



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

**INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS DE SUELO EN LA
FORMACIÓN DE AVENIDAS TORRENCIALES EN LA MICROCUENCA DE
PACHUCA.**

Trabajo escrito

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Andrés Uriel Martínez Vizcaino

Director:

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero

Querétaro, Qro., a junio 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

**INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS DE SUELO EN LA FORMACIÓN DE
AVENIDAS TORRENCIALES EN LA MICROCUENCA DE PACHUCA.**

Trabajo escrito

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Andrés Uriel Martínez Vizcaino

Director:

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero

Presidente

M. en G.I.C. Alejandro César Valdés Carrera

Secretario

M.I. Rubén Armendáriz Rubio

Vocal

Mtra. Alma Angélica Navarrete Carrillo

Suplente 1

Dra. Diana Patricia García Tello

Suplente 2

Centro Universitario Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (octubre y 2024)
México

*Dedicado al amoroso recuerdo de Celia Guerrero Rodríguez y
Dolores Manuel Martínez Garrido.*

*No hay un día que pase sin pensar en ustedes, pero sé que eventualmente nos
volveremos a encontrar.*

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, quisiera agradecer a Dios y a San Francisco de Asís, santo patrono de las y los naturalistas, por guiarme siempre en el ejercicio y desarrollo de mi profesión y por ser una fuente de inspiración en la búsqueda del bienestar ambiental y social.

Agradezco a mi mamá y a mi hermano, Laura Vizcaino y Gerardo Martínez, y a Carlos Bravo por siempre estar al pendiente de mí y apoyarme, a pesar de los muchos desacuerdos que podamos tener, los amo mucho; así mismo, agradezco a mis tíos Jacqueline Madrid y Mario Alberto González por todos los momentos alegres que hemos compartido y a mis tres primitos, Aimé, Daphne y José Emilio, quienes iluminan mi vida y me motivan a ser una mejor persona, siempre voy a estar para ustedes.

A Gloria Melo, Yoyito, por estar conmigo y no perder la fe en mí, aun cuando yo no podía mantenerla, estabas segura de que encontraría la forma de solucionar los problemas a los que me enfrenté durante la maestría y los encontramos juntos, te lo agradezco de todo corazón.

A Juan Alfredo Hernández Guerrero, no me alcanzan las palabras para agradecerle el apoyo que me dio en un momento tan crítico es una persona invaluable y uno de los mejores profesores de los que he tenido el gusto de aprender; también agradezco a Alejandro Valdés, Diana García y a Alma Navarrete son grandes profesores y hacen una labor fenomenal en la enseñanza.

A las y los compañeros de la Subdirección Técnica de la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en el Estado de Hidalgo, empezando por Rubén Armendáriz Rubio y Sergio Guzmán Morales, de todo corazón les agradezco por haberme dado la oportunidad de realizar mi estancia profesional en su área, sin duda me llevo un aprendizaje invaluable; agradezco también a Isabel Campa, Victoria Ramírez, Martín Rodríguez, Martín Bautista, Isidro López, Sergio Alarcón,

Germán Palma y a Carlos Aguilar por haberme recibido con todo el cariño, más que un espacio de trabajo me sentí en casa.

Agradezco a las y los compañeros de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo, empezando por David Uribe, por siempre brindarme su apoyo con todo el entusiasmo, también a Arturo Islas, Ismael Alvarado, Sirelda Cornejo, Nuria Morales, Francisco Lechuga, Araceli Olguín, Javier Cuevas, Juan Emmanuel Vera, Gilberto Téllez, Anayatzin Dinaroa, Claudia Ordoñez, Cinthia Vargas, Agustín Sánchez, Celso Ibarra, José Luis Monroy, Elliot Ramírez, Ernesto Hernández, David Ramírez, Evelyn Terrazas, Luis Moreno, Gregorio Sánchez, Miguel Molina, Rosalba Cruz, Ángeles García, Valentín Franco y a todos los compañeros de la brigada de Tecocomulco.

Agradezco a mis profesoras y profesores de la Unidad Xochimilco de la Universidad Autónoma Metropolitana por todo lo que me han enseñado y por seguir acompañándome hasta el día de hoy, con todo cariño a Virginia Cervantes, Jorge Servín, Gilberto Vela, José Viccón, Beatriz Hidalgo, Roberto Ángeles, Miguel Mosqueda y Jorge Reyes, todos mis logros, académicos y profesionales, los comparto con ustedes.

Quiero agradecer a mis amigos, son la mejor compañía y le pido a Dios nos conceda muchos años más juntos en las buenas y en las malas, a Gisela Jiménez, Samuel Quintanar, Daniel Ramírez, Frida Reséndiz, Yiyetzi Vázquez, Cecilia García, Jeanette Cerratos, Emmanuel Lara, Camila Rangel, Eleazar Alfaro, Daniela Torres, Alexis Mejía, Daniel Rocha, Pamela Yougoné, Arided López, Liliana Ramírez, Jacqueline Trejo, Isabel Guzmán y Diviana Martínez.

Finalmente, quisiera agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por brindarme la beca para poder dedicarme a este trabajo los últimos dos años, gracias a esta institución puedo aportar mi granito de arena para mejorar las condiciones de vida de las y los hidalguenses.

RESUMEN

Los cambios de coberturas y usos de suelo para fines de urbanización son los que tienen mayor impacto en la superficie de la Tierra, usualmente traduciéndose en un aumento del área de superficies impermeables trayendo consigo impactos importantes en las cuencas hidrográficas, unidades territoriales de cuya función depende la calidad y cantidad del agua aprovechable, provocando alteraciones en los flujos de aguas superficiales que pueden causar avenidas torrenciales. La microcuenca de Pachuca ha presenciado una urbanización acelerada, fenómeno que ha favorecido la formación de avenidas torrenciales, las cuales se han convertido en eventos recurrentes y peligrosos, ocasionando daños y pérdidas materiales y económicas. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue analizar la influencia de los cambios de usos y coberturas de suelo en la formación de avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca para generar información para prevención de esta clase de desastres hidrometeorológicos. El proceso incluyó la digitalización visual simple de imágenes satelitales, consecuentemente, utilizando el modelo SCS-CN, se identificaron las variaciones en la escurrimiento superficial, también se usó el software HEC-RAS para simular los eventos anteriores de avenidas torrenciales en la microcuenca, se aplicaron tres índices de vulnerabilidad a nivel de manzana y, finalmente, se identificaron las zonas de riesgo a través de un análisis multicriterio. Se identificó que la variable que más influye en las avenidas torrenciales en la microcuenca era el cambio de usos y coberturas de suelo, alcanzando un valor de coeficiente de escurrimiento superior al 0.9, así mismo, se obtuvieron los mapas de planicies aluviales de los eventos de avenidas torrenciales en el periodo de estudio, de distintos tipos de vulnerabilidad y de peligro a la formación de esta clase de desastres hidrometeorológicos. Se espera que la información obtenida de la presente investigación pueda ser de utilidad para autoridades municipales y estatales en la toma de decisiones en torno a la prevención de riesgos ante avenidas torrenciales.

Palabras clave: Uso de suelo; Cobertura de suelo; Avenidas torrenciales; Microcuenca.

ABSTRACT

Land-Cover and Land-Use changes for urbanization purposes are those that have the major impact over Earth Surface, usually increasing impervious areas causing important impacts on hydrographic basins, territorial units on whose function depends on the quality and quantity of usable water, disrupting surface water runoff resulting in torrential flows. Pachuca micro-basin has been strongly urbanized and torrential flows had become a common and dangerous phenomenon, causing material and economic losses and damage. Therefore, the aim of this research is to analyze the influence that Land-Cover and Land-Use changes have in torrential flow formation in the Pachuca micro-basin to generate information that will help to prevent this kind of hydrometeorological disasters. The elaboration of this research included a heads-up digitization of satellite imagery, consequently, using the SCS-CN model, the disruptions on the surface water runoff were identified, also, the HEC-RAS software was used to simulate the past torrential flows events in the Pachuca micro-basin, three vulnerability index were applied at urban block level and, finally, flash flood risk areas were identified by an Analytic Hierarchy Process. Land-Cover and Land-Use changes were found to be the most influential factor for torrential flows in Pachuca micro-basin, reaching a runoff coefficient beyond 0.9, also, flood plain maps of past torrential floods events in the study period, maps of different kind of vulnerability and a map of torrential flows formation risk were obtained. Hope of this research is to provide useful and high-quality info to municipal and state authorities for the decision making around torrential flow risk management.

Keywords: Land-Use; Land Cover; Torrential Flows; Micro-Basin.

INDICE

INTRODUCCIÓN	10
Planteamiento del problema	12
Justificación	15
OBJETIVOS	16
1. MARCO CONCEPTUAL.....	18
1.1. Cambio de uso y coberturas de suelo y su implicación en las alteraciones de las escorrentías superficiales en cuencas hidrográficas	18
1.2. Cuencas urbanizadas y su papel en la formación de avenidas torrenciales.....	23
1.3. Gestión del riesgo asociado con avenidas torrenciales y su importancia de poder mitigar y prevenir	25
1.4. Gestión integral del riesgo de desastres	27
1.5. Las avenidas torrenciales como un tema emergente en la actualidad	29
2. ESTADO DEL ARTE	31
2.1. Atención y prevención de avenidas torrenciales en un contexto global .	31
2.2. Atención y prevención de avenidas torrenciales en México.....	36
2.3. Marco de referencia general de la atención y prevención de avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca.....	38
2.4. Importancia del estudio de las avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca.....	39
3. ZONA DE ESTUDIO	42
3.1. Características socio-económicas de la zona de estudio	43
3.2. Características biofísicas de la zona de estudio	45
3.3. Características morfométricas de la zona de estudio	46

4. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS.....	51
4.1. Etapa 1. Estimación de la tasa de cambios de usos y coberturas de suelo entre los años 2012 a 2020.....	53
4.1.1. Fase 1.1. Clasificación de imágenes satelitales	53
4.1.2. Fase 1.2. Estimación de tasa de cambio de uso y cobertura de suelo .	54
4.2. Etapa 2. Identificación de las avenidas torrenciales durante los años 2012 a 2020	55
4.2.1. Fase 2.1. homogeneización de las series de tiempo climatológicas.....	55
4.2.2. Fase 2.2. Estimación de la escorrentía superficial.....	56
4.2.3. Fase 2.3. Reconstrucción de los eventos de avenidas torrenciales	60
4.3. Etapa 3. Determinación de las zonas susceptibles a avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca.....	63
4.3.1. Fase 3.1. Identificación de las zonas vulnerables ante las avenidas torrenciales por manzana.....	63
4.3.2. Fase 3.2. Realización de mapa de riesgo a avenidas torrenciales	65
5. RESULTADOS	70
5.1. Estimación de la tasa de cambios de usos y coberturas de suelo entre los años 2012 a 2020.....	70
5.2. Influencia de la precipitación pluvial en la formación de avenidas torrenciales, 2000-2020.....	73
5.2.1. Precipitación diaria	74
5.2.2. Precipitación mensual acumulada	76
5.2.3. Precipitación máxima en 24 horas mensual	79
5.2.4. Precipitación pluvial y avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca	81
5.3. Estimación de la escorrentía superficial.....	83
5.3.1. Determinación del número de curva	83
5.3.2. Estimación de la escorrentía superficial, 2012-2020.....	85
5.3.3. Estimación del coeficiente de escurrimiento	88
5.4. Efectos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la escorrentía superficial de la Microcuenca de Pachuca	91

5.4.1. Mapeo de las llanuras aluviales por evento de inundaciones y avenidas torrenciales.....	91
5.4.2. Zonas de mayor afectación tras los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales	95
5.4.3. Identificación de resultados.....	97
5.5. Determinación de las zonas vulnerables a avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca	103
5.5.1. Vulnerabilidad social, estructural y por tipo de vivienda en la Microcuenca de Pachuca	103
5.5.2. Implicaciones de los distintos grados de vulnerabilidad en la microcuenca de Pachuca	106
5.5.3. Realización del mapa de riesgo a avenidas torrenciales	110
6. DISCUSIÓN	113
CONCLUSIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

INTRODUCCIÓN

La construcción y gestión del riesgo asociado con amenazas hidrometeorológicas son temas relevantes debido a la constante formación de eventos perjudiciales, los cuales suelen manifestarse en daños y pérdidas materiales, económicas y humanas y, por ende, forman lugares susceptibles (Arnous y Omar, 2018; Oreano-Hernández y Hernández-Guerrero, 2022). En este contexto, las actividades humanas juegan un papel importante en la formación de lugares susceptibles y en la magnitud del impacto, sea por las aceleradas modificaciones con escasa o nula planeación, entre ellas destacan cambios de uso y cobertura de suelo, donde el cambio de uso de suelo implica cualquier tipo de intervención cíclica o permanente que realiza el ser humano para satisfacer sus necesidades, sea mediante el cambio de los regímenes de manejo y la transformación del medio biofísico de un lugar, mientras que la cobertura del suelo (material físico en la superficie terrestre) se define por las asignaciones de la actividad humana (Pérez *et al.*, 2012; CONABIO, 2020).

Por su parte, los cambios de usos y coberturas de suelo para fines de urbanización juegan un papel importante en la construcción del riesgo y desastre por amenazas de origen hidrometeorológico, ya que se acompaña de concentración de población, diversificación de actividades económicas, transformación de medios y activos, alteración de suelos naturales o productivos, y cambios en ríos y cuerpos de agua (Gupta *et al.*, 2016; Bahena-Ayala *et al.*, 2021; Haider, *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2022).

Así, en espacios urbanos, dada su propia dinámica de transformación, es común el fomento e incremento de superficies impermeables, disminución de la capacidad de infiltración y evapotranspiración, así como aumento del volumen y velocidad de las escorrentías superficiales con arrastre de sedimento y la subsecuente afectación a sistemas expuestos (Johnson y Patil, 2006; Zhang *et al.*, 2016; Berihun *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). A ese fenómeno que involucra a las escorrentías superficiales se le

conoce como avenidas torrenciales, y destacan entre los eventos que suelen evolucionar rápidamente en desastres, ya que en periodos de tiempo relativamente cortos pueden transportar y descargar importantes volúmenes de agua a gran velocidad (Fletcher *et al.*, 2012; Guerrero y Aristizábal, 2019; Daniels, 2023). Además, su formación es casi impredecible debido a la rapidez con la cual ocurre, sea por su corta duración y largo periodo de retorno, así como su distribución poco uniforme en el espacio y tiempo (Montoya *et al.*, 2009). En este sentido, las avenidas torrenciales involucran procesos acumulativos donde la lluvia es un factor importante, pero también cambios de uso y coberturas de suelo (Aristizábal *et al.*, 2020; Barnett y Bouw, 2022; Hussain Shah *et al.*, 2023). Por lo tanto, no se debe considerar los cambios sin involucrar la dinámica hídrica natural, para ello se requiere un enfoque como el de cuenca hidrográfica para entender lo que se alteró o está en proceso de alteración.

Al respecto, en la literatura científica se ha documentado el efecto de los cambios de usos y coberturas de suelo sobre la escorrentía superficial y, subsecuentemente, en la formación de estos desastres hidrometeorológicos (Zope *et al.*, 2017; Worku *et al.*, 2017; Akter *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2021; Al-Juaidi, 2018; Chaemiso *et al.*, 2021; Dandapat y Sahoo, 2021; Bakhtiar *et al.*, 2022), así como trabajos que intentan entender el fenómeno a partir de parámetros morfométricos en cuencas hidrográficas (Arceo *et al.*, 2018; Nageswara, 2020; Karunanidhi *et al.*, 2020; Getachew y Manjunatha, 2022). Otros trabajos buscaron patrones para identificar el riesgo propiciado por ese fenómeno hidrometeorológico para generar herramientas para la gestión y prevención (He *et al.*, 2020; Cerbelaud *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022; Cai y Xu, 2022; Cerbelaud *et al.*, 2022). No obstante, a pesar de los aportes mencionados, son escasos los estudios sobre avenidas torrenciales (formación y repercusiones) que toman en cuenta los cambios de uso y coberturas de suelo considerando cuencas hidrográficas urbanizadas o en proceso de urbanización, pero de llevarse a cabo, contribuiría con información y conocimiento que apoyaría

la formulación de estrategias y políticas públicas para mitigar o solucionar estos eventos perjudiciales.

Planteamiento del problema

Con base en lo señalado hasta el momento, México cuenta con diversos espacios urbanos que evidencian las causas y consecuencias de las avenidas torrenciales en cuencas hidrográficas. Al respecto, la Ciudad de México (CDMX) y zona conurbada han atravesado un acelerado proceso de urbanización, al punto que se ha conformado una megalópolis poblada por más de 32 millones de personas en un territorio conformado por 240 municipios distribuidos en 14 metrópolis (SEMARNAT, 2018), ese territorio se extiende desde la CDMX hasta los estados de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Querétaro e Hidalgo (CAME, 2018), siendo hoy día la tercer zona metropolitana más grande de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la más grande del mundo fuera del continente Asiático (OCDE, 2015). Este crecimiento acelerado ha provocado cambios significativos en la hidrografía de la Cuenca del Valle de México y en las cuencas hidrográficas aledañas propiciado, entre otras, por obras hidráulicas para el abastecimiento y el drenaje de aguas negras (Peña, 2018).

En este contexto, el estado de Hidalgo es una de las entidades federativas del territorio señalado que ha sufrido importantes cambios respecto a sus coberturas y usos de suelo, especialmente a través del establecimiento de proyectos como el corredor industrial Tula-Tepeji-Atitalaquia y las obras hidráulicas para el aprovechamiento de las aguas negras provenientes del Distrito Federal, hoy CDMX (Montelongo, 2015). Se estima que, entre los años 2000 y 2014, la superficie urbana en el estado de Hidalgo aumento 72.3 km², con una tasa de crecimiento promedio anual de 1.8 %, siendo los municipios de Tetepango, Mineral de la Reforma,

Tizayuca y Pachuca los que presentaron las mayores tasas de crecimiento con valores de 102 %, 183.44 %, 94 % y 68.5 % respectivamente (Cano *et al.*, 2017).

Al respecto, destaca la constante urbanización que han presentado las zonas metropolitanas de Pachuca de Soto y Tulancingo, las cuales rebasan los límites municipales y se extienden sobre las circunspecciones aledañas hasta presentar contacto físico con conurbaciones (Pérez, 2018), a lo cual, sobresale la Zona Metropolitana de Pachuca por los acelerados cambios de uso y coberturas de suelo.

La Zona Metropolitana de Pachuca ubicada en la región centro sur del estado de Hidalgo, está constituida por siete municipios (Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Zempoala, Zapotlán de Juárez, San Agustín Tlaxiaca, Mineral del Monte y Epazoyucan), los cuales han sufrido cambios a lo largo de su historia, aunque los más importantes se perciben desde principios del siglo XXI. En este sentido, durante la época de la colonia Pachuca se constituyó como un asentamiento minero que se mantuvo hasta mediados del siglo XX cuando pasó a ser una opción de inversión inmobiliaria por su cercanía con la CDMX (Granados, 2010). También, a partir del terremoto suscitado en la Ciudad de México en septiembre de 1985, el flujo migratorio hacia la Zona Metropolitana de Pachuca aumentó considerablemente e incrementó el suelo urbano (Guerrero y Enciso, 2021). Por su parte, desde el año 2000 aumentó de manera significativa la demanda habitacional, y con ello, el desarrollo de colonias urbanas y fraccionamientos de interés social (mayoritariamente vivienda en serie), especialmente en los municipios de Mineral de la Reforma, Pachuca y Zempoala (González, 2009; Lara *et al.*, 2017). En la última década del siglo XX y principios del siglo XXI, la Zona Metropolitana de Pachuca experimentó acelerado incremento y expansión de suelo urbano que fomentó una periurbanización de límites difusos, fragmentada, poco controlada y de difícil acceso para el suministro de servicios públicos, además, se ocuparon lugares susceptibles a la formación de avenidas torrenciales; lugares que eran dedicados a las

actividades primarias, o bien, áreas naturales, ríos y cuerpos de agua temporales o desecados (García-Benítez *et al.*, 2019; Franco y Contreras, 2021).

Aunado a lo señalado, se puede percibir que, de manera transversal al fenómeno, la mayoría de la población no puede acceder a casa propia debido al bajo nivel de ingresos que se registran en la Zona Metropolitana de Pachuca y el aumento en el precio del suelo y construcción derivado de la especulación inmobiliaria (González y Pizarro, 2022). Asimismo, la tendencia en la Zona Metropolitana de Pachuca va dirigida a continuar con la lotificación de tierras anteriormente agrícolas y de propiedad ejidal promoviendo la reducción de laderas y cerros en la zona conurbada, especialmente en Mineral de la Reforma (Ramírez y Solís, 2023), por lo mismo, impacta directamente en la dinámica hídrica de microcuencas como la de Pachuca de Soto San Pedro Nopancalco, Pachuquilla, Fraccionamiento la Reforma, el Huixmi, el Venado y Pachuca.

De las microcuencas señaladas destaca la microcuenca de Pachuca, donde los cambios de uso y cobertura de suelo pueden estar relacionadas con la alteración de la escorrentía superficial y, esto a su vez, con la formación de avenidas torrenciales en la zona de transporte de agua, así como inundaciones en la zona de depósito de agua. Si bien el relieve de la microcuenca de Pachuca es susceptible a la formación de avenidas torrenciales e inundaciones, no era común que se suscitaran este tipo de eventos, menos aún que se convirtieran en desastres, pues la inundación de 1949 era considerada uno de los desastres más importantes presentado en esta zona en el siglo XX (CENAPRED, 2019). No obstante, a partir del año 2015 el fenómeno es recurrente y peligroso, siendo los años de 2019, 2020, 2021 y 2023 en los que este fenómeno se ha presentado con mayor intensidad, y donde destacan las colonias que se encuentran la sección del municipio de Mineral de la Reforma (García, 2015; González, 2023a) dentro de la microcuenca de Pachuca (Torres, 2019; Hernández, 2020; Redacción, 2021; González, 2023a; Martínez, 2023).

Aunado a lo anterior, la información sobre avenidas torrenciales es escasa y la que se presenta incluye la dinámica poblacional, específicamente al río de las avenidas (Romero, 2012), pero no se asocia el uso y cobertura de suelo, además, en el atlas de riesgo se distingue información sobre estos eventos en 30 sitios distintos, pero no cubre la totalidad de la microcuenca de Pachuca (CENAPRED, 2022).

Con base en los argumentos planteados hasta el momento, surgen las siguientes interrogantes ¿cuál es la tasa de cambio de coberturas y usos de suelo en la microcuenca de Pachuca entre los años 2012 a 2020 y la distribución de cada categoría?, ¿dónde se han presentado las avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca durante los años 2012 a 2020?, ¿qué relación hay entre avenidas torrenciales y los usos y coberturas de suelo en la microcuenca de Pachuca?, y ¿cuáles son las zonas susceptibles en la microcuenca de Pachuca a este fenómeno hidrometeorológico? Por lo tanto, es importante analizar la influencia de los cambios de coberturas y usos de suelo en la formación de avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca para determinar zonas susceptibles a este fenómeno hidrometeorológico dentro de esta.

Justificación

El proceso de urbanización en la Zona Metropolitana de Pachuca, y en particular en la microcuenca de Pachuca, es un fenómeno que se ha documentado ampliamente, incluso se ha vinculado este proceso con el aumento del volumen de descarga de agua en el río de las Avenidas en los años 1985, 2000, 2007 y 2011, pero es necesario realizar un trabajo actualizado, así como extender el análisis al nivel de microcuenca, considerando no solo el aumento de la superficie impermeable por el aumento de las zonas habitacionales, sino también su distribución y la relación que guarda con la morfometría de esta unidad hidrográfica.

A partir de este trabajo se espera obtener cinco productos: 1) capas de usos y coberturas de suelo de la microcuenca de Pachuca de los años 2012 a 2020; 2) información sobre el comportamiento de la escorrentía superficial, donde se incluyen las variaciones del número de curva de la microcuenca y el coeficiente de escurrimiento; 3) mapas de las planicies aluviales de los eventos de avenidas torrenciales; 4) mapas de vulnerabilidad social, estructural y por tipo de viviendas; y 5) mapa de riesgo a la formación de avenidas torrenciales.

La información obtenida de la presente investigación puede ser de utilidad a las autoridades municipales y estatales para la toma de decisiones en materia de prevención de riesgos ante avenidas torrenciales, ya que, si bien existen mapas de riesgos hidrometeorológicos, estos no consideran las avenidas torrenciales y se centran en el riesgo por inundaciones; esta cartografía solo reconoce los cauces que atraviesan el municipio y el número de habitantes por colonia vulnerables, además de que dividen el territorio de la microcuenca de Pachuca entre municipios y estos últimos los divide en microcuencas, por lo tanto, es importante utilizar una microcuenca delimitada independientemente de los límites municipales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar la influencia de los cambios de usos y coberturas de suelo en la formación de avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca para generar información para la prevención de esta clase de desastres hidrometeorológicos.

Objetivos específicos

1. Estimar la tasa de cambio de usos y coberturas de suelo en la microcuenca de Pachuca entre los años 2012 a 2020, así como los mapas de distribución.

2. Analizar la relación entre usos y coberturas de suelo en la formación de avenidas torrenciales, para determinar zonas susceptibles en la microcuenca de Pachuca.
3. Modelar e identificar el impacto de las avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca durante el periodo de estudio.
4. Identificar las zonas vulnerables ante las avenidas torrenciales en función de la composición social y estructural de las manzanas que se ubican en la microcuenca de Pachuca.
5. Realizar un mapa de riesgo de avenidas torrenciales en función de la información colectada y generada.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Cambio de uso y coberturas de suelo y su implicación en las alteraciones de las escorrentías superficiales en cuencas hidrográficas

El agua es un elemento indispensable para el desarrollo de la vida sobre la Tierra y desde el principio de la historia su manejo ha sido de los intereses principales del hombre, es así que desde finales del siglo XIX se formaliza el estudio del agua en su aspecto cualitativo y para la tercera década del siglo XX se empieza a analizar las propiedades del agua a través de la colección de datos medibles para su análisis estadístico (Maderey y Jiménez, 2005), y es a partir de este interés, que la gestión integrada de cuencas hidrográficas como unidad básica para la planificación, manejo y gestión de los recursos naturales adquiere mayor relevancia día con día (Jiménez, 2005).

La cuenca hidrográfica es el territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, la cual se conforma por un sistema hídrico que conduce sus aguas a un río principal que generalmente tiene un punto de salida a un cuerpo de agua como un lago o a un mar (Faustino *et al.*, 2004) aunque también puede darse el caso de que la cuenca retenga el agua dentro de sus límites físicos (cuencas endorreicas)(Mayo y Tingey, 2021) o que el agua se evapore antes de formar cualquier tipo de red de drenaje (cuencas arreicas)(Dürr *et al.*, 2011), estas se pueden dividir por quebradas o pequeños ríos llamadas subcuencas y, a su vez, estas se pueden dividir en cuencas de menor tamaño llamadas microcuencas (Henao, 2006), así mismo, se reconocen tres zonas funcionales: la de captación o cuenca alta; la de almacenamiento de transición o cuenca media y la de descarga, de emisión o cuenca baja (Valdés-Carrera y Hernández-Guerrero, 2018).

La cuenca hidrográfica se forma de un mosaico complejo de ecosistemas, naturales y manejados, donde se reconocen los vínculos entre los territorios de las zonas altas

medias y bajas, cuyas externalidades, transportadas por los cursos de agua, conectan físicamente a las poblaciones alejadas unas de otras (Cotler *et al.*, 2010) por lo que es un sistema de captación y concentración de aguas superficiales en el que se forman complejas relaciones entre los componentes biofísicos y sus habitantes, donde los recursos hídricos resultan el factor determinante por lo que esta unidad es un sistema complejo en el que interactúan distintos subsistemas sociales, políticos, económicos, culturales, físicos y biológicos (García, 2006).

El complejo proceso de la toma de decisiones para la gestión adecuada de cuencas requiere de una aproximación holística en la que se involucren la mayor cantidad de actores involucrados y de disciplinas (Ahmed *et al.*, 2023), asimismo, reconocer que los procesos ecológicos no se rigen por los límites político/administrativos impuestos por el ser humano (Stewart, 2019). Es así como la gestión integrada de cuencas implica un proceso de coordinación, conservación, manejo y dinámica del agua, territorio y recursos relacionados a través de sectores que coexistan en una determinada cuenca hidrográfica con el fin de maximizar los beneficios económicos y sociales derivados de los recursos hídricos de manera equitativa (Lim *et al.*, 2022). Así, el manejo del agua con perspectiva de cuencas hidrográficas ha ganado gran importancia desde el año 2000 cuando fue integrado por la Unión Europea en la Estructura Directiva del agua (DFW, por sus siglas en inglés) y, subsecuentemente, fue exportado a países del Este de Europa, África y Asia Central (Ak y Benson, 2022).

El comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica se puede describir a partir de los parámetros morfométricos como el coeficiente de compacidad, el factor de forma, la pendiente del cauce, la pendiente media y la densidad de drenaje (Soomro *et al.*, 2022), así como la rugosidad y la escorrentía superficial, determinada por variables como el tipo de coberturas y usos de suelo y su capacidad de infiltración,

siendo este último factor determinante para riesgos como inundaciones y avenidas torrenciales (Morte *et al.*, 2019).

El cambio de usos y coberturas de suelo es reconocido como una variable importante de cambio global que afecta a los sistemas ecológicos con un importante impacto sobre los recursos naturales como el suelo y el agua, el sistema climático global y la biodiversidad (Sivrikaya *et al.*, 2009). Asimismo, los impactos negativos de las alteraciones en la superficie de la tierra provocadas por el ser humano se han documentado desde 1864 y, a partir de ahí, se les da el crédito a los cambios de coberturas y usos de suelo por ser la causa directa de los cambios ambientales globales más notorios de los últimos tres siglos (Rai, 2009), sin embargo, en los últimos años este proceso ha ganado mayor relevancia.

A pesar de la larga y complicada interacción entre los humanos y la Tierra a través de los cambios de coberturas (cualidades biofísicas de la superficie terrestre) y el uso de suelo (los propósitos humanos aplicados a estas cualidades), no se ha presentado otro momento en la historia del ser humano donde estas interacciones sean tan destructivas como en la época contemporánea (Erdoğan y Saliş, 2023). Previo a la época del libre mercado global, las actividades productivas y las intervenciones humanas en la superficie de la Tierra obedecían la lógica de aptitud territorial, buscando las condiciones naturales adecuadas para cada actividad, sin embargo, en la actualidad la tendencia va dirigida a transformar los territorios en favor de las necesidades del mercado, modificando las condiciones naturales para facilitar las actividades económicas que se demanden (Hill, 1989), así también el crecimiento de los centros urbanos es otro factor que provoca alteraciones importantes y aceleradas en los patrones espaciales de los usos y coberturas de suelo (Rindfuss *et al.*, 2007); el crecimiento de las ciudades se da a costa de las zonas rurales marginales y con tierras degradadas o poco productivas aledañas a zonas urbanas y/o industriales (Poyatos *et al.*, 2003).

El análisis de cambios de usos y coberturas de suelo pueden realizarse dividiendo la zona de estudio por zonas de planificación urbana, distritos y/o subzonas urbanas (Takatsu, 1989), asimismo, en zonas rurales se realizan a nivel de unidades administrativas como municipios, condados, localidades, y parcelas (Satoh, 1989), de ser el caso que se esté estudiando una zona periurbana esta se puede zonificar en cinco categorías distintas: zonas agrícolas, zonas de interés agrícola, zonas de interés urbano, zonas urbanas construidas, zonas de amortiguamiento de la urbanización (Doi, 1989). Existen otras aproximaciones al análisis del cambio de coberturas y usos de suelo, comúnmente por unidades ecosistémicas, sin embargo, el estudio por cuencas hidrográficas puede dar mejores resultados que expliquen mejor la tendencia y los impactos de este fenómeno a nivel regional (Zilio *et al.*, 2022).

Todos los patrones de uso de suelo deberían de ser resultado de la integración funcional y armoniosa de las infraestructuras residenciales, comerciales, industriales de transporte y comunitarias en función de las características topográficas (Devi, 1989), pero estos patrones de intervención no siempre siguen esta lógica y la falta de consideración sobre las características propias de las cuencas hidrográficas como las pendientes y los cauces han facilitado desastres naturales que resultan en pérdidas humanas (Gupta *et al.*, 2016). Por esta razón, en años recientes se acentuó la necesidad de contar con información suficiente y precisa en relación con los cambios de coberturas y usos de suelo para determinar y entender las repercusiones sociales, económicas y ambientales que pueden traer estos mismos (Hu *et al.*, 2023).

Los cambios de usos y coberturas tienen un impacto importante en la escorrentía superficial de las cuencas hidrográficas, esta se define como el agua de lluvia que no es absorbida por el suelo antes de alcanzar cuerpos de agua (Dharmayasa *et al.*, 2022) y, es por esto, que es un componente fundamental del ciclo hidrológico,

regulando la calidad y cantidad de agua superficial, lo que determina tanto los ecosistemas a distintas escalas como el desarrollo de las sociedades humanas (Cheng, 2012). Se puede entender a este fenómeno como un sistema influenciado por procesos geomorfológicos, químicos y ecológicos, es así que, los sistemas de escorrentías se explican como una respuesta intermitente a eventos de lluvia causada por un exceso de infiltración o un exceso de saturación de agua en los suelos (Schroers *et al.*, 2022).

Las dos variables que más afectan a la escorrentía superficial son las biofísicas como la precipitación, pendiente y tipo de coberturas vegetales y las actividades humanas, al mismo tiempo, los cambios en la escorrentía superficial pueden afectar la vida humana y las actividades productivas de las que depende resultando en desastres como inundaciones (Wang *et al.*, 2022a).

Respecto a lo anterior, las actividades económicas tienen un impacto directo en la escorrentía superficial, ya que actividades como la deforestación, el arado de la tierra para la agricultura, la construcción de asentamientos humanos y de complejos industriales, la minería y la construcción de caminos y otras vías de comunicación (Hnativ *et al.*, 2023). Es así como dentro de las cuencas hidrográficas se pueden identificar dos procesos, la escorrentía superficial agrícola y urbana (Jin *et al.*, 2023), donde una característica principal de estos tipos de escorrentía son grandes volúmenes de descarga de agua y a gran velocidad como resultado del aumento de las superficies impermeables, la compactación de los suelos y la infraestructura de drenaje (Weatherl *et al.*, 2021; Marin *et al.*, 2022). Asimismo, otra característica propia de estos dos tipos de escorrentía es el aumento de contaminantes por arrastre, siendo algunos como el amonio y los ortofosfatos (Chang *et al.*, 2022), lo que impacta directamente en la calidad de agua de los cuerpos que reciben esta descarga y la degradación de las tierras que puedan aprovechar esa agua para cultivos (Wang *et al.*, 2022b).

Dicho todo esto, la escorrentía superficial es un reflejo de la capacidad de infiltración de una cuenca por lo que las alteraciones en este proceso también incluyen disminución de la capacidad de recarga de aguas subterráneas, así como riesgos asociados a la formación de avenidas torrenciales e inundaciones, eventos que, desde finales del siglo XX, son cada vez más peligrosos y recurrentes, causantes de pérdidas económicas y humanas (Halecki *et al.*, 2022). Por estos motivos, el estudio de la escorrentía superficial puede ser considerado un factor fundamental para el establecimiento de políticas públicas y estrategias en torno a la conservación y manejo del agua superficial y subterránea (Devi *et al.*, 2022).

1.2. Cuencas urbanizadas y su papel en la formación de avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales, también conocidas como *torreteras*, *rieras*, *yasas* y/o *clamores* son fenómenos hidrometeorológicos donde los flujos de agua efímeros cuenca arriba forman una descarga acelerada y con mucha fuerza que puede arrastrar sedimentos y termina causando daños ecológicos, sociales y económicos importantes cuenca abajo (Kumar *et al.*, 2021).

La ocurrencia de este fenómeno está asociada a lluvias fuerte y de corto tiempo en cuencas pequeñas y montañosas, este fenómeno es considerado uno de los peores riesgos naturales e hidrometeorológicos en términos del número de fatalidades y pérdidas económicas que provocan (Arango *et al.*, 2020), así mismo se han convertido en uno de los riesgos hidrometeorológicos y naturales más comunes en la última década (Yuan *et al.*, 2021). Otros factores asociados a la formación de avenidas torrenciales son los suelos rocosos, pendientes pronunciadas y una alta escorrentía superficial (Burnett, 2008), la densidad de drenaje (Subraelu *et al.*, 2023), así a la urbanización, misma que aumenta la vulnerabilidad ante esta clase de riesgo hidrometeorológico (Martins *et al.*, 2018).

El proceso de urbanización provoca alteraciones importantes al funcionamiento de la cuenca hidrográfica, dando como resultado un aumento en la escorrentía superficial (Zhu *et al.*, 2021) debido a que este proceso cambia los usos y coberturas de suelo propios de las zonas donde se extiende la mancha urbana y lo convierte en superficie impermeables (Li *et al.*, 2022), por lo que son las ciudades los espacios más susceptibles a riesgos hidrometeorológico como avenidas torrenciales (Xie *et al.*, 2022). El crecimiento urbano en países en vías del desarrollo implica, comúnmente, un proceso acelerado y generalmente mal planificado que lleva al aumento de las superficies impermeables y en conjunto con eventos hidrometeorológicos atípicos provocan la formación de avenidas torrenciales, donde las zonas marginales de las ciudades tienden a ser las más vulnerables (Fonseca *et al.*, 2022). Por esta razón, ese fenómeno se ha convertido en uno de los desastres naturales más comunes con una tendencia que vaticina mayor incidencia en el futuro (Brase *et al.*, 2023).

En una época de notable aumento de las áreas urbanas, el análisis, la prevención y el manejo de las avenidas torrenciales se convierte en un tema prioritario ante el gran impacto social, económico y ecológico que representan, con el fin de brindar una introducción a este apartado es importante mencionar que en la actualidad cerca del 56 % de la población mundial vive en áreas urbanas, en el caso de México, la cifra sube hasta el 80 % de su población, la mayoría residiendo en la Ciudad de México y su zona conurbada, lo que ha detonado un importante crecimiento de las ciudades y zonas periurbanas (Narcizo *et al.*, 2023).

La identificación y atención de esta clase de eventos requiere de una perspectiva del riesgo y desastres en cuencas hidrográficas para la creación de estrategias adaptativas más allá de los límites político administrativos (Almoradie *et al.*, 2023).

1.3. Gestión del riesgo asociado con avenidas torrenciales y su importancia de poder mitigar y prevenir

El término “riesgo” tiene una larga historia que remonta a los años ochenta cuando fue introducido en el campo de desastres naturales, desde entonces ha ido tomando gran notoriedad (Sui, 2022). Cabe decir que el riesgo se puede considerar como una medida de la magnitud de los daños que se pueden presentar ante una situación de peligro, y éste se puede estimar asumiendo una vulnerabilidad determinada frente a distintos tipos de peligros, por lo tanto, el riesgo se entiende como la probabilidad de ocurrencia de daños (exposición) frente a un peligro determinado que puede causar perjuicios a un sistema afectable (vulnerabilidad) (Stamatelatos, 2000). Por su parte, cuando se escala de la probabilidad al hecho se denomina desastre, esto es, una interrupción severa del funcionamiento de una comunidad o sociedad a cualquier escala debido a eventos peligrosos interactuando con condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad de respuesta, derivando en impactos y/o pérdidas humanas, materiales, económicas y ecológicas (Ariyachandra y Wedawatta, 2023).

La evaluación de riesgos es un componente esencial para su manejo y prevención, en este contexto, la evaluación de riesgos hidrometeorológicos consiste en cuatro elementos esenciales: caracterización de las áreas de interés, evaluación de los peligros, evaluación de la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo (Tu *et al.*, 2023).

Entre los peligros con mayor recurrencia destacan los de origen hidrometeorológicos (inundaciones, sequías, ciclones tropicales, avenidas torrenciales, avenidas debridantes, entre otros), los cuales son fenómenos impredecibles y dinámicos, mientras que la respuesta humana a estos sucesos se ve influenciada por su proximidad al desastre y la habilidad de anticipar, resistir, afrontar y recuperarse de sus consecuencias (Hussain *et al.*, 2023). El análisis y evaluación de esta clase de

peligros es un tema crítico en la historia humana, no obstante, desde la década de 1950 se ha observado un incremento significativo en las pérdidas derivadas de desastres naturales (Hill *et al.*, 2013), esto se debe, en parte, a que los fenómenos climatológicos extremos se han vuelto cada vez más comunes (Zhang *et al.*, 2022).

Al respecto, instituciones como la Comisión de Comunidades Europeas (EC, por sus siglas en inglés) reconoce en el análisis de riesgos hidrometeorológicos a las avenidas torrenciales y las inundaciones como una directiva fundamental de la gestión integrada de cuencas hidrográficas (Evers, 2016), ya que los riesgos hidrometeorológicos representan cerca de un tercio de todos los tipos de desastres naturales y son los causantes de, al menos, el 31 % de las pérdidas económicas totales relacionadas a riesgos naturales (Mitra y Das, 2023), así como una de las causas principales de pérdida de infraestructura esencial de los sistemas humanos, lo que deriva en la pérdida de servicios básicos como el abastecimiento de la luz y energía eléctrica (Thacker *et al.*, 2018). Por otro lado, estos fenómenos también provocan impactos sociales importantes como muertes y daño físico a la población, además, tienen repercusiones indirectas sobre el funcionamiento normal de la vida pública resultado de la agitación social por desplazamientos forzosos, desempleo y aumento de la pobreza (Ugliotti *et al.*, 2023), pues las zonas más afectadas por riesgos hidrometeorológicos, especialmente por inundaciones, deslaves y avenidas torrenciales, suelen ser barrios marginales de zonas urbanas al no contar con un desarrollo urbano adecuado (Quesada-Román, 2022).

