

"2023, Año de Francisco I. Madero, Apóstol de la Democracia"

Saltillo, Coahuila de Zaragoza a 15 de julio de 2024
OFICIO NÚMERO: SEGOB/UTSG/272/2024

**C. FRANCISCO RODRÍGUEZ
P R E S E N T E.-**

De conformidad con lo dispuesto por los artículos 6° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 7° de la Constitución Política del Estado de Coahuila de Zaragoza y 99 de la Ley de Acceso a la Información Pública para el Estado de Coahuila de Zaragoza, me permito dar respuesta a su solicitud de acceso a la información, con número de folio **050098300014724**, realizada a la Secretaría de Gobierno en fecha **2 de julio de 2024**, en la que requiere lo siguiente:

CITO: "Solicito a Protección Civil información sobre reportes de niveles de subsidencia (hundimiento progresivo de las superficies) que hayan detectado en los municipios de La Laguna en los últimos 10 años o si existen zonas detectadas de riesgo en la región Laguna por temas de subsidencia, solicito en caso de tenerlas, detallar la ubicación de esas zonas"

Me permito hacer de su conocimiento, que en aras de la transparencia, y con fundamento en el artículo 97 de la Ley de Acceso a la Información Pública para el Estado de Coahuila de Zaragoza, se gestionó con la **Subsecretaría de Protección Civil**, la información solicitada, donde a manera de respuesta se informa lo siguiente:

CITO: "me permito informarle que la información que cuenta esta Subsecretaría sobre zonas de subsidencias corresponde a la desarrollada por el INEGI derivada de un estudio realizado en el año 2019 sobre detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales donde se contempla la región Laguna; se anexa PDF y link de publicación:

https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825188290.pdf

En virtud de lo anterior, le sugerimos dirigir su petición a la Dirección Municipal de Protección Civil de los municipios mencionados en el escrito."

Así mismo, me permito anexar documento del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, relacionado con Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales.

Sin otro particular por el momento, y esperando que la información proporcionada sea satisfactoria, me permito informarle que existe el Recurso de Revisión a que hacen mención los artículos 109, 110, 111, 112, 113, 114 y demás relativos de la Ley de Acceso a la Información para el Estado de Coahuila de Zaragoza.

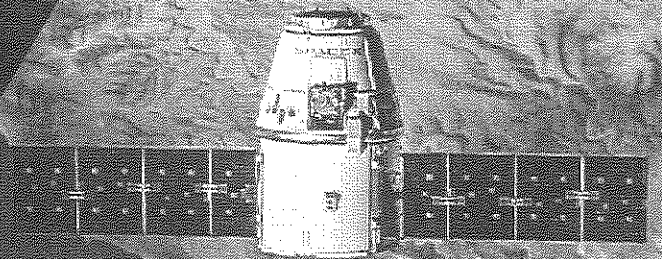
"ATENTAMENTE"

**LIC. JORGE ALEJANDRO SÁNCHEZ DE VALLE
TITULAR DE LA UNIDAD DE TRANSPARENCIA
DE LA SECRETARÍA DE GOBIERNO**

C.c. p. Archivo



Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales



Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**Detección de zonas de subsidencia
en México con técnicas satelitales**



Obras complementarias publicadas por el INEGI sobre el tema:

Estudio de los hundimientos por subsidencia en Aguascalientes con métodos satelitales. Reporte Técnico.

Catalogación en la fuente INEGI:

623.893

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México).

Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI, c2019.

xii, 17 p. : il.

ISBN 978-607-530-032-0.

1. Sistema de posicionamiento global - México. 2. Satélites artificiales en navegación - Metodología.

Conociendo México

01 800 111 4634

www.inegi.org.mx

atencion.usuarios@inegi.org.mx



INEGI Informa



@INEGI_INFORMA

DR © 2019, Instituto Nacional de Estadística y Geografía

Edificio Sede

Avenida Héroe de Nacozari Sur 2301

Fraccionamiento Jardines del Parque, 20276 Aguascalientes,

Aguascalientes, Aguascalientes, entre la calle INEGI,

Avenida del Lago y Avenida Paseo de las Garzas.

Presentación

La percepción remota desde plataformas satelitales ha tenido una impresionante evolución en los últimos años, con una creciente cantidad de sensores para diversas aplicaciones; proporcionando cada vez imágenes con mayor detalle, con una cobertura más completa de toda la Tierra y con mayor accesibilidad para los usuarios. El estudio de la forma de la Tierra y de los fenómenos físicos que ocurren en su superficie es uno de los campos de la geografía que más han sido beneficiados por esta creciente disponibilidad de datos de diferentes técnicas satelitales.

Desde décadas atrás se ha contado con herramientas como la fotogrametría para describir el relieve; sin embargo, la cuantificación de los cambios o deformaciones de la superficie, que con el tiempo van modificando el relieve, se realizaba solo mediante observaciones aisladas utilizando técnicas topográficas o geodésicas. Actualmente, además de proporcionar nuevas alternativas para producir modelos digitales de elevación para representar el relieve, las técnicas satelitales a través de las imágenes de radar de apertura sintética han facilitado el estudio a detalle de las deformaciones que ocurren en el suelo debido a diferentes fenómenos. Uno de tales fenómenos es la subsidencia, que consiste en el hundimiento paulatino de la superficie del suelo, lo que provoca el agrietamiento del suelo, y que está relacionado principalmente a actividades de minería o a la extracción de líquidos del subsuelo.

En este documento se presentan los resultados de la estimación de los hundimientos que afectan a diferentes regiones en el país y que estarían asociados al fenómeno de subsidencia. El insumo principal de estos estudios fueron las imágenes del sensor satelital Sentinel-1¹, con las que se aplicaron técnicas de interferometría SAR para los cálculos.

¹ Las imágenes Sentinel-1 son proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del programa Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>).

Instituciones que proporcionaron información

European Space Agency
Nevada Geodetic Laboratory

Siglas

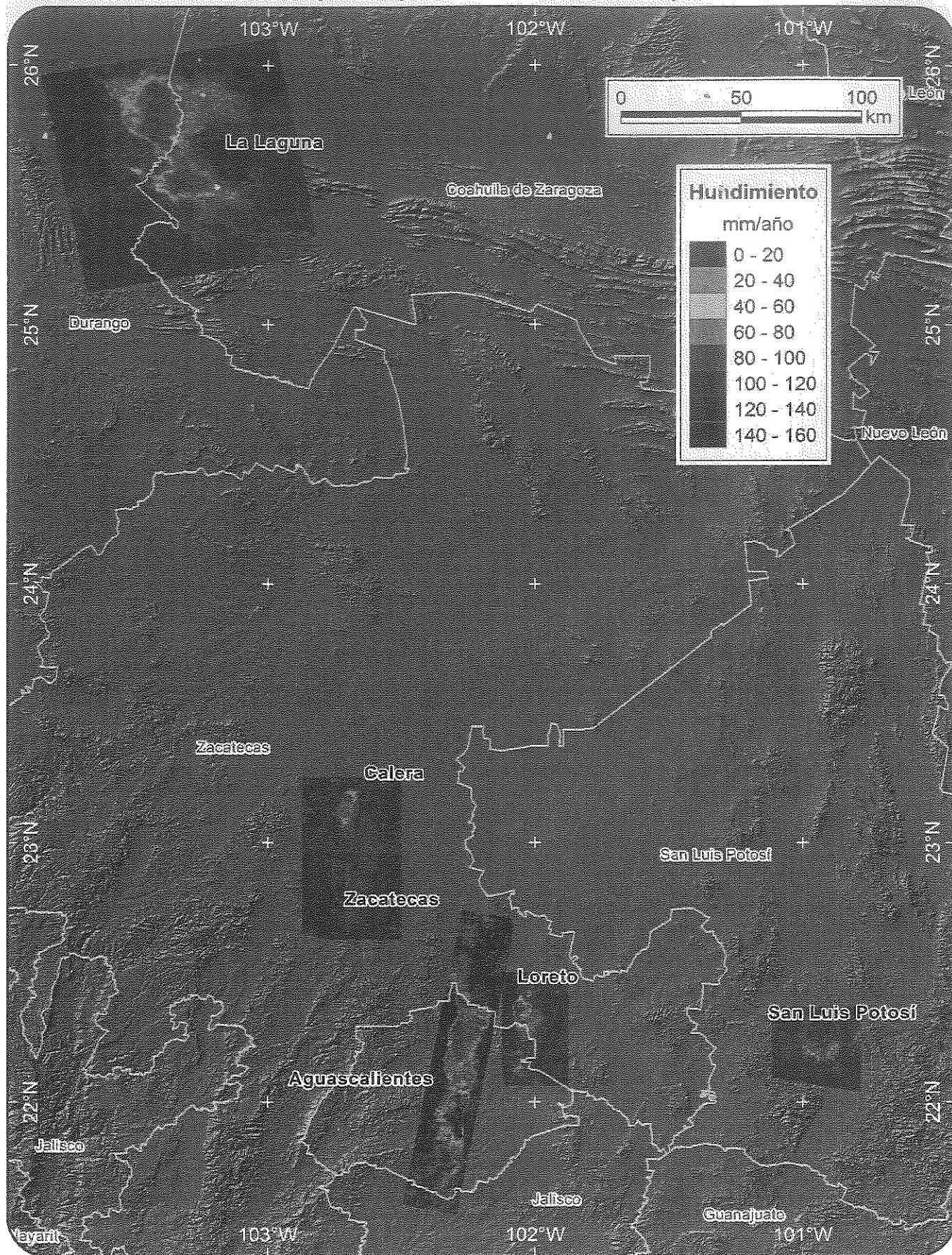
ESA
NGL

Otras siglas de instituciones y/o conceptos

SAR	Synthetic Aperture Radar
DInSAR	Differential SAR Interferometry
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
SBAS	Small Baselines Interferometry
GNSS	Global Navigation Satellite System
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa
GPS	Global Positioning System
SGM	Servicio Geológico Mexicano

