

Riesgos socionaturales asociados a fallas geológicas, algunos casos del centro-sur de México

Socio-natural risks associated with geological faults, some cases in central-southern Mexico

Edgar Angeles Moreno ^{1*}, Isidro Loza Aguirre ¹, Patricia Olvera Flores ²

¹ División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, Av. Juárez No. 77; Zona Centro; C.P. 36000; Guanajuato, e.angeles@ugto.mx e isidro.loza@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5177-1305> y <https://orcid.org/0000-0002-2294-1464>

² Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, patiflores2002@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3847-7248>

*Autor de correspondencia

Recibido: 09/12/2024. Aceptado: 13/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Angeles Moreno, E., Loza Aguirre, I., & Olvera Flores, P. (2025). Riesgos socionaturales asociados a fallas geológicas, algunos casos del centro-sur de México. Geografía Aplicada, 1(1), 197-239. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25633>

Resumen

Los riesgos socionaturales están relacionados directa o indirectamente con fallas geológicas en el centro-sur de México. Los riesgos socionaturales que se presentan son de tipo socio-geológicos como deslizamientos de tierra, flujos de detritos, derrumbes de rocas, laderas inestables, terremotos, fallas de subsidencia y flujo de contaminantes en agua subterránea; estos riesgos afectan a centros rurales y urbanos. Los sistemas de falla regionales, fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT), fallas de Sierras y Cuencas (*Basin and Range*), fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) contienen estructuras de grabenes, pilares estructurales, y zonas de fallas a veces de relaciones complejas. La gestión del riesgo en relación con la presencia de estas fallas geológicas es un tema que requiere ser atendido. En este artículo se exponen algunos casos relacionados a estas problemáticas aplicando metodologías de interpretación geológica de imágenes de satélite, cartografía geológica, geología de campo, geomorfología y algunas relaciones geográficas. Los resultados muestran problemas asociados con riesgos socionaturales y socio-geológicos, por ejemplo, la influencia de las fallas geológicas en la contaminación del agua subterránea por arsénico y flúor en cuencas hidrológicas, los controles en flujos de detritos a lo largo de las fallas San Antonio y San Miguel en el sistema volcánico Nevado de Toluca- San Antonio, problemáticas relacionadas a las fallas de subsidencia hídrica y fallas geológicas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y por último fallas geológicas sísmicamente activas del sistema de fallas de Tenango en donde se resalta la importancia de que en las poblaciones afectadas por terremotos existan planes de gestión del riesgo y sistemas de alerta temprana.

Palabras clave: Fallas geológicas, México, Riesgos socionaturales y socio-geológicos.

Abstract

Socio-natural risks are directly or indirectly related to geological faults in south-central Mexico. Socio-natural risks that occur are of a socio-geological type, such as landslides,

debris flows, rock falls, unstable slopes, earthquakes, subsidence faults, and flow of contaminants in groundwater. These risks affect both rural and urban centers. Regional fault systems such as the San Luis Tepehuanes faults (SFSLT), Basin and Range faults, Taxco San Miguel de Allende faults (SFTSMA), and Trans-Mexican Volcanic Belt faults (FVTM) are formed by graben structures, structural pillars, and fault zones that sometimes have complex relationships. Risk management in relation to these geological faults is an issue that requires attention. This work presents some cases related to these problems by applying methodologies considering geological interpretation of satellite images, geological cartography, field geology, geomorphology, and some basic geographic relationships. The results show problems associated with socio-natural and socio-geological risks, such as the influence of geological faults on groundwater contamination, including the presence of arsenic and fluoride in hydrological basins; structural controls on debris flows along the San Antonio and San Miguel faults in Nevado de Toluca-San Antonio volcanic system; problems related to water subsidence faults and geological faults in the Metropolitan Zone of the Toluca Valley and, finally, seismically active geological faults of the Tenango fault system, where the importance of risk management plans and early warning systems in populations affected by earthquakes is highlighted.

Keywords: Geological faults, Mexico, Socio-natural and socio-geological risks.

1. Introducción

Los riesgos socionaturales son planteados como una serie de relaciones socionaturales entre un territorio habitado con una infraestructura civil y su entorno medio ambiental en el que existe una alta probabilidad de que estas relaciones puedan derivar situaciones de riesgos de desastres (Campos-Vargas *et al.*, 2015; Baró-Suárez *et al.*, 2018). De acuerdo con UNISDR (2009) el riesgo está constituido de cuatro componentes básicos: peligro, exposición, vulnerabilidad y resiliencia, cada uno de estos componentes tienen sus propias características físicas y sociales. Las amenazas o peligros naturales son la probabilidad de

que ocurra un evento que por su ubicación, características y severidad puede afectar a seres humanos (Baró-Suárez *et al.*, 2018), estos pueden ser erupciones volcánicas, terremotos, inestabilidades de laderas, deslizamientos de tierra, erosión de suelo, cambios en el nivel de terreno, y fallas geológicas. Las amenazas antrópicas ligadas a actividades económicas de aprovechamiento del medio natural también son consideradas dentro de estos riesgos (Baró-Suárez *et al.*, 2018). En este contexto de riesgos socionaturales, muchas de las fallas geológicas en México se pueden considerar como un riesgo socio-geológico, ya que sistemas de fallas regionales y otras de escala tectónica tienen una influencia directa o indirecta en ciudades o centros urbanos de importancia económica en el país. Los sistemas de fallas que se tratan en este trabajo son algunos sistemas de fallas del centro-sur de México que son sistemas de fallas normales de rumbo NW a NNE, NE-SW, y E-W que afectan a las rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico, formando fosas, semifosas y pilares tectónicos de dimensiones variadas, los sistemas de fallas de San Luis Tepehuanes (SFSLT) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), sistema de fallas de Sierras y Cuencas (Henry y Aranda-Gómez, 1992; Henry y Aranda-Gómez, 2000) (Figura 1), graben de Aguascalientes (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; 2023), sistemas de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005b), y sistema de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (SFFVTM) (Figura 2). Estos sistemas de fallas geológicas no se habían considerado en la categoría de riesgos socio-geológicos que son un tipo de riesgo socionatural para cuando las fallas de estos sistemas cruzan por ciudades importantes del centro-sur de México. Estas fallas se han documentado que determinan controles directos o indirectos en problemas en ciudades y poblaciones como canales de flujos de contaminantes, desplazamientos de acuíferos, intensificadores de erosión, derrumbes, flujos de detritos, fallas de subsidencia, fallas sísmicamente activas y otros. En este artículo se muestran como estos peligros determinan los riesgos.

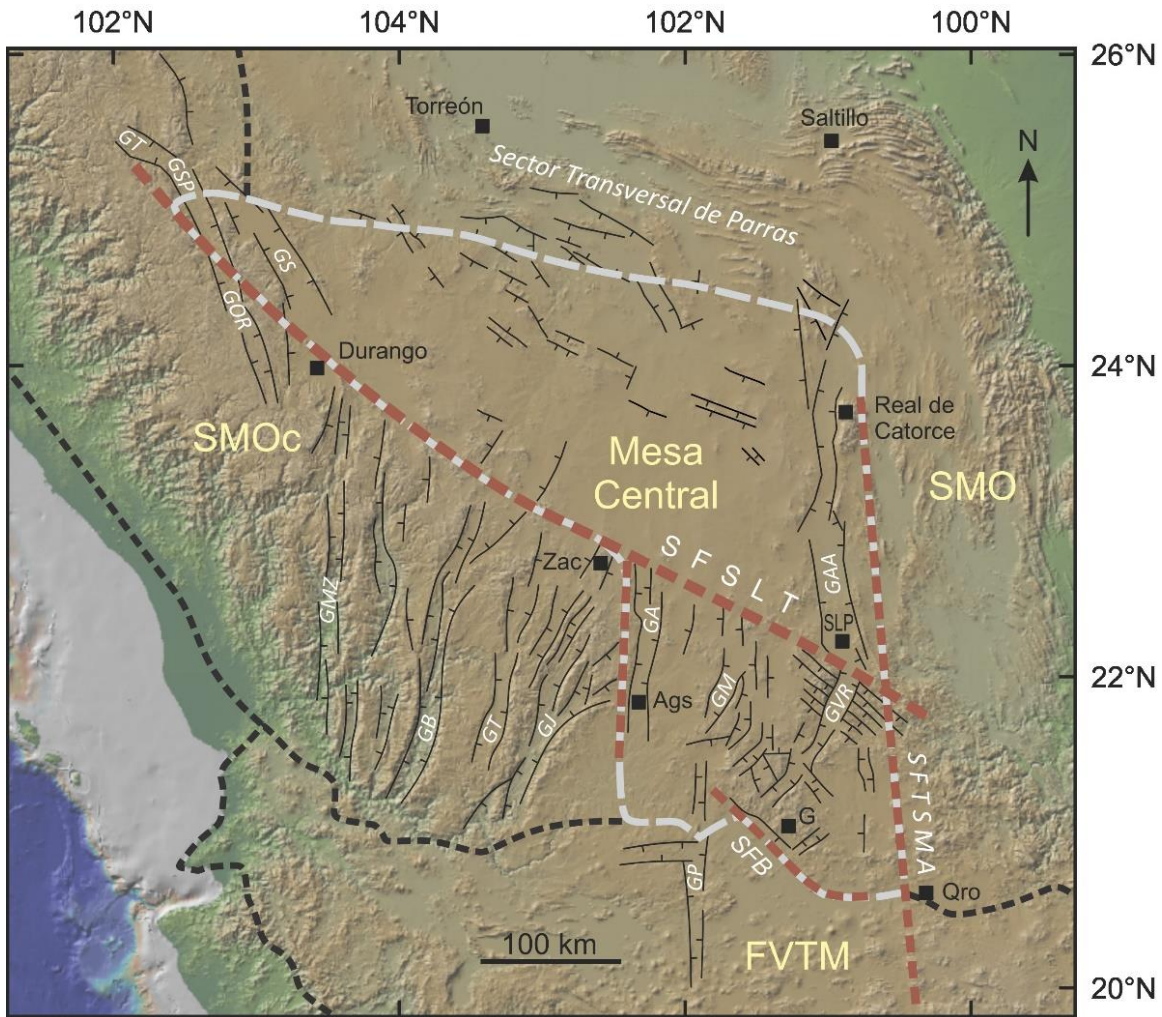


Figura 1. Principales sistemas de fallas en la Mesa Central y sus alrededores. El sistema de fallas San Luis-Tepehuanes de rumbo NW va de San Luis de La Paz en Guanajuato hasta Tepehuanes en Durango y divide a la Mesa Central en sector norte y sur. Localidades en caracteres negros: SLP: San Luis Potosí, Qro: Querétaro, Zac: Zacatecas, Ags: Aguascalientes, G: Guanajuato. Algunas estructuras mayores: GT: Graben Tepehuanes, GSP: Semigraben de Santiago Papasquiaro, GS: Graben de Santiaguillo, GOR: Graben de Otinapa-Río Chico, SFSLT: Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes, SFTSMA: Sistema de Fallas Taxco San Miguel de Allende, GMZ: Graben Mezquital, GB: Graben Bolaños, GTL: Graben Tlaltenango, GJ: Graben de Juchipila, GA: Graben de Aguascalientes, GM:

Semigraben de Matancillas, GP: Graben Pajaritos, GVR: Graben de Villa de Reyes, SFB: Sistema de Fallas del Bajío, GAA: Graben Arista Ahualulco, SMOc: Sierra Madre Occidental, SMO: Sierra Madre Oriental, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.

