

## Fallas activas en Zamora, Michoacán, México: afectación y monitoreo

### *Active faults in Zamora, Michoacán, Mexico: impact and monitoring*

Víctor Manuel Hernández Madrigal,\* Cecilia Irene Villaseñor Reyes,\*\* Jesús Pacheco Martínez,\*\*\* Gerardo Manuel Rodríguez Torres,+ Netzahualcóyotl Flores Lázaro++

Recibido: 3/07/2024. Aceptado: 5/09/2024. Publicado: 11/11/2024.

**Resumen extendido.** La subsidencia por sobreexplotación del agua subterránea es uno de los fenómenos que más afectan a zonas urbanas de México situadas sobre depósitos no consolidados, como ocurre en Zamora. Esta ciudad, ubicada al noroeste del estado de Michoacán sobre sedimentos lacustres y fluvio-lacustres, es reconocida internacionalmente por su alta producción y procesamiento de fresas. Una actividad económica que demanda grandes volúmenes de agua de alta calidad, lo que ha llevado a una intensa extracción de agua subterránea. La subsidencia en Zamora comenzó a manifestarse en 2008 a través de fallas geológicas superficiales y activas, que, a pesar de causar graves daños a la infraestructura, no habían sido estudiadas adecuadamente. Este trabajo tiene como objetivos cartografiar por primera vez y a gran escala dichas estructuras; cuantificar la tasa de deformación y nivel de impacto, y analizar la relación entre el proceso de generación de fallas superficiales asociadas a la subsidencia diferencial con el sistema de fallas de origen tectónico regional y trayectoria de afluentes antiguos. Para ello fueron identificadas deformaciones en la infraestructura urbana asociadas al hundimiento diferencial; se implementó

un sistema de monitoreo GPS sobre puntos de control terrestre ubicados estratégicamente sobre ambos bloques de las fallas; se calculó el Grado de Impacto Urbano (GIU) a partir de relaciones espaciales de intersección y proximidad entre la franja de afectación, eje de falla y predio urbano, y fue evaluada la sobreposición cartográfica entre el fallamiento superficial, mancha urbana actual, sistema de fallas regional, y trayectos del escurrimiento superficial de la época colonial. Los resultados muestran que la ciudad de Zamora se ve afectada por cuatro fallas superficiales: “Centro”, “Colegio”, “Porvenir” y “Campestre”. Las dos primeras, más antiguas, presentan GIU de 0.36 y 0.42, respectivamente; tasa de hundimiento máximo de 15.2 mm/año con tendencia de desaceleración, y dirección general NW-SE con trayectoria cóncava hacia el sur donde se ubica el bloque hundido. La falla “Porvenir”, con GIU de 0.31, tiene una trayectoria WNW-ESE semicóncava hacia el norte donde se ubica su bloque caído, y tasa de hundimiento máximo de 9.3 mm/año también en desaceleración. En estas tres fallas la ubicación del bloque hundido y trayectoria del escarpe no son congruentes con la geometría del fallamiento regional,

\*Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Mujica s/n, edificio U-3, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán, México. <https://orcid.org/0000-0003-1287-0911>. Email: [victor.hernandez@umich.mx](mailto:victor.hernandez@umich.mx). Autor de correspondencia.

\*\* Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Patzcuaro Erongaricuaro km. 3, Centro, 58010, Pátzcuaro, Michoacán, México. <https://orcid.org/0000-0002-4038-9714>. Email: [cecilia.villarey@gmail.com](mailto:cecilia.villarey@gmail.com)

\*\*\* Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y Observatorio de Riesgos Hidrogeológicos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, 20100, Aguascalientes, Ags., México. <https://orcid.org/0000-0002-0451-4143>. Email: [jesus.pacheco@edu.uaa.mx](mailto:jesus.pacheco@edu.uaa.mx)

+ Universidad Tecnológica de la Construcción. Av. Nicolás Ballesteros 1200, Cd. Industrial, 58200, Morelia, Mich., México. <https://orcid.org/0000-0001-7808-6674>. Email: [gerardo.torres@umich.mx](mailto:gerardo.torres@umich.mx)

++ Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Patzcuaro Erongaricuaro km. 3, Centro, 58010, Pátzcuaro, Michoacán, México. <https://orcid.org/0000-0002-2343-857X>. Email: [netzaff@gmail.com](mailto:netzaff@gmail.com)

pero sí con la antigua trayectoria del río Duero y canal Los Espinos (fallas Centro y Colegio), y del dren El Calvario (falla El Porvenir), por lo que su control estructural se asocia a paleocanales y sus factores condicionantes a depósitos fluviales de las épocas prehispánica y colonial. En contraste, la falla superficial Campestre, que es la más joven de todas y también la que mayor impacta a la infraestructura habitacional (GIU=0.45), presenta bloque caído al sur y dirección WNW-ESE coincidente con la falla profunda Villa Fuerte y la geometría del bordo septentrional del mayor hundimiento regional del Valle de Zamora. La subsidencia regional activa en combinación con paleocanales que son muy comunes en un valle de frecuentes inundaciones como el de Zamora, con geometría del basamento tipo graben y extracción intensa de agua subterránea; es factor condicionante importante para el desarrollo de fallas superficiales activas y dinámicas en donde se generan o reactivan, se desarrollan, y “mueren” o estabilizan. La cartografía, grado de impacto urbano y velocidad de hundimiento de las fallas activas de Zamora permitirán establecer políticas públicas examinadas a la planificación del crecimiento urbano y agroindustrial de la región con enfoque en la reducción de riesgos de desastres.

**Palabras clave:** río Duero, hundimiento, fallas, afectación, subsidencia.

**Abstract.** Subsidence due to groundwater overexploitation is one of the phenomena that most affects urban areas in Mexico located on unconsolidated deposits, as is the case in Zamora. This city, located in the northwestern part of the state of Michoacán on lacustrine and fluvial-lake sediments, is internationally recognized for its high production and processing of strawberries. This economic activity demands large volumes of high quality water, which has led to intense groundwater extraction. Subsidence in Zamora began to manifest itself in 2008 through surface and active geological faults, which, despite causing serious damage to infrastructure, had not been adequately studied. The objectives of this work are to map these structures for the first time and on a large scale; to quantify the rate of deformation and level of impact; and to analyze the relationship between the generation process of surface faults associated with differential subsidence and the fault system of regional tectonic origin and the trajectory of ancient tributaries. For this purpose, deformations in the urban infrastructure associated with

differential subsidence were identified; a GPS monitoring system was implemented on ground control points strategically located on both fault blocks; the Degree of Urban Impact (GIU) was calculated from spatial relationships of intersection and proximity between the affected strip, fault axis and urban property; and the cartographic overlap between the surface faulting, current urban area, regional fault system, and trajectories of surface runoff from colonial times was evaluated. The results show that the city of Zamora is affected by four surface faults: “Centro”, “Colegio”, “Porvenir” and “Campestre”. The first two, older, present GIU of 0.36 and 0.42, respectively; maximum subsidence rate of 15.2 mm/year with a decelerating trend; and general NW-SE direction with a concave trajectory towards the south where the subsided block is located. The “Porvenir” fault with GIU of 0.31, has a WNW-ESE semi-concave trajectory towards the north where its down-dropped block is located, and maximum subsidence rate of 9.3 mm/year also in deceleration. In these three faults, the location of the sunken block and the scarp trajectory are not congruent with the geometry of the regional faulting, but with the ancient trajectory of the Duero river and Los Espinos channel (Centro and Colegio faults), and of the El Calvario drainage (El Porvenir fault), so their structural control is associated with paleochannels and their conditioning factors with fluvial deposits from pre-Hispanic and colonial times. In contrast, the Campestre surface fault, which is the youngest of all and also the one that has the greatest impact on the housing infrastructure (GIU=0.45), has a south-falling block and a WNW-ESE direction coincident with the Villa Fuerte deep fault and the geometry of the northern edge of the largest regional subsidence in the Zamora Valley. The active regional subsidence in combination with paleochannels that are very common in a valley of frequent floods such as the Zamora Valley, with graben-like basement geometry and intense groundwater extraction, is an important conditioning factor for the development of active and dynamic surface faults where they are generated and/or reactivated, develop, and “die” or stabilize. The mapping, degree of urban impact and rate of subsidence of the active faults of Zamora will allow the establishment of public policies aimed at planning the urban and agro-industrial growth of the region with a focus on disaster risk reduction.

