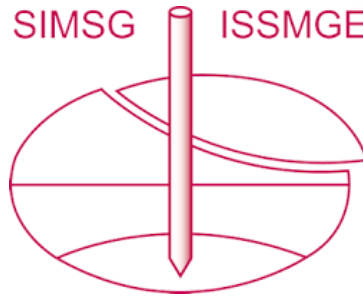


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Estimación de la velocidad del hundimiento diferencial en el Municipio de Irapuato, Gto; México

Norma Liliana CRUZ ORTIZ^{a,1}, María Alejandra RIVERA TRASGALLO^a,
José de Jesús TORRES GARCÍA^a y Norma Claudia CALDERÓN ROSAS^a
^a CIATEC, A.C.

Resumen. Las manifestaciones de hundimientos diferenciales derivados de la subsidencia han sido reportadas en las últimas décadas en el territorio central de México, generando afectaciones tanto a la infraestructura como a la calidad de vida de sus habitantes; tal como es el caso del Municipio de Irapuato en Guanajuato; en el cual se identifican evidencias desde finales de los 80, lo que le ha permitido ser un caso de estudio. La geología, sobreexplotación del acuífero, incremento poblacional y agricultura son algunas de las variables que influyen en la manifestación en superficie de las estructuras geológicas sepultadas que quedan expuestas en forma de grietas de tensión y fallas en la superficie. En el presente trabajo se analizan algunas variables para estimar el hundimiento en zonas específicas del territorio de Irapuato donde han sido localizados agrietamientos y desplazamientos verticales que han afectado la infraestructura civil. Con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica, se realiza el análisis y abatimiento de los niveles estáticos del acuífero Irapuato-Valle, y con ello; se define el grado de vulnerabilidad de la población y los sistemas expuestos ante este fenómeno. Se ha encontrado que en función de la piezometría y los hundimientos superficiales reportados por un mismo periodo, se define una tasa de 2 a 3 centímetros de desplazamiento vertical por cada metro que se abate el acuífero. Así mismo, se realiza un análisis de la vigencia de esta estimación en función de las variables analizadas.

Palabras Clave. Subsidencia, Irapuato, hundimientos diferenciales.

1. Introducción

México es un país en crecimiento y ha generado el desarrollo de polos urbanos con incremento de la actividad industrial y social en varios puntos del territorio, generando el uso de recursos naturales en todos los sentidos que han apoyado a su construcción. El estado de Guanajuato se ha convertido en uno de los puntos con mayor interés industrial por parte de empresas nacionales y extranjeras con un incremento poblacional importante en varios de sus municipios como son León, Irapuato, Celaya, Salamanca, Silao y Guanajuato capital.

¹ Departamento de Soluciones Tecnológicas, Correo: ncruz@ciatec.mx (Norma Liliana Cruz Ortiz); arivera@ciatec.mx (María Alejandra Rivera Trasgallo); jgarcia@ciatec.mx (José de Jesús Torres García); ncalderon@ciatec.mx (Norma Claudia Calderón Rosas).

En las últimas décadas muchas zonas urbanas en el centro de México han sido afectadas por hundimientos diferenciales del suelo y ocurren en ciudades como son Morelia, Aguascalientes, Celaya, Irapuato, Querétaro, Salamanca, etc., y afectan a sectores de distintos estratos sociales, a zonas industriales, hospitales, colonias de escasos recursos y zonas residenciales. Todas estas ciudades tienen como característica común haber sido construidas en antiguas cuencas lacustres configuradas por un fallamiento regional [1], [2].

2. Antecedentes

Los hundimientos se habían ligado solamente a la sobreexplotación de acuíferos, y en el año 2001 estos procesos fueron reportados por varios autores [1], la mecánica que da lugar a esos fallamientos implica la conjunción de una serie de elementos, entre ellos la presencia de fallas geológicas previas que controlaron el depósito de sedimentos lacustres y fluviolacustres, así como la ocurrencia de subsidencia debida generalmente a sobreexplotación de los sistemas acuíferos, lo que da lugar a una deformación lenta, continua y asísmica. Estos elementos interactúan entre sí ocasionando lo que se denomina un proceso de subsidencia [2]. Además, el rápido descenso de los niveles de los acuíferos induce la compactación, fracturamiento y fallamiento [3], [4] y [5].

