

# Mapa hidrográfico urbano y zonas en peligro de inundación en Pachuca de Soto, Hidalgo, México

## Urban hydrographic map and flood hazard zones in Pachuca de Soto, Hidalgo, Mexico

Juan Carlos Mora-Chaparro<sup>1,\*</sup>, Nelly Lucero Ramírez-Serrato<sup>2</sup>, Mario Ángel Morales-Valencia<sup>3</sup>, Jesús Jacob Nieto-Butrón<sup>2</sup>, María del Carmen Oviedo-Parra<sup>3</sup>, Raúl Guerrero-Bustamante<sup>3</sup>, Mario Alberto Hernández-Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de peligros y riesgos por fenómenos naturales, Instituto de Geofísica, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8745, S/N, Indeco La Huerta, 58341, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CDMX, México.

<sup>3</sup> Geoparque Mundial UNESCO Comarca Minera. Reforma 7, Centro, 043503, Huasca de Ocampo, Hidalgo, México.

\* Autor para correspondencia: (J.C. Mora-Chaparro) [jcmora@igeofisica.unam.mx](mailto:jcmora@igeofisica.unam.mx)

### Cómo citar este artículo:

Mora-Chaparro, J.C., Ramírez-Serrato, N.L., Morales-Valencia, M.A., Nieto-Butrón, J.J., Oviedo-Parra, M.C., Guerrero-Bustamante, R., Hernández-Hernández, M.A., 2025, Mapa hidrográfico urbano y zonas en peligro de inundación en Pachuca de Soto, Hidalgo, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77(3), A180625. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2025v77n3a180625>

Manuscrito recibido: 8 de Enero, 2025

Manuscrito corregido: 24 de Marzo, 2025

Manuscrito aceptado: 12 de Junio, 2025

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## RESUMEN

El año 2024 será recordado como uno de los más devastadores en México por los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos. Ciclones tropicales, tormentas severas e inundaciones afectaron diversas regiones del país, poniendo a prueba la resiliencia de la infraestructura civil y los sistemas de gestión del agua. En Pachuca de Soto, Hidalgo, las inundaciones urbanas se presentan cada año y, en el último lustro, se han identificado nuevas zonas afectadas. La falta de una estrategia efectiva para reducir las áreas de riesgo y mitigar los daños contrasta con el crecimiento urbano desorganizado, que ha modificado los cauces naturales de arroyos y ríos, muchos de los cuales fueron entubados, invadidos o eliminados. Esto ha alterado la red hidrográfica natural, generando una red urbana donde el agua fluye ahora por las calles. Este estudio presenta el mapa hidrográfico urbano de Pachuca de Soto, que integra la subcuenca natural, nueve microcuencas y seis áreas hidrográficas derivadas del análisis de la traza urbana y su entorno natural. A partir de estos datos se realizó un modelado numérico bidimensional de la escorrentía superficial, que evidencia las alteraciones en los patrones naturales de flujo ocasionadas por la intervención antrópica. Los resultados muestran el desbordamiento de arroyos y la inundación de zonas adyacentes a antiguos cauces. El trabajo de campo corroboró las áreas susceptibles de inundación y permitió identificar nuevas zonas de riesgo asociadas al escurrimiento superficial por las calles, definidas como parte de la nueva red hidrográfica urbana. El mapa hidrográfico urbano constituye una herramienta esencial para comprender la dinámica hidrológica de la ciudad y diseñar estrategias de planificación urbana y gestión del riesgo ante inundaciones.

**Palabras clave:** mapa hidrográfico urbano, red hidrográfica urbana, cuencas hidrográficas, afluentes urbanos, peligro de inundación.

## ABSTRACT

2024 will be remembered as one of the most devastating years in Mexico due to disasters associated with hydrometeorological phenomena. Tropical cyclones, severe storms, and floods affected various regions of the country, testing the resilience of civil infrastructure and water management systems. In Pachuca de Soto, Hidalgo, urban flooding occurs annually, and in the past five years new flood-prone areas have emerged. The lack of an effective strategy to reduce flood-prone zones and mitigate damages contrasts with the disorganized urban growth that has modified the natural courses of streams and rivers—many of which have been culverted, encroached upon, or eliminated. This has altered the natural hydrographic network, giving rise to an urban hydrographic network where runoff now flows through streets. This study presents the urban hydrographic map of Pachuca de Soto, which integrates the natural sub-basin, nine micro-basins, and six hydrographic areas derived from the analysis of both the urban layout and its natural surroundings. Based on these data, a two-dimensional numerical model of surface runoff was developed, revealing alterations in natural flow patterns caused by anthropogenic changes. The results show stream overflows and flooding of areas adjacent to former channels. Fieldwork confirmed flood-susceptible areas and identified new risk zones associated with surface runoff along streets, which were incorporated into the definition of the new urban hydrographic network. The urban hydrographic map represents an essential tool for understanding the city's hydrological dynamics and for designing urban planning and flood risk management strategies.

**Keywords:** urban hydrographic map, urban hydrographic network, watersheds, urban tributaries, flood hazard.

## 1. Introducción

La ONU-Hábitat (2021) ha catalogado que, entre las diez principales catástrofes registradas durante los últimos 50 años, las que han provocado la mayor cantidad de víctimas han sido las sequías, con 650 000 muertes; seguidas por las tormentas, con 577 232; las inundaciones, con 58 700; y las temperaturas extremas, con 55 736, según el atlas de esta agencia de la ONU sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos entre 1970-2019.

*“Las lluvias extremas han causado inundaciones masivas en muchos países y ciudades del mundo. Millones de personas han sido desplazadas y muchas murieron. Pero no es solo en el mundo en desarrollo donde las inundaciones han provocado grandes trastornos. Las inundaciones catastróficas en Europa también han dejado cientos de muertos y daños generalizados”,* dijo Petteri Taalas, Secretario General de la OMM (ONU-Habitat, 2021).

El año 2024 pasará a la historia como uno de los más devastadores en términos de desastres asociados a los fenómenos hidrometeorológicos, entre los que se encuentran ciclones tropicales, tormentas severas e inundaciones, que afectaron a múltiples regiones del planeta y pusieron en jaque la resiliencia de las infraestructuras y los sistemas de gestión del agua (Iagua, 2025).

Las zonas más afectadas han sido las ciudades en las que la transformación del paisaje urbano, a través de la construcción de calles y edificios, altera drásticamente los patrones naturales de escorrentía superficial. Estas modificaciones impactan la dinámica de los afluentes y pueden incrementar la susceptibilidad a inundaciones al modificar la capacidad de infiltración del suelo, desviar el flujo de agua y cambiar el comportamiento de los cauces. Evaluar cómo estas alteraciones afectan la escorrentía es fundamental para entender los riesgos asociados y para implementar soluciones efectivas que mejoren la gestión del agua en áreas urbanizadas. En este sentido, los mapas hidrográficos urbanos y la modelación hidráulica han evolucionado como herramientas cruciales para la gestión del agua en entornos urbanizados (Mora-Chaparro, 2022).

Los mapas hidrográficos urbanos proporcionan una representación detallada de las características topográficas e hidrográficas en la zona urbana, permitiendo una comprensión precisa de la dinámica del flujo de agua por sus calles. Estos mapas son fundamentales para identificar las microcuencas y áreas hidrográficas, y para evaluar cómo la transformación del terreno y la hidrografía natural con el crecimiento urbano afectan el comportamiento del flujo de agua y desarrollan una nueva hidrografía en la zona urbana (Mora *et al.*, 2023). Por otro lado, la modelación hidráulica permite simular el comportamiento de la escorrentía superficial bajo diferentes condiciones, proporcionando información valiosa sobre el impacto de la urbanización y las posibles áreas de inundación. La combinación de estos enfoques ofrece una visión integral que facilita la identificación de zonas críticas y la planificación de medidas preventivas efectivas. La integración de mapas hidrográficos con modelaciones hidráulicas no solo mejora la precisión en la evaluación de riesgos, sino que también apoya la formulación de estrategias de gestión del agua más sostenibles y resilientes, impactando directamente en la reducción de daños y en la protección de las comunidades urbanas.

La zona metropolitana de Pachuca de Soto abarca una superficie de 1 196.5 km<sup>2</sup>, incluyendo dentro de ella a los municipios de Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Mineral del Monte, San Agustín Tlaxiaca, Epazoyucan, Zapotlán de Juárez y Zempoala. El crecimiento constante de la zona metropolitana ha sido concentrado hacia el sur, este y oeste sin un control ni una planeación. Este crecimiento desmesurado y la urbanización desordenada han generado el incremento en la probabilidad de ocurrencia de inundaciones (CENAPRED, 2019).

El río de las Avenidas es el cauce principal que atraviesa la zona urbana, que el 24 de junio de 1949 presentó la primera inundación, después de una lluvia intensa que provocó grandes escurrimientos que generaron su desbordamiento. Los niveles del agua rebasaron los dos metros de altura, con daños materiales, pérdidas humanas y varios desaparecidos (CENAPRED, 2019).

En 1999 se registró otra nueva inundación en la zona identificada como el Venado, que pasó a ser una laguna; no obstante, el antecedente de esta inundación, posteriormente esta zona fue urbanizada, siendo de las zonas que más se inundan (fraccionamientos de Los Tuzos, Magisterio, Venados, Tulipanes, Forjadores, Cipreses, Quinta Bonita y La Colonia). Además, las colonias y fraccionamientos recientemente desarrollados no contemplaron obras de mitigación pluvial. Aunque algunos no se localizan directamente sobre la avenida Río de las Avenidas ni a lo largo de su cauce —que se extiende desde el bulevar Nuevo Hidalgo hasta Tizayuca y atraviesa la ciudad—, presentan igualmente problemas de inundación. Entre las zonas más afectadas se encuentran los alrededores del bulevar G. Bonfil, Nopancalco, Zona Plateada, PRI Chacón, Bosques del Peñar, San Bartolo y 20 de Noviembre (González, 2023). Entre las áreas privadas están: San Nicolás y Fraccionamiento Santa Matilde, Rinconadas de Esmeralda, Sendero de Los Pinos, Privada Portobello, Qavalta Residencial, Viñedos, Real Navarra, Privadas San Leobardo, Lindavista, San Alfonso, Privadas Santa Matilde Plus, Real de Medinas, Téllez, Matilde, Fraccionamiento Perlas, Privada Marsala, Amores de Don Juan. Así como Real de la Plata, Olivenza, Mineral del Oro, Privadas del Sol, entre otras (González, 2023).

Pachuca de Soto año con año ha presentado problemas y daños a infraestructura civil por inundaciones severas: 1867, 1884, 1912, 1921, 1925, 1930, 1949, 1978, 2006, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2023 (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2022; Protección Civil Municipal, 2017-2022).