Fuente: figura modificada de Nieto-Samaniego et al. (2023)

2. Marco geológico

En el centro-sur de México los riesgos socio-geológicos están relacionados directa o indirectamente con fallas regionales como son: sistemas de fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT), fallas de Sierras y Cuencas (Basin and Range), sistema de fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y sistemas de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). A continuación, se describen sus características.

Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes. El sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT) es un conjunto de fallas normales que integran un gran lineamiento de rumbo NW-SE que se extiende desde San Luis de La Paz, en el estado de Guanajuato, hasta Tepehuanes, en el estado de Durango, con una longitud aproximada de 600 km y edades de actividad que van del Paleoceno-Eoceno al Cuaternario (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005) (Figura 1). Este sistema es el límite entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, y atraviesa a esta última provincia dividiéndola en los sectores: meridional y septentrional (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). A lo largo de este sistema de fallas se ubica el Campo Volcánico de Durango (Figura 1), compuesto por lavas basálticas con edades del Plioceno-Holoceno que están afectadas por fallas normales de rumbo NW (Aranda-Gómez *et al.*, 1997; Aranda-Gómez *et al.*, 2005) (Figura 1). Este sistema de fallas pasa por ciudades y poblaciones importantes como Santiago Papasquiaro, Durango, Fresnillo, Zacatecas, San Luis Potosí y San Luis de la Paz. A lo largo de este sistema de fallas se han identificado algunos tipos de riesgos socio-geológicos como: regiones con sismicidad reciente (Nieto-Samaniego *et al.*, 2012), escarpes de fallas con inestabilidad de laderas y fallas que controlan a deslizamientos por ejemplo en la ciudad de Zacatecas (Flores-

González, *et al.*, 2019). En la ciudad de Zacatecas también se han detectado que algunas de las fallas geológicas del SFSLT con direcciones NW-SE controlan la formación de grietas (fracturas) en construcciones urbanas como pavimentos, banquetas y bardas; estas fallas geológicas también ejercen un control en procesos erosivos y otros procesos geomorfológicos dentro de la ciudad (Escalona-Alcázar *et al.*, 2024).

Sistema de Cuencas y Sierras. El sistema de Cuencas y Sierras se extiende al norte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) por todo el centro y el noroeste de México (Henry y Aranda-Gómez, 1992, 2000), y se caracteriza por fallas normales de rumbo NNE a NNW que generaron una topografía de fosas y pilares alargados como los que se observan al oeste y suroeste de la Mesa Central (Figura 1). A este sistema de fallas se le ha denominado el “*Basin and Range Mexicano*” (Henry y Aranda-Gómez, 1992) y afecta a la mayor parte de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental y sus alrededores, salvo por su zona central que no presenta extensión significativa (Henry y Aranda-Gómez, 1992, 2000; Ferrari *et al.*, 2005). Según Henry y Aranda-Gómez (1992, 2000) el sistema de fallas de Cuencas y Sierras se formó por extensión de rumbo este-noreste en tres episodios: el primero, y el de menor intensidad, ocurrió alrededor de los 30 Ma, seguido por dos episodios de mayor intensidad uno en el límite Oligoceno-Mioceno y el otro en el Mioceno medio. A este sistema de fallas geológicas se asocia una fisiografía de sierras y cuencas, que determinan varios procesos geomorfológicos regionales y locales como deslizamientos, erosión de laderas y procesos de talud.

El Graben de Aguascalientes. Se ha considerado al Graben de Aguascalientes (Figura 1) como el límite tectónico entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central por tener un gran desplazamiento, y porque separa regiones con estilos estructurales distintos (Niето-Samaniego *et al.*, 1999; 2023). Esta estructura regional tiene un rumbo preferencial N-S y como estructura buza hacia el este, con un escarpe de 250 m de altura que se continúa en cuencas rellenas por, al menos, 500 m de rocas sedimentarias con ignimbritas intercaladas. El graben de Aguascalientes controla la fisiografía del valle de

Aguascalientes, así como sus fallas geológicas (orientación N-S) controlan las fallas de subsidencia por extracción de agua subterránea y que afectan a la ciudad de Aguascalientes, y a poblados a lo largo de estas fallas (Pacheco-Martínez, *et al.*, 2013). Los riesgos sicionaturales asociados con estas fallas de subsidencia son varios como hundimientos de terreno, fracturamiento y deterioro de estructuras civiles, erosión intensa con formación de socavones en zonas urbanas, rompimiento de vías de comunicación y otros.

Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) es un conjunto de fallas de rumbo N-NNW que atraviesan el centro de México y divide bloques corticales con diferentes historias geológicas, espesores de la corteza y topografía distintos, cuya principal manifestación geofísica es una anomalía gravimétrica significativa (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005b). Este sistema de fallas corta en su parte central a la FVTM, teniendo dentro de esta provincia un rumbo NNW, y al norte y sur de esta un rumbo N-S (Figuras 1 y 2). A lo largo de la ubicación de este sistema de fallas se originan varios tipos riesgos sicionaturales cuando cruzan por regiones pobladas, por ejemplo, en cuencas hidrológicas del noreste del estado de Guanajuato las fallas funcionan como canales del flujo de agua subterránea contaminada con arsénico y flúor (Piña-González *et al.*, 2022). A lo largo de la ubicación de estas fallas y en donde coinciden con la posición de fallas de subsidencia (originadas por la extracción desmedida de agua subterránea) se presenta un control estructural (Almazán-Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021). En los escarpes de estas fallas del SFTSMA que coinciden con la ubicación de zonas pobladas, se presentan problemas de inestabilidades de laderas y taludes como en San Miguel de Allende, ciudad de Querétaro y en varias regiones del estado de México (Ordaz-Hernández *et al.*, 2019; Olivares-Sánchez, 2020).

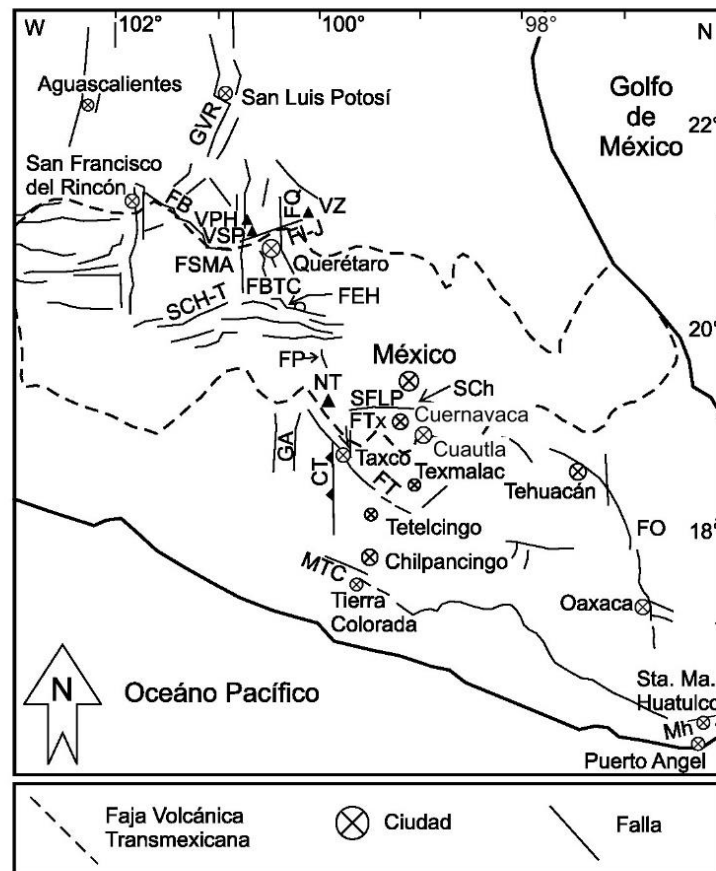


Figura 2. Fallas mayores dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. GVR: Graben de Villa de Reyes, FQ: falla Querétaro; FBTC: fallas Bartolomé, Tlacote, La Cuesta y Lagunillas-Huimilpan; FB: falla del Bajío; FI-J: fallas Ixtla-La Joya; FSMA: falla San Miguel de Allende; SCH-T: sistema Chapala-Tula; FT: falla Tetipac, Chichila y Amates; FLP: sistema de fallas La Pera; FTx: fallas Taxco, San Gregorio, Coapango y Acamixtla; FEH: falla Epitacio Huerta; FP: falla Perales; GA: graben de Arcelia; CT: cabalgadura Teloloapan; FO: Falla de Oaxaca; MTC: milonitas de Tierra Colorada; Mh: milonitas de Huatulco; SCh: Sierra de Chichinautzin; VZ: Volcán Zamorano; VPH: Volcán Palo Huérfano; VSP: Volcán San Pedro; NT: Volcán Nevado de Toluca.

Fuente: Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego (2005b).

Sistemas de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana. Se ha propuesto que la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se ubica sobre una zona de debilidad preexistente de escala cortical o litosférica. La cubierta volcánica de hasta 4000 m de espesor no permite conocer si esta provincia se ubica sobre la traza de una falla cortical, pero dentro de esta provincia, o en sus límites, se encuentran fallas mayores con desplazamientos que van desde cientos a varios miles de metros (Figura 2). Los sistemas de fallas que se han reconocido son por lo menos cuatro, un sistema de fallas laterales NE-SW fallas del Mioceno tardío (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999), fallas extensionales NE-SW, fallas extensionales y oblicuas con rumbo E-W (Johnson y Harrison, 1990; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999) y fallas NE-SW del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato. Esta provincia geológica separa zonas de la corteza con estilos de deformación distintos, razón por la cual se considera a la FVTM como una frontera tectónica.

3. Metodología de estudio de fallas geológicas

En este trabajo las metodologías empleadas comprendieron la cartografía geológica, interpretación de imágenes de satélite de Google Earth, geología de campo, geomorfología y geología estructural. En el caso de San Miguel de Allende (estado de Guanajuato) se establece una relación entre la cartografía geológica con los efectos que las fallas geológicas provocan en las poblaciones, identificando varios peligros y riesgos socionaturales como contaminación de agua subterráneas, control estructural en grietas en la superficie o inestabilidad de laderas. En las fallas de subsidencia de la Cuenca del Valle de Toluca (CVT) se emplearon cartografía de campo y método de observación de afectaciones a construcciones urbanas. En el caso de peligros y riesgos socionaturales en el Volcán San Antonio (ubicado al noroeste del volcán Nevado de Toluca), se realiza una integración de fallas geológicas, se relaciona a la cartografía geomorfológica y se realizan verificaciones en campo. En el último caso presentado del análisis de las fallas geológicas que se activaron durante el terremoto de 19 de septiembre de 2017 en la región de Tenancingo (estado de México) se emplearon las metodologías de cartografía geológica con interpretación de

lineamientos en imágenes de satélite, trabajo de campo y documentación de campo de los daños en construcciones por el sismo.

