río en la zona de estudio, considerando tanto crecidas como disminuciones en el caudal.

Ahora, las inundaciones en la zona no solo se deben al desbordamiento del río, pues la precipitación pluvial ha provocado en múltiples ocasiones encharcamientos e inundaciones localizadas en distintas áreas de la ciudad de Salamanca. Este fenómeno resalta la importancia de incluir datos pluviométricos precisos en el modelo. Para ello, se consultaron los registros de la estación climatológica del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, ubicada en el centro de la ciudad: estación 11096, Salamanca, CONAGUA-DGE, (Latitud: 20.565° , Longitud: -101.2° , Altitud: $1,717 \text{ msnm}$). Esta estación tiene registros de datos diarios de precipitación, evaporación y temperaturas extremas desde el año 1941 (CONAGUA, s.f.).

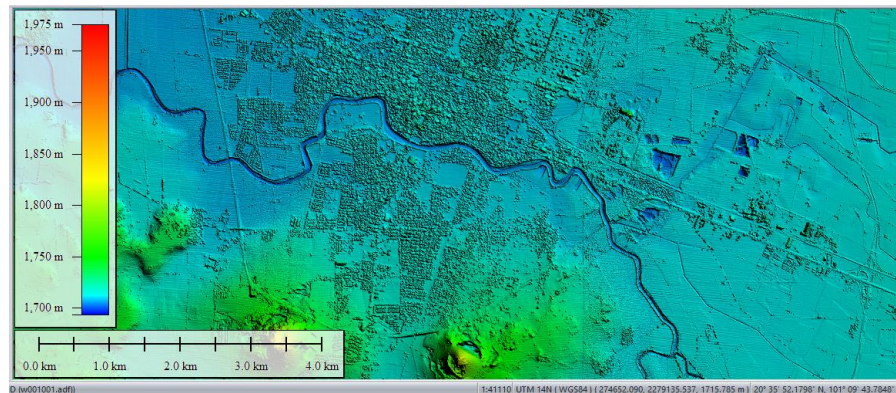
Se realizó un análisis centrado en los días previos y posteriores al evento de inundación más grave registrado en Salamanca, ocurrido en septiembre de 2003. El análisis detallado se enfocó en los datos del 10 de septiembre de dicho año, considerando también un periodo de aproximadamente dos semanas anteriores y algunos días posteriores, dando finalmente los datos tomados desde el 31 de agosto hasta el 16 de septiembre. Como resultado se obtuvo un intervalo de 16 días, equivalente a 1,382,400 segundos, este rango temporal se utilizó también para ajustar los datos del caudal del río en las simulaciones. El hietograma resultante se muestra en la figura 3.



Zonificación de usos de suelo a partir de la información del IMPLAN
Nota: Obtenido de IMPLAN Salamanca. Cartografía, 2023.



Cartas topográficas de INEGI para la caracterización del relieve topográfico.
Nota: Obtenido de INEGI. Mapa Digital de México,



Visualización del Modelo de Elevación Digital al unir las 6 cartas del INEGI.
Fuente: INEGI. Biblioteca Digital de Mapas

Figura 1. Información geoespacial empleada para el modelo de cálculo de Salamanca.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE GASTOS				
PERIODO DE RETORNO AÑOS (Tr)	ESTACIONES (Q en m ³ /s)			
	SOLÍS	ACÁMBARO	SALVATIERRA	SALAMANCA
2	46.1	73.5	79.9	133.4
5	68.2	132.6	142.5	305.3
10	88.1	196.7	228	388.3
20	103.8	250.2	293.3	440.8
50	122.2	312.9	368.4	501.8
100	135.5	357.9	422.2	545.6
500	165.5	459.9	544.1	644,90
1000	178.4	503.5	596.3	687.5

Método usado: Gumbell Doble con valores extrapolados.

Figura 2. Gastos de diseño para puentes y obras hidráulicas calculados en las estaciones hidrométricas sobre el río Lerma en el estado de Guanajuato. Obtenido de CONAGUA. Información estadística Climatológica.

Para una mejor visualización de los resultados, éstos se superponen sobre fotos satelitales descargables desde la página web del INEGI, y que corresponden a las mismas cartas topográficas de los modelos de elevación digital, publicadas en el 2008. Esto resulta particularmente útil para identificar las zonas urbanas que resultan inundadas en la simulación, lo que proporciona una visión clara sobre el riesgo y el posible impacto en la población.

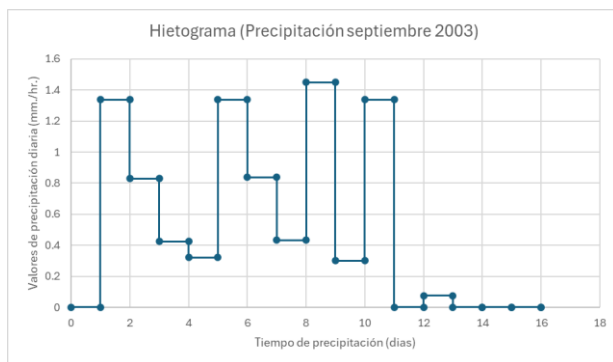


Figura 3. Hietograma utilizado en el análisis.