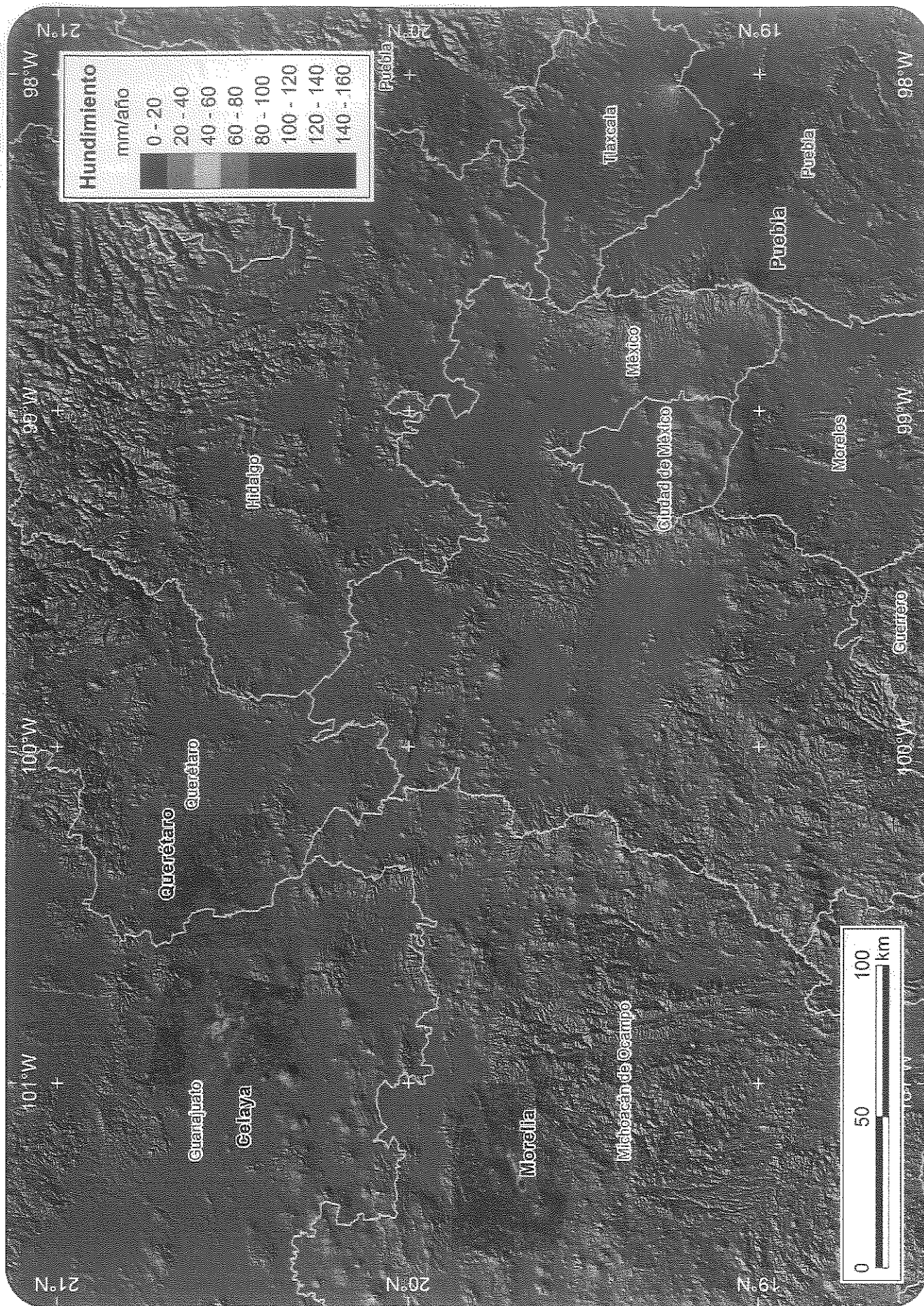
Casos de subsidencia que se presentan (zona norte)

Mapa 1



Casos de subsistencia que se presentan (zona centro)

Mapa 2



Índice

1. Metodología	1
1.1 Interferometría SAR	1
1.2 Observaciones GNSS	2
2. Resultados	5
2.1 Calera, Zacatecas	5
2.2 Celaya, Guanajuato	6
2.3 Loreto, Zacatecas	7
2.4 La Laguna	8
2.5 Morelia, Michoacán	9
2.6 Ciudad de Puebla	10
2.7 Ciudad de Querétaro	11
2.8 Ciudad de San Luis Potosí	12
2.9 Valle de Aguascalientes	14
Bibliografía	17

Introducción

De los casos de subsidencia en la república Mexicana, el de la ciudad de México es el más representativo debido a la magnitud de los hundimientos que ocurren en gran parte de la mancha urbana, incluyendo el centro histórico, lo que ha llevado a la realización de estudios para determinar la naturaleza del fenómeno y que ha propiciado el desarrollo de técnicas de cimentación que mitiguen el hundimiento diferencial de grandes edificaciones y de edificios históricos para evitar daños a las estructuras. Sin embargo, aunque el de la ciudad de México es el más significativo, solo representa uno de los otros muchos casos que ocurren en el país, algunos de ellos también ya estudiados debido a los grandes daños que el fenómeno ha ocasionado en viviendas e infraestructura urbana, como el de Aguascalientes o el de Celaya, y otros que, por no representar fuertes pérdidas económicas o por afectar regiones mucho menores, no han sido motivo de estudio, como los de la ciudad de Puebla, o los de Calera, Zacatecas.

Un indicio de que alguna región está siendo afectada por subsidencia es la aparición de fallas o grietas en el suelo en los que se aprecia desplazamiento vertical de uno de los labios con respecto del labio contrario. No obstante, algunos tipos de suelo pueden absorber fuertes deformaciones por compresión del suelo sin presentar fallas, o bien, estas aparecen hasta que el hundimiento del suelo ya alcanzó magnitudes de decímetros. Esto hace necesario que se efectúe la detección, cuantificación y monitoreo del fenómeno para identificar así zonas de riesgo susceptibles a presentar nuevas fracturas del suelo.

Las observaciones geodésicas son una de las herramientas que ha sido de gran utilidad para detectar zonas afectadas por subsidencia y para cuantificar sus efectos con una gran exactitud, pero que tiene la limitante de proporcionar solo información de manera puntual y aislada. En este sentido, la interferometría con imágenes SAR satelitales presenta la ventaja de cubrir grandes extensiones, así como técnicas avanzadas de procesamiento que proporcionan también buenas exactitudes en la cuantificación de los desplazamientos. No obstante, las

observaciones geodésicas, en especial las de las estaciones GNSS permanentes, por sus altas exactitudes en la cuantificación de deformaciones, siguen siendo un insumo importante para validar y complementar las deformaciones observadas mediante técnicas de interferometría SAR.

El objetivo inicial de abordar los casos que aquí se presentan (ver mapas 1 y 2) es el de detectar los efectos de estas deformaciones en las estaciones que conforman la red geodésica nacional, y fueron elegidos con base en diferentes antecedentes, por ejemplo, el caso de la ciudad de Puebla se abordó para analizar los desplazamientos observados en las series de tiempo de estaciones GNSS permanentes, otros casos como los de Loreto y de Calera, Zacatecas, se efectuaron para complementar el levantamiento de estructuras geológicas; y otros más para ahondar y obtener la situación que presentan actualmente casos documentados en estudios previos, que a la vez se utilizaron como referencia.

1. Metodología

En el apartado 1.1 del documento “Estudio de los Hundimientos por Subsistencia en Aguascalientes con Métodos Satelitales; Reporte Técnico” (INEGI, 2016) se describen los aspectos básicos de la interferometría SAR diferencial (DInSAR) y de los métodos DInSAR avanzados PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*) y SBAS (*Small Baseline Subset*), por lo que en este documento solo se retoman algunos conceptos sobre el cálculo de las deformaciones con el método PSI, que fue el utilizado para obtener la mayoría de los resultados que se presentan.

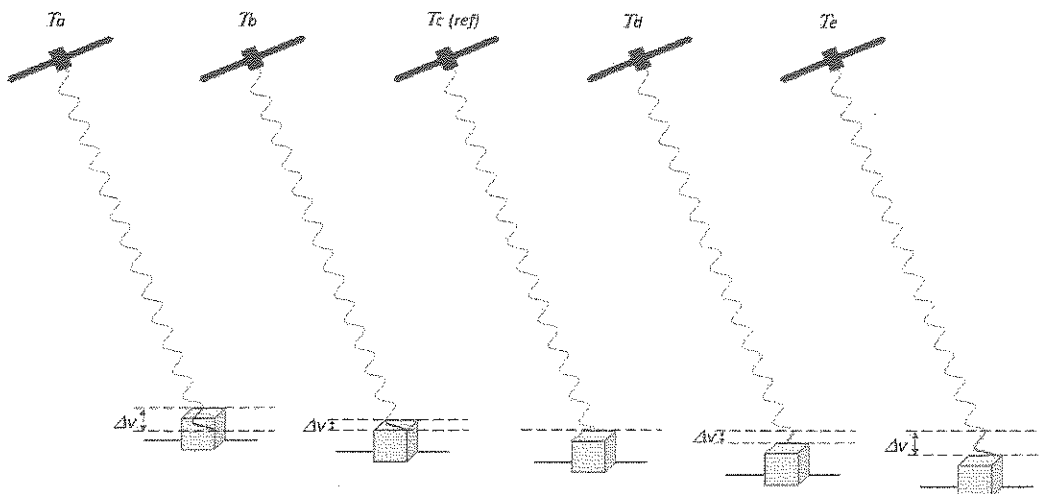
1.1 Interferometría SAR

Los métodos DInSAR, en general, explotan las variaciones de la fase de la señal radar retrodispersada en diferentes adquisiciones del sensor SAR para calcular las deformaciones que ocurren en la zona de interés, cubierta por el conjunto de imágenes que se utilizan. A diferencia de la técnica DInSAR,

que se aplica a pares de imágenes adquiridas en diferente fecha, los métodos avanzados PSI y SBAS utilizan un conjunto de imágenes para solventar algunas limitaciones de la técnica DInSAR, como la dificultad para detectar procesos lentos de deformación y la falta de resultados confiables en zonas donde se pierde la correlación de la señal en las imágenes.

En la técnica PSI se aprovechan elementos de resolución en el terreno con propiedades específicas de dispersión de la señal para superar la pérdida de correlación entre las imágenes que se utilizan, identificando para ello áreas en una serie de interferogramas en cuya señal dispersada domina la de un solo punto u objeto dispersor, lo que reduce la varianza de la señal; de tal manera que permite extraer solo las variaciones de fase debidas a la deformación, con lo que se obtienen exactitudes de milímetros en las deformaciones calculadas.

Variaciones de fase en un reflector permanente con respecto a una fecha de referencia (T_c)



Para los estudios se utilizaron indistintamente imágenes de los sensores Sentinel-1A y Sentinel-1B de la ESA. En la siguiente tabla se enlistan las características principales de ambas plataformas.

Propiedad o Característica:	Sentinel-1A	Sentinel-1B
Lanzamiento	2014	2016
Banda	C	
Longitud de Onda	~5.546576 cm	
Inclinación de la órbita	98.18°	
Altitud promedio	693 Km	
Ciclo de repetición	12 días	

Sentinel-1A y Sentinel-1B comparten la misma órbita, con una diferencia de fase orbital de 180°.

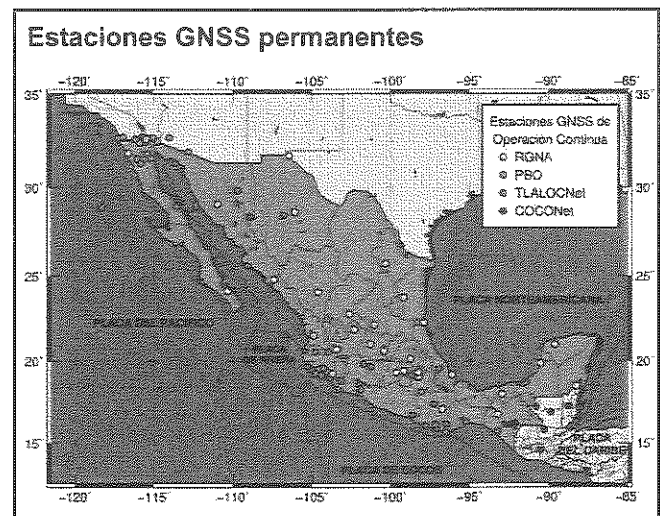
Las imágenes Sentinel-1 que se utilizaron para el análisis de los casos que aquí se presentan fueron adquiridas en el modo IW (*interferometric wide swath*), que tienen una huella aproximada de 250 kilómetros, en formato *Single Look Complex* (SLC) con una resolución nominal de 5 metros en dirección del rango (perpendicular a la trayectoria del satélite) y de 20 metros en dirección del azimuth (en dirección de la órbita del satélite).