Al ser las avenidas torrenciales eventos hidrometeorológicos repentinos, de corta duración, es complicado predecir su ocurrencia y, al mismo tiempo, realizar acciones de evacuación se vuelven complicado y riesgoso para la seguridad de los afectados y rescatistas, por lo que la mejor forma de afrontar este riesgo es a través de la prevención (Starzec *et al.*, 2023), es así como los análisis a posteriori son efectivos y necesarios para identificar los factores que facilitan la formación de avenidas

torrenciales (Wang *et al.*, 2023) y, por lo mismo, el desarrollo de nuevas técnicas para la identificación de zonas susceptibles a la formación de avenidas torrenciales se ha vuelto un tema prioritario en países donde la urbanización se lleva a cabo de forma acelerada y poco planificada (Bin *et al.*, 2023). Lo anterior también influye en la necesidad de obtener información que permita el desarrollo de estrategias e infraestructura que permita la prevención de este fenómeno hidrometeorológico y sus repercusiones económicas, sociales y ecológicas (Yaseen *et al.*, 2023).

1.4. Gestión integral del riesgo de desastres

Varias instituciones alrededor del mundo reconocen que la evaluación y el manejo de riesgos como avenidas torrenciales debe de abordarse desde una perspectiva de gestión integrada de cuencas hidrográficas (Evers, 2016), ya que reconoce que esta perspectiva está bien adecuada para generar respuestas adaptativas a esta clase de riesgos a través de medidas correctivas y preventivas, así como, estrategias de manejos de desastres a través de procesos de participación entre gobiernos (Albrecht, 2023).

Desde la década de 1990 se ha observado un cambio significativo en la interpretación de los fenómenos de desastres expresado en tres grandes dimensiones, en lo jurídico, académico y en lo político, es así como se han formado dos grandes corrientes para la atención de desastres naturales, una que los entiende como eventos geofísicos e hidrometeorológicos, y la que los entiende como producto de una interacción humano-naturaleza (Kriger, 2023), esta última corriente toma en cuenta procesos como la urbanización y la subsecuente pérdida de ecosistemas, así como factores que aumentan la probabilidad de formación de

riesgos naturales como inundaciones, remociones en masa y avenidas torrenciales, entre otros (Duque y Quintero, 2013).

Ante esta premisa surge la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (GIRD), este concepto se refiere a un proceso general de diagnóstico del riesgo junto con sus componentes, así como al tratamiento de dicho riesgo (Oficina Federal de Protección Civil, 2014), esta es una práctica distinta a la forma tradicional de afrontar los riesgos de desastres y su impacto en la sociedad, siendo la diferencia principal que el objetivo de la GIRD se enfoca en el conocimiento de los riesgos y las causas de fondo que la generan (CENAPRED, 2020), en el marco de la GIRD, el análisis de amenazas y evaluación de riesgos se estructura de acuerdo al modelo que se presenta en la figura 1, que ilustra las tres fases del modelo y las siete etapas para el manejo adecuado de los riesgos.

La GIRD resulta en un abordaje teórico-práctico que se ha ido consolidando gracias a la sistematización y reflexión sobre diversas experiencias empezando en áreas rurales y aisladas vulnerables a desastres naturales y que, progresivamente, se fue focalizando en centros urbanos y sus barrios informales, vulnerables a riesgos naturales agravados por la actividad humana (Gatti *et al.*, 2017).

Para realizar un ejercicio adecuado, la GIRD requiere de una coordinación transversal entre los distintos actores sociales e institucionales, estableciendo una cogestión entre el gobierno y la sociedad donde se priorice la salvaguarda de la vida humana, así mismo, requiere de una fundamentación dirigida a la reducción de vulnerabilidades como eje estratégico para la elaboración de diagnósticos, leyes y programas (Alcántara-Ayala *et al.*, 2019).



Figura 1. Modelo de la Gestión Integral del Riesgo.

Fuente: Oficina Federal de Protección civil (2014).

1.5. Las avenidas torrenciales como un tema emergente en la actualidad

Con lo mencionado hasta el momento, se puede decir que los cambios económicos y tecnológicos han desencadenado procesos altamente impactantes para la Tierra, procesos globales y locales como los cambios de usos y coberturas de suelo aumentan considerablemente la intensidad y ocurrencia de fenómenos naturales, lo que pone en riesgo la vida y economía de quienes habitan zonas vulnerables a estos fenómenos, especialmente habitantes de espacios urbanos, eso sin contar el importante impacto ecológico que conlleva.

Las avenidas torrenciales deben de atenderse desde la gestión integrada de cuencas, pues no sólo son los factores biofísicos como la pendiente, precipitación, las coberturas vegetales y la densidad de drenaje los que propician este fenómeno, también son factores sociales, políticos y económicos los que agravan o disminuyen el riesgo, por ejemplo, la falta de una lógica adecuada en el ordenamiento territorial provocará alteraciones importantes en la función de la cuenca, especialmente en la escorrentía superficial, por lo tanto, este tipo de problemas deben verse como fenómenos que atraviesan todas las dimensiones de la cuenca hidrográfica y es necesario entenderlos desde una perspectiva holística.

Un primer paso en el manejo de las avenidas torrenciales es la caracterización a posteriori de la magnitud de los eventos con el fin de obtener información útil para identificar otras zonas susceptibles, y es crucial para el desarrollo de estrategias de prevención, ya que por su naturaleza espontánea e intempestiva, es prácticamente imposible realizar acciones de mitigación durante el desastre sin poner en riesgo también a los cuerpos de atención como rescatistas y paramédicos.

2. ESTADO DEL ARTE

A partir de los argumentos expuestos en el capítulo anterior, es importante decir que una parte clave de la GIRD es el análisis de las características que desatan el desastre, por ende, la atención y prevención de las avenidas torrenciales debe de estar sustentado en una evaluación integral de los procesos que subyacen la formación de esta clase de desastres, considerando no solo eventos climatológicos como ciclones tropicales y tormentas atípicas, sino también por procesos antrópicos como la mala regulación ineficiente de los escurrimientos, la deforestación y el crecimiento exacerbado de las manchas urbanas (Krvavica *et al.*, 2023). Asimismo, la reconstrucción de eventos de desastre provocados por avenidas torrenciales permite obtener información base con soporte científico para la toma de decisiones al momento de elaborar estrategias de atención y prevención (Li *et al.*, 2021).

2.1. Atención y prevención de avenidas torrenciales en un contexto global

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo las avenidas torrenciales han ganado notoriedad debido a su alta incidencia y su gran impacto, es por eso que la Unión Europea, a través de la Directiva de Inundaciones publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea en octubre del 2007, reconoce la importancia de los desastres relacionados a inundaciones, incluyendo avenidas torrenciales, e incita a los miembros de la Comunidad Europea a la elaboración de planes hidrológicos de cuenca para la prevención y gestión de estos asegurando que esta acción es un componente fundamental de la gestión integrada de cuencas.

Por otro lado, Organización Meteorológica Mundial, iniciada en el Congreso Internacional de Meteorología de Viena de 1873 y consolidada por ratificación en el congreso del 23 de marzo de 1950 (WMO, 2022), puso en marcha el sistema de

guía para avenidas torrenciales con cobertura global (FFGS, por sus siglas en inglés) desde el año 2007 basado en un sistema de advertencia temprana con el fin de solventar algunas de las carencias en las capacidades de cada país de atender y prevenir esta problemática (WMO, 2021). En la actualidad, este sistema está implementado en más de 60 países en colaboración con la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA, por sus siglas en inglés), Servicio Nacional Climático (NWS) y el Centro de Investigación Hidrológico (HRC) del Gobierno de los Estados Unidos y a partir de este proyecto se han desprendido los siguientes proyectos regionales (WMO, 2022): 1) Guía de Avenidas Torrenciales de Centro América (CAFFG) (En operación); 2) Guía de Avenidas Torrenciales de la Región sur de África (SARGFFG) (En operación); 3) Guía de Avenidas Torrenciales de la Comisión del Río Mekong (MRCFFG) (En operación); 4) Guía de Avenidas Torrenciales del Sur Este de Europa (SEEFFG) (Bajo implementación); 5) Guía de Avenidas Torrenciales del Sur de Asia (SAsiaFFG) (Bajo implementación); 6) Guía de Avenidas Torrenciales de la Región Central de Asia (CARFFG) (Bajo implementación); 7) Piloto de la Guía de Avenidas Torrenciales de Sudamérica (Bajo implementación); 8) Guía de Avenidas Torrenciales de Haití y República Dominicana (HDRFFG) (Sujeto a mejoras); 9) Guía de Avenidas Torrenciales del Sureste de Asia y Oceanía (SAOFFG); 10) Guía de Avenidas Torrenciales de Myanmar (Bajo implementación); 11) Guía de Avenidas Torrenciales de Fiji (FijiFFGS); 12) Guía de Avenidas Torrenciales de África Occidental (WAFFGS).

El funcionamiento a detalle del FFGS se describe a continuación, presentando su diseño de estructura para la cobertura global, como se muestra en la figura 2, y su diseño centrado en el predictor, como se muestra en la figura 3.

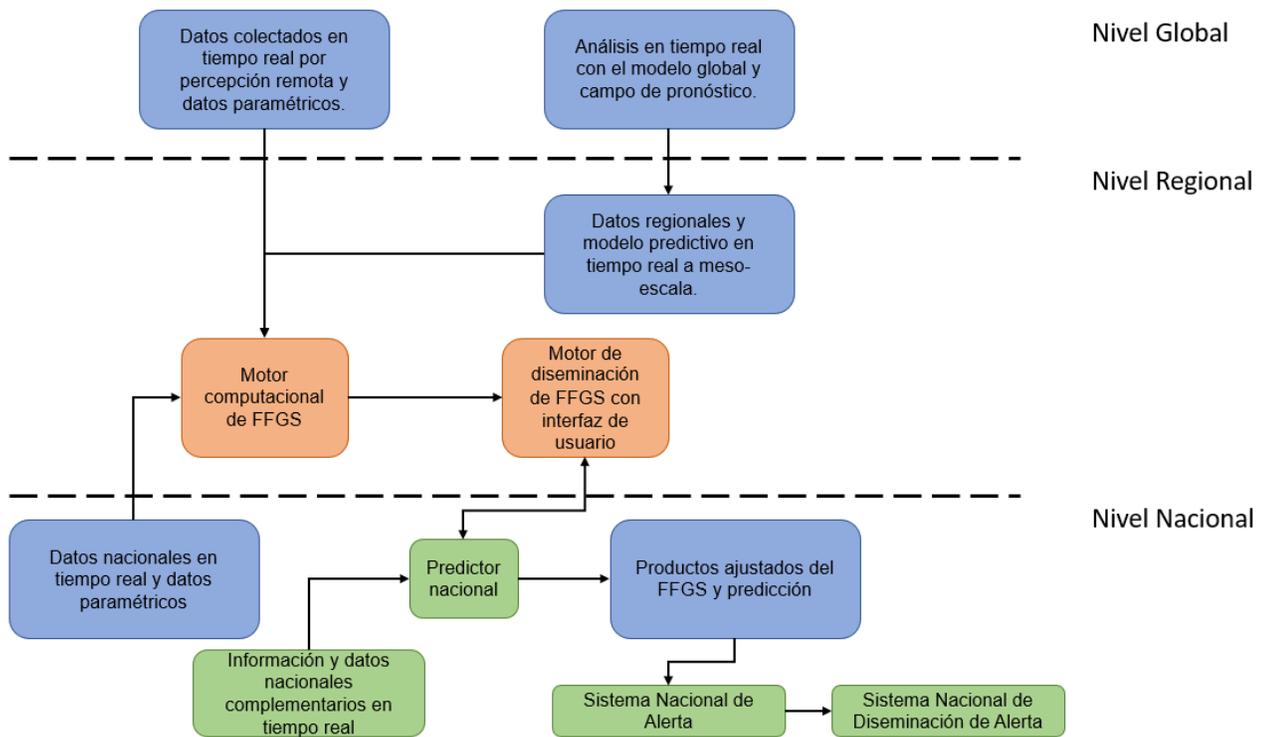


Figura 2. Diseño de la estructura global, regional y nacional del FFSG con cobertura global, donde los recuadros azules representan los insumos, los recuadros naranjas representan los motores del sistema y los recuadros verdes incluyen los datos e infraestructura de la nación de interés.

Fuente: Georgakakos *et al.* (2022).

El sistema del FFSG está diseñado para dar predicciones en tiempo real de las zonas donde se pudiera presentar una avenida torrencial, está diseñado para un funcionamiento bilateral entre el sistema y el operador, en este caso el predictor que se ubica en el país de interés y que alimenta el sistema con datos locales de utilidad para aumentar la fiabilidad de las predicciones, las cuales utilizan índices de riesgo de avenidas torrenciales para identificar las microcuencas que tengan la mayor probabilidad de producir este fenómeno.

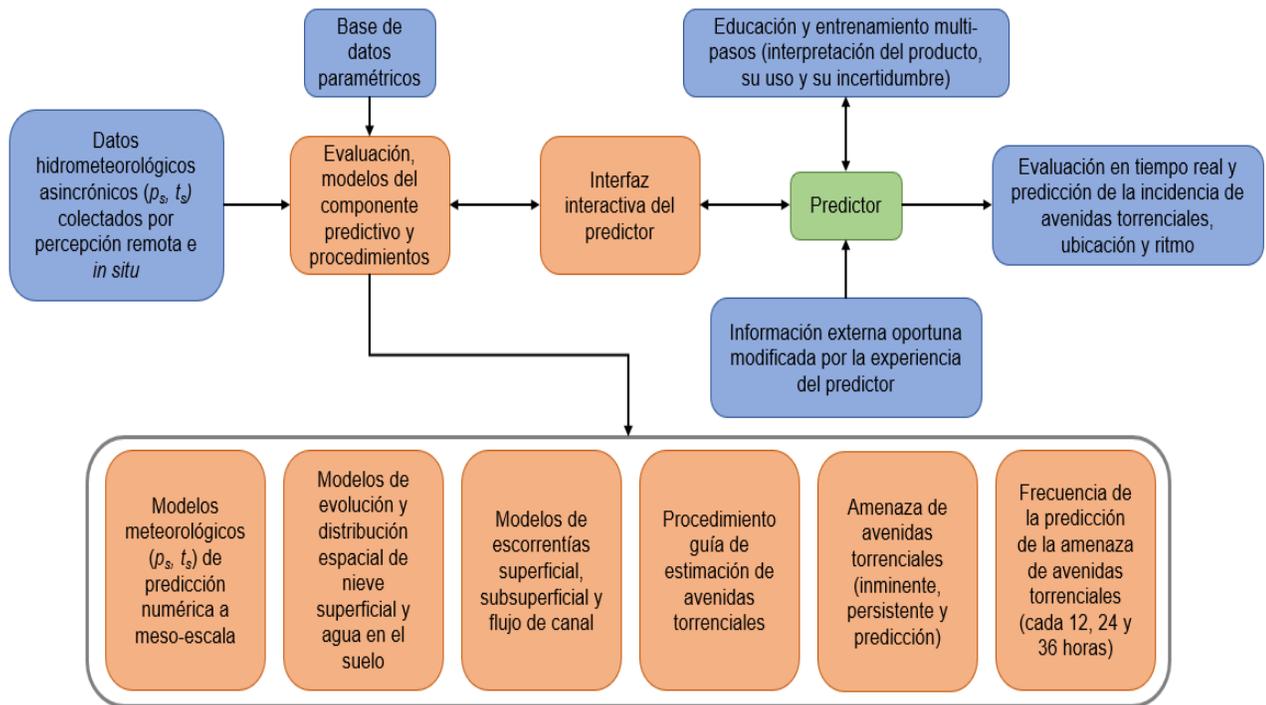


Figura 3. Diseño de la estructura del Sistema de Guía de Avenidas Torrenciales con cobertura global centrado en el predictor.

Fuente: Georgakakos *et al.* (2022).

El predictor en cuestión puede acceder a información hidrometeorológica y de saturación de suelos en tiempo real colectada por percepción remota por microcuencas, al mismo tiempo, la interfaz le permite al operador descargar la información que requiera para realizar análisis de forma independiente.

Se ha probado la eficiencia de los sistemas SAOFFGS, SARFFG y SEEFFG, así como la calidad de los productos generados por el BSMEFFGS (productos de alarma, precipitación y nieve) para Indonesia, Malawi, Rumanía y Bulgaria respectivamente dando buenos resultados en ambos casos, teniendo algunas sugerencias para el uso adecuado y el mejoramiento de este sistema (Yordanova *et al.*, 2022; Putra *et al.*, 2021; Jubach y Sezin, 2016; Matreata, 2013).

Se han propuestos otros métodos de prevención a través de la identificación de zonas susceptibles a avenidas torrenciales en países donde el FFGS no está en operación. Al respecto, en Corea del Sur se propuso un sistema de guía a través de una interfaz de programación de aplicaciones que pudiera generar rutas de evacuación que estén disponibles para los habitantes de zonas vulnerables a avenidas torrenciales y otros desastres asociados a inundaciones (Jeon *et al.*, 2023). Por su parte, en España se ha propuesto utilizar predicciones numéricas climatológicas basadas en el Índice Europeo de Precipitación basado en Climatología simulada (EPIC, por sus siglas en inglés) en conjunto con un sistema probabilístico de guía para avenidas torrenciales (PFFGS, por sus siglas en inglés) (Alfieri *et al.*, 2011). En Brasil se utilizan los sistemas de drenaje sustentable para disminuir el impacto de las avenidas torrenciales en cuencas urbanas, este comprende un conjunto de metodologías distintas que pretenden disminuir las alteraciones en las escorrentías superficiales, por lo que se recomienda realizar estudios antecedentes y un seguimiento del desempeño de las técnicas empleadas para asegurar el mejor desempeño posible (Fonseca *et al.*, 2022).

Quizá uno de los sistemas de guía ante avenidas torrenciales independientes del FFGS más desarrollados es el sistema de predicción de avenidas torrenciales de China, implementado a finales de los años 90 por el Departamento de Administración Climatológica y el Ministerio de Recursos Hídricos de la República Popular de China. Sin embargo, ante las limitaciones que éste presenta, se han propuesto nuevas aproximaciones para mejorar su desempeño, incluyendo la incorporación de índices como el FFPI (Índice de Potencial de Avenidas Torrenciales, por sus siglas en inglés) y, a partir de ahí, incluir progresivamente los índices de peligro de avenidas torrenciales y de riesgo avenidas torrenciales (FFHI y FFRI por sus siglas en inglés, respectivamente) (Zeng *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2016). Esta propuesta no es de extrañar dado que el FFPI es hoy día una de las herramientas más confiables y precisas para determinar las zonas susceptibles para

la formación de avenidas torrenciales, este modelo se basa en información específica de los sitios de interés, incluyendo la pendiente, usos y coberturas de suelo y tipo de suelo (Lazarević *et al.*, 2023).

Finalmente, es importante señalar que el caso particular de las cuencas hidrográficas urbanas requiere una atención distinta contrario a otro tipo de cuencas considerando dos factores, el escurrimiento en esta clase de cuencas puede ser hasta doce veces más alto que en cuencas naturales y por la alta concentración de población e infraestructura que albergan los impactos sociales y económicos son considerablemente mayores (Yan *et al.*, 2023). Se hicieron distintas modelaciones de patrones de lluvia para evaluar la formación de avenidas torrenciales y anegaciones en la cuenca urbana de Meixi a través del uso combinado de los modelos FLO-2D y BTOPMC para identificar las condiciones climatológicas que puedan detonar esta clase de fenómenos (Jiang y Yu, 2022) y en Wielkopolska. Polonia, se propuso una aproximación distinta al análisis espacial, ya que se identificaron las zonas de mayor riesgo ante avenidas torrenciales a partir del análisis de las intervenciones del servicio estatal de bomberos entre los años 2010 y 2021 (Pińskwar *et al.*, 2023).

2.2. Atención y prevención de avenidas torrenciales en México

En un país donde la tendencia indica que el proceso de urbanización va en aumento, las cuencas urbanas serán más comunes y éstas requerirán ser entendidas también desde el manejo integral de cuencas y con tres objetivos principales: la salud pública y saneamiento urbano, la protección del medio ambiente y la protección ante riesgos asociados a inundaciones (Cevallos-Flores y Gutiérrez-López, 2017). Esto implica, entre otras cosas, la necesidad de analizar el fenómeno del crecimiento urbano en

el contexto de la dinámica de las propias cuencas hidrográficas en las cuales se asientan estos procesos (Domínguez y Salas, 2017).

Respecto al manejo de las avenidas torrenciales, México no se encuentra operando con el FFGS, ni con ninguno de sus proyectos regionales derivados, sin embargo, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) cuenta con un sistema de Monitoreo y Aviso de Fenómenos Naturales que considera tres variables importantes para la formación de avenidas torrenciales, el nivel de las presas, precipitación acumulada y ciclones tropicales, así mismo, cuenta con atlas Municipales y Estatales de riesgo con indicadores de peligro, exposición y vulnerabilidad, es importante señalar que estos indicadores agrupan a las inundaciones junto con las avenidas torrenciales (CENAPRED, 2023). Otra cosa importante de resaltar de los atlas de riesgos municipales es que dividen los territorios en microcuencas y, aunque no profundiza en la función de la cuenca hidrográfica y su importancia para la formación, análisis y manejo de desastres naturales, sí reconoce su utilidad como unidad territorial.

Independientemente del servicio que provee el CENAPRED, probablemente el sistema de prevención de avenidas torrenciales más desarrollado que se encuentra en funcionamiento en México es la red de información de emergencia del agua (EWIN, por sus siglas en inglés), la cual se utiliza para alertar a la población de las Zonas Metropolitanas de Colima y Villa de Álvarez y consta de una plataforma de ocho estaciones de monitoreo hidrológicas, ocho estaciones meteorológicas, estaciones nómadas móviles de monitoreo y drones de rastreo (Ibarreche, 2020).

Se ha propuesto realizar regionalizaciones de zonas de riesgo ante avenidas torrenciales en la cuenca urbana de Cuauhtémoc, ubicada en la Ciudad de México, a través de la caracterización de una avenida torrencial suscitada en la cuenca urbana

de Tlalnepantla en septiembre del 2021 mediante el uso de programas como HEC-RAS, HEC-HMS e Iber (Arganis *et al.*, 2023). Por otro lado, se realizó un trabajo parecido con la evaluación a posteriori de una avenida torrencial suscitada en Peribán de Ramos, Michoacán, el 23 de septiembre del 2018 utilizando el software FLO-2D para recrear el evento en 2 dimensiones y haciendo simulaciones para tratar de predecir el riesgo de que se desate un nuevo evento, así como la magnitud que éstos puedan tener y las zonas que se verán afectadas (Vázquez *et al.*, 2023).

También se propuso una regionalización para identificar las zonas con mayor probabilidad de recuperarse de un desastre de este tipo a través de la resiliencia turística en la localidad de Matehuala, San Luís Potosí, utilizando un método de tipificación probabilística (Vázquez, 2023). A partir de lo mencionado, es claro que las estrategias para la prevención de avenidas torrenciales es un tema poco explorado en México, así también desde la perspectiva de cuencas hidrográficas, al menos dos de los tres artículos que se encontraron en esta revisión ignoran por completo su importancia para entender y manejar esta clase de desastres.

2.3. Marco de referencia general de la atención y prevención de avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca

Respecto a la Zona Metropolitana de Pachuca, sólo se cuenta con los atlas de riesgo del Estado de Hidalgo, y de los municipios de Mineral de la Reforma, Pachuca de Soto y San Agustín Tlaxiaca (CENAPRED, 2014, 2018, 2022), sin embargo, como se mencionó con anterioridad, estos tres instrumentos agrupan las avenidas torrenciales con las inundaciones, así mismo, sólo identifican los cauces que se pudieran desbordar, a la vez que zonifica las colonias con riesgo de inundación en función a la cercanía de estos cauces, además, los tres atlas de riesgo municipal reconocen la necesidad de elaborar estudios hidrológicos más detallados para

identificar las zonas de riesgo a desastres relacionados a inundaciones y el establecimiento de sistemas de aviso temprano.

En la revisión bibliográfica sólo se pudo encontrar un trabajo que analizaba la relación entre las variaciones en el nivel del río de las avenidas (ubicada en la subcuenca del río de las avenidas) con el crecimiento de la población de la Ciudad de Pachuca de Soto, en el cual se expresa el cambio de coberturas y usos de suelo en la Zona Metropolitana de Pachuca, previendo que, de seguir la tendencia de crecimiento urbano descrita, continuará el incremento significativo de la vulnerabilidad a riesgos asociados con inundaciones y avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca (Romero, 2012).

2.4. Importancia del estudio de las avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca

No es de extrañar la respuesta que se ha suscitado en todo el mundo ante el importante riesgo que representan las avenidas torrenciales, pues cada metodología para la prevención de desastres ya sea a través de sistemas de aviso temprano o identificación a priori de zonas susceptibles a la formación de este fenómeno hidrometeorológico, resulta de gran utilidad para al menos disminuir el número de daños o muertes.

No hay que dejar de lado que la prevención y manejo de las avenidas torrenciales requiere de una gestión integrada de cuencas, ya que las alteraciones en el flujo de agua principal son reflejo del estado de conservación de la cuenca hidrográfica y de sus funciones, recordando que esta es un sistema complejo que depende de los distintos subsistemas que la componen, así como de la forma en la que estos últimos se relacionan entre sí, por lo tanto, la mejor forma de disminuir el impacto de las avenidas torrenciales es a través de la mitigación de los procesos de cambio que

inciden en la formación de estos desastres como, por ejemplo, la recuperación de zonas degradadas o estableciendo un ordenamiento ecológico territorial que reconozca a la cuenca, sus características morfométricas y sus zonas funcionales.

En el caso de México, es claro que se habla muy poco del tema a pesar de ya haber experimentado los estragos de las avenidas torrenciales en distintas partes de la República Mexicana y, a pesar de que se cuenta con un sistema de aviso de distintas variables que influyen en la formación de avenidas, por lo mismo, es necesario establecer un sistema de guía que sirva para la prevención y manejo de esta clase de desastres y, después de observar las distintas aproximaciones que se utilizan sobre el fenómeno en distintos países, sean los casos de la FFGS o el sistema de predicción implementado por la República Popular de China, se pueden hacer propuestas que requieren de poca infraestructura y una inversión económica accesible. Esta necesidad, que de por sí puede llegar a ser urgente en zonas altamente vulnerables por los cambios de coberturas y usos de suelo como la Ciudad de México, se volverá ineludible, ya que la incidencia de las avenidas torrenciales no sólo se va a mantener, puede llegar a aumentar.

El caso de la Zona Metropolitana de Pachuca y las microcuencas que lo conforman es más preocupante, dado que las herramientas de prevención con las que se cuenta tienen un alcance parcial del territorio y en el caso particular de las avenidas torrenciales la evaluación del riesgo que representan es limitado y esto es algo que los mismos instrumentos reconocen al incentivar a, entre otras acciones, la realización de estudios hidrológicos correspondientes para mejorar las posibilidades de prevención de desastres asociados a inundaciones como las avenidas torrenciales.

Es por todo lo antes dicho que la presente investigación resulta pertinente y relevante y se espera que pueda ser de utilidad para dar el primer paso a la creación de instrumentos preventivos específicos para avenidas torrenciales con el fin de abonar al bienestar de las y los habitantes de la Zona Metropolitana de Pachuca.

3. ZONA DE ESTUDIO

La microcuenca de Pachuca pertenece a la subcuenca del Río Tezontepec (RH26Dt) en la cuenca del Río Moctezuma (RH26D) en la región hidrológica número 26 “Río Pánuco” (RH26) (SIATLv4, 2018) y se localiza en el estado de Hidalgo, México, abarcando un área total de 33.58 km² entre los municipios de Mineral de la Reforma (80.51 %), Pachuca de Soto (14.28 %), Mineral del Monte (4.78 %) y Epazoyucan (0.43 %) y albergando un total de 35 localidades del municipio de Mineral de la Reforma, parte de una localidad del municipio de Pachuca de Soto y una pequeña porción de una localidad del municipio de Mineral del Monte (INEGI, 2019a) como se observa en la figura 4.

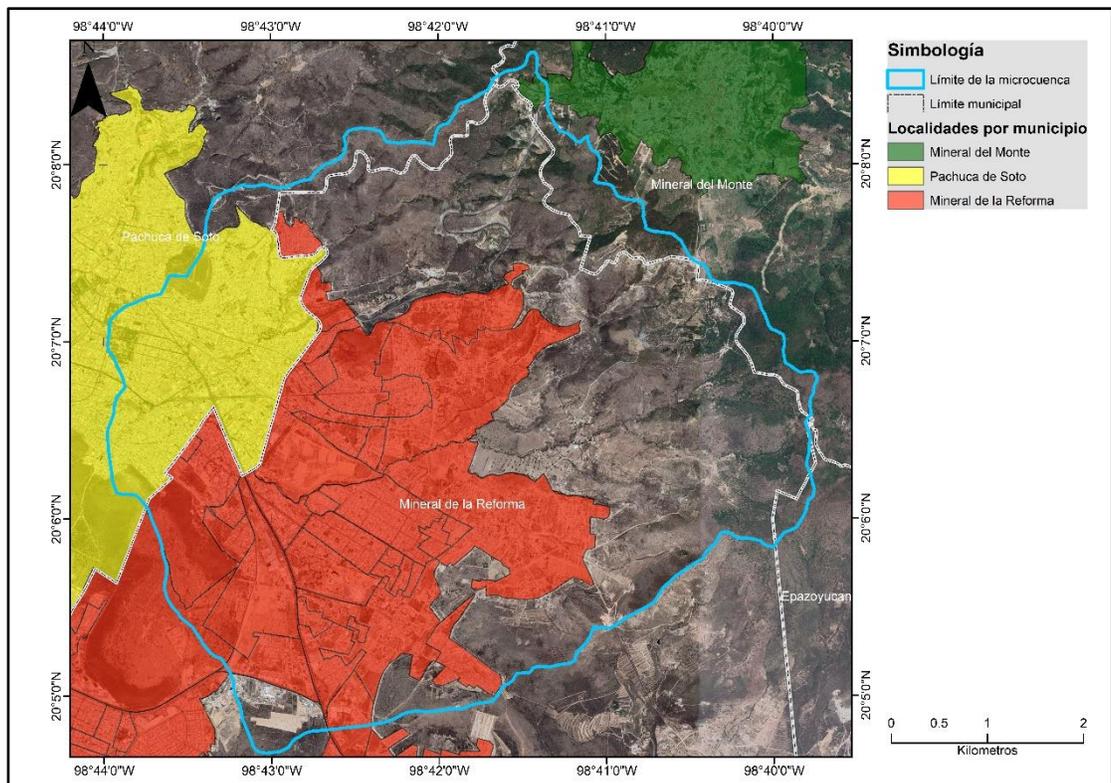


Figura 4. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente: INEGI (2019b), FIRCO (2002).

3.1. Características socio-económicas de la zona de estudio

En el municipio de Mineral de la Reforma radican un total de 202,749 personas, de las cuales 106,490 son mujeres (52.5 %) y 96,259 son hombres (47.5 %), de esta población el 60.6 % es económicamente activa, siendo las siguientes actividades productivas aquellas con el mayor porcentaje de fuerza laboral: empleados de ventas, despachadores y dependientes en comercios (7.66 %), comerciantes en establecimientos (6.48 %) y trabajadores de apoyo en actividades agrícolas (5.88%). Respecto al municipio de Pachuca de Soto, cuenta con 314,331 personas, de las cuales 164,772 son mujeres (52.4 %) y 149,559 son hombres (47.6 %), y comparte los mismos porcentajes de fuerza laboral en las principales actividades económicas (Secretaría de Economía, 2021).

En cuanto a los usos y coberturas de suelo se tienen identificadas 11 unidades distintas como se muestra en la figura 5: asentamientos humanos (AH, 38.61 %), bosque de encino (BQ, 6.81 %), matorral crasicaule (MC, 4.78 %), matorral desértico rosetófilo (MDR, 8.21 %), pastizal inducido (PI, 10.54 %), agricultura de temporal anual (TA, 1.86 %), agricultura de temporal anual y permanente (TAP, 12.14 %), agricultura de temporal semipermanente y permanente (TSP, 0.06 %), vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate (VSa/BJ, 5.95%), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (VSa/BQ, 10.13 %) y vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule (VSa/MC, 0.93 %).

Se obtuvo información de este mismo rubro de ocho años antes donde los porcentajes de la superficie de la microcuenca se distribuían entre las siguientes unidades (INEGI, 2010): asentamientos humanos (33.74 %), agricultura de temporal semipermanente (0.06 %), agricultura de temporal permanente (1.78 %), agricultura de temporal anual (19.71 %), bosque de encino (3.21 %), vegetación secundaria

arbustiva de bosque de encino (11.73 %), vegetación secundaria arbustiva de táscate (5.16 %), matorral crasicaule (0.33 %), matorral desértico rosetófilo (4.92 %) y pastizal inducido (19.35 %).

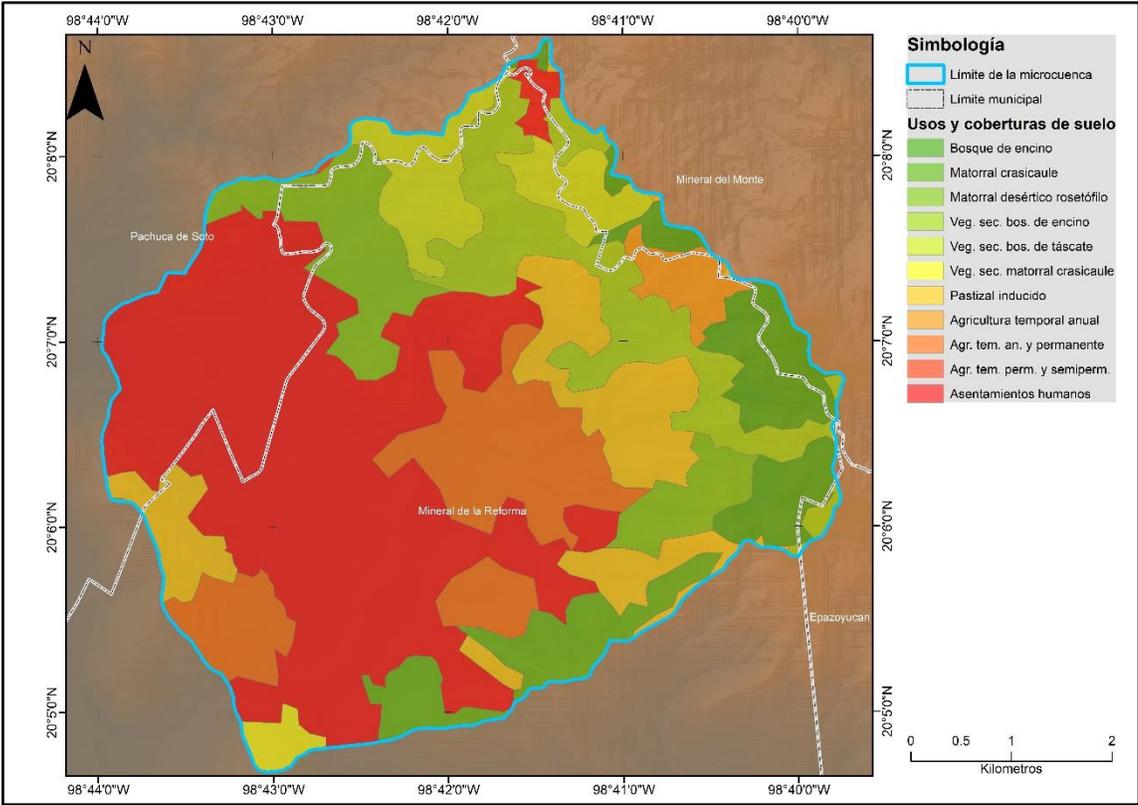


Figura 5. Usos y coberturas de suelo en la zona de estudio.

Fuente: INEGI (2018), FIRCO (2002).

Los porcentajes anteriores indican una disminución de pastizales inducidos, vegetación secundaria arbustiva de encino y en las actividades agrícolas en general, así como aumento en la superficie destinada a los asentamientos humanos, resalta el hecho de que también aumentaron las coberturas correspondientes a los matorrales, bosque de encino y vegetación secundaria arbustiva de táscate. Por otra parte, el Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos serie I del INEGI de 1983 señala

que la superficie zona urbana representaba apenas el 11.22 % de la superficie total de la microcuenca, lo que indica que en 35 años triplicó su tamaño.

3.2. Características biofísicas de la zona de estudio

Respecto a las características biofísicas, la microcuenca se ubica entre los 2,435 y los 3,086 msnm con una pendiente media de 12.04° y alberga dos cuerpos de agua, uno perenne y otro intermitente (INEGI, 2019b). Se identifican cuatro unidades climáticas de la clasificación climática de Köppen modificada por García (INEGI, 2008): semiárido templado con lluvias en verano (BS_{1kw} , 68.76 %), templado subhúmedo seco ($C(w_0)(w)$, 27.60 %), Templado subhúmedo más húmedo ($C(w_2)(w)$, 0.00067 %), semifrío subhúmedo más húmedo ($C(E)(w_2)$, 3.64 %).

Por otra parte, respecto al aspecto edafológico de la microcuenca, se identificaron ocho unidades distintas (INEGI, 2007): luvisol crómico con cambisol éutrico y leptosol lítico ($LV_{cr}+CM_{eu}+LP_{li}/3$, 0.66 %), regosol éutrico con andosol léptico y leptosol húmico/lítico ($RG_{eu}+AN_{lep}+LP_{huli}/2$, 24.27 %), phaeozem epipetrodúrico ($PH_{pdp}/2$, 3.86 %), regosol éutrico con leptosol lítico ($RG_{eu}+LP_{li}/2$, 25.62 %), phaeozem epipetrodúrico con leptosol éutrico/lítico y regosol éutrico ($PH_{pdp}+LP_{euli}+RG_{eu}/2$, 24.85 %), leptosol éutrico/lítico con regosol éutrico ($LP_{euli}+RG_{eu}/2$, 8.86 %), phaeozem léptico ($PH_{lep}/2$, 0.87 %), y ,finalmente, la zona urbana (ZU, 10.97 %), es importante mencionar que este último dato ya no es representativo dado que el proceso de urbanización aumentó significativamente la mancha urbana para fecha de la presente investigación.

La información geológica obtenida indica la presencia de seis unidades distintas (INEGI, 1983): andesita-brecha volcánica intermedia ($Ts(A-Bvi)$, 20.44 %), toba ácida ($Ts(Ta)$, 45.73 %), toba ácida-brecha volcánica ácida ($Ts(Ta-Bva)$, 3.4 %), aluvial ($Q(al)$, 16.14 %), riolita-toba ácida ($Ts(R-Ta)$, 1.97%), apilamientos de material molido resultado de la minería o jales (1.06 %), el resto del territorio (S/lt 11.22 %) no cuenta con información temática.

3.3. Características morfométricas de la zona de estudio

A partir de los parámetros que se presentan en la tabla 1 y tomando a consideración la información presenta Juárez (2016) y Valdés (2020) es posible inferir que, en función del coeficiente de compacidad de Gravelius, la cuenca tiene una forma de clase I “Casi redonda a oval-redonda”; De acuerdo con la relación de elongación ésta tiene un relieve fuerte y pronunciado y es moderadamente achatada considerando el factor de forma, así mismo se observa, a través del índice de alargamiento, que la microcuenca es poco alargada asemejando la forma de un cuadro. Presenta un patrón de drenaje dendrítico como se muestra en la figura 6, con una densidad media de drenaje y de corriente, y dado que tiene un cauce de 5° orden, indica la presencia de controles estructurales del relieve y mayor posibilidad de erosión.

Con base en la forma de la curva hipsométrica que se muestra en la figura 7 se considera una microcuenca madura, y tomando en consideración la pendiente media (21.07%), se puede decir que es una microcuenca fuertemente accidentada. Por su parte, esta microcuenca es sedimentaria, y el valor obtenido para el tiempo de concentración es de 7.83 minutos, lo que corresponde al tiempo que tarda en recorrer el agua captada en la parte más alta de la cuenca hasta el exutorio. Los valores morfométricos estimados para la microcuenca de Pachuca se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Parámetros morfométricos utilizados

Parámetro	Indicador	Formula/Definición	Unidades
Forma	Área de la cuenca (A_c)	Superficie comprendida dentro del parteaguas	km ²
	Perímetro de la cuenca (P_c)	Longitud del parteaguas	km
	Longitud axial de la cuenca (L_c)	Distancia del punto más alejado del exutorio hasta el extremo del parteaguas siguiendo el cauce principal	km
	Ancho promedio de la cuenca (W)	$W=A_c/L_c$	km ² /km
	Coefficiente de compacidad de gravelius (K)	$K=0.282*P_c/\sqrt{A_c}$	---
	Factor de forma (R_f)	$R_f=W/L_c$	---
	Relación de elongación (R_e)	$R_e=1.128*\sqrt{A_c}/L_c$	---
	Índice de alargamiento (I_a)	$I_a=L_m/A_m$	---
Relieve	Pendiente de la microcuenca (S)	$S100[(H*L)/A_c]$	%
Drenaje	Longitud del cauce principal (L_{cp})	Distancia de la proyección horizontal del cauce principal	km
	Pendiente media del cauce principal (P)	$P=[(H_{m\acute{a}x}*H_{m\acute{i}n})/L_{cp}]*100$	%
	Densidad de drenaje (D_d)	$D_d=L_{corr}/A_c$	Km/km ²
	Densidad de corrientes (D_c)	$D_c=C_a/A_c$	Corr/km ²
	Orden de la cuenca	Clasificación de los cauces según Strahler	---
	Relación de bifurcación (R_b)	$R_b=N_r/N_n+1$, $R_b=(R_{b1}+R_{b2}+R_{bn})/\text{número de } R_{bs}$	---
	Tiempo de concentración según Kiripich (T_c)	$T_{ck}=0.06628*(L_{cp}^{0.77}/S^{0.385})$	minutos

Fuente: Henao (2006) y Valdés-Carrera y Hernández-Guerrero (2018).