Modelo de cálculo

Con la información mencionada se construyó el modelo de cálculo en Iber, el cual se muestra en la figura 4. Se asignaron a las distintas áreas su correspondiente coeficiente de rugosidad de Manning en relación con el uso de suelo asignado a las mismas de parte de IMPLAN Salamanca, cuyos valores se muestran en la tabla 1.

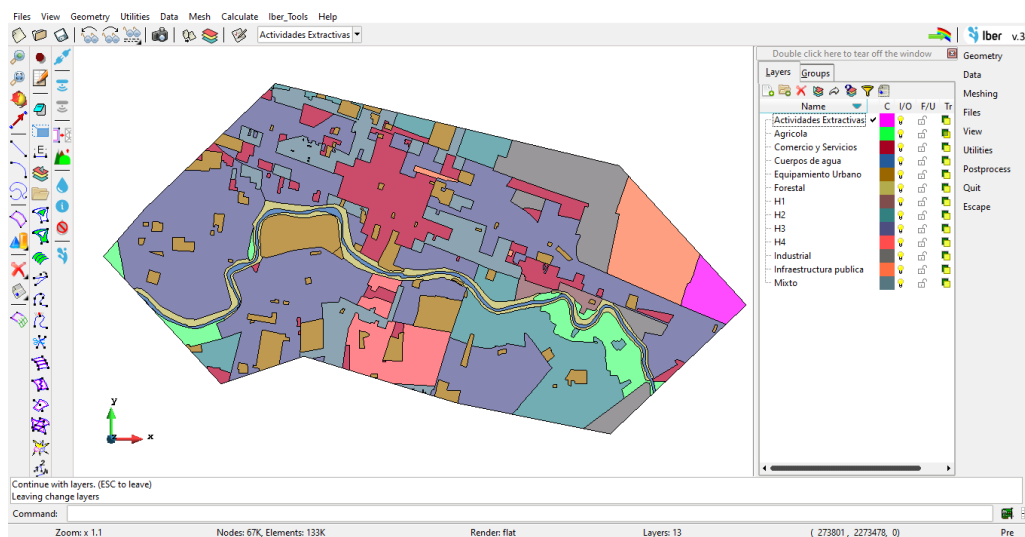


Figura 4. Modelo de cálculo en Iber para la zona de Salamanca.

Como condiciones de frontera se dejaron todos los bordes libres, y solamente se consideró como condición de entrada el borde correspondiente al ancho del río al este de la ciudad (parte derecha en la figura 4). El hietograma de lluvia se asignó a toda el área, considerando que los datos contienen la precipitación diaria acumulada en intervalos de 24 horas.

Se generó una malla conformada por 67,351 nodos y 133,685 elementos triangulares planos, con un tamaño máximo de 20 metros de lado. Esto da un tamaño de malla razonable para ejecutar las pruebas, si bien en algunas zonas pudiera resultar demasiado gruesa con la consiguiente pérdida de detalle en la solución final, recordemos que aumentar el número de elementos implica un mayor tiempo de cálculo. En la figura 5 se muestran vistas de la malla de cálculo utilizada en este modelo.

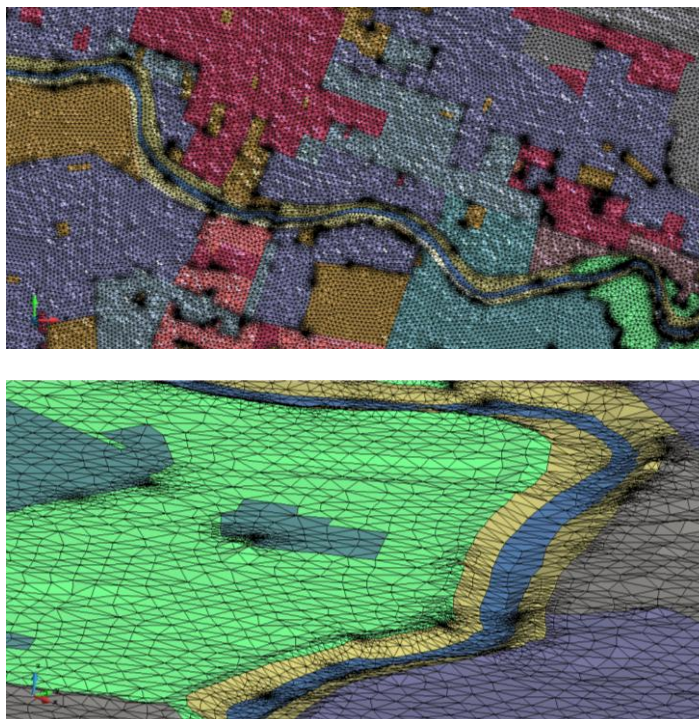


Figura 5. Vistas de la malla de cálculo utilizada en el modelo de Salamanca.

