

Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales

Volumen 2



Instituto Nacional de Estadística y Geografía

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

Volumen 2



Obras complementarias publicadas por el INEGI sobre el tema:
Detección de Zonas de Subsistencia en México con Técnicas Satelitales Volumen 1. Estudio de los Hundimientos por Subsistencia 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 subsistencia en México con técnicas satelitales: volumen 2 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. -- México: INEGI, c2021.
ix, 30 p.--(Subsistencias; 3).
1. Sistema de posicionamiento global - México. 2. Satélites artificiales en navegación - Metodología.

Conociendo México

800 111 4634

www.inegi.org.mx

atencion.usuarios@inegi.org.mx

 **INEGI Informa**  **@INEGI_INFORMA**

DR © 2021, **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.

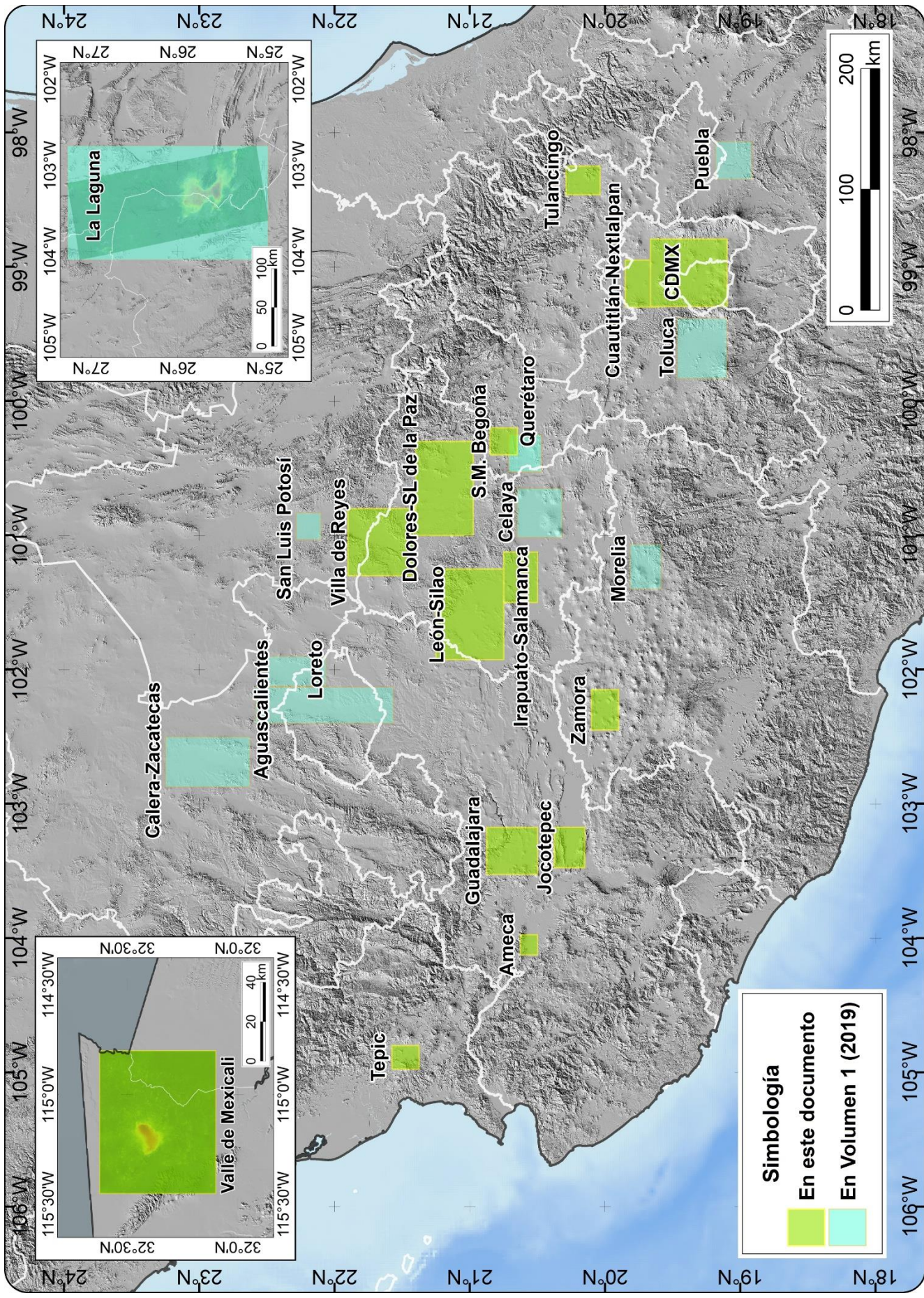
En este documento se presentan los casos de algunas regiones del país afectadas por el fenómeno de subsidencia, en complemento a las zonas publicadas en el Volumen 1 (2019).

Siglas de instituciones y/o conceptos

ESA	European Space Agency
NGL	Nevada Geodetic Laboratory
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
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
IIEG	Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco
FAA	Federal Aviation Administration

Casos de subsidencia que se presentan

Mapa 1



Índice

Introducción	IX
1.Insumos y metodología	1
1.1 Datos	1
1.2 Metodología	2
2.Resultados	5
2.1 Guadalajara, Jalisco	5
2.2 Tepic, Nayarit	7
2.3 Ciudad de México	8
2.4 Irapuato-Salamanca, Guanajuato	10
2.5 León, Guanajuato	11
2.6 Silao, Guanajuato	12
2.7 Dolores Hidalgo-San Luis de la Paz, Guanajuato	13
2.8 Ameca, Jalisco	14
2.9 Villa de Reyes, San Luis Potosí-San Felipe, Guanajuato	15
2.10 Santa María Begoña, Querétaro	16
2.11 Tulancingo, Hidalgo	17
2.12 Cuautitlán-Nextlalpan, Estado de México	18
2.13 Zamora, Michoacán	19
2.14 Valle de Mexicali, Baja California	19
2.15 Jocotepec-Ajijic, Jalisco	20
Anexo	
A. Series de tiempo de la altura en las estaciones GNSS permanentes ubicadas en las zonas de subsidencia	25
Referencias	29

Introducción

Las observaciones geodésicas son una de las herramientas que ha sido de gran utilidad para detectar zonas afectadas por subsidencia, así como para cuantificar sus efectos con una gran exactitud, pero que tiene la limitante de proporcionar información solo 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.

Estos estudios se realizan para proporcionar información geoespacial sobre las zonas afectadas por hundimientos asociados al fenómeno de subsidencia, que permita estimar la afectación que produce sobre la exactitud de la componente de altura de las coordenadas de las estaciones geodésicas que conforman el marco de referencia geodésico. El recurso es además un insumo para estudios geológicos, de ingeniería civil y de riesgo para la población por las fallas relacionadas a los hundimientos diferenciales del suelo; y proporciona información complementaria para estudios geofísicos y geohidrológicos por su relación con las propiedades mecánicas y físicas del suelo y, presumiblemente, con la extracción de agua de los mantos acuíferos.

En este documento se da secuencia a los estudios que se presentaron en el volumen 1 (INEGI, 2019), para abordar los casos más representativos de subsidencia y los de las zonas que presentan los hundimientos más significativos; sin embargo, aún existen otras zonas con indicios de estar afectadas por este fenómeno.

1. Insumos y metodología

1.1 Datos

El insumo principal de estos estudios fueron imágenes SAR de los sensores satelitales Sentinel-1A y Sentinel-1B del programa de observación de la Tierra Copernicus de la ESA. Las imágenes 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). En la siguiente tabla se enlistan las características principales de las dos plataformas.

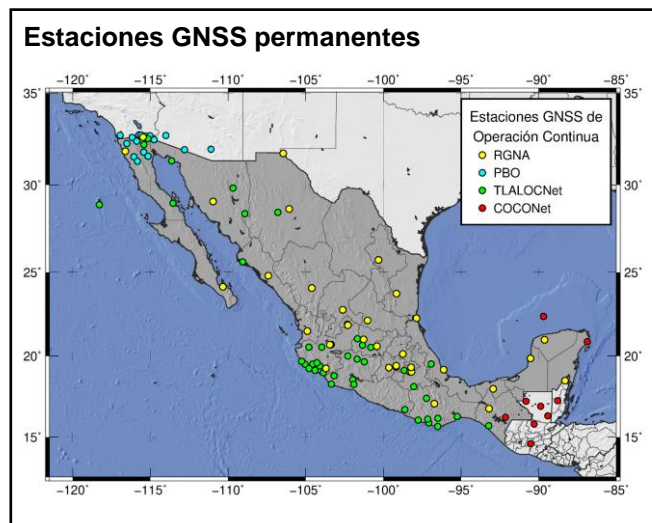
Propiedad o Característica:	Sentinel-1A	Sentinel-1B
Lanzamiento	2014	2016
Banda	C	
Longitud de Onda	~5.546576 cm	
Inclinación de la órbita	98.18°	
Altitud promedio	693 Km	
Ciclo de repetición	12 días	

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

Para obtener una estimación más precisa de la magnitud de los hundimientos, en los estudios se realizó el procesamiento interferométrico de dos conjuntos de imágenes Sen-

inel-1, uno con imágenes adquiridas por el sensor en trayectoria ascendente de la plataforma y otro conjunto en trayectoria descendente.

Otra fuente de información para calcular la magnitud de las deformaciones, y que en estos estudios se utilizó para verificar las que se obtuvieron del procesamiento de imágenes SAR, son los datos GNSS de estaciones permanentes de diferentes redes, como RGNA¹, PBO², COCONet³ y TLALOCNet⁴, en cuyas estaciones se recaban de manera continua los datos de las señales que emiten los satélites de constelaciones como GPS, GLONASS y Galileo.



Del procesamiento de los datos GNSS recabados en las estaciones, se obtienen soluciones diarias o semanales de las coordenadas de cada estación, con las que se

¹ Red Geodésica Nacional Activa (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/rqna.aspx?p=22>)

² Plate Boundary Observatory (<http://www.unavco.org/projects/major-projects/pbo/pbo.html>)

³ Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network (<http://coconet.unavco.org/>)

⁴ <http://cardi.geofisica.unam.mx/tlalocnet/>

puede calcular mediante el análisis de series de tiempo la velocidad con que ocurren los desplazamientos en los tres componentes, norte, este y altura, con exactitudes de décimas de milímetro. Otro insumo para algunas etapas de la interferometría es un Modelo Digital de Elevación. En los procesos se utilizó el de SRTM con resolución de 1 arco de segundo desarrollado por la NASA y la NGA, publicado en 2014.

1.2 Metodología

En las publicaciones previas (INEGI, 2016 e INEGI, 2019) relacionadas con este documento, se describen aspectos básicos de la interferometría SAR diferencial (DInSAR) y de los métodos PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*) y SBAS (*Small Baseline Subset*), a los que se les conoce como métodos *DInSAR avanzados* o métodos multitemporales. En lo que respecta a los estudios que se reportan en este documento, el método que se utilizó fue PSI. Para mayores detalles acerca de las técnicas de interferometría SAR, se recomienda consultar Ferreti *et al.*, 2007; Hanssen, 2001; Berardino *et al.*, 2002 y Hooper *et al.*, 2004.

El procesamiento de las imágenes SAR se realizó mediante software libre. Con el programa SNAP⁵, desarrollado por la ESA (Delgado-Blasco *et al.* y Fomelis *et al.*, 2018), se prepararon las imágenes y se generaron los interferogramas para posteriormente aplicar la técnica PSI usando el programa StaMPS (Hooper *et al.*, 2012). Ambos programas utilizan a la vez otras herramientas de uso libre como GDAL (*Open Source Geospatial Foundation*), y algunos otros como auxiliares para ciertos cálculos. Para la visualización y representación de los resultados, el programa StaMPS utiliza además GMT (Wessel *et al.*, 2013).

En el procesamiento PSI de los casos que aquí se presentan se aplicaron también correcciones para reducir efectos atmosféricos usando el programa TRAIN. Al igual que como se reporta en Bekaert *et al.*, 2015, en un estudio comparativo que se efectuó sobre la aplicación de los diferentes métodos para aplicar las correcciones atmosféricas no se identificó que alguno de ellos ofreciera, en general, mejores resultados que otro, por lo que para el desarrollo de los proyectos de las zonas de subsidencia aquí documentadas se optó por el método lineal para la aplicación de las correcciones. Cabe mencionar que con la aplicación de correcciones atmosféricas no se identificaron mejoras significativas en la cuantificación de los hundimientos en las zonas de subsidencia, sin embargo, se detectó que con su aplicación sí se logra reducir el ruido por artefactos atmosféricos en las áreas de relieve escarpado aledañas a las zonas de subsidencia.

El desenrollado de la fase que se obtiene de la interferometría se realiza con el programa SNAPHU (Chen y Zebker, 2002). En las técnicas DInSAR avanzados el desenrollado de la fase se realiza en el dominio del espacio, acumulando las variaciones de fase entre píxeles adyacentes en cada interferograma; y en el dominio del tiempo, acumulando las variaciones de fase para cada píxel, en los diferentes interferogramas. Tras el proceso de desenrollado de la fase, con base en la longitud de onda del sensor SAR, los valores de la fase y la geometría de adquisición, se calculan los desplazamientos verticales en cada punto de la imagen en donde se identificó un elemento reflector permanente de la señal radar.