En la región de Celaya, Guanajuato, la información geológica e hidrológica analizada indica que el proceso que origina los hundimientos y agrietamientos es complejo, y que las condiciones de un área tectónicamente activa, ubicada en la zona de alta sismicidad del país y con manifestaciones de agua termal con temperaturas mayores a los 40°C, deben tener gran influencia en el proceso [3].

La subsidencia en el Municipio de Irapuato fue reportada desde inicios de los 70s, en la década de los 80s fue donde se manifestaron en mayor proporción las fallas y grietas, afectando edificios, vialidades, pavimentos e infraestructura urbana. El primer mapeo de las fallas y grietas de tensión fue realizado en el año 2001 por FOSEG en el Atlas de Riesgos de Guanajuato [6], que de acuerdo al documento "Diagnostico de Peligros e Identificación e Desastres Naturales en México" [7] se coincide con la denuncia de los hundimientos regionales y locales, acompañados de agrietamientos del terreno natural en varios estados de la República Mexicana.

De acuerdo a las fallas reportadas por varios autores las fallas tienen una dirección preferencial al Noreste y se ubican en gran parte en la zona Sureste del Municipio de Irapuato [8], [9] y [10]. Por su parte Rodríguez Castillo [9] menciona que la velocidad de subsidencia observada va de 6 a 7 centímetros por año en la parte urbana del territorio. Trujillo Candelaria [6] menciona que en lo observado en 24 años (de 1986 a 2010) se tiene un descenso del nivel estático de 60 metros, lo que equivale a un promedio de 2.5 metros por año (en el acuífero), lo que ha generado una manifestación en superficie como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Casa habitación afectada por el fallamiento activo de la Ciudad de Irapuato.

El proceso de subsidencia suele presentar las siguientes tres etapas o fases:

- a) La primera etapa consiste en un hundimiento de la superficie, el cual es conocido como subsidencia, que se debe usualmente a la sobreexplotación de los acuíferos. Esta sobreexplotación abate los niveles freáticos, lo que causa una reducción de la presión del agua de poro que es transferida a la fase sólida de los sedimentos lacustres y fluviolacustres del acuífero, ocasionando a su vez una reducción del volumen de espacios vacíos de los sedimentos y por consiguiente una reducción de su espesor, el cual tiende a consolidarse. Esto es lo que se denomina consolidación primaria [2].
- b) Al hundimiento generado por la subsidencia, en la segunda etapa se suma otro, que es lento, continuo a través del tiempo y asísmico que se denomina creep, y que es resultado de la consolidación secundaria de los sedimentos. Esta consolidación secundaria suele ser menos significativa que la primaria. En esta segunda etapa se forma también una o más grietas de tensión a lo largo de la prolongación dentro de los sedimentos de los planos de las fallas geológicas preexistentes en el basamento rocoso [2].
- c) En la última etapa puede ocurrir un hundimiento diferencial en ambos lados de la grieta de tensión formada en la segunda etapa, de tal manera que uno de los lados se hunde más que el otro dando lugar a una geometría de falla normal que tiende a reproducir la geometría del basamento rocoso que la subyace. Puede formarse así un bloque alto y un bloque bajo a ambos lados de la grieta. Este hundimiento diferencial es el principal responsable de los daños observados en las construcciones de Morelia [2].

3. Metodología

La metodología que se siguió fueron recorridos de campo en todo el municipio para la identificación de las fallas o estructuras reportadas por otros autores además de que con la asesoría de personal de Protección Civil se visitaron sitios que recientemente habían

tenido algún reporte a esta oficina; se obtuvieron datos como las coordenadas del punto visitado (UTM), Altura (m.s.n.m.), nombre de la Falla, Desplazamiento Vertical (estimado en metros) y Abertura (observada en superficie, metros).