El procesamiento de las imágenes SAR se realizó con los programas SNAP² desarrollado por la ESA, con el que se aplica la técnica DInSAR y se prepararon las imágenes SAR para aplicar la técnica PSI (Delgado-Blasco et al. Y Fomelis et al., 2018); con el programa de uso libre para fines no comerciales StaMPS (Hooper et al., 2012), se aplicó el método PSI después de calcular los interferogramas con SNAP. Ambos programas utilizan a la vez otras herramientas de uso libre como GDAL (*Open Source Geospatial*

Foundation), SNAPHU³ (Chen y Zebker, 2002), GMT (Wessel et al., 2013), y algunos otros para los cálculos, visualización y representación de los resultados.

1.2 Observaciones GNSS

De los métodos geodésicos para cálculo de deformaciones, la nivelación diferencial es de las que ofrece una mejor exactitud, sin embargo, es una técnica costosa y, al igual que los levantamientos con equipo GNSS para monitoreo mediante repetición de observaciones, requiere de un gran esfuerzo de campo. Otra fuente de información son las redes de estaciones GNSS permanentes, como la RGNA⁴, PBO⁵, COCONet⁶ y TLA-LOCNet⁷ en cuyas estaciones se recaban de manera continua los datos de las señales que emiten los satélites de constelaciones como GPS, GLONASS y Galileo; y que son de gran utilidad para fines geodésicos.



Del procesamiento con *software* científico de los datos GNSS recabados en las estaciones permanentes, se obtienen soluciones diarias o semanales de las coordenadas de

² SNAP - ESA Sentinel Application Platform v6.0.0, <http://step.esa.int>

³ <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks>

⁴ Red Geodésica Nacional Activa

(<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/rgna.aspx?p=22>)

⁵ Plate Boundary Observatory

(<http://www.unavco.org/projects/major-projects/pbo/pbo.html>)

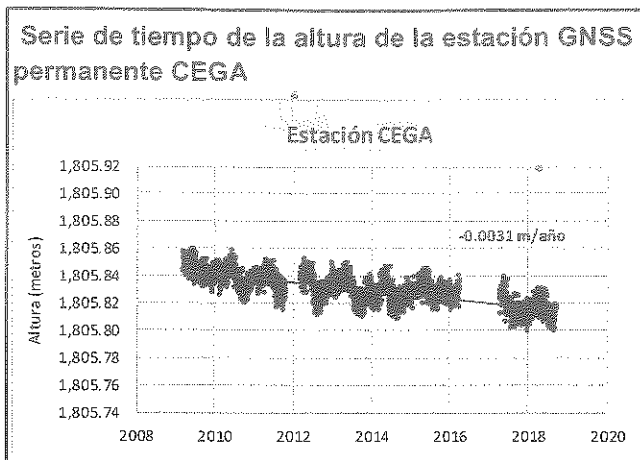
⁶ Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network (<http://coconet.unavco.org/>)

⁷ <http://cardi.geofisica.unam.mx/tlallocnet/>

cada estación. La exactitud de estas coordenadas es del orden de milímetros, con lo que, dando seguimiento a estas coordenadas mediante análisis de series de tiempo, se pueden observar los cambios de posición para obtener la velocidad con que ocurren los desplazamientos en los 3 componentes, norte, este y altura.

En las zonas con subsidencia donde se cuenta con estaciones permanentes, la velocidad de la altura de la estación es valiosa para verificar los resultados que se obtienen de la interferometría SAR, en especial en los obtenidos con la técnica DInSAR, que son

más susceptibles a presentar errores por la pérdida de coherencia en la fase de las imágenes que se emplearon.



2. Resultados

Como se menciona en el apartado de introducción, los casos que aquí se presentan han sido abordados conforme a diferentes necesidades y prioridades por lo que, los que a continuación se muestran, no son necesariamente los de mayor trascendencia ni son todos los casos de subsidencia en el país, ya que se tienen algunas zonas aún por estudiar.

En los mapas de hundimiento se muestran los resultados obtenidos aplicando la técnica PSI a conjuntos de imágenes Sentinel-1. Los proyectos se realizaron en diferentes etapas desde 2016 a la fecha, por lo que la cantidad de imágenes utilizadas y los periodos de tiempo que cubren difieren para cada zona estudiada.

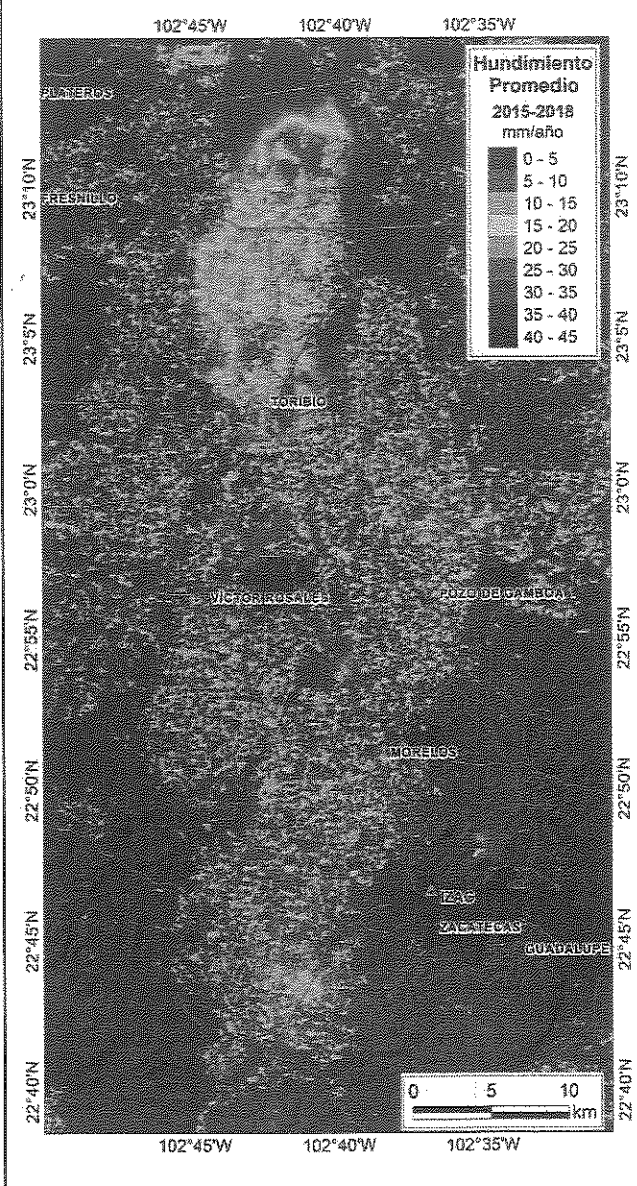
A manera de referencia, en los mapas se representan, mediante líneas en color rojo, las fallas y/o grietas que se tienen documentadas, ya sea de levantamientos realizados por el INEGI o por otras fuentes; para mayor información sobre las estructuras geológicas se recomienda consultar los productos del INEGI específicos de cada zona.

2.1 Calera, Zacatecas

Las imágenes que se utilizaron para obtener los hundimientos representados en el mapa fueron adquiridas en trayectoria ascendente del sensor Sentinel-1 durante el periodo del 17 de diciembre de 2014 al 1 de enero de 2019. Las fallas representadas corresponden a la actualización realizada por el INEGI en 2017, con base en trabajos previos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y Protección Civil del Estado. De acuerdo con el levanta-

miento de estructuras geológicas, la falla principal en la zona del acuífero o zona hidrogeológica de Calera, inicia al suroeste de la localidad Ramón López Velarde (Toribio) y se desarrolla 15 kilómetros hacia el norte.

Hundimientos promedio en la zona del acuífero de Calera ocurridos del 17 de diciembre de 2014 al 1 de enero de 2019.



Los hundimientos máximos detectados para los 4 años que cubren las imágenes fueron de 4.5 centímetros por año, al oeste de la falla “Calera-Madero”. En la región solo se cuenta con una estación GNSS permanente, IZAC, que no presenta hundimiento.

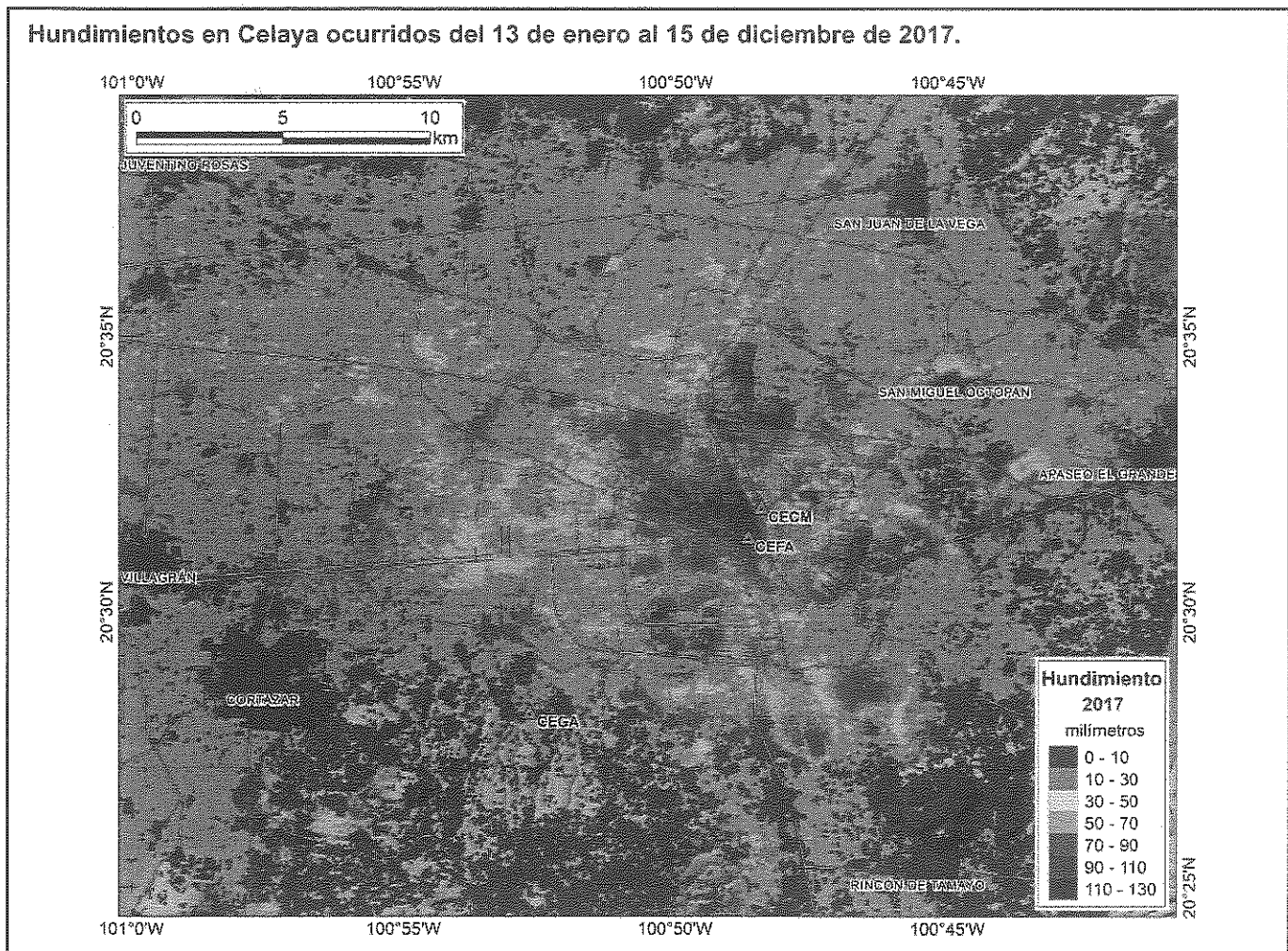
2.2 Celaya, Guanajuato

Los hundimientos que se muestran en el caso de Celaya, con máximos de 13 centímetros, corresponden al periodo cubierto por imágenes tomadas por el sensor entre el 13 de enero y el 15 de diciembre de 2017, y fueron adquiridas durante la trayectoria descendente del satélite.