Los valores finales de hundimiento en las áreas con subsidencia se obtuvieron de la

⁵ SNAP - ESA Sentinel Application Platform, <http://step.esa.int>

combinación de los desplazamientos verticales calculados a partir de los conjuntos de imágenes en trayectoria ascendente y descendente de la órbita del sensor Sentinel-1. Debido a la geometría de observación de los sensores SAR (de observación lateral), los desplazamientos verticales que se obtienen a partir de los observados en dirección de vista del satélite (*LOS*) pueden estar afectados por los desplazamientos horizontales, principalmente en dirección este-oeste, asociados también a la subsidencia (Samieie-Esfahany *et al.*, 2009). Ya que los desplazamientos en dirección este-oeste se reflejan con diferente signo en los resultados de las direcciones ascendente y descendente, con la combinación de las dos trayectorias de órbita se obtiene una mejor estimación de la componente vertical del desplazamiento.

De acuerdo con la bibliografía (Crosetto *et al.*, 2016) y con las evaluaciones de calidad efectuadas, la técnica PSI proporciona una precisión de milímetros en los valores de velocidad calculados; esto fue corroborado para las zonas en las que se cuenta con estaciones GNSS permanentes, encontrando diferencias de 1 a 2 mm/año entre la velocidad detectada mediante interferometría y la calculada con base en la información geodésica de las estaciones GNSS. Sin embargo, en ciertos casos los hundimientos

diferenciales de magnitud mayor a la de la longitud de onda que utiliza el sensor SAR, que se presentan en áreas específicas de algunas zonas de estudio, producen variaciones en la fase de los interferogramas que ocasionan errores en el desenrollado de la fase y se reflejan en estimaciones erróneas de la magnitud del hundimiento en esas áreas.

Las variaciones o ‘saltos’ en la fase pueden ocurrir en el dominio del tiempo, por la ocurrencia de fuertes hundimientos en periodos cortos de tiempo, como ocurre en algunas áreas de la Ciudad de México, o bien en el dominio del espacio por hundimientos diferenciales fuertes en distancias muy cortas, como los que ocurren en las fallas o grietas que están activas debido a la subsidencia.

En las zonas en las que se cuenta con información geodésica sobre los desplazamientos, se pueden identificar posibles errores de desenrollado en las áreas susceptibles a ello. También, contar con estimaciones obtenidas en ambas direcciones de órbita, ascendente y descendente, permite identificar posibles errores cuando se observan diferencias significativas entre ambas, que en ocasiones se logran corregir usando diferentes parámetros para realizar el desenrollado de la fase.

2. Resultados

Como producto de los estudios realizados, se generaron capas ráster para cada zona en formato GeoTIFF, con resolución de 1 arco de segundo (30 x 30 metros aproximadamente), que proporcionan el valor de hundimiento en milímetros por año en los píxeles en los que en las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) se detectaron elementos reflectores permanentes de la señal radar.

Por su cercanía, y en ocasiones por el cubrimiento de las imágenes Sentinel-1, algunas zonas de subsidencia se estudiaron en conjunto con otras zonas adyacentes, ya sea del mismo acuífero o de acuíferos⁶ contiguos. Los proyectos de procesamiento de imágenes de los casos de subsidencia que aquí se presentan se realizaron durante diferentes etapas entre 2019 y 2020, por lo que los periodos de tiempo de los datos utilizados difieren para cada zona.

Resultados de estudios previos de interferometría SAR e información geodésica disponible muestran que la magnitud de la subsidencia puede presentar variabilidad en el tiempo (INEGI, 2019), por lo que en los resultados que se presentan solo se describen los hundimientos ocurridos en el periodo especificado. La velocidad (v_h) de las estaciones

GNSS en los cuadros de información corresponde a la calculada para el periodo similar al de las imágenes Sentinel-1 que se utilizaron para el estudio, o en su defecto, a la del periodo más cercano.

En el Anexo 1 se muestran los gráficos de serie de tiempo de altura de las estaciones GNSS que se utilizaron, y la velocidad estimada para el periodo de estudio correspondiente. En los mapas de hundimiento que se muestran en esta sección, las capas ráster de hundimiento se representan sobre un sombreado del relieve del terreno derivado del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)⁷.

En los casos en que se dispone de información, 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. A manera de referencia, se incluyen también otros rasgos lineales, como carreteras y avenidas principales, en color amarillo claro, así como los nombres de las localidades representativas de cada zona y los de algunas de las que están ubicadas en donde ocurren los hundimientos de mayor magnitud.

2.1 Guadalajara, Jalisco

Acuífero

Toluquilla y Atemajac, en este último zonas de subsidencia dispersas, de menor proporción y magnitud que la del acuífero Toluquilla.

(Continúa)

⁶ <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>

⁷ <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Metadatos>

Localidades y municipios afectados

Localidades de La Tijera, San Agustín, Palomar y Los Gavilanes en Tlajomulco de Zúñiga; Santa Anita y Tlaquepaque (oeste) en el municipio de Tlaquepaque, y Tesistán y Zapopan (sureste) en el municipio de Zapopan. Se identifican también dos zonas de subsidencia, de menor extensión, en San José del Quince y el Salto, en el municipio de El Salto.

Hundimiento máximo

9.6 cm/año en La Tijera, 7.6 cm/año al sureste de Zapopan y al oeste de Tlaquepaque. 4.6 cm/año al sur de la localidad de El Salto y 3.2 cm/año al sureste de Tesistán.

Periodo de Estudio

2018. Imágenes del 25 de diciembre de 2017 al 20 de diciembre del 2018.

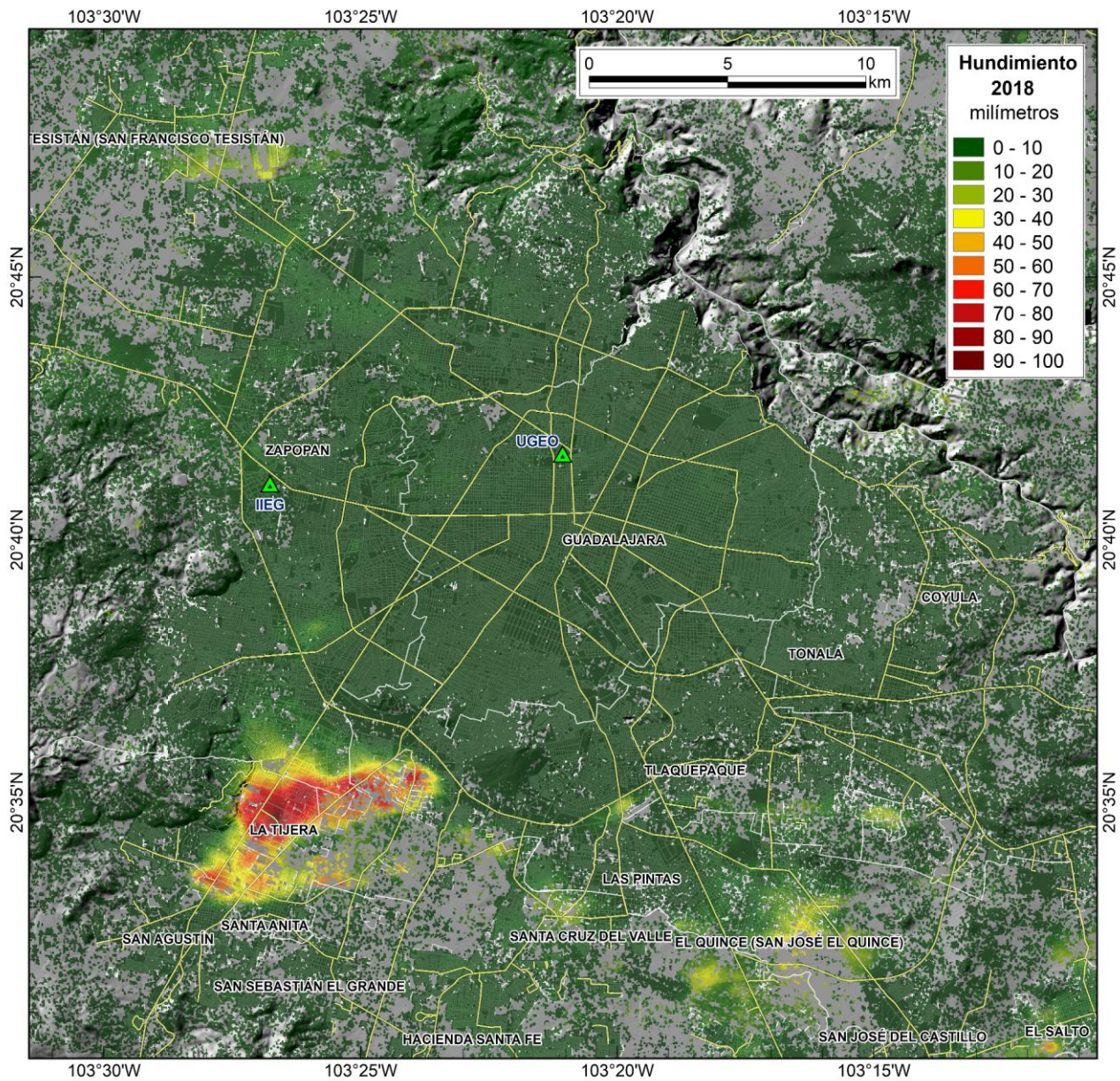
Información geodésica

Estaciones IIEG (RGNA-IIEG), $V_h = -0.009$ m/año y UGEO (TLALOCNet), $V_h = -0.010$ m/año.

Antecedentes

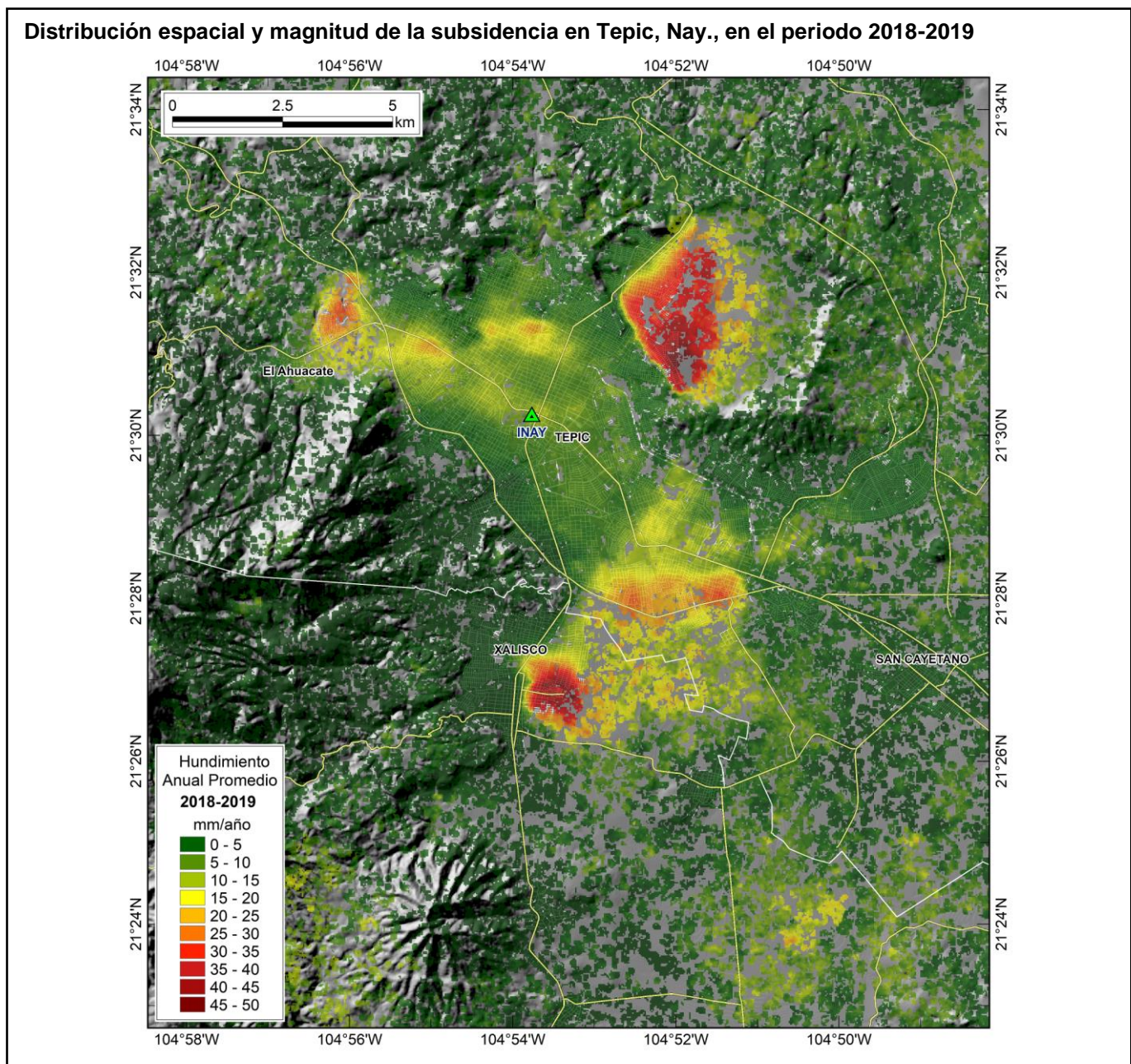
Chaussard *et al.*, 2014, Valdivia y Castillo (Geocalli), 2007.

Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Guadalajara, Jal., en 2018



2.2 Tepic, Nayarit

Acuífero	Valle de Matatipac.
Localidades y Municipios afectados	La mayor afectación se presenta en las ciudades de Tepic y Xalisco, en los municipios con el mismo nombre. En Tepic los hundimientos de mayor magnitud se presentaron al noreste de la ciudad, pero hay otras zonas con hundimientos importantes al sur y al noroeste, en donde alcanzan también a la localidad de El Ahuacate.
Hundimiento máximo	5.3 cm/año al noreste de la localidad de Tepic y 5.2 cm/año al este de la localidad de Xalisco.
Periodo de Estudio	2018-2019. Imágenes del 24 de noviembre de 2017 al 13 de enero de 2020.
Información geodésica	Estación INAY (RGNA). $V_h = -0.0138$ m/año.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.



2.3 Ciudad de México

Acuíferos	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca.
Principales localidades y alcaldías o municipios afectados	<p><i>Alcaldías de la Ciudad de México:</i> Alcaldías Venustiano Carranza e Iztacalco, ambas con hundimiento en todo su territorio, en algunas zonas con magnitudes mayores a 25 cm/año. Con fuerte hundimiento en gran parte de su territorio están las alcaldías de Iztapalapa y Tláhuac, donde se detectan máximos cercanos a 40 cm/año. En Gustavo A. Madero y Xochimilco se tienen máximos de más de 20 cm/año. Con hundimientos máximos de alrededor de 10 cm/año en gran parte del territorio, las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez también presenta afectación.</p> <p><i>Municipios y localidades en el Estado de México:</i> Los Municipios de Nezahualcóyotl (localidad de Ciudad Nezahualcóyotl) y Valle de Chalco Solidaridad (localidad de Xico) presentan hundimientos en toda su extensión, con máximos que superan los 35 cm/año. En los Municipios de Ecatepec de Morelos y Chimalhuacán se tienen hundimientos en gran parte de su territorio, con máximos de más de 25 cm/año. Municipios de Chalco y La Paz muestran también hundimientos significativos en localidades de gran concentración de población con máximos de más de 20 cm/año; de ellas, la localidad con mayor extensión afectada es Chalco de Díaz Covarrubias.</p> <p>Texcoco y Atenco son los municipios del Estado de México con los hundimientos de mayor magnitud, sin embargo, estos se presentan en zonas de escasa concentración de población. Esta zona de subsidencia se extiende también a varias localidades de los municipios de Chalco, Texcoco, Ixtapaluca y Atenco, así como a las alcaldías de Coyoacán y Tlalpan, con hundimientos de magnitud menor a los 5 cm/año.</p> <p>Por la fuerte magnitud de los hundimientos en la zona, la escala de la paleta de colores en el mapa hace poco notables los hundimientos menores a 5 cm/año, que pueden ocasionar también fracturamiento del suelo por los asentamientos diferenciales que ocurren en el terreno.</p>
Hundimiento máximo	39.9 cm/año en Tláhuac (al noreste de Xochimilco), 39 cm/año al oeste de Texcoco y en Ciudad Nezahualcóyotl, y 35 cm/año al oeste de Xico.
Periodo de Estudio	2019 (nominal). Imágenes de septiembre de 2018 a septiembre de 2019.
Información geodésica	Estaciones permanentes: ICMX ¹ $V_h = -0.014$ m/año, MMX1 ² $V_h = -0.277$ m/año, MXTM ³ $V_h = -0.258$ m/año, TNGF ⁴ $V_h = -0.001$ m/año, UTUL ⁴ $V_h = -0.034$ m/año y UFXN ⁴ $V_h = -0.113$ m/año.
Fuente de fallas y/o grietas	CENAPRED (http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/)
Antecedentes	Cabral-Cano <i>et al.</i> , 2010; Chaussard <i>et al.</i> , 2014 y Cigna <i>et al.</i> , 2011, entre otros.

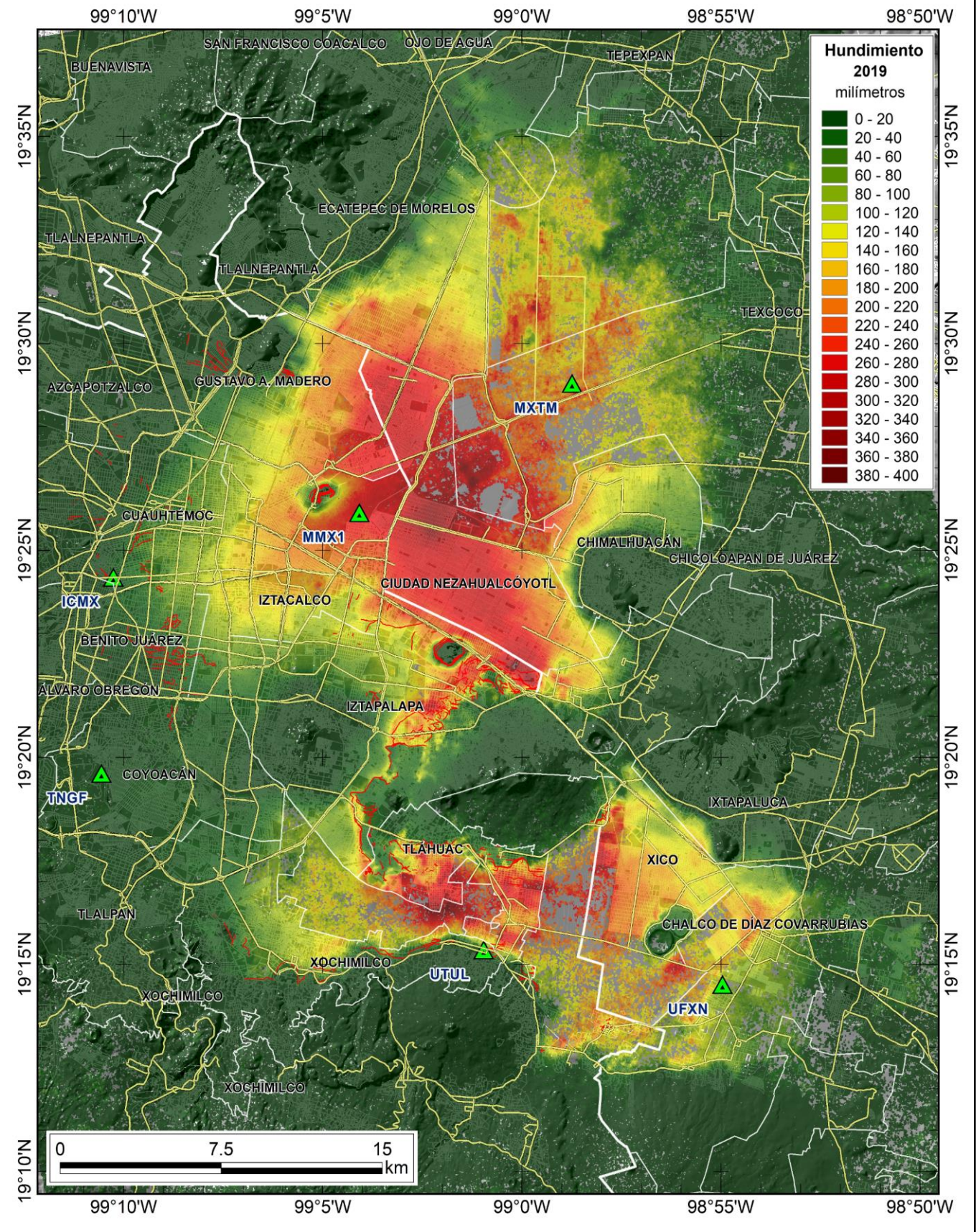
¹ RGNA.

² FAA (WAAS).

³ Administración desconocida (Datos de altura obtenidos de NGL (<http://geodesy.unr.edu/>)).

⁴ TLALOCNet .

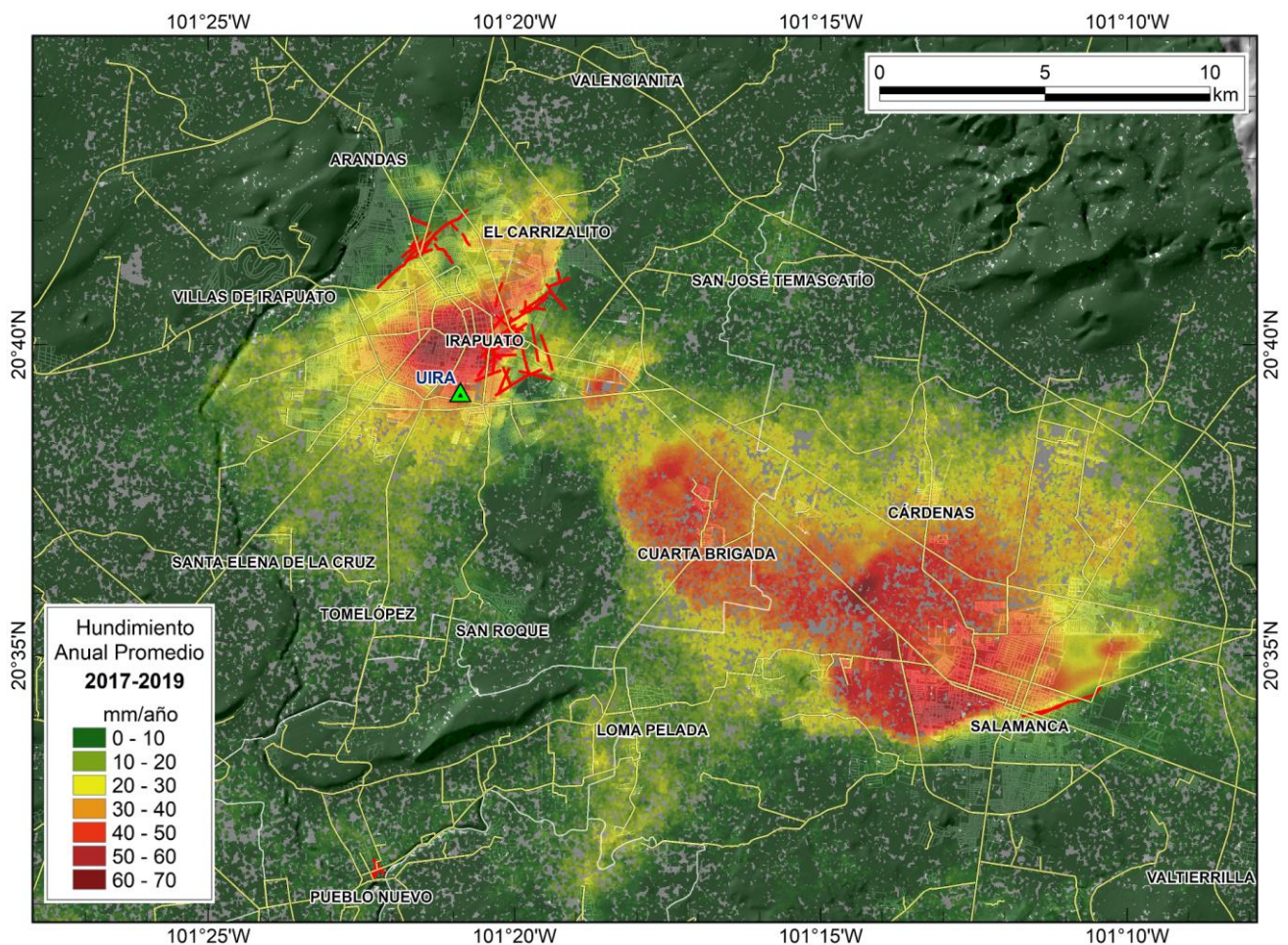
Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en la ciudad de México (y zonas contiguas de los acuíferos de Texcoco y Chalco-Amecameca) en 2019