Tabla 1. Coeficientes de rugosidad de Manning asignados a los distintos usos de suelo

Uso de suelo	Coeficiente de rugosidad de Manning
Actividades extractivas	0.04
Agrícola	0.04
Comercio y servicios	0.1
Cuerpo de agua (Rio)	0.025
Equipamiento urbano	0.02
Forestal	0.08
Habitacional 1 y 2	0.07
Habitacional 3 y 4	0.15
Industrial	0.1
Infraestructura publica	0.1
Mixto	0.1

Pruebas realizadas y resultados

Con el modelo descrito se realizaron 10 pruebas, ilustrándose aquí los resultados de 4 de ellas por limitaciones de espacio. La diferencia entre cada prueba fue el hidrograma usado para representar el gasto del Río Lerma, pues si bien se pudieron utilizar los datos medidos en los días que se registró la inundación de septiembre de 2003, la información topográfica considerada aquí no es de la misma época, por lo cual tiene más sentido abordar esto como una simulación de escenarios que tienen una cierta probabilidad de ocurrencia en el futuro aunque no se hayan presentado en el pasado. Los hidrogramas utilizados en las distintas pruebas se ilustran en la figura 6.

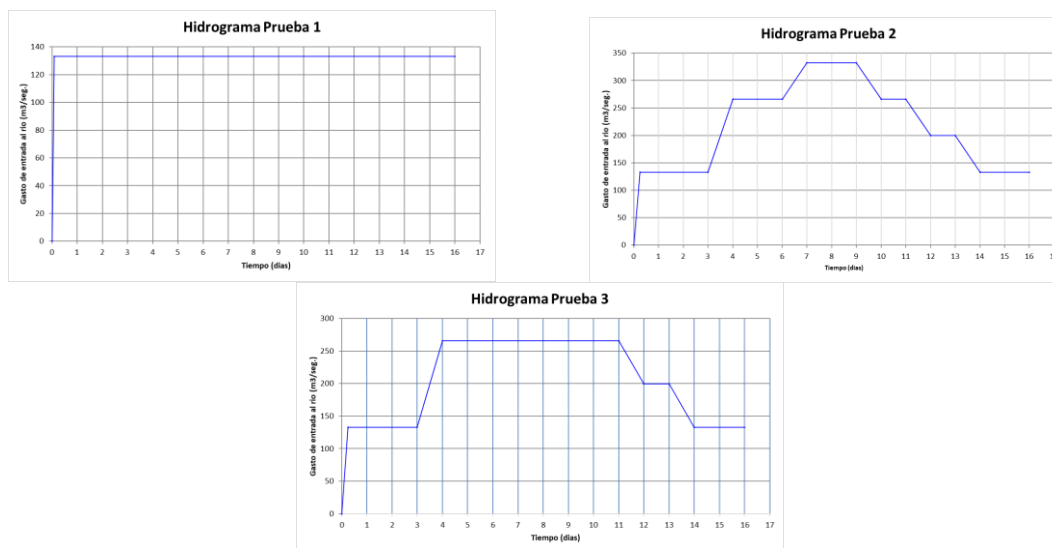


Figura 6. Hidrogramas utilizados para las pruebas ilustradas en este modelo.

Prueba 1

En esta prueba el gasto impuesto al cauce del río fue constante, con un valor correspondiente al máximo ordinario de 133 m³/seg mencionado en la figura 2. Este caudal no genera desbordamiento del río, pero la lluvia impuesta causa encharcamientos en varias zonas de la ciudad que llegan a generar acumulaciones de agua de profundidades considerables y peligrosas en las zonas habitadas, como se puede apreciar en la figura 7. Al norte del río se aprecian dos zonas donde el agua sube mucho de nivel, y que corresponden a predios sin construcción y a la refinería Ing. Antonio M. Amor de PEMEX.

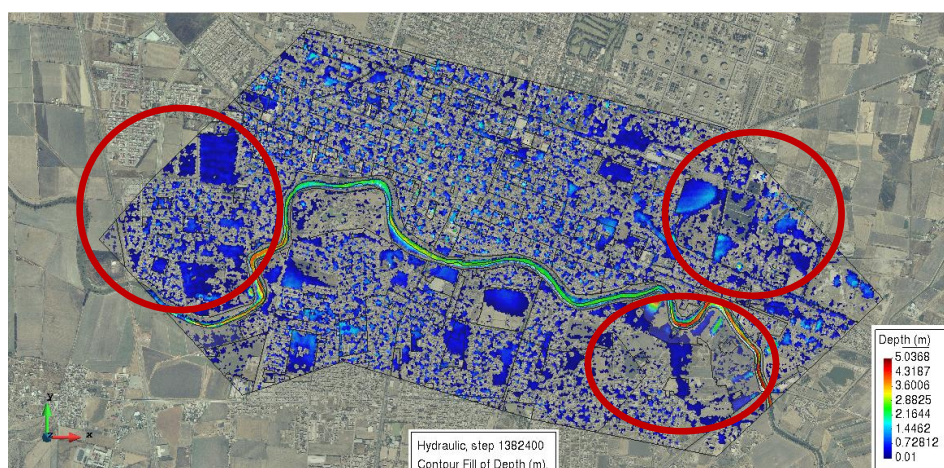


Figura 7. Zonas afectadas según los resultados al final de la prueba 1
Se muestra la profundidad que alcanza la superficie del agua respecto al nivel del suelo.

Al sur del río se observan acumulaciones importantes de agua, pero en estos casos sí ocurren en zonas de uso habitacional, habiendo puntos donde el agua supera el metro de profundidad. De esta prueba concluimos que una precipitación fuerte y sostenida sobre la ciudad como la de septiembre del 2003, provoca por sí sola zonas con inundaciones significativas, además de una salida muy lenta del agua encharcada en ellas¹.