La zona metropolitana de Pachuca de Soto enfrenta desafíos hidrográficos significativos como resultado de los cambios drásticos de sus áreas naturales con la transformación y desaparición de la red hidrográfica, cauces y suelos naturales. El desarrollo y crecimiento acelerado del área urbana, ha desencadenado alteraciones en las condiciones originales de la región, afectando la

filtración del agua en el subsuelo e incrementando la escorrentía del agua por sus calles, las cuales ahora son los afluentes urbanos (Mora-Chaparro, 2019; Mora-Chaparro, 2022; Mora *et al.*, 2023; Cruz-Gaytán, 2024). Estos cambios han generado una mayor vulnerabilidad a inundaciones y problemas relacionados con la gestión del agua. Por tanto, es esencial realizar un análisis detallado de cómo estos factores han afectado la dinámica hidrológica para poder implementar estrategias adecuadas. Esta necesidad subraya la importancia de desarrollar un enfoque integrado que combine la evaluación de las modificaciones hidrológicas con la planificación urbana, lo que facilitará una gestión más efectiva de los recursos hídricos y reducirá los riesgos asociados con las inundaciones en la ciudad.

Al modelar la escorrentía en función de la topografía modificada, se pueden identificar áreas críticas y planificar intervenciones que mitiguen los impactos de las inundaciones. En este estudio, se creó el mapa hidrográfico urbano (MHU) de Pachuca de Soto.

## 2. Área de estudio

La ciudad de Pachuca de Soto se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 20°07'21" de latitud norte y 98°44'09" de longitud oeste, con una altitud que oscila entre los 2 400 y 2 800 m s. n. m. El municipio limita al norte con los municipios de Mineral del Chico y Mineral del Monte, al sur con Zempoala y Zapotlán de Juárez, al este con Mineral de la Reforma y Epazoyucan, y al oeste con San Agustín Tlaxiaca, como se muestra en la Figura 1. Su extensión territorial abarca 195.30 km<sup>2</sup>, lo que representa aproximadamente el 0.93 % del área total del estado (CIDEU, 2023).

Al norte de la ciudad se ubica la denominada Sierra de Pachuca, ramificación de la Sierra Madre Oriental y un conjunto montañoso que se extiende horizontalmente desde Actopan hasta Tulancingo, sistema que tiene amplias reservas boscosas como el Parque Nacional El Chico.

La ciudad se ubica al final de una cadena montañosa al norte del Valle de México, en la zona de escurrimiento y en el inicio de la llanura que se extiende hasta el Ajusco; sus aguas llegan hasta la Laguna de Zumpango. El río principal es el río de las Avenidas, que concentra el agua de tres barrancas y corre por en medio de la ciudad. Entre los cerros que rodean a Pachuca se incluyen el cerro de San Cristóbal, al occidente, y el de San Cayetano, al oriente, el Cerro del Venado, Cerro Buena Vista, Cerro de Santa Apolonia y Cerro de la Platosa, al noreste, y el Cerro de Tlapacoya, Cerro Grande y Cerro del Huixmí, al suroeste. Algunos de estos cerros están cubiertos de viviendas; en muchos casos son poblaciones que de inicio se formaron en torno a las minas, consolidando colonias de mineros en escarpadas vías. Esto hace que la parte histórica de Pachuca sea de una traza irregular; históricamente,

Pachuca ha sido un sitio de estéril vegetación (Almaraz, 1865).

En la ciudad, lluvias intensas y prolongadas, junto con fuertes granizadas, han afectado a la población, vialidades, infraestructuras y la actividad económica. Durante gran parte del año, Pachuca experimenta fuertes vientos del noreste, con velocidades que pueden alcanzar hasta los 75 kilómetros por hora. Estos vientos son responsables del apodo de la ciudad como la “Bella Airosa” (Enjoymexico, 2019).

### 2.1. BITÁCORA DE EVENTOS HISTÓRICOS DE PACHUCA

Algunos eventos históricos notables obtenidos en los Atlas de riesgos locales (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2017, 2022), reportes de Protección Civil Municipal (2017-2022) y algunos medios de

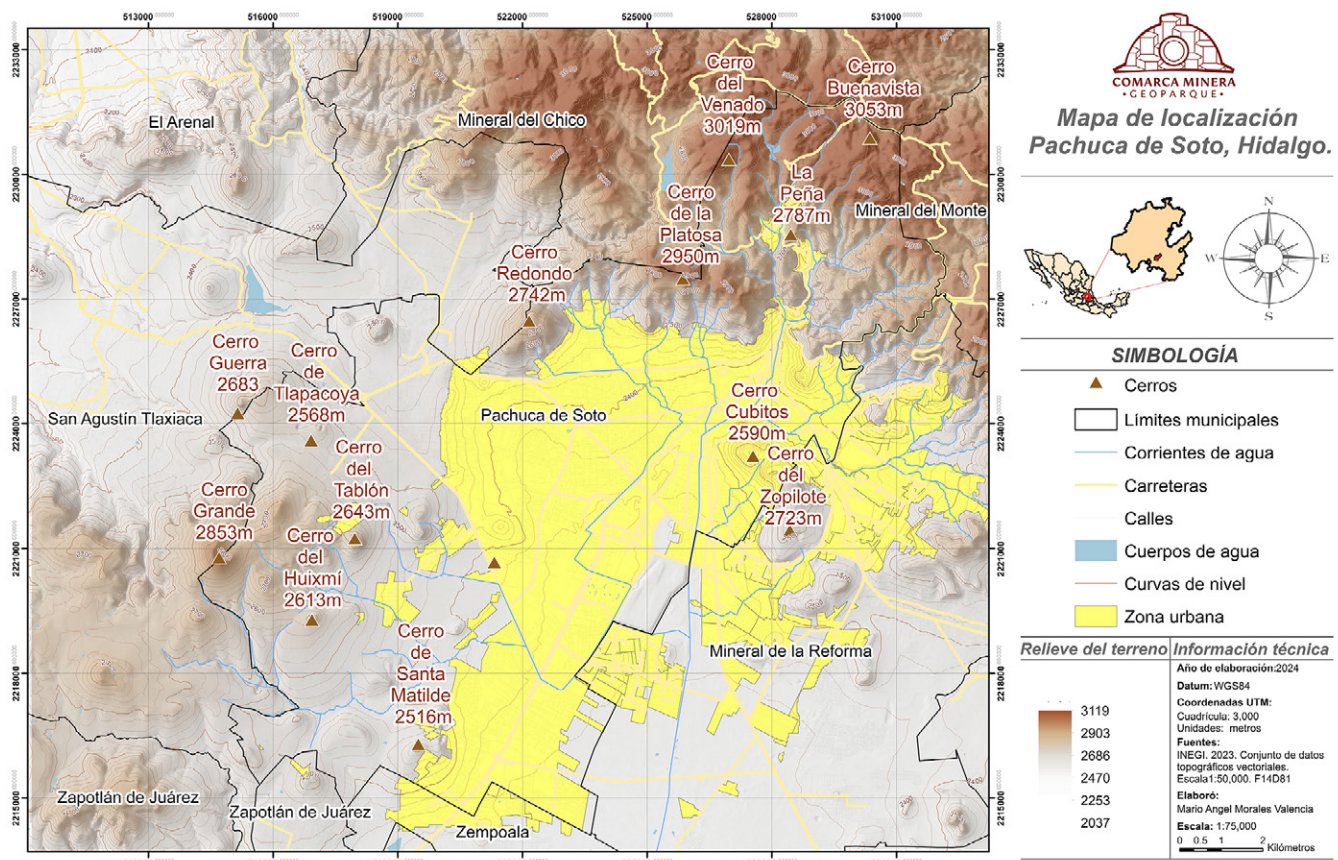


Figura 1 Mapa de localización del municipio de Pachuca de Soto en el estado de Hidalgo y la República Mexicana.

comunicación son los siguientes: En 1785, Pachuca fue devastada por una inundación generada por una lluvia de dos horas de duración, seguida de una tromba al norte de la ciudad. El 26 de septiembre de 1867, el desbordamiento del río de las Avenidas resultó en el colapso de casas y pérdida de vidas humanas. El 27 de septiembre de 1884, el río de las Avenidas se desbordó, afectando calles y plazas. El 8 de septiembre de 1888, lluvias continuas durante 30 horas provocaron desbordamientos de ríos y colapsos de casas. El 5 de mayo de 1905, una lluvia de dos horas causó una acumulación de agua de 1.5 metros y algunos decesos. En mayo de 1918, calles como Hidalgo, Allende, Guerrero, Juárez y Zaragoza se inundaron. En enero de 1921, por falta de lluvias, la cortina de la presa de la mina Xotol se derrumbó y el agua que aún permanecía en la presa bajó destruyendo dos de las minas y se fue acumulando en el río hasta que se desbordó hacia las calles; hubo más de 50 muertos y daños económicos a comercios y más a las minas que quebraron al no poder restituir las pérdidas. En febrero de 1923, sucede una granizada que colapsa los techos humildes de las casas, así como de algunas construcciones civiles más grandes. El 18 de septiembre de 1925, nuevamente la cortina de la presa de la mina Xotol provoca una inundación, cuando ya estaba reconstruida, pero al estar llena al máximo por la lluvia intensa, los empresarios mineros quisieron evitar un nuevo colapso y abrieron las compuertas, con lo que se recargó el río y provocó su desborde en la ciudad. Para 1930 sucede una de las más grandes inundaciones de la ciudad cuando, por las lluvias, nuevamente el río se desborda buscando cauce por las diversas calles hasta niveles de las azoteas; no se habla de muertos, pero sí de daños a instalaciones comerciales y las del telégrafo (Soto-Oliver, 2004).

El 24 de junio de 1949, el desbordamiento del río de las Avenidas resultó en la pérdida de 55 vidas y daños materiales (no fueron calculados y se reportaron como incalculables). Después de la más catastrófica inundación y por ello la más recordada, tanto las empresas mineras como los

gobiernos intentaron controlar las inundaciones; se edificaron y modernizaron presas en las partes altas al norte de Pachuca como Jaramillo y Cerezo (que además dan abasto de agua potable a la ciudad), Camelia o rompepicos (llamadas así las presas reducidas que sirven para controlar avenidas), El Girón, El Cedral, La Estanzuela, El Tulipán, San Buenaventura y Avenidas (Téllez-Pelcastre, 2019). En torno a los cerros de Pachuca se proyectó un sistema de canales denominado “cinturón de seguridad”, diseñado para interceptar las aguas pluviales y conducir las hacia las barrancas, evitando así su ingreso a las calles de la ciudad. No obstante, el sistema nunca se concluyó completamente. Uno de estos canales, localizado en el Cerro de San Cristóbal, descarga por el flanco norte hacia la barranca El Zembo y, por el otro extremo, hacia un dren pluvial urbano (Kampfner *et al.*, 2015).