2.4 Irapuato-Salamanca, Guanajuato

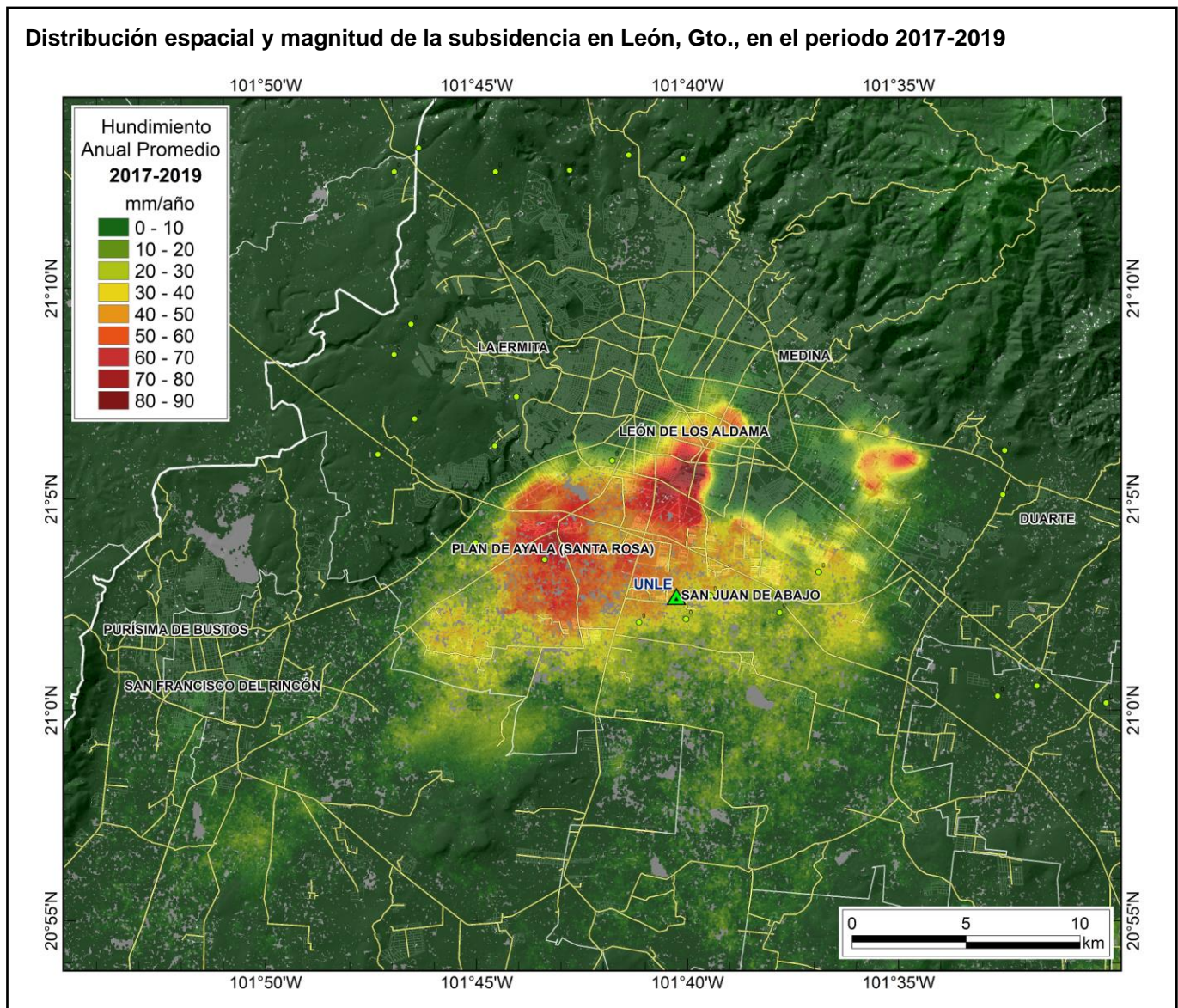
Acuífero	Irapuato-Valle de Santiago.
Localidades y Municipios afectados	Mayormente la ciudad de Irapuato y, con hundimientos de menor magnitud, la localidad de El Carrizalito. En el municipio de Salamanca, la ciudad de Salamanca y las localidades Cuarta Brigada, Cárdenas, San Vicente de Flores y Cerro Blanco de Mancera. Otras localidades de Irapuato y Salamanca presentan hundimientos inferiores a 3 cm/año, que se extienden hasta el municipio de Pueblo Nuevo (oeste del municipio).
Hundimiento máximo	7.1 cm/año al noroeste de la ciudad de Salamanca y 6.9 cm/año en el centro de la ciudad de Irapuato; con hundimientos significativos también al suroeste de la primera y al este de la segunda.
Periodo de Estudio	2017-2019. Imágenes del 1 de diciembre de 2016 al 19 de noviembre de 2019.
Información geodésica	Estación UIRA (TLALOCNet). $V_h = -0.038$ m/año.
Fuente de fallas y/o grietas	INEGI.
Antecedentes	Rodríguez <i>et al.</i> , 2008 y Chaussard <i>et al.</i> , 2014.

Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Irapuato y Salamanca Gto., en el periodo 2017-2019



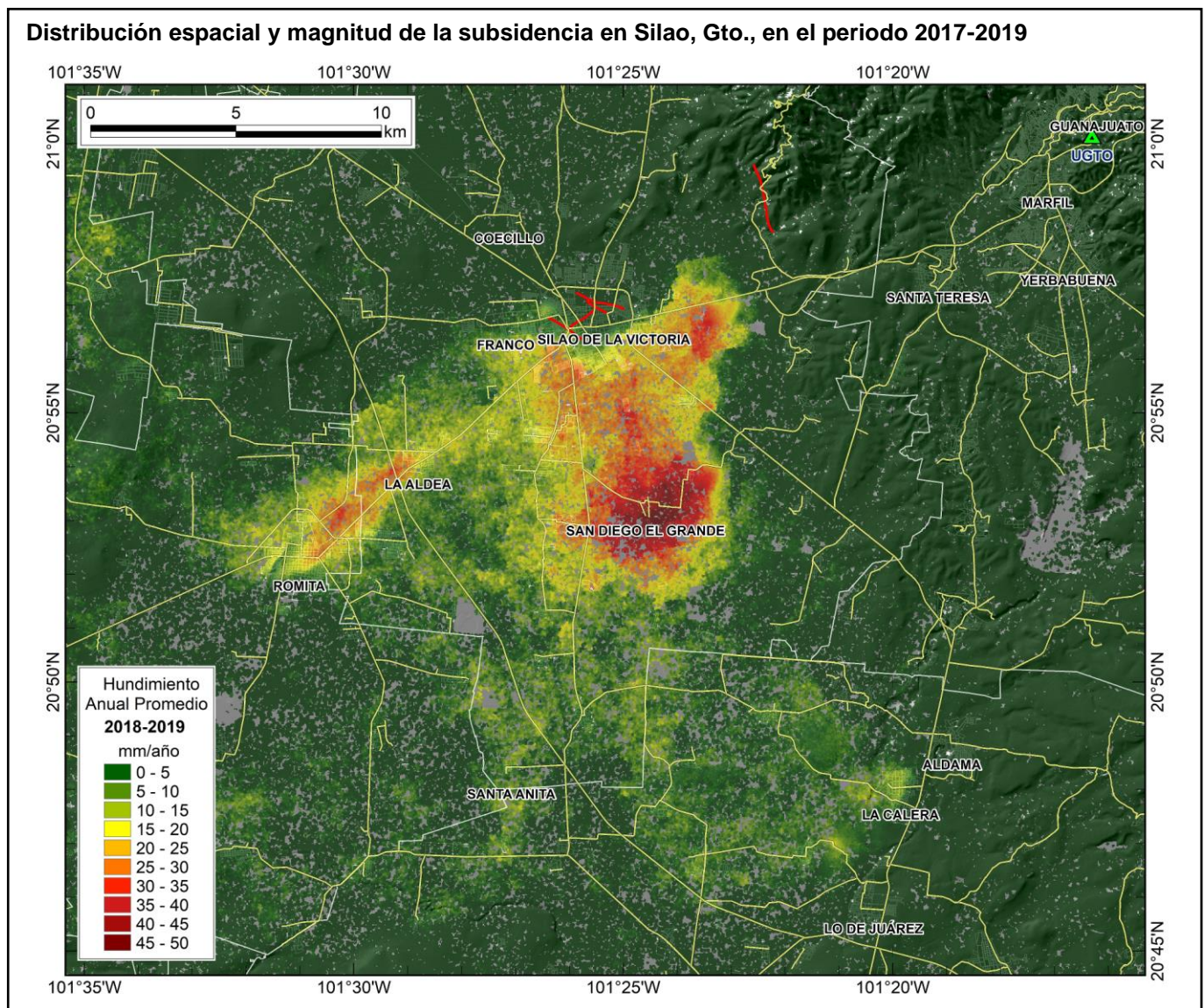
2.5 León, Guanajuato

Acuífero	Valle de León.
Localidades y municipios afectados	Los hundimientos de mayor magnitud se presentan en el sur de la ciudad de León de los Aldama y las localidades aledañas de Plan de Ayala (Santa Rosa) y San Juan de Abajo. La zona de subsidencia afecta con hundimientos de menor magnitud a algunas otras localidades al sur del municipio de León y se extiende hasta el municipio de San Francisco del Rincón.
Hundimiento máximo	9.3 cm/año en el centro-sur de la ciudad de León y 7.9 cm/año al sur de la localidad de Plan de Ayala.
Periodo de Estudio	2017-2019. Imágenes del 1 de diciembre de 2016 al 19 de noviembre de 2019.
Información geodésica	Estación UNLE (TLALOCNet). $V_h = -0.016$ m/año.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014 y Cabral-Cano <i>et al.</i> , 2015.



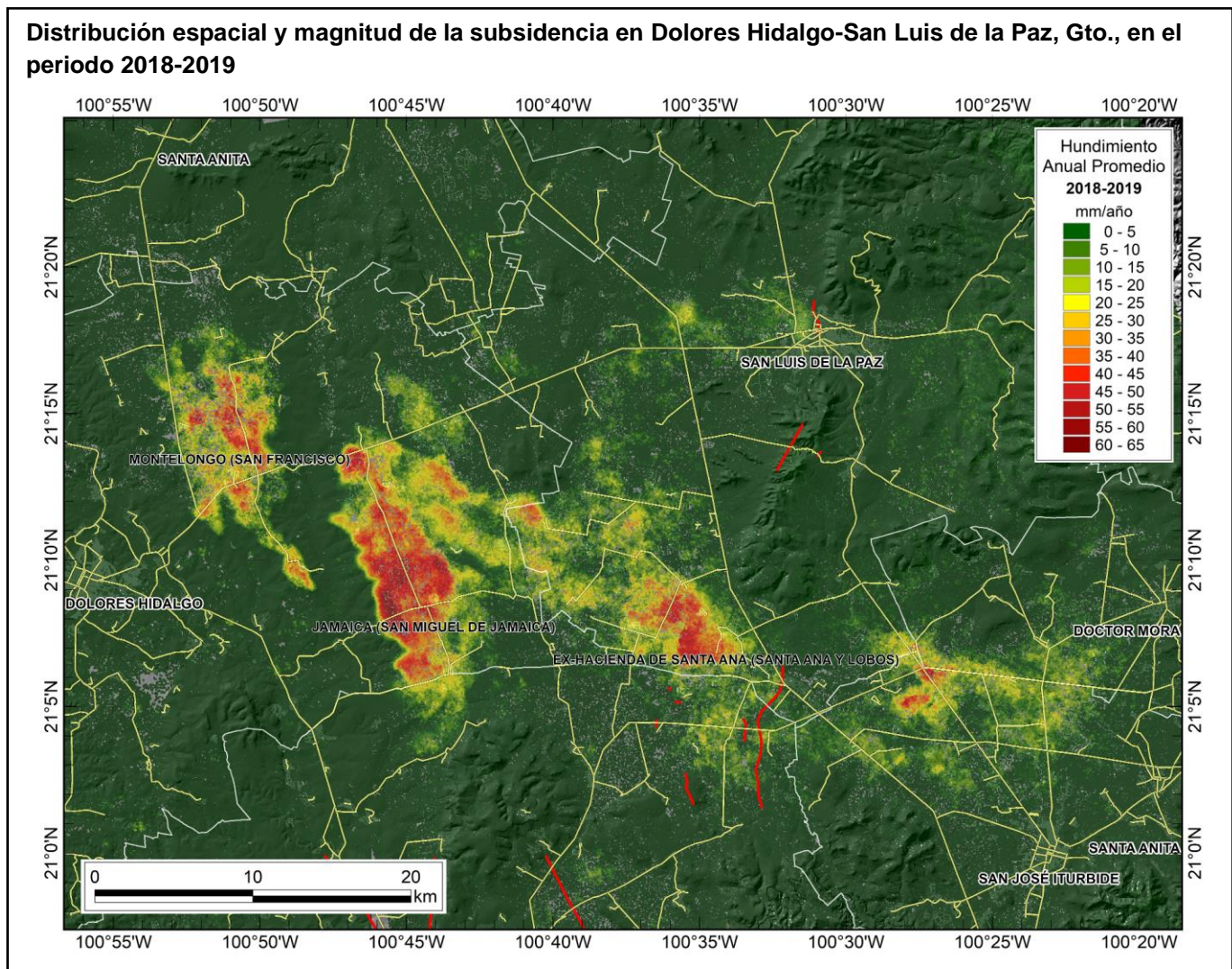
2.6 Silao, Guanajuato

Acuífero	Silao-Romita.
Localidades y municipios afectados	En el municipio de Silao de la Victoria, la afectación se da al sur de la ciudad que lleva el mismo nombre y en las localidades de Franco y La Aldea, con los hundimientos más significativos en la localidad de San Diego el Grande. Al suroeste de la zona, en la localidad de Romita en el municipio con mismo nombre.
Hundimiento máximo	5.3 cm/año al sureste de la ciudad de Silao de Victoria en la localidad de San Diego el Grande.
Periodo de Estudio	2017-2019. Imágenes del 1 de diciembre de 2016 al 19 de noviembre de 2019.
Información geodésica	Estación UGTO (RGNA). $V_h = 0.000$ m/año.
Fuente de fallas y/o grietas	INEGI, SGM (1999).
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.