Prueba 2

En esta prueba el gasto impuesto al cauce del río tiene dos crecidas. Comienza en 133 m³/seg, aumenta a 266 m³/seg, y vuelve a subir hasta 332 m³/seg durante 48 horas, para después bajar de manera gradual hasta el valor inicial de 133 m³/seg. Este comportamiento se adaptó con la intención de imitar el crecimiento del caudal del río por los escurrimientos que se presentan aguas arriba de la zona de interés, aunque hay que mencionar que dicho aumento se fijó de forma totalmente arbitraria.

Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 8, donde se observa un comportamiento distinto en el cauce del río que ya presenta desbordamiento en varias de las zonas aledañas a él. Este agudiza los problemas de inundación en la zona de afectación al sur del río que se observó en la prueba 1, incrementándose el nivel máximo del agua. Además nos encontramos con otras áreas cercanas al cauce del río que también se inundan, y aunque no son grandes en extensión, sí pueden generarse impactos económicos considerables al ubicarse en zonas habitadas de la ciudad.

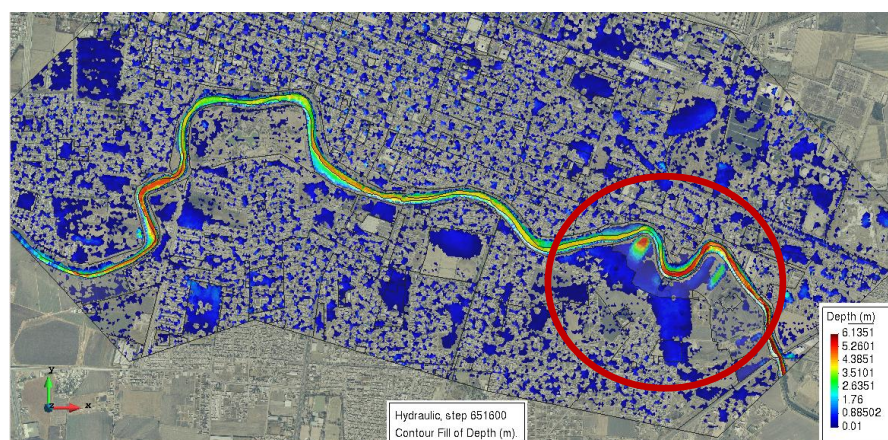


Figura 8. Resultados de la prueba 2. Se aprecia una mayor afectación en una colonia al sur del Lerma.

Prueba 3

En esta prueba el caudal del río tiene una sola crecida, con un gasto máximo menor al de la prueba 2. El gasto inicial es el mismo de 133 m³/seg, que se mantiene durante 2.5 días, entonces se incrementa hasta alcanzar 266 m³/seg., se mantiene en ese nivel durante 7 días (604,800 seg.) para entonces bajar de manera gradual hasta los 133 m³/seg. Este comportamiento se propuso con la intención ver el comportamiento con un gasto más bajo del río pero manteniendo el valor pico durante más tiempo, para comparar las afectaciones del escenario anterior. Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 9, comparándolos con los de la prueba anterior.

Notamos que las zonas afectadas son exactamente las mismas en ambas pruebas, son muy similares en extensión aunque con mayor profundidad para la segunda prueba, teniéndose un máximo de 0.36 metros de diferencia.

¹ En el canal de YouTube AlexRan Engineering cuya liga figura al final de la bibliografía se pueden ver los videos con las simulaciones realizadas para este caso de estudio.

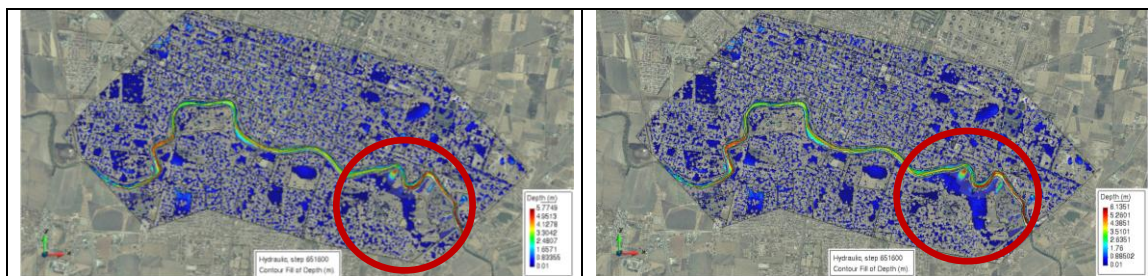


Figura 9. Comparación de resultados para el mismo instante de tiempo en la prueba 3 (izquierda) y la prueba 2 (derecha).

Discusión de los resultados del caso Salamanca

De acuerdo con la prueba 1, hay zonas de afectación cuya causa principal es la lluvia directa, pues éstas se presentan sin que haya desbordamiento del río. Dado que el hietograma utilizado para la simulación corresponde a los datos reales de las fuertes lluvias de septiembre del 2003 pudiera pensarse que esa fue la razón más importante, pero hay que tomar en cuenta que esas lluvias no se presentaron de manera aislada y que las lluvias fuertes siempre estarán acompañados por aumentos importantes en el caudal del río. La intención aquí era averiguar si la lluvia por sí sola es capaz de provocar problemas fuertes dentro de la mancha urbana.