Posteriormente se trabajó con los Sistemas de Información Geográfica y el software ArcGis para su representación y poder identificar las colonias o zonas mayormente afectables por este fenómeno, cabe mencionar que se hizo la correlación entre las fallas reportadas de otros autores y las ubicadas en este trabajo, coincidiendo y en algunos casos extendiendo el trazo de la falla.

4. Resultados

Con los métodos antes mencionados se obtuvo la Tabla 1 en la cual se pueden observar los 29 puntos verificados de las fallas en el Municipio de Irapuato, en la columna de desplazamiento vertical son los metros que se observan de diferencia entre el piso y el techo de la falla, en la mayoría de los casos se tiene una abertura entre cada uno de estos bloques.

Tabla 1. Puntos de verificación de las fallas en la Ciudad de Irapuato.

No.	Coordenadas		Altura	Falla	Desplazamiento	Abertura (m)
	E	N	msnm		vertical (m)	
1	254916	2286076	1721	Deportiva Sur	0.4	--
2	256080	2286421	1721	Esperanza	1.0	5.0
3	256332	2286651	1724	Puente de Guadalupe	0.3	1.0
4	256248	2284614	1723	Floresta	0.6	3.0
5	256571	2285924	1724	Floresta	0.3	0.5
6	257063	2287421	1725	Las Fresas	0.2	2.0
7	256843	2287433	1731	Las Fresas	0.3	--
8	253690	2289354	1736	Paseo Irapuato	0.8	1.5
9	253737	2289396	1737	Paseo Irapuato	0.5	2.0
10	258623	2286550	1728	Los Olivos	0.4	0.5
11	257119	2287160	1727	Parque Hidalgo	0.6	1.0
12	257266	2286302	1725	Parque Hidalgo	0.4	1.0
13	257333	2286143	1725	Parque Hidalgo	0.6	1.5
14	256839	2285447	1724	Parque Hidalgo	0.5	1.5
15	257136	2286903	1731	Parque Hidalgo	0.6	--
16	256601	2288813	1740	Plan Guanajuato	0.2	0.5
17	250879	2286597	1726	Plan Vivirá	0.2	1.0
18	255565	2290797	1741	Pradera	1.0	2.0
19	256113	2286095	1721	Puente de Guadalupe	0.5	2.0
20	256101	2286072	1721	Puente de Guadalupe	0.4	2.0
21	256109	2286612	1725	Esperanza	0.5	2.0
22	256222	2286959	1722	Puente de Guadalupe	3.0	3.0
23	256273	2287039	1724	Puente de Guadalupe	1.6	1.5
24	257805	2288474	1731	Puente de Guadalupe	3.0	4.0
25	257814	2288467	1734	Puente de Guadalupe	3.0	4.0
26	257840	2288519	1732	Puente de Guadalupe	3.0	4.0
27	257881	2288588	1734	Puente de Guadalupe	3.0	4.0
28	256777	2287542	1731	Puente de Guadalupe	0.6	1.5
29	260259	2285782	1725	El Trébol	0.3	1.0

Con el software de ArcGis se elaboraron los mapas como se observa en la Figura 2, donde se identifican los puntos verificados en la zona urbana de Irapuato y las fallas reportadas por Trujillo-Candelaria se identifican en líneas de color rojo.

Las condiciones del acuífero de Irapuato en la actualidad son de déficit y se encuentra comprometido el abasto a la población en algunos años ya que los niveles que se pueden alcanzar pueden ser críticos. Carreón-Freyre [11] hace una comparativa de la época de secas y lluvias en los años 2005 y 2011 en la que se observan las zonas de mayor abatimiento del nivel freático en la ciudad, a fin de generar una correlación entre los sistemas de fallas, abatimientos y ubicación de pozos. Del análisis comparativo, se retoma la ubicación de los sistemas de fallas y la extracción de agua subterránea ya que con su relación indirecta con la subsidencia del terreno se puede inferir que las zonas de mayor hundimiento o desplazamiento vertical se localizan están en donde los abatimientos del nivel freático están ocurriendo y se realizó una proyección a 2040 para conocer las futuras manifestaciones de propagación de las fracturas o fallamiento activo en el municipio de Irapuato.