L_{corr} corresponde a la longitud total de corrientes dentro de la cuenca; C_a corresponde a la sumatoria del total de corrientes dentro de la cuenca; L_m corresponde a la longitud máxima de la cuenca; A_m corresponde a al ancho máximo tomado perpendicularmente a la dirección de L_m ; H corresponde a la equidistancia entre curvas medias; L corresponde a la longitud de las curvas de nivel; $H_{m\acute{a}x}$ corresponde a la cota máxima sobre el cauce principal; $H_{m\acute{i}n}$ cota mínima sobre el cauce principal; H_1 corresponde a la diferencia de nivel entre el parteaguas y el exutorio; NC corresponde al número de curva.

Tabla 2. Parámetros morfométricos de la microcuenca de Pachuca

Parámetro	Indicador	Valor
Forma	A_c	33.58 km ²
	P_c	24.99 km
	L_c	8.35 km
	W	3.93 km ² /km
	K	1.22
	R_f	0.46
	R_e	2.24
	I_a	0.88
Relieve	S	21.07%
Drenaje	L_{cp}	8.36 km
	P	21.066%
	D_d	2.57 km/km ²
	D_c	3.72 corr/km ²
	Orden de la cuenca	5° orden
	R_b	3.07
	T_c	37.16 minutos

Fuente: SIATLv4 (2018), INEGI (2019) y EOSDA (2023).

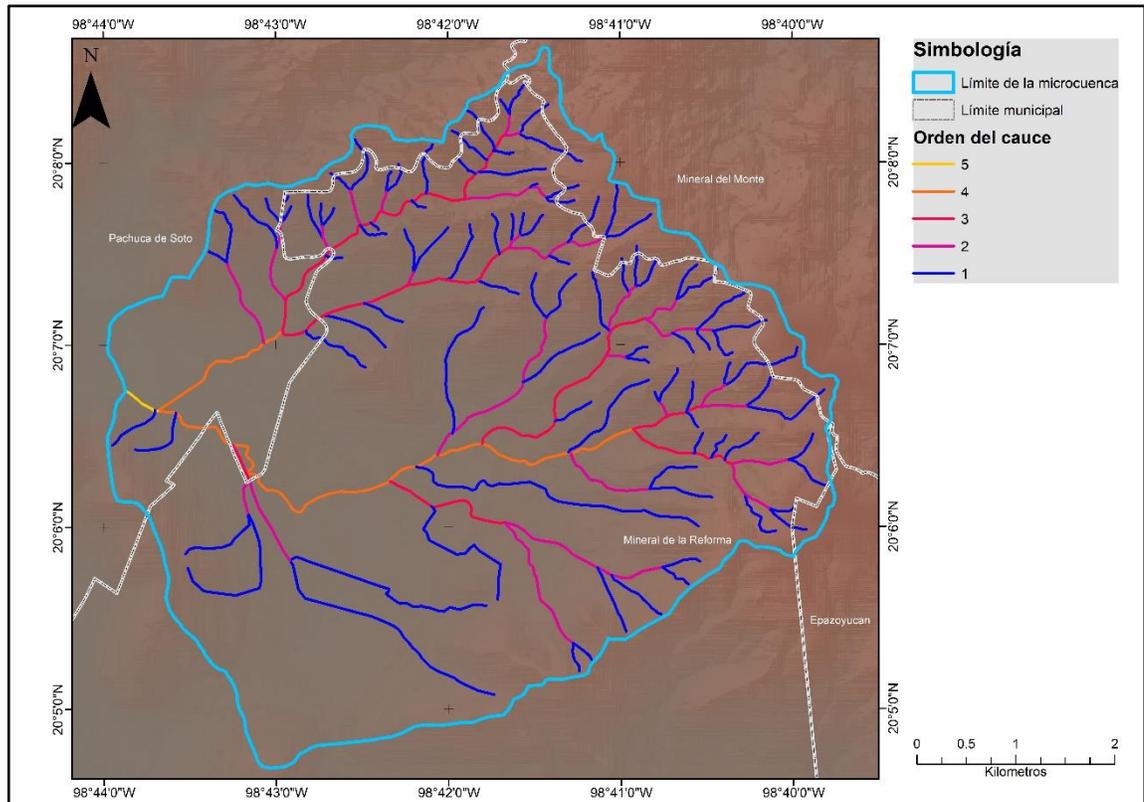


Figura 6. Red de drenaje de la microcuenca de Pachuca.

Fuente: SIATLv4 (2018), INEGI (2019), FIRCO (2002).

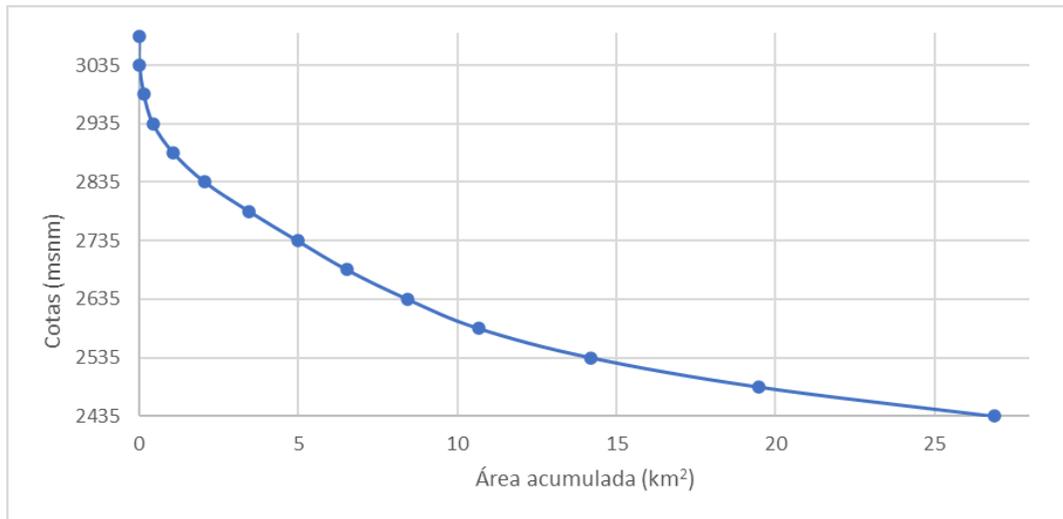


Figura 7. Curva hipsométrica de la microcuenca de Pachuca.

Respecto a las zonas funcionales de la microcuenca, en la figura 8 se muestra la gráfica del perfil altitudinal del cauce principal y se puede observar que los principales quiebres se dan a los 2,440 y a los 2,700 metros sobre el nivel del mar, en la figura 9 se puede observar la distribución de las tres zonas funcionales de la microcuenca, donde la zona baja o de emisión corresponde a 8.52 km² (25.39 %), la zona media o de captación-transición corresponde a 17.18 km² (51.13 %) y la zona alta o de captación corresponde a 7.88 km² (23.47 %).

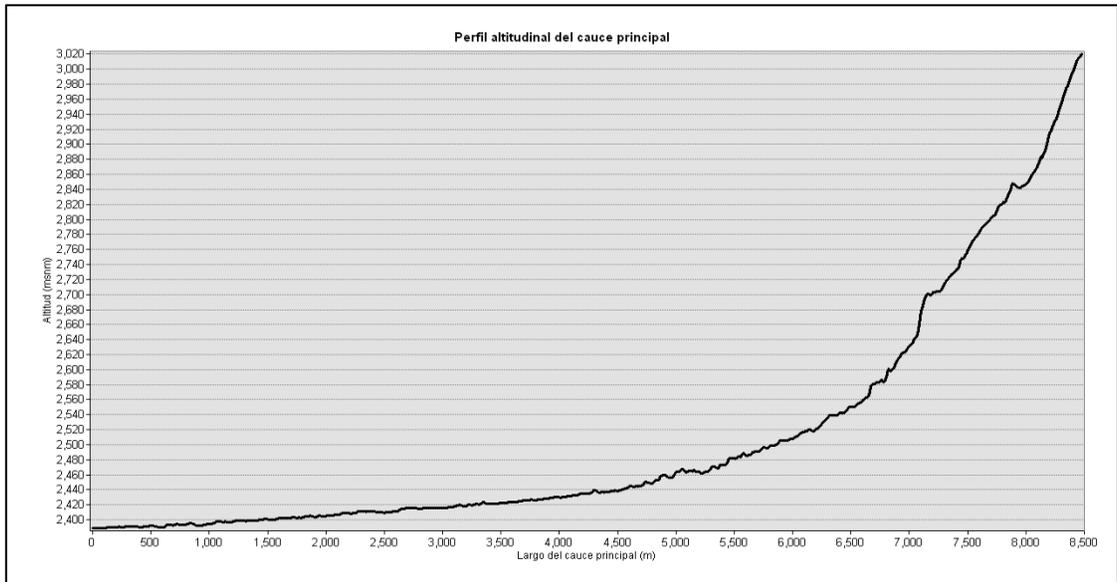


Figura 8. Perfil altitudinal del cauce principal de la microcuenca de Pachuca.

Fuente: Modelo Digital de Elevación (EOSDA, 2023).

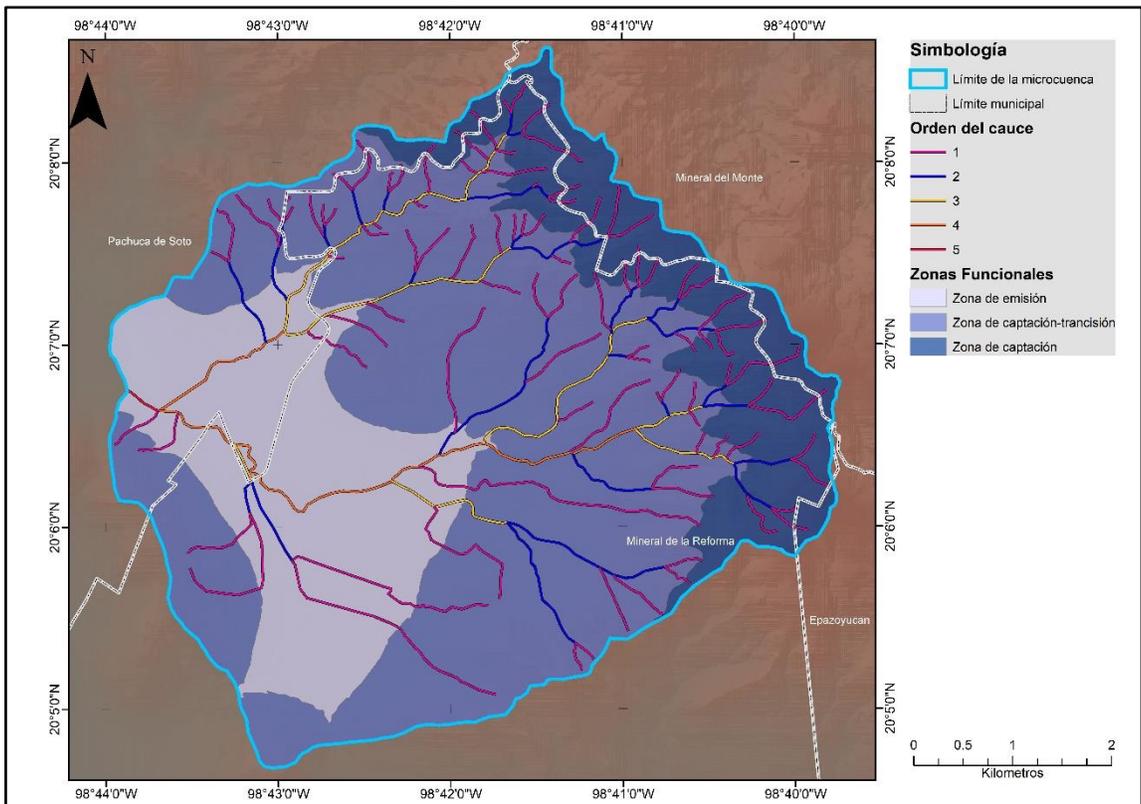


Figura 9. Zonas funcionales de la microcuenca de Pachuca.

Fuente: EOSDA (2023), INEGI (2019), FIRCO (2002).

4. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

La presente investigación tuvo como propósito evaluar los cambios en las coberturas y usos de suelo que se han presentado en la microcuenca de Pachuca entre los años 2012 a 2020 para estimar la influencia que han tenido en su escorrentía superficial y, en consecuencia, en la formación de avenidas torrenciales abordado desde el manejo integral de cuencas, en particular, desde el paradigma del análisis y gestión de riesgos.

Para ello se definieron tres etapas en las que se integran variables como el crecimiento de la mancha urbana, tipos de suelo y precipitación para el análisis de su relación en el contexto de la zona de estudio (Figura 10), trabajando con información documental de libre acceso como conjuntos de datos vectoriales, modelos digitales de elevación, imágenes satelitales y series de tiempo, obtenidas de fuentes como el Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATLv4) de la misma institución, EOS Data Analytics (EOSDA) y Airbus.

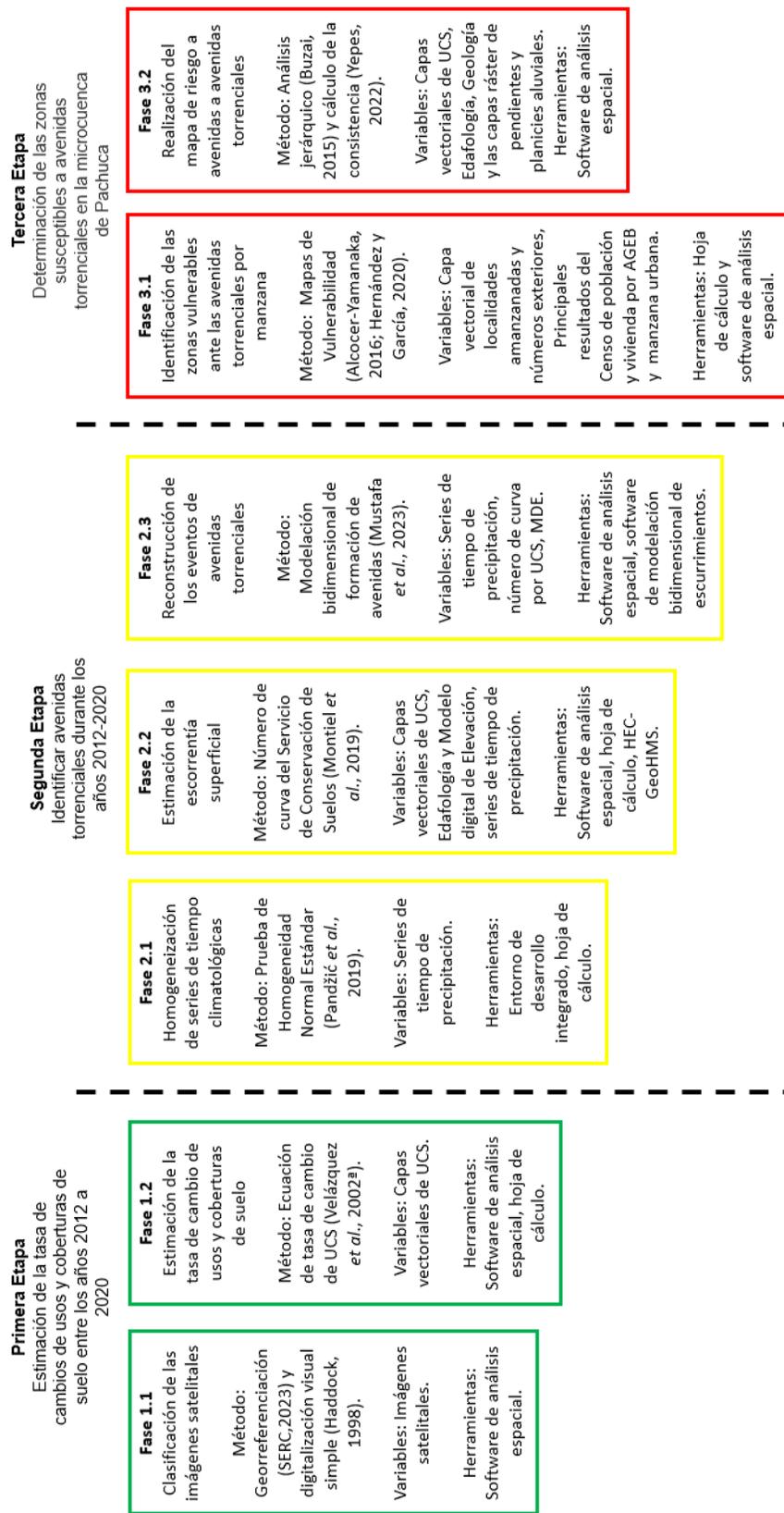


Figura 10. Diagrama de la secuencia metodológica.

Fuente: Elaboración propia

4.1. Etapa 1. Estimación de la tasa de cambios de usos y coberturas de suelo entre los años 2012 a 2020

4.1.1. Fase 1.1. Clasificación de imágenes satelitales

En esta fase el primer paso fue la obtención de imágenes satelitales, las cuales se encuentran disponibles en el portal de Google Earth Pro y son mosaicos de imágenes provistas por el servicio de Airbus Intelligence, el cual cuenta con un total de 16 satélites distintos que capturan escenas con resoluciones desde los 12 cm por píxel hasta los 40 metros por píxel (Airbus, 2023), así como 4 ortofotos correspondientes a los cuadrantes f14d81a, f14d81c, f14d81d, f14d81f provistos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2000) para comparación. Las imágenes se descargaron en formato JPG y no cuentan con información de referencia espacial, por lo que fue necesario georreferenciarlas a través del uso de un software de análisis espacial, en este caso ArcMap 10.3, esta acción consiste en asignarle coordenadas a un número determinado de píxeles para poder ubicarla en el espacio que le corresponde en la realidad (SERC, 2023). Las imágenes que se obtuvieron corresponden a junio del 2000, febrero del 2012, febrero del 2013, junio del 2014, febrero del 2015, septiembre del 2016 y 2017, enero del 2018 y mayo del 2019 y 2020. Posteriormente, dichas imágenes fueron clasificadas realizando una clasificación visual simple con el método de vista frontal (Haddock, 1998; Sadek *et al.*, 2020) utilizando el mismo software de análisis espacial, basándose en las clasificaciones que utiliza el INEGI en el Conjunto de Datos Vectoriales de uso de suelo y vegetación serie VII (INEGI, 2018), agrupando las categorías de agricultura en una sola así como las de vegetación secundaria, así mismo, se realizó una validación de topología a cada capa vectorial resultante con el fin de evitar solapamientos, saltos y geometrías no validas con el software de análisis espacial QGIS 3.28.7.

Al concluir esta fase se obtuvieron las capas vectoriales de los polígonos de usos y coberturas de suelo de los años 2000, 2012 a 2014 y del 2015, cuando las inundaciones y avenidas torrenciales se volvieron más frecuentes, hasta el año 2020; se realizaron mapas de la distribución de dichos polígonos dentro de la Microcuenca de Pachuca por año.

4.1.2. Fase 1.2. Estimación de tasa de cambio de uso y cobertura de suelo

Una vez definidas las capas vectoriales de los polígonos de usos y coberturas de suelo de la microcuenca de Pachuca por año, el siguiente paso fue el cálculo de la tasa de cambio de usos y coberturas de suelo utilizando la siguiente ecuación (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015):

$$tc = \left(S_2 / S_1 \right)^{1/n} - 1$$

Donde Tc representa la tasa de cambio; S_1 representa la superficie de usos y coberturas en el tiempo inicial; S_2 representa la superficie de coberturas y usos de suelos en el tiempo final y n la amplitud del periodo evaluado en años. La información del área ocupada de cada categoría de coberturas y usos de suelo obtenido en la fase 1.1 fue exportada a una hoja de cálculo en Excel, programa de la paquetería Microsoft 365, para esta estimación.

4.2. Etapa 2. Identificación de las avenidas torrenciales durante los años 2012 a 2020

4.2.1. Fase 2.1. homogeneización de las series de tiempo climatológicas

Para el cálculo de la escorrentía superficial, se utilizaron las series de tiempo climatológicas obtenidas del Sistema del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de las estaciones Presa el Girón (13079), Pachuca (OBS) (13022), Real del Monte (13115) y el Cerezo (13150) como se muestran en la figura 11.

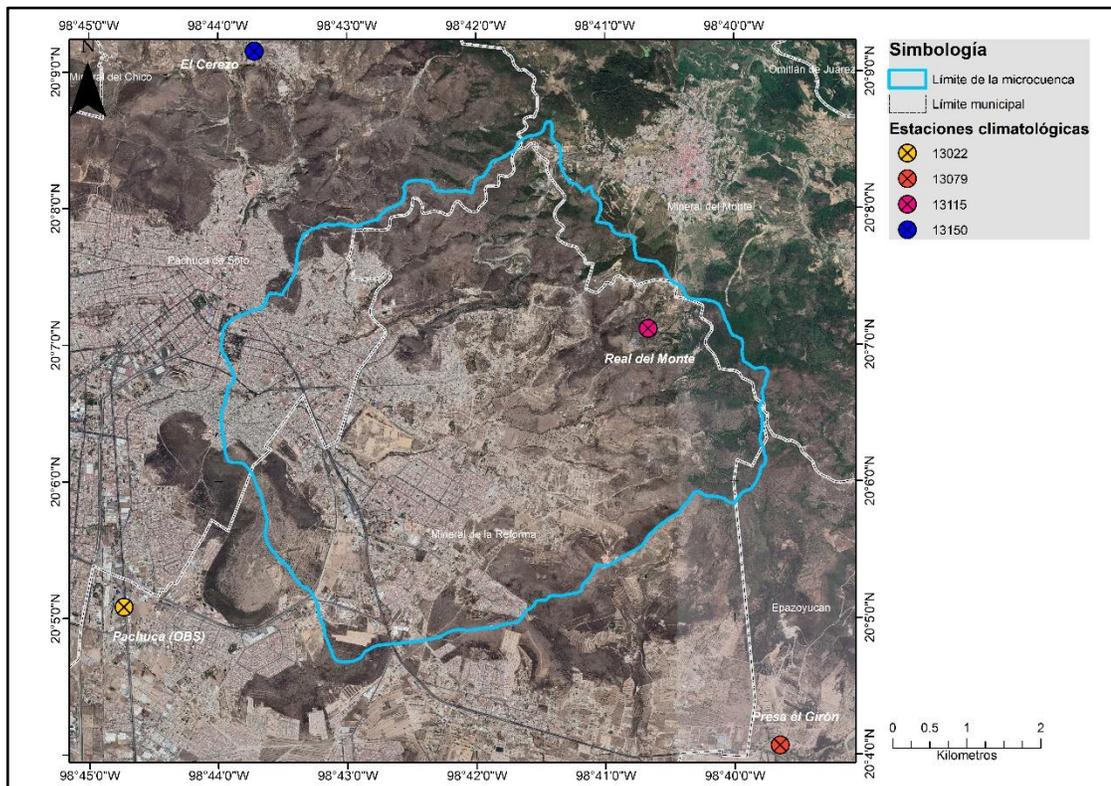


Figura 11. Estaciones climatológicas activas cerca de la zona de estudio.

Fuente: SIH (2010-2020), INEGI (2019), FIRCO (2002).

Estas series de tiempo pueden presentar errores de medición por fallas del equipo o errores humanos por lo que fue necesario evaluar la calidad de la información y realizar la homogeneización de estas para reducir el margen de error. Para la evaluación de la calidad de las series de tiempo se utilizó la Prueba de

Homogeneidad Normal Estándar (SNTH, por sus siglas en inglés) (Pandžić *et al.*, 2019) a través del entorno de desarrollo integrado R versión 4.3.1 y su consola RStudio junto con la paquetería Climatol versión 3.1.2, con estas mismas herramientas se realizó la homogeneización de los datos empleando un modelo de regresión lineal denominado Eje Mayor Reducido o Regresión Ortogonal que permitirá estimar los datos ausentes y cuya expresión es:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Donde: \hat{y} es un dato estimado mediante los correspondientes n datos x_j más próximos disponibles en paso temporal y w_j es el peso asignado a cada uno de ellos (Guijarro, 2019).

4.2.2. Fase 2.2. Estimación de la escorrentía superficial

El proceso siguiente fue el cálculo de la escorrentía superficial utilizando el método de Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN por sus siglas en inglés), el cual permite utilizar la información obtenida de las imágenes satelitales, así como otras bases de datos espaciales y no espaciales, para estimar la escorrentía superficial a través de los sistemas de información geográfica de una forma más sencilla y eficiente que métodos convencionales (Topno *et al.*, 2015), a pesar de que el modelo SCS-CN inicialmente se pensó para cuencas menores a 15 km² este se ha modificado para usarse en cuencas grandes utilizando el método de la curva de ponderación con la información espacial de coberturas y uso de suelo y de las características de los suelos (Karunanidhi *et al.*, 2020).

Para esta etapa se utilizaron los siguientes insumos: las capas vectoriales de coberturas y usos de suelo por año de la microcuenca de Pachuca obtenidas en la fase 1.1; la capa vectorial de edafología de la microcuenca obtenida del conjunto de datos vectoriales edafológicos serie II (INEGI, 2007); la capa ráster del MDE de 4.47

metros por píxel o 19.98 m² (EOSDA, 2023) y las series de tiempo ya homogeneizadas y completadas.

La expresión Matemática del modelo SCS-CN es la siguiente (Montiel *et al.*, 2019):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{si } P > I_a, Q = 0 \text{ en caso contrario}$$

Donde: Q es el escurrimiento (mm); P es la precipitación total (mm); S es el potencial máximo de retención (mm); I_a es la abstracción inicial (mm), definida por una proporción del valor de S :

$$I_a = \lambda S$$

Donde; λ es el coeficiente de abstracción inicial (adimensional), y su valor estándar es 0.2; integrando ambas partes, la ecuación resulta de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

El parámetro S depende del tipo de suelo, uso de suelo, condiciones hidrológicas y condición de humedad antecedente (AMC) y se determina con la ecuación siguiente:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde: CN es el valor de número de curva y para esto tomando a consideración las tablas del Manual Nacional de Ingeniería del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en función del tipo, uso y condición hidrológica del suelo, de la cobertura y de las prácticas de manejo, se utilizó la herramienta "CN Grid" de la extensión HEC-GeoHMS, para este fin se realizaron las tablas 3 y 4 a 6, en la primera se clasificaron los suelos presentados en la capa vectorial de suelos en grupos de suelos hidrológicos considerando únicamente la textura de los suelos dominantes, información que se obtuvo de la base de referencia mundial del recurso suelo (FAO, 2015), en la segunda tabla se establecieron los valores de Número de Curva en función del tipo de uso y cobertura de suelo y considerando los tres supuestos de condición antecedente de humedad.

Tabla 3.- Clasificación de suelos dominantes en tipos de suelos hidrológicos

Suelos dominantes	Categoría de suelos hidrológicos
Luvisoles	A
Regosoles	C
Phaeozems	A
Leptosoles	C
N/A*	D

Fuente: INEGI (2007), FAO (2015) y Bradbury *et al.* (2000).

*N/A: Corresponde a las porciones de la microcuenca que no poseen información en la capa vectorial de edafología.

Tabla 4.- Valores de Número de curva para grupos hidrológicos de suelo A

UCS	Categoría	Clave	Condición Antecedente de humedad ($\lambda=0.2$)			Condición antecedente de humedad ($\lambda=0.05$)		
			I	II	III	I	II	III
Asentamientos humanos	Zonas construidas	16	64	81	92	50.773	73.823	89.825
Bosque de encino	Bosques perenes	42	12	25	43	5.108	13.077	27.791
Cuerpo de agua	Presas	53	100	100	100	100	100	100
Matorral crasicaule	Matorrales y pastizales	33	21	39	59	10.392	24.138	44.715
Matorral desértico rosetófilo			21	39	59	10.392	24.138	44.715
Pastizal inducido			21	39	59	10.392	24.138	44.715
Vegetación secundaria			21	39	59	10.392	24.138	44.715
Suelo descubierto	Carreteras	14	80	91	97	72.382	88.390	96.665
Tierra agrícola	Tierras de cultivo y pastoreo	21	42	62	79	50.773	73.823	89.825

Fuente: Bradbury *et al.* (2000) y Hawkins (2009).

Tabla 5.- Valores de Número de curva para grupos hidrológicos de suelo C

UCS	Categoría	Clave	Condición Antecedente de humedad ($\lambda=0.2$)			Condición antecedente de humedad ($\lambda=0.05$)		
			I	II	III	I	II	III
Asentamientos humanos	Zonas construidas	16	80	91	97	72.382	88.390	96.665
Bosque de encino	Bosques perenes	42	51	70	85	35.784	58.508	79.642
Cuerpo de agua	Presas	53	100	100	100	100	100	100
Matorral crasicaule	Matorrales y pastizales	33	55	74	88	40.132	63.925	84.031
Matorral desértico rosetófilo			55	74	88	40.132	63.925	84.031
Pastizal inducido			55	74	88	40.132	63.925	84.031
Vegetación secundaria			55	74	88	40.132	63.925	84.031
Suelo descubierto	Carreteras	14	87	95	98	82.569	94.022	97.906
Tierra agrícola	Tierras de cultivo y pastoreo	21	60	78	90	45.898	69.525	86.945

Fuente: Bradbury *et al.* (2000) y Hawkins (2009).

Tabla 6.- Valores de Número de curva para grupos hidrológicos de suelo D

UCS	Categoría	Clave	Condición Antecedente de humedad ($\lambda=0.2$)			Condición antecedente de humedad ($\lambda=0.05$)		
			I	II	III	I	II	III
Asentamientos humanos	Zonas construidas	16	83	93	98	76.723	91.245	97.906
Bosque de encino	Bosques perenes	42	59	77	89	44.715	68.110	85.491
Cuerpo de agua	Presas	53	100	100	100	100	100	100
Matorral crasicaule	Matorrales y pastizales	33	63	80	91	49.533	72.382	88.390
Matorral desértico rosetófilo			63	80	91	49.533	72.382	88.390
Pastizal inducido			63	80	91	49.533	72.382	88.390
Vegetación secundaria			63	80	91	49.533	72.382	88.390
Suelo descubierto	Carreteras	14	89	96	99	85.491	95.365	99.056
Tierra agrícola	Tierras de cultivo y pastoreo	21	64	81	92	50.773	73.823	89.825

Fuente: Bradbury *et al.* (2000) y Hawkins (2009).

Se ha encontrado que el valor estándar de λ puede reducir la sensibilidad del modelo a cuencas donde las condiciones biofísicas pueden ser distintas a las de aquellas que se utilizaron para determinar este valor, se ha sugerido usar 0.05 pero para esto el valor de CN debe de ser ajustado con la siguiente ecuación (Hawkins *et al.*, 2009):

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879\left(\frac{100}{CN_{0.2}} - 1\right)^{1.15} + 1}$$

Donde: $CN_{0.2}$ es el valor de número de curva considerando 0.2 como valor de λ y $CN_{0.05}$ es el valor de número de curva considerando 0.05 como valor de λ , por lo que la ecuación cambia de la siguiente forma:

$$Q = \frac{(P - 0.05S_{0.05})^2}{P + 0.95S_{0.05}} \text{ Si } P > 0.05S_{0.05}, Q = 0 \text{ en caso contrario}$$

Para fines de la presente investigación se utilizó tanto $I_{0.2}$ como $I_{0.05}$ y el valor de número de curva total de la microcuenca por año se obtuvo con la siguiente fórmula (Al-Juaidi, 2018):

$$CN_c = \frac{CN_1A_1 + CN_2A_2 + \dots + CN_nA_n}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Donde CN_n corresponde al número de curva de cada subárea de la microcuenca y A_n al área de cada subárea.

Finalmente, se estimó el coeficiente de escurrimiento con la siguiente formula (Campos-Aranda, 2009):

$$C_e = \frac{VE}{VP}$$

Donde VE corresponde al volumen escurrido y VP corresponde al volumen precipitado.

Todas las tareas de esta fase se realizaron utilizando el software de ArcMap 10.3 obteniéndose así el número de curva de cada cobertura y uso de suelo y las capas vectoriales de las escorrentías superficiales de la microcuenca de Pachuca de los años 2012 a 2020 así como los valores de escorrentía superficial y coeficiente de escurrimiento por día y mes de este mismo periodo de tiempo.

4.2.3. Fase 2.3. Reconstrucción de los eventos de avenidas torrenciales

A partir de los valores de número de curva obtenidos en la fase anterior y con el modelo digital de elevación se realizó la reconstrucción de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales dentro de la microcuenca con la metodología propuesta por Mustafa *et al.* (2023) utilizando el software del Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HERC-RAS, por sus siglas en inglés) para el mapeo de las llanuras aluviales. Este modelo fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y es una de las herramientas más usadas para modelar perfiles de superficies de agua de regímenes de flujo mixto, subcrítico y torrencial, esto se debe a su flexibilidad en la creación de escenarios hídricos, a su rapidez en los cálculos y su fácil manejo y operación (Mora y Gilberto, 2016), los datos obtenidos de la modelación se procesaron para el análisis espacial y el mapeo de las zonas donde se presentaron las escorrentías (huo *et al.*, 2016).

Para la configuración en dos dimensiones HEC-RAS puede utilizar tanto la ecuación de Saint-Venant o la aproximación de difusión de ola (Iroume *et al.*, 2022):

Ecuación de Saint-Venant

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Aproximación de difusión de ola

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 pg \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + pf + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h\tau_{xy})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) = - \frac{n^2 pg \sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + qf + \frac{\partial}{\rho \partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\rho \partial x} (h\tau_{xy})$$

Donde: h es la profundidad del agua (m); p y q son el flujo específico en las direcciones x y y (m^2s^{-1}), respectivamente, ζ es la elevación de la superficie (m); g es la aceleración provocada por la gravedad (m^2s^{-2}); n es el coeficiente de aspereza de Manning ($m^{-1/3}s$); ρ es la densidad del agua (kgm^{-3}); τ_{xx} , $h\tau_{yy}$ y τ_{xy} son los componentes de efectividad del esfuerzo cortante; y f es el Coriolis (s^{-1}).

Para asegurar la estabilidad numérica del modelo el paso de tiempo es definido de acuerdo con la condición de Courant-Friederichs-Lewy:

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta x} \leq 1.0 (\text{avec } C_{max} = 0.3) \text{ ou } \Delta T \leq \frac{\Delta x}{V} (\text{avec } C = 1.0)$$

Donde: C es el número de Courant; V es la velocidad (ms^{-1}); ΔT es el paso de tiempo (s); y Δx es el tamaño de la celda de la cuadrícula (m).

En la función de RAS Mapper de HEC-RAS se realizaron simulaciones de flujo inestable en dos dimensiones a partir de la capa ráster de terreno generada a partir del MDE de 4.47 metros por pixel o $19.98 m^2$ (EOSDA,2023), también se utilizó la

capa vectorial del límite de la microcuenca para establecer el perímetro de la zona de flujo en dos dimensiones con un tamaño de celdas de 10 m x 10 m y se estableció una pendiente de fricción de 0.00889 para la profundidad normal como condición de contorno de flujo externo y se utilizó un número de Courant-Friederichs-Lewy mínimo de 1 y máximo de 3 con número de pasos bajo el mínimo antes de duplicar de 4, este valor se utilizó también para el número máximo de duplicado de los pasos de tiempo base y para el número máximo de división de los pasos de tiempo base.

Se crearon capas de infiltración con los datos de número de curva y coeficiente de abstracción inicial y capas de usos y coberturas de suelo para integrar el número de coeficiente de Manning, obtenido del manual de usuario de HEC-RAS (2024) para definir la rugosidad de las superficies de la zona de flujo en dos dimensiones, finalmente, se utilizaron los datos de precipitación diaria de los meses donde se identificaron inundaciones y avenidas torrenciales y en las simulaciones se usó una precipitación por malla, los insumos utilizados para las modelaciones se detallan en la tabla 7.

Tabla 7.- Insumos utilizados para la modelación de avenidas torrenciales

Año	Capas vectoriales			Capas ráster	Series de tiempo precipitación diaria
	Área de flujo 2D	NC	C. de Manning		
2015	Límite de la microcuenca de Pachuca	CAH II ($\lambda=0.2$)	UCS 2015	Capa de terreno creada a partir del Modelo Digital de Elevación.	julio a octubre
2017		CAH I ($\lambda=0.2$)	UCS 2017		junio a septiembre
2018		CAH I ($\lambda=0.2$)	UCS 2018		junio a septiembre
2019 [1]		CAH I ($\lambda=0.2$)	UCS 2019		abril a julio
2019 [2]					julio a octubre
2020					UCS 2020

Fuente: FIRCO (2002), SIH (2015-2020), EOSDA (2023), Airbus (2015-2020), Bradbury *et al.* (2000) y el manual de usuario de HEC-RAS (2024).

Al finalizar esta fase se obtuvieron mapas de profundidad máxima de las llanuras aluviales de las avenidas torrenciales identificadas entre los años 2015 a 2020.

4.3. Etapa 3. Determinación de las zonas susceptibles a avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca

4.3.1. Fase 3.1. Identificación de las zonas vulnerables ante las avenidas torrenciales por manzana

Para esta fase se utilizó la metodología para la elaboración de mapas de vulnerabilidad a partir de la propuesta por Alcocer-Yamanaka *et al.* (2016) y Morales *et al.* (2024) donde la vulnerabilidad social por manzana se valora en función del porcentaje de población de entre cero y cinco años y 60 años y más, lo cual se puede expresar en la siguiente fórmula:

$$\text{Indice de Vulnerabilidad Social} = \frac{(\text{Población} \leq 5 \text{ años}) + (\text{Población} \geq 60 \text{ años})}{\text{Población total}}$$

Categorizando las manzanas en cinco grupos de acuerdo con su grado de vulnerabilidad: *Muy Alta* (IVS \geq 0.40), *Alta* (IVS \geq 0.31), *Media* (IVS \geq 0.21), *Baja* (IVS \geq 0.01) y *Muy Baja* (IVS \geq 0.00).

Así mismo, la vulnerabilidad estructural de viviendas por manzana se valora en función del porcentaje de casas con piso de tierra respecto al número de hogares por manzana como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\text{Indice de Vulnerabilidad Estructural} = \frac{\text{Numero de viviendas con piso de tierra}}{\text{Numero total de hogares}}$$

Categorizando las manzanas en cinco grupos de acuerdo con su grado de vulnerabilidad: *Muy Alta* ($IVE \geq 0.40$), *Alta* ($IVE \geq 0.31$), *Media* ($IVE \geq 0.21$), *Baja* ($IVE \geq 0.01$) y *Muy Baja* ($IVE \geq 0.00$).

Finalmente, presentan un índice de vulnerabilidad por tipo de vivienda considerando cuatro tipos de manzanas, el tipo I donde más del 20 % de las viviendas particulares habitadas son de un solo cuarto, el tipo II donde más del 20 % de las viviendas particulares habitadas son de dos cuartos, el tipo III donde más del 50 % de las viviendas particulares habitadas son de tres cuartos y menos del 40 % de la población de la manzana es económicamente activa y, finalmente, el tipo IV donde más del 50 % de las viviendas particulares habitadas son de tres cuartos y más del 40 % de la población de la manzana es económicamente activa.

Para fines del presente trabajo, la vulnerabilidad social se calculó utilizando la tasa de dependencia demográfica y la vulnerabilidad estructural se calculó considerando también el número de viviendas particulares habitadas que no disponen de luz eléctrica, el número de viviendas particulares habitadas que no disponen de agua en la vivienda y el número de viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje de acuerdo con lo planteado por Hernández y García (2020).

La estimación de los tres índices se hizo en una hoja de cálculo utilizando la información presentada en la base de datos los Principales Resultados por Área Geoestadística Básica (AGEB) y Manzana Urbana del Censo de Población y Vivienda realizado por el INEGI en el año 2020, posteriormente, los resultados se concatenaron con la tabla de atributos de la capa vectorial de las manzanas de los municipios que inciden en la microcuenca de Pachuca a través de la función de “Uniones” en el software de análisis espacial QGIS, dicha capa vectorial se extrajo por atributo (clave de la entidad y clave de municipio) del producto “Información

Vectorial de Localidades Amanzanadas y Número Exteriores” escala 1:20,000 del INEGI del año 2019.

Al finalizar esta fase se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad social, vulnerabilidad estructural y de vulnerabilidad por tipo de vivienda de las manzanas que inciden dentro de la Microcuenca de Pachuca.

4.3.2. Fase 3.2. Realización de mapa de riesgo a avenidas torrenciales

La última fase consistió en realizar la evaluación de las zonas de riesgo a avenidas torrenciales utilizando una variación del FFRI (índice de riesgo de avenidas torrenciales, por sus siglas en inglés) propuesto por Zeng *et al.* (2016). El proceso consistió en una evaluación multicriterio (EMC) similar a la metodología propuesta por Buzai (2015), el proceso consiste en una suma lineal ponderada de capas ráster utilizando un SIG (Rivera *et al.*, 2021), en este caso se utilizaron las capas vectoriales generadas anteriormente de coberturas y usos de suelo, vulnerabilidad social, vulnerabilidad estructural, vulnerabilidad por tipo de vivienda y edafología, así como la capa ráster de pendientes, planicies aluviales y precipitación media anual; se utilizaron las variables propuestas por Zeng *et al.* (2015), Koem y Tantane (2021) y se tomaron a consideración sus criterios de ponderación, abonando a la ponderación que se propone en función de los resultados de las fases anteriores del presente trabajo, ya que se observó que los usos de suelo, edafología y la pendiente son factores que, en el caso de la microcuenca de Pachuca, tienen mayor incidencia en la formación de avenidas torrenciales que el volumen de precipitación, así mismo, se utilizarán las capas vectoriales de vulnerabilidad social, estructural y por tipo de vivienda. Se usaron las capas vectoriales y ráster que se enlistan en la tabla 8.