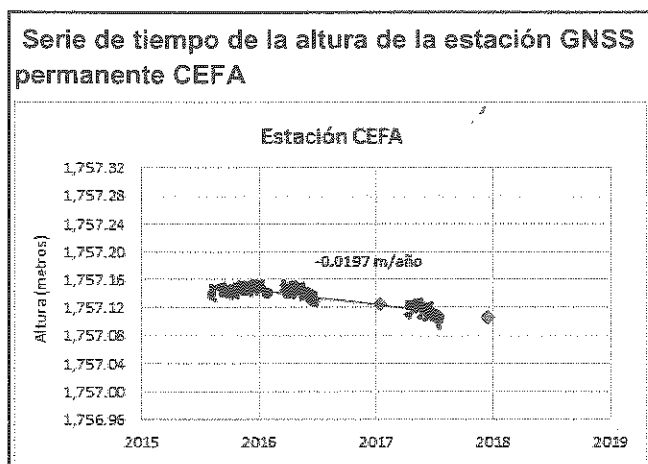
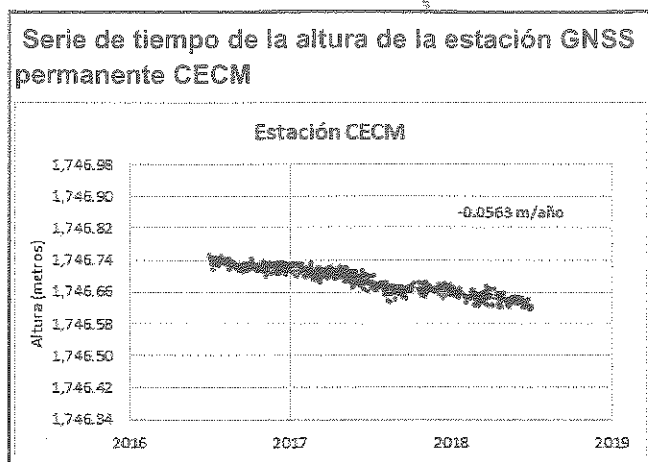
Las fallas y grietas plasmadas en el mapa de hundimientos corresponden a las del

levantamiento realizado por el INEGI en el año 2012. En la zona urbana destaca el bloque entre las dos fallas principales, que presenta hundimientos de entre 5 y 7 centímetros. Sobre este bloque está ubicada la estación GNSS permanente CECM, que presenta un hundimiento promedio de 6.3 centímetros por año. Además de CECM, en Celaya están las estaciones GNSS permanentes CEFA y CEGA, con cuyas series de tiempo se validaron los resultados de la interferometría.

Estación	Hundimiento	Periodo de Observación GNSS
	Promedio	
CECM	5.6 cm/año	2016 - 2018
CEFA	2.0 cm/año	2015 - 2017
CEGA*	0.3 cm/año	2009 - 2018



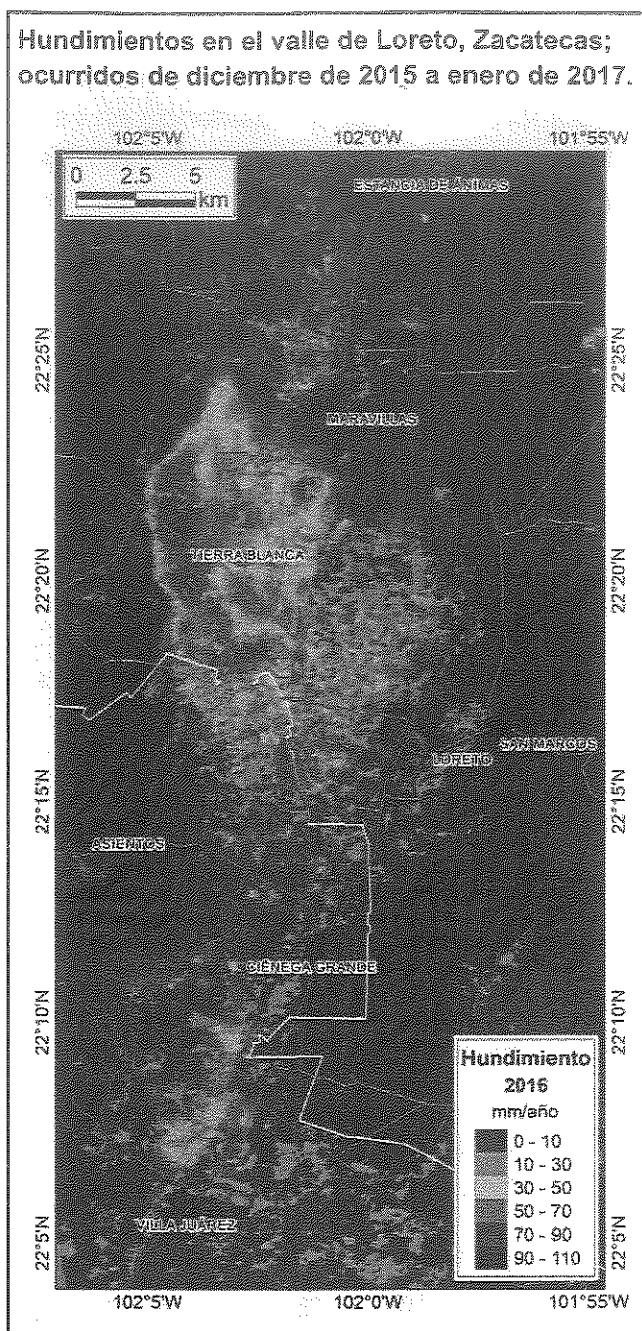
Los gráficos siguientes muestran, con puntos en azul, la variación diaria de la altura de las estaciones CECM y CEFA, y con diamantes naranja, el hundimiento observado mediante interferometría. En la sección 1.1 de este documento se muestra el gráfico de la estación CEGA.



2.3 Loreto, Zacatecas

En algunos proyectos de interferometría para el monitoreo de la subsidencia en el valle de Aguascalientes también se observaron hundimientos que afectaban al municipio de Loreto, Zacatecas. En 2017 se efectuó el levantamiento de estructuras de subsidencia en la zona, en donde se detectaron las fallas que afectan principalmente a la localidad de Loreto. Sin embargo, del estudio de interferometría se observó que los hundimientos más significativos, de hasta 11 centímetros por

año, se presentan en la localidad de Tierra Blanca.



En esta zona se carece de datos geodésicos sobre los desplazamientos verticales, por lo que la validación se efectuó con resultados de otros proyectos de procesamiento de pares de imágenes con el método DInSAR. Los resultados que se muestran en el mapa corresponden a los de la aplicación del método PSI con imágenes del periodo de diciembre de 2015 a enero de 2017.

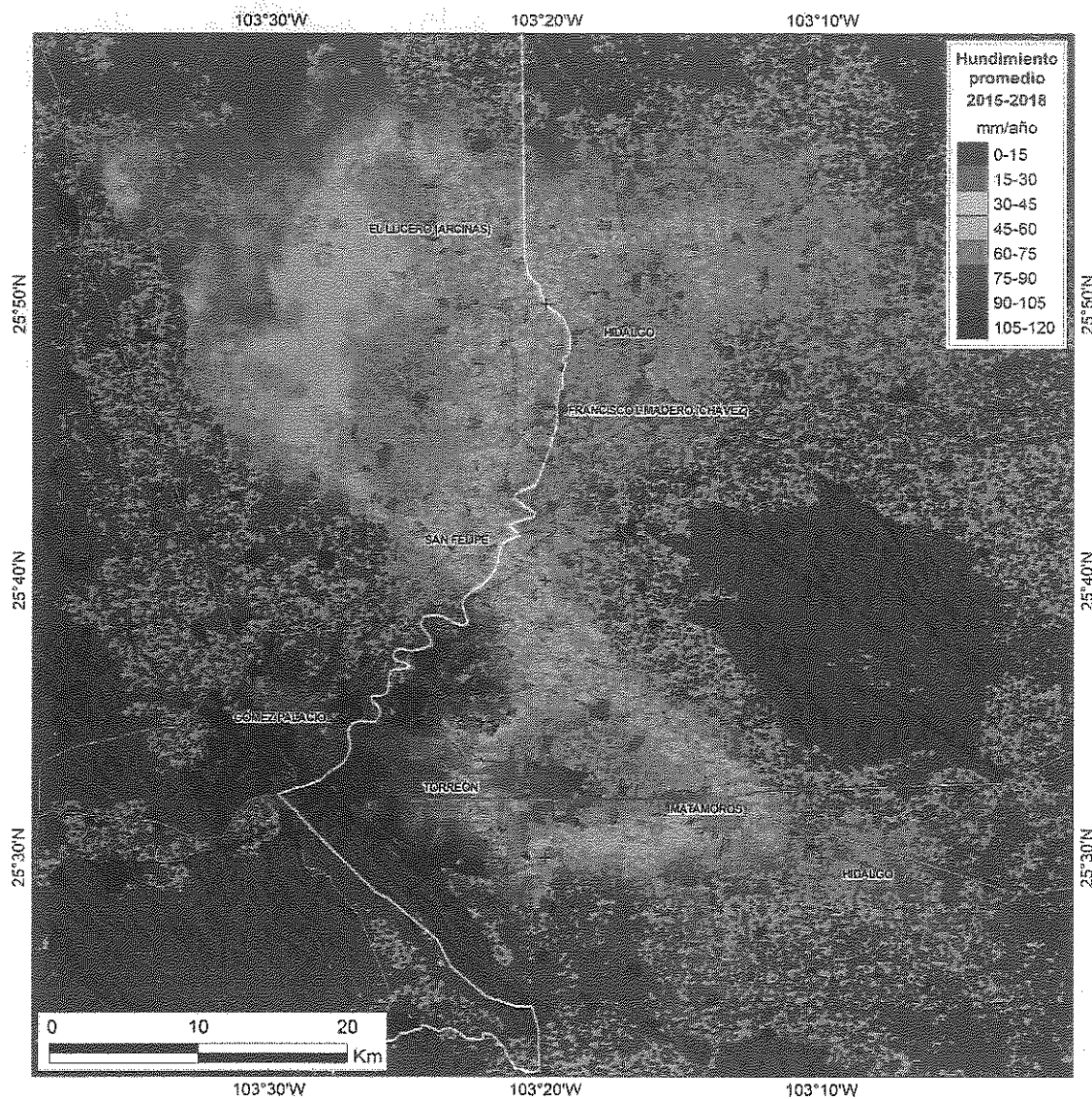
2.4 La Laguna

A pesar de la importancia que representa por la cantidad de habitantes y por la actividad económica que ahí se desarrolla, los antecedentes sobre estudios de subsidencia en esta región son escasos, por lo que en 2018 el INEGI efectuó el levantamiento para actualizar las fallas y grietas. Mediante la interferometría SAR con imágenes Sentinel-1 se detectaron hundimientos máximos de 12 centímetros por año al este de la ciudad de Torreón, Coahuila; sin embargo, también se

tiene una zona con hundimientos significativos entre las localidades de El Lucero y San Felipe, en el Estado de Durango.