Las fallas geológicas pueden ser identificadas en imágenes satelitales o directamente en la superficie durante el trabajo de campo. Los datos se colectaron mediante observaciones y mediciones de la orientación y la inclinación de los planos de falla con instrumentos como brújulas y clinómetros (Fossen, 2016). Ya que se colectaron suficientes datos de planos de falla, se realizó el análisis estructural. El tipo de análisis estará en función de los objetivos del estudio. Los datos deben ser agrupados y seleccionados de una manera que resulte razonable (Fossen, 2016). En algunos casos estos pueden ser homogéneos y son tratados como una familia o sistema, otras veces son heterogéneos y será útil subdividirlos en subgrupos o subpoblaciones. Se deben considerar criterios geológicos para subdividirlos o agruparlos, como la orientación, si existe o no un relleno, tipo de movimiento o por zonas dentro del área de estudio. Estas últimas, las variaciones geográficas definen subzonas que suelen llamarse dominios estructurales.

4. Resultados y discusión

4.1. Falla San Miguel de Allende

Características geológicas

La Falla San Miguel de Allende es parte del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende, ha sido reconocida en noreste del estado de Guanajuato afectando a toda la Cuenca Alta del Río Laja (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Beltrán-Martínez *et al.*, 2023). Considerando todos sus segmentos, tiene un rumbo promedio NNW-SSE, con variaciones a N-S y NNE-SSW en algunos segmentos, y una longitud total aproximada de 50 km (Figura 3). El sector central de la Falla de San Miguel de Allende resulta el de mayor relevancia desde la óptica de peligros y riesgos socionaturales, pues en el bloque hundido de esta falla se ubica gran parte de la mancha urbana de la población homónima (Figura 3). La posición de la falla para el sector central se ha reconocido desde el sur de la ciudad hasta 15 km al norte de San Miguel

de Allende; en la parte sur la falla es cubierta por los depósitos del volcán Palo Huérfano, y continúa con un rumbo NNE hacia el norte de la ciudad. La falla de San Miguel de Allende es una falla de tipo normal con inclinación hacia el oeste y que se formó en el Oligoceno; la falla presenta reactivaciones durante el Mioceno, a la que se le ha estimado un desplazamiento máximo de 450 m (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001) produciendo desniveles topográficos que superan los 200 m al norte de la ciudad de San Miguel de Allende. En el bloque levantado de esta falla se exponen rocas Mesozoicas marinas compuestas de intercalaciones de lutitas, areniscas y calizas, que son cubiertas por rocas volcánicas cenozoicas como basaltos, riolitas e ignimbritas (Figura 3). Al oeste de la falla, en el bloque hundido, hay afloramientos aislados de basaltos, y predomina el relleno sedimentario mal consolidado como limos, areniscas y conglomerados, cuyo espesor máximo es de hasta 200 m (Beltrán-Martínez *et al.*, 2023; Beltrán-Martínez, 2023).

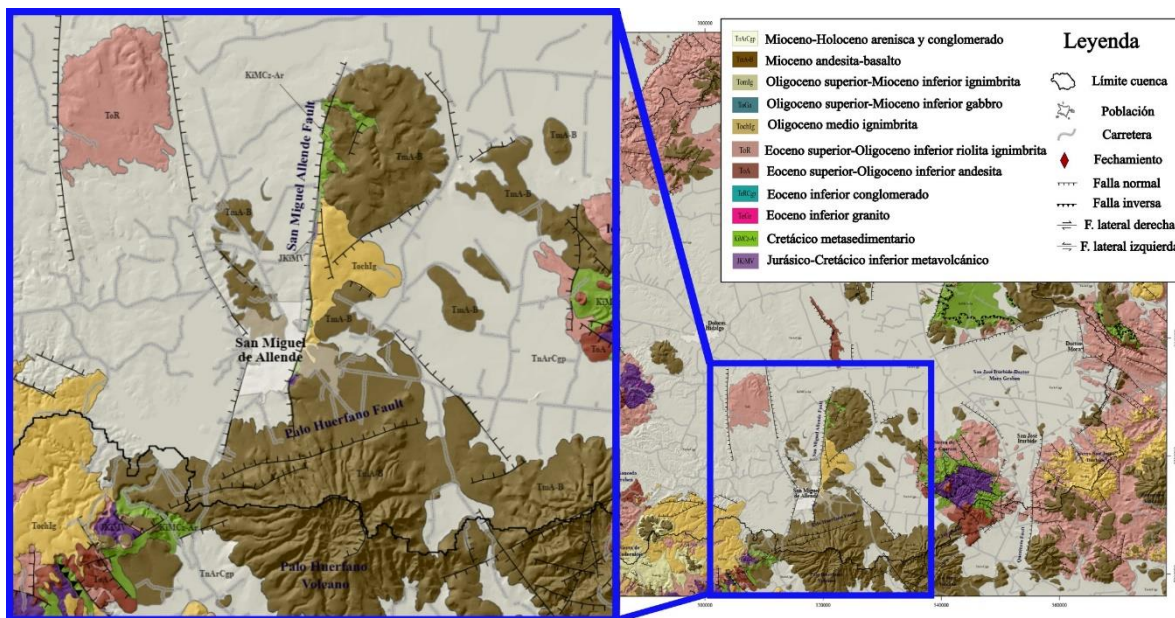


Figura 3. Fragmento del mapa geológico de la Cuenca Alta del Río Laja. En el recuadro azul se muestra un acercamiento al área del sector central de la Falla de San Miguel de Allende.

Fuente: Beltrán-Martínez *et al.* (2023)

Peligros y riesgos socionaturales

El crecimiento poblacional y la actividad agrícola han llevado a la sobreexplotación del acuífero, alterando el equilibrio ambiental e incrementando la presencia de contaminantes de origen geogénico en el agua subterránea debido a la extracción de agua a mayores profundidades en algunas partes de la cuenca (Knappett *et al.*, 2020). Se ha propuesto que las fallas en la cuenca, como la de San Miguel de Allende, tienen un rol importante en el ascenso de contaminantes aunado a la explotación del acuífero (Piña-González *et al.*, 2022). De continuarse con la tasa de extracción del agua subterránea para consumo humano y uso agrícola existe el riesgo de que la presencia de contaminantes se generalice en la Cuenca Alta del Río Laja (CARL).

Los hundimientos y agrietamientos del terreno que son causados por la sobreexplotación de acuíferos en cuencas como la CARL son otro fenómeno geológico que representa un riesgo para la población y la infraestructura. Al norte de San Miguel de Allende, siguiendo la traza de la falla, se encuentra la comunidad de San José de la Estacada, Municipio de Dolores Hidalgo; en esta comunidad, hundimientos de hasta dos metros han acompañado la formación de grietas en el terreno con orientación NNW-SSE a NW-SE causando afectaciones a las instalaciones de la escuela de educación básica. El fenómeno de hundimiento y agrietamiento asociado a la sobreexplotación se ha documentado en otras partes del centro de México como el valle de Aguascalientes, en donde la presencia y orientación de los agrietamientos está fuertemente influenciado por fallas mayores (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). Los fenómenos de hundimientos y agrietamientos no se han reportado en otras áreas de la Cuenca Alta del Río Laja (CARL), pero de continuarse la sobreexplotación de agua subterránea existe el riesgo de formación de nuevos hundimientos y agrietamientos y la presencia de contaminantes en el agua subterránea. Las fallas mayores, como la falla de San Miguel de Allende, ejercerán un control importante en las orientaciones de los agrietamientos, y de darse estos en la mancha urbana de la

población homónima traerá afectaciones a la infraestructura urbana y casa habitación de la población homónima.

4.2. Fallas de subsidencia en la Cuenca del Valle de Toluca

La formación de fallas de subsidencia hídrica es una consecuencia de la deformación del terreno por extracción de agua subterránea, es un problema reconocido a nivel internacional y a nivel nacional (México) ligado con el crecimiento poblacional y por ende la demanda de agua (Figueroa-Miranda *et al.*, 2018; Collados-Lara *et al.*, 2020). La subsidencia del terreno y formación de fallas con grietas no solo ocurre en ciudades, sino también en zonas agrícolas. En zonas agrícolas de escalas de tamaño regionales la extracción de agua subterránea origina compactación de los materiales geológicos del acuífero como se puede ejemplificar con el caso del Valle Central de California (Faunt *et al.*, 2015), y también en la región de El Bajío en el estado de Guanajuato (Rodríguez *et al.*, 2012; Figueroa-Miranda *et al.*, 2018). En las ciudades que tienen el problema, la subsidencia del terreno es acompañada por la formación de grietas y fallas de subsidencia en el suelo que afecta a construcciones civiles como casas habitación, residencias, bodegas industriales y otros tipos de infraestructura civil. En México varias ciudades están en esta situación ya que crecen rápidamente en su número de habitantes y se urbanizan rápidamente lo que demanda una extracción desmesurada del agua subterránea. Una gran cantidad de estas ciudades se encuentran en cuencas volcano-sedimentarias que son limitadas por fallas geológicas que son denominadas semigrabenos o grabenes. Algunos ejemplos de estas ciudades ubicadas en cuencas volcano-sedimentarias con problemas de subsidencia son: Ciudad de México, Aguascalientes, Morelia, Celaya, Irapuato, Querétaro, y Toluca. Las fallas por subsidencia en estas ciudades se han reportado en varios estudios, por ejemplo: Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Pacheco-Martínez *et al.*, 2013; Ochoa-González *et al.*, 2018; Almazán Vázquez, 2017; Rodríguez-Campero *et al.*, 2023).

La Cuenca del Valle de Toluca está limitada por sierras de origen volcánico, estas sierras presentan varias estructuras volcánicas que tuvieron actividad desde el Mioceno llegando al Cuaternario por ejemplo la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevado de Toluca-San Antonio (García-Palomo *et al.*, 2008, 2000). Los sistemas de fallas geológicas alrededor de la Cuenca del Valle de Toluca tienen direcciones NW-SE, E-W, y NE-SW (Figura 4) (Sistemas de Taxco-San Miguel de Allende, Sistemas de fallas de Acambay y Tenango, y Sierra de las Cruces). Se interpreta que parte de estas fallas geológicas deben estar ocultas en la ZMVT, esto por la alineación de aparatos volcánicos, las trazas de las fallas de subsidencia y alineación de terremotos que han ocurrido (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021).