2.7 Dolores Hidalgo-San Luis de la Paz, Guanajuato

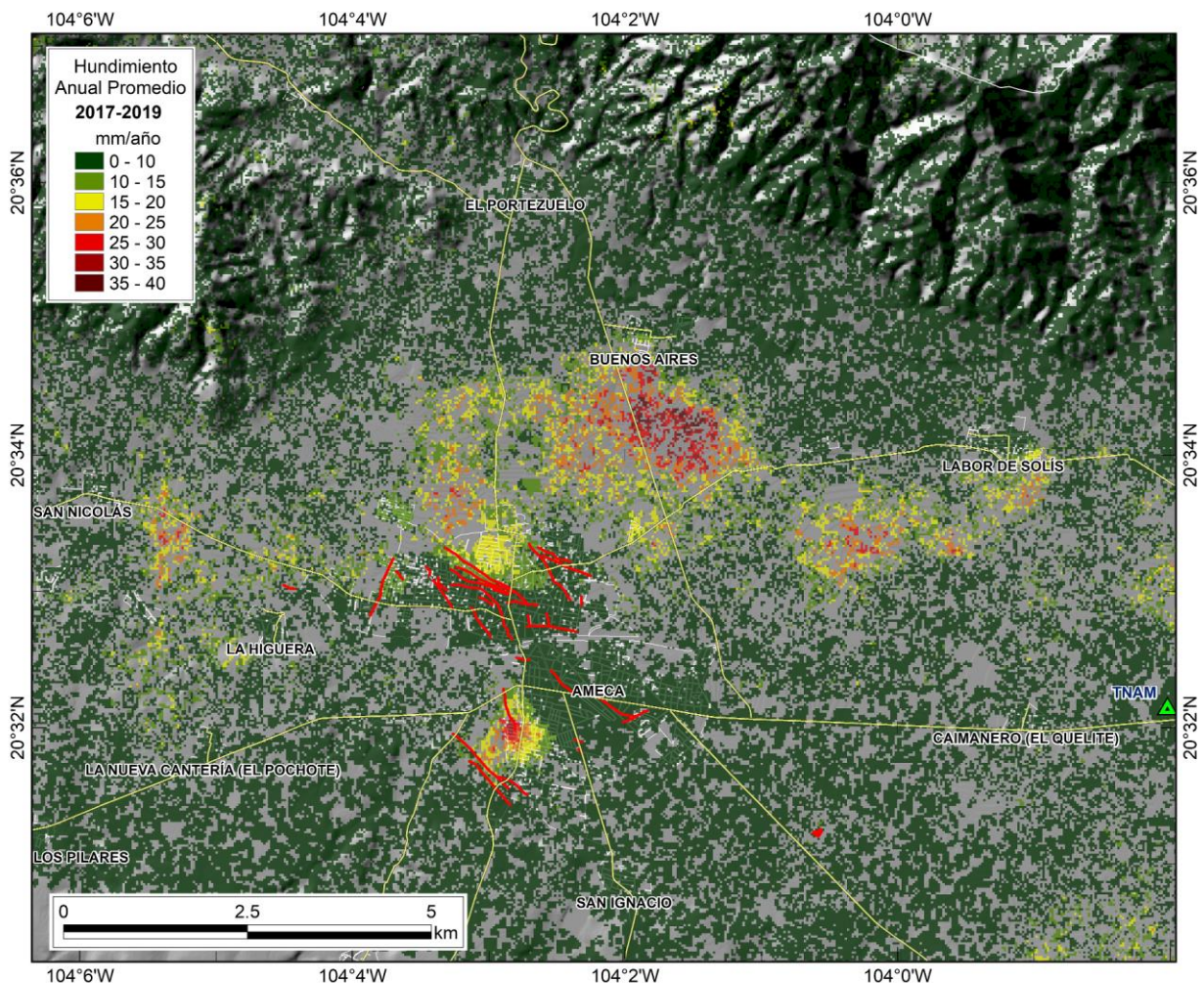
Acuíferos	Cuenca Alta del Río Laja, Laguna Seca y Dr. Mora – San José de Iturbide.
Localidades y municipios afectados	Los hundimientos se dan mayormente en áreas de cultivo de los municipios de Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia de México, San Luis de la Paz y San José Iturbide. En el municipio de Dolores Hidalgo solo las localidades de Montelongo (San Francisco) y Jamaica (San Miguel de Jamaica) se encuentran dentro de las zonas de mayor hundimiento. En el municipio de San Luis de la Paz la localidad Exhacienda de Santa Ana (Santa Ana y Lobos) es la que está ubicada en la zona de mayor hundimiento.
Hundimiento máximo	6.3 cm/año al este de Dolores Hidalgo, 5.4 cm/año en la zona al sur del municipio de San Luis de la Paz y 5.3 cm/año en la zona al noroeste del municipio de San José Iturbide.
Periodo de Estudio	2018-2019. Imágenes del 6 de diciembre de 2017 al 1 de enero de 2020.
Fuente de fallas y/o grietas	INEGI, SGM (1999).
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.



2.8 Ameca, Jalisco

<i>Acuífero</i>	Ameca.
<i>Localidades y municipios afectados</i>	Ciudad de Ameca y localidad Buenos Aires, en el municipio de Ameca.
<i>Hundimiento máximo</i>	4 cm/año al sur de la localidad de Buenos aires y 3.6 cm/año al suroeste de la localidad de Ameca. Se detectan también una zona con hundimientos de 3 cm/año al suroeste de la localidad de Labor de Solís. En esta zona predominan áreas de cultivo y de vegetación que no son las más apropiadas para la interferometría, por lo que no se logró obtener una definición clara de algunas áreas afectadas.
<i>Periodo de Estudio</i>	2017-2019. Imágenes del 24 de noviembre de 2016 al 8 de enero de 2020.
<i>Información geodésica</i>	Estación TNAM (TLALOCNet). $V_h = -0.014$ m/año.
<i>Fuente de fallas y/o grietas</i>	Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos Jalisco.
<i>Antecedentes</i>	Consejo de Recursos Minerales – Municipio de Ameca, 2012.

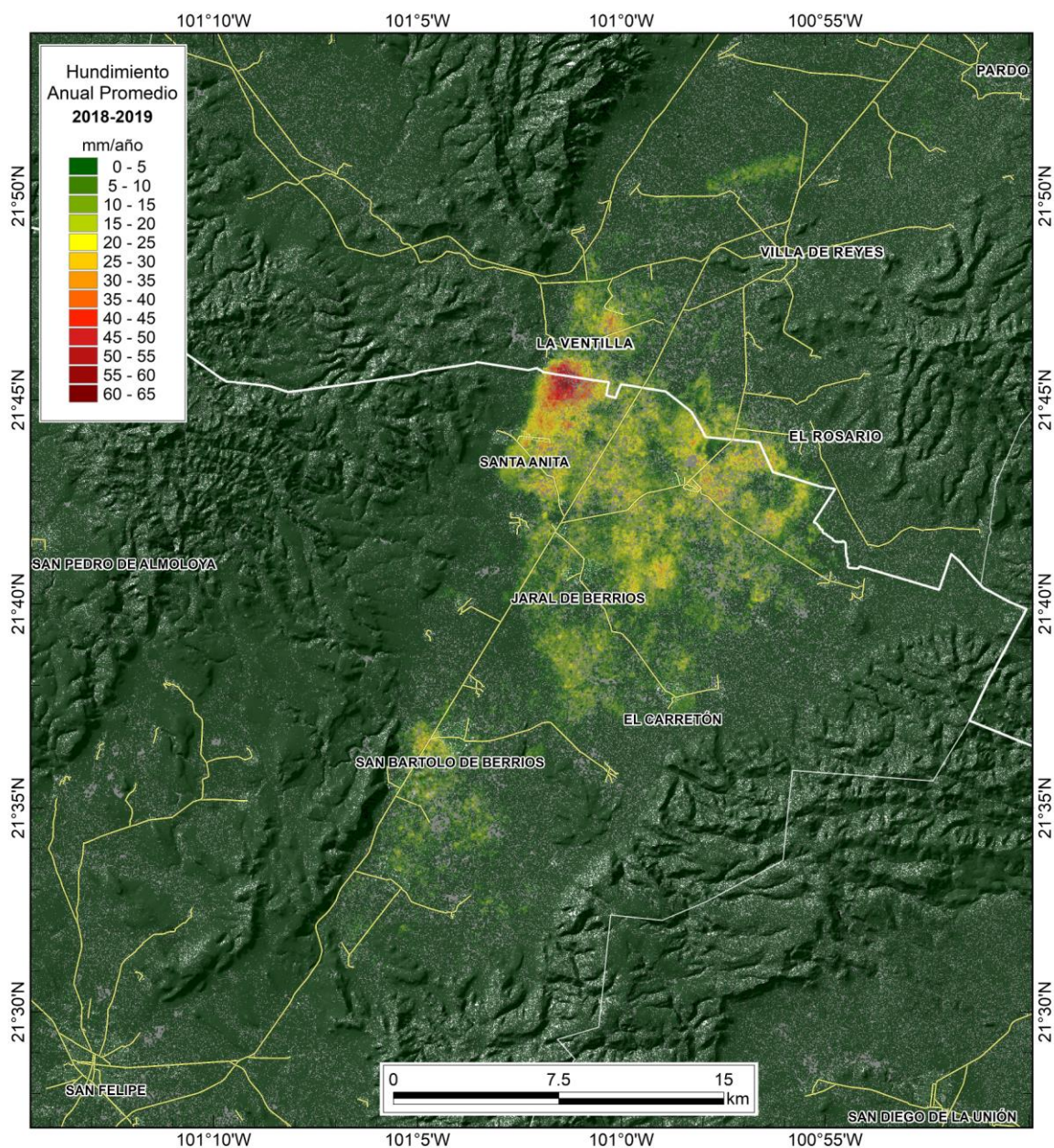
Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Ameca, Jal., en el periodo 2017-2019



2.9 Villa de Reyes, San Luis Potosí-San Felipe, Guanajuato

Acuífero	Jaral de Berrios – Villa de Reyes.
Localidades y municipios afectados	Localidad de Santa Anita, municipio de San Felipe, Gto. Los hundimientos más significativos ocurrieron en áreas de cultivo en el límite entre los Estados de San Luis Potosí y Guanajuato, al sur de la localidad de La Ventilla, municipio de Villa de Reyes, y al norte de Santa Anita, municipio de San Felipe.
Hundimiento máximo	6.5 cm/año, al sur de la localidad de La Ventilla, Villa de Reyes, S.L.P.
Periodo de Estudio	2018-2019. Imágenes del 6 de diciembre de 2017 al 15 de enero de 2020.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.