Los problemas de inundaciones por lluvias y granizadas se hicieron más frecuentes en las zonas donde se desarrollaban nuevos fraccionamientos a partir del siglo XXI. El 31 de enero de 2011, una granizada afectó colonias de los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma, alrededor de las 17:30 horas. El 31 de enero de 2012, se registró otra granizada a las 5:30 pm que depositó una capa de 20 a 30 centímetros de espesor. El 10 de enero de 2015, una fuerte granizada con duración de 35 minutos afectó la región. El 19 y 20 de marzo de 2015, una granizada impactó los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma. El 19 de marzo de 2016, una fuerte granizada nuevamente afectó la zona; se recolectaron granos de granizo con un diámetro mayor de dos centímetros. El 29 de junio de 2017, un torrencial aguacero azotó Pachuca, generando inundaciones y caos vehicular. Colonias como Morelos y Real de la Plata sufrieron afectaciones, con niveles de agua que alcanzaron 70 centímetros de altura. La carretera Pachuca-Ciudad Sahagún y los bulevares como Nuevo Hidalgo y Ramón G. Bonfil fueron inundados (Plaza Juárez, 2017). El 25 de septiembre de 2017, intensas lluvias en Apan causaron inundaciones en calles como Guerrero

y Constituyentes. Viviendas, con inundaciones de hasta medio metro. El 28 de junio de 2018, una tormenta con granizo afectó Pachuca, Hidalgo. El Fraccionamiento Los Tuzos en Mineral de la Reforma sufrió inundaciones con niveles de agua superiores a medio metro. Mineral del Chico experimentó una capa de hielo por la granizada (Rincón, 2018).

El 22 de agosto de 2019, intensas lluvias provocaron inundaciones de hasta 1.5 metros en la colonia Valles del Palmar del municipio de Pachuca de Soto, con la evacuación de once personas (ADN, 2019). El 24 de septiembre de 2019, una lluvia intensa provocó inundaciones y caos vial en los fraccionamientos al sur de Pachuca (Hernández, 2019). El 7 de mayo de 2020, intensas lluvias generaron inundaciones que superaron los cuatro metros de altura en los desniveles de río de las Avenidas. Se registraron inundaciones totales en desniveles de Jaime Nunó y viaducto Javier Rojo Gómez, llegando a 4.5 metros, así como en avenidas Juárez y Madero. En Santiago Tlapacoya, hubo el colapso del muro perimetral del panteón; en el barrio La Española, un deslave de cerro obstruyó el acceso a catorce viviendas. La zona centro se vio afectada con la inundación del sótano del edificio del Poder Ejecutivo. Además, se reportó una persona arrastrada por la corriente en el río de las Avenidas (Jiménez, 2020). El 30 de noviembre de 2023, una intensa tormenta generó inundaciones en más de 40 colonias, con niveles de agua superiores a 60 centímetros de altura en algunas áreas (Alfaro, 2023).

### 3. Metodología

La metodología seguida se desglosa en varias etapas interconectadas, comenzando con la creación del mapa hidrográfico urbano (MHU), la cartografía y superposición de las zonas en peligro de inundación (ZPI), la modelación hidráulica y el análisis e interpretación de los datos obtenidos. Esta metodología se detalla a continuación.

#### 3.1. CREACIÓN DEL MAPA HIDROGRÁFICO URBANO (MHU)

El primer paso consistió en la elaboración del MHU para la zona urbana de Pachuca de Soto. Se comenzó con la recopilación y análisis de datos topográficos e hidrológicos disponibles, los cuales incluyen información sobre el relieve, cauces y características hidrológicas preexistentes (INEGI, 2024; SIATL v4, 2024). En esta etapa, se elaboró un mapa base detallado sobre el cual se superpuso la red hidrográfica obtenida de la plataforma SIATL v4 para la delimitación de la subcuenca. Esta abarca toda la zona urbana de Pachuca de Soto y se definió en función del flujo de escorrentía hacia el río de las Avenidas. A partir de esta delimitación, se identificaron las microcuencas; cada una abarca un área específica de escurrimientos hacia afluentes que descargan al río principal. Además, se definieron las áreas hidrográficas (AH), que abarcan las zonas urbanizadas donde el agua, al carecer de un arroyo definido, fluye directamente por las calles, consideradas afluentes urbanos (AU).

Las microcuencas y el área hidrográfica están delimitadas por el parteaguas, definido como la línea imaginaria que indica dónde comienza a escurrir el agua hacia el interior de estas, dando origen a la dinámica y a la red hidrográfica en su interior.

Cada una de las microcuencas puede estar conformada por un área natural, zona hidrográfica natural (ZHN), y por el área urbana o zona hidrográfica urbana (ZHU). Dentro de la microcuenca, el agua comienza a escurrir por la ZHN, terrenos y cauce natural del arroyo, después ingresa a la ZHU, donde el agua escurre por el remanente del cauce natural que quedó dentro de la zona urbana o por las calles, que ahora son los afluentes urbanos (Mora-Chaparro *et al.*, 2023; Cruz-Gaytán, 2024).

En el AH, el agua cae directamente en las calles de la zona urbana y escurre por las mismas siguiendo la dirección de la pendiente de estas. Para comprender mejor cómo llega y escurre el agua en la zona urbana, se llevó a cabo una

delimitación detallada de la zona urbana de Pachuca; se creó el mapa de la subcuenca con las microcuencas y las áreas hidrográficas que abarcan toda la traza urbana. Las microcuencas se enumeraron de acuerdo con la dirección del movimiento de las manecillas del reloj, desde la Microcuenca 1 (MCH 1), hasta la Microcuenca 9 (MCH 9). Así mismo, las áreas hidrográficas se enumeraron de igual forma en dirección del movimiento de las manecillas de reloj, desde Área hidrográfica 1 (AH 1) hasta el Área hidrográfica 6 (AH 6).

### 3.2. SUPERPOSICIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN (ZPI)

Una vez definido el MHU, se procedió a la superposición de las ZPI sobre el mapa hidrográfico. Las zonas en peligro de inundación fueron obtenidas de los reportes y dictámenes de riesgos, de diferentes años, emitidos por Protección Civil Municipal (2017-2022), de los Atlas de Riesgos de Pachuca de Soto (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2017, 2022) y reportes de diferentes medios de comunicación, que abarcan desde 1785 hasta el año 2023. Estos datos identifican las áreas que históricamente presentan problemas de inundación. La superposición se realizó para identificar cómo las zonas de riesgo se relacionan con las microcuencas y áreas hidrográficas definidas, facilitando la visualización de los posibles impactos de las inundaciones en la infraestructura urbana.

### 3.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE ESCORRENTÍA

Con la finalidad de comparar y evidenciar el impacto del cambio en la topografía en la escorrentía superficial, se llevó a cabo una modelación hidráulica bidimensional utilizando el software de acceso libre IBER. Este software de acceso libre es desarrollado por GEAMA (Universidade da Coruña), Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya) y EPHYSLAB (Universidade de Vigo), siendo usado para simular el comportamiento de la escorrentía superficial en contextos urbanos (García-Feal *et al.*, 2017).

La modelación numérica computacional es ampliamente usada para simular el comportamiento del agua en un área determinada (Kumar *et al.*, 2023). Cervantes *et al.* (2020) evidencia cómo afecta el cambio de uso de suelo en la dinámica de escorrentía, haciendo modelos referenciados a distintos años para la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Adil *et al.* (2024) redacta un ejemplo claro de la metodología aplicada a Saidia (Marruecos). Djafri *et al.* (2024) realiza una comparación entre IBER y el software HECRAS, consiguiendo resultados similares para El Bayadh City (Argelia). Gutiérrez-García *et al.* (2022) lo utiliza a nivel subcuenca basado en la precipitación histórica registrada por un huracán en la subcuenca Tesechoacán, México.

IBER emplea un enfoque basado en ecuaciones de flujo bidimensionales que resuelven las ecuaciones de Saint-Venant, basadas en la conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Este software se utiliza para modelar la dinámica de la escorrentía, considerando las variaciones en la topografía, el uso del suelo y las características hidrológicas del área (Prado-Hernández *et al.*, 2019). Para este trabajo, se emplearon los siguientes datos:

#### 3.3.1. PROCESAMIENTO DE MUESTRA

Se utilizó un modelo digital de superficie (MDS) de cinco metros de resolución del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), disponible de manera gratuita en su portal oficial [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx). Este MDS contiene elementos que sobresalen del suelo, como edificios; es fundamental para realizar modelos precisos de escorrentía superficial y modelación hidráulica, permitiendo un análisis detallado de las características del entorno.

#### 3.3.2. ANÁLISIS DE MUESTRA

El uso de suelo está estrechamente relacionado con el número de Manning, un coeficiente que representa la rugosidad del terreno y afecta la velocidad a la que el agua fluye sobre diferentes

superficies (Bustamante *et al.*, 2023). El número de Manning es esencial en la modelación hidráulica, ya que valores más altos indican una mayor resistencia al flujo del agua, mientras que valores más bajos reflejan superficies más lisas y con menor fricción.

En este estudio, la capa de uso de suelo fue derivada de la clasificación de una imagen satelital de tres metros de resolución obtenida de la constelación de satélites PlanetScope, mediante una licencia educativa. Esta imagen permitió identificar diferentes tipos de cobertura del terreno, a los cuales se asignaron números de Manning específicos: cultivos (0.05), suelo (0.023), vegetación (0.032), zona urbanizada (0.15), y asfalto (0.013). Estos valores son cruciales para modelar cómo el agua se desplaza en la zona de estudio, facilitando un análisis preciso de la escorrentía superficial.

### 3.3.3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DEL MODELO

Este ejercicio se realizó específicamente para el río de las Avenidas. Para ello, se asignó una condición de entrada en la parte alta del cauce principal. El hidrograma de trabajo correspondió a 24 horas de simulación, con un caudal pico a mitad del tiempo de 101.3 m<sup>3</sup>/s. Este caudal es equivalente a un periodo de retorno de 10 años, y fue obtenido utilizando el software VELL (Visualizador de escenarios de lluvia), el cual es público y pertenece a CENAPRED, el organismo gubernamental encargado del manejo y gestión de desastres en México.

### 3.3.4. CÁLCULO DE PELIGROSIDAD

IBER utiliza la metodología ACA, establecida por la Agencia Catalana del Agua (ACA) en España, para evaluar la peligrosidad de las inundaciones. Esta metodología se basa en el Real Decreto 903/2010 y la Ley 9/2010 (BOE, 2008), y utiliza criterios específicos relacionados con el tirante y la velocidad del agua para clasificar la peligrosidad en baja, media y alta.