Tabla 8. Insumos utilizados para la realización del mapa de riesgo de avenidas torrenciales

Tipo de insumo	Variables	Escala	Fuente
Capa vectorial	[1] Usos y coberturas de suelo (2020)	1:50,000	Generado a partir de imágenes satelitales
	[2] Cercanía a los cauces (2018)	1:50,000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (SIATLv4)
Capa ráster	[3] Pendientes (2023)	19.98 m ² por píxel	Generado a partir de modelo digital de elevación obtenida de EOSDA
Capa vectorial	[4] Vulnerabilidad social (2020)	1:20,000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
	[5] Edafología (2007)	1:250,000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Capa ráster	[6] Precipitación	10 m ² por píxel	Generado a partir de las series de tiempo procesadas en la fase 2.1
Capa vectorial	[7] Vulnerabilidad por tipo de vivienda (2020)	1:20,000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
	[8] Vulnerabilidad estructural (2020)	1:20,000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía

Fuente: Zeng *et al.* (2015) y Koem y Tantane (2021).

Para el análisis multicriterio se utilizó un proceso de análisis jerárquico, esta es una técnica estructurada utilizada para la ponderación de la influencia de cada variable (Waqas *et al.*, 2021), respecto a la matriz de ponderación, cada variable es comparada una con otra para priorizar y asignar un valor de ponderación (Saaty, 2008) obteniendo la tabla 9.

Tabla 9. Matriz de jerarquización

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	Σ	<i>w</i>
[1]	1.00	2.00	3.00	2.00	5.00	5.00	7.00	8.00	33.00	0.220025
[2]	0.50	1.00	2.00	2.00	6.00	7.00	8.00	8.00	34.50	0.230026
[3]	0.33	0.50	1.00	2.00	4.00	6.00	9.00	9.00	31.83	0.212246
[4]	0.50	0.50	0.50	1.00	5.00	3.00	8.00	8.00	26.50	0.176687
[5]	0.20	0.17	0.25	0.20	1.00	0.33	0.50	0.50	3.15	0.021002
[6]	0.20	0.14	0.17	0.33	3.00	1.00	3.00	3.00	10.84	0.072294
[7]	0.14	0.13	0.11	0.13	2.00	0.33	1.00	0.50	4.34	0.028919
[8]	0.13	0.13	0.11	0.13	2.00	0.33	2.00	1.00	5.82	0.038801
									Total	149.98

Fuente: Zeng *et al.* (2016), Buzai (2015) y Rivera *et al.* (2021).

Una vez determinado el valor de ponderación se rasterizan las capas vectoriales y se utiliza la herramienta *Raster Calculator* del software de análisis espacial ArcMap

para la zonificación de la microcuenca respecto al riesgo a la formación de avenidas torrenciales utilizando la siguiente fórmula (Tallah *et al.*, 2019):

$$Modelo_{AHP} = \sum_{ni}^n W_i \times F_i$$

Donde W_i corresponde al valor ponderado de cada variable que incide en la formación de avenidas torrenciales y F_i corresponde al valor del píxel de cada capa ráster.

En cuanto a los valores de cada categoría, en las tablas 10 a 17 se presentan los valores de cada categoría que fueron asignados a los píxeles de las capas ráster y las capas vectoriales rasterizadas.

Tabla 10. Valores asignados a las categorías de usos y coberturas de suelo [1]

Categoría	Valor	Valor ponderado
Cuerpo de agua	10	2.200
Suelo descubierto		
Asentamientos humanos		
Tierra agrícola	8	1.760
Pastizal inducido	6	1.320
Vegetación secundaria		
Matorral crasicaule	4	0.880
Matorral desértico rosetófilo		
Bosque de encino	2	0.440

Fuente: Elaborado a partir de los resultados obtenidos en las fases 1.1 y 2.1.

Tabla 11. Valores asignados a las categorías de cercanía a los cauces [2]

Categoría	Valor	Valor ponderado
0 – 40 m	10	2.300
40 – 80 m	8	1.840
80 – 120 m	6	1.380
120 – 160 m	4	0.920
> 160 m	2	0.460

Fuente: Elaborado a partir de las series de tiempo homogeneizadas en la fase 2.3.

Tabla 12. Valores asignados a las categorías de pendiente [3]

Categoría	Valor	Valor ponderado
30° <	10	2.122
10° - 30°	6.33	1.444
0° - 10°	3.33	0.707

Fuente: EOSDA (2023).

Tabla 13. Valores asignados a las categorías de vulnerabilidad social [4]

Categoría	Valor	Valor ponderado
Muy alta	10	1.767
Alta	8	1.413
Media	6	1.060
Baja	4	0.707
Muy baja	2	0.353
Sin información	0	0

Fuente: Elaborado a partir de los resultados obtenidos en la fase 3.1.

Tabla 14. Valores asignados a las categorías de edafología [5]

Categoría	Categoría hidrológica	Valor	Valor ponderado
N/A	D	10	0.210
Leptosoles	C	6.66	0.133
Regosoles			
Luvisoles	A	3.33	0.070
Phaeozems			

Fuente: Elaborado a partir de la capa de la categoría hidrológica de suelos realizada en la fase 2.1.

Tabla 15. Valores asignados a las categorías de precipitación media anual [6]

Categoría	Valor	Valor ponderado
65.17 – 69.181 mm	10	0.723
60.918 – 65.172 mm	8	0.578
56.745 – 60.918 mm	6	0.434
52.819 – 56.745 mm	4	0.289
48.319 - 52.819 mm	2	0.145

Fuente: Elaborado a partir de las series de tiempo homogeneizadas en la fase 2.1.

Tabla 16. Valores asignados a las categorías de vulnerabilidad por tipo de vivienda [7]

Categoría	Valor	Valor ponderado
Viviendas tipo I	10	0.289
Viviendas tipo II	7.5	0.217
Viviendas tipo III	5	0.145
Viviendas tipo IV	2.5	0.072
Sin información	0	0

Fuente: Elaborado a partir de los resultados obtenidos en la fase 3.1.

Tabla 17. Valores asignados a las categorías de vulnerabilidad estructural [8]

Categoría	Valor	Valor ponderado
Muy alta	10	0.388
Alta	8	0.310
Media	6	0.233
Baja	4	0.155
Muy baja	2	0.078
Sin información	0	0

Fuente: Elaborado a partir de los resultados obtenidos en la fase 3.1.

Por último, se utilizó el índice de consistencia (CI, por sus siglas en inglés) y la razón de consistencia (CR, por sus siglas en inglés), para validar la asignación de pesos a cada variable (Yepes, 2022), usando la siguientes formulas:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde λ_{max} es el máximo autovalor y n corresponde a la dimensión de la matriz de decisión; En cuanto al CR se utilizó la siguiente formula:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Donde RI corresponde a al índice aleatorio, que por el tamaño de la matriz, 8 variables, este corresponde a 1.41, así mismo, el CR máximo es del 10 %, por lo que un valor menor al 10 % indicaría una consistencia adecuada.

Al finalizar esta fase se obtuvo un mapa de riesgos a avenidas torrenciales.

5. RESULTADOS

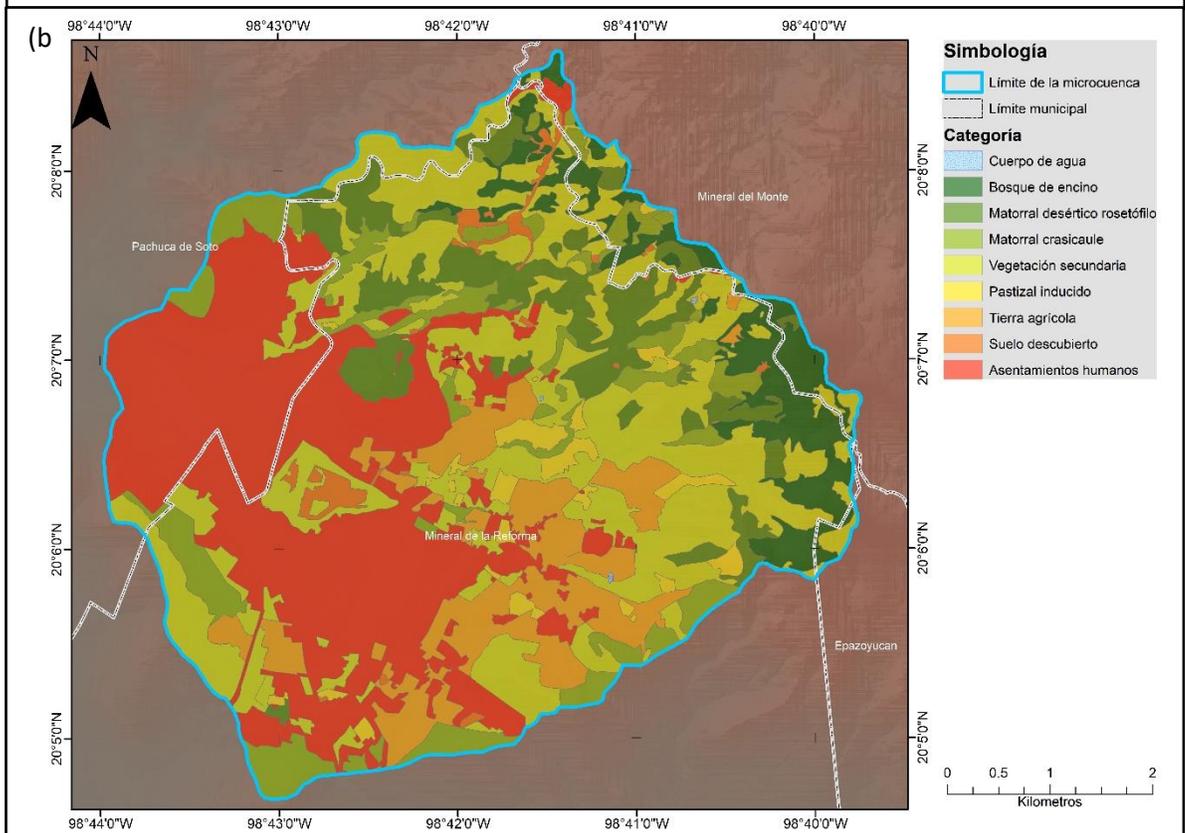
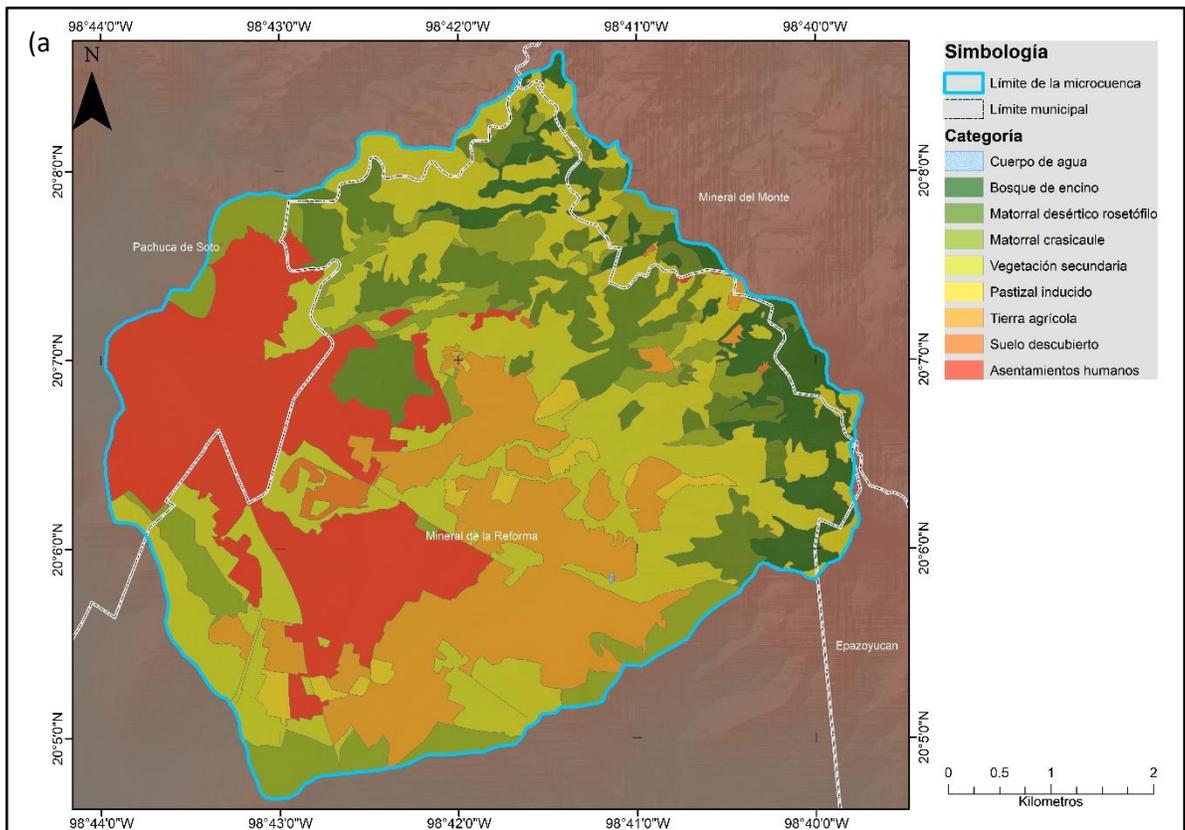
5.1. Estimación de la tasa de cambios de usos y coberturas de suelo entre los años 2012 a 2020

En cuanto a la clasificación de imágenes satelitales a través de la clasificación visual simple, los valores obtenidos para cada categoría se presentan en la tabla 19. Donde se puede observar que la categoría predominante son los asentamientos humanos, que para el año 2020 representa el 32.53 % de la superficie total de la microcuenca, le sigue la vegetación secundaria, con 26.66%, y por el matorral crasicaule con 9.59%. Por el otro lado, las categorías menos representadas son el suelo descubierto, 3.30 %, pastizal inducido, 2.02 % y los cuerpos de agua abarcando un 0.03 %. Para el final del periodo de estudio los asentamientos humanos y el suelo descubierto abarcaban un total de 12.032 km² lo que representa poco más de la mitad de la microcuenca, a la vez del crecimiento urbano con una escasa lógica de ordenamiento territorial. En la figura 12 se muestran los cambios de usos y coberturas de suelo de los años 2000, 2012 y 2020.

Tabla 18. Superficie ocupada por usos y coberturas de suelo en la Microcuenca de Pachuca en km²

Categorías	Años									
	2000	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Asentamientos humanos	7.1582	10.4255	10.5275	10.6335	10.741	10.793	10.818	10.890	10.920	10.925
Suelo descubierto	0.2729	0.4836	0.4787	0.5321	0.509	0.563	0.609	0.696	0.756	1.107
Tierra agrícola	5.7239	3.4348	3.4036	3.3931	3.398	3.367	3.357	3.272	3.225	3.060
Bosque de encino	2.4807	2.4369	2.4369	2.4358	2.436	2.436	2.436	2.436	2.436	2.436
Vegetación secundaria	10.0429	9.3625	9.3184	9.1740	9.169	9.139	9.095	9.092	9.080	8.953
Matorral crasicaule	3.6861	3.3958	3.3958	3.3883	3.370	3.355	3.337	3.316	3.285	3.221
Matorral desértico rosetófilo	3.5895	3.2413	3.2218	3.2182	3.198	3.197	3.197	3.194	3.194	3.194
Pastizal inducido	0.6282	0.7970	0.7970	0.8047	0.757	0.728	0.728	0.680	0.680	0.680
Cuerpo de agua	0.0038	0.0087	0.0065	0.0065	0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010

Fuente: Airbus (2012-2020) y CONAGUA (2000).



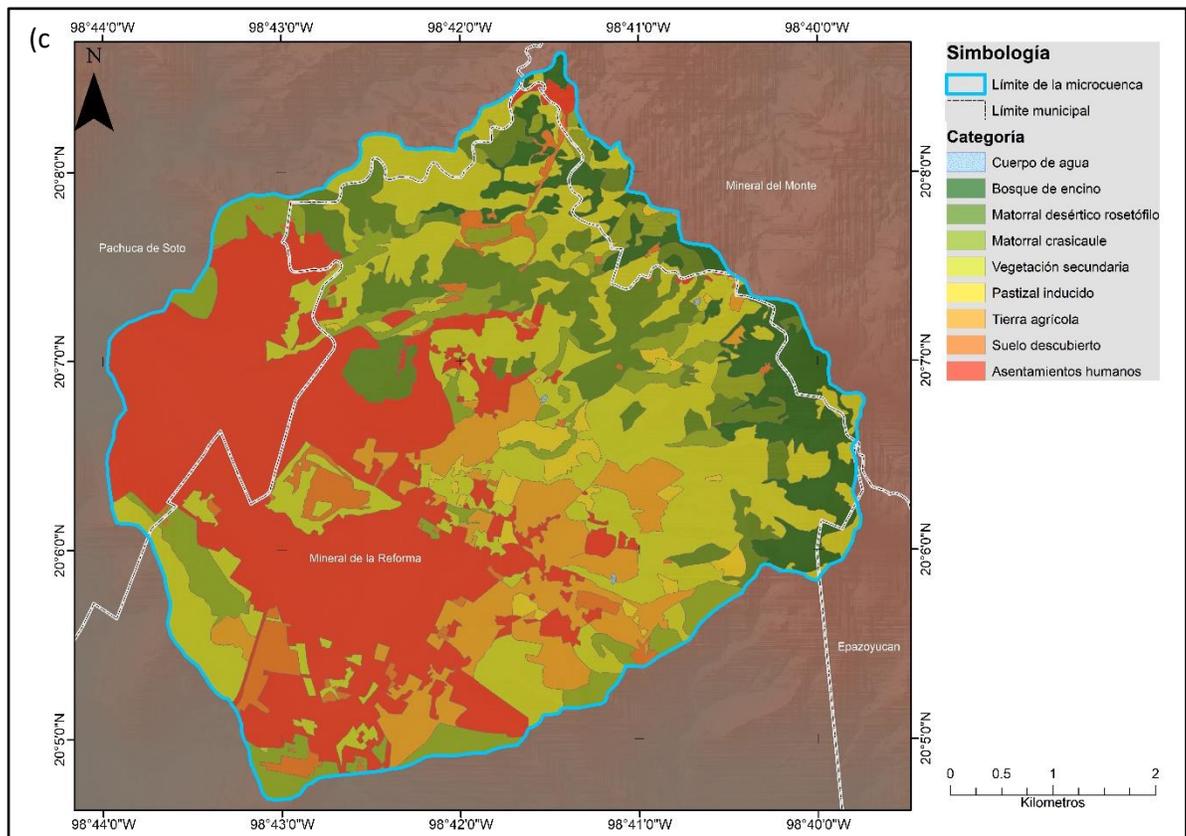


Figura 12. Cambios en los UCS dentro de la microcuenca en los años 2000(a), 2012(b) y 2020(c).

Fuente: Airbus (2015 y 2020) y CONAGUA (2000).

Una vez obtenidos los valores de la superficie que ocupa cada categoría de UCS dentro de la microcuenca, se estimó la tasa de cambio por año, y los resultados se presentan en la tabla 20. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que el uso de suelo con la tasa de cambio anual más alta fueron los asentamientos urbanos con un crecimiento del 2.14 % (0.233 km² o 233,376.025 m²) por año, seguido por el suelo descubierto con un crecimiento del 7.25 % (0.08 km² o 80,339.749 m²) por año y por los pastizales inducidos con un crecimiento del 0.397% (0.002 km² o 2,700.168 m²) por año, por el otro lado, las tierras de uso agrícola presentaron el mayor decremento con una tasa de cambio anual del 3.082 % (0.094 km² o 94,319.81 m²) por año, seguido por el matorral crasicaule con un decremento del 0.67 % (0.021 km² o 21,631.15 m²) por año, el matorral desértico

rosetófilo con un decremento del 0.58 % (0.018 km² o 18,611.41 m²) por año y la vegetación secundaria con un decremento del 0.57 % (0.051 km² o 51,281.27 m²) por año, así mismo, se pudo observar que el crecimiento de la mancha urbana no sigue un patrón claro lo que puede aumentar la capacidad de escurrimiento de la microcuenca.

Tabla 19. Valores obtenidos de la tasa de cambio de UCS

Categoría	Tasa anual de cambio en porcentaje
Asentamientos humanos	2.14%
Suelo descubierto	7.26%
Tierra agrícola	-3.08%
Bosque de encino	-0.09%
Vegetación secundaria	-0.57%
Matorral crasicaule	-0.67%
Matorral desértico rosetófilo	-0.58%
Pastizal inducido	0.40%
Cuerpo de agua	5.06%

Fuente: Airbus (2012-2020) y CONAGUA (2000).

5.2. Influencia de la precipitación pluvial en la formación de avenidas torrenciales, 2000-2020

En esta sección se presentarán los resultados de los análisis exploratorios y los resultados de la homogeneización de cada una de las variables climatológicas consideradas para el presente estudio, dicha información se obtuvo de las cuatro estaciones climatológicas más cercanas a la microcuenca y que aún siguen operando, tal como se muestra en la figura 11, estas fueron Pachuca de Soto (OBS) (13022), presa el Girón (13079), Real del Monte (13115) y el Cerezo (13150).

Se presentan distintos gráficos para cada variable climatológica incluyendo gráfico, respecto a los análisis exploratorios se presentan un gráfico de cajas de los datos de cada estación, un gráfico de la disponibilidad de información por estación y otro de la cantidad de estaciones con información durante el periodo de estudio, así

como un histograma de frecuencia de los datos, en cuanto a los resultados de la homogeneización se presentan los gráficos finales de las correcciones realizadas.

5.2.1. Precipitación diaria

De las series de tiempo de precipitación diaria se obtuvieron los gráficos presentados en la figura 13, donde se puede observar, a través del diagrama de cajas (Figura 13a), que existen numerosas anomalías en las series de tiempo de precipitación diaria de las cuatro estaciones consideradas para el presente trabajo de investigación. Al respecto, resaltan tres datos poco lógicos, en la estación 13079 resaltó un dato particularmente anómalo en la fecha 29/06/2011 y en la estación 13150 se detectaron dos datos igual de anómalos en las fechas 30/06/2011 y 09/08/2012, también se observa en el histograma de frecuencia de datos (Figura 13b) que los valores de precipitación más comunes son entre el 0 y 10 mm, en cuanto a la disponibilidad de datos, en la gráfica de número de estaciones con disponibilidad de datos por día (Figura 13c) se observa que la mayor parte del periodo de estudio se presentó disponibilidad de información en las cuatro estaciones con pequeños periodos en los que la disponibilidad solo se presenta en tres estaciones y dos periodos en el año 2012 donde la disponibilidad de información únicamente era en dos estaciones, en la última gráfica (Figura 13d) se observa que las estaciones con mayor disponibilidad de datos fueron las estaciones 13079 y la 13150, la 13115 presentó dos periodos importantes de ausencia de información en 2012 y 2020 y la 13022 tiene una ausencia importante de información entre finales del año 2012 y principios del año 2014.

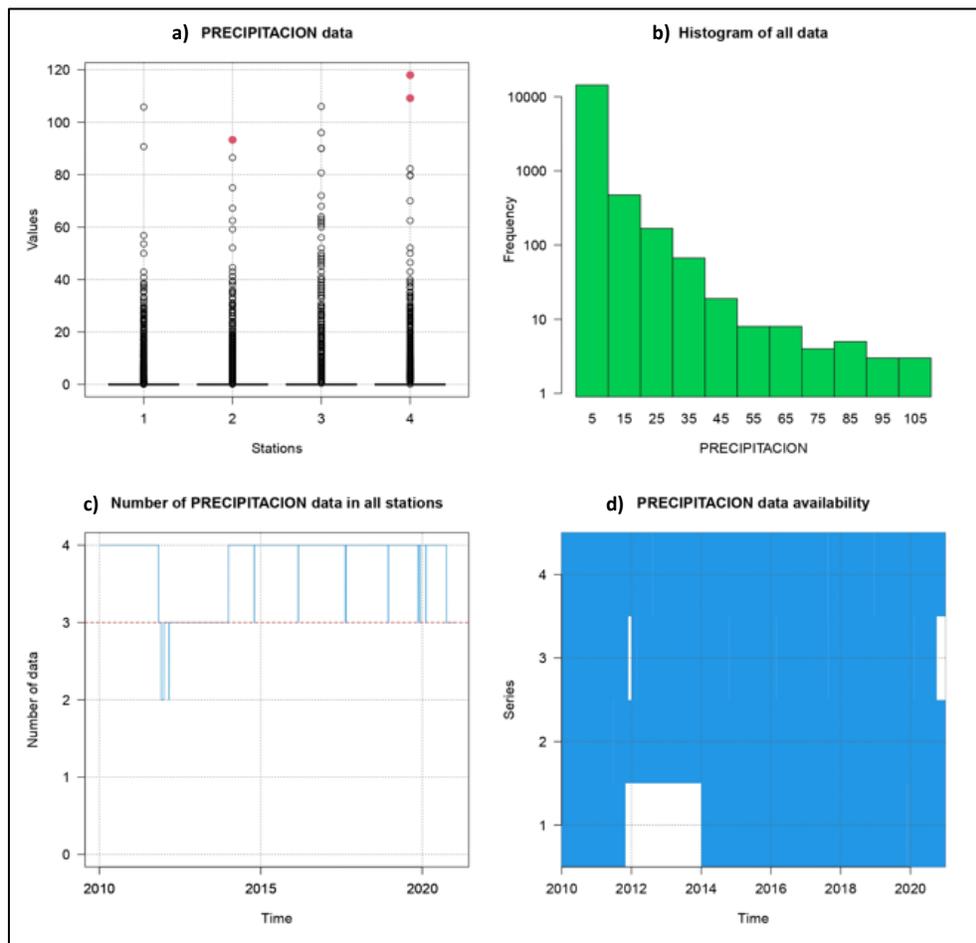


Figura 13. Gráficas resultantes del análisis exploratorio de las series de tiempo de precipitación diaria: a) diagrama de cajas de los datos por estación; b) histograma de frecuencia de los datos de las series de tiempo; c) número de estaciones con disponibilidad de datos por día; y d) disponibilidad de datos por estación.

Fuente: SIH (2010-2020).

Respecto a los resultados de la homogeneización de los datos diarios de precipitación estos se presentan en la figura 14. En estas gráficas la línea negra representa los datos de las series de tiempo que se conservaron, las líneas rojas los datos con los que se rellenaron las ausencias y las líneas verdes los datos corregidos, así es posible observar que la estación 13115 (Figura 14c) es la que recibió la mayor cantidad de correcciones y relleno de datos ausentes, las demás no recibieron correcciones en periodos de tiempo tan largos aunque sí hubo un

rellenado importante de datos, especialmente en la serie de tiempo de la estación 13022 (Figura 14a) entre los años 2011 y 2014.

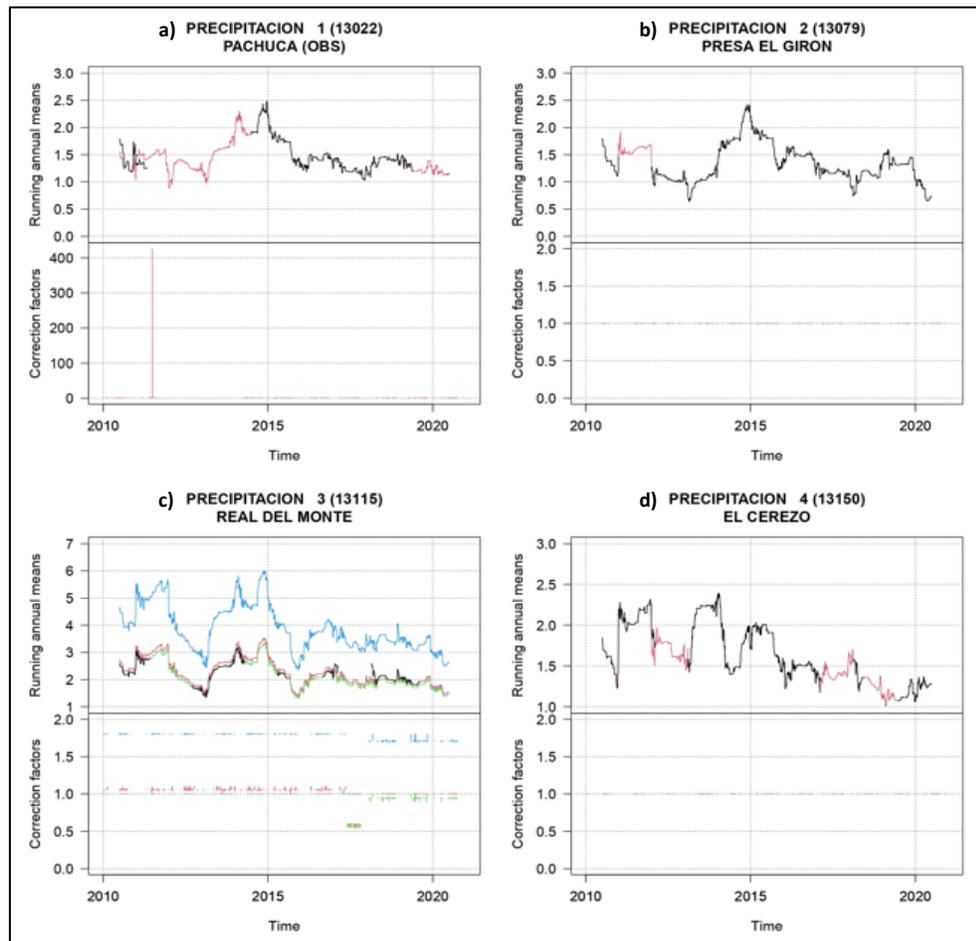


Figura 14. Resultados de la homogeneización de las series de tiempo de precipitación diaria de las estaciones: a) 13022; b) 13079; c) 13115; y d) 13150.

Fuente: SIH (2010-2020).

5.2.2. Precipitación mensual acumulada

El análisis exploratorio de las series de tiempo de precipitación mensual acumulada muestra que se presentó un número significativamente menor de anomalías, siendo

la serie de tiempo de la estación 13022 la que muestra una mayor simetría como se muestra en el gráfico de cajas (Figura 15a), así mismo, el histograma de frecuencia de los datos (Figura 15b) muestra que los datos de precipitación más comunes en las cuatro series de tiempo son entre el 0 y los 50 mm. Respecto a la disponibilidad de datos, en la gráfica de número de estaciones con disponibilidad de datos por mes (Figura 15c) se observa que en la mayor parte del periodo de estudio hay datos disponibles en las 4 estaciones, habiendo disponibilidad en tres estaciones en dos momentos puntuales en 2010 y 2020 y un periodo entre 2012 y 2014 con una ausencia importante de datos en una estación (Figura 15d).

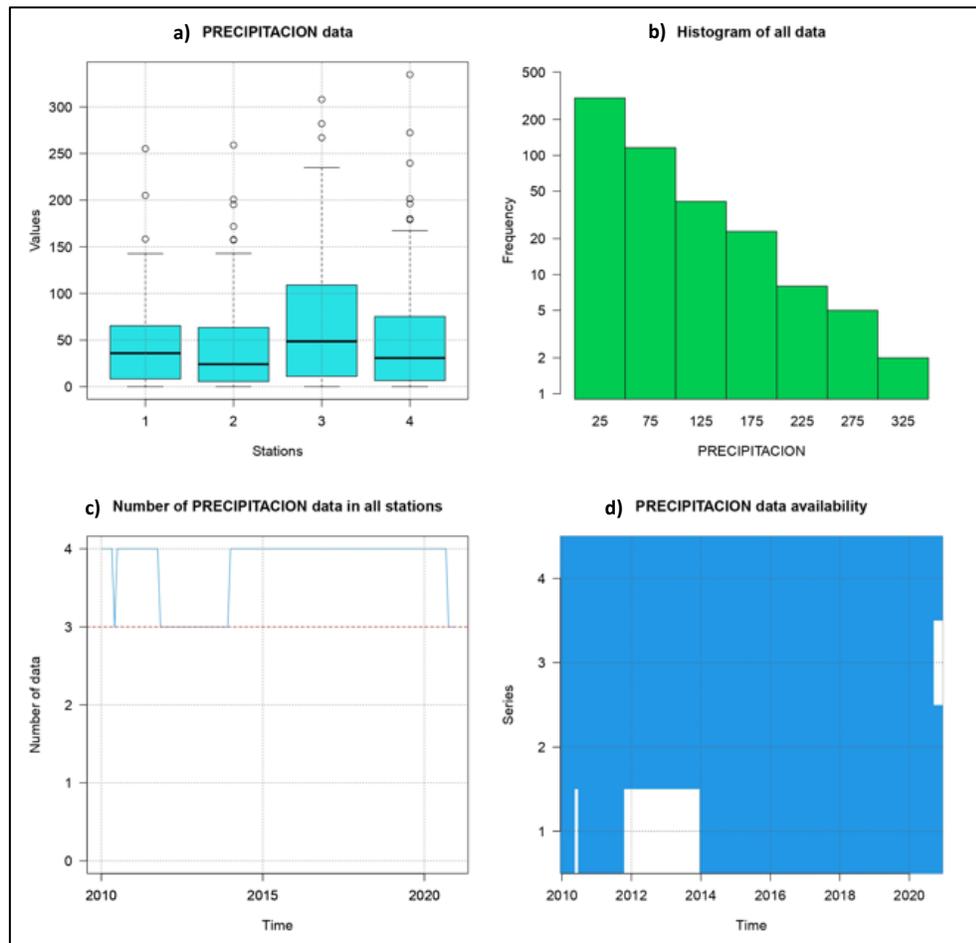


Figura 15. Gráficas resultantes del análisis exploratorio de las series de tiempo de precipitación mensual acumulada: a) diagrama de cajas de los datos por estación; b) histograma de frecuencia

de los datos de las series de tiempo; c) número de estaciones con disponibilidad de datos por día; y d) disponibilidad de datos por estación.

Fuente: SIH (2010-2020).

Como resultado de la homogeneización, la estación 13079 (Figura 16b) no presentó ningún tipo de corrección, las estaciones 13115 (Figura 16c) y la estación 13150 (Figura 16d) tuvieron correcciones importantes entre los años 2012 y 2014, finalmente, la estación 13022 (Figura 16a) es la que tuvo el mayor número de datos ausentes rellenados con algunas correcciones entre los años 2010 y 2011.

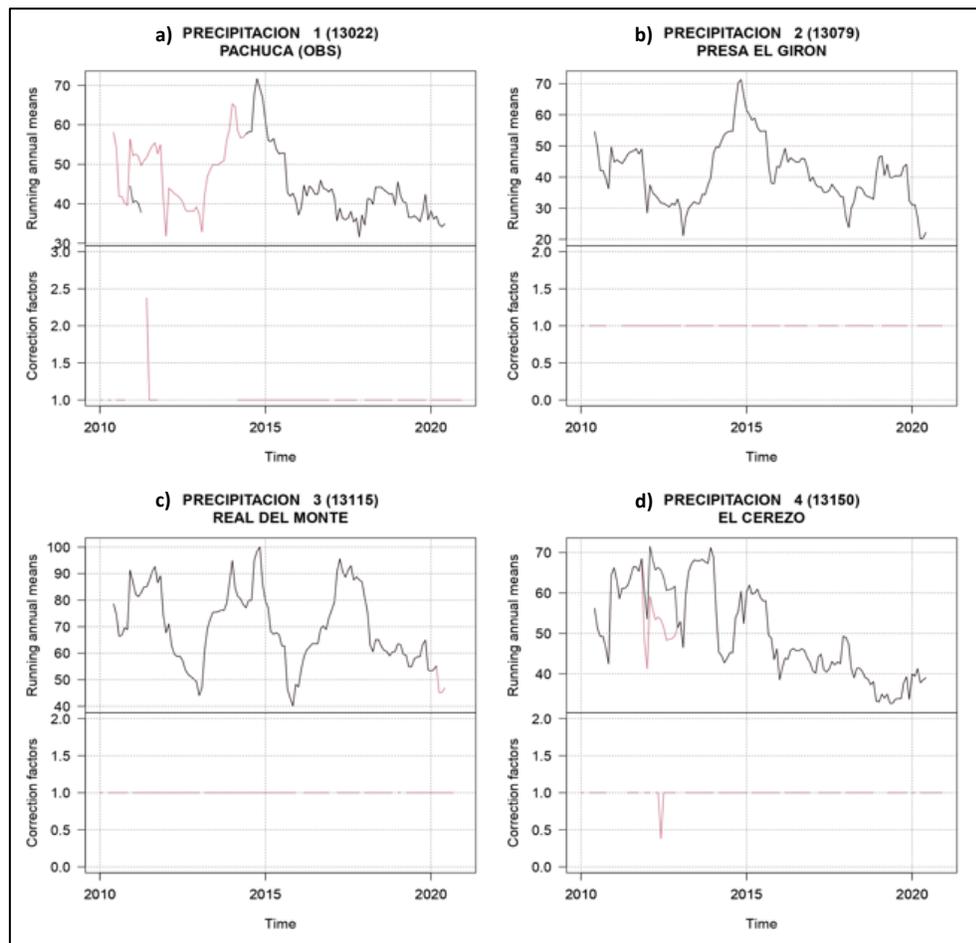


Figura 16. Resultados de la homogeneización de las series de tiempo de precipitación mensual acumulada de las estaciones: a) 13022; b) 13079; c) 13115; y d) 13150.

Fuente: SIH (2010-2020).

5.2.3. Precipitación máxima en 24 horas mensual

En cuanto a los gráficos resultantes del análisis exploratorio, se observan pocas anomalías en las series de tiempo de las cuatro estaciones, siendo las series de tiempo de la estación 13022 y de la 13115 las que tienen mayor simetría como se observa en el gráfico de cajas (Figura 17a), los valores más comunes en el histograma de frecuencias son los que van del 0 a los 10 mm (Figura 17b), en cuanto a la disponibilidad de información, se puede observar en el gráfico de número de estaciones con disponibilidad de datos por mes (Figura 17c) que hay dos momentos puntuales donde solo hay disponibilidad de datos en tres estaciones, en los años 2010, 2020 y en el año 2012, coincidiendo con el periodo de mayor ausencia de datos de la estación 13022 por lo que en ese momento sólo había disponibilidad de datos en tres estaciones, así mismo se observa en el último gráfico (Figura 17d) que hay una disponibilidad total de datos en las estaciones 13079 y 13150 mientras que la estación 13115 presenta dos ausencias de datos en los años 2012 y 2020 y la estación 12022 presenta datos ausentes en un momento del año 2010 y en un periodo amplio entre 2012 y 2014. Estos gráficos se presentan en la figura 17.

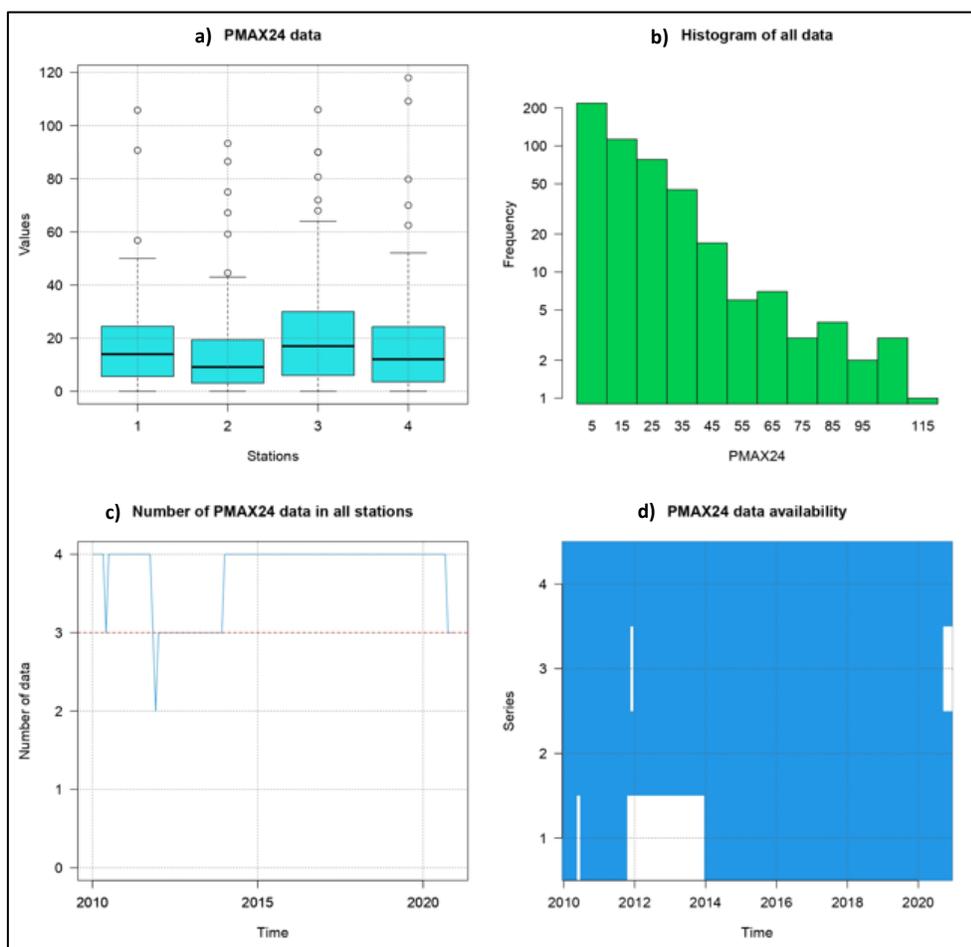


Figura 17. Gráficas resultantes del análisis exploratorio de las series de tiempo de precipitación mensual máxima en 24 horas: a) diagrama de cajas de los datos por estación; b) histograma de frecuencia de los datos de las series de tiempo; y c) número de estaciones con disponibilidad de datos por día d) disponibilidad de datos por estación.