Las imágenes que se utilizaron en este estudio de interferometría son del periodo del 3 de diciembre de 2014 al 30 de diciembre de 2018. Aunque también en esta región se carece de valores de hundimiento en estaciones geodésicas, los resultados de la aplicación del método PSI muestran correlación con la geomorfología y con resultados preliminares obtenidos con el método DInSAR.

Hundimientos promedio en La Laguna ocurridos entre el 3 de diciembre de 2014 y el 30 de diciembre de 2018.



2.5 Morelia, Michoacán

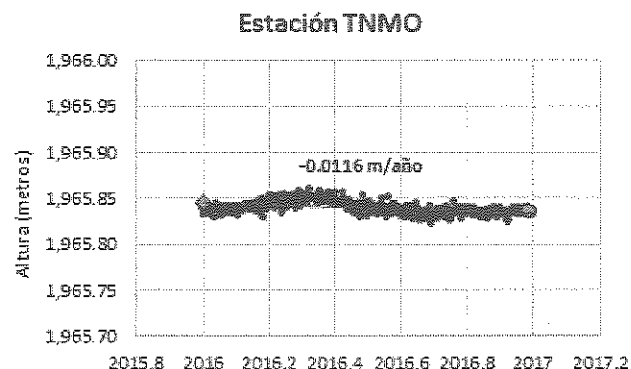
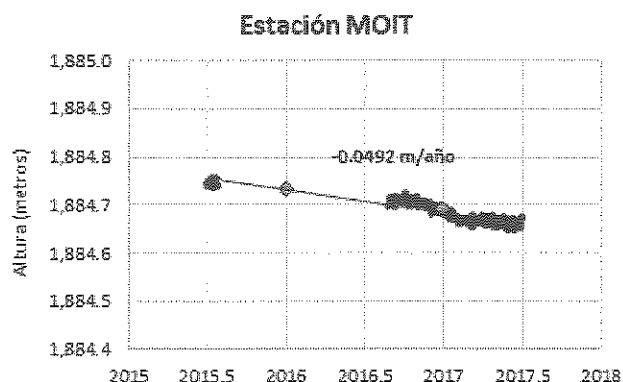
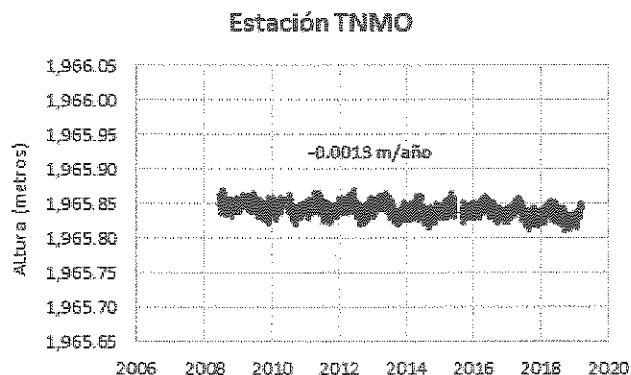
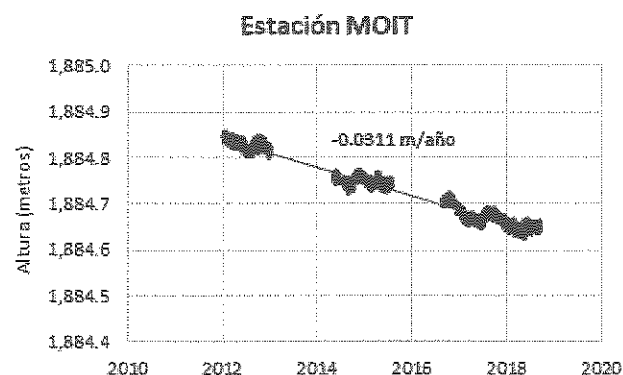
Los hundimientos máximos que se detectaron en Morelia, utilizando un conjunto de imágenes del periodo del 31 de diciembre de 2015 al 25 de diciembre de 2016, alcanzan los 14 centímetros por año, y se presentan al suroeste de la ciudad.

Las coordenadas de las soluciones diarias de las dos estaciones GNSS permanentes en la ciudad de Morelia presentan variaciones estacionales que implican que la velocidad de los hundimientos varía dependiendo del periodo considerado; esto ocasiona que los hundimientos en el periodo observado con interferometría SAR resultan mayores al desplazamiento vertical promedio en ambas estaciones. Para verificar los resultados de la interferometría, además de la velocidad

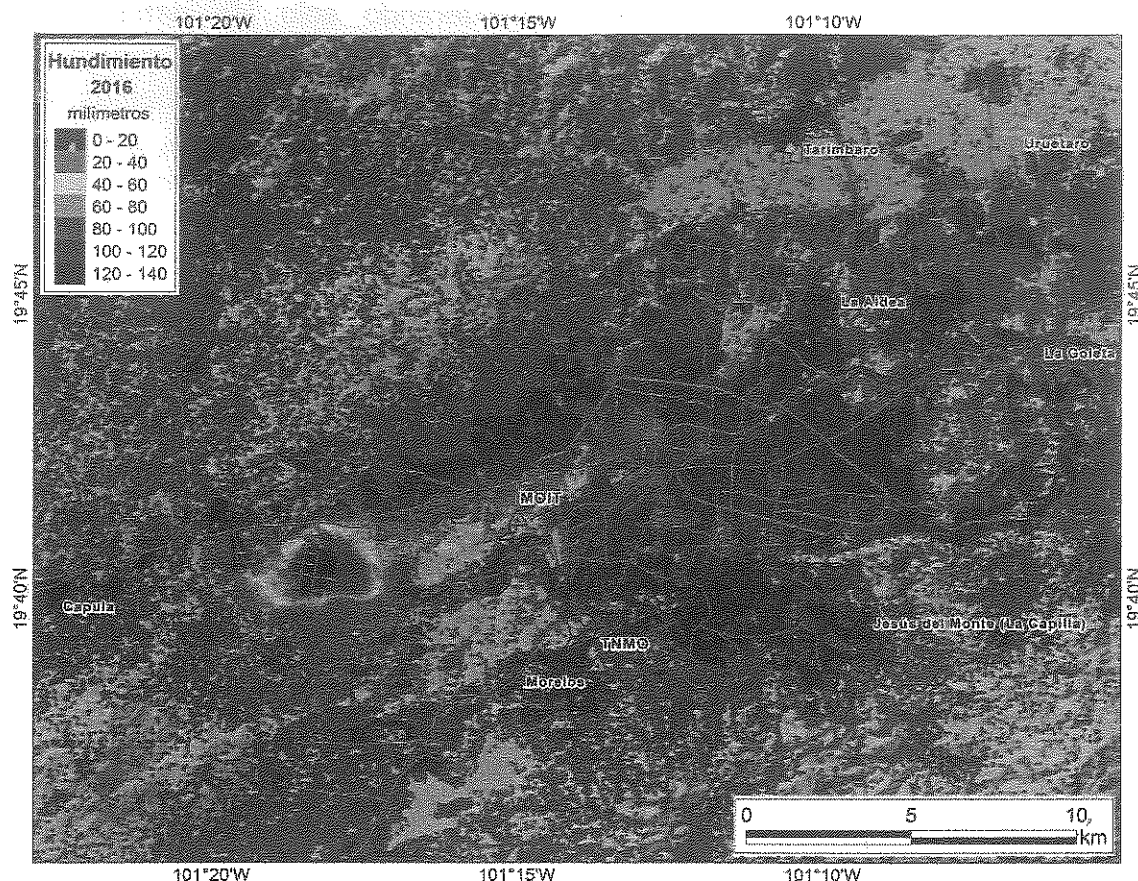
promedio, calculada con todos los datos disponibles, se estimó también la velocidad considerando solo los datos del periodo cubierto por las imágenes Sentinel-1. En la estación MOIT se tiene además la falta de datos de algunos periodos, por lo que, para estimar una velocidad para el periodo de interés, se consideraron las alturas de la estación desde junio de 2015 a junio de 2017.

Las fallas representadas en el mapa de hundimientos en Morelia son atribuidas a Garduño-Monroy et al. (2001) y fueron extraídas de Ávila-Olivera (2008). En Hernández-Madrigal et al (2015) se documenta una nueva falla, "Manantiales", que estaría relacionada con los hundimientos máximos detectados mediante interferometría al oeste de la ciudad, y que se muestran en el mapa de la página siguiente.

Altura de las estaciones GNSS permanentes MOIT y TNMO. Arriba, velocidades calculadas para todas las observaciones GNSS. Abajo, velocidades en el periodo cubierto por las imágenes Sentinel-1 usadas en la interferometría, y el desplazamiento observado con la interferometría (diamantes color naranja).



Hundimientos promedio en Morelia, Michoacán; ocurridos entre el 31 de diciembre de 2015 y el 25 de diciembre de 2016.

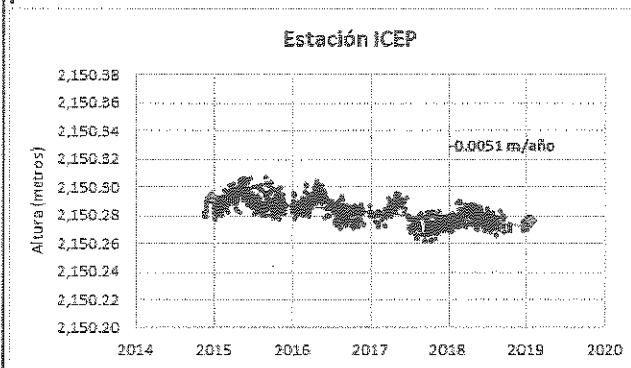


2.6 Ciudad de Puebla

La información sobre la subsidencia en Puebla es también muy escasa; sobre este tema, notas periodísticas dan cuenta de la presencia o propagación de fallas en la ciudad, sin embargo, a la fecha no se cuenta con un levantamiento del trazo de las fallas o grietas, que pudiera relacionarse con la subsidencia detectada.