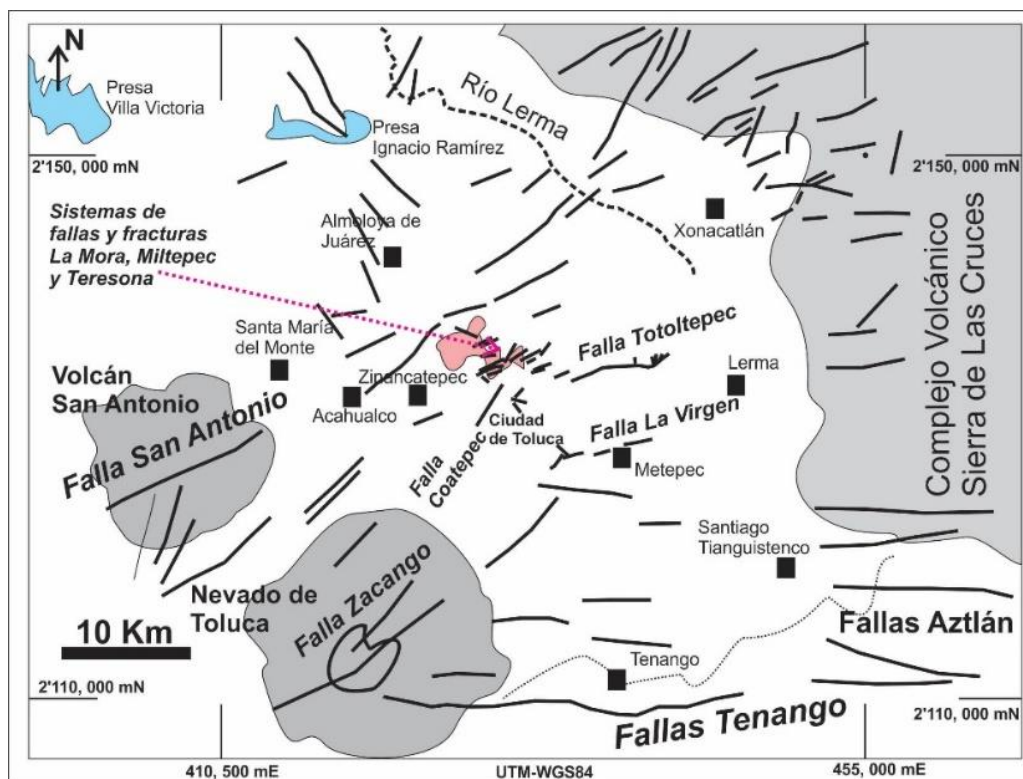


Figura 4. Ubicación de los sistemas de fallas geológicas que se localizan en la Cuenca del Valle de Toluca en relación con los sistemas de fallas de subsidencia hídrica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Fuente: Angeles-Moreno *et al.* (2021).

Características físicas y geológicas

Las fallas de subsidencia en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se han estudiado en sus características de orientación de su traza, abertura, profundidad y localización por compañías subcontratistas de organismos operadores de agua desde los años ochenta (CONAGUA, 2002) sin embargo estos estudios no están publicados. Los sistemas de fallas de subsidencia reconocidos son falla Totoltepec, La Virgen-Magdalena, La Mora, Miltepec, Lerdo, Cerro del Calvario, Coatepec, Teresona y Sierra Morelos (Figura 5). Estos sistemas de fallas se reconocieron con base cartografía de campo y detección de daños en las construcciones civiles. Las fallas presentan direcciones E-W, ENE-WSW, ESE-WNW, NW-SE y N-S con geometrías curvilíneas, sigmoidales, zonas de relevo, escalonadas, ramificadas, y cola de caballo (Figura 6) (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021). Las longitudes son variables de escala kilométrica como la falla Totoltepec que tiene longitudes mínimas de 1 a 2 km, llegando a alcanzar 8 km y otras fallas de subsidencia de 100 m a 1 km (Figura 5). Las fallas cortan a estratos de suelos de origen volcánico, capas de rocas piroclásticas y otras rocas volcánicas. Las rocas piroclásticas fueron derivadas de depósitos piroclásticos de composición andesítica originados por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas y depósitos de caída; estos depósitos a su vez provenientes de las estructuras volcánicas de los alrededores de la ZMVT.

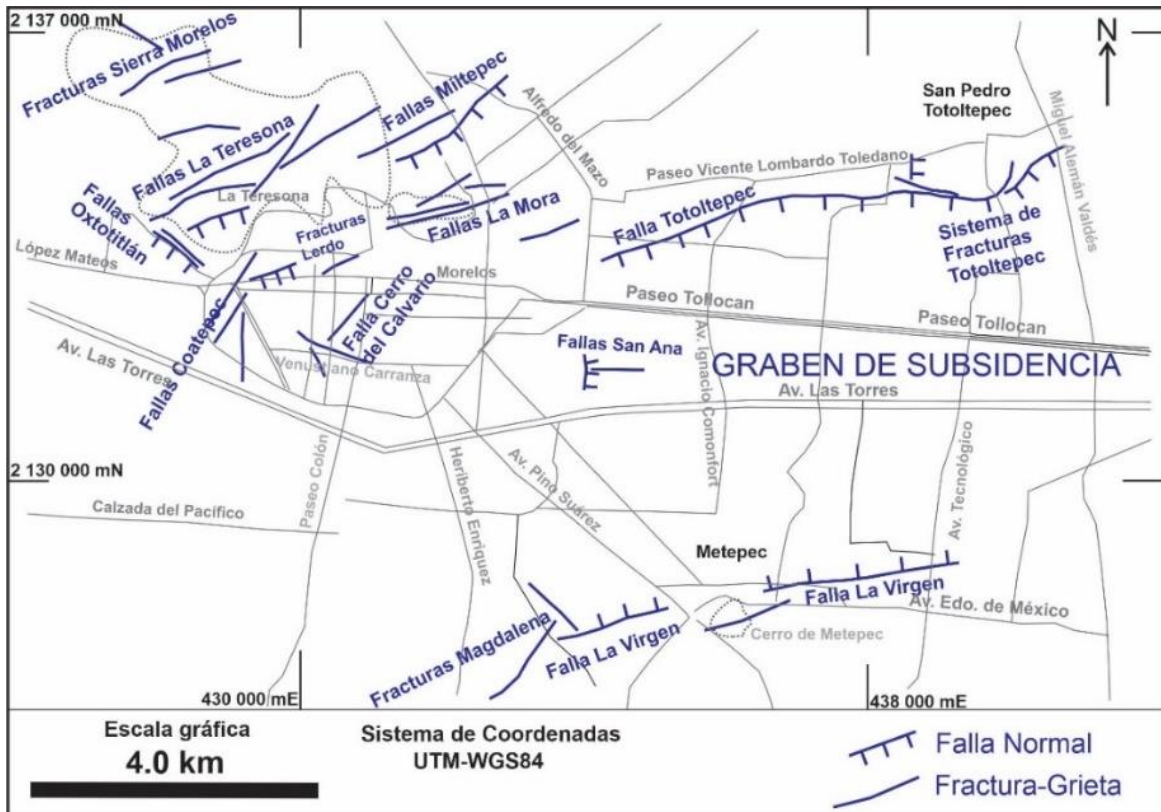


Figura 5. Sistemas de grietas y fallas de subsidencia en la ciudad de Toluca parte central de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente: modificado de Almazán Vázquez (2017).



Figura 6. Geometría de grietas y fallas de subsidencia en construcciones afectadas. A, estructura sigmoideal definida por grietas y desplazamiento vertical de falla de subsidencia. B, falla de subsidencia con desplazamiento vertical, grietas de tensión ramificadas en aceras y bardas de construcción. C, construcción intensamente fracturada en zona de fallas de subsidencia de Oxtotitlán. D, fallas inversas de subsidencia en muro de construcción resultado de acomodo estructural de falla principal Totoltepec de subsidencia.

Fuente: Elaboración propia.

Mecanismos de subsidencia y generación de grietas

Las fallas de subsidencia en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se han reconocido desde los años sesenta y setentas como se reporta en varios reportes técnicos

no publicados (CONAGUA, 2002). La formación de estas fallas de subsidencia y grietas tienen que ver con varios factores que se combinan: como la exportación del agua hacia la Ciudad de México mediante el Sistema Lerma-Cutzamala que entro en operación a principios de la década de 1950 (CONAGUA, 2005), el uso agrícola e industrial del agua subterránea, los abatimientos de niveles freáticos, profundización de conos de abatimientos alrededor de pozos de agua (Rodríguez-Campero, *et al.*, 2023), y compactación de los materiales de los acuíferos.

La generación de grietas y fallas de subsidencia ocurre en varias zonas específicas de la ZMVT, en zonas de transición entre roca de derrames volcánicos dacítico-andesíticos con los suelos y depósitos piroclásticos de las partes bajas, en las capas superiores de fallas de bordes de grabenes, y en las protusiones o levantamientos topográficos de rocas volcánicas de basamento (Figura 7). Las fallas y grietas de los sistemas Oxtotitlán, Miltepec, y la Mora son ejemplos de sistemas ubicados en las zonas de transición entre diferentes materiales litológicos y cambios de espesor de las rocas volcánicas (Figura 5). En estas zonas han ocurrido descensos piezométricos importantes en el agua subterránea lo que implica otro factor importante que se suma a la formación de grietas en las zonas transicionales (Rodríguez-Campero *et al.*, 2023). La falla de subsidencia Totoltepec se ha interpretado que coincide en posición y dirección a largo de una falla geológica que se encuentra a mayor profundidad y que es parte de un graben oculto (Almazán Vázquez, 2017, Angeles-Moreno *et al.*, 2021) y otros trabajos sugieren que puede deberse a la presencia de rocas volcánicas de mayor resistencia mecánica a profundidad por irregularidades topográficas (Rodríguez-Campero *et al.*, 2023).

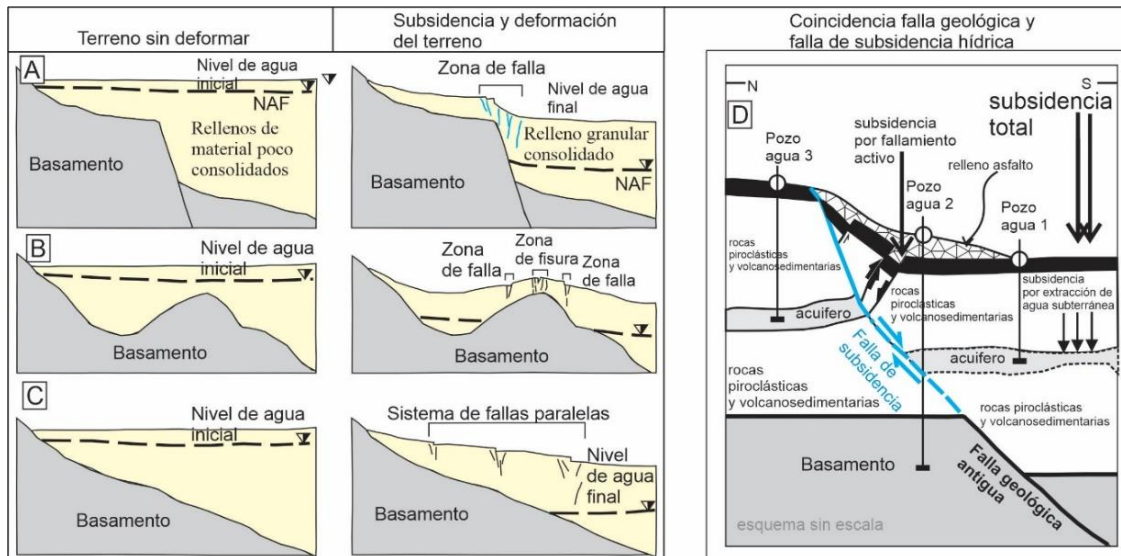


Figura 7. Algunos mecanismos en el origen de las grietas y fallas de subsidencia. A, falla geológica del borde un graben que es coincidente espacialmente con las fallas de subsidencia originadas por deslizamiento de nivel freático (NAF). B, altos y bajos en el basamento, y en zona de protusión de basamento se formas grietas de subsidencia al cambiar el nivel freático. C, fallas y grietas de subsidencia en la margen de cuenca o zona transicional mecánica y de cambios de espesor de depósitos de cuenca. D, esquema que muestra el modelo de mecanismo de subsidencia cuando coincide una falla de subsidencia hídrica y a profundidad una falla geológica.