Fuente: SIH (2010-2020).

El resultado de la homogeneización arrojó que no hubo cambios para la serie de tiempo de la estación 13079 (figura 18b), mientras que la estación 13022 (figura 18a) tuvo datos rellenados en el año 2010 y entre los años 2014 y 2014. Respecto a la estación 13115 (figura 18c) se rellenaron datos y se hicieron correcciones entre los años 2011 y 2013, finalmente, la serie de tiempo de la estación 13150 (figura 18d) tuvo dos correcciones importantes entre los años 2012 y 2013, así como entre los años 2015 y 2016.

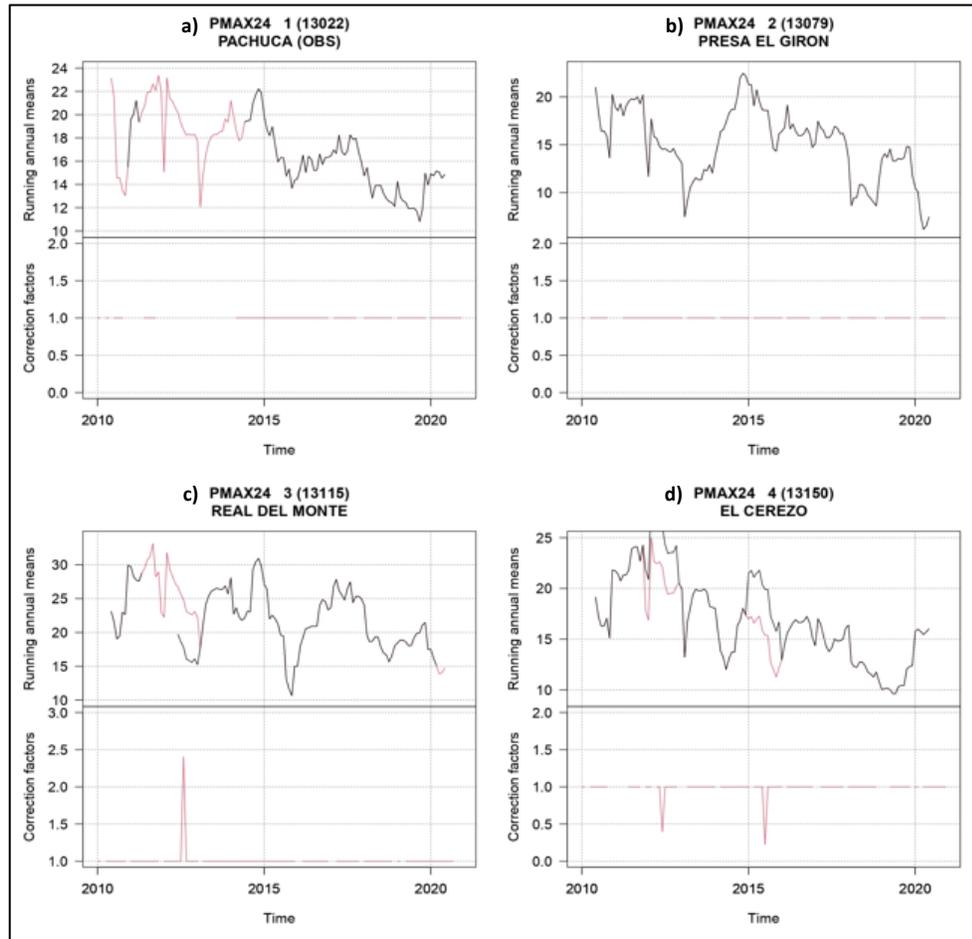


Figura 18. Resultados de la homogeneización de las series de tiempo de precipitación mensual máxima en 24 horas de las estaciones: a) 13022; b) 13079; c) 13115; y d) 13150.

Fuente: SIH (2010-2020).

5.2.4. Precipitación pluvial y avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca

En la figura 19 se observa el resultado de las series de tiempo de precipitación mensual acumulada y precipitación mensual máxima en 24 horas ya homogeneizadas, junto con los meses en los que se presentaron avenidas torrenciales e inundaciones en la Zona Metropolitana de Pachuca. Esto permitió determinar de manera visual si los eventos coinciden con picos de precipitación, lo que brindó indicios del nivel de influencia que tiene en la formación de estos ventos

hidrometeorológicos. Así, en esa figura se identifica que siete de nueve eventos se formaron a partir del año 2015, siendo el periodo de más incidencia entre abril del 2019 y mayo del 2020, esto a pesar de ser un periodo con un notable decremento de la precipitación.

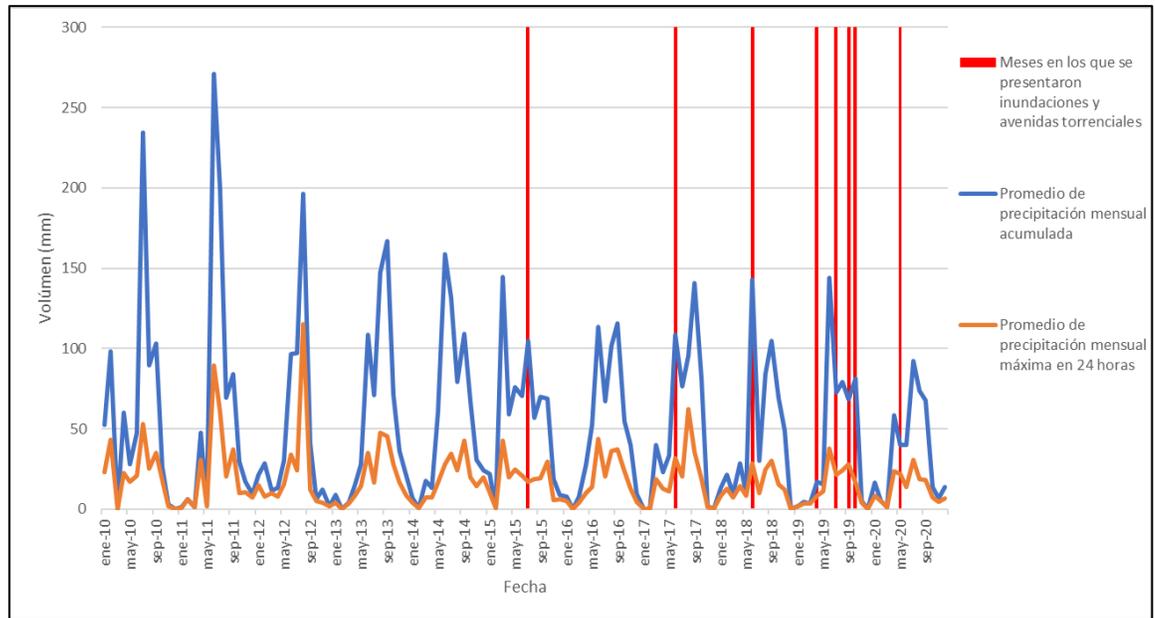


Figura 19. Incidencia de inundaciones y avenidas torrenciales en la Zona Metropolitana de Pachuca entre los años 2010 a 2020.

Fuente: SIH (2010-2020), García (2015), Martín (2017), Hernández (2018), Rincón (2018), Ameth (2019), Redacción Criterio (2019), Sánchez (2019), Santos (2019), Jiménez (2020), Redacción AM (2020), Redacción Quadratín (2020).

Con base en la edición del año 2013 del Atlas de Riesgos del municipio de Pachuca, desde el año 2000 hasta el año de publicación de este instrumento solo se habían presentado dos desastres hidrometeorológicos importantes, esto es, las inundaciones de septiembre del año 2006 y una granizada importante el 31 de enero del año 2011. Asimismo, no se encontró alguna nota periodística que documentara algún tipo de desastre de esta índole hasta julio del 2015, habiendo dos inundaciones similares en los años 2017 y 2018 en el mes de junio y, como se

comentó con anterioridad, es a partir del año 2019 que la situación se agrava a pesar de la notable disminución del volumen de precipitación que coincidió con el periodo donde iniciaron importantes proyectos residenciales en zonas críticas para la hidrología de las microcuencas que inciden en la Zona Metropolitana de Pachuca (Hernández, 2018; Redacción 2023). Por su parte, la precipitación mínima promedio mensual acumulada con la que se han formado eventos de inundaciones y avenidas torrenciales es de 39.68 mm, tal como se presentó en mayo del año 2020, lo que deja ver que la influencia que tiene la precipitación puede ser menor a la influencia de los cambios de coberturas y usos de suelo.

5.3. Estimación de la escorrentía superficial

En este apartado se incluyen los resultados de la estimación de la escorrentía superficial con el uso del modelo de número de curva del servicio de conservación de suelos (CN-SCS, por sus siglas en inglés), empezando por la determinación del número de curva de la microcuenca de Pachuca a partir de las coberturas y usos de suelo que se identificaron año con año dentro de la zona de estudio, así mismo, se presentan los distintos gráficos resultantes de la estimación de la escorrentía superficial y del coeficiente de escurrimiento con la información de precipitación diaria y mensual acumulada.

5.3.1. Determinación del número de curva

Se estimó el número de curva de la microcuenca bajo tres antecedentes de humedad y de los dos supuestos del coeficiente de absorción inicial ($\lambda=0.2$ y $\lambda=0.05$) para cada año entre el 2012 y 2020. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 21, en la cual se observa un crecimiento anual promedio del 0.17 %, siendo el año 2015 con menor crecimiento (0.13 %, 0.09 % y 0.06 % para las condiciones

antecedentes de humedad I, II y III respectivamente) y el año 2020 con mayor crecimiento (0.64 %, 0.36 % y 0.18 % para las condiciones antecedentes de humedad I, II y III respectivamente) bajo el supuesto 1 ($\lambda=0.2$). En cuanto al supuesto 2 ($\lambda=0.05$), el aumento en el número de curva es mayor con un crecimiento anual promedio del 0.25 % y, al igual que en el supuesto 1, el año 2015 presentó el menor crecimiento (0.17 %, 0.13 % y 0.08 % para las condiciones antecedentes de humedad I, II y III respectivamente) y el año 2020 con el mayor crecimiento (1.02 %, 0.56 % y 0.26 % para las condiciones antecedentes de humedad I, II y III respectivamente). En la figura 20 se muestra el crecimiento del número de curva por año.

Tabla 20. Número de curva estimado para la microcuenca de Pachuca

CAH	2012		2013		2014		2015		2016	
	$\Lambda=0.2$	$\Lambda=0.05$								
I	56.80	44.31	56.88	44.40	57.05	44.59	57.13	44.67	57.26	44.81
II	73.64	64.76	73.71	64.85	73.85	65.03	73.92	65.11	74.03	65.26
III	86.35	81.86	86.40	81.93	86.49	82.05	86.54	82.12	86.63	82.24
CAH	2017		2018		2019		2020			
	$\Lambda=0.2$	$\Lambda=0.05$	$\Lambda=0.2$	$\Lambda=0.05$	$\Lambda=0.2$	$\Lambda=0.05$	$\Lambda=0.2$	$\Lambda=0.05$		
I	57.36	44.92	57.53	45.11	57.63	45.23	58.00	45.69		
II	74.12	65.37	74.26	65.55	74.34	65.66	74.61	66.03		
III	86.69	82.33	86.78	82.45	86.84	82.53	86.99	82.74		

Fuente: Airbus (2012-2020).

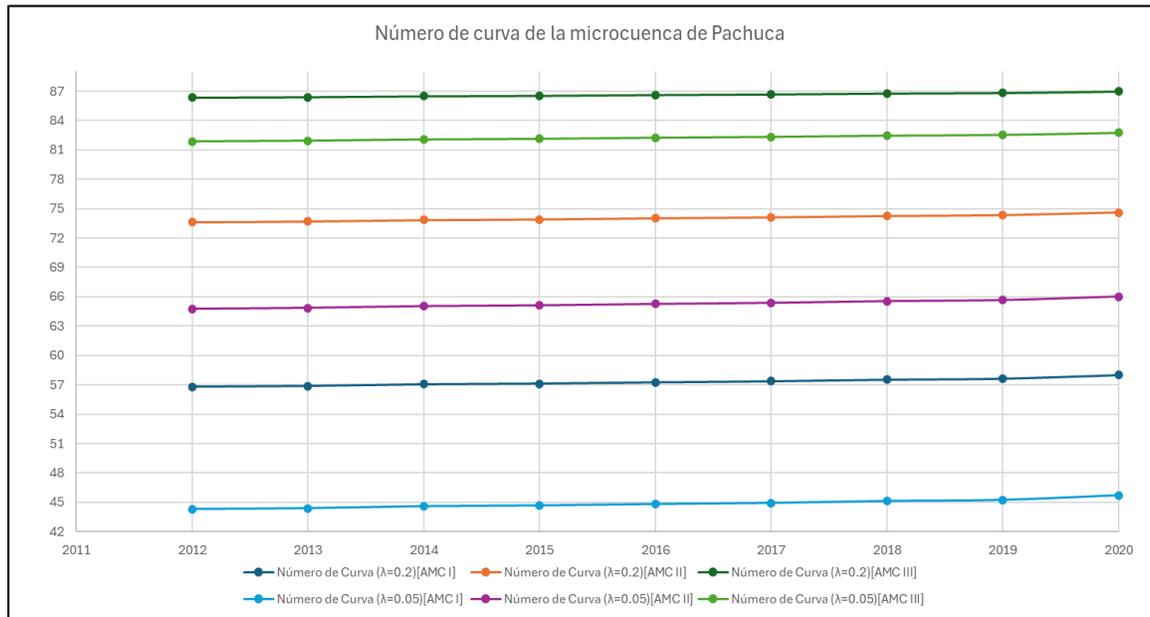


Figura 20. Crecimiento del número de curva de la microcuenca de Pachuca entre los años 2012 a 2020.

Fuente: Airbus (2012-2020).

5.3.2. Estimación de la escorrentía superficial, 2012-2020

Para la estimación de la escorrentía se determinó la condición antecedente de humedad en función de la suma total de la precipitación de los cinco días anteriores del mes o del día del cual se hiciera el cálculo, lo anterior incluyó como referencia la tabla 22 y considerando la fecha del 22 de septiembre como inicio de la temporada durmiente y el 19 de marzo como inicio de la temporada de crecimiento.

Tabla 21. Características de las condiciones antecedentes de humedad

Condición antecedente de humedad	Humedad de suelo	Temporada durmiente	Temporada de crecimiento
I	Seco	<0.05	<1.4
II	Promedio	0.5-1.1	1.4-2.1
III	Cercano a saturación	>1.1	>2.1

Fuente: Bradbury *et al.* (2000).

Los valores de la escorrentía superficial acumulada por mes para los dos supuestos se presentan en la figura 21, donde se puede observar un decremento de la escorrentía mensual acumulada año con año teniendo picos importantes cercanos a las temporadas de lluvia, siendo los picos más elevados en los años 2012 y 2014 y, para el año 2020, el pico alcanzó un valor superior a la mitad del pico más alto en el año 2012, así mismo, los valores del supuesto 1 ($\lambda=0.2$) son ligeramente más altos que en los valores de los picos del supuesto 2($\lambda=0.05$).

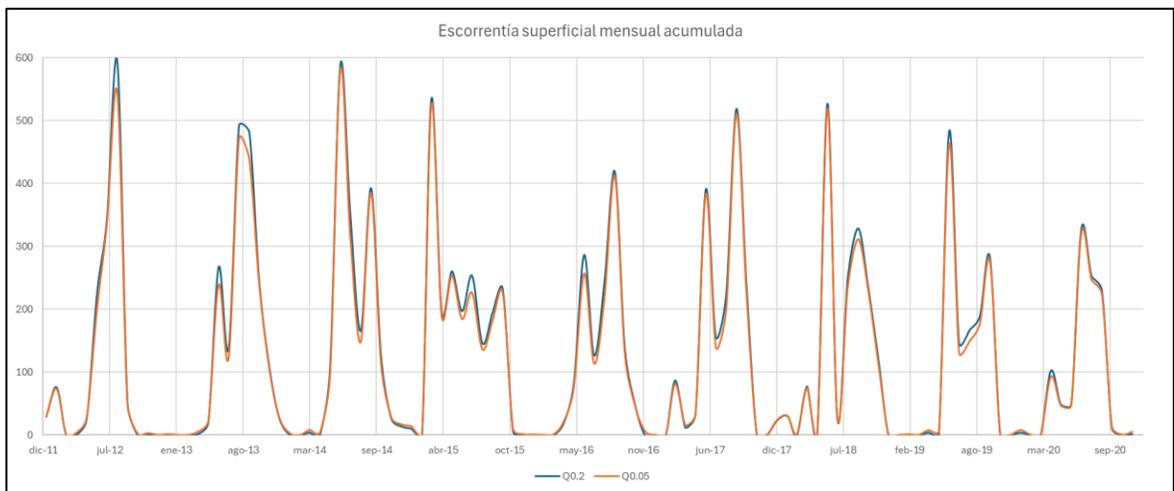


Figura 21. Resultado del cálculo de la escorrentía superficial mensual acumulada en la microcuenca de Pachuca entre 2012 y 2020.

Fuente: Capas vectoriales de usos y coberturas de suelo (2012-2020) y (2011-2020).

En cuanto a la escorrentía superficial diaria, los valores estimados bajo los dos supuestos se presentan en la figura 22, donde no solo se puede observar un decremento más marcado al presentado en el gráfico de la escorrentía superficial acumulada mensual (figura 21), además, se observa menor cantidad de días con lluvia en los años 2019 y 2020. En cuanto a las diferencias entre ambos supuestos, se pueden observar ligeras diferencias en las temporadas de secas, donde la figura 22b muestra valores ligeramente mayores a los que se observan en la figura 22a.

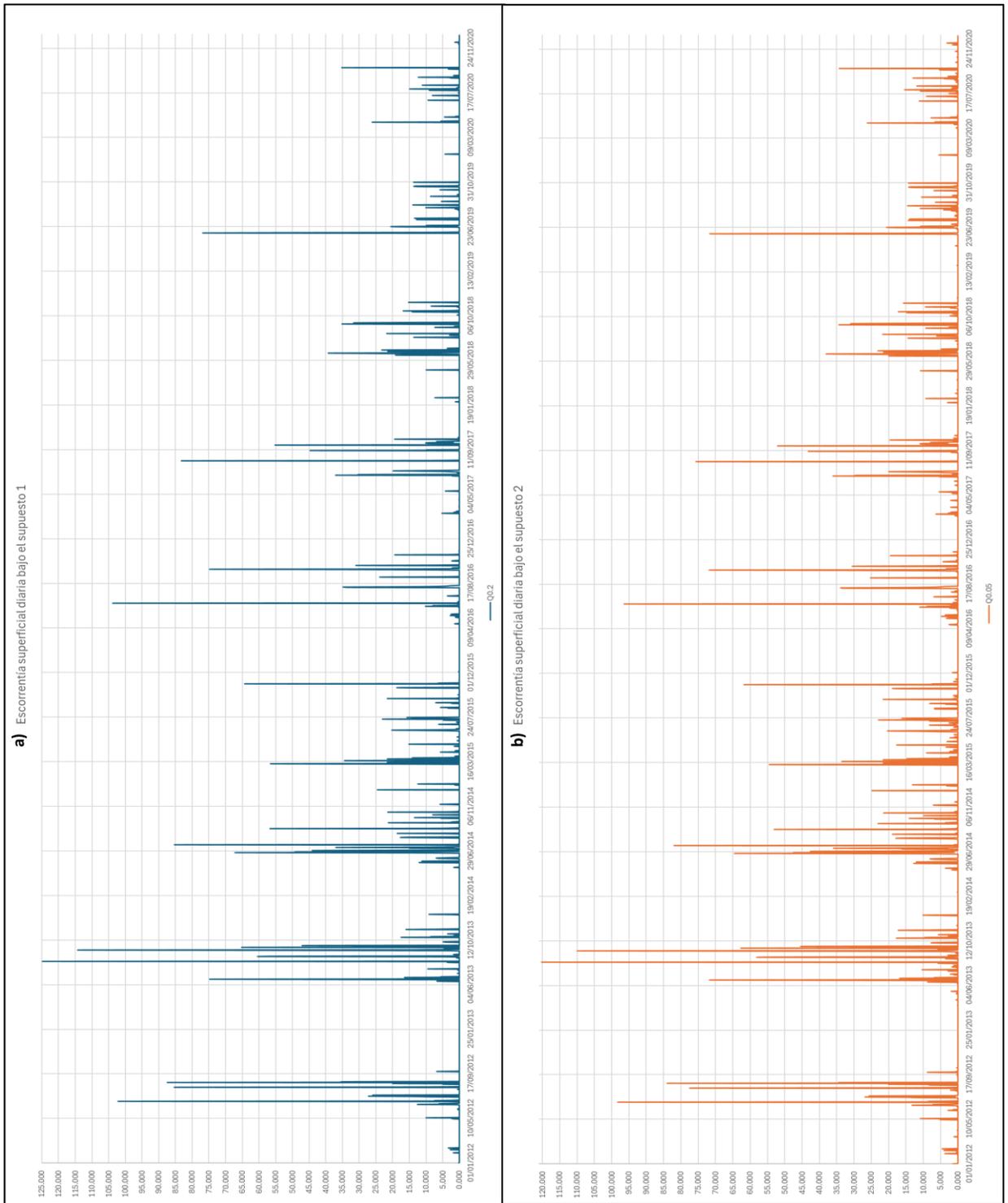


Figura 22. Resultado del cálculo de la escorrentía superficial diaria en la microcuenca de Pachuca entre 2012 y 2020 bajo a) el supuesto 1 ($\lambda=0.2$) y b) el supuesto 2 ($\lambda=0.05$).

Fuente: Capas vectoriales de usos y coberturas de suelo (2012-2020) y SIH (2011-2020).

5.3.3. Estimación del coeficiente de escurrimiento

Respecto al coeficiente de escurrimiento por mes, la figura 23 muestra una tendencia distinta a la escorrentía superficial mensual, pues, a pesar de que los últimos años del periodo de estudio fueron años con valores significativamente menores a los de los primeros años, el coeficiente de escurrimiento mantiene valores altos (mayores a 0.8) en cada temporada de lluvias. Además, se observan ligeras diferencias entre los dos supuestos, ya que el supuesto 1 ($\lambda=0.2$) mantiene valores más altos a los del supuesto 2 ($\lambda=0.05$) en los picos más cercanos al 1, mientras que en los periodos más cercanos a 0 es el supuesto 2 el que mantiene valores más elevados al supuesto 1.

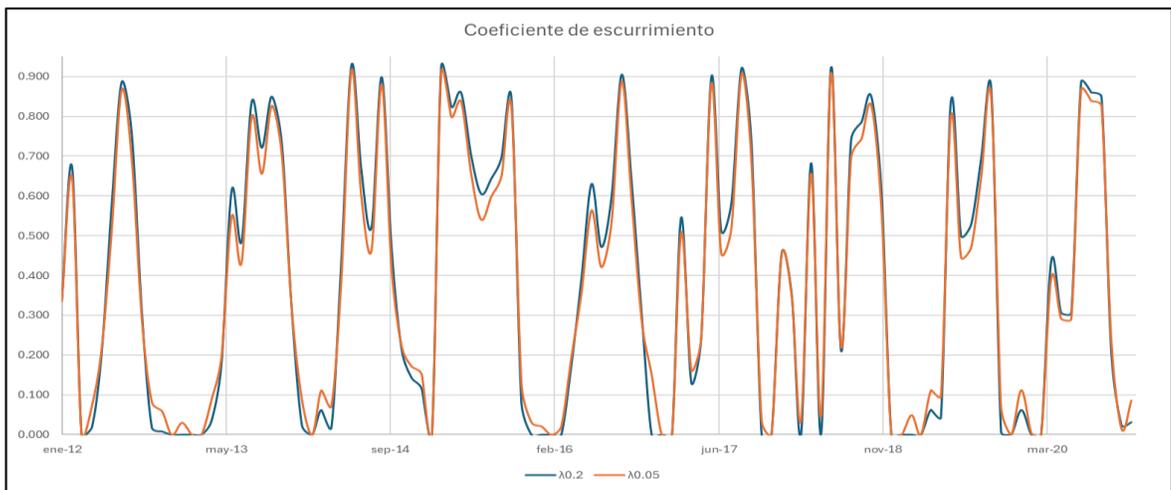


Figura 23. Resultado del cálculo del coeficiente de escurrimiento mensual acumulada en la microcuenca de Pachuca entre 2012 y 2020.

Fuente: Capas vectoriales de usos y coberturas de suelo (2012-2020) y SIH (2011-2020).

En cuanto al coeficiente de escurrimiento por día, se observa una tendencia relativamente clara, aunque los valores son ligeramente menores en los últimos años del periodo de estudio respecto a los primeros. Asimismo, entre los dos

supuestos, en la figura 24b los valores son mayores a los que se observan en la figura 24a, teniendo picos pronunciados que llegan hasta el 1, y valores mayores en los periodos de secas con periodos más cortos con 0 absoluto.

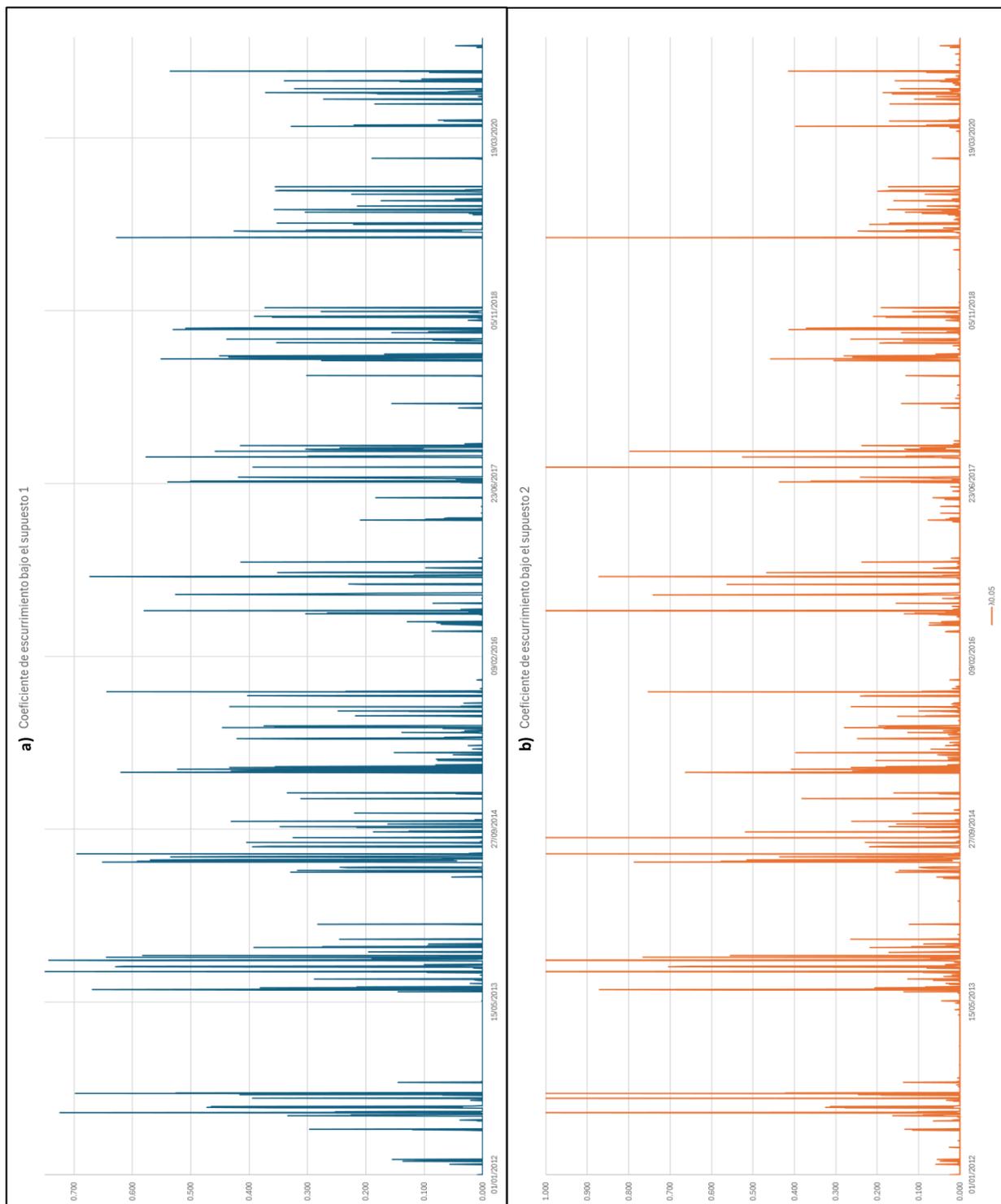


Figura 24. Resultado del cálculo del coeficiente de escurrimiento diario en la microcuenca de Pachuca entre 2012 y 2020 bajo a) el supuesto 1 y b) el supuesto 2.

Fuente: Capas vectoriales de usos y coberturas de suelo (2012-2020) y SIH (2011-2020).

5.4. Efectos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la escorrentía superficial de la Microcuenca de Pachuca

La estimación de la escorrentía superficial sigue una tendencia similar a lo observado en las series de tiempo de precipitación, ya que año con año es menor el volumen escurrido y no parece explicar el fenómeno de la formación de avenidas torrenciales en la zona de estudio. Sin embargo, en los dos supuestos, el coeficiente de escurrimiento, tanto mensual acumulado como diario, denotan una tendencia completamente distinta, ya que pese a que disminuye la lluvia año con año, la proporción del agua que escurre se mantiene con valores similares, lo que indica que la capacidad que tiene la microcuenca de infiltrar y retener el agua es mucho menor, esto se puede explicar no sólo por el crecimiento constante de los asentamientos humanos y los suelos descubiertos, sino también por el patrón de crecimiento que tiene al no seguir una lógica de ordenamiento.

5.4.1. Mapeo de las llanuras aluviales por evento de inundaciones y avenidas torrenciales

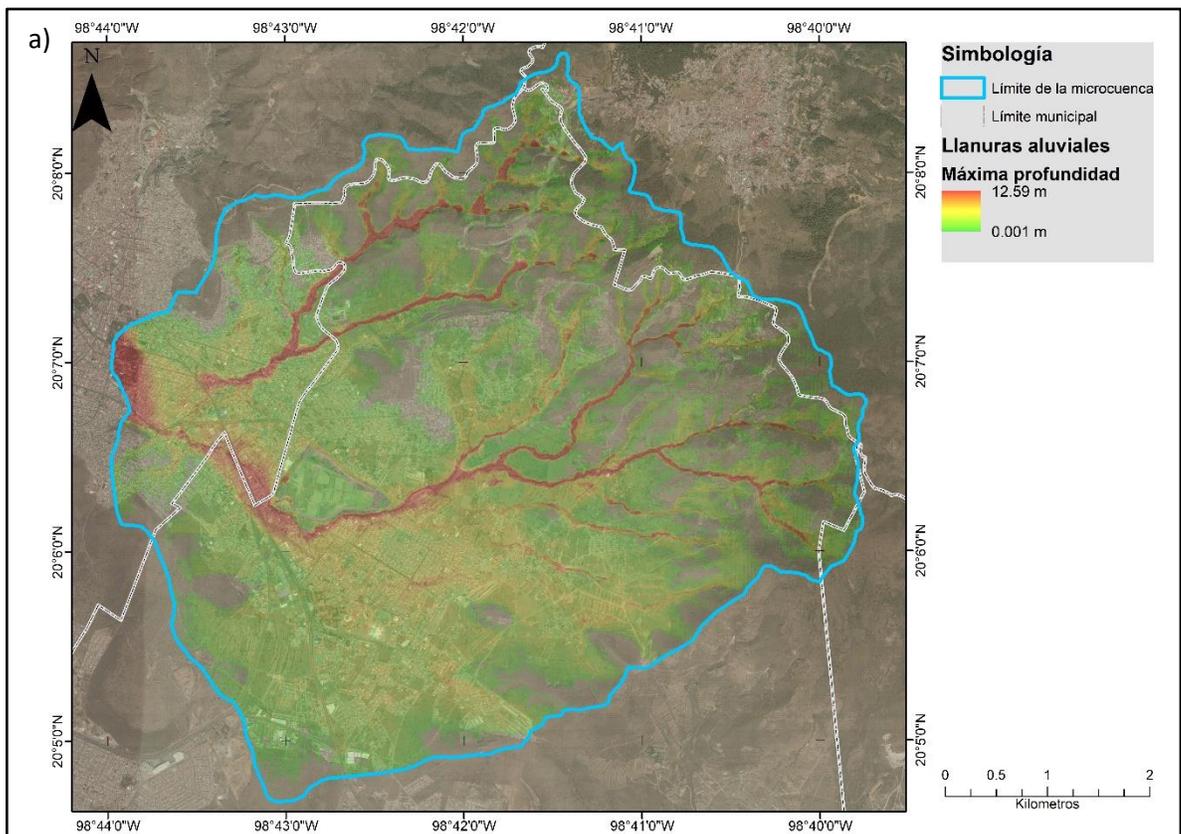
La modelación bidimensional de los procesos de inundaciones y avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca con el software HEC-RAS dio como resultado seis capas ráster de profundidad máxima, estas capas permiten identificar las zonas más afectadas durante esta clase de desastres hidrometeorológicos, en esta sección se presentan los resultados de dichas modelaciones, así como las zonas visualmente más afectadas.

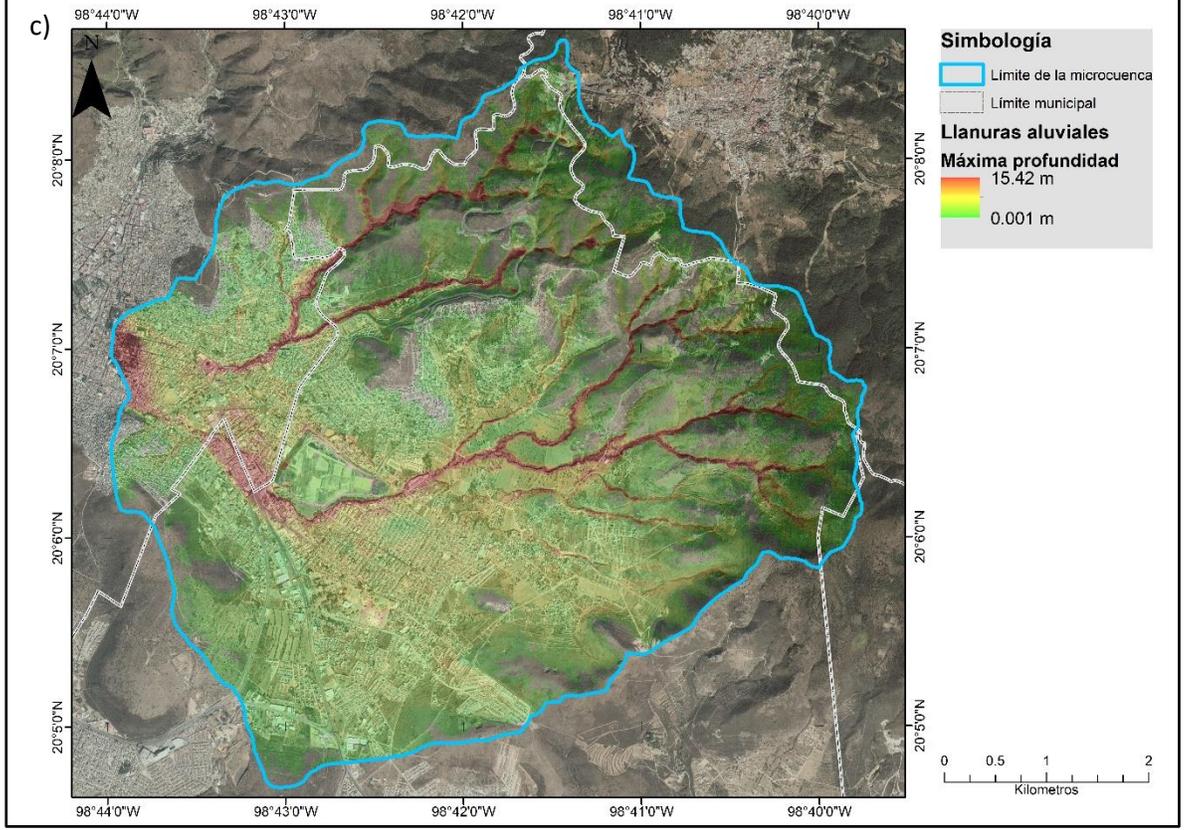
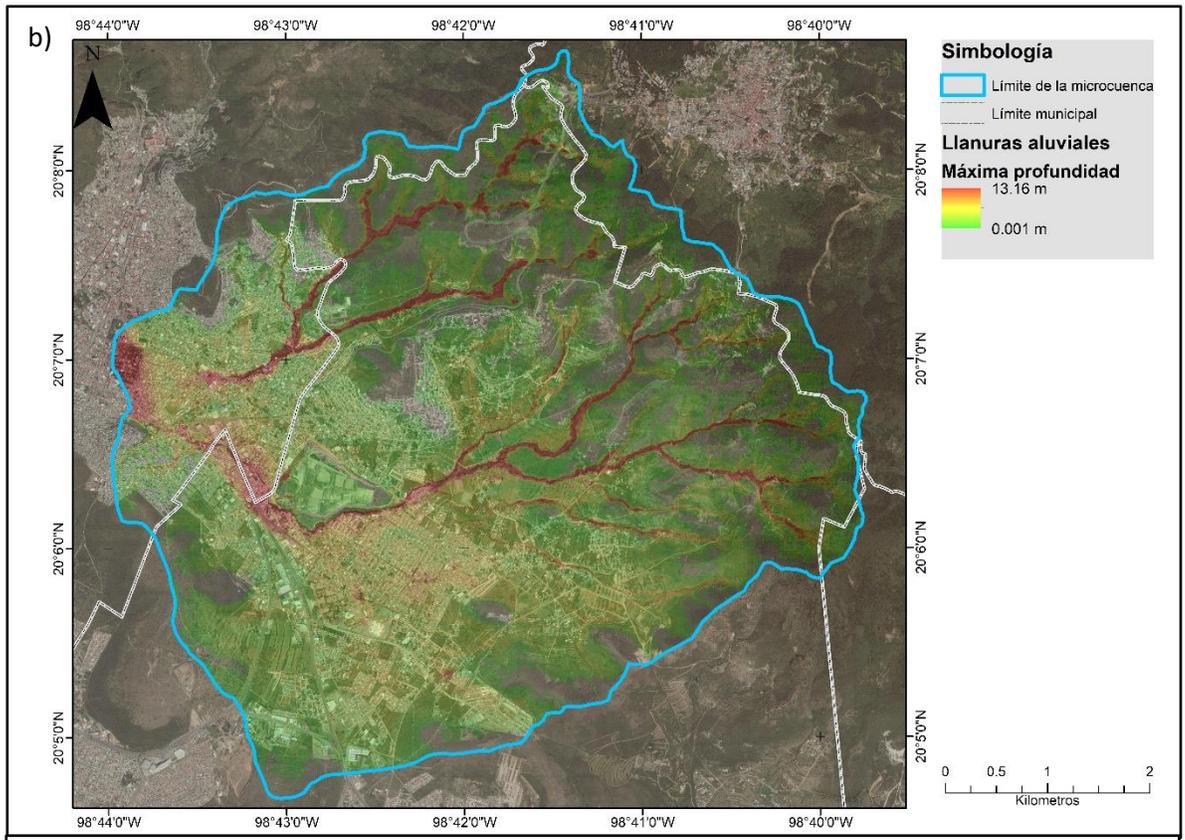
Así, resultado de la revisión hemerográfica se identificaron 10 eventos de inundación y avenidas torrenciales entre los años 2015 a 2020 por lo que se realizaron las modelaciones con la información climatológica de los siguientes periodos: 1) 1 julio

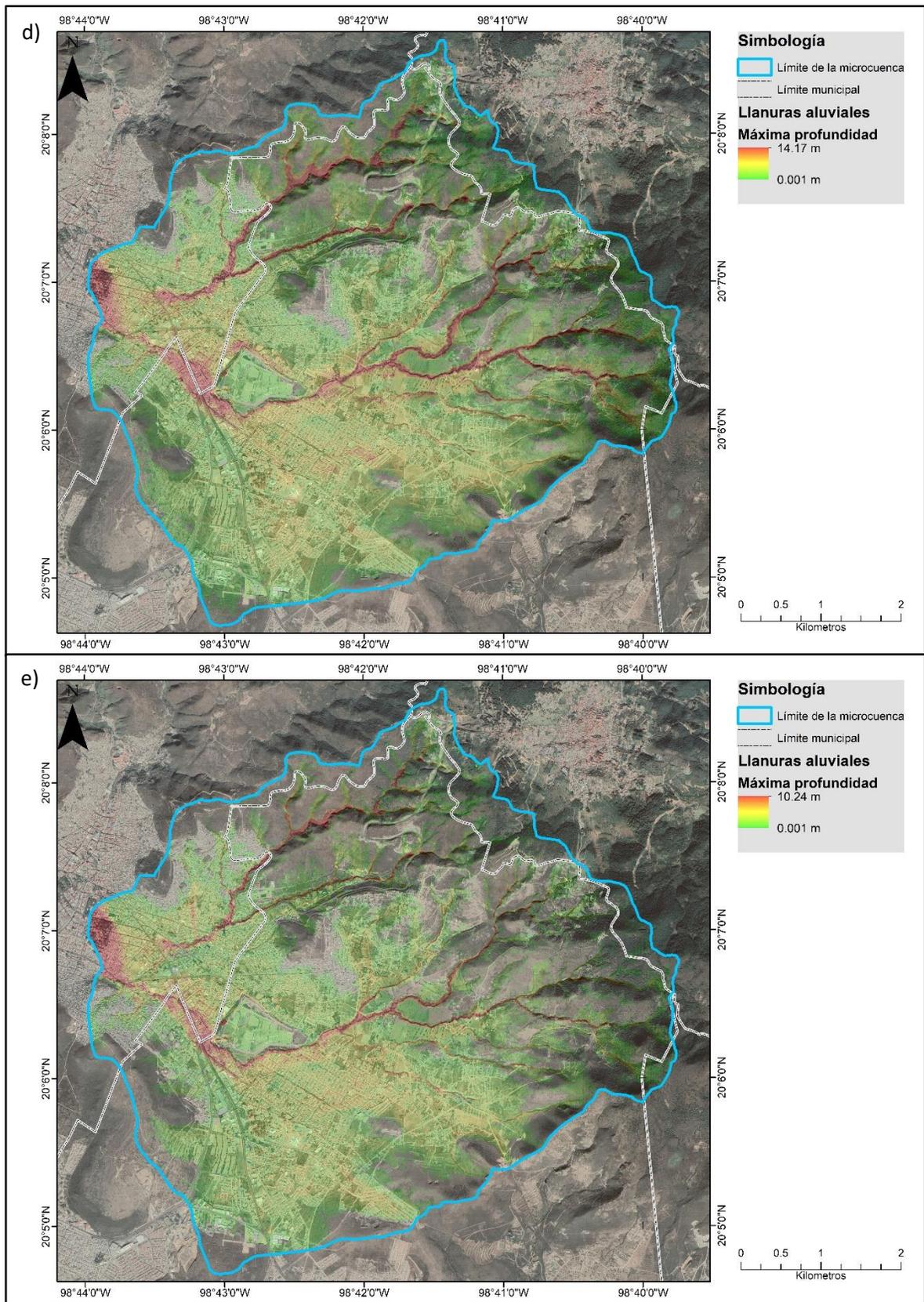
a 8 de octubre del 2015 2) 1 de junio a 8 de septiembre del 2017 3) 1 de junio a 8 de septiembre del 2018 4) 01 de abril al 08 de julio del 2019 5) 9 julio a 15 de octubre del 2019 y 6) 1 de mayo a 8 de agosto del 2020.