Entonces, los resultados de las pruebas 2 y 3 se pueden considerar más cercanos a la realidad. En ellas las zonas afectadas fueron prácticamente las mismas, y se comparan con un mapa publicado en una cuenta de Facebook de divulgación histórica y que muestra las zonas afectadas reportadas en la inundación de septiembre del 2003, imagen que se reproduce en la figura 10. En dicha imagen se aprecia que las áreas inundadas también se obtuvieron en nuestras simulaciones, aun cuando la información topográfica utilizada en este trabajo es bastante más reciente. Esto indica que las colonias afectadas en el 2003 siguen siendo vulnerables a los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Otro punto que es importante comentar es el lento desalojo del agua de las zonas inundadas, aun después del cese de las lluvias. Esto se explica en buena parte porque no se consideró en el modelo la infiltración de agua en el subsuelo, y tampoco la salida del agua a través del drenaje sanitario y pluvial que se haya instalado. En suma, es conveniente avanzar a modelos más complejos y realistas, de manera que se puedan realizar diferentes propuestas de manejo del agua a través de obras de contención, almacenamiento y/o desvío del agua.

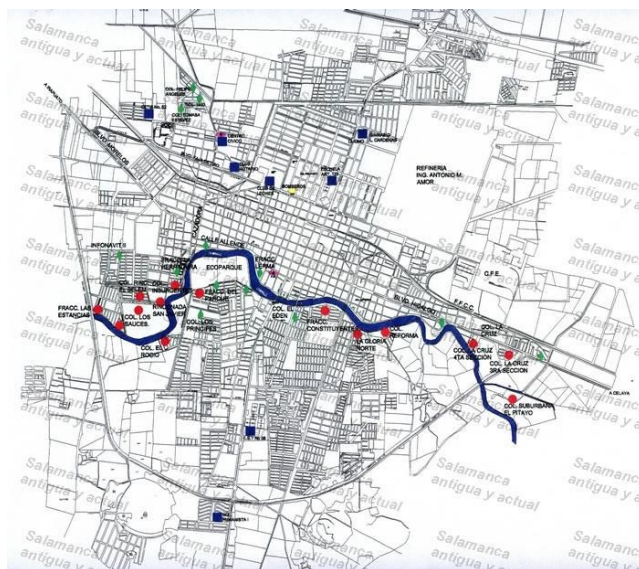


Figura 10. Mapa de zonas afectadas en inundación de Salamanca, septiembre 2003.
Fuente: Salamanca Gto Colección de Fotografía Antigua y Actual, Facebook, (2013).

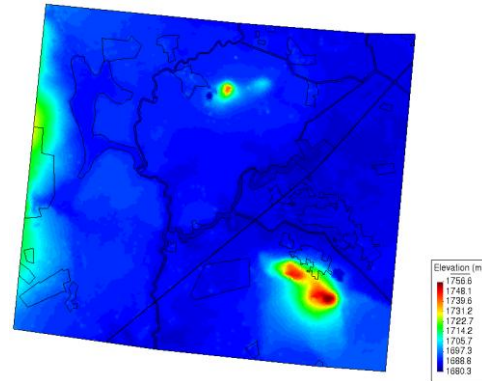
Caso de estudio: comunidad de Huitzatarito en el municipio de Abasolo.

En este caso no se encontró un mapa de uso de suelo como en el ejemplo anterior. Entonces, para la construcción del modelo de cálculo, se dibujó la geometría directamente sobre fotografías satelitales en Google Earth, delimitando polígonos de uso de suelo según lo que se podía distinguir en las imágenes. La información topográfica del sitio fue obtenida de la página web del INEGI, empleando las cartas topográficas F14c62d3, F14c62d4, F14c62e3, F14c72b1, F14c72a1 y F14c72a2, correspondientes a los municipios de Abasolo y Pénjamo.

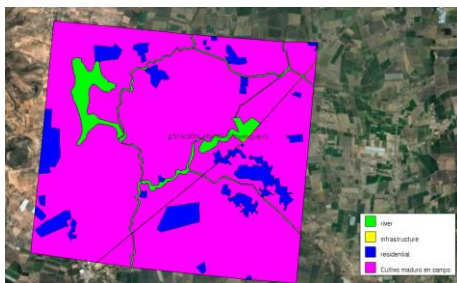
La región de interés es bastante plana y se encuentra rodeada de montañas, lo que genera unas diferencias importantes en altitud debido a la presencia de picos elevados. En el proceso de la información topográfica, después de unificarla en un único archivo DEM se aplicó un filtro que eliminaba picos de altitud de un solo punto, esto con el fin de "limpiar" los cauces del río Turbio y los drenes que cruzan por la zona, de estructuras como puentes y alcantarillas que son capturadas por el escáner LIDAR y que resultarían en un "tapón" ficticio en el modelo de cálculo. La figura 11 muestra el área de estudio, las elevaciones topográficas, el modelo con la asignación de usos de suelo, y la asignación de hietogramas de lluvia. En este caso se tienen dos, dado que dentro de la zona de estudio se tienen dos estaciones meteorológicas. En la tabla 2 se muestran los coeficientes de rugosidad asignados a los polígonos de acuerdo con su uso de suelo.



Polígonos de uso de suelo dibujados en Google Earth.



Elevaciones topográficas utilizadas en el modelo de cálculo.