Fuente: los esquemas A, B, y C fueron modificados de Pacheco-Martínez *et al.* (2013) y el esquema D es elaboración propia.

Peligros y riesgos socionaturales

Los principales daños generados por la formación de las fallas de subsidencia y grietas asociadas en la ZMVT son en los elementos constructivos de viviendas familiares, edificios, naves industriales, avenidas, calles, banquetas y otros elementos de construcción en las calles. Las deformaciones en las construcciones comprenden desplazamientos, rotaciones y distorsiones de cimentaciones, muros, columnas, trabes, ventanas, puertas, lozas y pisos

(Figura 6). Esto ya se ha descrito en varios trabajos realizados con anterioridad que estudian las fallas de subsidencia en la ZMVT (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021; Rodríguez-Campero *et al.*, 2023). Los riesgos socionaturales que pueden ocurrir son debido a la vulnerabilidad que presentan las construcciones a lo largo de la zona de influencia y de la traza en si misma de la deformación de las fallas y grietas de subsidencia, en donde se ha observado que las construcciones varían en tipos de materiales de construcción desde adobe, tierra y concreto, y todos estos tipos de construcciones son afectados (Figura 6). La calidad de vida de las familias es afectada cuando sus casas se encuentran sobre una falla de subsidencia, ya que el movimiento de la falla daña la construcción provocando intenso fracturamiento y hundimiento diferencial; en consecuencia, una mayoría de familias no puede sobreponerse a estos gastos de reparaciones, ya que también es un gasto continuo y muchas familias requieren reubicarse, lo que implica que también es un problema de ordenamiento territorial.

La presencia de fallas y grietas de subsidencia hídrica son una evidencia de la sobreexplotación de los acuíferos en la ZMVT que va acompañada de procesos sociales como el crecimiento de la población, la expansión no planificada de la urbanización y la conciencia de los habitantes ante el problema del agrietamiento. Estos factores aumentan el riesgo como lo apunta Baró Suárez *et al.* (2018). En la periferia de la zona urbanizada (zonas transicionales) se pueden presentar varios tipos de riesgos como son sísmicos y un fracturamiento intensificado. Estos riesgos están vinculados con la heterogeneidad en la estratigrafía, la presencia de protusiones topográficas en el basamento y presencia de pozos de agua donde hay fallas y grietas (Figura 7). Las zonas transicionales presentan una alta vulnerabilidad ante los eventos de terremotos, ya que al ocurrir un terremoto se generan y activan fracturamientos, lo que tiene consecuencias lamentables en las construcciones y posibles daños a vidas humanas; esto se ha visto en la Cuenca del Valle de México con el sismo de 19 de septiembre de 2017 en donde el terremoto afectó zonas periféricas de la Cuenca del Valle con daño a construcciones y personas (Torres-Álvarez, 2017-2018) y activo

fallas y grietas de subsidencia por ser zonas de debilidad y con espesores de capas de rocas blandas menores a 30 m.

Otros tipos de riesgos asociados con la formación de grietas y fallas de subsidencia que son una consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos del Valle de Toluca son los riesgos ambientales y ecológicos, esto ya había sido señalado en el trabajo de Esteller y Diaz-Salgado (2002). En este trabajo se señala de la desecación de cuerpos de agua, disminución de niveles de agua en ríos y la subsidencia. La subsidencia implica la generación de fallas de subsidencia y estas fallas acompañadas de formación de grietas tienen extensión a profundidad lo que origina conexiones entre acuíferos, las conexiones de acuíferos o niveles de agua subterránea añade otro elemento de riesgo en este caso por contaminación de acuíferos y que puede afectar a la población, esto porque las conexiones de grietas de subsidencia pueden llegar a los niveles de aguas residuales o niveles más profundos con presencia de metales pesados tóxicos; en la ciudad de Irapuato, por ejemplo, se ha visto que existe contaminación del agua subterránea con tolueno y se ha interpretado que las fallas subsidencia facilitan la migración de contaminantes (Rodríguez *et al.*, 2012). En algunos pozos de la región de El Bajío se han reportado pozos de agua con concentraciones altas de arsénico y flúor (Mendoza, 1999) lo que es otro riesgo socioambiental y estos contaminantes pueden trasladarse a lo largo de las fallas de subsidencia. Las fallas y grietas de subsidencia hídrica no se han considerado como un riesgo en las leyes y reglamentos ambientales por ejemplo Ley General de Aguas Nacionales o Leyes que tienen que ver con Equilibrio Ecológico o Protección de Medio Ambiente, y esto ya se había señalado por ejemplo en el trabajo de Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez (2006) donde también se señala que existe una desvinculación total de los trabajos de cartografía de grietas de Protección Civil y no se consideran por constructores de unidades habitacionales. En la actualidad en las Ciudades de México y Aguascalientes ya existe una mayor preocupación por parte de gobiernos estatales y municipales que es reflejado en la realización de estudios de ingeniería civil, de ingeniería geotécnica y de geociencias. En algunos gobiernos también

se ha colocado a disposición pública la información de la ubicación y distribución espacial de las fallas y grietas de subsidencia en estas ciudades. por ejemplo, en Aguascalientes el Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG) (SOP, 2009), esto debe llevarse a los planes de desarrollo urbano, municipal y de ordenamiento territorial.

4.3. Características geológicas y peligros asociados en el Volcán San Antonio

Estratigrafía

El volcán San Antonio se ubica al noroeste del volcán Nevado de Toluca (Figura 8), forma parte del complejo volcánico Nevado de Toluca-San Antonio, y del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. García Palomo, *et al.*, (2000), mencionan que, por su estratigrafía, la morfología del edificio volcánico, el fracturamiento y las rocas intemperizadas, su edad pertenece a Mioceno medio. Se definió una unidad estratigráfica denominada Secuencia volcánica San Antonio, el edificio principal está conformado por secuencias de flujos de lava cubiertas por materiales piroclásticos que consisten en capas gruesas de caída, ricas en pómez que están sobrepuestas por depósitos de flujos piroclásticos pumíticos y *surges*. Secuencias de depósitos gruesos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas expuestos en la ladera norte del volcán, cerca de la localidad de Santa María del Monte municipio de Zinacantepec, México García Palomo *et al* (2000).

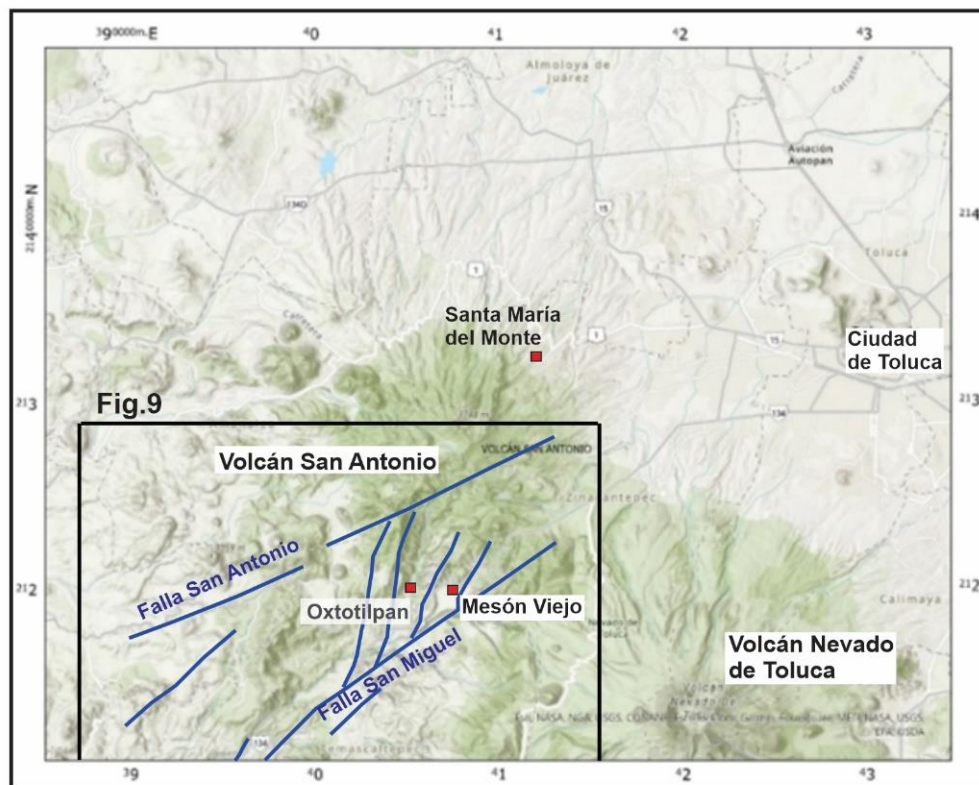


Figura 8. Mapa de ubicación del volcán San Antonio.

Fuente: ESRI, NASA, NGA, USGS, CONANP, Tom Tom, Garmin, Foursquare, METI/NASA, USGS, EPA y USDA.

Fallas

El volcán San Antonio está asociado a la intersección de dos sistemas de fallas normales con dirección noreste-suroeste, se extienden desde la zona de Zihuatanejo-Petatlán hasta el norte de la cuenca de México, en algunos sitios del volcán presenta una morfología de laderas escarpadas con pendientes superiores a los 30°. Los escarpes coinciden con fallas que se formaron desde el Mioceno y se reactivaron durante el Plioceno. Estos sistemas de fallas está conformados por las fallas San Antonio y San Miguel, la primera tiene una longitud de aproximadamente 24 km en el volcán San Antonio, y corta la parte central del edificio volcánico; las segunda falla se ubica al sureste de la primera, entre el los volcanes

Nevado de Toluca y San Antonio, la presencia de esas dos fallas normales forman un valle denominado como una fosa tectónica San Miguel (García Palomo *et al.*, 2000), tiene una dirección hacia el sur, con una profundidad de aproximadamente 400 metros, y una anchura de 3 km, y es drenado por el río Peña Blanca (Figura 9).