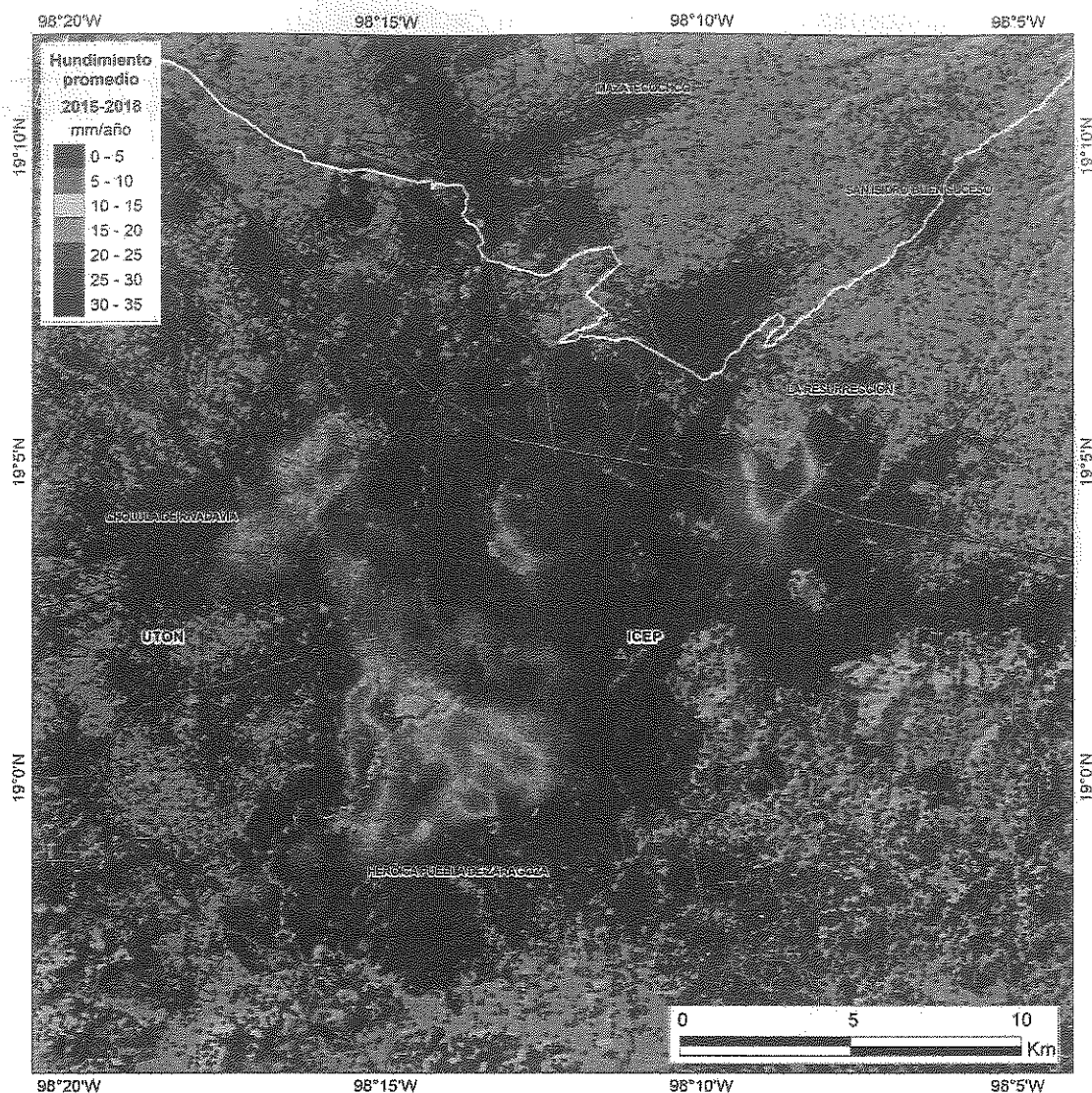
Las coordenadas de las soluciones diarias de la estación GNSS permanente ICEP, de la RGNA, muestra un hundimiento promedio de 0.5 centímetros por año para el periodo considerado para la interferometría, mientras que en la estación UTON se considera estable, ya que su desplazamiento vertical es inferior a un milímetro por año.

Serie de tiempo de la altura de la estación GNSS permanente ICEP



En el mapa siguiente se muestran los hundimientos en los dispersores permanentes que se detectaron en imágenes adquiridas por el sensor Sentinel-1 en el periodo del 14 de diciembre de 2014 al 16 de enero de 2019, con un máximo de 3.5 centímetros por año.

Hundimientos promedio en la ciudad de Puebla; ocurridos entre el 14 de diciembre de 2014 y el 16 de enero de 2019.



2.7 Ciudad de Querétaro

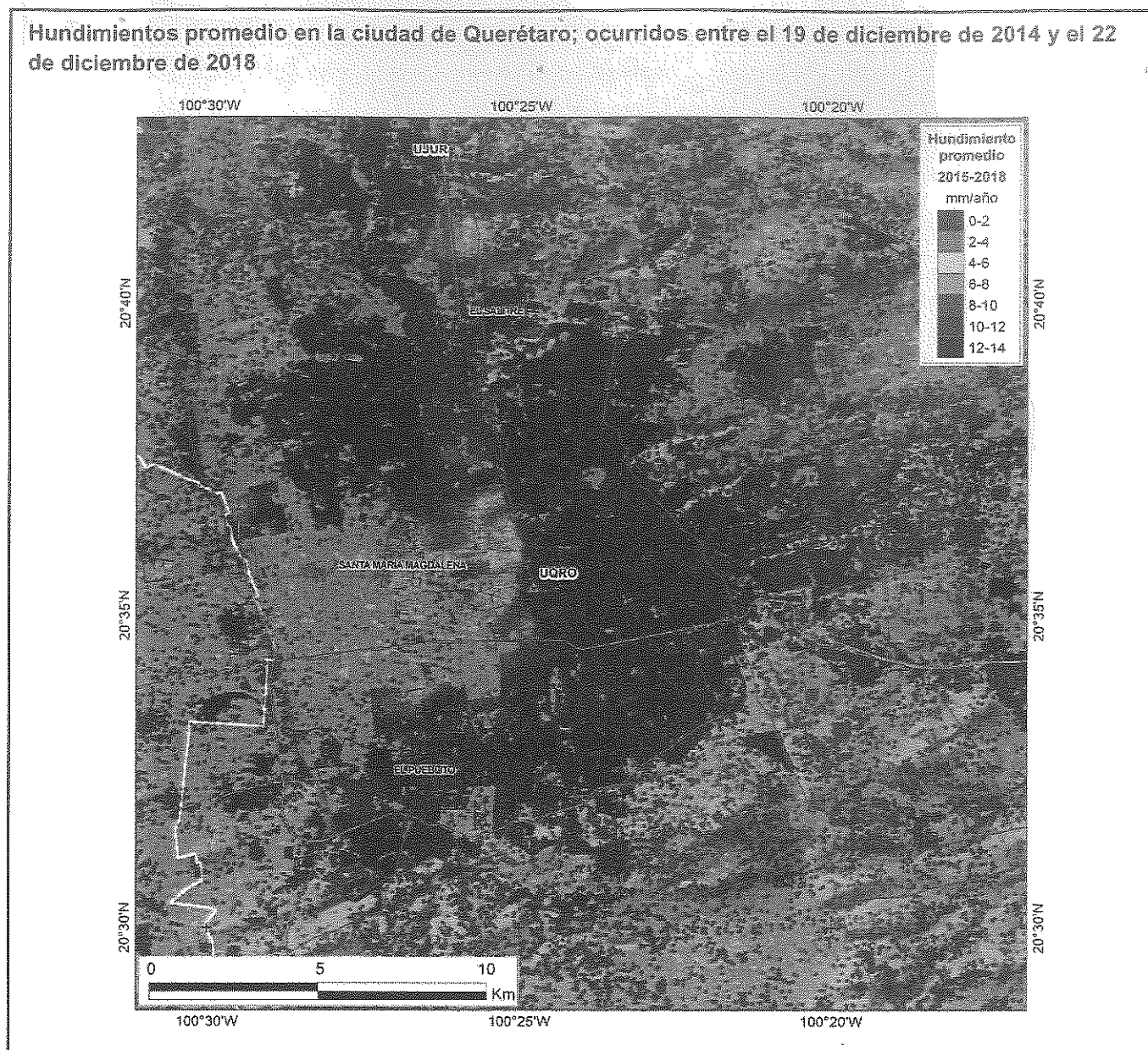
Comparada con otras zonas de subsidencia, el hundimiento que se observa actualmente en la ciudad de Querétaro es de magnitud muy pequeña. Del procesamiento inicial con el método PSI de un conjunto de imágenes Sentinel-1, con cobertura temporal de un año, no se logró identificar claramente la señal correspondiente a la subsidencia a la que se atribuyen algunas de las fallas detectadas en la zona, sin embargo, del procesamiento de imágenes del periodo del 19 de diciembre de

2014 al 22 de diciembre de 2018 se identificaron hundimientos de 1.4 centímetros por año como máximo.

En lo que se refiere a observaciones GNSS, permanentes en esta zona, en el periodo considerado la estación UQRO, de la RGNA, presentó un hundimiento promedio de 0.3 centímetros por año. La estación UJUR, en Juriquilla, presenta varios periodos sin datos y algunas inconsistencias que impiden una estimación confiable del hundimiento en el área en donde está ubicada.

En el mapa de los hundimientos que se obtuvieron de la interferometría se muestran también las fallas actualizadas en el año 2013

por el INEGI con base en las publicadas por Aguirre-Díaz et al. (2005) y que son citadas en Pacheco (2007).

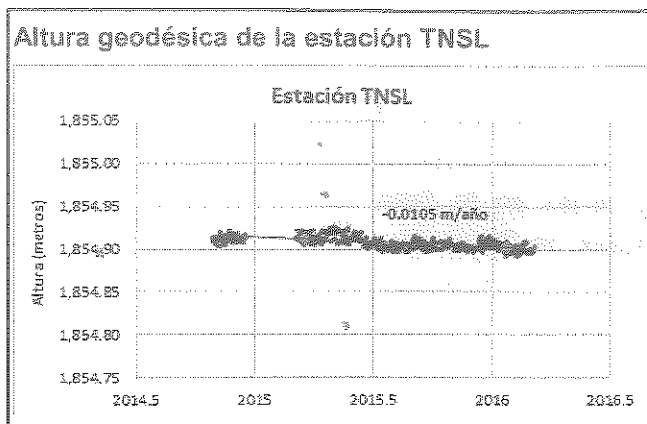


2.8 Ciudad de San Luis Potosí

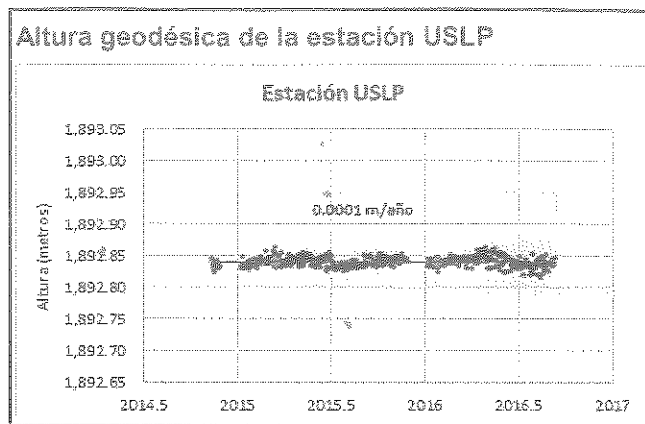
La detección de los hundimientos en la ciudad de San Luis Potosí se realizó con imágenes adquiridas por el sensor Sentinel-1 de marzo de 2015 a enero de 2016. Del procesamiento de ese conjunto de imágenes se obtuvieron hundimientos máximos de 8 centímetros por año en una zona al norte de la ciudad de San Luis Potosí, sin embargo, en el municipio de

Soledad de Graciano Sánchez también se tienen algunas zonas con hundimientos significativos.