Modelo de cálculo con las áreas de uso de suelo aplicado en Iber.



Asignación de hietogramas de lluvia aplicado en Iber.

Figura 11. Caracterización del área de estudio y modelo de cálculo.

Tabla 2. Coeficientes de rugosidad por uso de suelo.

Uso de suelo	Coefficiente Manning
River	0.025
Infrastructure	0.02
Residencial	0.15
Cultivo maduro en campo	0.03

Con el propósito de recrear la inundación de septiembre de 2021, se analizaron los datos de precipitación de ese año de la base de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, s.f.). Se seleccionaron dos estaciones climatológicas próximas al sitio de interés: la estación 11001 (Abasolo, Gto.) y la estación 11003 (Agua Tibia, Pénjamo, Gto). Con dicha información se elaboraron los hietogramas de precipitación mostrados en la figura 12, comprendiendo una ventana de 12 días antes de la fecha de inundación (6 de septiembre). En la estación de Abasolo se registró un acumulado de 507.9 mm durante los 40 días previos, y 204.4 mm en los días inmediatamente anteriores al 6 de septiembre, lo que evidencia una saturación progresiva del suelo y un aumento en la escorrentía superficial. La asignación de los hietogramas en las áreas del modelo se muestra en la figura 11.

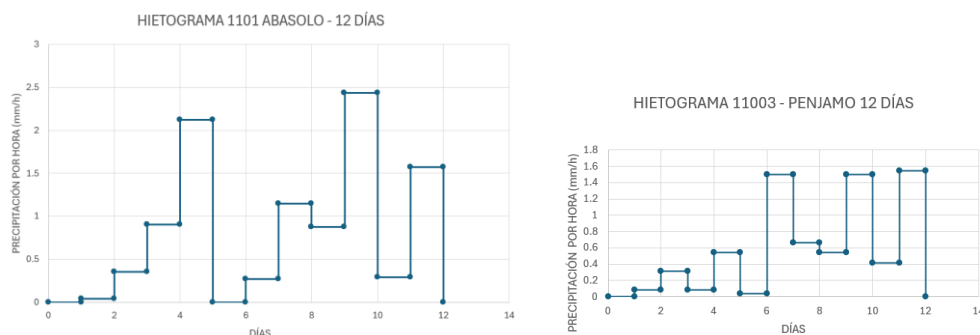


Figura 12. Hietogramas de lluvia empleados en este caso de estudio.

A diferencia del caso del Lerma en Salamanca, en el río Turbio no tiene instalada una estación hidrométrica funcional en su paso por Abasolo que permita obtener registros directos y confiables del caudal; tampoco existen datos sobre el caudal que circula por los drenes que pasan cerca de las comunidades afectadas. En consecuencia, se recurrió a la simulación de condiciones hidráulicas mediante valores teóricos constantes de gasto, introduciendo crecidas del caudal a la entrada del dominio de cálculo para simular condiciones de escorrentía acumulada a causa de las lluvias. El objetivo de este enfoque fue identificar el comportamiento promedio de los cauces y analizar su respuesta hidrológica bajo diferentes escenarios de caudal. La figura 13 muestra los hidrogramas utilizados en una de las pruebas, donde se fijó un gasto pico de 30 m³/s para el cauce principal (río Turbio), mientras que para los drenes secundarios se implementó un caudal constante con valor máximo de 5 m³/s.

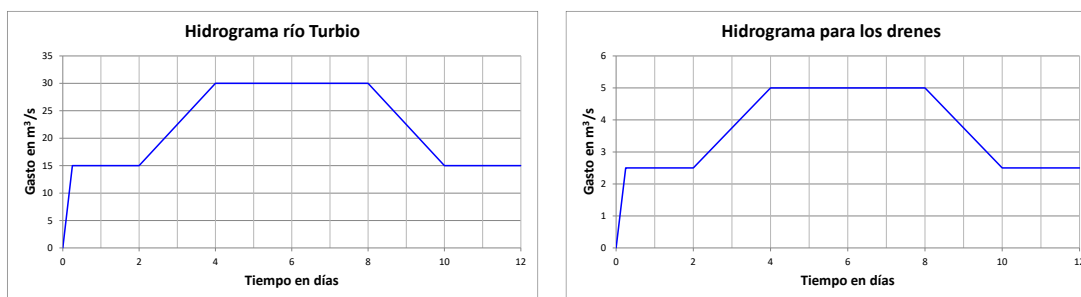


Figura 13. Ejemplos de hidrogramas de flujo para los cauces de este caso.

De todas las pruebas realizadas, se presentan aquí los resultados de una sola de ellas, correspondiendo a los datos hidráulicos mostrados en las figuras 12 y 13. Las figuras 14 y 15 muestran las alturas del agua para dos tiempos de simulación diferentes, en ellas se puede observar la evolución de la inundación precisamente en las comunidades de Huitzatarito y sobre todo en Santa Cecilia. De estos resultados se tiene que, debido a las condiciones topográficas de la localidad el flujo superficial no encuentra una salida natural eficiente, lo que genera zonas de retención y estancamientos prolongados, lo que se traduce en una zona altamente susceptible a sufrir inundaciones frecuentes. Estos resultados coinciden mucho con las áreas más afectadas que se muestran en la fotografía satelital de la figura 16, la cual se puede localizar en Google Earth en octubre del 2021.