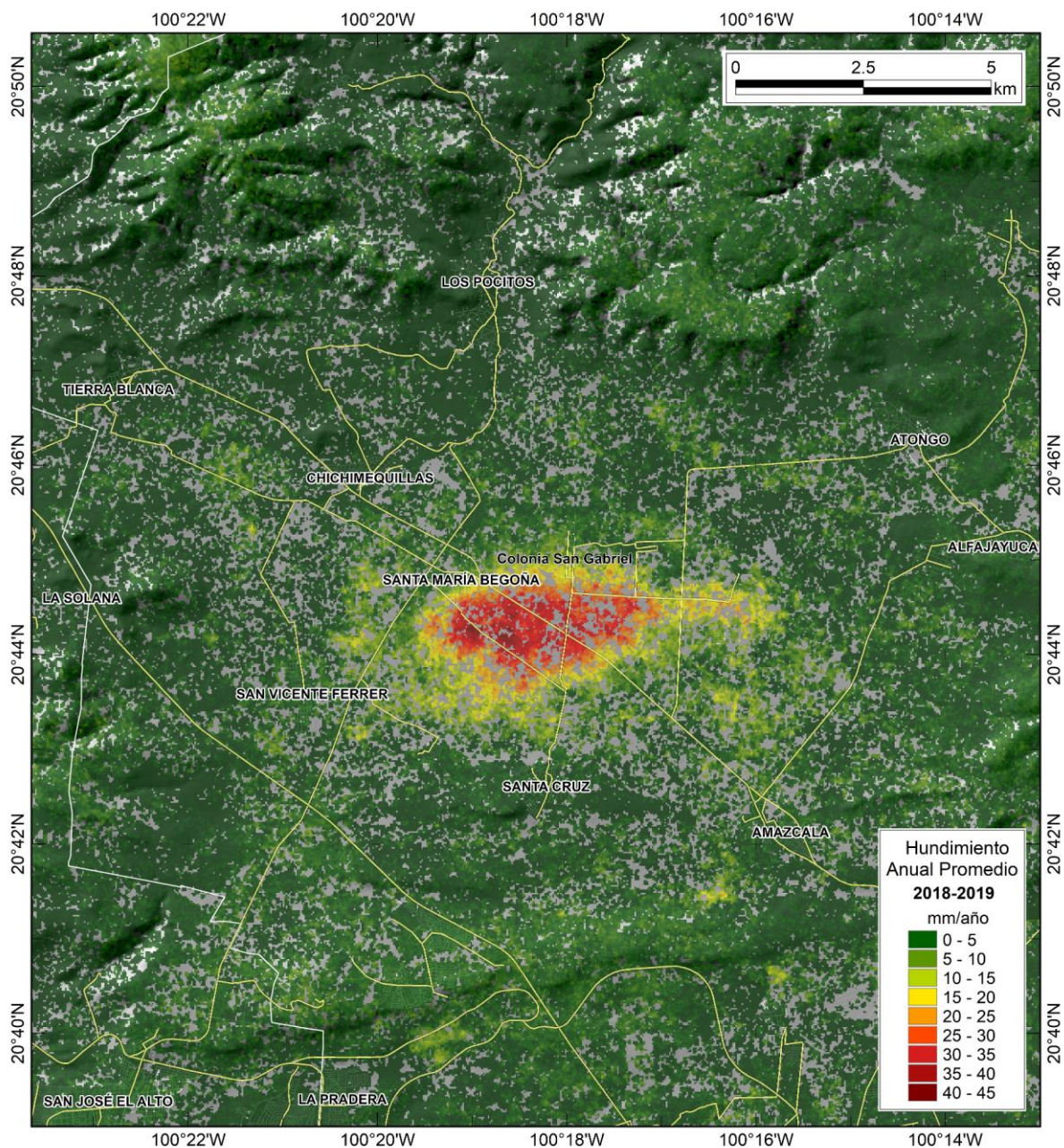
Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Villa de Reyes, S.L.P. y San Felipe, Gto., en el periodo 2018-2019



2.10 Santa María Begoña, Querétaro

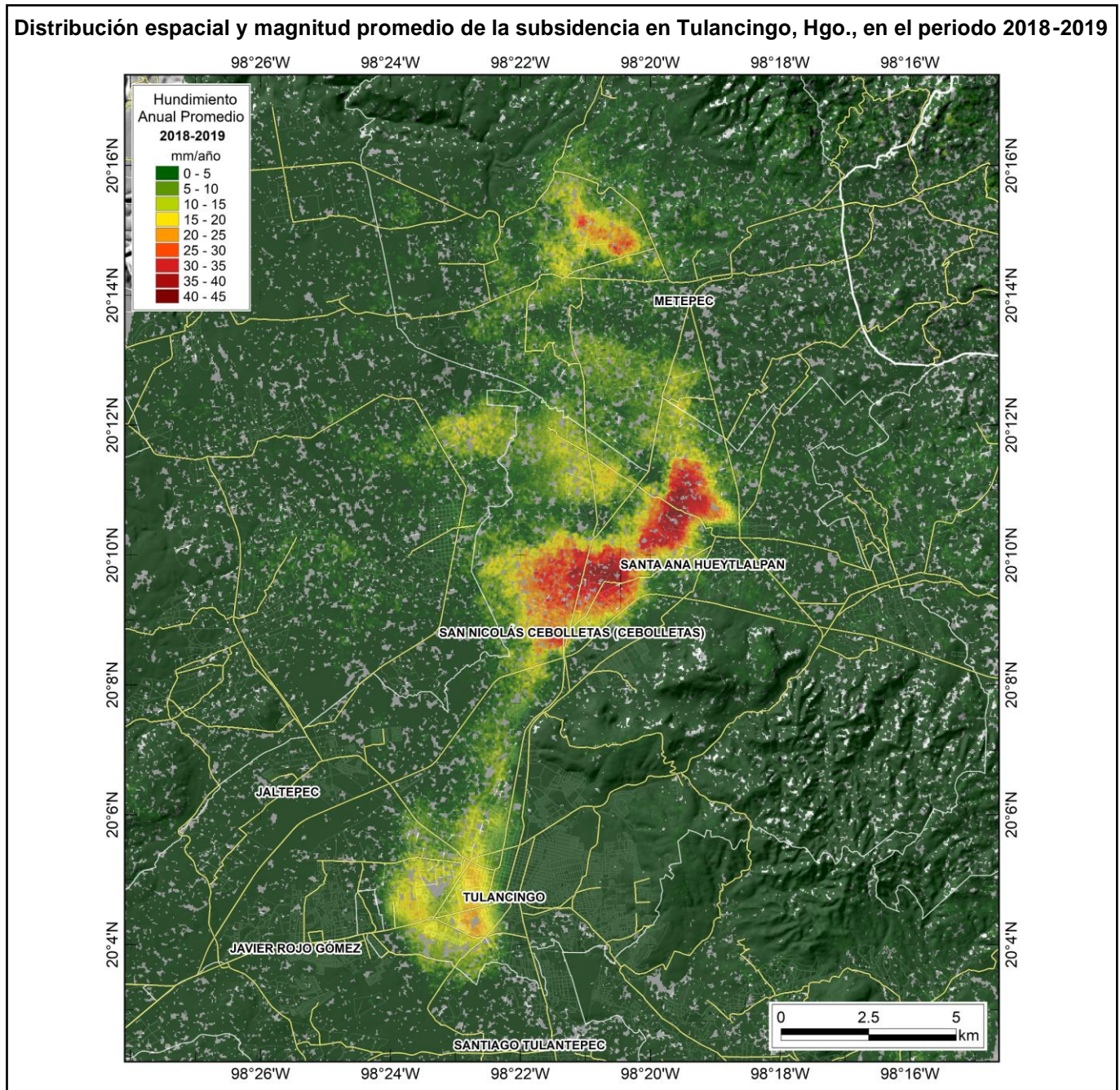
Acuífero	Valle de Amazcala.
Localidades y municipios afectados	Localidades de Santa María Begoña y Colonia San Gabriel, municipio de El Marqués; los hundimientos de mayor magnitud ocurren en áreas de cultivo, al sur de dichas localidades.
Hundimiento máximo	4.5 cm/año, al sur de la localidad de Santa María Begoña.
Periodo de Estudio	2018-2019. Imágenes del 6 de diciembre de 2017 al 4 de enero de 2020.
Antecedentes	Sin antecedentes documentados.

Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Santa María Begoña, Qro., en el periodo 2018-2019



2.11 Tulancingo, Hidalgo

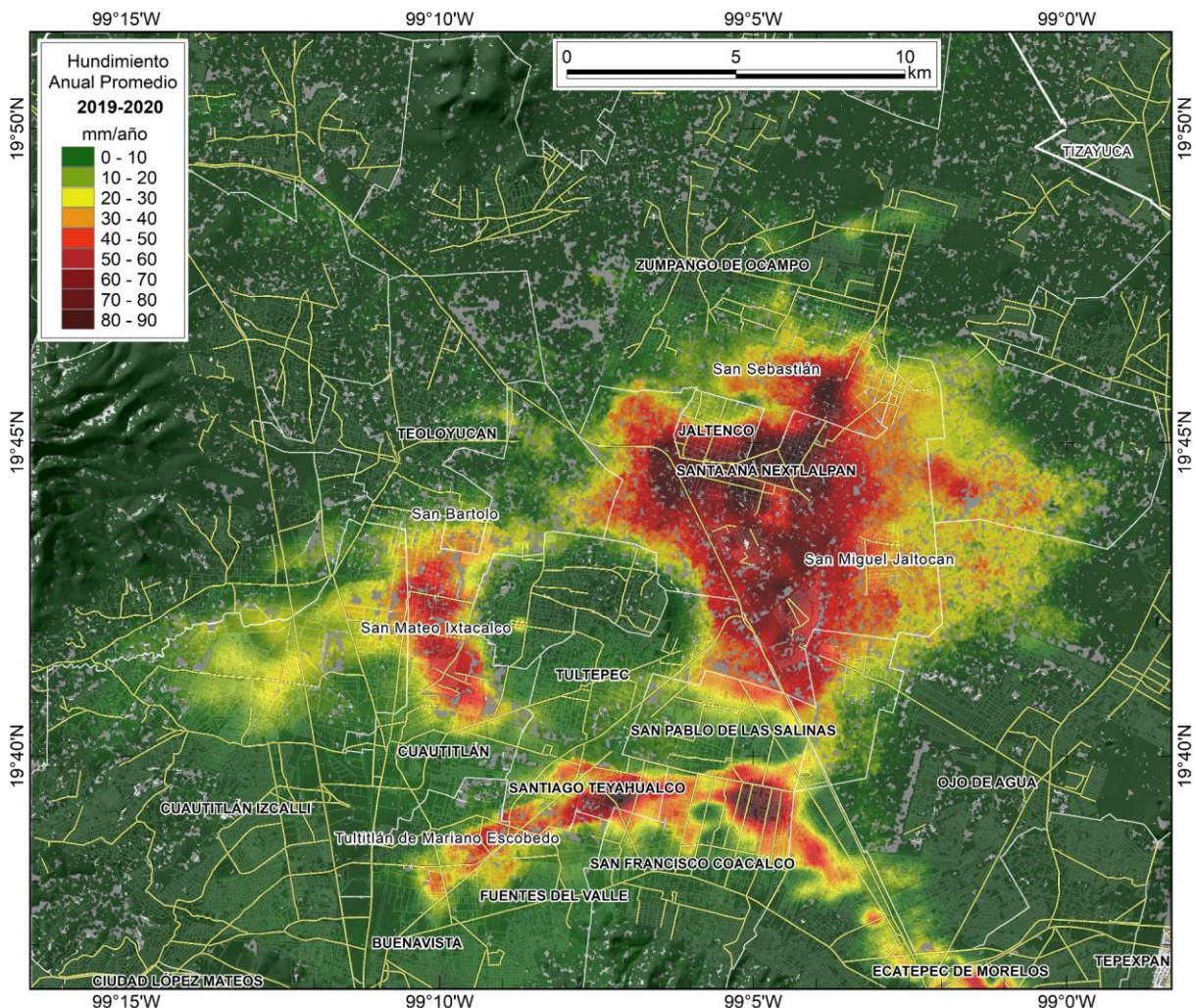
<i>Acuífero</i>	Valle de Tulancingo.
<i>Localidades y municipios afectados</i>	Santa Ana Hueytlalpan, San Nicolás Cebolletas (Cebolletas) y Tulancingo en el municipio de Tulancingo. En el municipio de Metepec se observa una zona de subsidencia al noroeste de la localidad que lleva el mismo nombre.
<i>Hundimiento máximo</i>	4.5 cm/año en el oeste de Santa Ana Hueytlalpan y al norte de San Nicolás Cebolletas. 3.2 cm/año al noroeste de la localidad de Metepec y 2.3 cm/año en la zona oeste de la ciudad de Tulancingo.
<i>Periodo de Estudio</i>	2018-2019. Imágenes del 22 de noviembre de 2017 al 11 de enero de 2020.
<i>Antecedentes</i>	Sin antecedentes documentados.