Tanto el hundimiento detectado mediante interferometría para la zona donde está ubicada la estación GNSS permanente TNSL como la serie de tiempo de la altura de la estación, indican un hundimiento promedio de 1 centímetro por año.

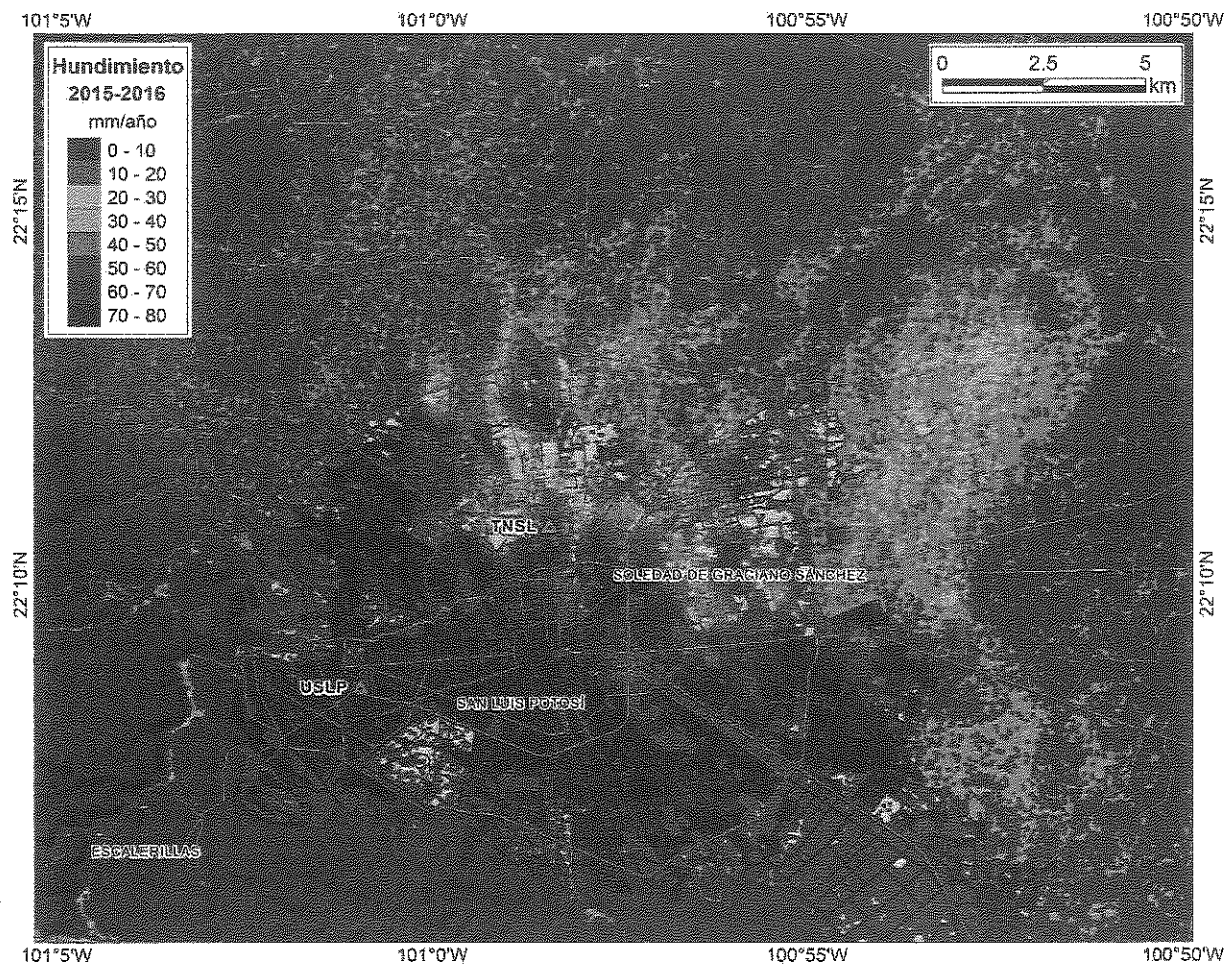


La estación USLP, de la RGNA, (actualmente reubicada como ISLP) tuvo un hundimiento promedio de 0.2 centímetros al año en el periodo que estuvo activa; pero en el periodo del estudio de interferometría el desplazamiento vertical fue prácticamente nulo.



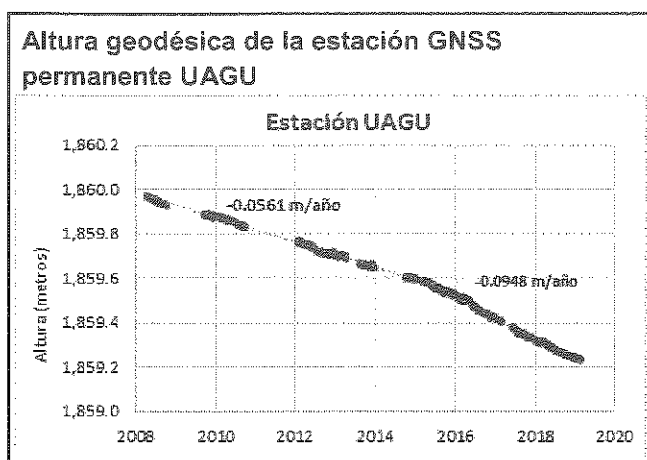
En 2014 el INEGI realizó una actualización de las fallas en esta zona con base en levantamientos previos del SGM y de Arzate (2008). Las fallas en el mapa siguiente son las que se obtuvieron de estos trabajos de actualización.

Hundimientos promedio en la ciudad de San Luis Potosí; ocurridos entre el 18 de marzo de 2015 y el 24 de enero de 2016

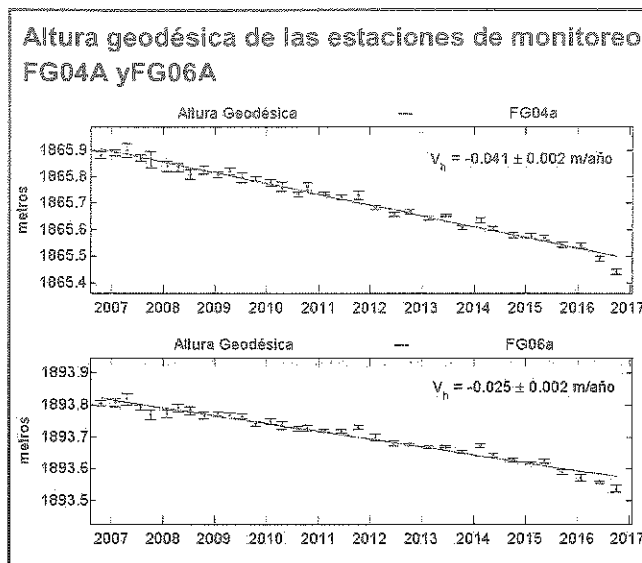


2.9 Valle de Aguascalientes

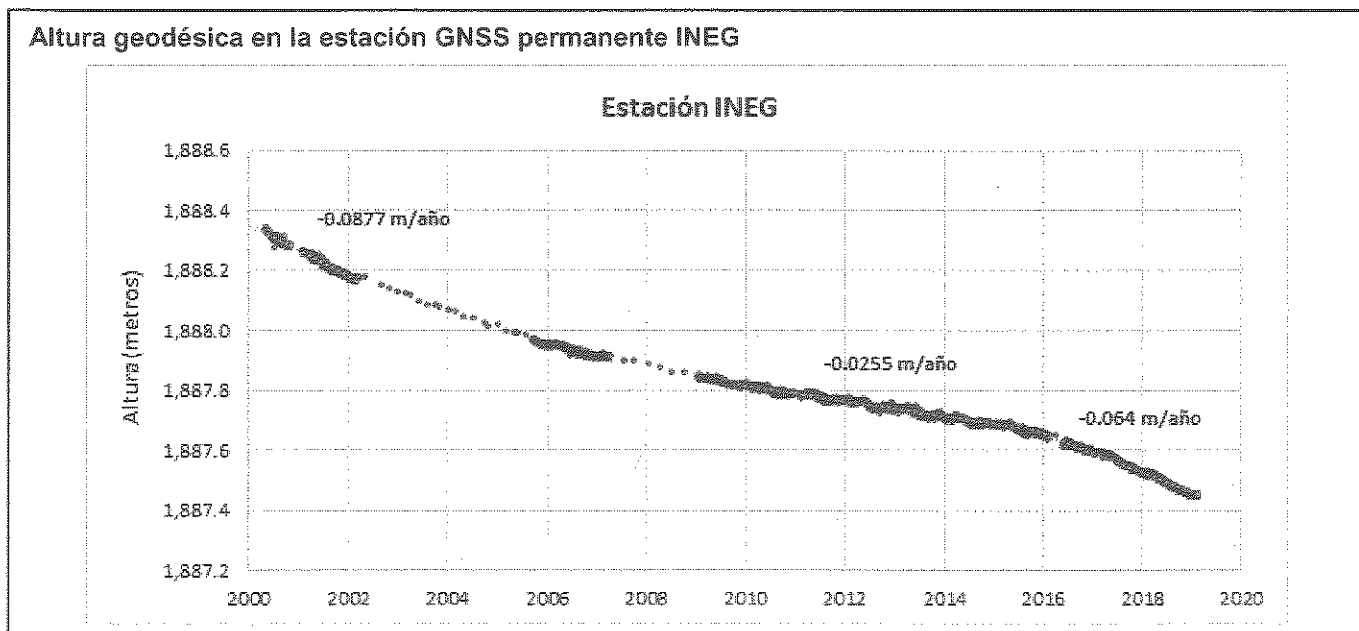
Con la disponibilidad de imágenes Sentinel-1 ha sido posible dar seguimiento al monitoreo de la subsidencia en Aguascalientes que se venía realizando mediante el seguimiento de la altura de las estaciones GNSS permanentes, el reposicionamiento de estaciones geodésicas de la red pasiva y el procesamiento de imágenes Envisat y TerraSAR-X. El seguimiento de la altura de las estaciones permanentes muestra un incremento de la tasa de hundimiento para el periodo de finales de 2015 a principios de 2019, con un promedio de 9.5 y 6.4 centímetros por año en las estaciones UAGU e INEG, respectivamente.