**Keywords:** Duero river, sinking, faults, affectation, subsidence.

## INTRODUCCIÓN

La subsidencia por sobreexplotación del agua subterránea es uno de los fenómenos que más afectan a la infraestructura de zonas urbanas. En México la subsidencia producida por sobreexplotación de agua subterránea se divide para su estudio en dos grupos: subsidencia regional, y subsidencia diferencial. La primera, conocida también como subsidencia tipo

Ciudad de México (Figuroa-Miranda *et al.*, 2018), comienza a ser registrada en dicha urbe a finales de siglo XIX y principios del XX (Gayol, 1925; Carrillo, 1969) y consiste en un hundimiento cuasi homogéneo que afecta a superficies extensas en respuesta a la compactación de grandes paquetes de materiales no consolidados, depositados sobre antiguas y profundas fosas tectónicas. El segundo tipo de subsidencia es a la cual Farina *et al.* (2007),

Ávila-Olivera *et al.* (2010) y Figueroa Miranda *et al.* (2018), definen como subsidencia diferencial con control estructural. Esta comienza a ser registrada en Celaya e Irapuato (Trujillo-Candelaria, 1985; 1991) y Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2001) a mediados de la década de 1980, y se origina por una consolidación heterogénea de los rellenos sedimentarios que forman el sistema acuífero de espesor variable depositados sobre escarpes de antiguas fallas geológicas, paleo-relieves abruptos, y paleo-canales. En este documento nos referiremos a este tipo como subsidencia diferencial. Ambos grupos de subsidencia son motivados por el incremento de esfuerzos efectivos y reducción de presión de poro a consecuencia de descenso del nivel del agua subterránea. Por lo que es común su desarrollo en asentamientos humanos ubicados sobre depósitos lacustres y fluvio-lacustres, y con gran dependencia de agua subterránea.

La subsidencia diferencial se asocia al desarrollo en la superficie del terreno de una falla normal asísmica (que no genera sismos) (Brunori *et al.*, 2015), o falla superficial semi paralela a la proyección de la corona del escarpe de la falla sepultada, con el buzamiento en la dirección del bloque de techo de esta última, y con una franja de afectación en donde se registran deformaciones en la infraestructura. Actualmente, este fenómeno afecta a ciudades con acelerado crecimiento demográfico e industrial tales como Querétaro (Castellazzi *et al.*, 2021); Toluca (Calderhead *et al.*, 2011); Aguascalientes (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013); San Luis Potosí (Pacheco-Martínez *et al.*, 2010); Puebla (Chaussard *et al.*, 2014) y Ciudad Guzmán (Brunori *et al.*, 2015) entre otras. En todas ellas se generan importantes daños materiales (Hernández-Madrugal *et al.*, 2014; 2015), ambientales (Ortiz Zamora y Ortega Guerrero, 2007), y se potencian otros fenómenos como las inundaciones (Vera y López, 2010; Figueroa-Miranda, 2018).

Como puede notarse, el estudio de este fenómeno se ha centralizado principalmente en ciudades capitales o de gran relevancia socioeconómica (Villaseñor *et al.*, 2022), dejando de lado poblaciones menores donde el proceso, a pesar de generar daños materiales, no ha sido adecuadamente identificado ni cartografiado. Es el caso de la ciudad de Zamora

(Mich.) cuyo atlas de riesgos reporta la ausencia de riesgo por hundimientos y fracturamientos del terreno (Grupo Edificador INCA, 2013), no obstante que los habitantes del Centro Histórico afirman que sus viviendas y calles comenzaron a verse afectadas por grietas y fracturas desde 2008. Congruente con esto último, Chaussard *et al.*, (2014), usando la técnica de interferometría radar de apertura sintética (InSAR), reportan para el periodo 2007-2011 un hundimiento con velocidad de 12.8 cm/año en la mancha urbana de Zamora. Posteriormente, para los periodos 2014-2017 y 2018-2021 Villaseñor-Reyes *et al.* (2022), mediante radar interferométrico diferencial de apertura sintética (DInSAR), obtienen hundimientos de 10 y 7.8 cm/año, respectivamente.

En este trabajo se muestra por primera vez la cartografía a gran escala de las fallas por subsidencia diferencial que afectan a la ciudad de Zamora. Se presenta una evaluación de la tasa de deformación y la identificación de los predios urbanos afectados. Además, se discute la relación entre el proceso de generación de fallas superficiales asociadas a la subsidencia diferencial y el sistema de fallas de origen tectónico regional, así como la trayectoria antigua del río Duero, mediante la sobreposición cartográfica. Esta información permitirá a los tomadores de decisiones implementar políticas públicas para la gestión del riesgo por subsidencia diferencial, con la posibilidad de implementar un monitoreo permanente para su descripción espacio-temporal y análisis de peligros asociados como las inundaciones. Sin duda es de gran interés para los estudiosos de la subsidencia en México, así como para planificadores y desarrolladores urbanos.

### Localización del área de estudio

La ciudad de Zamora, cabecera del municipio homónimo, se localiza en el sector noroeste del estado de Michoacán (Figura 1) a una altitud de 1570 msnm. Tiene una extensión de 3229 ha (9.6% de la superficie municipal) y una población de 169 133 habitantes (CONAGUA, 2020). Colinda al sur con el municipio de Jacona de Plancarte, siendo el río Duero la frontera natural que divide a las cabeceras de ambos municipios; al sureste con Tangancicuaro; al este con Churintzio y Tlazazalca;