2.12 Cuautitlán-Nextlalpan, Estado de México

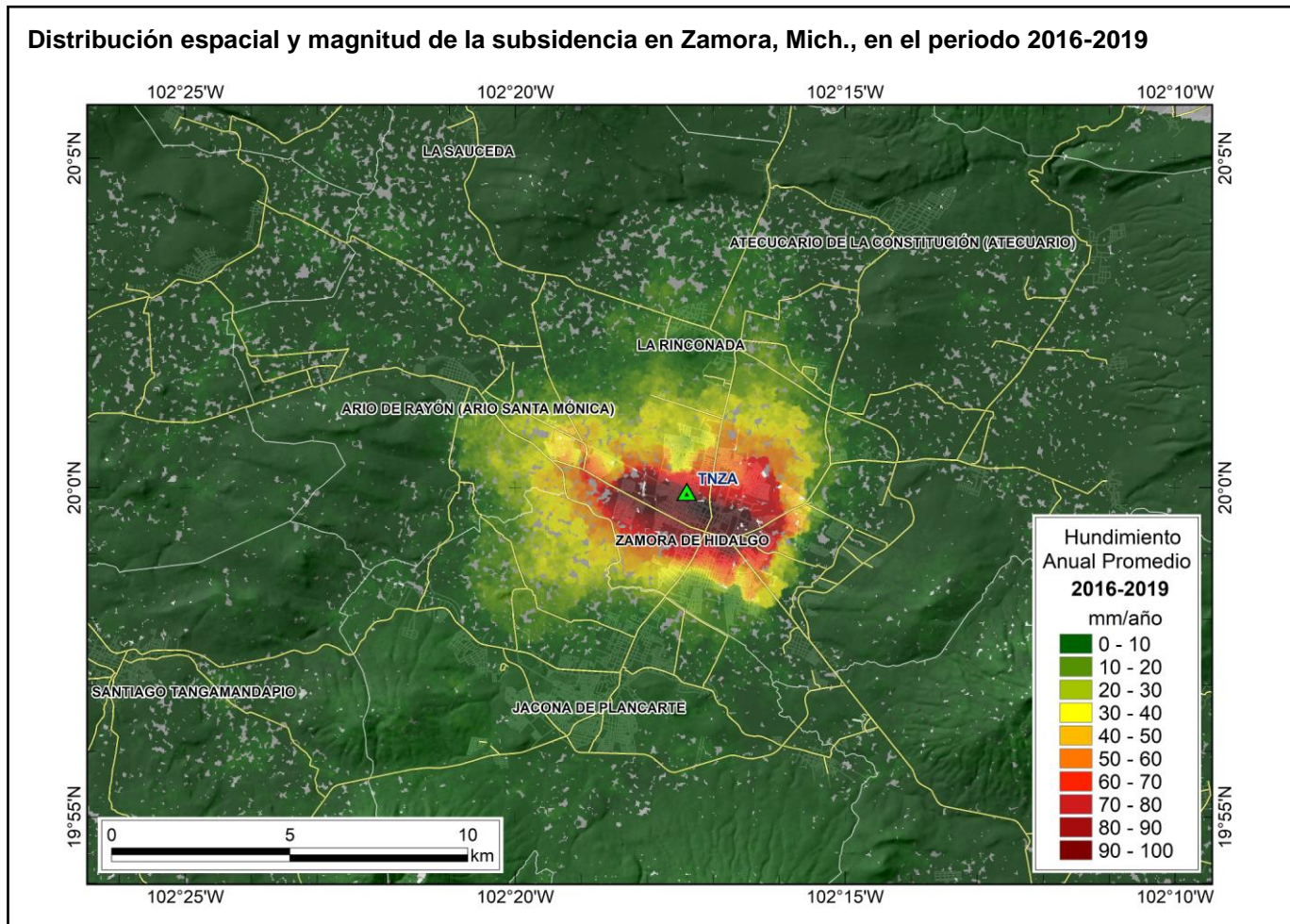
Acuífero	Cuautitlán – Pachuca.
Localidades y municipios afectados	La mayor afectación se presenta en las localidades de Santa Ana Nextlalpan y San Miguel Jaltocan, en el municipio de Nextlalpan, y se extienden a las áreas rurales aledañas. Los hundimientos de mayor magnitud también afectan a localidades de Santiago Teyahualco, municipio de Tultepec; San Francisco Coacalco, municipio de Coacalco de Berriozábal, y Jaltenco en el municipio con mismo nombre. También se presentan hundimientos importantes en San Mateo Ixtacalco, municipio de Cuautitlán y en Tultitlán de Mariano Escobedo, municipio de Tultitlán. En menor proporción ocurrieron hundimientos en las localidades de San Bartolo en el municipio de Teoloyucan y San Sebastián, municipio de Zumpango.
Hundimiento máximo	8.4 cm/año al sur de San Sebastián, en el municipio de Zumpango, 8.3 cm/año en de Santa Ana Nextlalpan y Santiago Teyahualco; y 7.8 cm /año en San Francisco Coacalco.
Periodo de Estudio	2019-2020. Imágenes del 13 de noviembre de 2018 al 1 de enero de 2021.
Antecedentes	Cigna y Tapete, 2021.

Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Cuautitlán-Nextlalpan, Estado de México, en el periodo 2019-2020



2.13 Zamora, Michoacán

Acuífero	Zamora.
Localidades y municipios afectados	Ciudad de Zamora de Hidalgo y localidad Ario de Rayón (Ario Santa Mónica) en el municipio de Zamora; y Jacona de Plancarte en el municipio de Jacona.
Hundimiento máximo	10.2 cm/año, en un área a menos de un kilómetro al norte de la zona centro de la ciudad de Zamora de Hidalgo.
Periodo de Estudio	2016-2019. Imágenes del 22 de diciembre de 2015 al 6 de enero de 2020.
Información geodésica	Estación TNZA (TLALOCNet). $V_h = -0.075$ m/año.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.

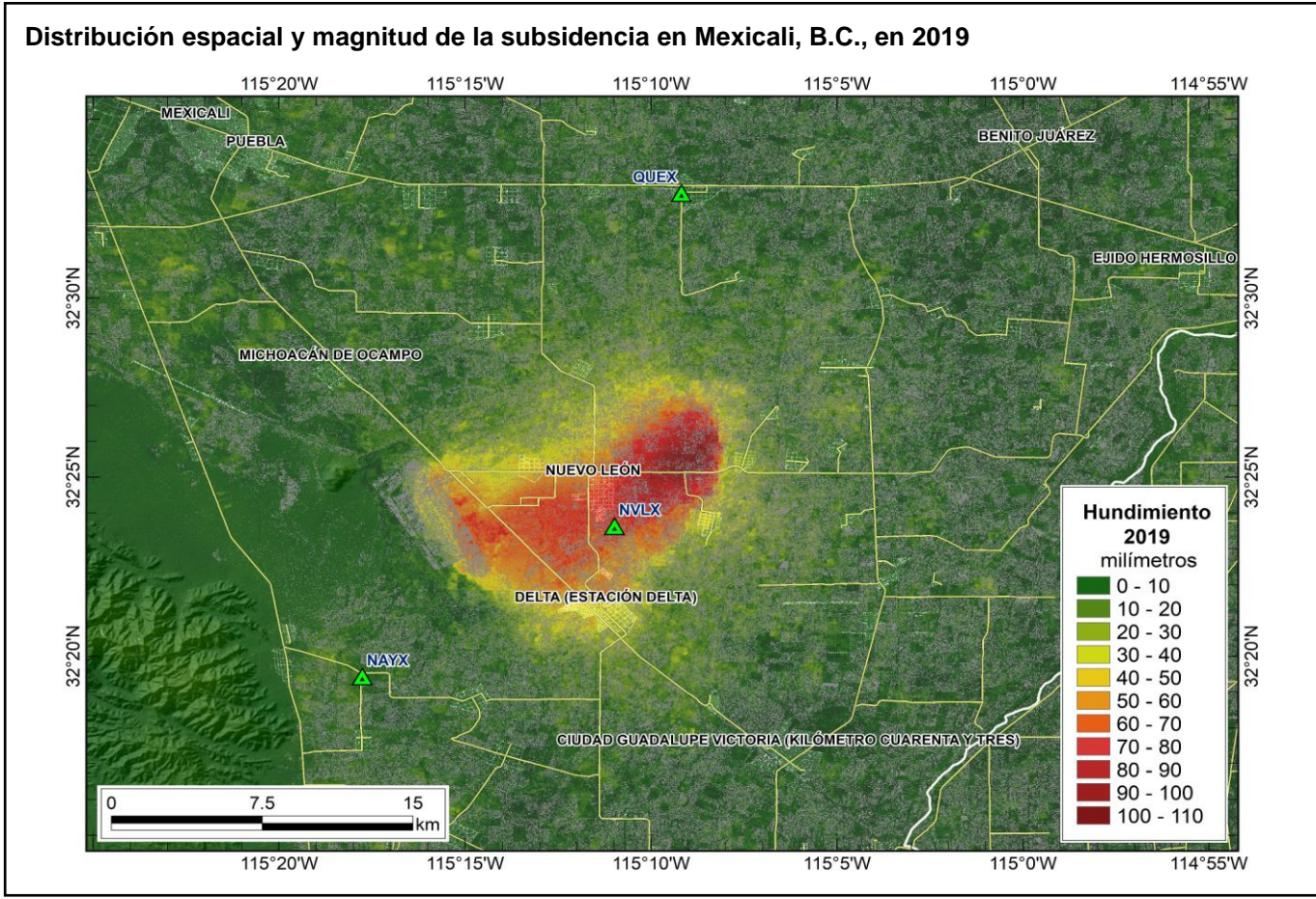


2.14 Valle de Mexicali, Baja California

Acuífero	Valle de Mexicali.
Localidades y municipios afectados	Localidades de Nuevo León, Ejido Miguel Hidalgo y Delta (Estación Delta) en el municipio de Mexicali. La zona con hundimientos de mayor magnitud es un área de cultivo al noreste de la localidad de Nuevo León.

(Continúa)

Hundimiento máximo	11.2 cm/año, al noreste de la localidad de Nuevo León.
Periodo de Estudio	2019. Imágenes del 6 de enero de 2019 al 24 de febrero de 2020.
Información geodésica	Estaciones: QUEX (TLALOCNet), $V_h = -0.009$ m/año; NAYX (CICESE REGNOM ⁸), $V_h = 0.000$ m/año y NVLX (CICESE REGNOM), $V_h (2014-2016) = -0.069$ m/año (sin datos actuales disponibles).
Antecedentes	Glowaka <i>et al.</i> , 2010 y Sarychikhina <i>et al.</i> , 2011.

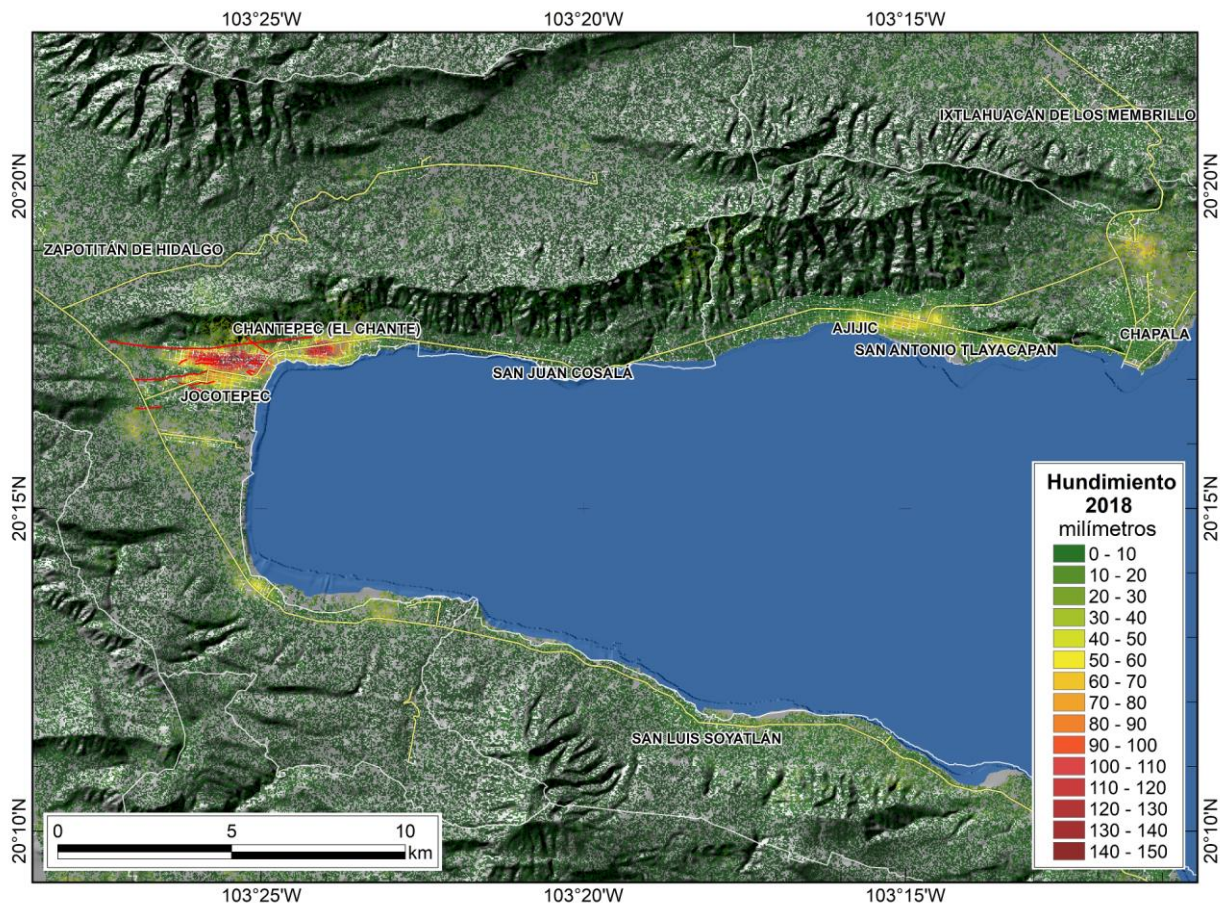


2.15 Jocotepec-Ajijic, Jalisco

Acuífero	Chapala.
Localidades y municipios afectados	Jocotepec y Chantepec (El Chante) en el municipio de Jocotepec; Ajijic y San Antonio Tlayacapan en el municipio de Chapala.
Hundimiento máximo	15 cm/año en Jocotepec, 12.9 cm/año en Chantepec, y 6.2 cm/año en la zona oeste de Ajijic. Se observa también una zona de menor extensión al sureste de la localidad de Chapala Haciendas, con un hundimiento máximo de 6.5 cm.
Periodo de Estudio	2018. Imágenes del 25 de diciembre de 2017 al 20 de diciembre del 2018.
Antecedentes	Hernández-Marín <i>et al.</i> , 2014.