### 3.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Los resultados obtenidos de la modelación hidráulica se integraron con el MHU y las ZPI para una evaluación comprensiva. Se analizaron las interacciones entre las microcuencas, las áreas hidrográficas y las zonas de riesgo, identificando áreas con mayor susceptibilidad a inundaciones y evaluando la efectividad de las intervenciones propuestas. Este análisis permitió desarrollar recomendaciones para la gestión del agua y la reducción de riesgos, basadas en una comprensión detallada de la dinámica hidrológica urbana.

## 4. Resultados

El mapa base (MB) de Pachuca de Soto se ha creado como una herramienta fundamental para comprender las condiciones naturales de la zona donde se desarrolló la ciudad. El MB se convierte en un recurso esencial para cualquier análisis hidrográfico, sirviendo como punto de referencia para la delimitación de la subcuenca y la identificación de microcuencas y áreas hidrográficas. Ofrece una comprensión clara de la topografía, permitiendo visualizar la disposición natural del terreno (Figura 2).

Para definir la subcuenca que abarca la zona urbana de Pachuca, se utilizó la plataforma SIATL (SIATL v4, 2024), la subcuenca tiene un área de 207 km<sup>2</sup> y un perímetro de 75.3 km. Su río principal es el río de las Avenidas, que tiene una longitud de 182 km. Este río se origina en la comunidad de San Miguel Cerezo, a una altitud de 2 800 m s. n. m., atraviesa la zona urbana de Pachuca de Soto y sale de la ciudad hacia la comunidad de San José Palma Gorda en el municipio de Mineral de la Reforma. Además, su dirección principal es de NE-SO.

Los resultados obtenidos del análisis del MHU indican la identificación de 9 microcuencas hidrográficas (MCH) y 6 áreas hidrográficas (AH) en la zona urbana de Pachuca de Soto. Las características y distribución de estas microcuencas se detallan a continuación. Tanto las MCH como las AH se detallan de manera gráfica en la Figura 3 y se caracterizan en la Tabla 1.

#### 4.1. ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN

Las zonas en peligro de inundación (ZPI) son las áreas que año con año se inundan y que causan daños a sus habitantes y a su infraestructura. Primero se recopiló la información histórica de las inundaciones en Pachuca de Soto (Tabla 2).

Para hacer la cartografía de cada uno de estos registros en la zona de estudio, se llevó a cabo un extenso trabajo de campo con base en la información proporcionada en los dictámenes de riesgo de Protección Civil Estatal, Protección Civil Municipal, Atlas de Riesgos y haciendo preguntas a la población afectada. Con la información recopilada se obtuvieron con mayor precisión los datos registrados de los polígonos de peligro de inundación en la Tabla 3. Posteriormente se registró la relación que existe entre las MCH y AH con las zonas en peligro de inundación (ZPI),

la cual se registró en la Tabla 3.

Esta se elaboró con la información sobre las colonias afectadas por inundaciones en la zona urbana de Pachuca de Soto. Esta incluye el nombre de las colonias, así como sus coordenadas geográficas, proporcionando un registro preciso de las áreas impactadas por las inundaciones. La Figura 4 se elaboró al sobreponer las zonas en peligro de inundación en cada una de las microcuencas y las áreas hidrográficas (Tabla 4), con el objetivo de establecer una relación entre estas.

Los datos de las Tablas 2, 3 y 4 ofrecen una perspectiva para comprender la frecuencia, la magnitud y los cambios en la manifestación de las inundaciones, así como el incremento de las áreas afectadas y los daños que han provocado en el tiempo (Figura 4).

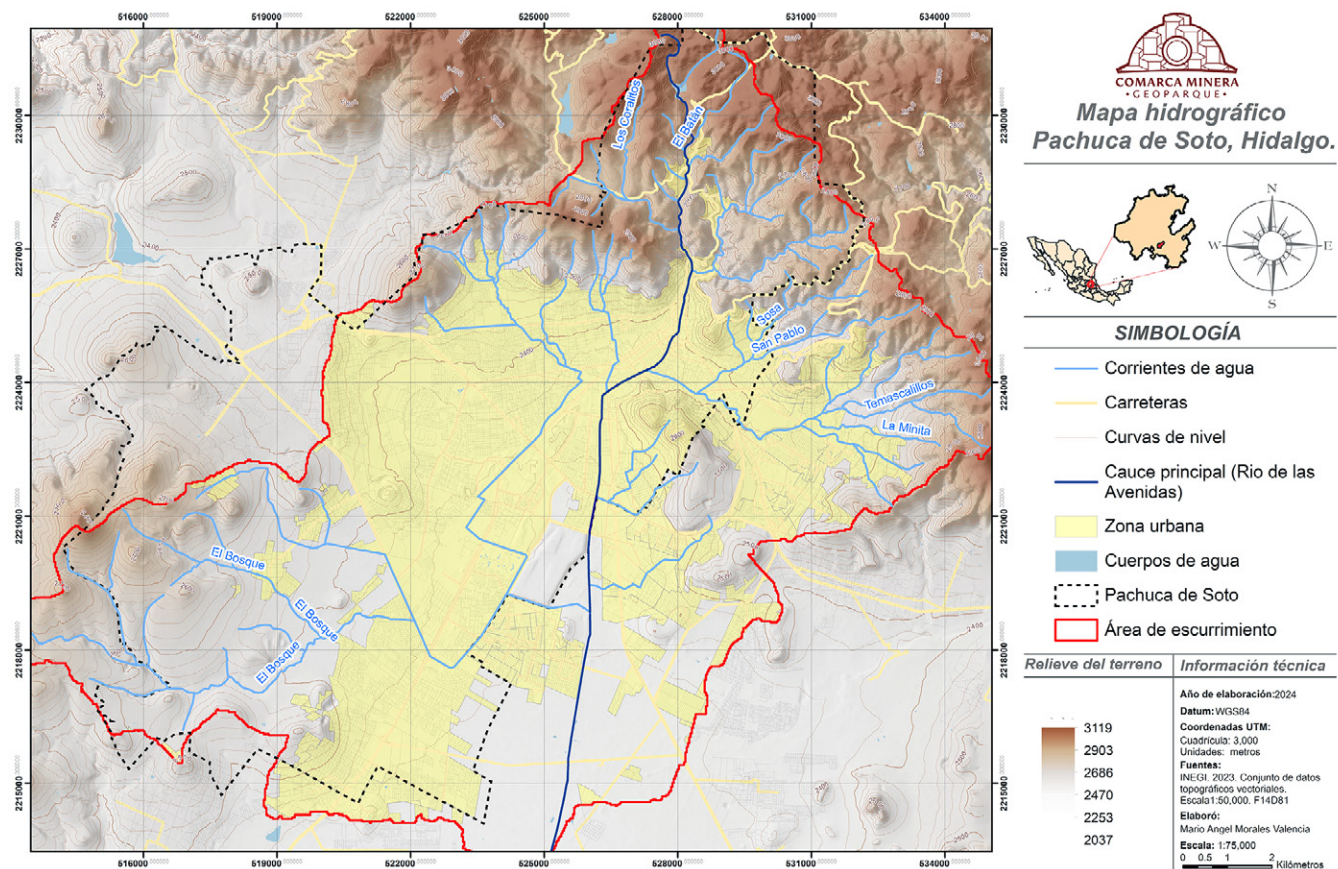


Figura 2 Mapa hidrográfico con la subcuenca del río de las Avenidas que atraviesa la zona urbana. También se observan los ríos El Bosque, Temascalillos, La Minita, Los Coralitos, El Batán, San Pablo y La Minita.

Con la información de las Tablas 3 y 4 se realizó un mapa que engloba las zonas en peligro de inundación (ZPI) y las colonias que han sido afectadas (Figura 4). Se observa que MCH3 y

MCH8 tienen seis y cuatro zonas en peligro de inundación, mientras que AH1, AH4, AH5 y AH6 tienen seis, cinco, cinco y seis zonas en peligro de inundación, respectivamente.

Tabla 1. Tabla con las microcuencas hidrográficas (MCH) y áreas hidrográficas (AH).

Microcuencas	Ubicación	Área (km <sup>2</sup> )	Nombre de arroyo/río	Longitud cauce (km)	Altitud inicio del cauce (m s. n. m.)	Altitud final del cauce (m s. n. m.)	Dirección del flujo
Microcuenca 1	NE	14.44	Avenidas	6.25	2991	2426	NE-SO
Microcuenca 2	NE	9.82	S/N	5.35	2990	2495	SE-SO
Microcuenca 3	NE	33.81	Temascalillo	9.43	1984	2388	E-O
Microcuenca 4	NE	4.42	S/N	2.92	2555	2366	NE-SO
Microcuenca 5	E	5.32	S/N	3.84	2463	2355	SO-NE
Microcuenca 6	SO	32.01	El Bosque	11.9	2698	2363	O-E
Microcuenca 7	E	12.11	S/N	7.33	2627	2358	NO-SE
Microcuenca 8	NE	4.83	S/N	3.8	2857	2382	N-S
Microcuenca 9	NE	14.65	S/N	4.86	2683	2379	NE-SE
AH1		3.43					
AH2		2.36					
AH3		14					
AH4		28					
AH5		15.6					
AH6		10					