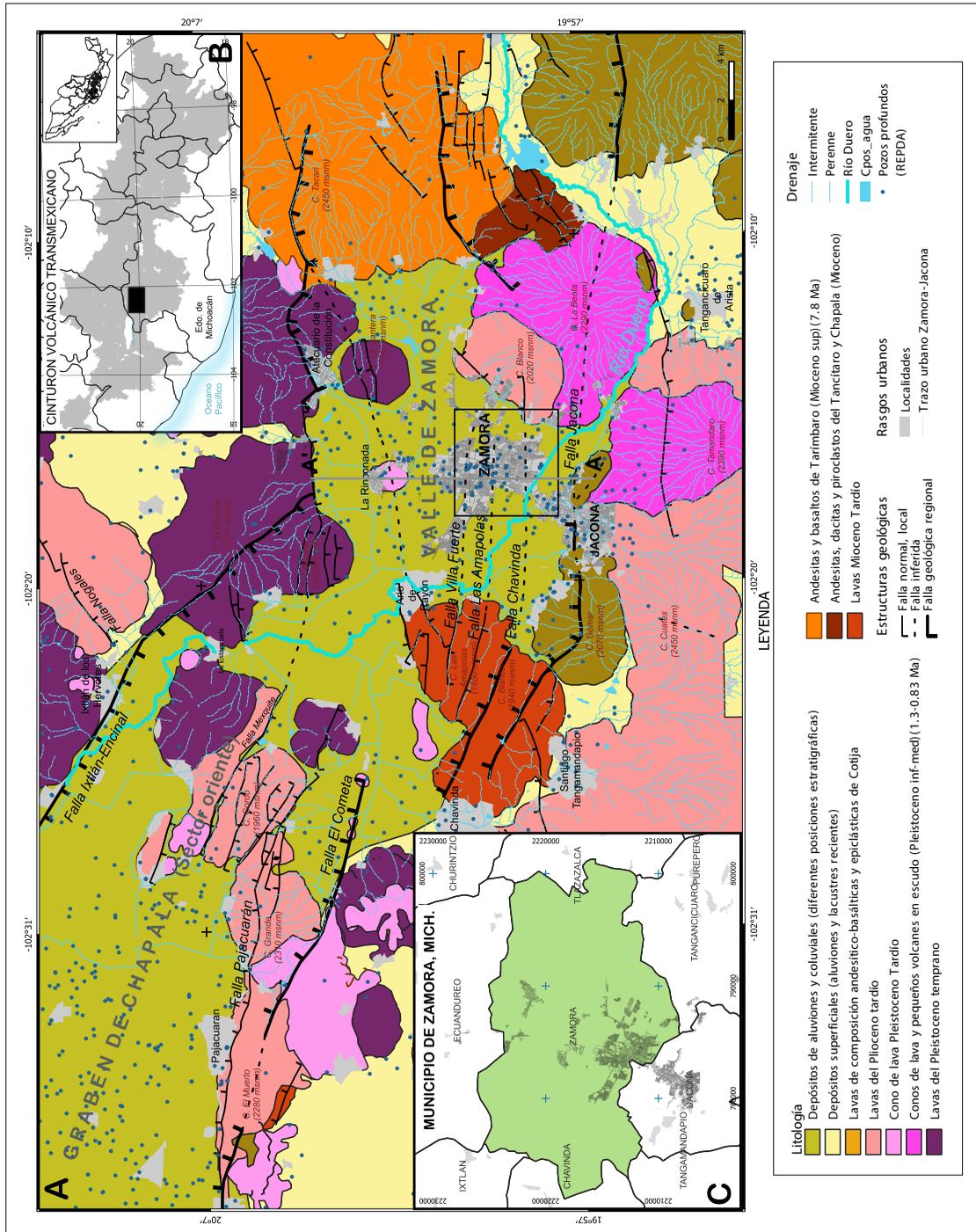


Figura 1. Localización del área de estudio y geología del valle de Zamora.

al norte con Ecuandureo e Ixtlán; y al oeste con Chavinda y Tangamandapio (Figura 1C). Presenta un clima semihúmedo subtropical con lluvias en verano y precipitación media anual de 815 mm.

### Características geológicas

La ciudad de Zamora se desarrolla sobre una gran depresión topográfica conocida como Valle de Zamora (Figura 1A), localizada en el occidente del Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 1B). Este valle presenta una forma alargada en dirección E-W limitado al norte por las fallas normales Ixtlán-Encinal y Mexquite, con direcciones NW-SE y E-W, respectivamente, ambas con bloques de techo en el sur, y al sur por la falla Jacona de dirección E-W con el bloque de techo en el norte. Al interior de este valle se observan bloques fallados y basculados lo que hace suponer que se trata de la prolongación del flanco oriente del graben de Chapala.

El basamento de este valle está conformado por derrames basálticos-andesíticos del terciario inferior, cubiertos por sedimentos lacustres y fluviolacustres no consolidados (alternancias de gravas, arenas, limos, y arcillas de edad reciente) de más de 800 m de espesor (SEPICT, 1993). Al interior y periferia del valle se observan numerosas estructuras volcánicas de composición basáltica y andesítica-basáltica de entre las que destacan: C. Blanco (2020 m) y C. La Beata (2290 m) al E y SE, respectivamente; C. Gomar (2070 m) en el sur; C. Las Amapolas (1850m) al poniente, y al norte, cerros Colorado (1880m) y La Cantera (1740m). Todos ellos edificios volcánicos asociados a eventos tectónicos que fracturaron a este sector del graben de Chapala durante el Terciario superior y Pleistoceno (Rosas-Elguera *et al.*, 1989).

### Hidrografía

La ciudad de Zamora se localiza en la parte baja de la cuenca del río Duero, dentro de la región hidrográfica Lerma-Santiago y del Distrito de Riego 061, perteneciente a la Región Hidrológica Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico. El río Duero, principal afluente perenne de la región, nace en el sector septentrional de la meseta purépecha con los manantiales de Cherán, Carapan y Purépero localizados entre las cotas 2300 y 2700

msnm. Inicia su flujo hacia el oeste cruzando la cañada de los Once Pueblos (1800 a 2100 msnm) y al entrar al valle de Tangancícuaro (1700 msnm) cambia de dirección hacia el noroeste para llegar al Valle de Zamora (1580 msnm). Posteriormente, se dirige hacia el norte y al llegar a la localidad de La Estanzuela retoma nuevamente su dirección al noroeste para atravesar la Ciénega de Chapala e incorporarse finalmente al río Lerma. La baja pendiente del Valle de Zamora fue motivo de desbordamientos frecuentes del río Duero por lo que la ciudad, desde su fundación, ha sido afectada por inundaciones que se intensifican en temporada de lluvias. Para mitigar este problema, en la época colonial se construyó un canal de desagüe que atravesaba el centro histórico de Zamora y conducía las aguas servidas hacia el noroeste, además de un sistema de canales (El Calvario, Los Espinos y Tamandarillo) (Figura 2) que eran empleados para la irrigación de parcelas de cultivo ubicadas en la periferia de la ciudad (Sánchez, 2007). En esta misma época, el río Duero fluía en dirección este-oeste siguiendo la trayectoria de la actual calle Corregidora, ubicada 150 m al sur de la plaza de armas, marcando el límite meridional de la ciudad de esa época. La mancha urbana continuó expandiéndose por lo que los frecuentes desbordamientos del río Duero afectaron cada vez con mayor intensidad a la población. Es por ello, por lo que a finales del siglo XIX se inicia el proyecto de rectificación de este histórico río a cargo de un regimiento de zapadores del ejército mexicano (Sánchez y Boehm, 2005; Sánchez, 2007), ubicándolo 1600 m hacia el sur con una nueva trayectoria que fue conocida en su momento como Nuevo Río Duero o canal de Zapadores, conservándose así hasta la actualidad (Figura 2).

### Uso y disponibilidad de agua subterránea

La economía del municipio se basa principalmente en la agricultura y agroindustria, particularmente en el cultivo y procesamiento de frutillas (fresa, frambuesa, zarzamora y frutos rojos o *berries*), por lo que tiene una gran exigencia de agua de alta calidad (Flores-Lázaro *et al.*, 2017). La agricultura, ganadería, industria y población urbana son los principales consumidores de agua subterránea