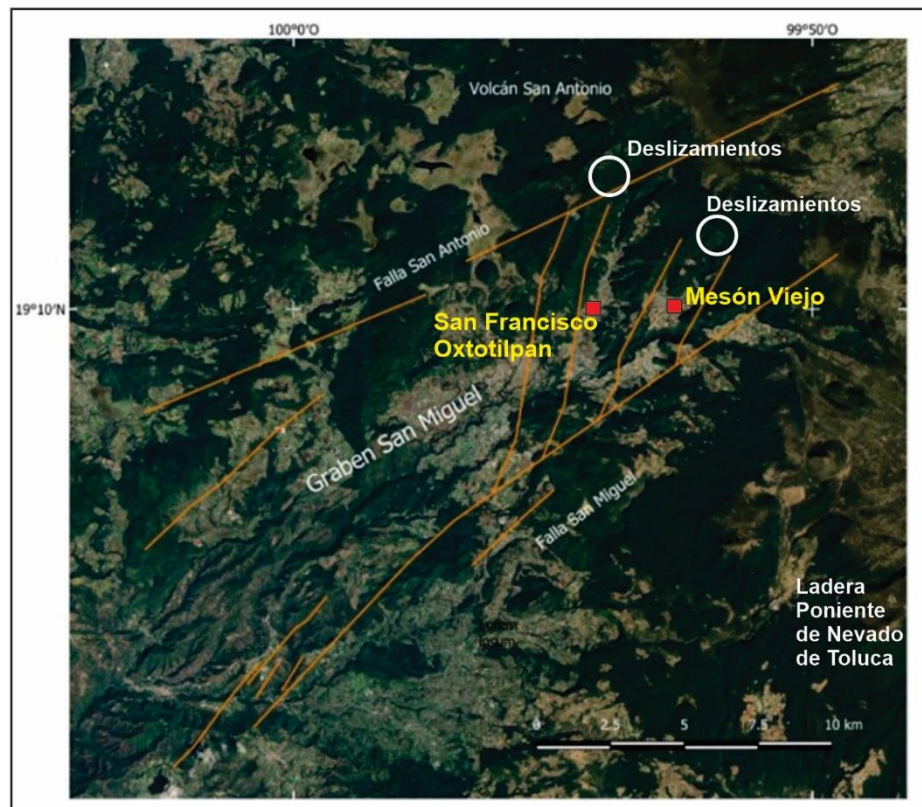


Figura 9. Fallas volcán San Antonio.

Fuente: García Palomo *et al.* (2000).

Geomorfología

El volcán San Antonio se eleva de los 2550 a 3680 msnm, presenta una cima en forma de herradura hacia el sur, su ladera norte es un piedemonte suavizado con pendientes de 2° a 15°, está conformado por depósitos volcánicos (flujos piroclásticos de bloques y cenizas y pómez) (García-Palomo *et al.*, 2000). Las laderas son disectadas por corrientes fluviales que

forman barrancos con una profundidad promedio de 100 a 150 metros, la ladera sur se caracteriza por un piedemonte con mayor pendiente de entre 15° a más de 35°, conformado por lavas de composición andesítica, es una piedemonte fuertemente erosionado con profundos valles fluviales de 200 a 400 metros, destaca el valle fluvial del río Peña Blanca en la localidad de San Francisco Oxtotilpan, con una dirección hacia el sur con una anchura máxima de 4 km, con una profundidad promedio de 400 m y una longitud de 11 km que forma parte de la fosa tectónica de San Miguel.

Peligros y riesgos socionaturales

Los flujos de detritos son los movimientos de remoción en masa más peligrosos en las zonas montañosas, debido a las altas velocidades y distancias que alcanzan, así como los daños que ocasionan (Hürlimann, *et al.*, 2019, Spielmann y Aaron, 2024). Este tipo de movimientos tienen un particular mecanismo de generación inician primero como deslizamiento superficial, a nivel de suelo, y posteriormente, se combinan con los escurrimientos de poca permeabilidad durante la presencia de lluvias intensas (Xia, *et al.*, 2023). Los flujos de detritos aportan grandes cantidades de sedimentos con tamaños que van desde arcillas hasta cantos rodados y cuando se depositan en los abanicos aluviales están mal clasificados (Ballesteros-Cánovas, *et al.*, 2023). Los factores que influyen en la generación están asociados a las intensas lluvias, pero existen otros que forman parte de la estabilidad de la ladera, como puede ser la litología, pendiente, morfología y la presencia de fallas y fracturas. Las fallas tienen una influencia fundamental en la estabilidad de las pendientes, el control de la erosión y transporte de sedimentos en las laderas (Wei, *et al.*, 2018; Wang, *et al.*, 2020, Whitbread, *et al.*, 2024).

La presencia del sistema de fallas San Miguel y San Antonio y fracturas, asociados a una morfología caracterizada por escarpes en la cima del volcán, presencia de rocas muy intemperizadas, depósitos de cenizas y flujos piroclásticos poco consolidados, además de las condiciones de precipitación de la zona, que es de 1,000 a 1,200 mm promedio anual, han favorecido el desarrollo de procesos de remoción en masa. En este sentido, destacan

los eventos ocurridos en el año 2010, fueron eventos complejos que comenzaron como deslizamientos superficiales y con la combinación con el agua se convirtieron en flujos detritos, estos eventos tuvieron lugar algunas localidades del estado de México como Mesón Viejo y San Francisco Oxtotilpan en el municipio de Temascaltepec, y en la localidad de Santa María del Monte en el municipio de Zinacantepec. Los eventos ocurridos en Mesón Viejo y San Francisco Oxtotilpan, fueron de gran impacto debido a las afectaciones principalmente en la carretera Toluca-Valle de Bravo y en las áreas agrícolas de estas localidades, provocando pérdidas económicas. Los movimientos ocurridos en la localidad de Mesón Viejo iniciaron con un primer flujo de detritos en el escarpe de un sector de la falla San Antonio, con una altura de aproximadamente 50 metros. Este escarpe caracterizado por lavas andesíticas muy intemperizadas. El flujo de detritos posteriormente se desplazó por el cauce del río Zacatonal, provocando una mezcla de agua, rocas, detritos, sedimentos finos y árboles, moviéndose en una pendiente de aproximadamente 30°, la velocidad y la carga se incrementó al llegar a la carretera Toluca-México, debido a que el río está canalizado por un puente mismo que fue azolvado y cubrió la carretera llevándose algunos vehículos que transitaban por ella. Un segundo flujo de detritos, que es más importante, se originó al sureste del anterior, uniéndose al río Zacatonal, aumentado su volumen y depositándose en el abanico aluvial del río, donde se asienta la localidad de Mesón Viejo, donde inundó caminos y áreas de cultivo (Figura 10).

En la localidad de San Francisco Oxtotilpan, los movimientos ocurridos se presentaron en laderas escarpadas asociada con la falla San Antonio, correspondiente al sector oeste del graben San Miguel, las condiciones litológicas, estructurales, geomorfológicas y de precipitación fueron similares a la zona de Mesón Viejo. La generación del movimiento se presentó en un afluente del río Peña Blanca, sobre una ladera escarpada, su inicio de desarrollo fue como un deslizamiento superficial y posteriormente se mezcló con agua, sedimentos y árboles convirtiéndose en un flujo de detritos, uniéndose al canal del río Peña

Blanca y depositándose en el abanico aluvial del mismo, inundando las zonas de cultivo (Figura 11).

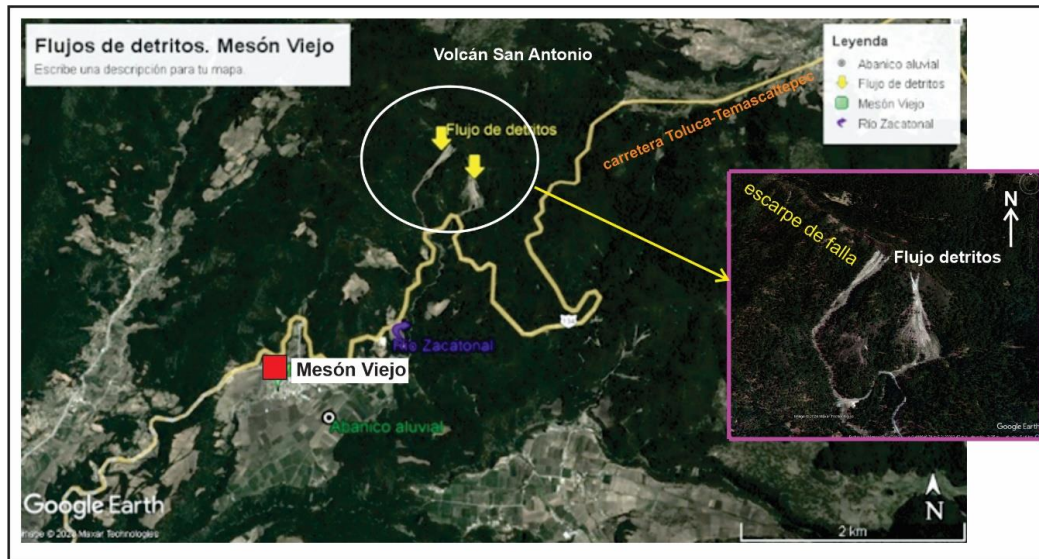


Figura 10. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de Mesón Viejo.

Fuente: Imagen Google Earth.

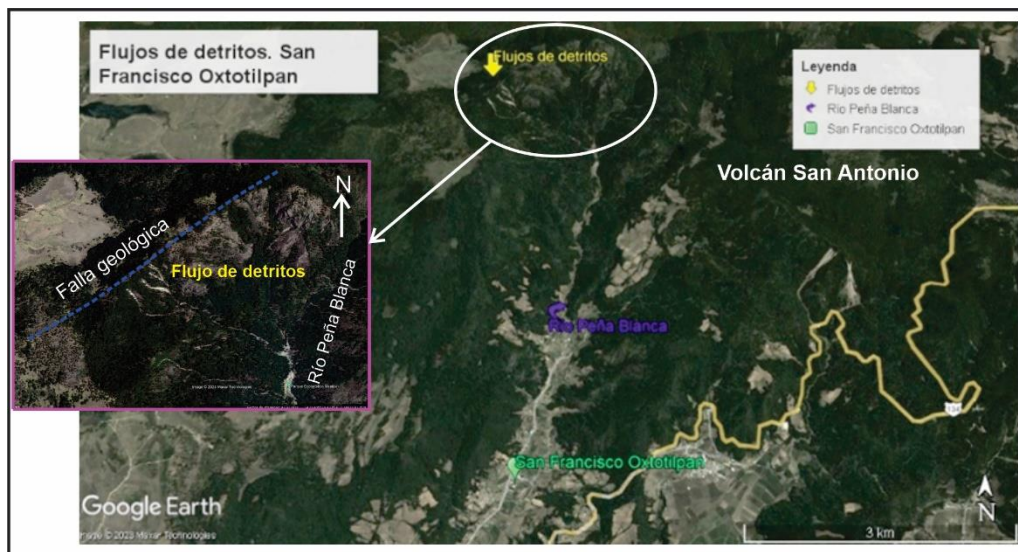


Figura 11. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de San Francisco Oxtotilpan.