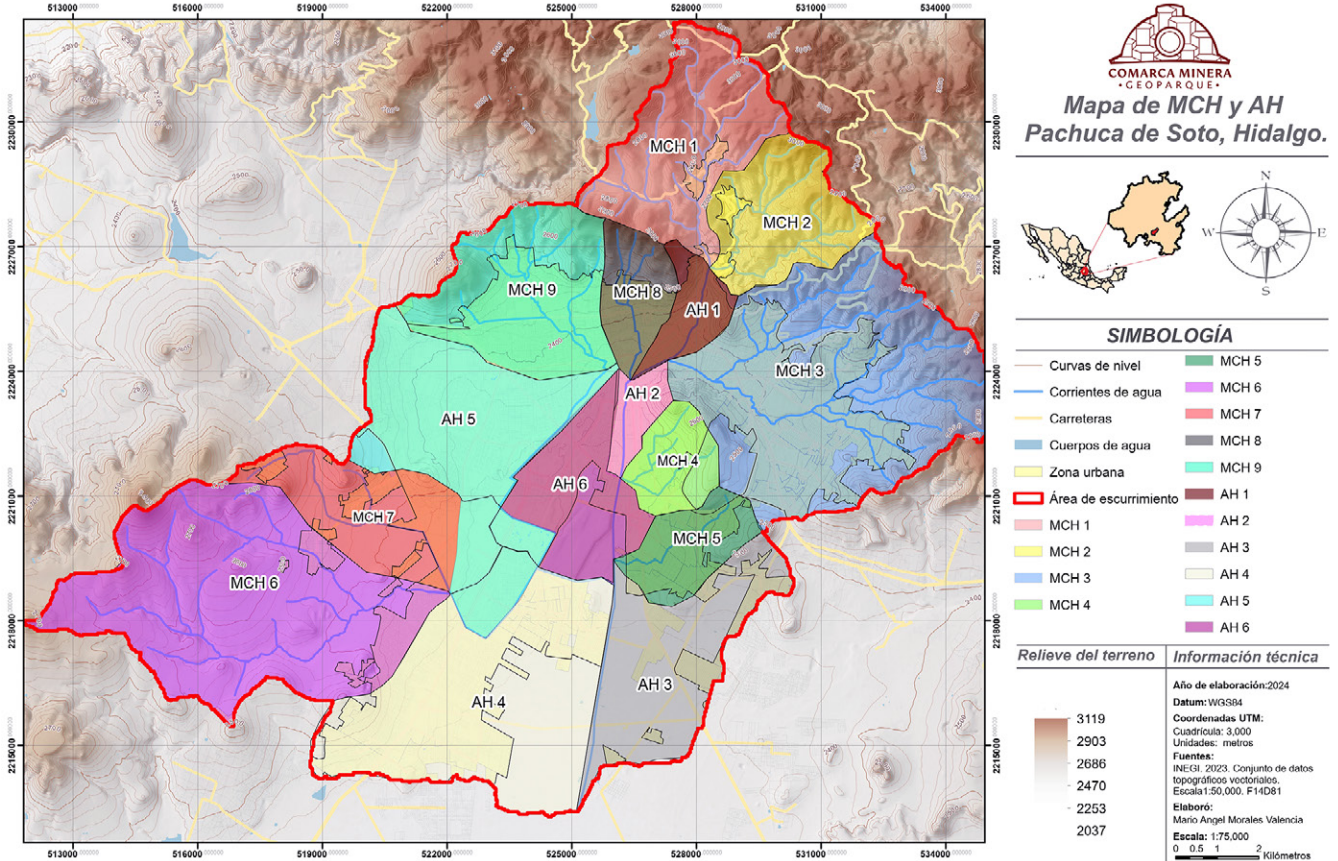


Figura 3 Mapa con la ubicación de las microcuencas y áreas hidrográficas que conforman la subcuenca del río de las Avenidas y abarcan toda la zona urbana de Pachuca de Soto.

**Tabla 2. Registro histórico de las inundaciones en Pachuca de Soto (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2022; Protección Civil Municipal, 2017-2022).**

Fecha	Lugar	Características	Daño
5 de septiembre de 1785	Río de las Avenidas, Colonia centro	Nivel del agua 3 m	300 muertos
6 de septiembre de 1867	Río de las Avenidas	Desbordamiento del río	Derrumbe de casas y decesos sin cuantificar
27 de septiembre de 1884	Río de las Avenidas	Desbordamiento del río e inundación de plazas, calles y edificios	
8 de septiembre de 1888	Río de las Avenidas, cauce occidental	Lluvia durante 30 h, azolve transportado por el agua, desde los terrenos de las minas en explotación	Derrumbes, afectación de las calles paralelas al cauce del río, Zaragoza, Plaza Independencia, Matamoros, Allende y Guerrero, cubiertas de escombros. Decesos en los derrumbes
05 de mayo de 1912		Lluvia durante dos horas que inundó las calles, subiendo las aguas 15 m	Decesos por ahogamiento y pérdidas a comercios
01 de mayo de 1912		Se inundaron las calles de Hidalgo, Allende, Guerrero, Juárez y Zaragoza	Las calles de Venustiano Carranza, Hidalgo, Zaragoza, Matamoros, Allende, Doria y Guerrero se convierten en cauce de lodo y piedras
01 de enero de 1921		Las minas de El Fresnillo” y “El Rosario” fueron inundadas por el torrente	Derrumbes de casas y dos decesos
18 de septiembre de 1925	Derrumbe de la cortina de la presa del Xotol (Sotol)	Aumento repentino del volumen del agua en el río, por apertura de compuertas	Inundó las calles de Morelos, Hidalgo, Matamoros, Zaragoza, Allende y Guerrero, la parroquia de la Asunción y el jardín Constitución
19 de octubre de 1930	Presa Xotol (Sotol)	Lluvia intensa	En la calle Hidalgo, el agua alcanzó una altura de casi 3 m 55 fallecidos y daños materiales incalculables
24 de junio de 1949		Desbordamiento del río de las Avenidas	Afectación a las colonias Santa Julia, 11 de julio, Tulipanes, Venta Prieta y Centro de la ciudad
01 de septiembre de 2006	Norte de la ciudad, donde convergen las cañadas Tulipán y Rosario	Lluvias intensas, niveles de hasta 70 cm	
31 de enero de 2011	Colonias de los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma	Granizada alrededor de las 17:30 horas	
31 de enero de 2012	Colonias de los municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma	Granizada a las 5:30 pm, con una capa de 20 a 30 cm de espesor	
10 de enero de 2015	Región	Fuerte granizada con duración de 35 minutos	
19 de marzo de 2015	Municipios de Pachuca y Mineral de la Reforma	Granizada	
19 de marzo de 2016	Región	Fuerte granizada, granos de granizo de más de 2 cm de diámetro	
29 de junio de 2017	Pachuca, colonias como Morelos y Real de la Plata, carretera Pachuca de Ciudad Sahagún, bulevares Nuevo Hidalgo y Ramón G. Bonfil	Torrencial aguacero generando inundaciones y caos vehicular. Niveles de agua alcanzaron 70 cm	
25 de junio de 2017	Apan, calles Guerrero y Constituyentes	Intensa lluvia	Viviendas inundadas con niveles de agua de hasta medio metro
28 de junio de 2018	Pachuca, Fraccionamiento Los Tuzos en Mineral de la Reforma, Mineral del Chico	Tormenta con granizo	Inundaciones con niveles de agua superiores a medio metro en Fraccionamiento Los Tuzos. Capa de hielo en Mineral del Chico
22 de agosto de 2019	Colonia Valles del Palmar del municipio de Pachuca de Soto	Intensa lluvia	Inundaciones de hasta 15 m, evacuación de 11 personas
24 de septiembre de 2019	Fraccionamientos al sur de Pachuca	Intensa lluvia	Inundaciones y caos vial
07 de mayo de 2020	Pachuca, desniveles de Río de las Avenidas, Jaime Nuno, viaducto Javier Rojo Gómez, avenidas Juárez y Madero, Santiago Tlapacoya, barrio La Española, zona centro	Intensa lluvia	Inundaciones superando los 4 m en desniveles, colapso del muro perimetral del panteón, deslave de cerro obstruyendo acceso a 14 viviendas, sótano del edificio del Poder Ejecutivo inundado, una persona arrastrada por la corriente en el río de las Avenidas
30 de noviembre de 2023	Pachuca, más de 40 colonias	Intensa tormenta	Inundaciones con niveles de agua superiores a 60 cm

Tabla 3. Sitios cartografiados que actualmente se inundan en Pachuca de Soto, Hidalgo.

Sitio	Nombre	Longitud	Latitud
1	Dren Lazos	-98.77351843	20.05951557
2	Colector BLVD. Bonfil	-98.76000576	20.11455541
3	Crucero Av. Madero y calle allende	-98.73270291	20.11920685
4	Cinturón de seguridad	-98.74385051	20.1318363
5	Canaleta pluvial BLVD. Minero	-98.7747858	20.1240 154
6	Barranca mina el Álamo	-98.73040504	20.10879182
7	Av. Palmitas	-98.74329375	20.11132597
8	Cerro Cubitos	98.74302893	20.09168927
9	Libramiento Pachuca Tulancingo	-98.74577454	20.08761233
10	Colector pluvial Ferrocarril Central	-98.74605591	20.11994845
11	Carretera antigua México-Pachuca	-98.75851254	20.10548485
12	Canal pluvial campesina	-98.75220797	20.12242859
13	Colector pluvial cinturón de seguridad Las Lajas	-98.72378493	20.11751657
14	Dren Pithayas	-98.79200763	20.05632817
15	Fracc. Valle de San Javier Y BLVD. Colosio	-98.75527837	20.09364345
16	Inicio interior del Rio de las Avenidas	-98.72903999	20.13312427
17	Barranca el Zembo	-98.76865736	20.1135738
18	Barranca Guadalupe	-98.71714175	20.1232249
19	Zona sur Pachuca	-98.78202142	20.05297161
20	Zona centro de Pachuca	-98.73024088	20.12642879
21	Crucero zona centro de Pachuca	-98.74077875	20.12023986
22	Colector pluvial ferrocarril central	-98.76196289	20.05663297
23	Colector pluvial Felipe Ángeles	-98.76334215	20.1002101
24	Rio de las Avenidas esquina Av. Los maestros.	-98.74750421	20.10087693
25	Dren Fernández de Lizardi	-98.71825373	20.1163614
26	Colector real de Minas	-98.7350392	20.1162814
27	Barranca de Zacatecas	-98.73368555	20.11174422
28	Geo-villas de san Antonio Dren Esmeralda	-98.78893639	20.04472253
29	Aeropuerto, zona militar, Pit	-98.77498642	20.08957863
30	Dren Valle del Sol	-98.79831573	20.07022483
31	Continuación dren Santa Julia	-98.77331161	20.087325
32	Dren panorámica-La Paz	-98.7484658	20.0877 193
33	Dren IMSS (Canaleta Tec)	-98.77541305	20.08009183
34	Dren Revolución	-98.74085698	20.11647256
35	Dren La Paz centenario de las avenidas	-98.767036	20.08722631
36	Dren Colosio oriente	-98.75808591	20.09547342
37	Conector insurgentes	-98.74630793	20.11595054
38	Centro comercial parque vértice	-98.78268295	20.05483774
39	Colonia Doria	-98.77769092	20.05584907
40	Fraccionamiento Progreso	-98.71848474	20.1066572

**4.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE ESCORRENTÍA**

Los resultados de la modelación hidráulica bidimensional del río de las Avenidas (considerando un punto de entrada de agua al tramo del río) revelaron áreas críticas de acumulación de agua y potenciales zonas de inundación en Pachuca de Soto. La simulación proporcionó un mapa detallado del tirante del agua, que identificó las zonas de desborde y clasificó la peligrosidad de inundaciones mediante el método de IBER.