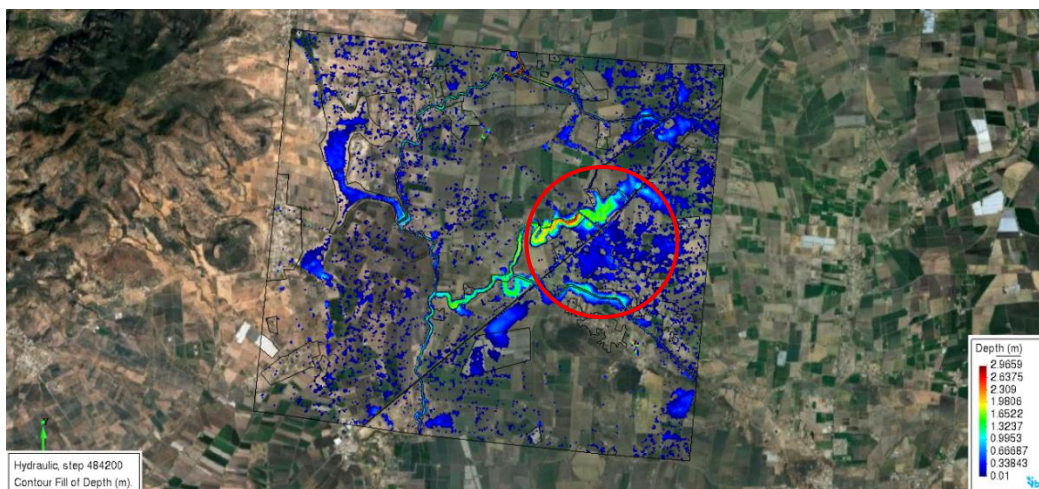


Figura 14. Resultados a las 136 horas de simulación (5.6 días).

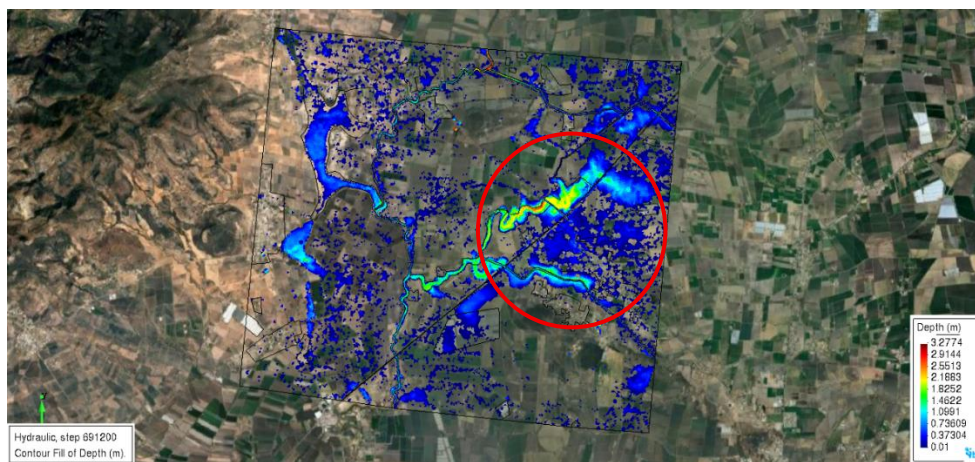


Figura 15. Resultados a las 192 horas de simulación (8 días).

Cabe destacar que, durante la inundación ocurrida en septiembre de 2021, los niveles de agua permanecieron elevados durante de más de 20 días (Espinoza, 2021), lo que evidencia la severidad del evento y refuerza la conclusión de que el agua no tiene salida rápida debido a la topografía tan plana del terreno. Aunque no se tiene la certeza de haber empleado un gasto cercano al real tanto en el río Turbio como en los drenes en este modelo, es muy probable que el caudal del río Turbio en esta zona de interés superó con creces los $30 \text{ m}^3/\text{s}$. En otra prueba cuyos resultados se muestran en la figura 17 se utilizó un gasto mayor a los $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y se observan alturas mayores de agua y una mayor extensión en las zonas inundadas, teniendo aún más similitud con las que se aprecian en la fotografía de la figura 16.



Figura 16. Fotografía satelital del área de estudio durante la inundación del 2021, tomada en el mes de octubre de ese año.
Fuente: Google Earth.

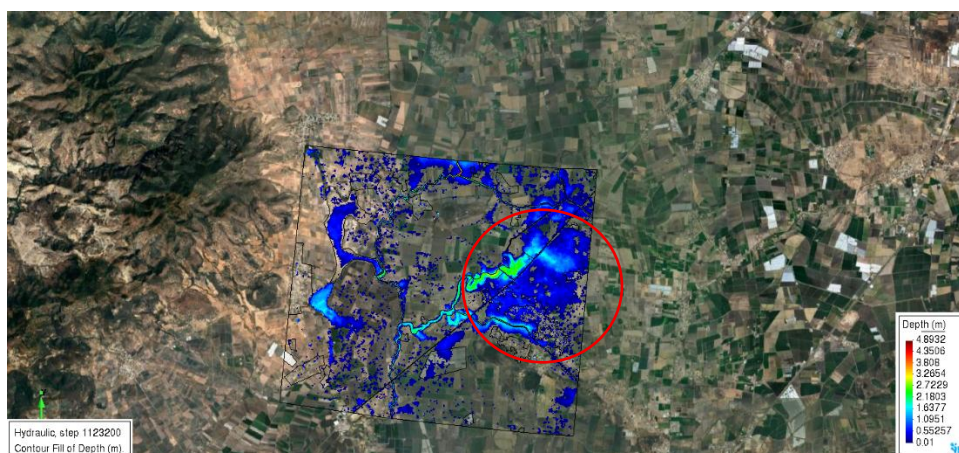


Figura 17. Resultados del modelo al final de la ejecución (12 días).