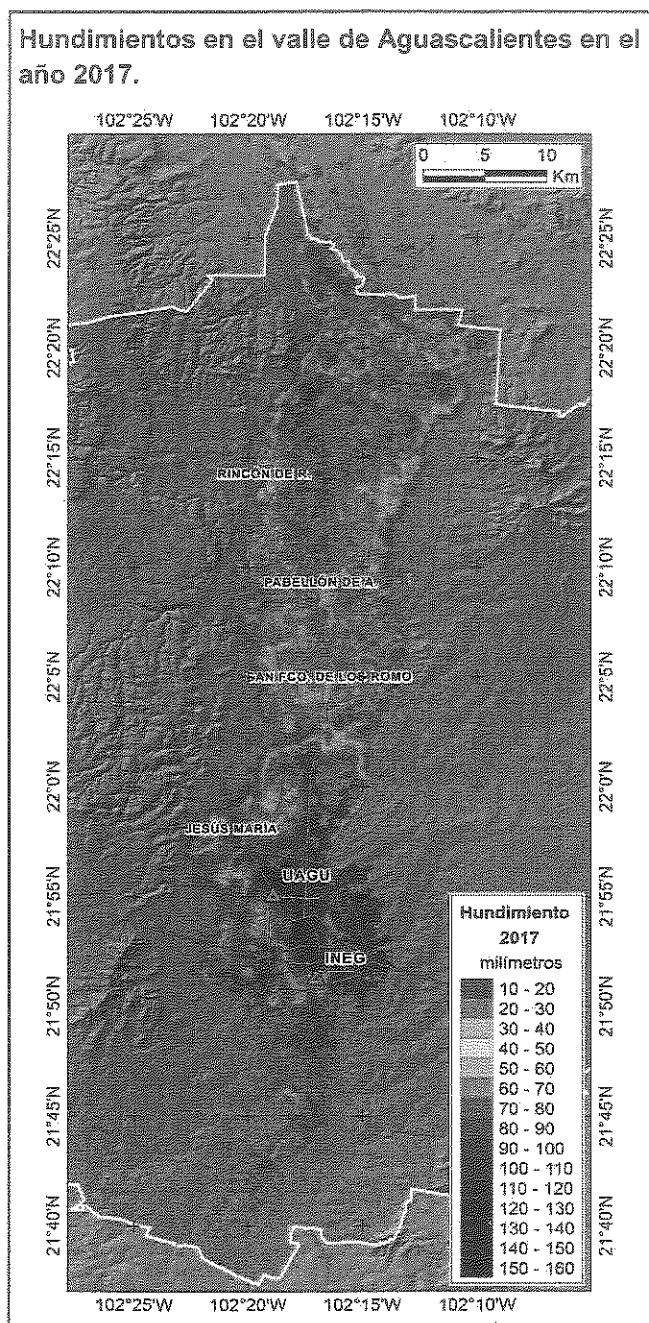
En algunas de las estaciones de monitoreo (FG04A, FG06A, FG13, FG14A, FG45 y FG45A), ubicadas dentro del primer cuadro de la zona urbana, también se reflejó un aumento en la tasa de hundimiento desde finales de 2015. El monitoreo en estaciones de la red geodésica pasiva, mediante reposicionamiento con receptores GNSS, se interrumpió en 2017.



Hasta mediados de 2015 la estación INEG había mostrado una continua desaceleración, llegando a un mínimo de 2.55 centímetros por año.

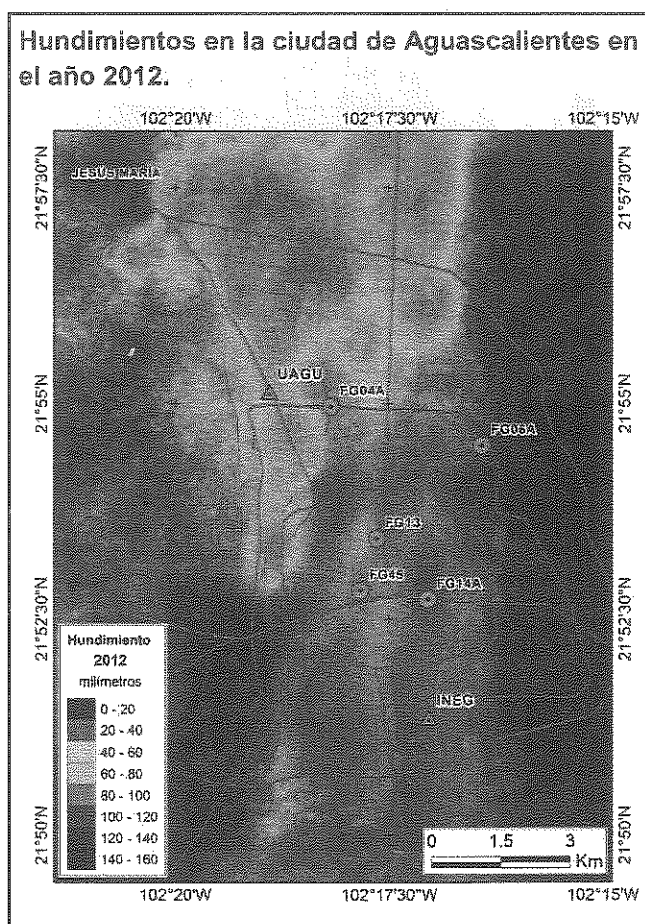


Los resultados de la interferometría SAR corroboran el incremento en los hundimientos en el centro y al norte de la ciudad; en el mapa siguiente se muestran los que se ocurrieron en el año 2017, que fueron obtenidos con el método PSI. Las fallas en el mapa son las publicadas por el gobierno del Estado⁸, resultado de los trabajos del comité interinstitucional de fallas geológicas y grietas del Estado de Aguascalientes (CIFGGEA)⁹.



⁸ <http://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifaqq/web/mapa.asp>

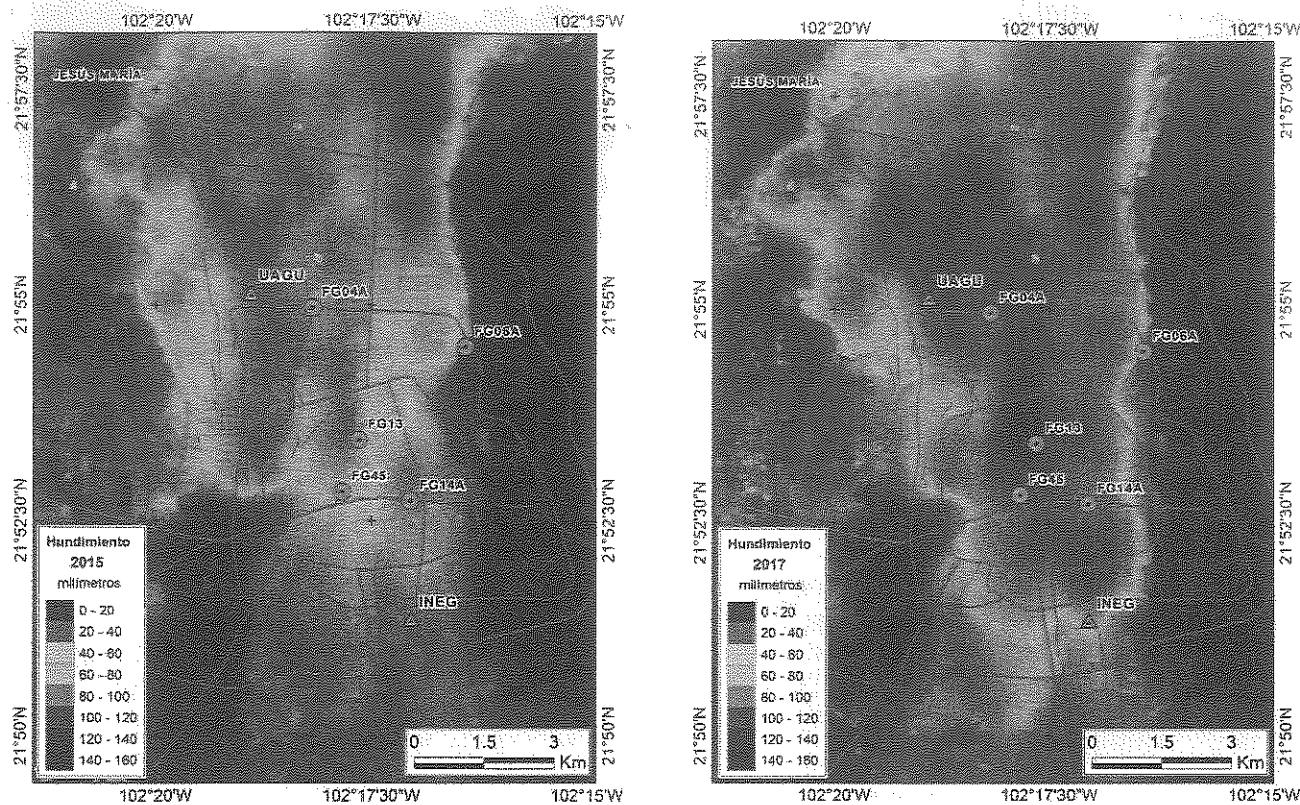
Si bien el aumento en la tasa de hundimiento se presenta en gran parte de la ciudad, hay zonas donde se mantiene sin variaciones significativas, como sucede al este de Jesús María. En los mapas siguientes se muestra solo la cobertura de la ciudad de Aguascalientes con la intención de mostrar las variaciones que en esta zona se observan para los diferentes periodos estudiados; para fines comparativos entre los tres diferentes periodos (2012, 2015 y 2017), los resultados que se muestran corresponden a los que se obtuvieron con el método DInSAR.



También para facilitar la visualización de las diferencias, el valor máximo en la escala de los hundimientos en los mapas de 2012, 2015 y 2017 de la ciudad de Aguascalientes, se estableció en 16 centímetros por año, que fue el valor máximo observado para el año 2017.

⁹ <https://www.cifggea.org/>

Hundimientos en la ciudad de Aguascalientes en el año 2015 (izquierda) y 2017 (derecha).



Bibliografía

Aguirre-Díaz, G. J., Zúñiga Dávila Madrid, R., Pacheco Alvarado, F.J., Guzmán Speziale, M., y Nieto Obregón, J. *El graben de Querétaro, Querétaro, México*, 2000. Observaciones de fallamiento activo: Geos, boletín de la Unión Geofísica Mexicana, v. 20, p. 2-7.

Arzate, J., Barboza, J.R., López, R., Pacheco, J., Mata, J.L. y Del Rosal, A. *Estudio geológico-geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez*, 2008. Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, pp. 79.

Ávila-Olivera, J.A. *Evolución de los procesos de Subsistencia-Creep-Falla, Casos: Morelia, Mich. Y Celaya, Gto.*, 2008. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Chen, C.W. and Zebker, H.A. *Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models*, 2002. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, pp. 1709-1719.

Delgado Blasco, J.M., Fomeils M. *Automated SNAP sentinel-1 DInSAR processing for StaMPS PSI with open source tools*, 2018.

Garduño-Monroy, V.H., E. Arreygue-Rocha, I. Israde-Alcántara y G.M. Rodríguez-Torres. *Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México*, 2001. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 18, No. 1, pp. 37-54.

Hernández-Madrigal V.M, Flores-Lázaro, N. Villaseñor-Reyes, C.I. y Muñiz Jáuregui, J.A. *Impacto económico producido por Subsistencia diferencial en zonas urbanas. Caso de estudio Morelia Mich.*, 2015. Revista Ciencia Nicolaita, No. 65.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M. *Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation*, 2012. Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.

M. Fomeilis, J. M. Delgado Blasco, Y-L. Desnos, M. Engdahl, D. Fernandez, L. Veci, J. Lu and C. Wong. *ESA SNAP - StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2018. (doi:10.5281/zenodo.1322353).

Pacheco, J. *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*, 2007. Tesis doctoral. UNAM, Centro de Geociencias, Juriquilla, Qro., México.

Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. and Wobbe, F. *GMT 5: A major new release of the Generic Mapping Tools*, 2013. Eos Trans. AGU, 94(45), pp. 409-410.

Otras fuentes

Oliver, C. and Quegan, S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, 1998. Artech House Remote Sensing Library, Boston, Massachusetts.

Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes. *Sistema de Fallas Geológicas y Grietas*, 2019. (<http://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/mapa.asp>).