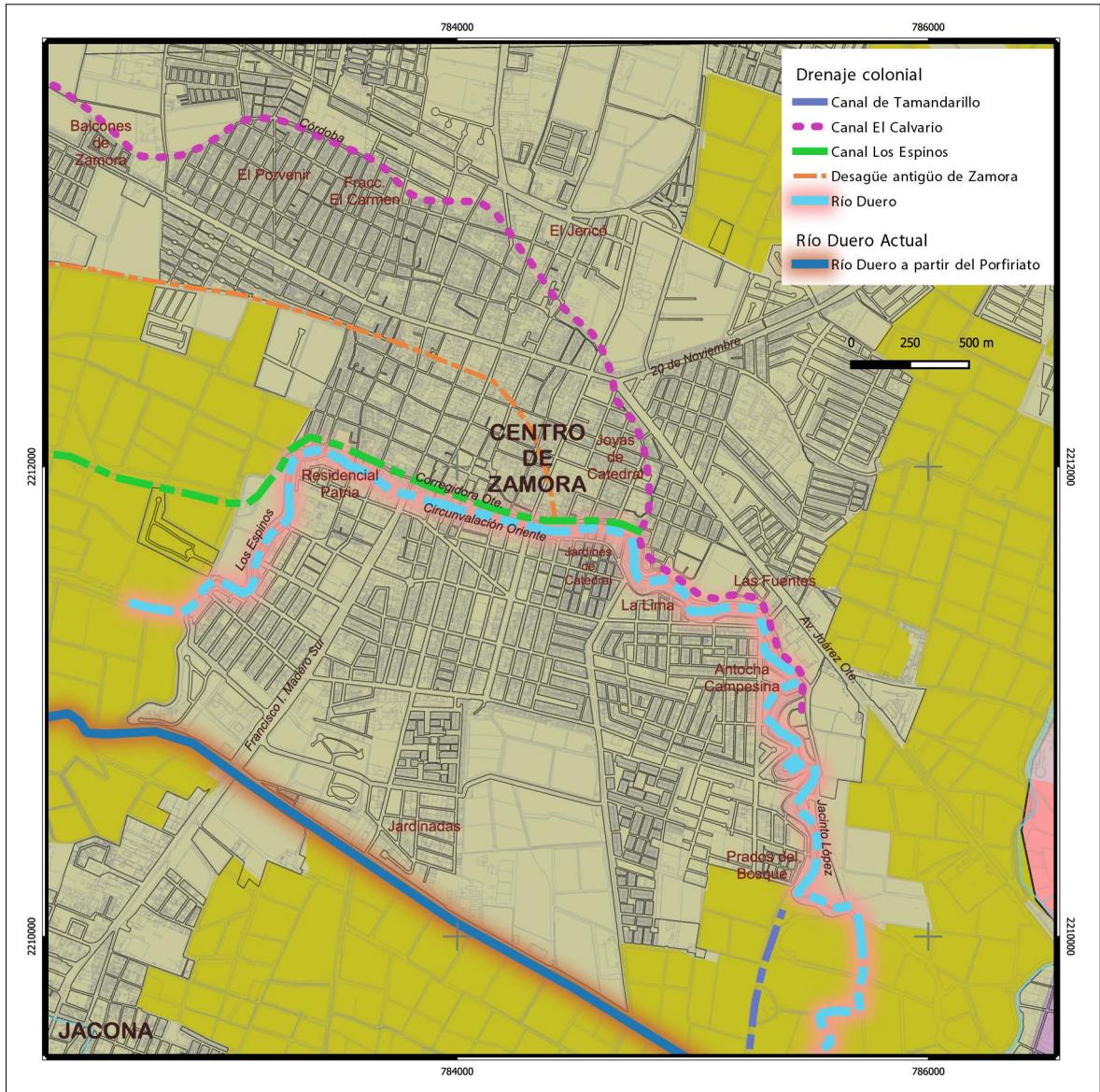


Figura 2. Drenaje actual y colonial de la ciudad de Zamora (sobrepuesto a la mancha urbana actual. Fuente: tomado de Sánchez y Boehm (2005).

con una extracción de más de 107.144 hm<sup>3</sup>/año a través de 742 pozos profundos (CONAGUA, 2020), de estos últimos el 35% (262 pozos) se localizan dentro o en las inmediaciones de la ciudad de Zamora (Figura 1A).

Con base en las últimas actualizaciones de la disponibilidad de agua del acuífero Zamora, efectuadas por la Comisión Nacional del Agua

(CONAGUA), se tiene una sobreexplotación del acuífero a una razón de 11.47 hm<sup>3</sup>/año y 15.91 hm<sup>3</sup>/año para los años 2020 y 2024, respectivamente (CONAGUA, 2020; 2024). Cifra que se considera subestimada pues además del número oficial de fuentes de extracción de agua subterránea, habría que considerar pozos y norias no registrados y que son del conocimiento popular, por lo que

los valores de sobreexplotación seguramente son más elevados.

## METODOLOGÍA

El presente trabajo se efectuó en tres etapas. En la primera, se cartografió el escarpe de las fallas superficiales y su franja de afectación a partir de

la identificación y georreferenciación de daños y afectaciones en la infraestructura urbana tales como: grietas por cortante en fachadas y muros de colindancia las cuales se identifican por una inclinación aproximada de 45°; ruptura y desplazamiento vertical y horizontal en guarniciones y banquetas; escarpes en calles y camellones; deformación en marcos de ventanas y puertas; plegamiento en losas de entrepiso y azotea (Figura 3). Esta información,



Figura 3. Registro fotográfico de la afectación por subsidencia diferencial en Zamora, Mich. La imagen de la izquierda corresponde al registro fotográfico más antiguo en cada falla.

en conjunto con el mapa catastral a escala 1:5000, datos vectoriales de la carta topográfica E13B19a a escala 1:20 000 (INEGI, 2006) y modelos digitales de elevación tipo terreno, con resolución de 5 m (INEGI, 2012), fue introducida al Sistema de Información Geográfica QGIS (Versión 3.22).

En la segunda etapa se implementó un programa de monitoreo multitemporal mediante equipo GPS marca LEICA, modelo SR500, doble frecuencia. Se

realizaron tres campañas de medición de coordenadas (28/nov/2019, 06/oct/2020, y 08/mar/2021) en ocho puntos de control geodésico, colocados y distribuidos estratégicamente sobre los bloques de piso y techo de las fallas superficiales previamente cartografiadas cuya ubicación se muestra en la Figura 4. El registro de coordenadas se efectuó bajo la modalidad estático-rápido y posteriormente se aplicó corrección diferencial con apoyo del soft-

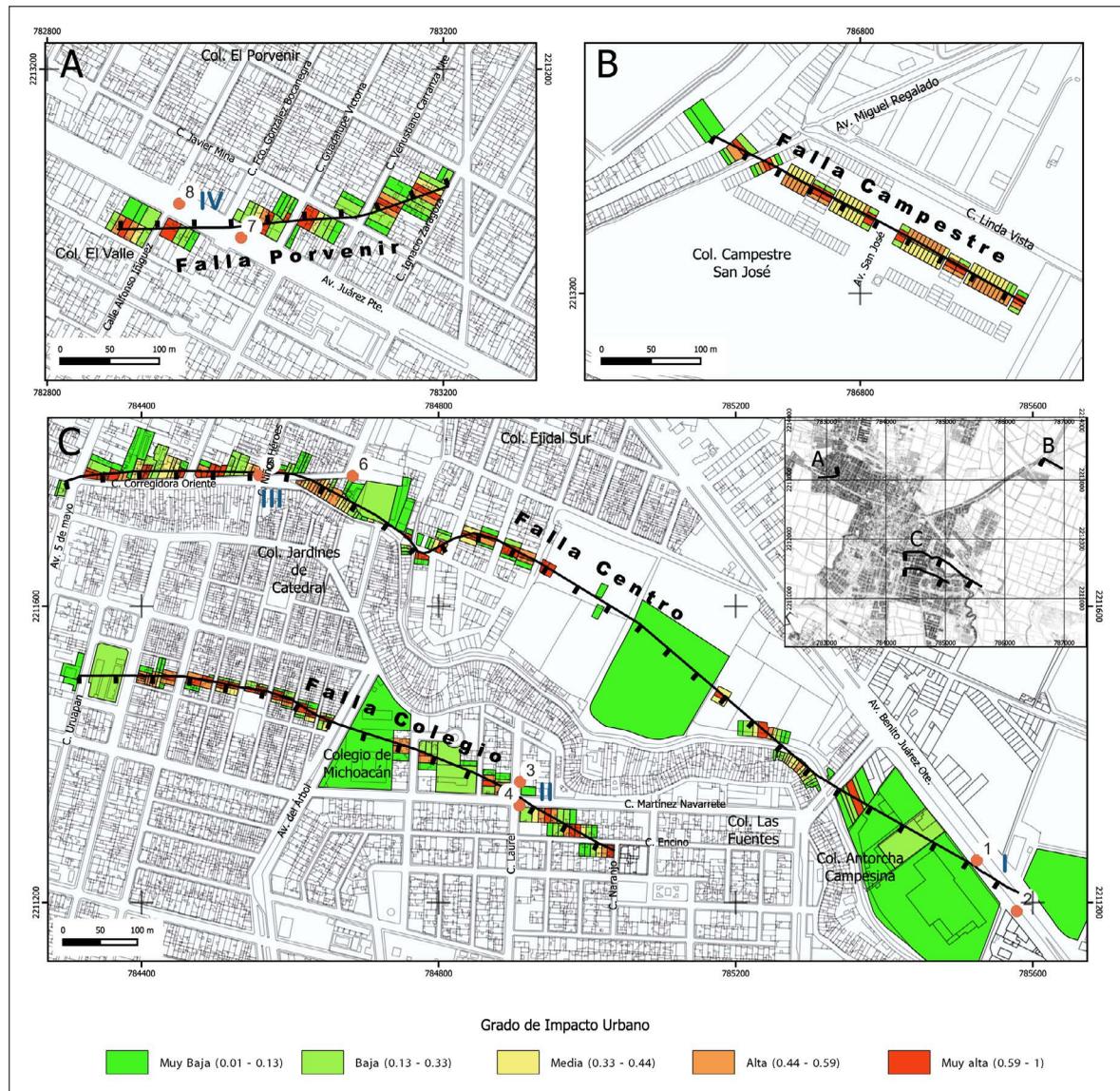


Figura 4. Fallas geológicas por subsidencia diferencial en Zamora, Mich., y grado de impacto urbano por predio. Los puntos con número corresponden al control terrestre y cada par representa un sitio de monitoreo multitemporal GPS (números romanos).