Los datos mostraron que las áreas de mayor riesgo se concentran en regiones con topografía plana y escaso drenaje, donde la escorrentía superficial se acumula significativamente. El modelo hidráulico confirmó que las zonas de acumulación de escorrentía coinciden con las zonas de peligro de inundación (ZPI) previamente identificadas, lo que sugiere una correspondencia entre los resultados modelados y las observaciones de campo previas. Además, se observó que el flujo de escorrentía del río de las Avenidas no sigue el curso tradicional

Tabla 4. Tabla con las microcuencas (MCH) y áreas hidrográficas (AH) con las zonas en peligro de inundación (ZPI).

Microcuencas (MCH) y áreas hidrográficas (AH)	Zonas en peligro de inundación (ZPI)
MCH 1	0
MCH 2	0
MCH 3	6
MCH 4	2
MCH 5	0
MCH 6	1
MCH 7	1
MCH 8	4
MCH 9	3
AH 1	6
AH 2	2
AH 3	0
AH 4	5
AH 5	5
AH 6	6

reportado por el SIATL, desviándose hacia un afluente secundario al noroeste y centro de la ciudad (Figuras 5 y 6). El valor máximo de tirante de agua (calado) registrado es de 3.55 m (con base en el caudal de entrada x asignado, de un periodo de retorno y), seguido por un punto anómalo de 11.75 m de tirante de agua que se registra en una depresión topográfica parecido a una dolina, ubicado en un espacio semirural.

### 5. Discusión

La zona metropolitana de Pachuca de Soto, Hidalgo, ha experimentado recurrentes problemas de inundación debido a su crecimiento urbano acelerado y a la alteración de sus cauces naturales.

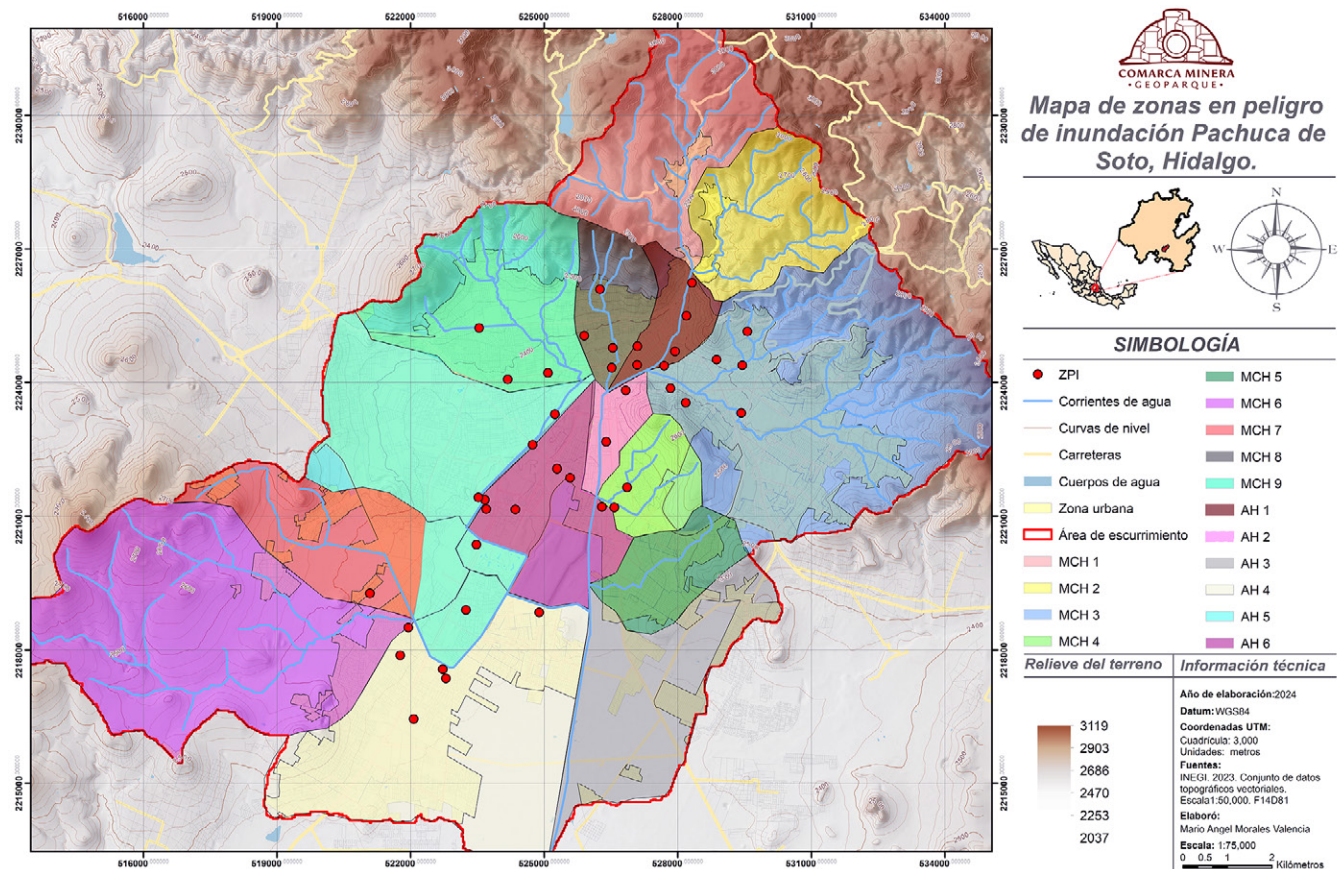


Figura 4 Mapa de Pachuca de Soto con las zonas en peligro de inundación (ZPI) obtenidas en campo y reportes de protección civil municipal.

Estudios previos han documentado que las precipitaciones intensas, combinadas con una infraestructura de drenaje insuficiente y la impermeabilización del suelo, han generado anegamientos en diversas zonas de la ciudad (IMIP, 2013). Estos eventos han afectado tanto a la infraestructura vial como a viviendas (IMIP, 2013; Lizárraga *et al.*, 2019), lo que resalta la importancia de comprender la dinámica de la escorrentía y las zonas de acumulación de agua para una mejor planificación urbana y mitigación de riesgos.

La modelación hidrológica y la caracterización de un mapa hidrográfico urbano son herramientas clave para entender la distribución y el comportamiento del agua en entornos urbanos. La simulación de eventos de inundación permite identificar zonas vulnerables, evaluar

el impacto de la urbanización sobre el drenaje natural y diseñar estrategias de mitigación más efectivas (Rosenzweig *et al.*, 2020). En ciudades con crecimiento desordenado, como Pachuca, la modelación es fundamental para predecir escenarios de riesgo y mejorar la planeación de infraestructura hidráulica. Además, la generación de mapas hidrográficos urbanos facilita la visualización de los patrones de escurrimiento y acumulación de agua, permitiendo tomar decisiones informadas en el diseño de sistemas de drenaje pluvial y obras de contención (Merz *et al.*, 2008).

El análisis realizado mediante la modelación hidrodinámica en dos dimensiones revela importantes aspectos sobre el comportamiento del agua en el área de estudio. Sin embargo, es significativo señalar que el río de las Avenidas

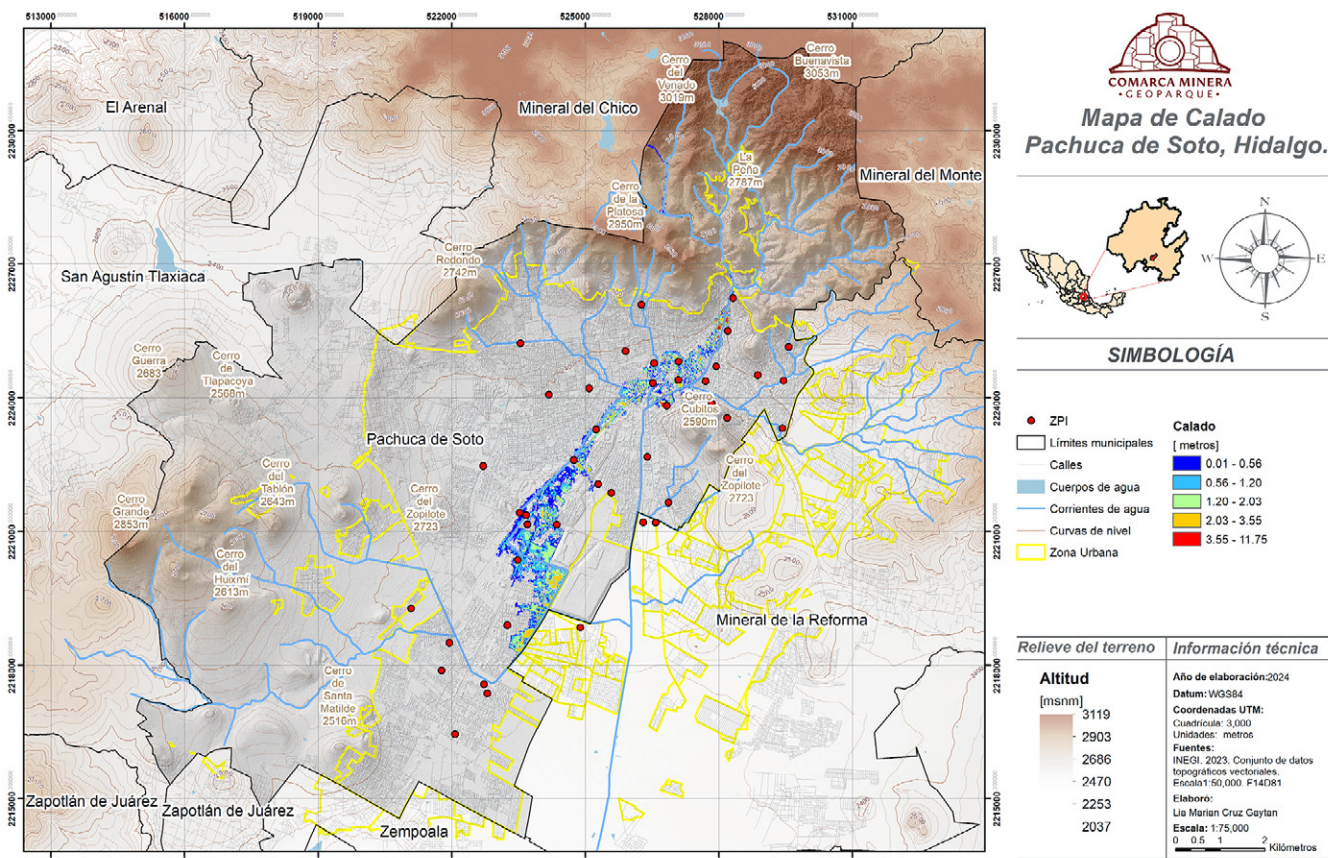


Figura 5 Mapa con el modelado de calado (tirante), escorrentía superficial, Pachuca de Soto, Hidalgo.

tiene una parte canalizada subterránea que no fue considerada en el modelo, lo que significa que gran parte del agua modelada en la topografía actual podría estar siendo drenada a través de esa canalización (Hauser *et al.*, 2024). En el modelo, se observa que el río se desborda en ciertas zonas debido a que la canalización subterránea hace que la topografía superficial se aplane, generando áreas donde el agua se acumula en la superficie, algo común en la construcción de terraplenes (Viand y González, 2012). A pesar de esta simplificación, una gran porción de las zonas identificadas como de peligro de inundación (ZPI) coincide con las áreas de acumulación de escorrentía superficial, lo que indica que el agua podría acumularse en la superficie después de la canalización, ya que no existe una estructura de flujo visible en esa área.