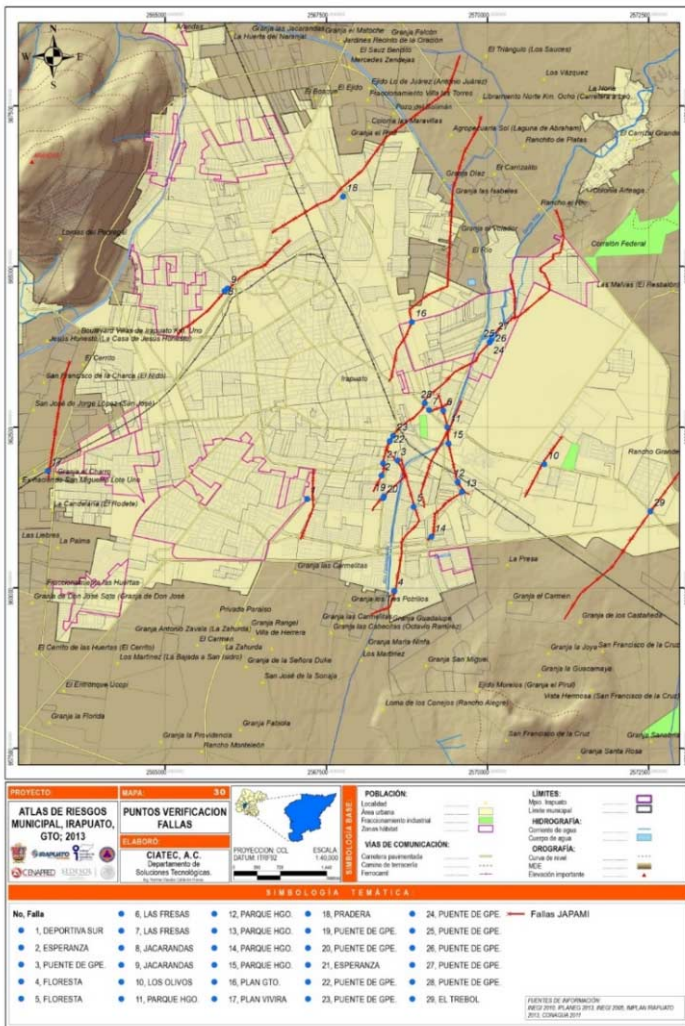


Figura 2. Mapa donde se ubican los puntos de verificación de las fallas en la Ciudad de Irapuato.

En la Figura 3 muestra las condiciones del acuífero que se presentarían en el año 2040 en una proyección de las condiciones actuales. Dentro de la ciudad de Irapuato los abatimientos proyectados van del orden de los -5 a los -40 metros de acuerdo al nivel actual y en este punto cabe mencionar que estas cifras son estimadas y que se deberán hacer más estudios complementarios como son de mecánica de suelos, así como continuar con el monitoreo de las fallas y de los sondeos a mayor profundidad ya que como se menciona en la geología los estratos son grandes paquetes sedimentarios que pueden alcanzar las decenas de metros por debajo de la superficie del terreno.