ware Leica Geo Office 8.4, tomando como bases de referencia las estaciones de Querétaro y Toluca de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI, con las efemérides precisas correspondientes a las fechas de medición. A partir de la comparación de los registros de las coordenadas medidas para las tres fechas de adquisición de datos se obtuvieron vectores de desplazamiento y tasas de subsidencia diferencial máxima para el periodo de monitoreo.

La tercera y última etapa tuvo dos finalidades: a) analizar los factores que condicionan la orientación, distribución y el modo en que se produce el hundimiento diferencial a partir de la sobreposición cartográfica de las fallas superficiales con respecto a la trayectoria inferida del graben de Zamora, y de la trayectoria histórica del río Duero, y b) evaluar el grado de impacto urbano (GIU) causado por la traza de la falla sobre cada predio que atraviesa, calculado como el factor de depreciación propuesto por Hernández-Madrigal *et al.*, (2014) y expresado en la ecuación 1.

$$GIU_i = \frac{\left(\frac{AA_i + I}{A_i + d_i}\right)}{2} \quad (1)$$

Donde:

GIU<sub>i</sub> = Grado de impacto urbano (%).

AA<sub>i</sub> = Área afectada en el predio “i” (m<sup>2</sup>).

A<sub>i</sub> = Área total del predio “i” (m<sup>2</sup>).

d<sub>i</sub> = Distancia perpendicular desde el centroide del predio “i” al eje de la falla asísmica (d<sub>i</sub> ≥ 1).

En este modelo el primer término del numerador representa la coexistencia entre el predio y la franja de afectación, mientras que el segundo término considera la proximidad del predio con el eje de la falla.

## RESULTADOS

### Cartografía

Se identificaron cuatro fallas por subsidencia diferencial (Figuras 3 y 4) que afectan a la ciudad de Zamora y que se describen a continuación de norte a sur.

*Falla Porvenir.* Ubicada en el sector NW de la ciudad. Presenta una trayectoria semicóncava con

dirección WSW-ENE, bloque hundido al NW y longitud de 339 m. Su escarpe máximo es de 20 cm de altura medido en el sitio IV de monitoreo GPS en su intersección con la Av. Juárez Poniente. Esta falla es una de las estructuras más antiguas, con inicio probable en el año 2008 considerando que en el 2009 ya se observaba la deformación (Figura 3A) con lo que se estima una tasa de hundimiento de aproximadamente 1.4 cm/año. Afecta una superficie total de 0.34 ha distribuida en 49 construcciones particulares (casas-habitación y locales comerciales) ubicadas en la Av. Benito Juárez Poniente y calles: Alfonso Iñiguez, Fco. González Bocanegra, Guadalupe Victoria, Venustiano Carranza, Ignacio Zaragoza y Javier Mina de las colonias El Valle y El Porvenir. El GIU producido por esta falla varía de 0.03 a 0.86 con promedio de 0.31 (Figura 4A).

*Falla Campestre.* Se encuentra en el sector NE de Zamora con una trayectoria recta en dirección NW-SE, bloque caído hacia el SW y escarpe máximo de 5cm medido en Av. San José. A pesar de que es la estructura más joven, inicia en el 2019 (Figura 3B), presenta un desarrollo longitudinal de 356 m, superior a la falla anterior, y una velocidad de hundimiento de 1.6 cm/año. Provoca la deformación de 0.42 ha en 113 casas-habitación, banquetas y guarniciones del fraccionamiento Campestre San José. Su GIU varía de 0.06 a 1 con promedio de 0.45 (Figura 4B), siendo el valor más alto de todas las fallas superficiales de Zamora debido a que la falla y el eje longitudinal de las manzanas urbanas afectadas presentan la misma dirección.

*Falla Centro.* Es hasta el momento la estructura más desarrollada y antigua. Considerando la evidencia fotográfica del 2009 (Figura 3C) estimamos que su deformación inició en 2008. Su extremo más occidental se localiza en el centro histórico de Zamora en la intersección de Av. 5 de Mayo con calle Corregidora Oriente. Se extiende hacia el E de forma paralela a la calle Corregidora hasta la intersección con la calle Niños Héroes. En este punto cambia su dirección hacia el SE y se extiende hasta la Av. Benito Juárez Oriente en donde se observan deformaciones incipientes en el camellón. Presenta una longitud total de 1500 m con una trayectoria general de forma cóncava hacia el SW donde se

localiza su bloque hundido, un escarpe máximo de 36 cm medido en la calle Leona Vicario (sitio III), y una tasa de hundimiento de 2.6 cm/año. En total afecta una superficie de 1.4 ha en la que se ubican 144 construcciones clasificadas como casas-habitación, bodegas, locales comerciales y parcelas de las colonias Centro, Jardines de Catedral, Ejidal Sur, Las Fuentes y Antorcha Campesina. El GIU es de 0.01 a 1 con promedio de 0.36 (Figura 4C).

**Falla Colegio.** Esta estructura se encuentra al sur de la falla anterior a una distancia de entre 275 a 285 m. Es decir, su trayectoria es prácticamente paralela a la estructura anterior con forma cóncava y bloque hundido también hacia el SW. Su extremo occidental se localiza en la calle Uruapan de la colonia Jardines de Catedral, y se extiende hasta la calle Naranja de la colonia Las Fuentes, pasando por las instalaciones del Colegio de Michoacán de donde toma el nombre. Su longitud total es de 770 m con escarpe de 9 cm medido en el sitio II, y una tasa de hundimiento de 0.65 cm/año. Afecta a 0.86 ha y 112 construcciones entre las que se encuentran casas-habitación, centros educativos y

locales comerciales. Su GIU varía de 0.03 a 1 con promedio de 0.42 (Figuras 3D y 4C).

### Cinemática

Los resultados del monitoreo multitemporal GPS (Figura 5 y Tabla 1), revelan que para el primer periodo 28/11/2019-06/10/2020 (313 días) se tuvo una tasa de hundimiento máximo de 15.2 mm/año en la falla Colegio y de 9.3 mm/año para la falla El Porvenir. En el segundo periodo 28/11/2019-08/03/2021 (466 días) las velocidades se redujeron a 6.3 y 7 mm/año, respectivamente, mostrando una clara desaceleración en ambas fallas. La falla Centro en su extremo SE (sitio I) registró un decremento aparente de su desnivel topográfico asociado a trabajos de reencarpetamiento. Desafortunadamente, por efecto de multi trayectoria en cañón urbano la técnica GPS no funcionó en el sitio III ubicado en el sector de mayor deformación de la falla Centro, por lo que no se pudo calcular el hundimiento.