Además, estas acumulaciones de escorrentía presentadas en el modelo podrían estar reflejándose de manera más intensa en el entorno real, dado que el modelo no incluye la escorrentía proveniente del afluente secundario. Solo se modeló el caudal del afluente principal desbordado sobre el secundario, lo que sugiere que, en el escenario real, las acumulaciones de agua podrían ser mayores debido a la interacción de ambos afluentes.

Las inundaciones obtenidas por el modelado matemático son con base en la información del terreno, las cuales coinciden en un 30 % con las inundaciones reales que afectan año con año. Como puede observarse de los resultados de este trabajo, las condiciones hidrológicas naturales han sido severamente afectadas por el crecimiento urbano que ha tapado o desaparecido los cauces

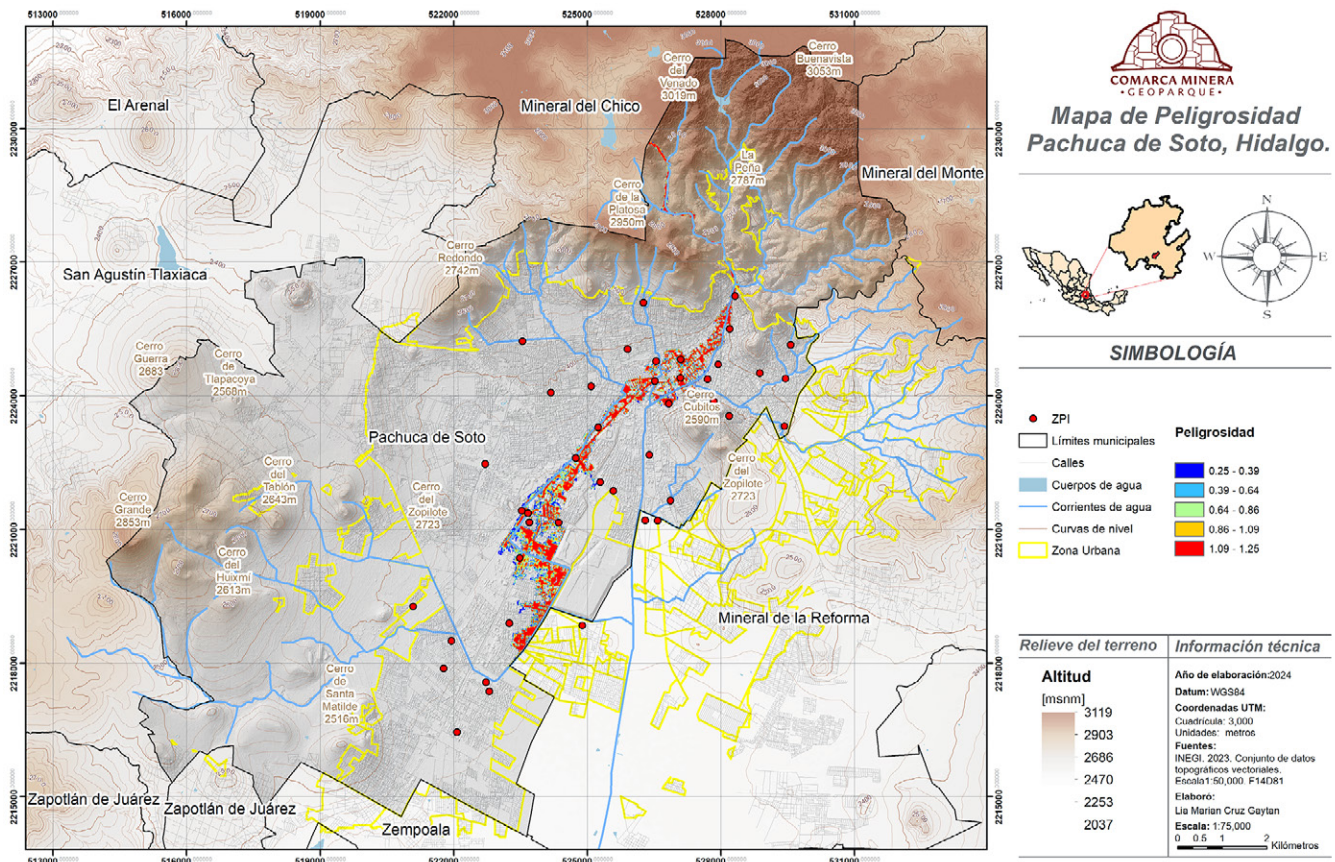


Figura 6 Mapa de modelado de la escorrentía superficial clasificada por peligrosidad.

naturales, por lo que el agua ahora escurre por las calles y llega a zonas más bajas donde se acumula e inunda, provocando daños. Las zonas en peligro de inundación que no coinciden con las asociadas al modelo se relacionan con el cambio en la infraestructura urbana que altera la topografía y, por ende, la modelación, siendo un limitante importante (Rosenzweig *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2021). El peligro de inundación se relaciona drásticamente con la falta de planeación en el crecimiento urbano (Seemuangngam y Lin, 2023), ya que se sigue construyendo en las partes altas de las microcuencas y áreas hidrográficas, lo que propicia mayores superficies impermeables, menor infiltración y mayor acumulación de escorrentía superficial sobre zonas pavimentadas en partes bajas de las MCH y AH.

Las nuevas zonas urbanas se conectan a los sistemas de alcantarillado sanitario (drenaje) y pluvial ya existentes, incrementando el volumen de agua; también, se conectan las nuevas calles a otras ya existentes, ocasionando que en época de lluvias ambas conexiones incrementen el volumen y la intensidad de agua que corre por los drenajes y las calles, lo que provoca que los drenajes se conviertan en fuentes y las calles en ríos efímeros.

## 6. Conclusión

El mapa hidrográfico urbano (MHU) de la zona urbana de Pachuca de Soto, Hidalgo, tiene los elementos de la nueva red hidrográfica urbana (RHU), donde el agua escurre por las calles desde la zona natural, llega a la zona urbana y se acumula en las partes más bajas, generando las zonas de peligro de inundación (ZPI). Se pueden observar los cauces naturales que fueron invadidos y que desaparecieron bajo la mancha urbana, la dirección de la pendiente de las calles de la zona urbana y las zonas en peligro de inundación.

La zona urbana de Pachuca de Soto se encuentra principalmente en la subcuenca del río de las Avenidas, el cual recibe el agua de nueve microcuencas y seis áreas hidrográficas.

Cada una de las microcuencas ha experimentado cambios en el uso del suelo que han modificado su régimen hidrográfico natural. En consecuencia, el escurrimiento superficial por las calles ha aumentado tanto en volumen como en intensidad, debido a la reducción en la infiltración y al incremento del flujo de escorrentía. Esta condición favorece la acumulación de agua en las zonas más bajas, provocando inundaciones.

Se recabó un registro de 40 colonias en peligro de inundación, las cuales han sufrido daños; algunas de estas tienen una evidencia histórica, mientras que otras son recientes y cada año aparecen nuevas zonas inundables. Las zonas en peligro de inundación están localizadas dentro de cada una de las microcuencas y de las áreas hidrográficas como resultado del crecimiento urbano desorganizado en estas áreas, donde se invaden, transforman y desaparecen los cauces naturales. Además, se conectan las aguas de los drenajes, colectores pluviales, las calles de los nuevos desarrollos urbanos con las calles de los ya establecidos, por lo que cada vez aparecen más zonas inundables y las calles con un mayor tirante de agua. Entre las microcuencas y áreas hidrográficas con zonas en peligro de inundación tenemos la MCH3 con seis, MCH4 con dos, MCH7 con uno, MCH8 con cuatro, MCH9 con tres, mientras que en las áreas hidrográficas tenemos AH1 con seis, AH2 con dos, AH4 con cinco, AH5 con cinco y AH6 con seis. Lo que nos indica que las áreas hidrográficas, sin cauce definido, son las que mayores zonas en peligro de inundación tienen. Mientras que las microcuencas llevan mayor volumen e intensidad de agua y las zonas de inundación se relacionan con las zonas donde los cauces han sido afectados en sus condiciones naturales.

El modelo hidráulico de escorrentía superficial de una sola entrada, modelado para el río de las Avenidas, evidencia las zonas críticas donde la escorrentía superficial tiende a acumularse y desbordarse, las cuales son coincidentes con los ZPI. Este modelo demuestra las repercusiones del aplanamiento de la topografía por infraestructura

urbana y la importancia de contemplar estos cambios en los mapas hidrográficos actualizados. Con este modelado se corroboran las zonas reales de inundación, las cuales han sido construidas socialmente al alterar las condiciones naturales del terreno.

El mapa hidrográfico urbano (MHU) de la zona urbana de Pachuca de Soto integra los elementos fundamentales que pueden servir como herramienta para la formulación de un nuevo plan de crecimiento urbano y para la definición de estrategias preventivas y de gestión del riesgo. Al identificar el origen y la trayectoria del agua que alcanza las zonas de inundación, las autoridades pueden implementar medidas específicas, como el fortalecimiento de la infraestructura, la planificación de rutas de evacuación y la asignación adecuada de recursos destinados a la mitigación de los impactos generados por las inundaciones.

Este mapa puede ser utilizado como recurso informativo para educar a la población sobre las áreas de peligro, fomentando una mayor conciencia y preparación ante posibles eventos hidrometeorológicos.

## Contribuciones de los autores

(1) Conceptualización: JCMC; (2) Análisis o adquisición de datos: NLRS, MAMV, LMCG, JJNB; (3) Desarrollo metodológico/técnico: JCMC, NLRS, MAMV, JJNB, MCOP, RGB, MAHH; (4) Redacción del manuscrito original: JCMC, MAHH, (5) Redacción del manuscrito corregido y editado: MAHH, (6) Diseño gráfico: MAHH, (7) Trabajo de campo: MAMV, LMCG, MCOP, RGB (8) Interpretación: JCMC, MAHH.

## Financiamiento

El presente proyecto fue financiado por los proyectos PAPIIT IT100923 y PAPIME PE106323 Universidad Nacional Autónoma de México.

## Agradecimientos

Se agradece al editor del Boletín, a los editores invitados y a la editora técnica por su contribución esencial a la preparación y publicación de este artículo.