Si bien los resultados que se obtuvieron se pueden considerar satisfactorios, la gran incertidumbre en los datos empleados nos dice que estos deben tomarse con cautela, por lo que es necesario realizar más modelos, y considerar más información que la que se empleó en este trabajo para lograr mejores resultados. A falta de tales datos, se puede recurrir a otros esquemas de estimación de parámetros de flujo, como el propuesto en Esqueda et al. (2024), además de varios otros que figuran en la literatura. Con los resultados que se tienen hasta este punto, no es sencillo encontrar una solución para este problema, y que los autores del trabajo piensan que se tendrán que realizar varios tipos de obras hidráulicas que actúen de manera combinada: 1.- Construcción de bordos alrededor de la zona para contener el desbordamiento de los cauces; 2.- Instalación de compuertas reguladoras en los drenes de riego para el control de flujo en ellos; 3.- Construcción de enormes tanques de captación y almacenamiento del agua más una línea de conducción para poder desalojar el agua mediante bombeo hacia un punto situado aguas abajo del Río Turbio. La evaluación de dichos escenarios requiere más estudios y simulaciones, algo que los autores del trabajo esperan continuar en un futuro cercano.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT A.C.) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el acceso a las máquinas con GPU del cluster “El Insurgente”, lo cual fue posible mediante el proyecto “Laboratorio de Supercómputo del Bajío (No. 300832)”, pues el apoyo de dicho proyecto hizo posible la culminación exitosa de este trabajo.

Bibliografía/Referencias

- Bellos, V. (2012). Ways for flood hazard mapping in urbanised environments: A short literature review. https://www.researchgate.net/profile/Arvind-Singh-21/post/Can_anyone_tell_me_the_urban_flood_hazards_mapping_methodology/attachment/59d6457579197b80779a090f/AS%3A453329902936067%401485093679830/download/WUJ_2012_04_03.pdf
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. M., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Cea, L. & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51, 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (s.f.). *Información estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Durán, O. (28 de octubre de 2023). Salamanca, la historia de sus inundaciones. *El Sol de Salamanca*. <https://oem.com.mx/elsoldesalamanca/local/salamanca-la-historia-de-sus-inundaciones-14659419>
- Espinoza, V. (3 de octubre de 2021). Abasolo, Guanajuato: Veinte días bajo el agua y no hay para cuándo volver. *Proceso*. <https://www.proceso.com.mx/reportajes/2021/10/3/abasolo-guanajuato-veinte-dias-bajo-el-agua-no-hay-para-cuando-volver-273205.html>
- Esqueda, H., Valdez, S. I., & Botello, S. (2022). Roughness Parameter Estimation for flood numerical simulation using Differential Evolution. *IEEE Mexican International Conference on Computer Science (ENC), Xalapa, Veracruz, Mexico*, 1-8, <https://doi.org/10.1109/ENC56672.2022.9882946>
- Esqueda, H., Botello, S., & Valdez, S. (2024). Estimation of peak flow in flood-producing rivers using numerical simulation, geospatial information and evolutionary algorithms. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 40(3), 37. https://www.scipedia.com/public/Esqueda_et_al_2024a
- García-Navarro, P., Murillo, J., Fernández-Pato, J., Echeverriar, I., & Morales-Hernández, M. (2019). The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 1235–1252. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-09657-7>
- Instituto Municipal de Planeación del Municipio de Salamanca, Guanajuato. [IMPLAN] (2023). *Cartografía 2023*. <https://implansalamancagto.gob.mx/sistema-municipal-de-informacion-estadistica-y-geografica-smieg/cartografia/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (s.f., a). *Mapa Digital de México*. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIwLjU3MTUxLGxvbjotMTAxLjlyNzUxLHo6OSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dDExMXNlcnZpY2Ivc3xjODAx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (s.f., b) *Biblioteca Digital de Mapas*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I., & Balogun, W. (2021). Flood hazard mapping methods: A review. *Journal of Hydrology*, 603(A), 126846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126846>.
- Salamanca Gto Colección de Fotografía Antigua y Actual. (2013, 5 de septiembre). *Mapa donde se muestran los puntos de inundación o los vulnerables a inundarse en rojo (2003)*. Facebook https://www.facebook.com/Salamancagtofotoantigua/photos/a.564688976929332/564692316928998/?type=3&locale=es_LA

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020, abril). *Dimensión y escurrimiento de ríos principales 2018. Compendio de Estadísticas Ambientales 2020*.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet9505.html

AlexRan Engineering. (2025, 23 de Julio) *Animaciones de los modelos de Salamanca* [videos]. YouTube.
<https://www.youtube.com/@AlexRanEngineering>