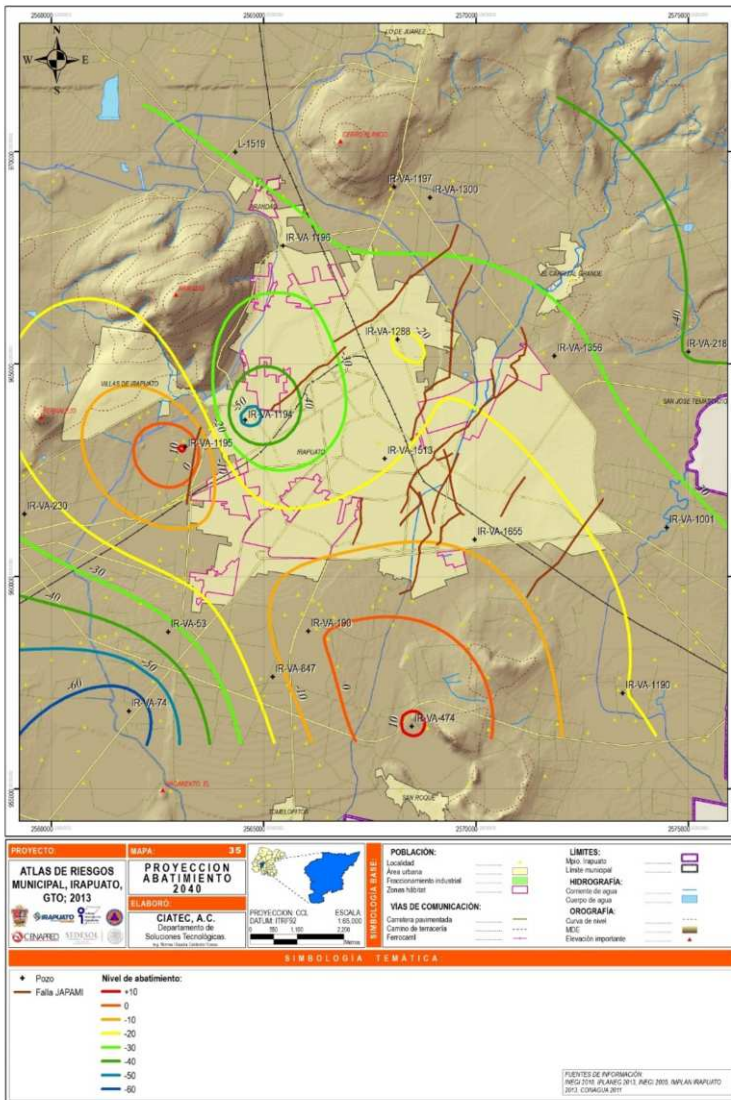


Figura 3. Mapa de proyección de abatimiento del acuífero de Irapuato para el año 2040 en la Ciudad de Irapuato, Gto.

Como se mencionó anteriormente Trujillo Candelaria [6] reportó 60 metros de abatimiento en el Acuífero de Irapuato-Valle en un período de 24 años, lo que da un abatimiento anual de

$$\Delta h_{ac} = 2.5 \text{ m/año}$$

Rodríguez Castillo [9] reportó un hundimiento superficial del terreno de 2 metros en un período de tiempo de 10 años y que el promedio de la velocidad de hundimiento es de 6 a 7 centímetros por año

$$\Delta h_{sup} = 6.5 \text{ cm/año}$$

Entonces si en un año se abate el acuífero 2.5 m y en superficie en promedio se hunde 6.5 cm, la relación que se encuentra es:

1 m de abatimiento en el acuífero es igual a 3 cm (2.6 cm) de hundimiento en superficie.

Nota: estos valores fueron calculados con las condiciones de extracción actuales y si estas cambian, los valores se podrán modificar de acuerdo a las modificaciones realizadas.

Para tener un mayor entendimiento de la distribución de las fallas en relación a su desplazamiento vertical; se propone una clasificación de tres niveles de fallamiento, conforme la Tabla 2, donde en Amarillo se tiene nivel bajo que oscila un desplazamiento vertical de 0.0 a 0.5 metros; en naranja es nivel intermedio y representa un rango de 0.6 a 1.0 metros de desplazamiento; y finalmente en rojo y nivel alto que significa un desplazamiento vertical de 1.1 a 4.0 metros.

Tabla 2. Clasificación de los desplazamientos verticales de las fallas en la Ciudad de Irapuato.