El software HEC-RAS genera tres productos de las modelaciones una capa de la elevación de la superficie del agua, una capa de la velocidad de flujo y una capa de máxima profundidad; es este último producto el que se utiliza para identificar las zonas afectadas por los procesos de inundaciones y avenidas torrenciales.

Las capas de máxima profundidad se presentan en los mapas de la figura 25 donde la profundidad va de los 0.001 metros a los 15.42 metros en la capa del evento 3 (1 de junio a 8 de septiembre del 2018), siendo la capa del evento 6 (1 de mayo a 8 de agosto del 2020) la que tiene la profundidad máxima más baja con 12.24 metros.







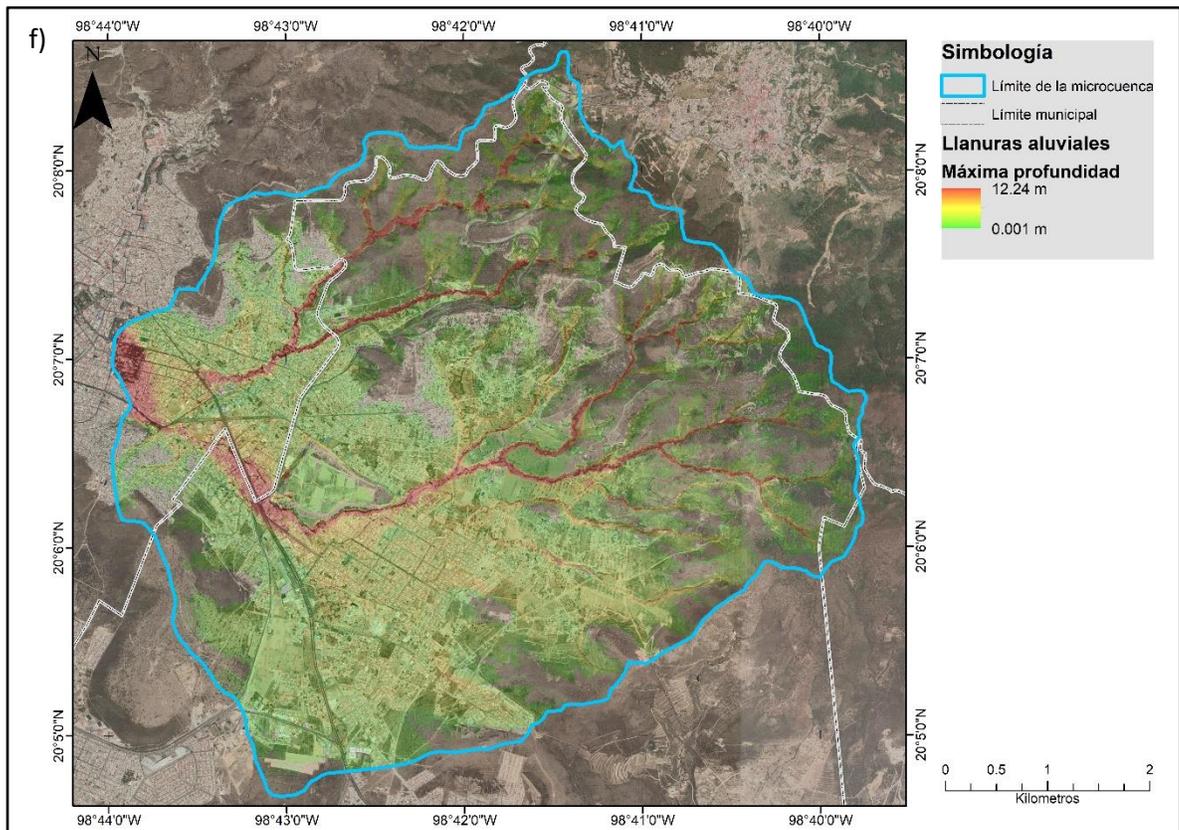


Figura 25. Resultado de las modelaciones de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca de los años 2015(a), 2017(b), 2018(c), primer semestre del 2019(d), segundo semestre del 2019(e) y 2020(f).

Fuente: Capas vectoriales de número de curva (2015-2020) y EOSDA (2023).

5.4.2. Zonas de mayor afectación tras los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales

Con las capas ráster de máxima profundidad con transparencia al 55 % se realizó un empalme para identificar las zonas que fueron más afectadas por los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales como se muestra en la figura 32 donde se puede observar las ocho localidades mayormente afectadas: Álamo Rustico, Azoyalta de Ocampo, Campestre Villas del Álamo, Dos Carlos Pueblo Nuevo, el Huizachal y la Unidad Minera 11 de Julio; las colonias el Álamo, Carboneras,

Carboneras Fraccionamiento, Campestre Villas del Álamo (FOVISSSTE), Paseo de las Reynas, Paseo de las Reynas I, Privada del Álamo, Privada del Álamo II, Rinconada los Álamos, Villas del Álamo y Taxistas presentan una afectación media y, finalmente, las colonias Abundio Martínez, Lomas Portezuelo y el Portezuelo, presentan una afectación baja.

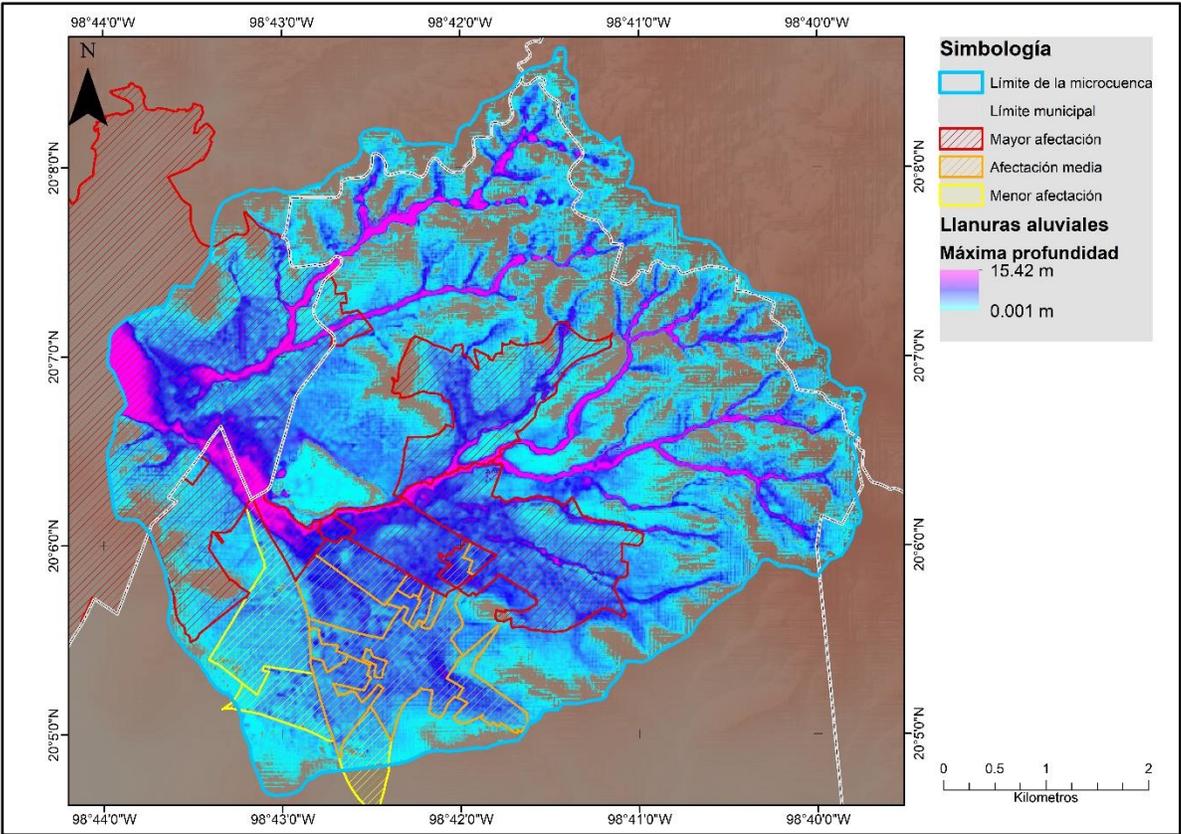


Figura 32. Empalme de las capas ráster resultantes de las modelaciones de los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca.

Fuente: Capas vectoriales de número de curva (2015-2020), conjunto de datos vectoriales de información topográfica Serie III (INEGI, 2019a) y el modelo digital de elevación de 4.47 metros por píxel (EOSDA, 2023).

5.4.3. Identificación de resultados

Con el fin de identificar los resultados de la modelación de las planicies aluviales se realizaron recorridos en campo el viernes 22 de marzo del 2024 donde se recorrieron algunos puntos sobre los cauces principales con el fin de observar la clase de sedimentos que arrastran estas corrientes y la cantidad de agua que escurre. En este sentido, se utilizaron caudales de muestra aun cuando es temporada de sequía, a pesar de ello se logró identificar cantos rodados que sugiere la congruencia con la información obtenida en la modelación.

En la figura 26 se observan algunas de fotografías del primer punto visitado durante el recorrido, ubicado sobre el cauce del río Azoyatla, en el cual se pudo observar un caudal constante, con una profundidad no menor a los 15 centímetros, así como algunos cantos rodados sin sedimento fino asentado en el fondo del río.

En el segundo sitio visitado, ubicado al norte del primer punto, y sobre el mismo cauce, se identificaron condiciones similares a las observadas en el sitio anterior como se puede apreciar en la figura 27.



Figura 26. Cauce del río Azoyatla.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 27. Cauze del río Azoyatla.

Fuente: Elaboración propia.

Para el tercer sitio, en la conjunción de los ríos azoyatla y barranca Xalapa, se observó una profundidad menor, pero con un flujo constante proveniente únicamente del río Azoyatla, el cual se encuentra entubado en algunas porciones, como se observa en la figura 28.



Figura 28. Conjunción del río Azoyatla y barranca Xalapa.

Fuente: Elaboración propia.

En el cuarto sitio, en la conjunción del río Sosa y el río San Lunes, se encuentra entubado, como se observa en la figura 29, por lo que no se pudieron observar ninguna de las características del cauce, la situación fue la misma en el quinto sitio, ubicado un kilómetro al sur del sitio anterior, en la figura 30 se puede avistar los argumentos mencionados.



Figura 29. Conjunción del río Sosa y río San Lunes.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 30. Conjunción del río Sosa y Río San Lunes.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en el último sitio, la conjunción de los ríos Sosa y Azoyatla, un kilómetro antes de que deriven en el río de las avenidas, se pudo observar un caudal permanente con una profundidad no menor a los 20 cm, así mismo se observaron cantos rodados y una velocidad notable, las imágenes de este sitio se presentan en la figura 31, considerando lo observado en el último punto visitado es posible considerar como adecuado el resultado obtenido durante esta fase del proceso metodológico.



Figura 31. Conjunción del río Sosa y Azoyatla.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Determinación de las zonas vulnerables a avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca

En esta sección se presentan los mapas resultantes de la estimación de los tres índices de vulnerabilidad por manzana que se utilizaron en la presente investigación y se describen las implicaciones que esto puede tener en eventos de avenidas torrenciales e inundaciones.

5.5.1. Vulnerabilidad social, estructural y por tipo de vivienda en la Microcuenca de Pachuca

En cuanto a la vulnerabilidad social, las manzanas con un grado de vulnerabilidad muy alto representan el 4.06 % (465 manzanas), las de vulnerabilidad alta el 7.39 % (864 manzanas), las de vulnerabilidad media el 16.38 % (1,875 manzanas), las de vulnerabilidad baja el 23.63 % (2,704 manzanas), las de vulnerabilidad muy baja el 28.06 % (3,211 manzanas); el 20.48 % (2,344 manzanas) no presenta información disponible en cuanto a este rubro. En la figura 33 se observa el grado de vulnerabilidad social por manzanas urbanas de la microcuenca de Pachuca.

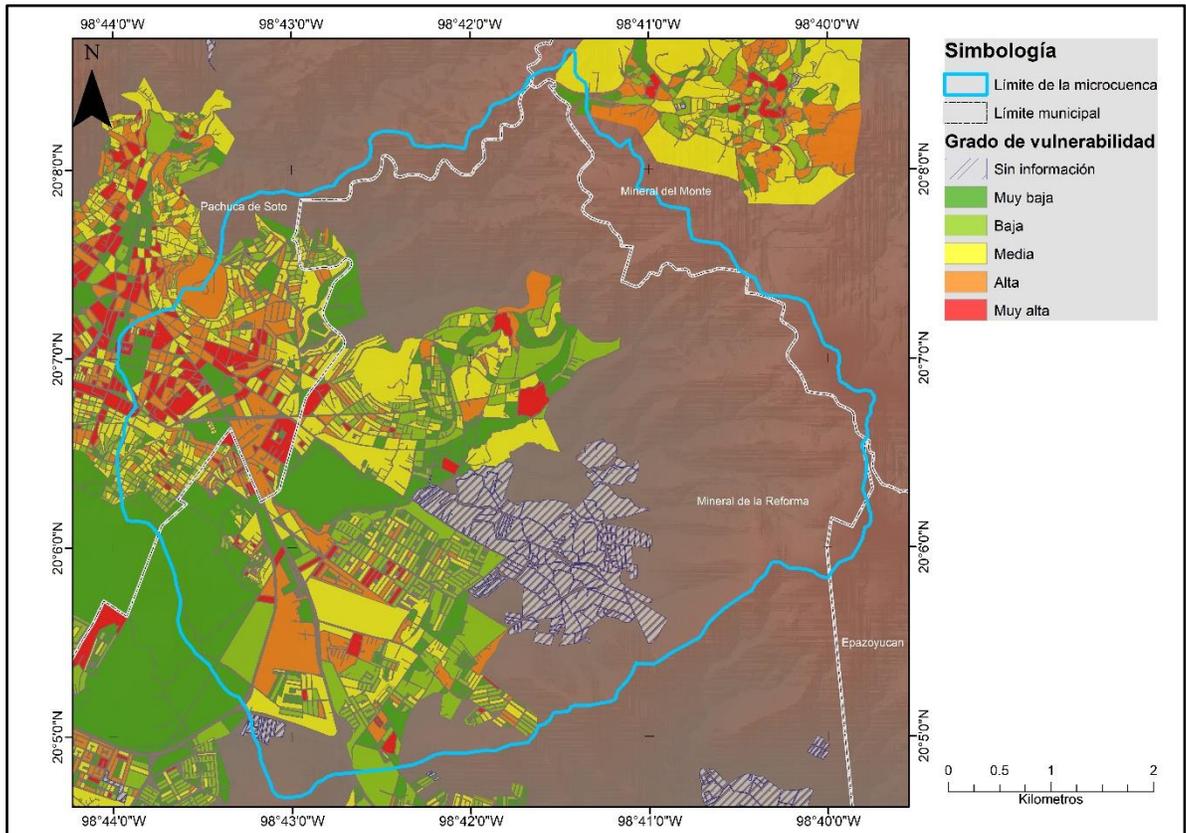


Figura 33. Resultado del cálculo del índice de vulnerabilidad social por manzana.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

La estimación del índice de vulnerabilidad estructural por manzana, determinada por el porcentaje de viviendas sin luz eléctrica, piso de tierra y sin acceso a agua entubada respecto al total de hogares por manzana, presenta resultados más homogéneos, ya que el 77.89 % (8,914 manzanas) presentan un grado de vulnerabilidad muy baja, seguido por el 1.03 % (118 manzanas) con el grado de vulnerabilidad muy alto, el 0.32 % (37 manzanas) presenta vulnerabilidad baja, el 0.16 % (18 manzanas) tiene vulnerabilidad media y el 0.12 % (14 manzanas) presentan vulnerabilidad alta; el 20.48 % (2,344 manzanas) no presenta información disponible respecto a este rubro. Al respecto, en la figura 34 se observa el grado de vulnerabilidad estructural por manzanas urbanas de la microcuenca de Pachuca.

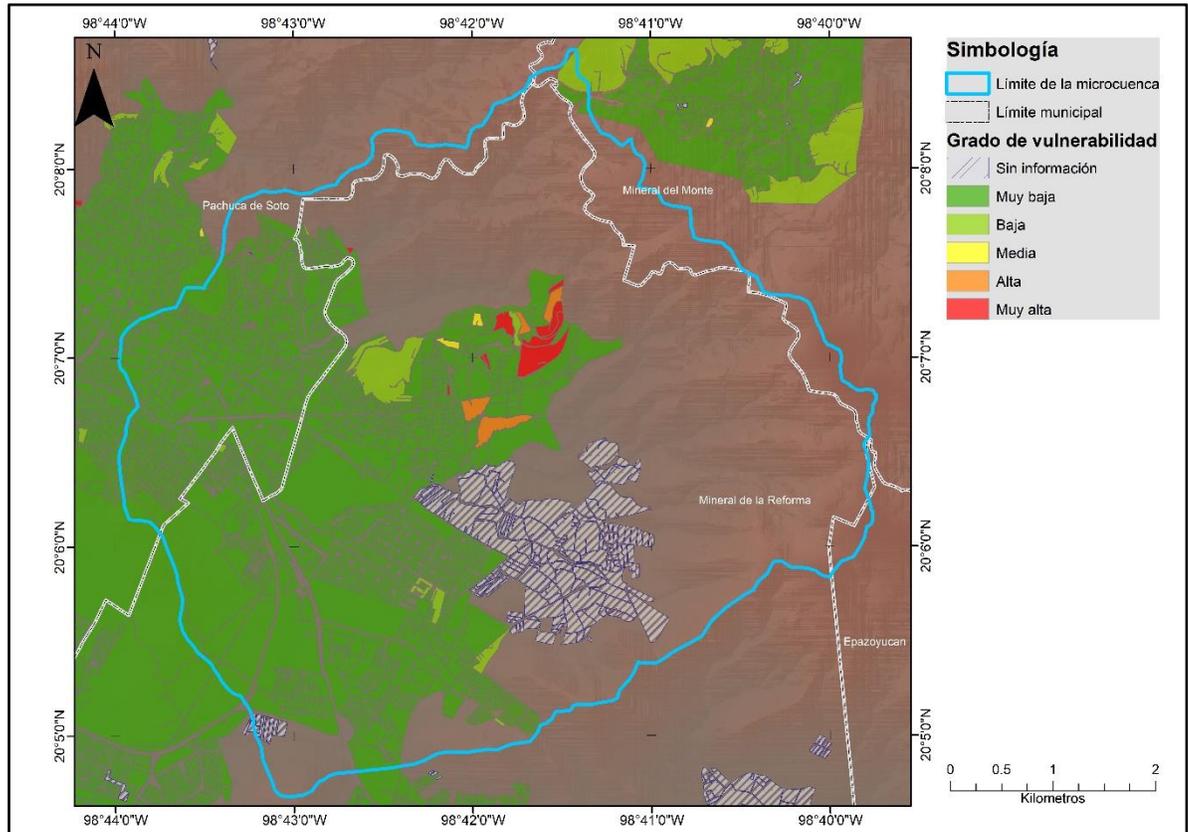


Figura 34. Resultado del cálculo del índice de vulnerabilidad estructural por manzana.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

Finalmente, el índice de vulnerabilidad por tipo de vivienda (Figura 35) señaló que el 53.32 % (6,103 manzanas) albergan mayoritariamente viviendas de tipo IV (riesgo bajo) donde más del 50 % son de al menos tres cuartos y más del 40 % de la población es económicamente activa, le sigue el 5.29 % (606 manzanas) con viviendas mayoritariamente de tipo III, donde más del 50 % tienen al menos tres cuarto y menos del 40 % de la población es económicamente activa (riesgo medio), el 3.71 % (425 manzanas) albergan, en su mayoría, viviendas de tipo II (riesgo alto) donde al menos 20 % son de dos cuartos y el 0.93 % (107 manzanas) de las manzanas albergan mayoritariamente viviendas de tipo I (riesgo muy alto), donde al menos el 20 % son viviendas de un solo cuarto; el 36.73 % (4,204 manzanas) no presenta información disponible respecto a este rubro.

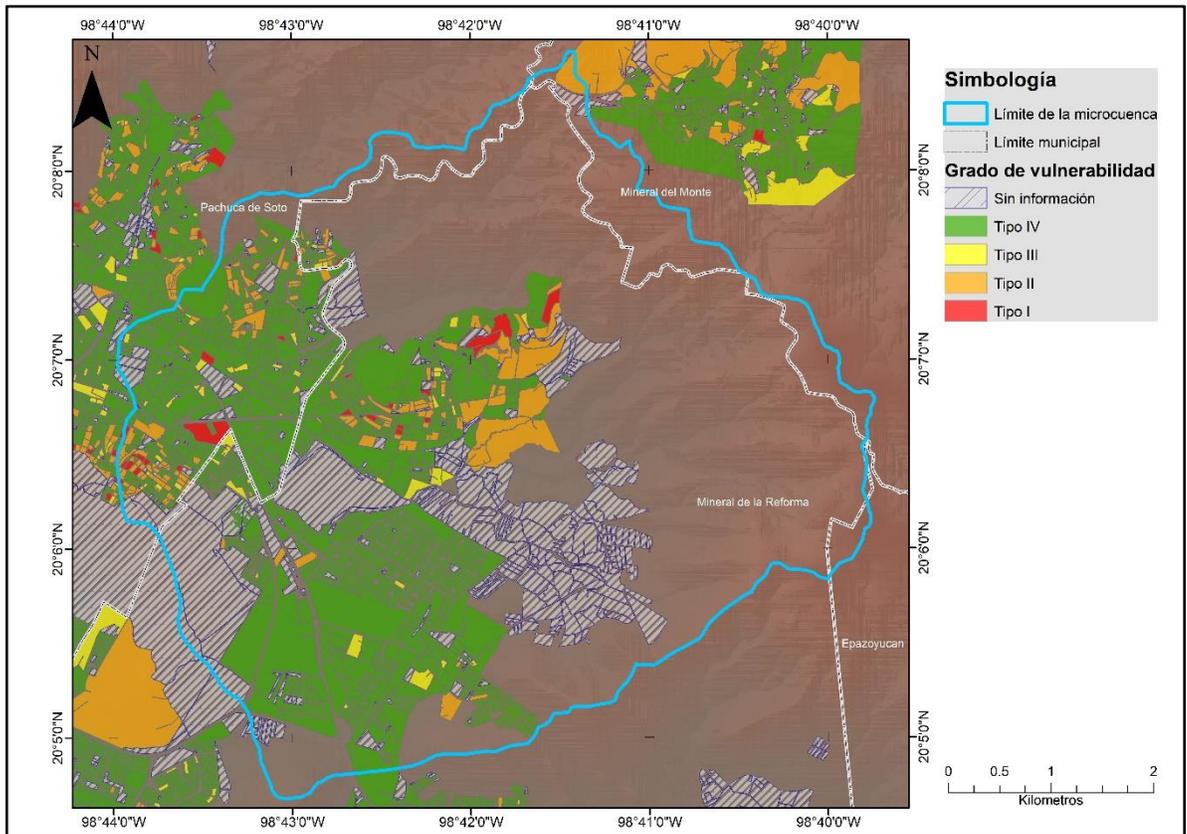


Figura 35. Resultado del cálculo del índice de vulnerabilidad por tipo de vivienda por manzana.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

5.5.2. Implicaciones de los distintos grados de vulnerabilidad en la microcuenca de Pachuca

En la figura 36 se observa el resultado del empalme entre avenidas torrenciales, inundaciones y vulnerabilidad social, a lo cual se agrega un nuevo matiz que, en algunos casos, intensifica el grado de vulnerabilidad ante las avenidas torrenciales, como es el caso de la zona inmediata al exutorio de la microcuenca donde hay una densidad poblacional importante y se concentran varias manzanas con un grado de vulnerabilidad social de medio a muy alto, lo que indica que indica que más de una tercera parte de esa población son niños, adultos mayores y personas con algún

tipo de discapacidad, se da un caso similar en las conjunciones de los cauces principales y en la zona sur de la microcuenca.

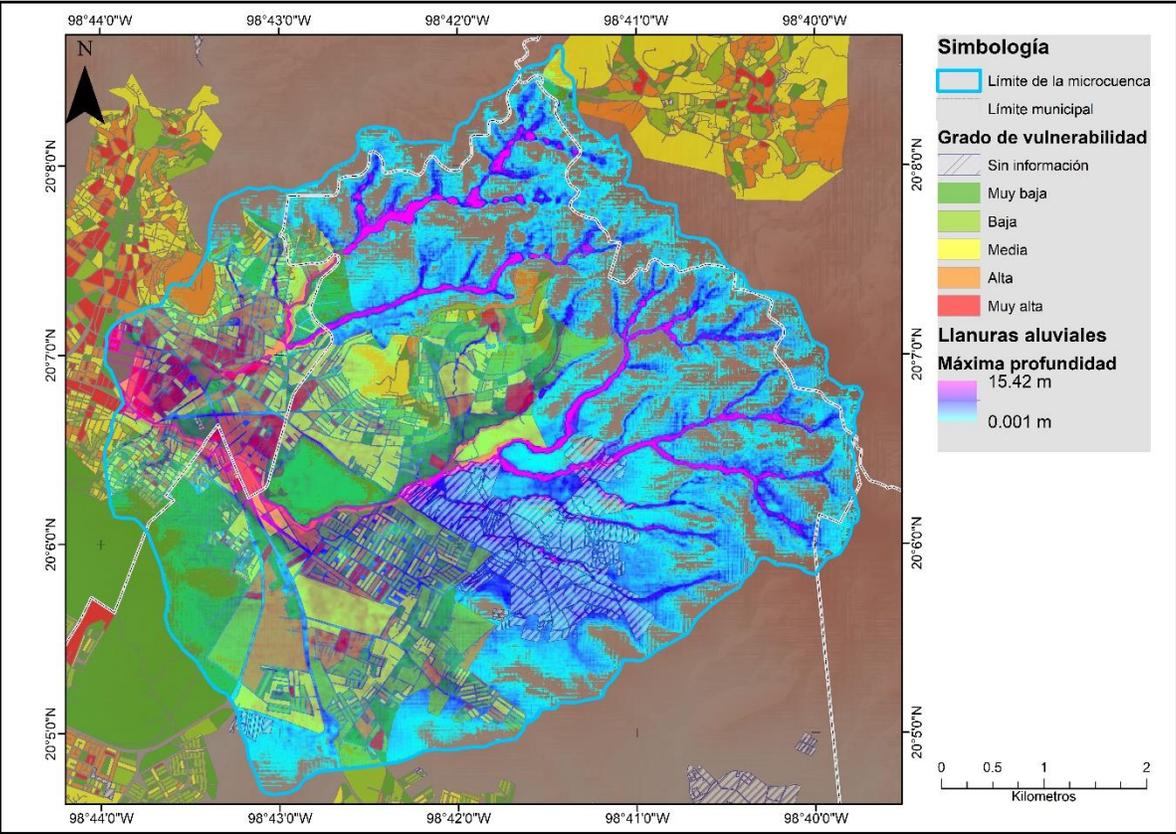


Figura 36. Vulnerabilidad social en la microcuenca de Pachuca.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

Haciendo el mismo ejercicio, pero con la capa vectorial de vulnerabilidad estructural el resultado es completamente distinto, como se observa en la figura 37 las pocas manzanas con un grado de vulnerabilidad de medio a muy alto se encuentran lejos de las zonas afectadas por las inundaciones y avenidas torrenciales.

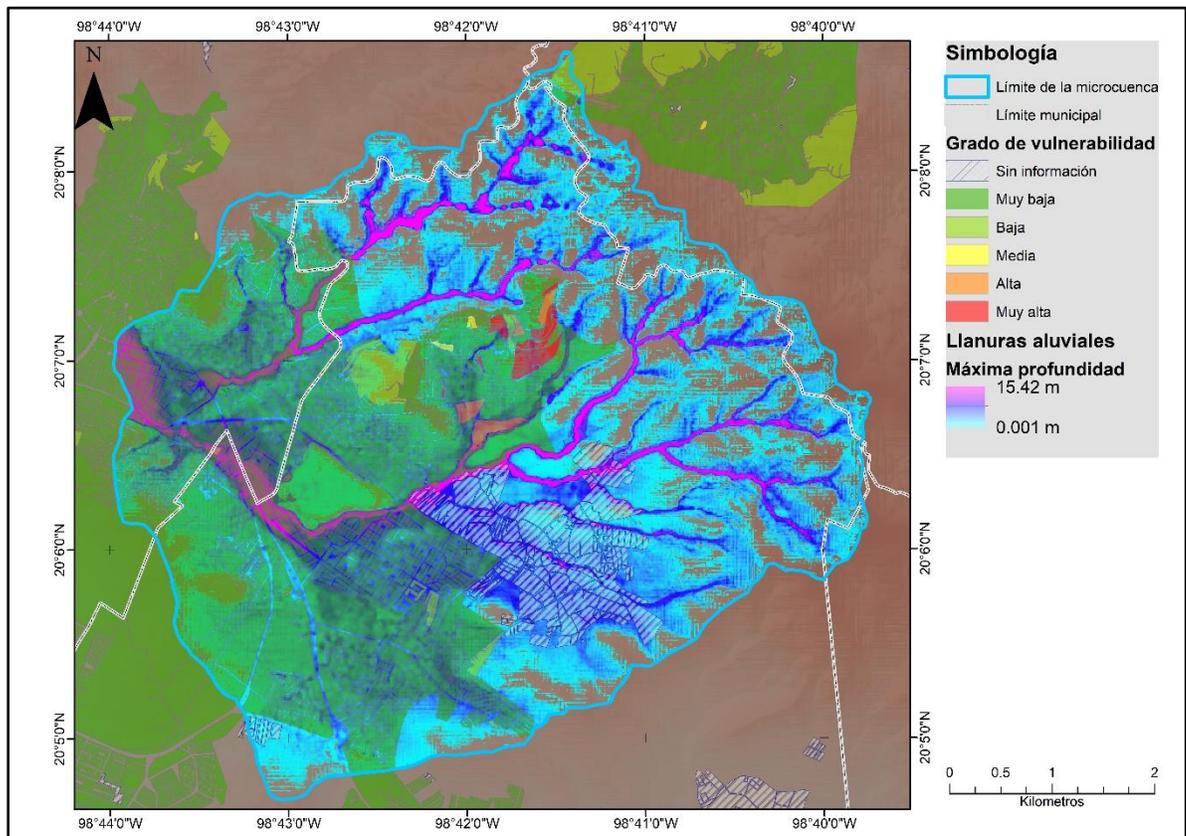


Figura 37. Vulnerabilidad estructural en la microcuenca de Pachuca.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

Finalmente, se da un resultado similar al anterior con la capa vectorial de vulnerabilidad por tipo de vivienda donde son pocas las manzanas con viviendas mayoritarias de tipo I y II que coincidan con las zonas más propensas a la formación de avenidas torrenciales como se muestra en la figura 38, sin embargo, las que coinciden se encuentran en la zona inmediata al exutorio de la microcuenca donde hay las manzanas con el mayor grado de vulnerabilidad social por lo que esto la convierte en la zona prioritaria para la atención y prevención de avenidas torrenciales e inundaciones.

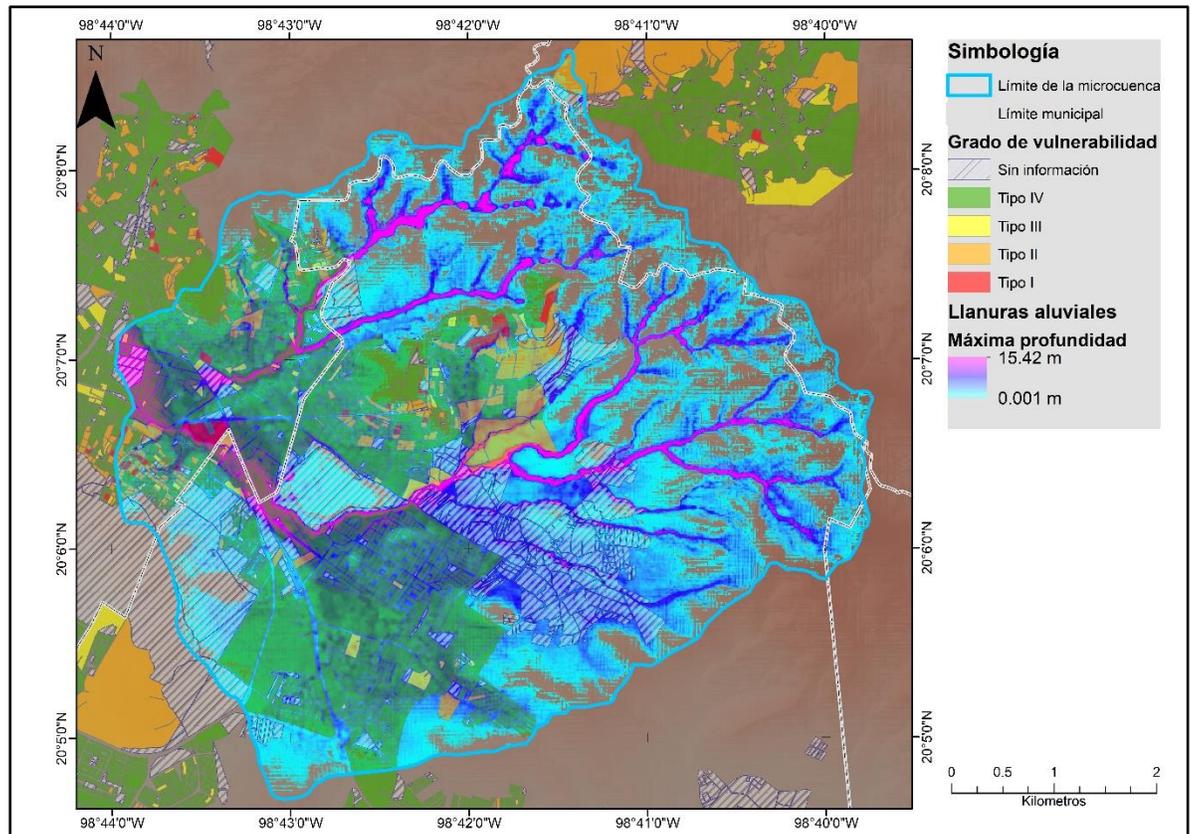


Figura 38. Vulnerabilidad por tipo de vivienda en la microcuenca de Pachuca.

Fuente: Elaborado a partir del INEGI (2019 y 2020).

Estos resultados permiten observar que de los tres tipos de vulnerabilidad evaluados en la presente investigación la social es la que debería tener mayor peso para las dependencias encargadas de la protección civil ya que es la variable menos homogénea y con mayor tendencia hacia un grado alto y muy alto de vulnerabilidad.

5.5.3. Realización del mapa de riesgo a avenidas torrenciales

Una vez identificadas las variables que influyen la formación de avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca, se dimensionó la magnitud del peligro de estos fenómenos y la magnitud de los distintos tipos de vulnerabilidad, la última fase consistió en la jerarquización y conjugación de las distintas capas de información generadas u obtenidas a lo largo de este trabajo de investigación para la producción de un mapa de riesgo de mayor certeza que los identificados en los atlas de riesgo de los municipios de la Zona Metropolitana de Pachuca que si cuentan con uno, en cuanto al Índice de consistencia y el coeficiente de consistencia se obtuvieron valores de 0.1 y 7.074 %, por lo que se puede afirmar que existe una consistencia adecuada en la matriz de ponderación que se realizó.

El resultado final se presenta en la figura 39 y 40, donde se puede observar que la mayor parte de la microcuenca presenta un grado de riesgo de medio a alto, siendo las localidades con el mayor riesgo San Guillermo la Reforma, El Álamo, Carboneras, Carboneras Fraccionamiento, Dos Carlos Pueblo Nuevo, Álamo Rústico, Privada del Álamo, Rinconada del Álamo, Unidad Habitacional CTM, Río de la Soledad, Guadalupe Minerva, Pachuca de Soto, Manuel Ávila Camacho, Colonia Militar, Taxistas y Abundio Martínez, siendo las localidades con el menor riesgo Paseo de las Reynas, Paseo de las Reynas II y El Portezuelo.

Los resultados de esta etapa son congruentes con los obtenidos en la fase 2.3 en cuanto a las coincidencias de las planicies aluviales con la capa ráster que resultó del análisis jerárquico exceptuando la parte sur de la microcuenca, donde los resultados de la fase 2.3 presentan la zona como una de poca profundidad y esto se puede explicar a que el modelo digital de elevación que se utilizó no tenía el

detalle suficiente para identificar los cauces que se forman sobre las calles pavimentadas de las colonia de carboneras y Abundio Martínez.

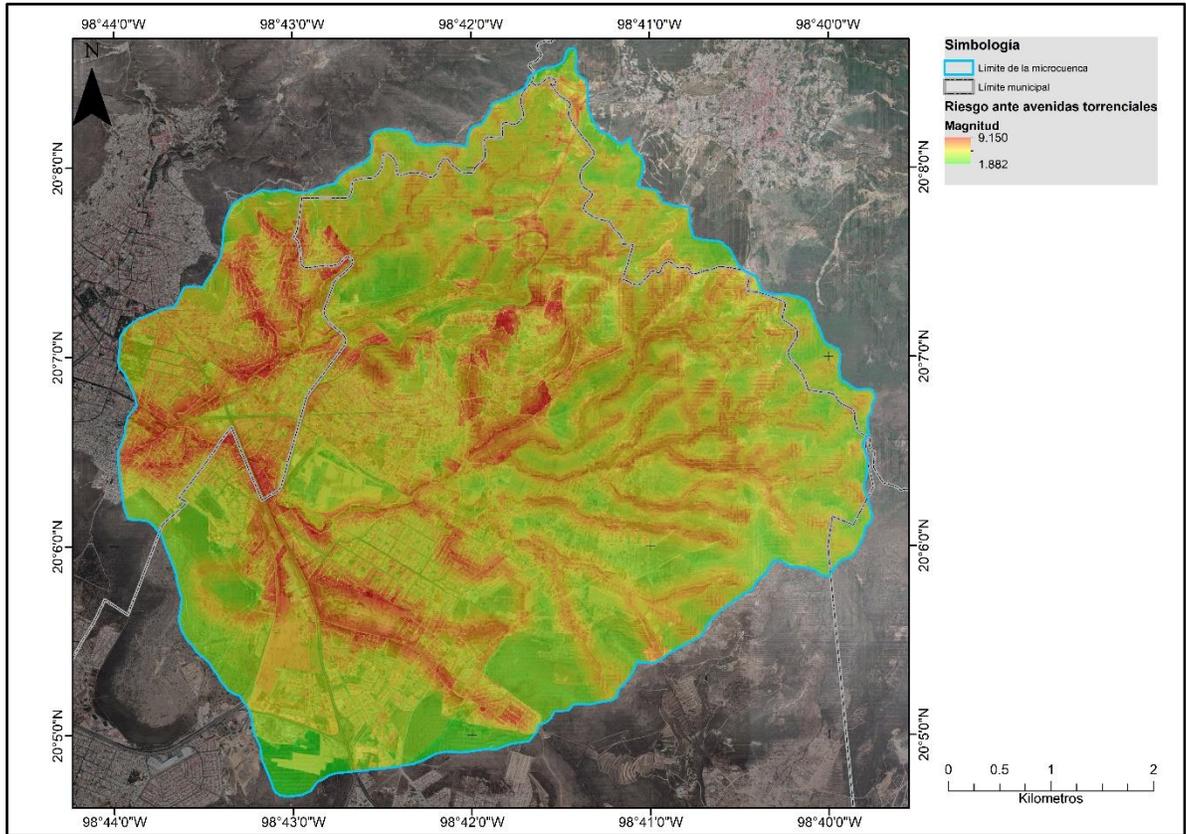


Figura 39. Riesgo de formación de avenidas torrenciales.