En lo que respecta al desplazamiento horizontal se observa que en las fallas Colegio (sitio II) y Porvenir (sitio IV), el movimiento en la dirección N-S

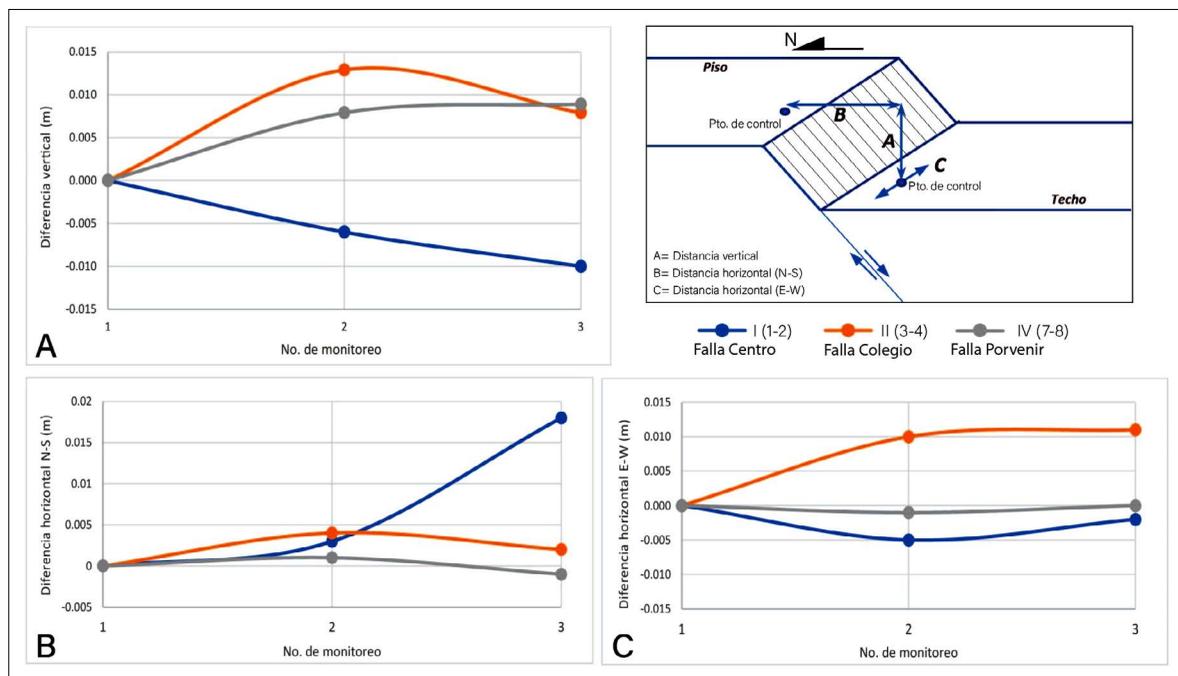


Figura 5. Registro multitemporal del desplazamiento vertical (A), horizontal en dirección N-S (B) y horizontal en dirección E-W (C), para los sitios de monitoreo GPS I, II, y IV. El sitio III no fue incluido debido a la inconsistencia evidente en los resultados GPS, consecuencia del elevado valor de la dilución geométrica (GDOP) asociado a interferencias urbanas.

Tabla 1. Diferencias de distancias en la dirección vertical, horizontal (N-S) y horizontal (E-W) para los cuatro sitios de monitoreo.

| Diferencia              | Vertical (m) |            |            |            | Horizontal N-S (m) |            |            |            | Horizontal E-W (m) |            |            |            |        |   |        |        |        |        |
|-------------------------|--------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|--------|---|--------|--------|--------|--------|
|                         | 1            | 2          | 3          | 1          | 2                  | 3          | 1          | 2          | 3                  | 1          | 2          | 3          |        |   |        |        |        |        |
| No de monit.            | 1            | 2          | 3          | 1          | 2                  | 3          | 1          | 2          | 3                  | 1          | 2          | 3          |        |   |        |        |        |        |
| Fecha                   | 28/11/2019   | 06/10/2020 | 08/03/2021 | 28/11/2019 | 06/10/2020         | 08/03/2021 | 28/11/2019 | 06/10/2020 | 08/03/2021         | 28/11/2019 | 06/10/2020 | 08/03/2021 |        |   |        |        |        |        |
|                         | Δ            | Δ          | Δ          | Δ          | Δ                  | Δ          | Δ          | Δ          | Δ                  | Δ          | Δ          | Δ          |        |   |        |        |        |        |
| Falla Centro I (1-2)    | 0.077        | 0          | 0.071      | -0.006     | 0.067              | -0.010     | 68.788     | 0          | 68.791             | 0.003      | 68.806     | 0.018      | 53.714 | 0 | 53.709 | -0.005 | 53.712 | -0.002 |
| Falla Colegio II (3-4)  | 0.44         | 0          | 0.45       | 0.013      | 0.45               | 0.008      | 31.626     | 0          | 31.63              | 0.004      | 31.628     | 0.002      | 0.679  | 0 | 0.689  | 0.01   | 0.69   | 0.011  |
| Falla Porvenir IV (7-8) | 0.1981       | 0          | 0.206      | 0.008      | 0.207              | 0.009      | 34.185     | 0          | 34.186             | 0.001      | 34.184     | -0.001     | 62.560 | 0 | 62.561 | -0.001 | 62.560 | 0      |
| Sitio (Pis. GPS)        |              |            |            |            |                    |            |            |            |                    |            |            |            |        |   |        |        |        |        |

(Figura 5B) es prácticamente nulo. En el caso del extremo oriente de la falla Centro (sitio I) los datos muestran que la distancia en dirección N-S incrementó 18 mm. Por otra parte, el desplazamiento en la dirección E-W, semiparalelo a la dirección de las fallas superficiales monitoreadas, revela que la falla Centro en su sector oriente presenta una componente horizontal lateral derecha; es decir, el punto de control 2 (techo) se acerca al punto 1 (piso) en la dirección E-W. En el sitio II de la falla Colegio, el punto 4 (techo) se aleja del punto 3 (piso) por lo que en este caso su componente horizontal es lateral izquierda. La falla Porvenir no presenta desplazamiento horizontal E-W.

En síntesis, se observa una tendencia general de disminución del hundimiento en las tres estructuras monitoreadas. En particular, la falla El Porvenir presenta una actividad nula en lo que respecta al movimiento horizontal siendo por lo tanto la más estable (Figura 5A). En las fallas de mayor expresión, Centro y Colegio, el desplazamiento vertical se conjuga con componentes horizontales lateral derecha e izquierda, respectivamente.

En la falla Campestre no se han colocado puntos de control por lo que hasta el momento se desconocen los valores precisos de hundimiento vertical y horizontal.

## DISCUSIÓN

La ciudad de Zamora es afectada por subsidencia diferencial con control estructural asociada a la sobreexplotación del agua subterránea mediante pozos profundos, distribuidos con una densidad de 1 pozo/km<sup>2</sup> en el municipio y de 4 pozos/km<sup>2</sup> en la mancha urbana (REPDA, 2020). La subsidencia regional que afecta a todo el Valle de Zamora registró velocidades de hasta 12.8 cm/año para el periodo 2007-2011 (Chaussard *et al.*, 2014), y de 10 y 7.8 cm/año para los periodos 2014-2017 y 2018-2021, respectivamente (Villaseñor-Reyes *et al.*, 2022). Esto indica una disminución en la velocidad del hundimiento regional, lo cual también se refleja en el desplazamiento vertical de las fallas superficiales Porvenir, Centro y Colegio reportadas en este trabajo (Figura 5A). Esta tendencia general

de desaceleración del hundimiento no es exclusiva de Zamora, ya que también se ha registrado en otras ciudades, como Morelia (México) donde la subsidencia en su sector meridional ha disminuido hasta un 28% (Figueroa-Miranda *et al.*, 2020), y Beijing (China) con una desaceleración de hasta un 12% (Chen *et al.*, 2019). En el caso de Zamora esta desaceleración podría ser resultado del decremento en el número de pozos registrado durante el periodo 2012 al 2020, que supone una reducción del volumen de extracción de 44,797 m<sup>3</sup>/año (Villaseñor-Reyes *et al.*, 2022). Por otra parte, tanto la disminución de la tasa de hundimiento como el volumen de extracción mencionado no son congruentes con el incremento del 3.17% en la extracción de agua subterránea el cual hace que el acuífero de Zamora siga en estado de sobreexplotación según las declaratorias de CONAGUA (2020; 2024). Lo que sugiere que es necesario llevar a cabo una mayor investigación para entender el comportamiento del fenómeno reportado en este trabajo. La caracterización detallada de la geometría del basamento, modelo estratigráfico de los depósitos no consolidados, identificación adecuada de acuíferos y tasa de abatimiento actualizado del nivel freático; siguen siendo tareas pendientes e indispensables para determinar con mayor precisión la relación entre la subsidencia y la extracción del agua subterránea en el Valle de Zamora.