Fuente: Google Earth.

Finalmente, en la ladera norte del volcán San Antonio, sobre el piedemonte se presentó un movimiento similar a los anteriores, se originó en un canal de cauce, sobre depósitos de ceniza y pómez, este movimiento no causó daños en el área, debido a que fue de escasa extensión (aproximadamente 400 m), abarcando solo área de bosque (Figura 12).



Figura 12. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de Santa María del Monte.

Fuente: Google Earth.

4.4. Sistema de fallas de Tenango

Características geológicas

El sistema de fallas de Tenango (SFT) es un sistema de fallas y fracturas que se localizan y son un límite importante fisiográfico, geomorfológico, e hidrológico de la Cuenca del Valle de Toluca en su parte Sur. Las fallas tienen una dirección principal E-W con otras fallas de acomodo estructural con direcciones NE-SW, N-S y WNW-ESE. A lo largo de la traza de las fallas que lo componen se localiza en el estratovolcán Nevado de Toluca (Figura 13). El SFT es un sistema de fallas que pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana y coincide espacialmente con el Complejo Volcánico Chichinautzin del Cuaternario. El SFT está formado por el graben Tenancingo, pilar estructural Atlatlahuaca, y las fallas: Tenango,

Joquicingo, San Pedro y Francisco Zarco (Figura 13) (García-Palomo *et al.*, 2000). Las fallas de SFT son un sistema de fallas oblicuas con componente normal e izquierdo lo que define un movimiento transtensional (Norini *et al.*, 2006). Este sistema de fallas está activo sísmicamente hoy día (Norini *et al.*, 2006) y parecen haber iniciado su actividad de movimiento desde el Pleistoceno y han tenido reactivaciones a lo largo del tiempo (García-Palomo *et al.*, 2000).

En la parte poniente del SFT se localiza otro sistema de fallas NE-SW que es definido por las fallas Zacango y falla San Antonio (García-Palomo *et al.*, 2000). En la parte sur del SFT se localizan varios sistemas de fallas que tienen direcciones N-S, NW-SE y NE-SW (Figura 13), estas fallas definen depresiones estructurales (grabenes), semigrabenes y pilares estructurales (García-Palomo *et al.*, 2000). Los sistemas de grabenes NW-SE son parte del Sistema de Fallas de Taxco San Miguel de Allende que tiene fallas más antiguas al Sistema de Fallas de Tenango (SFT).

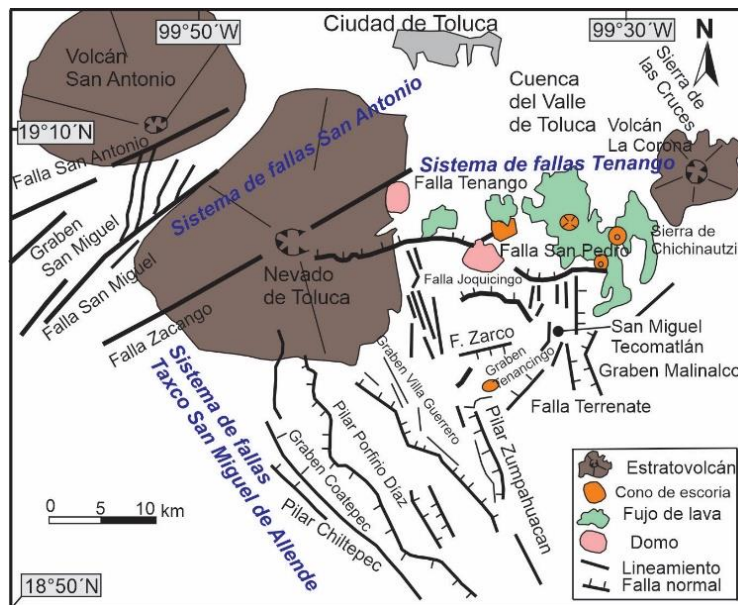


Figura 13. Sistema de Fallas de Tenango y otros sistemas de fallas en la parte Sur de la Cuenca del Valle de Toluca.

Fuente: figura modificada de García-Palomo *et al.* (2000).

Peligros y riesgos socionaturales

La presencia, localización y las características geológicas de las fallas del Sistema de Fallas de Tenango son consideradas con una zona de peligro y riesgos sísmico para las poblaciones cercanas y también para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). Existen evidencias de actividad sísmica a lo largo de las fallas E-W, por ejemplo, en lo denominado fallas de Aztlán que son un sistema de fallas que limitan a la Cuenca del valle de México en su parte Sur (Campos-Enríquez *et al.*, 2015), y en donde se localiza parte del Campo Volcánico Monogenético de Chichinautzin (CVCh). El Sistema de Fallas de Tenango (SFT) presenta históricamente actividad sismogénica, ya que Norini *et al.* (2006) muestra que ocurrieron dos eventos de fallamiento, el primer evento de fallamiento ocurrió entre 10, 585 años y 6045 años y el segundo de menos de 6000 años, esto con base en fechamientos geocronológicos de secuencias piroclásticas y depósitos epiclásticos que fueron desplazados verticalmente por las fallas de Tenango. Otro evento sísmico registrado ocurrió como tipo enjambre sísmico entre el 18 al 31 de agosto de 1980, con 29 temblores en el rango de 2.2 a 3.5 de magnitud (M_L) (Yamamoto y Mota, 1988); este evento lo vuelven a analizar Campos-Enríquez *et al.* (2015) considerando que fueron magnitudes de 2.7 a 3.5 M_c con una orientación E-W, y determinando que las fallas que se activaron son continuidad del sistema de fallas de Aztlán en la Sierra de Chichinautzin. La Cuenca del Valle de Toluca se ha considerado vulnerable ante la actividad del SFT esto debido los depósitos sedimentarios de origen lacustre en la estratigrafía de la cuenca (Norini *et al.*, 2006; Olivares Sánchez, 2020). Se han realizado estudios de vulnerabilidad y análisis de efectos de sitio en la ciudad de Toluca ante la posible afectación de un terremoto (Ordaz Hernández *et al.*, 2020).

En el terremoto de 19 de septiembre de 2017 varios poblados de los municipios ubicados en la parte sur del Estado de México fueron afectados. Las zonas más afectadas fueron aquellas ubicadas en la región de influencia del Sistema de Fallas de Tenango en su parte Norte y parte Sur. Los daños en las construcciones fueron variados desde fracturamiento

parcial hasta colapso total de las estructuras habitacionales (Figura 14) y estos daños estuvieron ligados con la dirección de la activación de fallas geológicas, así como condiciones geotécnicas del terreno (Angeles-Moreno, *et al.*, 2021). La organización de las brigadas de apoyo enseguida del terremoto estuvo organizada por delegados y vecinos de las poblaciones afectadas como el caso de San Miguel Tecamatlán en el municipio de Tenancingo en sur del estado de México (Figura 14), se observó la solidaridad entre personas de la comunidad y también en la llegada de ayuda externa de parte de organizaciones civiles, instituciones educativas, comunidades vecinas, y más tarde del municipio. Se observó al final la necesidad de contar con planes de contingencia a escala local y planes de acción en relación con la gestión del riesgo, y lo adecuado de contar con sistemas de alerta temprana ante terremotos y brigadas preparadas para la acción ante el riesgo sísmico.



Figura 14. Daños a construcciones por el terremoto de 19 de septiembre de 2017. A, casa dañada por terremoto en San Miguel Tecamatlán, municipio de Tenancingo. B, organización, acción comunitaria y de apoyo externo en San Miguel Tecamatlán enseguida de sismo de 19 de septiembre de 2017. C, medición de grietas de extensión en zonas propensas a deslizamiento por terremoto. D, efectos del terremoto en casas de San Miguel Tecamatlán.

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Los sistemas de fallas geológicas del centro-sur de México (Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes, fallas de Sierras y Cuencas (*Basin and Range*), fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y fallas de la Faja Volcánica Transmexicana) tienen un papel importante cuando se localizan en poblaciones y ciudades, ya que definen directa o indirectamente riesgos socionaturales y socio-geológicos, como la influencia de las fallas geológicas en la contaminación del agua subterránea por arsénico y flúor en cuencas hidrológicas, controles en flujos de detritos a lo largo de las fallas San Antonio y San Miguel, controles estructurales en las fallas de subsidencia hídrica en Toluca, y por último la presencia de terremotos en fallas geológicas sísmicamente activas como el sistema de fallas de Tenango. Los planes de gestión de riesgo en las comunidades deben considerar la ubicación y la naturaleza de estos sistemas de fallas geológicas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen las observaciones realizadas por los investigadores revisores y a los editores de la revista que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Conflictos de intereses

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

Alaniz-Álvarez, S.A. y Nieto-Samaniego, A.F. (2005b). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, 57, 1, 65-82. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a4>

Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, A.C., & Vasallo, L.F. (2001). Estratigrafía y Deformación Extensional en la región de San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (18)2, 129-148. <https://rmcg.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/990>.

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo, L. F., & Xu, S. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-eocénica del Centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29. <https://doi.org/10.18268/bsgm2002v55n1a2>

Alaniz-Álvarez, S.A., y Nieto-Samaniego, A.F. (2005a). Prefacio, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), i-ii. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1p1>

Almazán Vázquez, A.R. (2017). Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio morfoestructural (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/108983>

Angeles-Moreno, E., Cabadas-Báez, H.V., Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M.J., Almazán-Vázquez, A.R. & Guerrero-Jacinto, Z. (2021). Características geológico-estructurales de grietas en construcciones habitacionales ante diversos riesgos geológicos, casos de la ciudad de Toluca y San Miguel Tecmatlán: implicaciones en la interacción suelo-estructura. En *Actas de la XXI Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica* (pp. 35-44), RNPIG. https://www.researchgate.net/publication/351366732_Caracteristicas_geologico-estructurales_de_grietas_en_construcciones_habitacionales_ante_diversos_riesgos_geologicos_casos_de_la_ciudad_de_Toluca_y_San_Miguel_Tecomatlan_implicaciones_en_la_interaccio

Aranda-Gómez, J.J. Henry, C.D., Luhr, J.F. y McDowell, F.W. (1997). Cenozoic volcanism and tectonics in NW Mexico – a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces. En Aguirre-Díaz, G.J., Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., y Ferrari, L. (editors). *Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico – a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions: Mexico*, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursión 11, 41-84. <http://www.biblioteca.juriquilla.unam.mx:8080/jspui/handle/123456789/1559>

Aranda-Gómez, J.J., Luhr, J.F., Housh, T.B., Valdez-Moreno, G., y Chávez-Cabello, G. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico Tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187-225. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a1>

Ballesteros-Cánovas, J.A., Kariya, Y., Imaizumi, F., Manchado, A., Nishii, R., Matsuoka, N., Stoffel, M. (2023). Debris-flow activity in the Japanese Alps is controlled by extreme precipitation and ENSO – Evidence from multi-centennial tree-ring records. *Global and Planetary Change*. 231,104296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104296>.