Fuente: INEGI (2007, 2019a, 2019b, 2020), la capa vectorial de uso y coberturas de suelo del año 2020, SIATLv4 INEGI (2018), EOSDA (2023) y SIH (2010-2020).

Otra de las explicaciones de las variaciones entre los resultados de la fase 2.3 y de esta es el hecho de que, en la modelación bidimensional, el programa HEC-RAS, la lluvia se precipita de manera uniforme sobre el área de interés, mientras que la capa de precipitación media anual se realizó con una interpolación IDW donde existen distintos gradientes a lo largo de la zona de estudio.

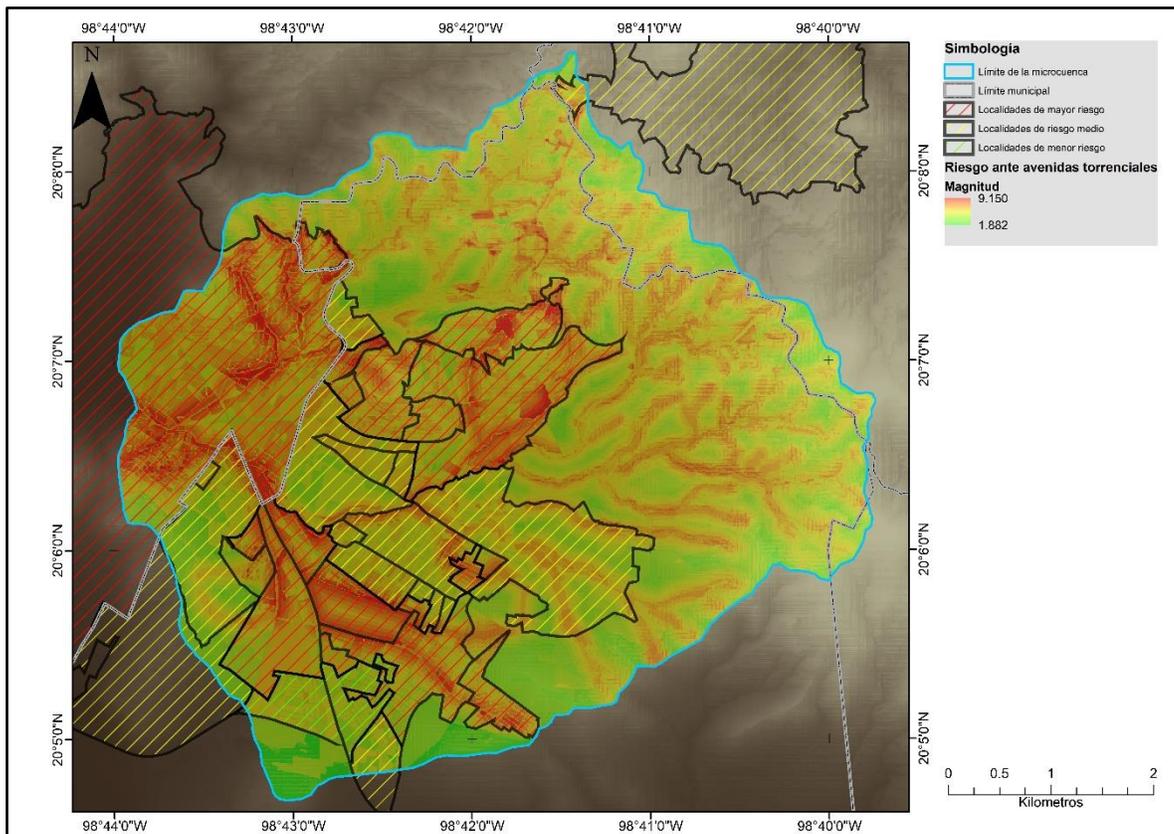


Figura 40. Resultados del análisis de jerarquía por localidades en la microcuenca de Pachuca.

Fuente: INEGI (2019 y 2020), SIATL (2018), EOSDA (2023) y SIH (2020).

6. DISCUSIÓN

Los resultados de la primera etapa arrojaron resultados que podrían ser inusuales, pues el crecimiento de la superficie de uso urbano se mantiene por debajo de lo esperable en una zona de rápido crecimiento urbano, Alshari y Gawali (2022) reportan una tasa de crecimiento urbano de hasta el 16.07 % por año en una cuenca fuertemente urbanizada, comparado con la tasa de crecimiento urbano en la zona de estudio, un 7.26 % por año, es 2.21 veces menor, así mismo, Sajikumar y Remya (2015) reportan que es común que con el crecimiento urbano a costa de las zonas de cultivo, las zonas agrícolas se muevan a las zonas forestales y matorrales, sin embargo, en el caso particular de la microcuenca de Pachuca no se da este fenómeno ya que el crecimiento urbano se ha dado por la desintegración de los ejidos y el subsecuente abandono de las tierras de cultivo, lo que ha facilitado la compra y lotificación de dichas tierras para la construcción de fraccionamientos (Ramírez y Solís, 2023) y dado que el abandono se ha dado en distintos lugares en diferentes momentos ha propiciado que el crecimiento de la mancha urbana sea desorganizado y sin seguir una lógica de ordenamiento ecológico-territorial (Franco y Contreras, 2021; García-Benítez *et al.*, 2019).

Aunque el crecimiento de la superficie urbana de la microcuenca de Pachuca es moderado el que este proceso se haya dado sin seguir una lógica de ordenamiento ecológico territorial ha provocado estragos en la escorrentía superficial, como se pudo observar con el aumento progresivo de la capacidad de escurrimiento, expresado con el número de curva de la microcuenca, y la extensión de las planicies aluviales conjugadas con profundidades de hasta 15.42 metros, y es que se ha reportado que aun con una tasa de aumento de suelo urbano/industrial del 1.26 % se presenta un aumento significativo en la escorrentía superficial ya que la densidad urbana es uno de los principales factores que afectan directamente el coeficiente de escurrimiento (Zeinali *et al.*, 2019; Osman *et al.*, 2022; Ademe *et al.*, 2023) y esto se

puede observar en los valores mensuales de coeficiente de escurrimiento obtenidos en los resultados del coeficiente de escurrimiento, ya que durante las temporadas de lluvia en el periodo de estudio se mantienen por arriba del 0.6, llegando incluso a superar el 0.9 en junio del 2014 (0.929), marzo del 2015 (0.923) y junio del 2018 (0.923); Pambudi *et al.* (2018) y Witjaksono *et al.* (2018) consideran los valores por encima del 0.54 como muy altos, por lo que se puede interpretar que desde el principio del periodo de estudio la microcuenca presentaba un importante impacto en su dinámica hidrológica y es que en el año 2000 las zonas urbanas correspondían al 21.31 % (7.158 km²) de la superficie total de la microcuenca mientras que en el año 2012 ya correspondían al 31.041 % (10.425 km²).

Es importante notar que, respecto a las zonas funcionales, los asentamientos humanos y suelos descubiertos representan el 85.56 % (7.3 km²), 22.98 % (3.95 km²) y 10.01 % (0.79 km²) de las zonas de emisión, captación-transición y captación respectivamente. Las cuencas están interconectadas por la influencia que la gravedad ejerce sobre sus cauces, provocando un efecto de impacto acumulado (Cotler, 2010) el hecho de que más de la cuarta parte de la zona de captación-transición ya sean asentamientos humanos y suelo aumenta las posibilidades de a la formación de avenidas torrenciales recordando que esta es una zona en la que se conjugan los cauces de la zona alta lo que la vuelve una zona crítica para el transporte del agua (Cotler *et al.*, 2013).

En cuanto a la veracidad de las estimaciones del número de curva durante el periodo de estudio en la microcuenca de Pachuca, si bien existen diversos métodos para validar la información obtenida a partir del uso del modelo SCS-CN, estos dependen de mediciones en campo del caudal (Shrestha *et al.*, 2021), sin embargo, uno de los principales atributos de este modelo es su uso para la estimación de la escorrentía en cuencas donde no existen datos sobre el volumen del caudal utilizando

únicamente el volumen precipitado (Hagras, 2023; Srivastava y Chinnasamy, 2021) y se ha probado como un buen modelo siendo incluso una mejor opción en relación a otros modelos como el de amplitud verde (Green Amp), o bien, la metodología nacional estandarizada de Rumania en cuencas donde no se tienen estaciones hidrométricas que puedan aportar datos para contrastar, incluso se han creado distintas variantes de este modelo para mejorar el desempeño en distintas condiciones particulares de cuenca y duración de eventos de lluvia (Voda, 2019; Kumar y Nalini, 2021; Mekonnen y Kumar, 2022, Amatya *et al.*, 2022).

A pesar de que se ha observado que la calidad de las series de tiempo de precipitación son un factor determinante en la calidad de los resultados de la modelación de escorrentía con el modelo SCS-CN (Sharma *et al.*, 2023; Faouzi *et al.*, 2022), no se observó en la literatura revisada para el presente trabajo que sea una variable a la que se le preste mucha atención, más allá de comparaciones del desempeño del modelo con series de tiempo climatológicas de distintas fuentes gubernamentales. Ante la premisa anterior, el uso de la paquetería de Climatol en el entorno de desarrollo R resultó una decisión adecuada y es que se ha observado que en países como Malasia hasta el 22 % de las series de tiempo presentan problemas de homogeneidad (Hainie y Mohd, 2013), en el caso de México, se ha observado que, respecto a las series de tiempo que presenta el SIH de la CONAGUA, al menos el 28 % de las series de tiempo de precipitación presentan problemas de homogeneidad y entre el 69 % y 70 % de las series de tiempo de temperatura mínima y máxima presentan problemas de homogeneidad (Guajardo *et al.*, 2017).

Los resultados del análisis exploratorio y homogeneización de las series de tiempo climatológicas son congruentes con lo antes mencionado, ya que de las 12 series de tiempo sometidas a la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar con la

paquetería climatol (cuatro de precipitación mensual acumulada, cuatro de precipitación mensual máxima en 24 horas y 4 de precipitación diaria) todas presentaban anomalías estadísticas, en particular las series de tiempo de precipitación diaria, las cuales presentaron una enorme cantidad de anomalías estadísticas, por lo que es fácil asumir que de no haberse realizado el proceso de homogeneización de las series de tiempo el resultado de las fases subsecuentes hubiera tenido enormes anomalías y el grado de fiabilidad hubiera sido notablemente bajo.

La homogeneización de las series de tiempo climatológica debería de realizarse de forma adecuada, tomando en consideración la naturaleza de los datos y el método que se va a utilizar (Khalil, 2021), existen distintos métodos para este fin como la prueba de Pettitt, la prueba de Buishand y el SNHT (Hussain *et al.*, 2023), aunque se sugiere el uso de más de una de estas pruebas para garantizar un menor margen de error (Kabbilawsh *et al.*, 2023) el SNHT ha probado un desempeño adecuado para la detección de errores estadísticos con un margen de error de hasta el 9 % (Marcolini *et al.*, 2017), aunque es importante tener a consideración los beneficios y limitaciones que plantea Toreti *et al.* (2011) puesto que el número de observaciones y el tipo de variable a analizar son factores que pueden disminuir el desempeño del modelo.

Las modelaciones de planicies aluviales realizadas con periodos de retorno o con los datos de los eventos puntuales, permiten dimensionar el peligro que representan las inundaciones y avenidas torrenciales y en conjunto con la información de vulnerabilidad permiten planear acciones para reducir el riesgo al bienestar de la población y la infraestructura (Shaikh *et al.*, 2022; Jibhakate *et al.*, 2023; Ullah *et al.*, 2024). En este sentido, los resultados de la modelación de planicies aluviales fueron satisfactorios y presentaron un margen aceptable de error con un promedio del 7.42

%, siendo la modelación con el menor porcentaje de error la de los eventos de mayo a septiembre del 2018 (2.49 %) y la de mayor porcentaje de error la de los eventos de julio a octubre del 2019 (15.23 %).

Los resultados de la modelación de planicies aluviales pueden ser perfectibles, aunque un modelo digital de elevación con una definición de 4.47 m por píxel es suficiente para obtener buenos resultados en las modelaciones de planicies aluviales comparado con los modelos digitales de elevación que son más usados con una definición de 10 a 30 m por píxel (dependiendo de la fuente), Mustafa *et al.* (2023) sugiere que integrar un modelo digital de superficies (SDM, por sus siglas en inglés) podría aumentar la precisión del modelo al reconocer la textura que da la distribución de las zonas construidas en la construcción del modelo de terreno y es que en la zona sur de la microcuenca se forman dos cauces a partir de las calles construidas en los fraccionamientos y colonias urbanas, sin embargo, el MDE no los reconoce, por lo que en las modelaciones de planicies aluviales identifica esa zona como inundable, pero asume que no fluye hacia el exutorio.

Así mismo, los mapas de peligro que se realizaron podrían enriquecerse utilizando métodos como el propuesto por Tola *et al.* (2023), integrando los mapas de velocidad y profundidad producidos durante la modelación bidimensional con HEC-RAS, o el método del Departamento para Asuntos Rurales, Ambientales y Alimenticios (DEFRA, por sus siglas en inglés), el cual integra dichas capas junto con el factor de debridación que se puede asignar de tablas previamente realizadas (Peker *et al.*, 2024). Finalmente, la presentación de estos mapas pudo haber sido mejor usando un modelo de terreno de redes irregulares triangulares (TIN, por sus siglas en inglés) en lugar de un modelo de sombra de colina como sugiere Yang *et al.* (2006).

Los índices de vulnerabilidad propuestos por Alcocer-Yamaka *et al.* (2016), utilizados para estimar el grado de vulnerabilidad en la microcuenca de Pachuca, resultan una herramienta práctica para dimensionar la vulnerabilidad estructural, social y por tipo de vivienda utilizando pocos insumos, gratuitos y que se pueden procesar con facilidad con cualquier hoja de cálculo y software de análisis espacial, sin embargo, la cantidad de variables que considera podrían no ser suficientes para representar de manera adecuada el grado de vulnerabilidad en estos tres rubros, por lo que se optó por incluir algunas de las variables propuestas por Hernández y García (2020), puesto que considerando que las personas con cualquier tipo de discapacidad tienen el mismo grado de vulnerabilidad ante desastres que las personas mayores de 60 años y menores de cinco años. En cuanto a lo estructural, el primer intento de calcular el índice de vulnerabilidad estructural considerando sólo las casas con piso de tierra por manzana resultó en un mapa prácticamente homogéneo, pero al incluir a las casas sin servicios básicos (electricidad e infraestructura hidráulica), variables que consideramos muy importantes para cualquier tipo de desastre, aumentó el grado de vulnerabilidad en las manzanas urbanas de la zona centro de la microcuenca, donde se pueden ubicar algunas con un grado muy alto de vulnerabilidad; consideramos también la importancia de realizar talleres comunitarios en futuros trabajos para poder obtener información cualitativa que permita medir con mayor precisión el grado de vulnerabilidad, esta información cualitativa debería de considerar variables como experiencias en eventos de avenidas torrenciales e inundaciones en eventos anteriores, el grado de analfabetismo y grado de conocimiento del riesgo que representan las avenidas torrenciales como lo sugieren Hamidi *et al.* (2022).

Por lo antes expuesto, consideramos que integrar estas variables a los índices de vulnerabilidad puede dar una visión más completa de las necesidades de una población determinada ante un desastre como las avenidas torrenciales y eso es algo que puede mejorar significativamente los resultados de acciones de mitigación

del impacto de estos desastres hidrometeorológicos que las instituciones correspondientes puedan realizar.

Los desastres hidrometeorológicos como avenidas torrenciales e inundaciones tienen factores comunes como la precipitación, usos y coberturas de suelo y cercanía a los cauces, sin embargo, la forma en que estos factores inciden en cada evento depende de las condiciones particulares de cada cuenca hidrográfica (Yilmaz *et al.*, 2023).

A partir de los resultados obtenidos con la clasificación de imágenes satelitales, las modelaciones de número de curva, planicies aluviales y vulnerabilidad y la descripción morfométrica de la microcuenca de Pachuca se pudo observar cual es el grado de influencia que tenían las distintas variables sobre la formación de avenidas torrenciales, por ejemplo, a partir de la homogeneización de las series de tiempo y la revisión hemerográfica se podía avistar que la lluvia no era la variable de mayor peso mientras que durante la descripción morfométrica destacó que la pendiente media era suficiente para categorizar a la microcuenca de Pachuca como una fuertemente accidentada, así mismo, su condición como una cuenca sedimentaria y el tiempo de concentración bajo daban evidencia suficiente para afirmar que la pendiente era un factor con mayor peso; en este sentido más que cualquier índice o metodología previamente establecida bajo condiciones específicas que pudieran no ser similares a las de la zona de estudio se tomó la decisión de realizar un Proceso de Análisis Jerárquico para identificar las zonas de peligro en la microcuenca de Pachuca.

La ventaja del Proceso de Análisis Jerárquico es que este método de análisis multicriterio permite, de forma flexible y simple, la toma de decisiones sobre problemas complejos (Dutal, 2023), la desventaja de esta metodología se da en el

hecho de que es un proceso prácticamente empírico, cuya validación depende más de lo observable en la zona de estudio que de algún modelo matemático, aunque existen distintos modelos como el del área bajo la curva, la tasa de éxito y la exactitud de la predicción como lo proponen Waqas *et al.* (2021) y Tariq *et al.* (2022).

Los resultados del Proceso de Análisis de Jerarquía fueron satisfactorios empezando por los resultados del Índice de consistencia y de la Razón de Consistencia, 0.1 y 7.074 % respectivamente, ya que indican una ponderación adecuada en función a lo planteado por Yepes (2022), también, de acuerdo con las observaciones del Ingeniero Sergio Alarcón Martínez, jefe del Departamento del Centro de Prevención Meteorológica de la Dirección Local Hidalgo de la CONAGUA, y el M.I. Rubén Armendáriz Rubio, Subdirector Técnico de la Dirección Local Hidalgo de la CONAGUA, quienes afirman que las colonias urbanas que presentan el mayor riesgo en el mapa resultante son congruentes con los reportes de inundación que se han recibido en los últimos años.

Si se compara el mapa resultante con los dos instrumentos de prevención de inundaciones y avenidas torrenciales municipales que inciden en la zona de estudio ambos resultan bastante limitados en su alcance; por un lado, el Atlas Municipal de Riesgos de Pachuca de Soto no reconoce a las cuencas como unidades funcionales si no solo como límites, considera riesgo y vulnerabilidad como sinónimos cuando el riesgo es una función de la vulnerabilidad y peligro (Zeng *et al.*, 2016) y asume como única variable la cercanía a los cauces, por el otro lado, el Atlas Municipal de Riesgos del Municipio de Mineral de la Reforma sí reconoce a la cuenca como una unidad funcional, incluso caracteriza algunos parámetros morfométricos de las cuencas que inciden en el municipio, utiliza el método racional para el cálculo de caudales, pero los insumos que se utilizan son de una calidad baja e ignora otras variables por lo que sólo reconoce como zona de peligro dentro de la microcuenca

a la colonia Taxistas, ignorando por completo zonas que en el presente trabajo se identificaron con alto riesgo como la Colonia Carboneras y Villas del Álamo.

Finalmente, es importante puntualizar que la microcuenca de Pachuca, por la cantidad de suelo de uso urbano que posee, puede considerarse una cuenca urbana y eso trae consigo otra condicionante sobre la escorrentía superficial y la propensión a formación de avenidas torrenciales ya que el escurrimiento depende en buena parte de la capacidad de drenaje de la infraestructura urbana, la cual puede verse superada por las descargas de uso urbano/industrial y la saturación de sedimentos y eso agrava los eventos de inundaciones y avenidas torrenciales (Koyama *et al.*, 2022; Sakke *et al.*, 2023), además, en las cuencas urbanas la capacidad de resistir y superar eventos de inundaciones y avenidas torrenciales no depende únicamente de la población y la organización colectiva sino también de la intervención de las autoridades para reparar la infraestructura urbana y restablecer los servicios básicos (Goyal *et al.*, 2023), por lo que, en este tipo de cuencas, se considera que la mejor forma de mitigar el riesgo a desastres hidrometeorológicos como inundaciones, avenidas torrenciales y deslaves es a través de la gestión de cuencas (Roy y Chintalacheruvu, 2024), una gestión integral que involucre los distintos órdenes de gobierno en coordinación con los distintos sectores que inciden toman parte de las actividades que inciden en la cuenca siempre tomando en cuenta las particularidades hidrológicas y ambientales de la cuenca hidrográfica en cuestión (Reilly, 2016; Lim *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

El propósito de la presente investigación fue determinar el grado de influencia que los cambios de coberturas y usos de suelo pudieran llegar a tener en la formación de avenidas torrenciales en la microcuenca de Pachuca a través de modelaciones hidrológicas e hidráulicas y a partir de los resultados de estas actividades y en conjunto con los resultados del mapeo de vulnerabilidad poder realizar un mapa de riesgo a avenidas torrenciales de la zona de estudio.

Como resultado se pudo determinar que, en el caso particular de la microcuenca de Pachuca, la precipitación pluvial es un factor de menor influencia en la formación de avenidas torrenciales, ya que factores como las características morfométricas propias de la cuenca, así como las densidades de cauces y drenaje, y la pendiente media, tienen un rol de mayor peso en este fenómeno, siendo el cambio de coberturas y usos de suelo el factor preponderante.

Los cambios de coberturas y usos de suelo han causado un gran impacto en la dinámica hídrica de la microcuenca de Pachuca que se expresa en el aumento año con año del número de curva de la microcuenca (86.99 en condición antecedente de humedad III) y en un alto coeficiente de escurrimiento (mayor a 0.9) aún en temporadas de baja precipitación por lo que a este punto no basta sólo con detener el crecimiento de la mancha urbana, es necesario poner en marcha planes de conversión de las tierras agrícolas y pastizales inducidos a suelo forestal con el fin de reducir la capacidad de escurrimiento y establecer medidas de protección a las zonas de suelo forestal y matorral en las zonas alta y media de la microcuenca.

La homogeneización de las series de tiempo es esencial para cualquier trabajo que requiera datos climatológicos por lo que es muy importante tener a consideración el

tipo de modelo que se va a utilizar, así como sus alcances y limitaciones, utilizar más de uno puede dar mejores resultados.

Las avenidas torrenciales son un fenómeno cada vez más recurrente en la microcuenca de Pachuca y representan un peligro importante, las modelaciones de planicies aluviales con HEC-RAS resultan una herramienta útil y práctica para dimensionar este fenómeno, sin embargo, la calidad de estos productos dependen de la calidad de los insumos, particularmente el nivel de detalle de los modelos digitales de elevación; la integración de modelos digitales de superficie para la realización del modelo de terrario pueden mejorar significativamente el resulta de este proceso.

A pesar de la facilidad y la practicidad en el uso de los índices de vulnerabilidad social, estructural y por tipo de vivienda, es muy importante considerar más información para robustecer la fiabilidad de los resultados de su uso, por lo que se sugiere, para trabajos posteriores, buscar la participación de las y los habitantes de las zonas de riesgo en talleres que puedan aportar esta información.

La microcuenca de Pachuca puede considerarse como una zona de alto riesgo para la formación de avenidas torrenciales, sería recomendable realizar ejercicios similares en todas las microcuencas de la Zona Metropolitana de Pachuca para poder entender el comportamiento de esta clase de desastres en esta Ciudad y poder establecer medidas de respuesta y mitigación ante el riesgo que representan para sus habitantes y la infraestructura pública.

Independientemente de la utilidad que los resultados obtenidos en la presente investigación puedan tener para las autoridades municipales y estatales de Hidalgo

consideramos que el mayor aporte que pueda tener este trabajo es la ruta metodológica, aunque perfectible, ofrece un buen marco de trabajo para poder dimensionar el peligro, la vulnerabilidad y posteriormente el riesgo con insumos fiables y de bajo costo y poca infraestructura, así mismo, resulta una ruta metodológica bastante flexible ya que permite identificar el peso de cada variable en la formación de avenidas torrenciales a partir de las características propias de cada microcuenca a la que se puede aplicar; así mismo, consideramos oportuno señalar las limitaciones que este esquema presenta empezando por el hecho de que si bien los insumos son gratuitos estos pueden no ser de tan fácil obtención como los modelos digitales de superficie o imágenes satelitales de alta calidad de años anteriores al 2015, por otro lado, lo mejor sería contar con datos hidrométricos para poder asegurar la mayor fiabilidad de la información resultante e incorporar modelos matemáticos que permitan corroborar dicha fiabilidad, así como realizar talleres con los habitantes de las distintas localidades y colonias de la zona para poder obtener información cualitativa que pueda robustecer los índices de vulnerabilidad social, estructural y por tipo de vivienda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ademe, D., Alamirew, T. y Andualem, T. (2023). Integrated and Individual Impacts of Land Use Land Cover and Climate Change on Hydrological Flows over Birr River Watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Water* 15(1; 166). <https://doi.org/10.3390/w15010166>
- Ak, M. y Benson, D. (2022). Assessing the Water Security Effectiveness of Integrated River Basin Management: Comparative Case Study Analysis for Lesson-Drawing. *Frontiers in Water* 4;101358. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.1013588>
- Akter, T., Quevauviller, P., Eisenreich, S. y Vaes, G. (2018). Impacts of climate and land use changes on flood risk management for the Schijn river, Belgium. *Environmental Science & Policy*, 89, 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.002>
- Albrecht, E. (2023). Changing Winters and Adaptive Water Governance: A Case Study on the Kemi River Basin, Finland. *Water* 15(11; 2024). <https://doi.org/10.3390/w15112024>
- Alcántara-Ayala, I., Garza, M., López, A., Magaña, V., Oropeza, O., Puente, S., Rodríguez, D., Lucatello, S., Ruiz, N., Antonio, R., Urzúa, M. y Vázquez, G. (2019). Gestión Integrada de Riesgo de Desastres Naturales en México: Reflexiones, retos y Propuestas de Transformación de la Política Pública desde la Academia. *Investigaciones Geográficas* 98, 2448-7279. <https://doi.org/10.14350/rig.59784>
- Alcocer-Yamanaka, V., Rodríguez-Varela, J., Bourguett-Ortiz, V., Llaguno-Guilberto, O. y Albornoz-Góngora, P. (2016). Metodología para la Generación de Mapas de Riesgo por inundación en Zonas Urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33-55.

- Alfieri, L., Velasco, D. y Thielen. (2011). Flash Flood Detection Through a Multi-Stage Probabilistic Warning System for Heavy Precipitation Events. *Advances in Geosciences* 29, 69-75. <https://doi.org/10.5194/adgeo-29-69-2011>
- Al-Juaidi, A. (2018). A simplified GIS-based SCS-CN method for the assessment of land-use change on runoff. *Arabian Journal of Geosciences*, 11; 269. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3621-4>
- Almoradie, A., Houngue, N., Adoukpe, J. y Evers, M. (2023). Transboundary Collaborative Modeling: Consensual Identification and Ranking of Flood Adaptation Measures-A Case Study in the Mono River Basin, Benin, and Togo. *Sustainability* 15(15; 11728). <https://doi.org/10.3390/su151511728>
- Alshari, E. y Gawali, B. (2022). Modeling Land Use Change in Sana'a City of Yemen with MOLUSCE. *Hindawi* 7419031. <https://doi.org/10.1155/2022/7419031>
- Amatya, D., Walega, A., Callahan, T., Morrison, A., Vulava, V., Hitchcock, D., Williams, T. y Epps, T. (2022). Storm Event Analysis of Four Forested Catchments on the Atlantic Coastal Plain Using a Modified SCS-CN Rainfall-Runoff Model. *Journal of Hydrology* 608; 127772. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127772>
- Ameth, E. (2019). Inundación en Plaza Explanada Adelanta Caos para Feria de Pachuca. *Todo Chicolapan*. <https://todochicoloapan.com/inundacion-en-plaza-explanada-adelanta-caos-para-feria-de-pachuca-e3TQ4e3Dg1Ng.html>
- Arango, M., Aristizábal, E. y Gómez, F. (2020). Morphometrical Analysis of Torrential Flows-Prone Catchments in Tropical and Mountainous Terrain of the Colombian Andes by Machine Learning Techniques. *Natural Hazards*, 105, 983-1012. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04346-5>
- Arceo, M., Cruz, R., Tiburan, C. y Balatibat, J. (2018). Modeling the hydrologic responses to land cover and climate changes of selected watersheds in the

- Philippines using soil and water assessment tool (SWAT) model. *DLSU Business & Economics Review*, 28, 84-101.
- Arganis, M., Preciado, M., De Luna, F., Cruz, L., Domínguez, R. y Santana, O. (2023). Application of a Regionalization Method for Estimating Flash Floods: Cuautepéc Basin, México. *Water* 15(3); 303. <https://doi.org/10.3390/w15020303>
- Aristizábal, E., Arango, M. y García, I. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242-258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- Ariyachandra, M. y Wedawatta, G. (2023). Digital Twins Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts. *Sustainability* 15(15); 11910). <https://doi.org/10.3390/su151511910>
- Arnous, M. y Omar, A. (2018). Hydrometeorological Hazards assessment of Some Basins in Southwestern Sinai Area, Egypt. *Journal of Coastal Conservation* 22, 721-743. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0604-2>
- Bahena-Ayala, R., Arreguín-Cortés, F. y Cervantes-Jaimes C. (2021). Evaluación de la Resiliencia en Ciudades ante Fenómenos Hidrometeorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 12(1), 192-260. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2021-01-06>
- Bakhtiar, O., Gaylan, F., Hamid, A., y Ail, S. (2022). Runof estimation using SCS CN and GIS techniques in the Sulaymaniyah sub basin of the Kurdistan region of Iraq. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 2640-2655. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01549-z>
- Barnett, J. y Bouw, M. (2022). Flooding from extreme Storm Events. En Barnett, J. y M. Bouw (eds.), *Managing the Climate Crisis: Designing and Building for Floods, Heat, Drought, and Wildfire* (pp. 79-101). Island Press.

- Berihun, M., Tsunekawa, A., Haregweyn, N., Tsegaye, D., Adgo, E., Tsubo, M., Ebabu, K. (2019). Hydrological responses to land use/land cover change and climate variability in contrasting agro-ecological environments of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 689, 347-365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.338>
- Bin, L., Yang, W. y Xu, K. (2023). Driving Force Exploration for Flash Flood Based on Mann-Kendall Test and Geographical Detector: A Case Study of Hainan Island, China. *Sustainability* 15(16); 12517). <https://doi.org/10.3390/su151612517>
- Bradbury, K., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M. y Potter, K. (2000). Components of the Hydrologic Budget. En *Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates* (pp. 7-16). University of Wisconsin-Madison.
- Brase, L., Mossa, L. y Robeck, E. (2023). Rainfall, River Height, and Local Relevance: Supporting Students' Use of Real-World Data to Explore Flash Floods. *Science & Children* 60(5), 54-59.
- Burnett, J. (2008). Introduction en *Flash Floods in Texas, XIII-XV* (pp.xiii-xv). Texas A&M University Press.
- Cai, X., y Xu, D. (2022). Simulation and Optimization Strategy of Storm Flood Safety Pattern Based on SCS-CN Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2; 698), 1-15. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020698>
- Camacho-Sanabria, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L. & Sánchez, M. (2015). Cambios de Cobertura/Usos del Suelo en una Porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques* 21(1), 93-112.
- Campos-Aranda, D. (2009). Calibración del Método del Coeficiente de Escurrimiento para Estimación de la Disponibilidad Anual en dos Zonas Geográficas de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 14(3), 131-143.

- Cano, L., Rodríguez, R., Valdéz, J., Acevedo, O. y Beltrán, R. (2017). Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat. *Investigaciones Geográficas* (92). <https://doi.org/10.14350/rig.52339>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2013, 26 de diciembre). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Pachuca de Soto, Hidalgo, 2013. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2014). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2018). Atlas de Peligros y/o Riesgos de Mineral de la Reforma, Hidalgo 2018. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2019, 28 de junio). 70 años de la gran inundación de Pachuca, Hidalgo. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/70-anos-de-la-gran-inundacion-en-pachuca-hidalgo>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2020). *Gestión Integral del Riesgo de Desastres: Nueva Visión de la Protección Civil*. Dirección General de la CENAPRED. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/605696/TEMA_2_GESTION_INTEGRAL_DEL_RIESGO.pdf

- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2022). Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Pachuca de Soto, Estado de Hidalgo, 2022. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023, 4 de octubre). Atlas Nacional de Riesgos. Obtenido de *Centro Nacional de Prevención de Desastres*: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>
- Cerbelaud, A., Breil, P., Blanchet, G., Roupioz, L., y Biottet, X. (2022). Proxy Data of Surface Water Floods in Rural Areas: Application to the Evaluation of the IRIP Intense Runoff Mapping Method Based on Satellite Remote Sensing and Rainfall Radar. *Water*, 14(3); 393). <https://doi.org/10.3390/w14030393>
- Cerbelaud, A., Roupioz, L., Blanchet, G., Pascal, B., y Briottet, X. (2021). A repeatable change detection approach to map extreme storm-related damages caused by intense surface runoff based on optical and SAR remote sensing: Evidence from three case studies in the South of France. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 182, 153-175. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.10.013>
- Cevallos-Flores, J. y Gutiérrez-López, A. (2017). La Modelación Geomorfológica en Cuencas Urbanas. En J. Schara (ed.), *Diálogos Transdisciplinarios VI Cuencas Hidráulicas* (pp. 122-152). Instituto de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Chaemiso, S., Kartha, S., y Pingale, S. (2021). Effect of land use/land cover changes on surface water availability in the Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Hydrological sciences journal*, 66(13), 1936-1962. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963442>
- Chang, B., Wherley, B., Aitkenhead-Peterson, J., McInnes, K. y Dweyr, P. (2022). Short-term impacts of urban landscape conversion on surface runoff quality.

Urban Ecosystems , 25, 1561-1576. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01247-2>

Cheng, H. (2012). Simulate Surface Runoff using Coupled Surface-Subsurface Models. En *Overland Flow and Surface Runoff* (T. Wong, ed.)(pp. 137-158). Nova Science Publishers, Inc.

Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME). (2018, 16 de septiembre). *La megalópolis de la ZMVM*. Obtenido de *blog de la Comisión Ambiental de la Megalópolis*: <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/la-megalopolis-de-la-zmvm?idiom=es>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2000). Sistema de información Geográfico del Agua: Ortofotos Escala 1:20,000. Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (18 de febrero de 2020). *Monitoreo de la cobertura del suelo*. Obtenido de Biodiversidad mexicana: <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo>

Cotler, H. (2010). *Las Cuencas Hidrográficas de México: Diagnóstico y Priorización* (1.ª ed.)(Garrido, A., González, N., Enríquez, C. y Cuevas, M., edición y diseño cartográfico). Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.

Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. y Ríos, E. (2013). *Cuencas Hidrográficas: Fundamentos y Perspectivas para su Manejo y Gestión* (1.ªed.). Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.

Dandapat, A., y Sahoo, S. (2021). Evaluation of Loss Models and Effect of LU/LC Changes on Surface Runoff in Subarnarekha River Basin. *IDH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(51), 542-555. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1619489>

Daniels, N. (2023). *Flash Flood*. Salem Press Encyclopedia of Science. Consultado el 15 de enero de 2024.

<https://edsp.uam.elogim.com/eds/detail/detail?vid=3&sid=f9ecfb2b-6757-4b00-be56-99ce0e4aa792%40redis&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRI#AN=113928216&db=ers>

- Devi, K., Sen, S. y Joshi, H. (2022). Promoting Surface Runoff Management for Enhancing Water Security: A Case Study of Solapur District Maharashtra. *Journal of the Institution of Engineers (India)* 104, 665-673. <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00719-8>
- Devi, S. (1989). Urban land-use changes with special reference to Visakhapatnam, India. En *Land-Use Change: Proceedings of the Ashikawa-Sapporo International Symposium* (R. D. Hill, ed.)(pp. 213-232). Shanghai Printing & Binding Co.
- Dharmayasa, I., Surakit, K., Jindal, R. y Thongdara, R. (2022). Investigation on Impact of Changes in Land Cover Patterns on Surface Runoff in Ayung Watershed, Bali, Indonesia Using Geographic Information System. *Environmental and Natural Resources Journal*, 20(2), 168-178. <https://doi.org/10.32526/enrj/20/202100161>
- Doi, H. (1989). Land-Use Control in the Peri-Urban Areas of Japan. En *Land-Use Change: Proceedings of the Asahikawa-Sapporo International Symposium, August 1987* (R. Hill, ed.)(pp. 141-154). Shanghai Printing & Binding Co.
- Domínguez, M. y Salas, A. (2017). Crecimiento Urbano y su Impacto Hidrológico. En J. Schara (ed.), *Diálogos Transdisciplinarios VI Cuencas Hidráulicas* (pp. 42-101). Instituto de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Duque, M. y Quintero, J. (2013). La Gestión Integral del Riesgo en Territorios Urbanos. *NOVA -Publicación en Ciencias Biomédicas-* 11(20), 121-127.
- Dürr, H., Laurelle, G., Van Kempen, C., Slomp, C., Meybeck, M. y Middelkoop, H. (2011). Worldwide Topology of Nearshore Coastal Systems: Defining the

- Estuarine Filter of River Inputs to the Oceans. *Estuaries and Coasts* 34, 441-458. <https://doi.org/10.1007/s12237-011-9381-y>
- Dutal, H. (2023). Determining the Effect of Urbanization on Flood Hazard Zones in Kahramanmaraş, Turkey, Using Flood Hazard Index and Multi-Criteria Decision Analysis. *Environmental Monitoring Assessment* 195(92). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10693-6>
- EOS Data Analytics (EOSDA). (2023). *LandViewer*. <https://eos.com/landviewer/?lat=30>
- Erdoğan, B. y Saliş, O. (2023). Spatio-Temporal analysis of Land Use and Land Cover Changes in Boğaçayı Watershed in a Touristic Region in Turkey. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(2), 183-197. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.016>
- Evers, M. (2016). Integrative River Basin Management: Challenges and Methodologies Within the German Planning System. *Environmental Earth Sciences*, 75; 1085, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5871-3>
- Fan, X., Quan, B., Deng, Z. y Liu, J. (2022). Study on Land Use Changes in Changsha–Zhuzhou–Xiangtan under the Background of Cultivated Land Protection Policy. *Sustainability*, 14(22; 15162). <https://doi.org/10.3390/su142215162>
- Faouzi, E., Arioua, A., Hssaisoune, M., Boudhar, A., Elaloui, A. y Karaoui, I. (2022). Sensitivity Analysis of CN Using SCS-CN approach, Rain Gauges and TRMM Satellite Data Assasement into HEC-HMS Hydrological Model in the Upper Basin of Oum Er Rbia, Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment* 8, 4707-4729. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01404-8>
- Farid Ahmed, M., Mokhtar, M., Lim, C., Suza, I., Ayob, K., Khirotdin, R. & Majid, N. (2023). Integrated River Basin Management for Sustainable Development: Time for Stronger Action. *Water*, 15(13; 2497). <https://doi.org/10.3390/w15132497>

- Faustino, J., García, S., Rodas, F., Flores, V., Ayala, C., Villalobos, A., Hernández, N., Eliseo, G., Paz, A., Recalde, A., Araica, R., Pérez, D., Aparicio, J., Quiroz, J., Girón, J. y Gómez, C. (2004). Modulo I: Conceptos Básicos de Cuencas. En *Manual de Manejo de Cuencas* (pp. 17-28). World Vision.
- Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2002). *Programa Nacional de Microcuencas*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Fletcher, T., Andrieu, H. y Hamel, P. (2012). Understanding management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- Fonseca, L., Oliveira, C., De Farias, B., Fernandes, E. y Andrade, D. (2022). Modelling and Assessment of Sustainable Urban Drainage Systems in Dense Precarious Settlements Subject to Flash Floods. *Hydroscience Journal* 108(1;2016024). <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.2016024>
- Franco, L., y Contreras, L. (24 de diciembre 2021). El Proceso de Urbanización en la Zona Metropolitana de Pachuca, en un Contexto Globalizador. Obtenido de Repositorio Universitario, Instituto de Investigaciones Económicas: <http://ru.iiec.unam.mx/5500/1/064-Franco-Contreras.pdf>
- García, I. (2015, 01 de julio). Lluvias provocan inundaciones en 20 viviendas de Pachuca. W radio. https://wradio.com.mx/radio/2015/07/01/nacional/1435768080_831325.html
- García, W. (2006). *El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica* [tesis de Especialidad en Gestión Agroambiental, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. https://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentosJuanDiego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/SistemaCuencaHidrogr%E1fica.pdf

- García-Benítez, M., Franco-Sánchez, L. y Granados-Alcántara, J. (2019). Evaluación del crecimiento de la población y transformación del uso de suelo urbano en la Zona Metropolitana de Pachuca, México. *QUIVERA*, 21(2), 63-81.
- Gatti, C., García, A., Vera, J., Verrastro, E. y Fontanet, F. (2017). La Construcción de Herramientas de Gestión Integral del Riesgo de Desastres a Nivel Local. La Experiencia del Municipio de Gral. San Martín. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo* 4(1), 7-29.
- Georgakakos, K., Modrick, T., Shamir, E., Campbell, R., Cheng, Z., Jubach, R., Sperflage, J., Spencer, C. y Banks, R. (2021). The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-to-Operations Effort. *Bulletin of the American Meteorological Society* 103(3), E665-E679. <https://doi.org/10.5593/sgem2022/3.1/s12.11>
- Getachew, B., y Manjunatha, B. (2022). Impacts of Land-Use Change on the Hydrology of Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Global Challenges*, 6(8; 2200041). <https://doi.org/10.1002/gch2.202200041>
- González, A. (2023a, 22 de agosto). Pachuca: Con drenes pluviales darán fin a 30 años de omisiones. El Sol de Tulancingo. Obtenido de <https://www.elsoldetulancingo.com.mx/local/pachuca-con-drenes-pluviales-daran-fin-a-30-anos-de-omisiones-10573439.html/amp>
- González, A. (2023b, 29 de mayo). Inundaciones en Pachuca: Estas son las zonas de mayor riesgo. El Sol de Hidalgo. Obtenido de <https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/inundaciones-en-pachuca-estas-son-las-zonas-de-mayor-riesgo-10139758.html>
- González, K. y Pizarro, K. (2022, 27 de noviembre). Análisis Descriptivo de la Zona Metropolitana de Pachuca 2020. Obtenido de Repositorio Universitario, Instituto de Investigaciones Económicas: <https://ru.iiec.unam.mx/5760/1/2.%20063-Gonz%C3%A1lez-Pizarro.pdf>

- González, M. (2009). *Crecimiento urbano y re-configuración territorial de la ciudad de Pachuca, 1980-2005* [tesis de maestría, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura]. Base de datos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Pachuca-Crecimiento-Urbano.pdf>
- Goyal, A., Barreiros, S., Matos, M. (2023). River Basin Flood Adaptation for Coastal Urban Slums. Mithi River Basin, Dharavi Slum. *RI-VISTA: Ricerche per la Progettazione del Paesaggio* 1, 142-153. <https://doi.org/10.36253/rv-14137>
- Granados, J. (2010). Los nuevos residentes de Pachuca: Análisis de la migración y características de los migrantes en la Aglomeración Urbana de Pachuca. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Guajardo, R., Granados, G., Sánchez, I., Gabriel, Díaz y Barbosa, F. (2017). Validación Espacial de Datos Climatológicos y Pruebas de Homogeneidad: Caso, Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* VIII(5), 1-32.
- Guerrero, L. y Aristizábal, E. (2019). Estimación y Análisis de Umbrales Críticos de Lluvia para la Ocurrencia de Avenidas Torrenciales en el Valle de Aburrá (Antioquia). *Revista EIA* 16(32), 97-111. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1281>
- Guerrero, R. y Enciso, J. (2021). La imaginabilidad urbana en Pachuca de Soto. Un análisis visual desde sus crónicas digitales. *Comunicación y Hombre* (17), 311-334. <https://doi.org/10.32466/eufv-cyh.2021.17.634.311-334>
- Gupta, A., Nair, S. y M., Y. (2016). Land-Use for Climatic and Human Security: Policy Concerns. En *Land-Use and Environmental Resources: Methods and Management* (A. Gupta, S. Nair y Y. M., eds.)(pp. 3-10). Associated Publishing Company.
- Haddock, G. (1998). Unit 14: On-Screen Digitizing. En *GIS Core Curriculum for technical Programs (1997-1999)*. University of California.