Las fallas superficiales comienzan a manifestarse en Zamora entre los años 2007-2008, siendo las primeras estructuras en aparecer las fallas superficiales Porvenir, Centro y Colegio (Figura 3). Sin embargo, habitantes del centro de Zamora afectados por la falla Centro, coinciden en afirmar que las grietas en sus viviendas y calles son contemporáneas a la edificación del Centro Regional de las Artes de Michoacán (CRAM) inaugurado en el 2006, debido a que durante su construcción se bombearon cientos de m<sup>3</sup> de agua para evitar la inundación de los cimientos al encontrarse éstos debajo del nivel freático. Es indiscutible que este bombeo, desde entonces permanente para impedir la inundación del estacionamiento subterráneo de dicho edificio, contribuye al abatimiento del nivel freático con efectos directos en la subsidencia. Sin embargo, en el caso de las fallas superficiales no se

distingue una relación directa debido a que: a) El CRAM se ubica sobre el bloque de piso y no sobre el bloque hundido o techo de la falla más próxima (F. Centro), y b) La falla Centro presenta concavidad hacia el sur y no hacia el norte que es donde

se supone el CRAM genera el cono de abatimiento del nivel freático (Figura 6).

Por otra parte, las fallas superficiales normalmente se relacionan con estructuras geológicas preexistentes y sepultadas por depósitos no con-

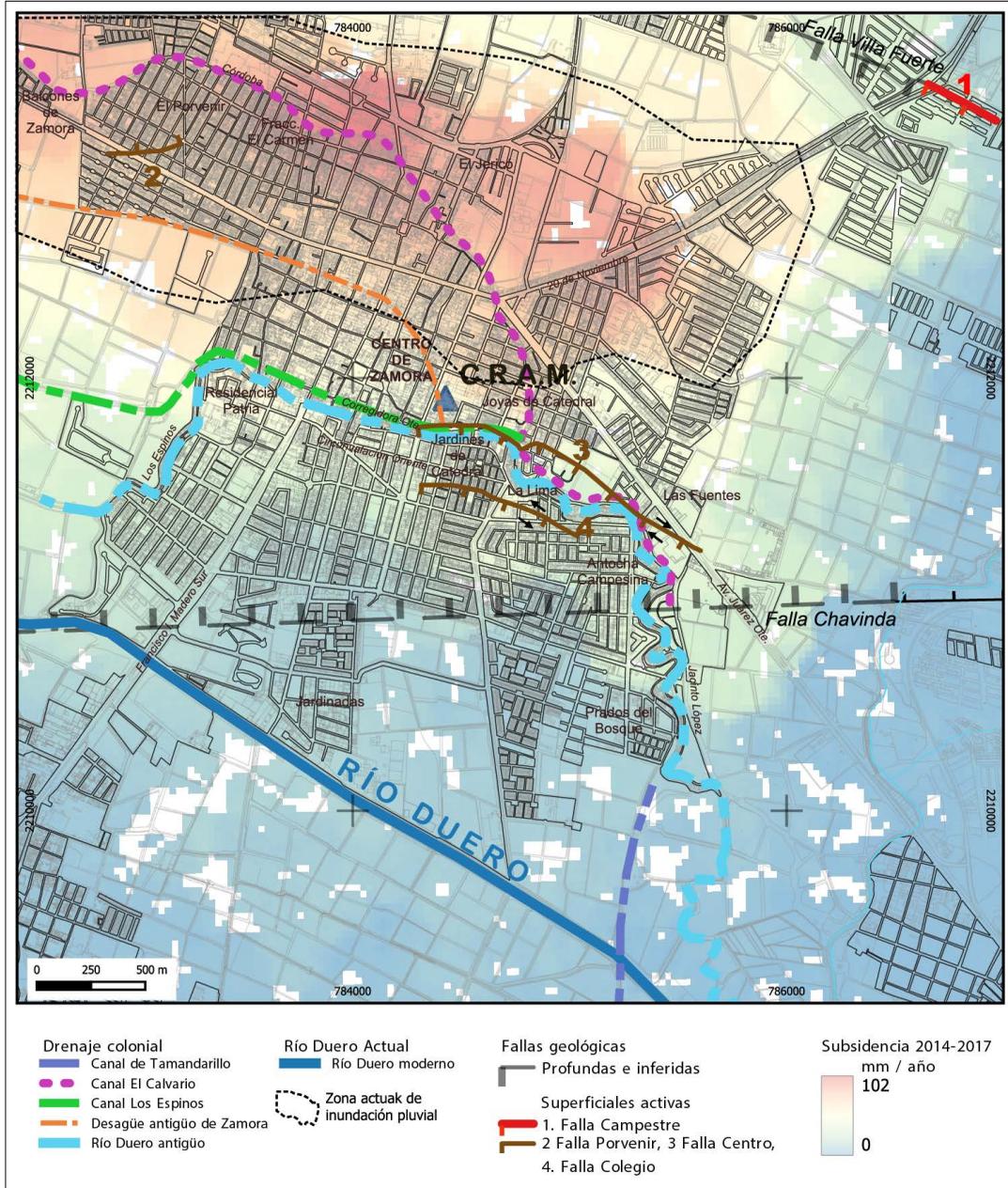


Figura 6. Sobreposición cartográfica de las fallas geológicas actuales con las fallas profundas (inferidas), drenaje colonial y actual. El valor de subsidencia para el periodo 2014-2017. Fuente: tomado de Villaseñor-Reyes et al. (2022)

solidados (Figuroa-Miranda *et al.*, 2018; 2020); sin embargo, en la ciudad de Zamora la geometría y orientación de las primeras fallas en aparecer (Porvenir, Centro y Colegio) no coinciden con la geometría del basamento del Valle de Zamora, concebido como la prolongación oriental del graben de Chapala (Figura 1). Esto debido a que el bloque hundido se encuentra al norte para el caso de la falla el Porvenir, y al sur para el caso de las fallas Centro y Colegio, definiendo en conjunto una geometría de horst y no de graben como se esperaría (Figura 6). Caso contrario es la falla Campestre, cuya orientación y geometría son coincidentes con la trayectoria inferida de la falla Villa Fuerte, y que forma parte del sector norte del graben de Zamora (Figura 6). Esta última estructura comienza a develarse a través del hundimiento regional evaluado por Villaseñor-Reyes *et al.*, (2022) y que se concentra en el sector centro-norte de la ciudad de Zamora en donde se sospecha se tiene la mayor profundidad de depósitos no consolidados y mayor recurrencia de inundaciones pluviales (Figura 6).

Finalmente, la sobreposición cartográfica de las fallas Colegio y Centro con el drenaje colonial de Zamora (Figura 6), revela una clara coincidencia con la forma y dirección de la trayectoria del antiguo meandro del río Duero y canal Los Espinos. Mientras que la falla El Porvenir podría estar asociada a un meandro abandonado del antiguo canal El Calvario. Por lo anterior, concluimos que estas tres primeras estructuras tienen un control estructural relacionado a paleocanales, y sus factores condicionantes se relacionan más a depósitos fluviales (ríos, arroyos y canales) de las épocas prehispánica y colonial.

## CONCLUSIONES

La ciudad de Zamora, Mich., es afectada por cuatro fallas superficiales activas: Centro (GIU = 0.36), Colegio (GIU = 0.42), Porvenir (GIU = 0.31) y Campestre (GIU = 0.45).