Baró Suárez, J.E. Díaz Sánchez, S.R. y Garatachia Ramírez, J.C. (2018). Capítulo I Marco conceptual para el estudio de los riesgos socionaturales en: Baró Suárez, J.E. y Monroy Gaytan, F. (Coordinadores), *Enfrentando los riesgos socionaturales* (Series Geografía, Págs. 15-35) CONACyT. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/95387>

Beltrán-Martínez, B.C. (2023). *Geología y Estructura de la Cuenca Alta del Río Laja y su influencia en la presencia de Arsénico y Flúor en Agua Subterránea*. (Tesis de Maestría), Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

Beltrán-Martínez, B.C., Loza-Aguirre, I., Li, Y., Miranda-Avilés, R., Nieto- Samaniego, A.F., Angeles-Moreno, E., Kshirsagar, P.V., Puy y Alquiza, M.J., & Hernández-Anguiano, J.H. (2023). Geological Map of the Upper Laja River Basin, Guanajuato, México. *Terra Digitalis*,

7(2), 1-18.

https://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/104

Campos-Enríquez, J.O. Lermo-Samaniego, J. F., Antayhua-Vera, Y. T., Chavacán, M. & Ramón-Márquez, V. M. (2015). The Aztlán Fault System: control on the emplacement of the Chichinautzin Range volcanism, southern Mexico Basin, Mexico. Seismic and gravity characterization. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 315-335. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000200014&lng=es&tlng=en.

Campos-Vargas, Milagros; Toscana-Aparicio, Alejandra; Campos Alanís, Juan. (2015). Riesgos socionaturales: vulnerabilidad socioeconómica, justicia ambiental y justicia espacial. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, vol. 24, núm. 2, pp. 53-69 Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia.
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/40243>

Collados-Lara, A., Pulido-Velázquez, D., Mateos, R. M., & Ezquerro, P. (2020). Potential impacts of future climate change scenarios on ground subsidence. *Water*, 12(1), 219.
<https://doi.org/10.3390/w12010219>

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua (2002). *Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero Valle de Toluca, Estado de México. Toluca, Estado de México*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Unidad de Comunicación Social de la Comisión Nacional del Agua.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103132/DR_1501.pdf

CONAGUA, 2005. *Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos*. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, México. 48 p.
<https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sistema-cutzamala.pdf>

Escalona-Alcázar, F.J., García-Paniagua, E., Pineda-Martínez, L.F., Rodríguez-González, B., Reveles-Flores, S.M.T., Valle-Rodríguez, S. (2024). Basement structural control in urban fracturing, a case study in Zacatecas, Mexico, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4915450/v1>.

Esteller, M. V. & Díaz-Delgado, C. (2002). Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico. *Environmental Management*, 29(2), 266-278. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0024-0>

Faunt, C. C., Sneed, M., Traum, J. A., & Brandt, J. T. (2015). Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 675-684. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. y Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen conmemorativo del centenario, Temas selectos de la geología mexicana, 57(3), 343-378. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>

Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & 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-González, M. T., Escalona-Alcázar, F.J., Bluhm-Gutiérrez, J., Valle-Rodríguez, S., Huerta-García, J., Pineda-Martínez, L.F., Rodríguez González, B., de Lira-Gómez, P., Reveles-Flores S.M.T. (2019). Identificación de peligros naturales a partir de la cartografía geológica y perfiles de georadar en la Unidad Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas. *GEOS*, Vol. 38., No.2. 1-17. <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/28>

Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge, Cambridge University Press.

García-Palomo, A., Macías, J. L., & Garduño, V. H. (2000). Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca Volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics*, 318(1-4), 281-302. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00316-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00316-9)

García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(1), 158-178. Recuperado en 28 de enero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742008000100010&lng=es&tlng=es

Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., & 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. <https://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/999>

Henry, C. D., & Aranda-Gómez, J. (1992). The real Southern Basin and Range: mid- to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology*, 20(8), 701. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020)

Henry, C. D., & Aranda-Gómez, J. J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and basin and range extension in the southern basin and range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00304-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00304-2)

Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., ... & Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.

Istrade-Alcántara, I., y Garduño-Monroy, V.H. (1999). Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (Central Western

México). in Cabrera, L., Saez, A. (eds.), Ancient and Recent Lacustrine Systems in Convergent Margins: *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151(1–3), 209–227.

Johnson, C.A., y Harrison, C.G.A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(2–4), 187–210. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90037-X)

Knappett, P. S., Li, Y., Loza, I., Hernández, H., Avilés, M., Haaf, D., Majumder, S., Huang, Y., Lynch, B., Piña, V., Wang, J., Winkel, L. H. E., Mahlknecht, J., Datta, S., Thurston, W., Terrell, D., & Nordstrom, D. K. (2020). Rising arsenic concentrations from dewatering a geothermally influenced aquifer in central Mexico. *Water Research*, 185, 116257. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116257>

Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Ortega-Obregón, C. (2012). Cenozoic Volcanism and Extension in northwestern Mesa Central, Durango, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 243–263. <https://doi.org/10.18268/bsgm2012v64n2a9>

Mendoza A.E. (1999). *Diagnóstico de la calidad del agua potable en las zonas urbanas del Estado de Guanajuato*. (Tesis Maestría, Maestría en Protección y Conservación Ambiental, Universidad Iberoamericana León). Consultado en <https://biblioteca.iberoleon.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=36257>

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2005). La Mesa Central de México: Estratigrafía, estructura y evolución Tectónica Cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 57(3), 285–318. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a3>

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Labarthe-Hernández, G. (1997). La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(1), 13–25. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-mexicana-de-ciencias-geologicas/articulo/la-deformacion-cenozoica-poslaramidica-en-la-parte-meridional-de-la-mesa-central-mexico>

Nieto-Samaniego, Á. F., Barajas-Gea, C. I., Gómez-González, J. M., Rojas, A., Alaniz-Álvarez, S. A., & Xu, S. (2012). Geología, evolución estructural (Eoceno al actual) y eventos sísmicos del Graben de Santiaguillo, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 115-130. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v29n1/v29n1a8.pdf>

Nieto-Samaniego, Á. F., Del Pilar-Martínez, A., Suárez-Arias, A. M., Ángeles-Moreno, E., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., Xu, S., Olmos-Moya, M. J.P., & Báez-López, J. A. (2023). Una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas de la Mesa Central de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 40(2), 187-213. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.2.1736>

Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental Volcanic Province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. 111(3), 347-363. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111)

Norini, G., Groppelli, G., Lagmay, A. M. F., & Capra, L. (2006). Recent left-oblique slip faulting in the central eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: seismic hazard and geodynamic implications. *Tectonics*, 25(4). <https://doi.org/10.1029/2005tc001877>

Ochoa-González, G. H., Carreón-Freyre, D., Franceschini, A., Cerca, M., & Teatini, P. (2018). Overexploitation of groundwater resources in the faulted basin of Querétaro, Mexico: a 3D deformation and stress analysis. *Engineering Geology*, 245, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.014>

Olivares Sánchez, R.A. (2020). *Geología Ambiental y Peligros Geológicos a lo largo de las Fallas de Tenango, Estado de México*. (Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México). <http://hdl.handle.net/20.500.11799/109023>

Ordaz Hernández, A., Esquivel Arzate, R. K., Hernández Santana, J. R., & Cabadas Báez, H. V. (2019). Susceptibilidad a desprendimientos de rocas en la urbanización La Teresona-

Zopilocalco Norte, Toluca: premisas para el desarrollo comunitario. *Investigaciones Geográficas*, (99). <https://doi.org/10.14350/rig.59888>

Ordaz Hernández, A., Hernández Millán, J. A., & Garatachia Ramírez, J. C. (2020). Aproximación cartográfica a la vulnerabilidad estructural ante sismos empleando una metodología cualitativa: aplicación para la Ciudad de Toluca. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 178–198. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9340>

Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeno-De-Leon, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>

Piña-González, V., Miranda-Avilés, R., Hernández-Anguiano, J. H., Knappett, P. S., Morales-Martinez, J. L., Puy Alquiza, M.D.J., Naves, A., Bian, J., Liu, J., Ramírez-González, L. M., Navarro-Céspedes, J. M. & Li, Y. (2022). Influence of geological faults on dissolved arsenic concentrations in an overexploited aquifer with shallow geothermal heat. *Applied Geochemistry*, 144, 105395. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105395>

Rodríguez, R., Lira, J., & Rodríguez, I. (2012). Subsidence risk due to groundwater extraction in urban areas using fractal analysis of satellite images. *Geofísica internacional*. 51(2), 157-167. Recuperado en 28 de enero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692012000200005&lng=es&tlng=en.

Rodríguez-Campero, C., Gárfias, J., Martel, R., & Navarro, I. (2023). Factores geológicos e hidrogeológicos asociados a las fracturas en la cuenca del Valle de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75(1), A251122. <https://doi.org/10.18268/bsgm2023v75n1a251122>

- Rodríguez-Castillo, R. & Rodríguez-Velázquez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a10>
- Silva-Romo, G. (1993). *Estudio de la estratigrafía y estructuras tectónicas de la Sierra de Salinas, edos. de S.L.P. y Zac.* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México) Instituto de Geología, México, D.F. <https://ru.dgb.unam.mx/jspui/handle/20.500.14330/TES01000198541>
- SOP, Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes (2009). *Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG)*. <https://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/mapa.asp>
- Spielmann, R., Aaron, J. (2024). A new method for detailed discharge and volume measurements of debris flows based on high-frequency 3D LiDAR point clouds; Illgraben, Switzerland. *Engineering Geology*, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107386>.
- Torres-Álvarez, C.R., 2017-2018. Efectos de Sitio del sismo de 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, *Revista Geotecnia*, Año 7, Núm. 246. Págs.18-22. <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-246.pdf>
- UNISDR (2009), Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastre, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés UNISDR) Suiza. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Wang, X., Frattini, P., Stead, D., Sun, J., Liu, H., Valagussa, A., & Li, L. (2020). Dynamic rockfall risk analysis. *Engineering Geology*, 272, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105622>.
- Wei, R., Zeng, Q., Davies, T., Yuan, G., Wang, K., Xue, X., Yin, Q. (2018). Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully, SE Tibetan Plateau and implications

to hazard monitoring. *Engineering Geology*, 233 (172-182).
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.013>.

Whitbread, K., Thomas, C., & Finlayson, A. (2024). The influence of bedrock faulting and fracturing on sediment availability and Quaternary slope systems, Talla, Southern Uplands, Scotland, UK. *Proceedings of the Geologists' Association*, 135, 61-77.
<https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2023.11.003>

Xia, X., Jarsve, K.T., Dijkstra, T., Liang, Q., Meng, X., Guan Chen, G. (2023). An integrated hydrodynamic model for runoff-generated debris flows with novel formulation of bed erosion and deposition. *Engineering Geology*, 326, 107310.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107310>.

Yamamoto, J., & Mota, R. (1988). La secuencia de temblores del Valle de Toluca, México de agosto 1980. *Geofísica Internacional*, 27(2), 279–298.
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1988.27.2.787>