- Hagras, A. (2023). Runoff Modeling Using SCS-CN and GIS Approach in the Tayiba Valley Basin, Abu Zenima Area, South-West Sinai, Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment* 9, 3883-3895. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01714-5>
- Haider, S., Masood, M., Rashid, M., Alshehri, F., Pande, C., Katipoğlu, O. y Costache, R. (2023). Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate and Land Use Change on Runoff under CMIP6 Scenarios. *Water* 15(19; 3421). <https://doi.org/10.3390/w15193421>
- Hainie, N. y Mohd, S. (2013). Homogeneity Test on Daily Rainfall Series for Malaysia. *Matematika* 29(1c), 141-150.
- Halecki, W., Stachura, T. y Fudala, W. (2022). Capacity of River Valleys to Retain Nutrients from Surface Runoff in Urban and Rural Areas (Southern Poland). *Water*, 14(20; 3259). <https://doi.org/10.3390/w14203259>
- Hamidi, A., Jing, L., Shahab, M., Azam, K., Tariq, M. y Ng, A. (2022). Flood Exposure and Social Vulnerability Analysis in Rural Areas of Developing Countries: An Empirical Study of Charsadda District, Pakistan. *Water* 14(7; 1176). <https://doi.org/10.3390/w14071176>
- Hawkins, R., Ward, T., Woodward, D. y Van Mullem, J. (2009). Initial Abstraction. En *Curve Number Hydrology: State of the Practice* (pp. 33-36). American Society of Civil Engineers.
- He, X., Chen, C., Liu, Y., y Chu, Y. (2020). Inundation Analysis Method for Urban Mountainous Areas Based on Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Model Using Remote Sensing Data. *Sensors and Materials*, 32(11), 3813-3822. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2769>
- Henao, J. (2006). Conceptos Generales. En *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Universidad de Santo Tomas.

- Henao, J. (2006). Métodos de Análisis Morfométricos de Área de Captación de una Cuenca. En *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Universidad de Santo Tomas.
- Hernández, J. y García, D. (2020). Capítulo XVII Redes sociales y Vulnerabilidad Social Ante el Virus COVID-19 en la Zona Metropolitana de Querétaro. En Pineda, R., García, M., Ochoa, A. y Hernández, J. (eds.), *Análisis y Perspectivas Sobre la Pandemia de COVID-19 en Querétaro* (pp. 666-686). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hernandez, L. (2018, 9 de febrero). Constructoras Implicadas en Conflicto de Interés en Hidalgo Construyen Fraccionamientos en Zonas Inundables. *N+*. Obtenido de <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/constructoras-implicadas-conflicto-interes-hidalgo-construyen-fraccionamientos-zonas-inundables/>
- Hernández, O. (2020, 8 de mayo). Fuertes lluvias provocan inundaciones en Pachuca. *88.9 Noticias*. Obtenido de <https://889noticias.mx/noticias/actualidad/fuertes-lluvias-provocan-inundaciones-en-pachuca/>
- Hill, L., Sparks, R. y Rougier, J. (2013). Risk Assessment and Uncertainty in Natural Hazards. En *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards* (1.^a ed.). Cambridge University Press.
- Hill, R. (1989). Smith, Ricardo, Stalin and the "Irrationality" of present-day global land use. En *Land-Use Change: Proceedings of the Asahikawa-Sapporo International Symposium, August 1987* (R. Hill, ed.)(pp. 1-6). Shanghai Printing & Binding Co.
- Hnativ, R., Yakhno, O. y Hnativ, I. (2023). Formation of the Surface Runoff of the Rivers of the Carpathian Region during the Urbanization of Slope Areas. *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), 249-255. <https://doi.org/10.12911/22998993/161765>

- Hu, C., Ran, G., Li, G., Yu, Y., Wu, Q., Yan, D. y Jian, S. (2021). The Effects of Rainfall Characteristics and Land Use and Cover Change on Runoff in the Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 1(69), 29-40. <https://doi.org/10.2478/john-2020-0042>
- Hu, Y., Raza, A., Syed, N., Acharki, S., Ray, R., Hussain, S., ... Elbeltagi, A. (2023). Land Use/Land Cover Change Detection and NDVI Estimation in Pakistan's Southern Punjab Province. *Sustainability*, 15 (4; 3572). <https://doi.org/10.3390/su15043572>
- Hussain Shah, S., Yassin, M., Abba, S., Lawal, D., Hussein Al-Qadami, E., Teo, F., Mustaffa, Z. y Aljundi, I. (2023). Flood Risk and Vulnerability from a Changing Climate Perspective: An Overview Focusing on Flash Floods and Associated Hazards in Jeddah. *Water* 15(20; 3641). <https://doi.org/10.3390/w15203641>
- Hussain, M., Mahmud, I. y Hefzul, S. (2023). pyHomogeneity: A Python Package for Homogeneity Test of Time Series Data. *Ubiquity Press* 11(4). <https://doi.org/10.5334/jors.427>
- Hussain, M., Shuai, Z., Moawwez, M., Umar, T., Iqbal, M., Kamran, M. y Muneer, M. (2023). A Review of Spatial Variations of Multiple Natural Hazards and Risk Management Strategies in Pakistan. *Water*, 15(3; 407). <https://doi.org/10.3390/w15030407>
- Hydrologic Engineering Center. (2024). *HEC-RAS User's Manual* (Version 6.5). US Army Corps of Engineers.
- Ibarreche, J., Aquino, R., Edwards, R., Rangel, V., Pérez, I., Martínez, M., Castellanos, E., Álvarez, E., Jiménez, S., Rentería, R., Edwards, A. y Álvarez, O. (2020). Flash Flood Early Warning System in Colima, México. *Sensors*, 20(18; 5231). <http://dx.doi.org/10.3390/s20185231>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1983). *Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos serie I 1:250,000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/#descargas>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Conjunto de Datos Vectoriales edafológicos serie II 1:250,000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de Datos Vectoriales de unidades climáticas 1:1,000,000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Conjunto de Datos Vectoriales de uso de suelo y vegetación serie IV 1:250,000*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Marco Geoestadístico 2014 versión 6.2*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Conjunto de Datos Vectoriales de uso de suelo y vegetación serie VII 1:250,000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019a). *Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica Serie III 1:50,000*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019b). *Información Vectorial de Localidades Amanzanas y Números Exteriores escala 1:20,000*. CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Principales Resultados por AGEB y Manzana Urbana del Censo de Población y Vivienda*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>
- Jeon, S., Jung, K., Kim, L. y Jung, H. (2023). Map API-Based Evacuation Route Guidance System for Floods. *Applied Science*, 13(16; 9194). <https://doi.org/10.3390/app13169141>

- Jiang, W. y Yu, J. (2022). Impact of Rainstorm Patterns on the Urban Flood Process Superimposed by Flash Floods and Urban Waterlogging Bases on a Coupled Hydrologic-Hydraulic Model: A Case Study in a Coastal Mountainous River Basin Within Southeastern China. *Natural Hazards* 112, 301-326. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05182-x>
- Jibhakate, A., Timbadiya, P. y Patel, P. (2023). Flood Hazard Assessment for the Coastal Urban Floodplain Using 1D/2D Coupled Hydrodynamic Model. *Natural Hazards* 116, 1557-1590. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05728-7>
- Jiménez, A. (2020, 8 de mayo). Inundación en Pachuca rebasó los 4 metros de altura; Familias Afectadas por Deslave de Cerro. *Quadratín Hidalgo*. <https://hidalgo.quadratin.com.mx/principal/inundacion-en-pachuca-rebaso-los-4-metros-de-altura-familias-afectadas-por-deslave-de-cerro/>
- Jiménez, F. (2005). Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas: Enfoques y Estrategias Actuales. *Recursos, Ciencia y Decisión (CATIE)* (2), 1-4. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8351>
- Jin, Z., Xiao, J., Ye, H., Fu, G., Li, G., Wu, W. y Li, F. (2023). Determination of nitrogen sources and losses in surface runoff from different lands at a watershed scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 30; 3052-63064. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26459-7>
- Johnson, G. D. y Patil, G. P. (2006). Landscape Pattern Analysis for Assessing Ecosystem Condition. *Springer Science + Business Media*.
- Juárez, M. (2016). *Delimitación de la Cuenca y Unidades Hidrográficas del Arroyo la Encantada Saltillo Coahuila Mediante el Método Pfafstetter* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8089>
- Jubach, R. y Sezin, A. (2016). International Severe Weather and Flash Flood Hazard Early Warning Systems-Leveraging Coordination, Cooperation, and

- Partnerships Through a Hydrometeorological Project in Southern Africa. *Water* 8(6; 258). <https://doi.org/10.3390/w8060258>
- Kabbilawsh, P., Kumar, D. y Chithra, N. (2023). Assessment of Temporal Homogeneity of Long-Term Rainfall Time-Series Datasets by Applying Classical Homogeneity Tests. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03310-0>
- Karunanidhi, D., Anand, B., Subramani, T. y Srinivasamoorthy, K. (2020). Rainfall surface runoff estimation for the Lower Bhavani basin in south India using SCS CN model and geospatial techniques. *Environmental Earth Science*, 79; 335. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09079-z>
- Khalil, A. (2021). Inhomogeneity Detection in the Rainfall Series for the Mae Klong River Basin, Thailand. *Applied Water Science* 11(147). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01474-6>
- Koem, C. y Tantanee, S. (2021). Flash Flood Hazard Mapping Based on AHP With GIS and Satellite Information in Kampong Speu Province, Cambodia. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment* 12(5), 457-470. <http://dx.doi.org/10.1108/IJDRBE-09-2020-0099>
- Koyama, N., Sakai, M. y Yamada, T. (2022). Study on Water-Level-Forecast Method Based on a Time Series Analysis of Urban River Basins-A Case Study of Shibuya River Basin in Tokyo. *Water* 15(1;161). <https://doi.org/10.3390/w15010161>
- Kruger, P. (2023). Lo que Bien se Aprende ¿Nunca se Olvida? Tensiones Conceptuales en la Normativa del Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres. *Studia Politicae* 59, 28-58. <http://dx.doi.org/10.22529/sp.2023.59.02>
- Krvavica, N., Šiljeg, A., Horvat, B. y Pandra, L. (2023). Pluvial Flash Flood Hazard and Risk Mapping in Croatia: Case Study in the Gospić Catchment. *Sustainability* 15(2; 1197). <https://doi.org/10.3390/su15021197>

- Kumar, A. y Nalini, S. (2021). Evaluation of Loss Models and Effect of LU/LC Changes on Surface Runoff in Subarnarekha River Basin. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 27(S1), 542-555. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1619489>
- Kumar, P., Garg, V. y Krishna, Y. (2021). GIS-Based Hazard and Vulnerability Assessment of a Torrential Watershed. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 921-951. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01476-z>
- Lara, J., Estrada, G., Zentella, J. y Guevara, A. (2017). Los costos de la expansión urbana: aproximación a partir de un modelo de precios hedónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(1), 37-63.
- Lazarević, K., Todosijević, M., Vulević, T., Polovina, S., Momirović, N. y Caković, M. (2023). Determination of Flash Flood Hazard Areas in the Likodra Watershed. *Water*, 15(15; 2698). <https://doi.org/10.3390/w15152698>
- Li, F., Chen, J., Liu, Y., Xu, P., Sun, H., Engel, B. y Wang, S. (2019). Assessment of the Impacts of Land Use/Cover Change and Rainfall Change on Surface Runoff in China. *Sustainability*, 11(13; 3535). <https://doi.org/10.3390/su11133535>
- Li, G., Liu, J. y Shao, W. (2023). Flood Risk Assessment Using TELEMAC-2D Models Integrated with Multi-Index Analysis in Shenzhen River Basin, China. *Water*, 14(16; 2513). <https://doi.org/10.3390/w14162513>
- Li, H., Le, M. y Liao, W. (2021). Integrated Risk Analysis Rely on Multi-data for Flash Flood in China Considering the Sensitivity of Disaster-prone Environment. *International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Risk Management (ICBAR)*, Shanghai, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9726938>

- Lim, C., Wong, H., Elfithri, R. y Teo, F. (2022). A Review of Stakeholders Engagement in Integrated River Basin Management. *Water*, 14(19; 2973). <https://doi.org/10.3390/w14192973>
- Maderey, L. y Jiménez, A. (2005). Introducción. En *Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico*. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma Nacional del México.
- Marcolini, G., Bellin, A. y Chiogna, G. (2017). Short Communication Performance of the Standard Normal Homogeneity Test for the Homogeneization of Mean Seasonal Snow Depth Time Series. *International Journal of Climatology* 37(1), 1267-1277. <https://doi.org/10.1002/joc.4977>
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N., Ungurean, C., Mihalache, A., Martoiu, N. y Tudose, O. (2022). Assessment of Seasonal Surface Runoff under Climate and Land Use Change Scenarios for a Small Forested Watershed: Upper Tarlung Watershed (Romania). *Water*, 14(18; 2860). <https://doi.org/10.3390/w14182860>
- Martín, J. (2017, 05 junio). Central de Abasto de Pachuca Padece Hacinamiento e Inundaciones. *Hoy Tamaulipas*. https://www.hoytamaulipas.net/notas/298082/Central-de-Abasto-de-Pachuca-padece-hacinamiento-e-inundaciones.html#google_vignette
- Martínez, L. (2023, 28 de julio). FOTOS: Fuertes lluvias en Pachuca dejan severas inundaciones. *ADN40*. Obtenido de <https://www.adn40.mx/mexico/inundaciones-plaza-explanada-pachuca-fuertes-lluvias-28-julio-2023>
- Martins, B., Lourenço, L. y Monteiro, S. (2018). Natural Hazards in Sao Vicente (Cabo Verde). *Journal of Environmental Geography*, 11 (1-2), 1-8. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2018-0001>
- Matreata, S., Baciú, O., Apostu, D. y Matreata, M. (2013). Evaluation of the Romanian Flash Flood Forecasting System – Case Study in the Calnau River

Basin. *Bodenkultur: Journal for Land Management, Food & Environment* 64(3/4), 67-72.

- Mayo, L. y Tingey, D. (2021). Shallow Groundwater Chemical Evolution, Isotopic Hyperfiltration, and Salt Pan Formation in a Hypersaline Endorheic Basin: Pilot Valley, Great Basin, USA. *Hydrogeology Journal* 29, 2219-2243. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02371-7>
- Mekonnen, H. y Kumar, S. (2022). Clarification of Issues and Long-Duration Hydrologic Simulation SCS-CN-Based Proxy Modelling. *Acta Geophysica* 70, 729-756. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00730-w>
- Mitra, R. y Das, J. (2023). A Comparative Assessment of Flood Susceptibility modelling of GIS-Based TOPSIS, VIKTOR, and EDAS Techniques in the Sub-Himalayan Foothills Region of Eastern India. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 16036-16067. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23168-5>
- Montelongo, M. (2015). Emisiones de gases de efecto invernadero y su mitigación en el Valle del Mezquital: Categoría energía 2005-2040. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Montoya, L., Silva, S. y González, J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas: Caso de aplicación a la Quebrada Doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 11-29.
- Montiel, R., Prado, J., Vázquez, M., Ibáñez, L. y Pascual, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37, 291-301. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Morales, J., Llaguno, O. y Vera, H. (2024, 27 de febrero). *Generación de Mapas de Vulnerabilidad en QGIS* [Ponencia]. QGIS Aplicado a Infraestructura Urbana, Morelos, México.

- Morte, A., Navarro, J. y García, E. (2019) Objective Assessment of Land Use in Hydrographical Studies. En *WIT Transactions on Ecology and the Environment Volume 234, 2019* (Mambretti, S. y Melagrejo, J., eds.) (pp. 41-52). WIT Press.
- Mustafa, A., Szydłowski, M., Veysipanah, M. y Hameed, H. (2023). GIS-Based Hydrodynamic modeling for Urban Flood Mitigation in Fast-Growing Regions: A Case Study of Erbil, Kurdistan Region of Iraq. *Scientific Reports*, 13;8935. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36138-9>
- Nageswara, K. (2020). Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS CN method. *Applied water Science*, 47(10), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1129-z>
- Narcizo, G., Fonseca-Salazar, M. y Campo, J. (2023). Urban Growth and Loss of Green Spaces in the Metropolitan Areas of São Paulo and Mexico City: Effects of Land-Cover Changes on Climate and Water Flow Regulation. *Urban Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01394-0>
- Oficina Federal de Protección Civil. (2014). *Gestión Integral del Riesgo: Su Importancia para Proteger a las Personas y sus Medios de sustento*. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- Oreano-Hernández, S. y Hernández-Guerrero, J. (2022). Inundaciones por Zonas Funcionales en la Subcuenca Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, México. *Revista Geográfica de América Central* 68(1), 238-264. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.9>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo 2014: Sistema Internacional de Clasificación de Suelos para la Nomenclatura de Suelos y la Creación de Leyendas de Mapas de Suelos* (Actualización 2015). FAO

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2015). *Estudios territoriales de la OCDE: Valle de México, México (Síntesis del estudio)*. OCDE.
- Osman, B., Faqe, G., Hamid, A. y Ahmad, S. (2022). Runoff Estimation Using SCS-CN and GIS Techniques in the Sulaymaniyah Sub-Basin of the Kurdistan Region of Iraq. *Environment, Development and Sustainability* 24, 2640-2655. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01549-z>
- Pambudi, S., Handayani, L., Meidiza, R. y Munggaran, G. (2019). Landuse Change Analysis for Hydrology Response and Planning Management of Cibeet Sub-Watershed, West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 284(012002). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/284/1/012002>
- Pandžić, K., Kobold, M., Oskoruš, D., Biondić, R., Bonacci, O., Likso, T. y Curić, O. (2019). Standard Normal Homogeneity Test as a Tool to Detect Change Points in Climate-Related River Discharge Variation: Case Study of the Kupa River Basin. *Hydrological Sciences Journal* 65(2), 227-241. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1686507>
- Parlamento Europeo. (2007, octubre 23). Directiva 2007/06/EC. *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32007L0060&qid=1696355205773>
- Peker, I., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O. y Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. *Sustainability* 16(1226). <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- Peña, J. (2018). Crisis del agua en Monterrey, Guadalajara, San Luis Potosí, León y la Ciudad de México (1950-2010). UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.

- Pérez, C. (2018). Expansión de la ciudad en la Zona Metropolitana de Pachuca: procesos desiguales y sujetos migrantes e inmobiliarios. *Territorios* (38), 41-65. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario>
- Pérez, R., Cruz, G., Moreno, F., González, A. y Romero, E. (2012). Cambios de vegetación y uso de suelo en la cuenca Río Bravo-San Juan, Coahuila (1993-2008). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10), 25-40.
- Pińskwar, I., Choryński, A. y Graczyk, D. (2023). Risk of Flash Floods in Urban and Rural Municipalities Triggered by Intense Precipitation in Wielkopolska of Poland. *International Journal of Disaster Risk Science* 14, 440-457. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00493-y>
- Poyatos, R., Latron, J. y Llorens, P. (2003). Land Use and Land Cover Change After Agricultural Abandonment: The Case of a Mediterranean Mountain Area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Search and Development*, 23(4), 362-368.
- Putra, A., Os, N. y Faalih, I. (2021). The Efficient Early Warning with South East-Asia Oceania Flash Flood Guidance System (SAOFFGS). En *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction* (Casagli, N., Tofani, V., Sassa, K., Bobrowsky, P. y Takara, K., Eds.). Springer.
- Quesada-Román, A. (2022). Disaster Risk Assessment of Informal Settlements in the Global South. *Sustainability*, 14(16); 10261). <https://doi.org/10.3390/su141610261>
- Rai, S. (2009). Introduction. En S. Rai, *Land Use and Climate Change* (pp. 1-16). Nova Science Publisehrs, Inc.
- Ramírez, J. y Solís, G. (2023). Las periferias metropolitanas: una aproximación a su estudio. *Revista de Estudios Regionales*, 1(1), 64-81. <https://doi.org/10.59307/terne1.111>
- Redacción (2019, 27 de septiembre). Piden Explicaciones por Inundación del Martes en la México-Pachuca. *Criterio*.

<https://criteriohidalgo.com/noticias/hidalgo/piden-explicaciones-por-inundacion-del-martes-en-la-mexico-pachuca>

Redacción (2020, 8 de mayo). Inundación en Pachuca Rebasó los 4 Metros de Altura; Familias Afectadas. *Quadratin*.
<https://queretaro.quadratin.com.mx/inundacion-en-pachuca-rebaso-los-4-metros-de-altura-familias-afectadas/>

Redacción. (2020, 8 de mayo). Deslave Inundaciones y Colapsos de Bardas, Saldo de Lluvia en Zona Metropolitana de Pachuca. *Am*.
<https://www.am.com.mx/hidalgo/2020/5/8/deslave-inundaciones-colapsos-de-bardas-saldo-de-lluvia-en-zona-metropolitana-de-pachuca-564156.html>

Redacción. (2021, 12 de mayo). IMÁGENES: Pachuca queda bajo el agua tras lluvias; piden estar alertas. *UNOtv.com*. Obtenido de <https://www.unotv.com/estados/hidalgo/pachuca-hidalgo-queda-bajo-el-agua-tras-lluvia-piden-estar-alertas/>

Redacción. (2023, 6 de septiembre). Vecinos del Sur de Pachuca Piden Detener Nuevos Fraccionamientos Debido a Inundaciones. *La Jornada Hidalgo*. Obtenido de <https://lajornadahidalgo.com/vecinos-del-sur-de-pachuca-piden-detener-nuevos-fraccionamientos-debido-a-inundaciones/>

Reilly, C. (2016). When in Louisiana, Do as the French Do: The Case for Integrated River Basin Management in Louisiana. *Tulane Environmental Law Journal* 30(41) 41-82.

Rincón, E. (2018, 28 de junio). Tormenta y Granizada Inundan Calles de Pachuca, Hidalgo. *Excelsior*. <https://www.excelsior.com.mx/nacional/tormenta-y-granizada-inundan-calles-de-pachuca-hidalgo/1248813>

Rindfuss, R., Entwisle, B., Walsh, S., Mena, C., Erlien, C. y Gray, C. (2007). Frontier Land Use Change: Synthesis, Challenges, and Next Steps. *Annals of the Association of American Geographers*, 97(4), 793-754.

- Romero, A. (2012). *Relación del escurrimiento superficial y el crecimiento poblacional en el Río de las Avenidas en Pachuca Hidalgo* [tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados]. Repositorio Institucional del COLPOS. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/1813>
- Roy, S. y Chintalacheruvu, M. (2024). Enhanced Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping in the Godavari River Basin, India: Leveraging Google Earth Engine and Principal Component Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering* 30(2), 228-244. <https://doi.org/10.1080/09715010.2023.2292280>
- Saaty, T. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences* 1(1), 83-98.
- Sadek, M., Li, X., Mostafa, E., Freeshah, M., Kamal, A., Almouctar, M., Zhao, F. & Mustafa, E. (2020). Low-Cost Solutions for Assessment of Flash Flood Impacts Using Sentinel-1/2 Data Fusion and Hydrologic/Hydraulic Modeling: Wadi El-Natrum region, Egypt. *Hindawi*, 1039309. <https://doi.org/10.1155/2020/1039309>
- Sajikumar, N. y Remya, R. (2015). Impact of Land Cover and Land Use Change on Runoff Characteristics. *Jurnal of Environmental Management* 161, 460-468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.041>
- Sánchez, J. (2019, 18 de julio). Personal de Bomberos y Protección Civil Realizaron Labores Ante Inundación. *Milenio*. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/personal-bomberos-proteccion-civil-realizaron-labores-inundacion>
- Santos, T. (2019, 30 Agosto). Necesarios Seis Drenes Pluviales en Pachuca para Evitar Inundaciones: Tellería. *Milenio*. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/necesarios-drenes-pluviales-pachuca-evitar-inundaciones-telleria>

- Sato, T. (1989). Agricultural Land-use Survey by Landsat MSS Data. En *Land-Use Change: Proceedings of the Asahikawa-Sapporo International Symposium, August 1987* (R. Hill, ed.)(pp. 115-124). Shanghai Printing & Binding Co.
- Schroers, S., Eiff, O., Kleidon, A., Scherer, U., Wienhöfer, J. y Zehe, E. (2022). Morphological controls on surface runoff: an interpretation of steady-state energy patterns, maximum power states and dissipation regimes within a thermodynamic framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (12), 3125-3150. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3125-2022>
- Science Education Resource Center at Carleton College (SERC). (2023, 16 de enero). Teaching with GeoPads. https://serc.carleton.edu/research_education/geopad/georeferencing.html
- Secretaría de Economía. (1 de enero de 2021a). *Data México*. Obtenido de Acerca de Mineral de la Reforma: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/mineral-de-la-reforma?redirect=true#education-and-employment>
- Secretaría de Economía. (1 de enero de 2021b). *Data México*. Obtenido de Acerca de Pachuca de Soto: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/pachuca-de-soto?redirect=true#economy>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (14 de julio de 2018). *Cuidado del medio ambiente, el reto de las grandes urbes*. Obtenido de Blog de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/cuidado-del-medio-ambiente-el-reto-de-las-grandes-urbes#:~:text=Uno%20de%20los%20grandes%20retos,su%20vez%20a%2014%20metr%C3%B3polis.>
- Shaikh, A., Pathan, A., Waikhom, S., Agnihotri, P., Islam, M. y Singh, S. (2022). Application of the Latest HEC-RAS Version for 2D Hydrodynamic Modeling

- Through GIS Framework: A Case Study From Coastal Urban Floodplain in India. *Modeling Earth Systems and Environment* 9, 1369-1385. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01567-4>
- Sharma, N., Kumar, R., Verma, S., Kumar, S. y Pandey, A. (2023). Sensitivity and Performance Evaluation of Improved SCS-CN Model by Incorporating Temporally Decaying Retention Parameter with Varying Soil Moisture for More Versatile Applications. *Paddy and Water Environment* 21, 307-324. <https://doi.org/10.1007/s10333-023-00925-x>
- Shrestha, S., Cui, S., Xu, L., Wang, L., Manandhar, B. y Ding, S. (2021). Impact of Land Use Change Due to Urbanisation on Surface Runoff Using GIS-Based SCS-CN Method: A Case Study of Xiamen City, China. *Land* 10(8); 839). <https://doi.org/10.3390/land10080839>
- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas v4 (SIATLv4) (2018). *Conjunto de datos vectoriales de Subcuencas 1:50,000* (ed. 2.0). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Sistema de Información Hidrológica (SIH). (2012-2022). *Conjunto de datos vectoriales de Estaciones Climatológicas Activas*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Sivrikaya, F., Çakir, G., Keleş, S. y Başkent, E. (2009). Spatiotemporal Dynamics of Land Use/Land Cover and Timber Carbo Storage: A Case Study From Bulanikdere, Turkey. En P. Joshi, P. Pani, S. Mohapatra, y T. Singh, *Geoinformatics for Natural Resource Management* (pp. 2015-248). Nova Science Publishers, Inc.
- Soomro, S., Hu, C., Boota, M., Ahmed, Z., Chengshuai, L., Zhenyue, H., Xiang, L. y Soomro, M. (2022) River Flood Susceptibility and Basin Maturity Analyzed Using a Coupled Approach of Geo-morphometric Parameters and SWAT

- Model. *Water Resources Management* 36, 2131-2160.
<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03127-y>
- Srivastava, A. y Chinnasamy, P. (2021). Investigating Impact of Land-Use and Land Cover Changes on Hydro-Ecological Balance Using GIS: Insights From IIT Bombay, India. *SN Applied Sciences* 3(343). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04328-7>
- Stamatelatos, M. (2000). Probabilistic Risk Assessment: What Is It And Why Is It Worth Performing It?. *NASA Office of Safety and Mission Assurance*. National Aeronautics and Space Administration.
<https://www.hq.nasa.gov/office/codeq/qnews/prs.pdf>
- Starzec, M., Kordana-Obuch, S. y Słyś, D. (2023). Assessment of the Feasibility of Implementing a Flash Flood Early Warning System in a Small Catchment Area. *Sustainability*, 15(10; 8316). <https://doi.org/10.3390/su15108316>
- Stewart, J. (2019). Critical Role of Bridging Organizations in River Basin Management in Alberta, Canada. En *WIT Transactions on Ecology and the Environment Volume 234, 2019* (Mambretti, S. y Melagrejo, J., eds.) (pp. 91-102). WIT Press.
- Subraelu, P., Ahmed, A., Ebraheem, A., Sherif, M., Mirza, S., Ridouane, F. y Sefelnasr, A. (2023). Risk Assessment and Mapping of Flash Flood Vulnerable Zones in Arid Region, Fujairah City, UAE-Using Remote Sensing and GIS-Based Analysis. *Water*, 15(15; 2802).
<https://doi.org/10.3390/w15152802>
- Sui, H., Su, T., Hu, R., Wang, D. y Zheng, Z. (2022). Study on the Risk Assessment Method of Rainfall Landslide. *Water*, 14(22; 3678).
<https://doi.org/10.3390/w14223678>
- Takatsu, Y. (1989). Urban Land Use and Urban Renewal in Japan. En *Land-Use Change: Proceedings of the Asahikawa-Sapporo International Symposium, August 1987* (R. Hill, ed.)(pp. 125-132). Shanghai Printing & Binding Co.

- Talha, S., Maanan, M., Atika H. y Rhinane, H. (2019, 14-15 de Noviembre). *Prediction of Flash Flood Suceptibility Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) Algorithms and GIS: A Study Case of Guelmim Region in Southwestern of Morocco [Ponencia]*. PhilGEOS x GeoAdvances, Manila, Filipinas.
- Tariq, A., Yan, J., Ghaffar, B., Qin, S., Mousa, B., Sharifi, A., Huq, M. y Aslam, M. (2022). Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation by Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model with Diverse Spatial Data. *Water* 14(3069). <https://doi.org/10.3390/w14193069>
- Thacker, S., Kelly, S., Pant, R. y Hall, J. (2018). Evaluating the Benefits of Adaptation of Critical Infrastructures to Hydrometeorological Risks. *Risk Analysis*, 38(1), 134-150. <https://doi.org/10.1111/risa.12839>
- Tola, S. y Shetty, A. (2024). Flood Hazard Map of the Becho Floodplain, Ethipia, Using Nonstationary Frecuency Model. *Acta Geophysica* 72, 1079-1095. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01074-9>
- Toreti, A., Kuglitsch, F., Xoplaki, E., Della-Marta, P., Aguilar, E., Prohom, M. y Luterbacher. (2011). Short Communication: A Note on the Use of the Standard Normal Homogeneity Test to Detect Inhomogeneities in Climatic Time Series. *International Journal of Climatology* 31, 630-632. <https://doi.org/10.1002/joc.2088>
- Torres, Y. (2019, 26 de abril). Inundaciones causan psicosis en los Tuzos. Criterio. Obtenido de <https://criteriohidalgo.com/multimedia/inundaciones-causan-psicosis-en-los-tuzos>
- Tu, Y., Zhao, Y., Dong, R., Wang, H., Ma, Q., He, B. y Liu, C. (2023). Study on Risk Assessment of Flash Floods in Hubei Province. *Water*, 15(4; 617). <https://doi.org/10.3390/w15040617>
- Ugliotti, F., Osello, A., Daud, M. y Yilmaz, O. (2023). Enhancing Risk Analysis Toward Landscape Digital Twin Framework: A Multi-Hazard Approach in the

- Context of a Socio-Economic Perspective. *Sustainability*, 15(16; 12429). <https://doi.org/10.3390/su151612429>
- Ullah, M., Qureshi, K. y Shah, L. (2024). Advanced Floodplain Mapping: HEC-RAS and ArcGIS Pro Application on Swat River. *Journal of Umm Al-Qura University of Engineering and Architecture*. <https://doi.org/10.1007/s43995-024-00054-4>
- Valdés, A. (2020). *Manual de Morfometría de Cuencas*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Valdés-Carrera, C. y Hernández-Guerrero, J. (2018). Zonas Funcionales y Unidades de Paisaje Físico-Geográfico en la Microcuenca Potrero de la Palmita, Nayarit, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 189-229. <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1.7>
- Vázquez, R., Carlón-Allende, T., García-Tenorio, F. y Mendiola, F. (2023). Numerical Modelling of a Flash-Flood event in Peribán de Ramos, Michoacán (México). *Physical Geography* 44(4), 503-529. <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2163539>
- Vázquez, V. (2023). Impacto Espacial de las Inundaciones Súbitas en la Resiliencia Turística de Matehuala, San Luís Potosí, México. *Cuadernos de Turismo*, 51, 163-187. <https://doi.org/10.6018/turismo.571501>
- Voda, M., Sarpe, C. y Voda, A. (2019). Romanian River Basins Lag Time Analysis. The SCS-CN Versus RNS Comparative Approach Developed for Small Watershed. *Water Resources Management* 33, 245-259. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2100-8>
- Wang, W., Yang, P., Xia, J., Zhang, S. y Cai, W. (2022a). Couplin analysis of surface runoff variation with atmospheric teleconnection indices in the middle reaches of the Yangtze River. *Theoretical and Applied Climatology*, 148, 1513-1527. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04013-8>

- Wang, Y., Dai, Q., Ding, P., Li, K., Yi, X., He, J., ... Yang, Y. (2022b). Rapid Response of Runoff Carrying Nitrogen Loss to Extreme Rainfall in Gentle Slope Farmland in the Karst Area of SW China. *Water*, 14 (20; 3341). <https://doi.org/10.3390/w14203341>Wang
- Wang, X., Gourbesville, P. y Liu, C. (2023). Flash Floods: Forecasting, Monitoring and Mitigation Strategies. *Water*, 15(9; 1700). <https://doi.org/10.3390/w15091700>
- Waqas, H., Lu, L., Tariq, A., Li, Q., Baqa, M., Xing, J. y Sajjad, A. (2021). Flash Flood Suceptibility Assessment and Zonation Using and Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model for the Chitral District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Water* 13(12; 1650). <https://doi.org/10.3390/w13121650>
- Weatherl, R., Salgado, M., Ramgraber, M., Moeck, C. y Schirmer, M. (2021). Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach . *Hydrogeology Journal* , 29, 2411-2428. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02385-1>
- Witjaksono, A., Surjono, Suharyanto, A. y Bisri, M. (2018). Spatial Analysis of Land Use in Bumiaji Subdistrict, Batu City, East Java, Indonesia. *International Journal of GEOMATE* 15(47), 139-144. <https://doi.org/10.21660/2018.47.47589>
- Worku, T., Khare, D. y Tripathi, S. (2017). Modeling runoff–sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed. *Environmental Earth Science*, 76; 550. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6883-3>
- World Meteorological Organization (WMO). (2021, 15 de octubre). *WMO Strengthens Flash Flood Guidance System*. <https://public.wmo.int/en/media/news/wmo-strengthens-flash-flood-guidance-system>

- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *About Us*.
<https://public.wmo.int/en/about-us>
- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *Flash Flood Guidance System with Global Coverage (FFGS)*. <https://public.wmo.int/en/projects/ffgs>
- Xie, S., Liu, W., Yuan, Z., Zhang, H., Lin, H. y Wang, Y. (2022). Integrated Risk Assessment of Waterlogging in Guanzhou Based on Runoff Modeling, AHP, GIS and Scenario Analysis. *Water*, 14(18; 2899).
<https://doi.org/10.3390/w14182899>
- Yan, Y., Zhang, N. y Zhang, H. (2023). Applications of Advanced Technologies in the Development of Urban Flood Models. *Water* 15(4; 622).
<https://doi.org/10.3390/w15040622>
- Yang, J., Townsend, R. y Daneshfar, B. (2006). Applying the HEC-RAS Model and GIS Techniques in River Network Floodplain Delineation. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33(1), 19-28. <https://doi.org/10.1139/l05-102>
- Yaseen, M., Ullah, F., Visetnoi, S., Ali, S. y Saqib, S. (2023). Does the Nature of Flash Floods Matter in the Risk Perception of Households? A Comparative Assessment among the Rural Households Prone to Flash and Riverine Floods in Pakista. *Water*, 15(3; 504). <https://doi.org/10.3390/w15030504>
- Yepes, V. (2022, 15 de febrero). *Cálculo de la Consistencia y el Vector Propio en AHP*. Universitat Politècnica de València. Consultado el 8 de febrero de 2024.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2022/02/15/calculo-de-la-consistencia-y-el-vector-propio-en-ahp/>
- Yilmaz, O., Akyuz, D., Aksel, M., Dikici, M., Akgul, M., Yagci, O., Sanli, F. y Aksoy, H. (2023). Evaluation of Pre- and Post-Fire Flood Risk by Analytical Hierarchy Process Method: A Case Study for the 2021 Wildfires in Bodrum, Turkey. *Landscape and Ecological Engineering* 19, 271-288.
<https://doi.org/10.1007/s11355-023-00545-x>

- Yordanova, V., Stoyanova, S., Balabanova, S., Koshinchanov, G. y Stoyanova, V. (2022). Flash Flood Forecasting Using Flash Flood Guidance System Products. *Section Hydrology & Water Resources* 22(3.1), 89-96. <https://doi.org/10.5593/sgem2022/3.1/s12.11>
- Yuan, W., Lu, L., Song, H., Zhang, X., Xu, L., Su, C., Liu, M., Yan, D. y Wu, Z. (2022). Study on the Early Warning for Flash Floods Base on Random Rainfall Pattern. *Water Resources Management* 36, 1587-1609. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03106-3>
- Zeinali, V., Vafakhah, M. y Hamidreza, S. (2019). 'Impact of Urbanization on Temporal Distribution Pattern of Storm Runoff Coeficient. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(595). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7734-3>
- Zeng, Z., Tang, G., Long, D., Xu, H., Chen, Y. y Yang, H. (2015, 1-4 de junio). *Development of GIS-Based FFPI for China's Flash Flood Forecasting* [Conferencia]. 2015 23rd International Conference on Geoinformatics. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2015.7378697>
- Zeng, Z., Tang, G., Long, D., Zeng, C., Ma, M., Hong, Y. Xu, H. y Xu, J. (2016). A Cascading Flash Flood Guidance System: Development and Application in Yunnan Province, China. *Natural Hazards* 84, 2071-2093. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2535-2>
- Zhang, J., Wang, J., Chen, S., Tang, S. y Zhao, W. (2022). Multi-Hazard Meteorological Disaster Risk Assessment for Agriculture Base on Historical Disaster Data in Jilin Province, China. *Sustainability*, 14(12; 7482). <https://doi.org/10.3390/su14127482>
- Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y. y Li, S. (2016). Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLOS ONE*, 11(6; e0158394). <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3391822>

- Zhu, R., Newman, G. y Atoba, K. (2021) Simulating the Impact of Land Use Change on Contaminant Transferal During Flood Events in Houston, Texas. *Landscape Journal* 40(2), 79-99. <https://doi.org/10.3368/lj.40.2.79>
- Zhu, Z., Zhang, Z., Zhao, X., Zuo, L. y Wang, X. (2022). Characteristics of Land Use Change in China before and after 2000. *Sustainability*, 14(21; 14623). <https://doi.org/10.3390/su142114623>
- Zilio, M., Bohn, V., Piccolo, M. y Perillo, G. (2022) Land Cover Changes and Ecosystem Services at the Negro River Basin, Argentina: What is Missing for Better Assessing Nature's Contribution? *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 265-278. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1901727>
- Zope, P. E., Eldho, T. I. y Jothiprakash, V. (2017). Hydrological impacts of land use-land cover changes and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. *Natural Hazards*, 87(3), 1267-1283.