Las primeras tres fallas tienen un control estructural asociado a paleocanales del río Duero (fallas Centro y Colegio), así como por el canal

El Calvario y drenaje antiguo de la época colonial (falla Provenir). El hundimiento diferencial máximo de estas estructuras es de 15.2 mm/año con una tendencia de desaceleración, que aún no es lo suficientemente clara en la falla Centro, por lo que se encuentran en una fase temprana de estabilidad. En contraste, la falla superficial Campestre, que es la más joven de todas y también la que mayor impacta a la infraestructura habitacional, presenta control estructural con el fallamiento tectónico al coincidir su ubicación y dirección con el límite septentrional del mayor hundimiento regional del Valle de Zamora, así como con la proyección de la falla profunda Villa Fuerte.

La subsidencia regional activa en combinación con paleocanales que son muy comunes en un valle de frecuentes inundaciones como el de Zamora, con geometría del basamento tipo graben y extracción intensa de agua subterránea, es factor condicionante importante para el desarrollo de fallas superficiales activas y dinámicas en donde se generan o reactivan, se desarrollan y “mueren” o estabilizan.

Finalmente, la cartografía, grado de impacto y velocidad de hundimiento de las fallas activas de Zamora permitirán establecer políticas públicas encaminadas a la mitigación del riesgo por subsidencia diferencial. Y, combinados con trabajos futuros enfocados en la caracterización detallada del basamento y registro del abatimiento freático, permitirán una mayor comprensión de la subsidencia regional y diferencial, así como de peligros asociados, como las inundaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONAHCYT, ICTI-Michoacán, y CIC-UMSNH por el financiamiento de esta investigación a través de los proyectos CF-2023-I-2322, PICIR-046, y CIC 2023-2025, respectivamente.

## REFERENCIAS

Ávila-Olivera, J. A., & Garduño-Monroy, V. H. (2010). Conceptual model of land subsidence with structural

- control. *Proceedings of Eighth International Symposium on Land Subsidence. IAHS Publ.*, 339, 195-197. Querétaro, México.
- Brunori, C. A., Bignami, Ch., Albano, M., Zucca, F., Samsonov, S., Groppelli, G., Norini, G. y Saroli, M. (2015). Land subsidence, round fissures and burees faults: InSAR monitoring of Ciudad Guzmán (Jalisco, México). *Remote Sensing*, 7(7), 8610-8630. <https://doi.org/10.3390/rs70708610>
- Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R. y Garfias, J. (2011). Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.017>
- Carrillo, N. (1969). *El hundimiento de la ciudad de México, proyecto Texcoco*. Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Castellazzi, P., Garfias, J. y Martel, R. (2021). Assessing the efficiency of mitigation measures to reduce groundwater depletion and related land subsidence in Querétaro (Central Mexico) from decadal InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102632>
- Chaussard, E., Wdowski, S., Cabral-Cano, E. y Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>
- Chen, B., Gong, H., Lei, K., Li, J., Zhou, Ch., Gao, M., Guan, H. y Lv, W. (2019). Land subsidence lagging quantification in the main exploration aquifer layers in Beijing plain, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.003>
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Zamora (1608), Estado de Michoacán*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Zamora (1608), Estado de Michoacán*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Farina, P., Ávila-Olivera, A. y Garduño-Monroy, V. H. (2007). Structurally-controlled urban subsidence along the Mexican Volcanic Belt (MVB) monitored by INSAR. *Proceedings of the Envisat Symposium 2007*, 23-27. Montreux, Switzerland.
- Figueroa-Miranda, S., Hernández-Madrigal, V. M., Tuxpan-Vargas, J. y Villaseñor-Reyes, C. I. (2020). Evolution assessment of structurally-controlled differential subsidence using SBAS and PS interferometry in an emblematic case in Central Mexico. *Engineering Geology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105860>
- Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M. y Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>
- Flores-Lázaro, N., Saldivar-Valdez, A., Hernández-Madrigal, V. M. y Pérez-Veyna, O. (2017). Valoración del agua de riego agrícola en el valle de Zamora, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4), 811-823. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.9>
- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I. y Rodríguez-Torres, G. M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), 37-54.
- Gayol, R. (1925). Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos. *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, III, 96-132.
- Grupo Edificador INCA, S. A. de C. V. (2013). *Atlas de Riesgos del Municipio de Zamora, Michoacán, 2013*. [http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2013/16108\\_AR\\_ZAMORA.pdf](http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2013/16108_AR_ZAMORA.pdf)
- Hernández-Madrigal, V. M., Flores-Lázaro, N., Villaseñor-Reyes, C. I. y Muñoz-Jáuregui, J. A. (2015). Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas. Caso de estudio Morelia, Mich. *Ciencia Nicolaita*, 65, 78-94. <https://doi.org/10.35830/cn.vi65.267>
- Hernández-Madrigal, V. M., Muñoz-Jáuregui, J. A., Garduño-Monroy, V. H., Flores-Lázaro, N., & Figueroa-Miranda, S. (2014). Depreciation factor equation to evaluate the economic losses from ground failure due to subsidence related to groundwater withdrawal. *Natural Science*, 6(3), 103-113. <https://doi.org/10.4236/ns.2014.63015>
- INEGI. (2006). *Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica escala 1:20,000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/#Mapa>
- INEGI. (2012). *Conjunto de Elevaciones Mexicano 3.2 (CEM 3.0)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>
- Ortiz Zamora, D. y Ortega Guerrero, M. A. (2007). Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie

- de Chalco: Implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal). *Investigaciones Geográficas*, (64). <https://doi.org/10.14350/rig.18364>
- Pacheco Martínez, J., Arzate-Flores, J., López-Doncel, R., Barboza-Gudiño, J., Mata-Segura, J., Del-Rosal-Pardo, A. y Aranda-Gomez, J. (2010). *Zoning map of ground failure risk due to land subsidence of San Luis Potosí, México*. IAHS-AISH Publication, 339.
- Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeño-De-Leon, M. E. y Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- REPDA. (2022). Consulta a la base de datos del REPDA. <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
- Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J. y Maciel, R. (1989). Geología del extremo oriental del graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: Zonas geotérmicas Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, México. *Revista Mexicana de Geoenergía*, 5(1), 3-18.
- Sánchez, R. M. y Boehm, S. B. (2005). *Cartografía hidráulica de Michoacán*. El Colegio de Michoacán.
- Sánchez, R. M. (2007). Jacona. Historia de un pueblo y su desencuentro con el agua. In Cárdenas, et al., Informe final de la primera etapa del proyecto Reserva Patrimonial del Curutarán. Colmich-UMSNH-INAH.
- Servicios, Estudios, Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, S. A. de C. V. (1993). Estudio de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Zamora, Michoacán. Inédito.
- Trujillo-Candelaria, J. A. (1985). Subsidencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto. En *Reunión sobre Asentamientos Regionales, México, D.F, México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y Asociación Geohidrológica Mexicana*, 1 y 2, 35-42.
- Trujillo-Candelaria, J. A. (1991). Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México. *Proceedings XXIII AIH Congress, Aquifer Overexploitation*, 175-178. Tenerife, España.
- Vera Pérez, M. y López Blanco, J. (2010). Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: El caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998-2005). *Investigaciones Geográficas*, (73), 22-40.
- Villaseñor-Reyes, C. I., Hernández-Madrigal, V. M. y Figueroa-Miranda, S. (2022). Identification and assessment of land subsidence development in rural areas using PS interferometry: A case study in Western Michoacan, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 81(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10545-z>
- Villaseñor-Reyes, C. I., Hernández-Madrigal, V. M., Delgado-Ramírez, O., Guevara-Alday, J. A. y Flores-Lázaro, N. (2024). 3D deformation velocity field analysis and transient electromagnetic method to detect the tectonic influence on the development of land-subsidence in Zamora, Mexico. *Engineering Geology*, 338, 107636 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107636>