## Conflicto de intereses

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés.

## Editor a cargo

Oswaldo Franco Ramos.

## Referencias

- Adil, J., Chourak, M., Farid, B., Hichame, S., Aboubakr, C., 2024, Two-dimensional flooding model using IBER software case Study: Saidia City North east of Morocco: E3S Web Of Conferences, 502, 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450203011>
- Al Día Noticias (ADN), 2019, Inundaciones alcanzaron 1.5 metros de altura en algunas colonias de Pachuca (en línea): México, disponible en <<https://aldianoticias.mx/2019/08/22/inundaciones-alcanzaron-1-5-metros-de-altura-en-algunas-colonias-de-pachuca/>>.
- Alfaro, B., 2023, Tormenta provoca inundaciones y colapsa drenajes en Pachuca, Hidalgo (en línea): México, Estados, N+, publicado el 30 de noviembre de 2023, disponible en <<https://www.nmas.com.mx/estados/tormenta-provoca-inundaciones-y-colapsa-drenajes-en-pachuca-hidalgo/>>.
- Almaraz, R., 1865, Memoria de los trabajos ejecutados por la Comisión Científica de Pachuca en el año de 1864: México, Imprenta de J. M. Andrade y F. Escalante.
- Boletín Oficial del Estado (BOE), 2008, Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio

- Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril; Ministerio de la Presidencia. Madrid, España.
- Bustamante, M.C.R., Castro, L.M.T., Parra, L.V.C., 2023, Sensibilidad del coeficiente de Manning en la estimación de los niveles de crecida para el mapeo de inundaciones en un río de la región interandina de Ecuador: Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía, 32(1), 35–49. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.94764>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2019, 70 años de la gran inundación en Pachuca, Hidalgo (en línea): México, Centro Nacional de Prevención de Desastres, actualizado 28 junio de 2019, disponible en <<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/70-anos-de-la-gran-inundacion-en-pachuca-hidalgo>>, consultado 16 febrero 2022.
- Cervantes, M.S., Hernando, A., García-Abril, A., Valbuena, R., Saornil, J.V., Manzanera, J.A., 2020, Simulation of overflow thresholds in urban basins: Case study in Tuxtla Gutiérrez, Mexico: River Research and Applications, 36(7), 1307–1320. <https://doi.org/10.1002/rra.3642>
- Centro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano (CIDEU), 2023, Pachuca de Soto (en línea): Barcelona, España, disponible en <<https://www.cideu.org/miembro/pachuca-de-soto/>>
- Cruz-Gaytán, L.M., 2024, Guía para elaborar un mapa hidrológico urbano en zonas de riesgo de inundación: caso Pachuca de Soto, Hidalgo: México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 145 p.
- Djafri, S.A., Cherhabil, S., Hafnaoui, M.A., Madi, M., 2024, Flood modeling using HEC-RAS 2D and IBER 2D: a comparative study: Water Supply, 24(9), 3061–3076. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.184>
- Enjoymexico, 2019, Pachuca-Clima-México (en línea): Baja California Sur, México, actualizado el 15 febrero de 2024, disponible en <<https://enjoymexico.net/mexico/pachuca-clima-mexico.php>>.
- Feng, B., Zhang, Y., Bourke, R., 2021, Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models: Natural Hazards, 106(1), 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>
- García-Feal, O., Gonzalez-Cao, J., Cea, L., Formella, A., Domínguez, J.M., 2017, Iber as a tool to analyse flooding scenarios: SciForum Conference Proceedings Paper, 1, 1–9. <https://doi.org/10.3390/chycle-2017-04841>
- Gobierno del Estado de Hidalgo, 2017, Atlas de Riesgos Pachuca de Soto 2017: Presidencia Municipal de Pachuca de Soto, Hidalgo, México, Atlas de Riesgos Nacional, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Gobierno del Estado de Hidalgo, 2022, Atlas de Riesgos Pachuca de Soto 2022: Presidencia Municipal de Pachuca de Soto, Hidalgo, México, Atlas de Riesgos Nacional, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 556 p.
- González, A., 2023, Inundaciones en Pachuca: Estas son las zonas de mayor riesgo (en línea): El Sol de Hidalgo, Organización Editorial Mexicana, actualizado 23 mayo de 2023, disponible en <<https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/inundaciones-en-pachuca-estas-son-las-zonas-de-mayor-riesgo-10139758.html>>, consultado 27 julio de 2023.
- Gutiérrez-García, J.V., Rubiños Panta, J.E., Fernández Reynoso, D.S., Ramírez Ayala, C., Roblero Hidalgo, R., Gutiérrez García, F.G., Romero Sánchez, M.E., 2022, Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán: Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 13(71), 159–181. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1238>
- Hauser, M., Reinstaller, S., Oberascher, M., Muschalla, D., Kleidorfer, M., 2024, The Impact of Underground Structures on Urban Flood Models: Water, 16(1), 170. <https://doi.org/10.3390/w16010170>

- Hernández, E., 2019, Intensa lluvia deja inundaciones y caos vial al sur de Pachuca (en línea): México, Quadratin Hidalgo, publicado el 24 de septiembre de 2019, disponible en <<https://hidalgo.quadratin.com.mx/sucesos/intensa-lluvia-deja-inundaciones-y-caos-vial-al-sur-de-pachuca/>>.
- Iagua, 2025, Informe Aon sobre desastres climáticos en 2024: el coste económico de las inundaciones y sequías (en línea): Madrid, España, actualizado 29 enero de 2025, disponible en <<https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/informe-aon-desastres-climaticos-2024-coste-economico-inundaciones/>>, consultado 2 enero 2025.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), 2013, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Pachuca de Soto: Hidalgo, México, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, 151 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2024, Topografía (en línea): México, Geografía y Medio Ambiente, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en <<https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>>, consultado el 7 de febrero de 2024.
- Jiménez, A., 2020, Inundación en Pachuca rebasó los 4 metros de altura; familias afectadas por deslave de cerro (en línea): México, Quadratin Hidalgo, publicado el 8 de mayo de 2020, disponible en <<https://hidalgo.quadratin.com.mx/principal/inundacion-en-pachuca-rebaso-los-4-metros-de-altura-familias-afectadas-por-deslave-de-cerro/>>.
- Kampfer, O., Silva Martin, P., Silvestre Reyes, J., 2015, Proyecto Dren Norponiente de la Ciudad de Pachuca: Revista Aplicaciones de la Ingeniería, 2(3) 139–146.
- Kumar, V., Sharma, K., Caloiero, T., Mehta, D., Singh, K., 2023, Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances: Hydrology, 10(7), 141. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- Lizárraga, L., Lagarda, F., Bigurra, C., 2019, Uso de las tecnologías de bajo impacto como alternativa para la restauración del ciclo hidrológico en zonas urbanas: Campus universitarios de la UAEH, como caso de estudio: Vivienda y Comunidades Sustentables, 5, 23–31. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i5.59>
- Merz, R., Blöschl, G., Humer, G., 2008, National flood discharge mapping in Austria: Natural Hazards, 46(1), 53–72. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9181-7>
- Mora-Chaparro, J.C., 2019, Mapping the risk of flooding, mass movements and local subsidence. A new proposal for big cities: Cham, Alemania, SpringerBriefs en Ciencias de la Tierra, 58 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22472-1>
- Mora-Chaparro J.C., 2022, Mapa Hidrográfico Urbano, herramienta para prevenir daños por inundaciones (en línea): Ciencia UNAM, Dirección General de Divulgación de la Ciencia, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en <<https://ciencia.unam.mx/leer/1305/mapa-hidrografico-urbano-herramienta-para-prevenir-danos-por-inundaciones>>.
- Mora-Chaparro, J.C., Hernández-Borges, E.E., Mora-Mora, L.L., 2023, Mapa de riesgos de inundación en la Microcuenca Hidrográfica 24 de Junio, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México: Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres, 7(1), 116–130. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i1.111>.
- ONU-Hábitat, 2021, Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres (en línea): Kenia, Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos Organización de las Naciones Unidas, actualizado 5 octubre de 2021, disponible en <<https://onu-habitat.org/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>>, consultado 2 enero de 2025.

- Plaza Juárez, 2017, Inundaciones y caos por torrencial aguacero en Pachuca. Principalmente en El Palmar, Zona Plateada y El Tezontle (en línea): Pachuca, Hidalgo, México, Barandilla, Diarios Plaza Juárez, disponible en <https://plazajuarez.mx/historico/inundaciones-y-caos-por-torrencial-aguacero/>
- Prado-Hernández, J.V., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., Valentín-Paz, O.G., Carrillo-García, M., Martínez-Ruiz, A., Sánchez-Morales, J.J.F., 2019, Application of HEC-HMS and IBER in the numeric modeling of floods in the Rio San Sebastian of the municipality of Totolapan: WIT Transactions on Ecology and the Environment, 239, 236–274. <https://doi.org/10.2495/WS190231>
- Protección Civil Municipal, 2017-2022, Reporte interno del municipio de Pachuca de Soto, Hidalgo: México, Archivo de documentos de Protección Civil, Subsecretaría de Protección Civil y Gestión de Riesgos del Estado de Hidalgo, Reporte inéditos.
- Rincón, E., 2018, Tormenta y granizada inundan calles de Pachuca, Hidalgo (en línea): México, Excelsior, disponible en <<https://www.excelsior.com.mx/nacional/tormenta-y-granizada-inundan-calles-de-pachuca-hidalgo/1248813>>.
- Rosenzweig, B.R., Cantis, P.H., Kim, Y., Cohn, A., Grove, K., Brock, J., Yesuf, J., Mistry, P., Welty, C., McPhearson, T., Sauer, J., Chang, H., 2020, The Value of Urban Flood Modeling: Earth's Future, 9(1), e2020EF001739. <https://doi.org/10.1029/2020ef001739>
- Seemuangngam, A., Lin, H., 2023, The impact of urbanization on urban flood risk of Nakhon Ratchasima, Thailand: Applied Geography, 162, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103152>
- SIATL v4, 2024, Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas: México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, disponible en, [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)
- Soto-Oliver, N., 2004, Pachuca una ciudad con sed: Pachuca, Hidalgo, Fundación Hidalguense-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 276 p.
- Téllez-Pelcastre, N., 2019, La gestión del agua en la cuenca del río de las Avenidas. Administración de las aguas negras en el regadío periurbano del valle de Pachuca, Hidalgo: Texcoco, Estado de México, Colegio de Postgraduados, tesis de maestría, 138 p.
- Viand, J., González, S., 2012, Crear riesgo, ocultar riesgo: gestión de inundaciones y política urbana en dos ciudades argentinas, en Primer Encuentro de Investigadores en Formación Recursos Hídricos: Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional del Agua.