Nivel	Color	Desplazamiento Vertical (m)	Falla Representativa
1 Bajo	Amarillo	0 a 0.5	Deportiva Sur
2 Intermedio	Naranja	0.6 a 1.0	Jacarandas
3 Alto	Rojo	1.1 a 4.0	Puente de Guadalupe

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de las fallas de acuerdo a la clasificación antes mencionada; como se observa, las fallas de nivel bajo se ubican aisladas unas de otras, por lo que podría considerarse secundarias o escalonadas de las principales; las fallas de nivel intermedio se encuentran una cerca de la otra a excepción del sistema Paseo Irapuato (Jacarandas) y Pradera, que tienen la misma orientación. La única falla que tiene el nivel 3 (alto) es la que ha representado mayores afectaciones a la infraestructura de la ciudad, no solo por su desplazamiento vertical, sino también por su longitud que casi alcanza los 6 kilómetros de sur a noreste.

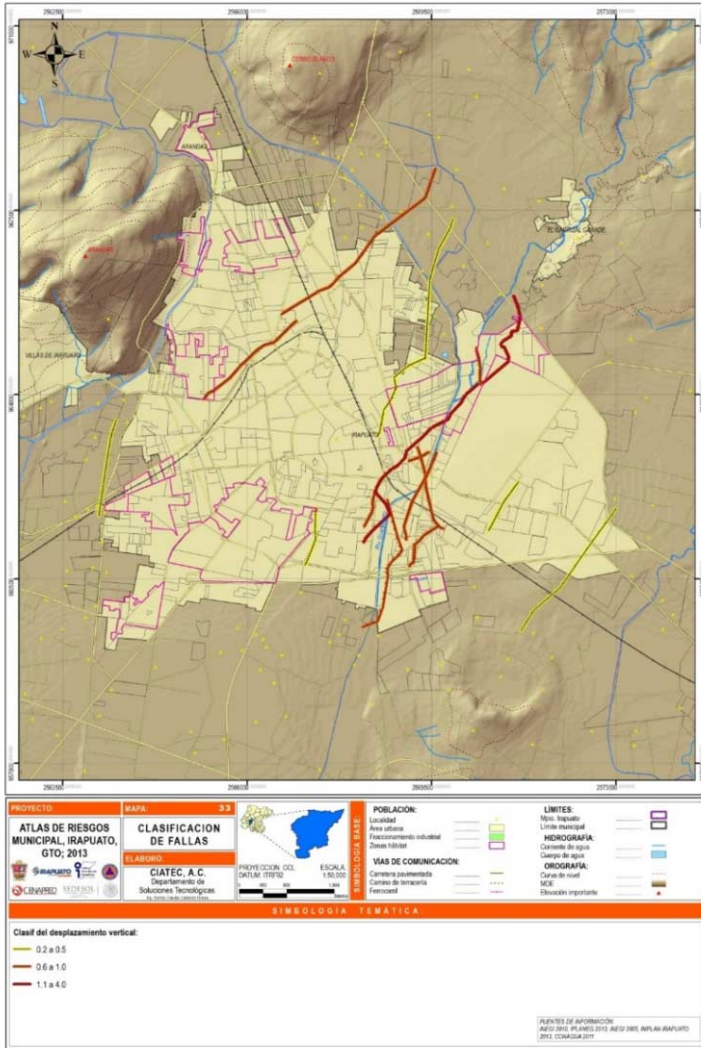


Figura 4. Mapa de clasificación de las fallas de acuerdo al desplazamiento vertical.

5. Conclusiones

El municipio de Irapuato se encuentra ubicado en una zona donde la subsidencia es un fenómeno frecuente, debido a todos los materiales del subsuelo ocurridos en la historia geológica por lo que no es un fenómeno que se pueda detener en un futuro cercano.

De seguir con las condiciones actuales de extracción de agua subterránea en el municipio de Irapuato se presentarán problemas por subsidencia cada vez mayores, afectando población e infraestructura pública y privada.

En la actualidad se tiene 1 m de abatimiento del acuífero que representa 3 cm de hundimiento en superficie, la cual variaría según las condiciones del terreno y de las

condiciones de extracción del acuífero, que con el paso de los años los centímetros acumulados son de especial atención.

La tasa de hundimiento calculado es de 3 cm en superficie por cada metro de abatimiento en el acuífero.

Con el escenario antes expuesto, se considera que las fallas tienen un componente longitudinal que puede verse aumentado según las condiciones del medio, las autoridades deberán tomar acciones para minimizar y/o controlar los efectos del fallamiento en la infraestructura, así como para iniciar las medidas de mitigación de la subsidencia presente en Irapuato.

Hace falta realizar estudios geofísicos en las zonas de hundimientos en las que se puedan determinar condiciones de flujo de agua subterránea y que puedan corroborar la presencia de estructuras y los parámetros hidrogeológicos de la columna estratigráfica.

Para obtener tasas de hundimientos más cercanos a la realidad se deberá trabajar con espesores de unidades litológicas para reportar la Z de compresión en cada uno de los sectores o zonas de mayor subsidencia y poder estimar las zonas que ya llegaron a su máximo hundimiento, así como las zonas donde aún se puede esperar un asentamiento y daño de la infraestructura en la ciudad, así como la evidencia en superficie de las estructuras sepultadas.

Referencias

- [1] V. Garduño-Monroy, E. Arregue-Rocha, I. Israde-Alcántara y G. Rodríguez-Torres, «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*, vol. 18, n° 1, pp. 37-54, 2001.
- [2] J. A. Ávila-Olivera y V. H. Garduño-Monroy, «Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsidencia-Creep-Falla (PSCF) en la Ciudad de Morelia, Mich., México.» *Geoteremia*, vol. 19, n° 2, pp. 50-59, 2006.
- [3] R. Huizar-Álvarez, L. Mitre-Salazar, S. Marín-Córdova, J. Trujillo-Candelaria y J. Martínez-Reyes, «Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime.» *Geofísica Internacional*, vol. 50, n° 3, pp. 255-270, 2011.
- [4] D. Carreón-Freyre, M. Cerca, G. Ochoa-González, P. Teatini y F. Zuñiga, «Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico.» *Hydrogeology Journal*, vol. 24, pp. 657-674, 2016.
- [5] M. Hernandez-Marin, J. Pacheco-Martínez, T. Burbey, D. Carreón-Freyre, G. Ochoa-González, G. Campos-Moreno y P. Lira-Gómez, «Evaluation of subsurface infiltration and displacement in a subsidence-reactivated normal fault in the Aguascalientes Valley, Mexico.» *Environmental Earth Sciences Journal*, vol. 76, p. 812, 2017.
- [6] J. Trujillo-Candelaria, «Estudio del fallamiento de terrenos en el área urbana de Irapuato, Gto.» JAPAMI, 2010.
- [7] CENAPRED, Diagnóstico de Peligros e Identificación de Desastres Naturales en México., 1ra. ed., México: Secretaría de Gobernación., 2001.
- [8] R. Rodríguez-Castillo y I. Rodríguez-Velázquez, «Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. LVIII, n° 2, pp. 265-269, 2006.
- [9] R. Rodríguez Castillo y A. Schroeder Aguirre, «Structural control on the subsidence faults alignment in Irapuato Mexico.» *AQUA mundi*, pp. 45-49, 2010.
- [10] R. Rodríguez, J. Lira y I. Rodríguez, «Subsidence risk due to groundwater extraction in urban areas using fractal analysis of satellite images.» *Geofísica Internacional*, vol. 51, n° 2, pp. 157-167, 2012.
- [11] Carreón-Freyre, D.C.; Cruz-Ortiz, N.L.; Cerca-Martínez, L.M., «Impacto por la subsidencia en la Ciudad de Irapuato en el Estado de Guanajuato, ocasionada por la sobreexplotación de los mantos acuíferos.» 2013.
- [12] J. Pacheco-Martínez y J. Arzate-Flores, «Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México.» *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 24, n° 3, pp. 389-402, 2007.