⁸ González-Ortega *et al.*, 2019.

Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en Jocotepec y Ajijic, Jal., en 2018



Anexo

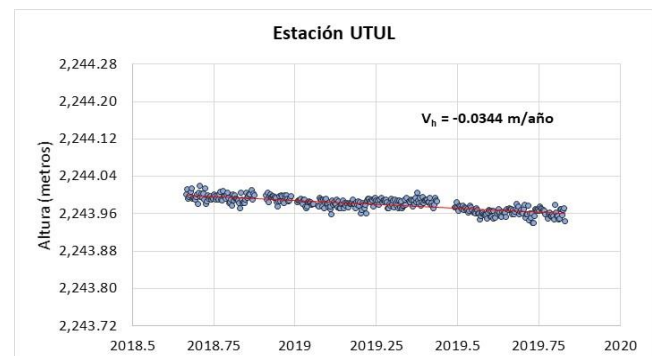
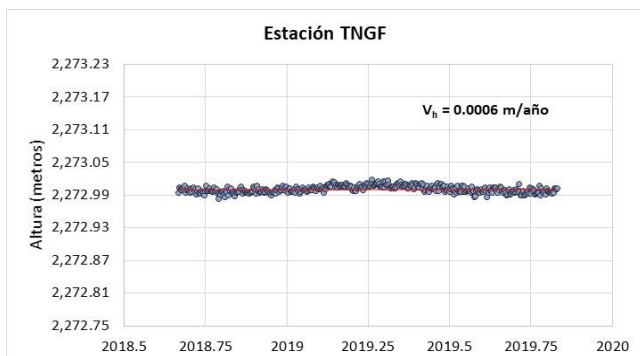
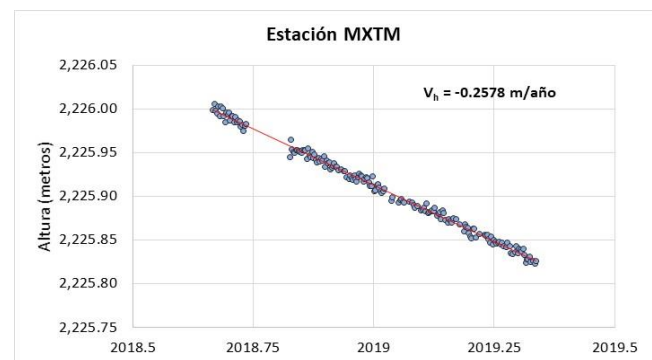
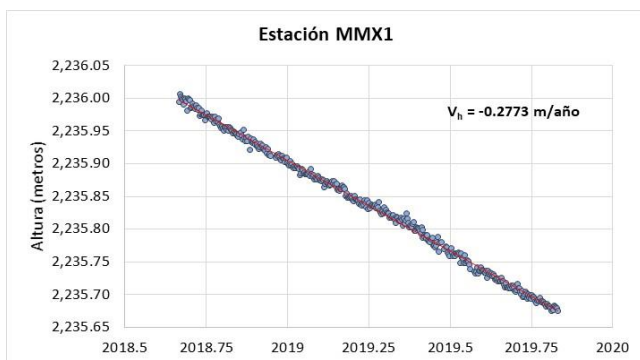
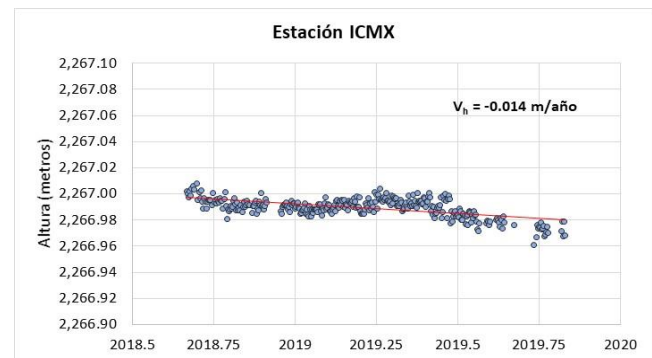
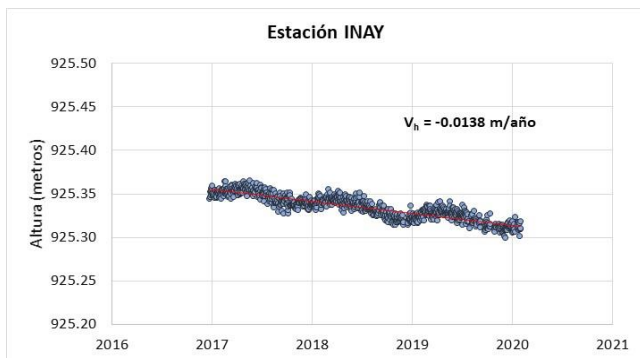
A. Series de tiempo de la altura en las estaciones GNSS permanentes ubicadas en las zonas de subsidencia

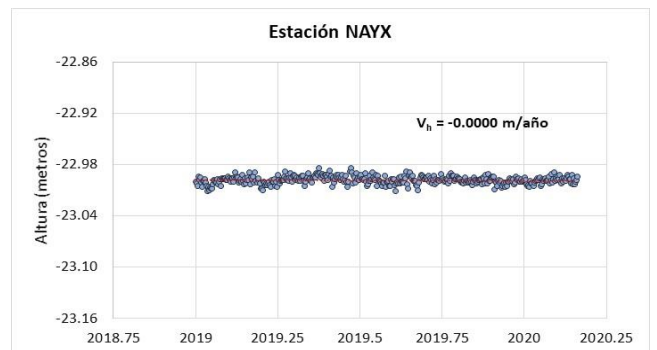
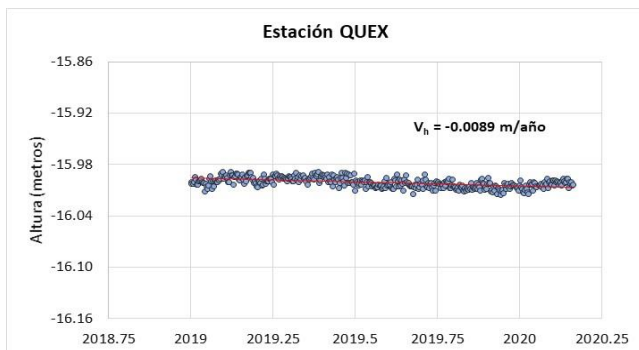
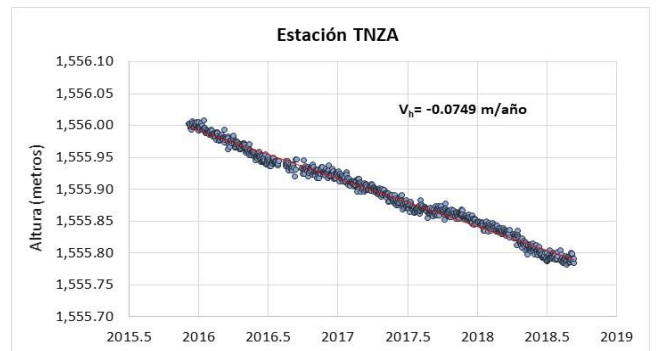
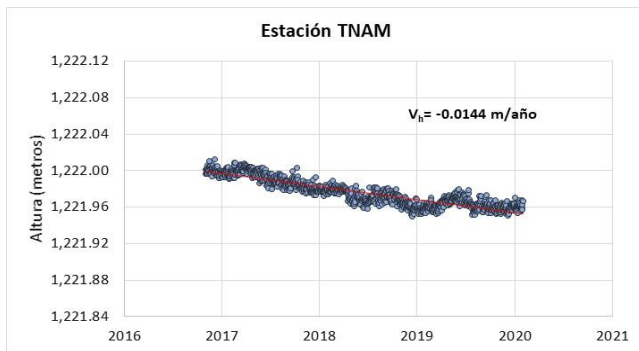
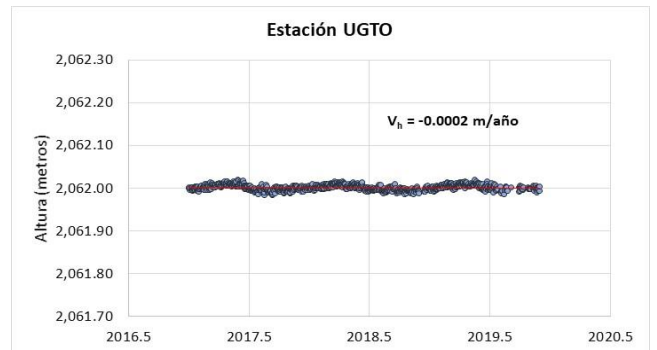
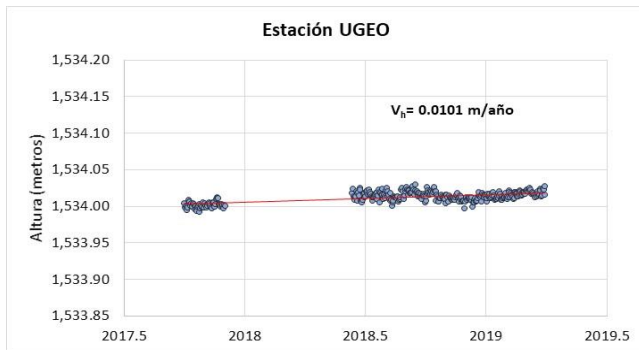
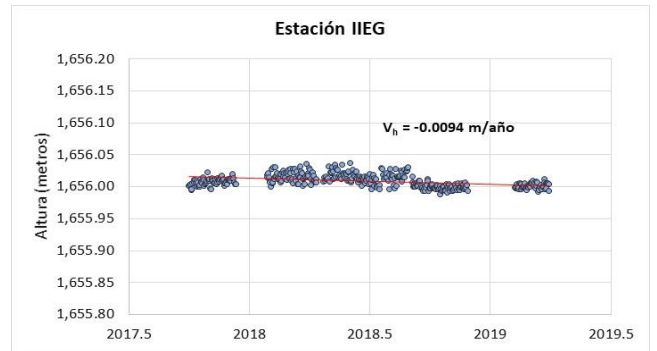
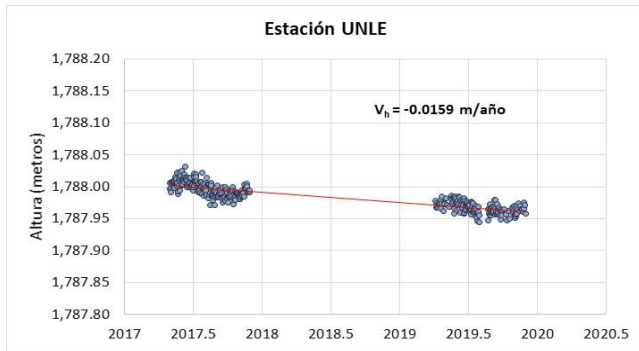
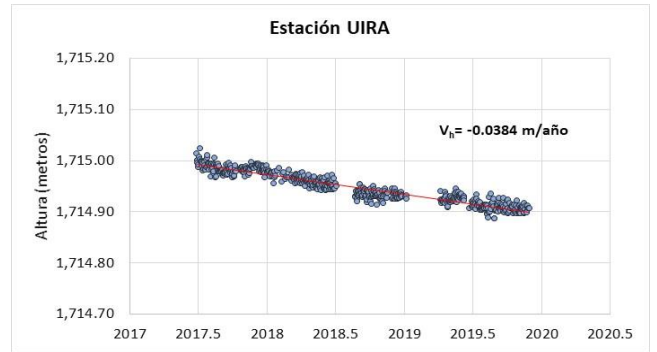
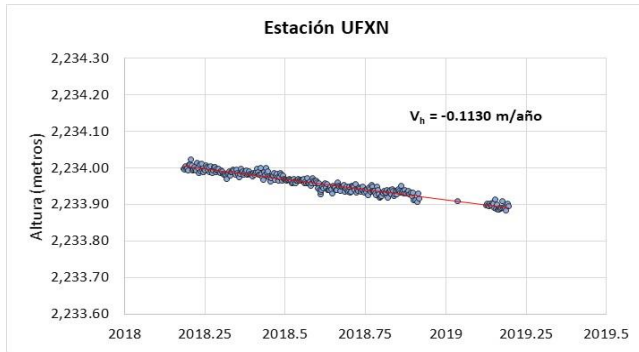
A manera de control de calidad, la verificación de resultados de la interferometría SAR y en su caso el ajuste de los valores de hundimiento, y de valores cero en las áreas sin desplazamiento vertical, se hizo con el apoyo de los desplazamientos observados en estaciones geodésicas.

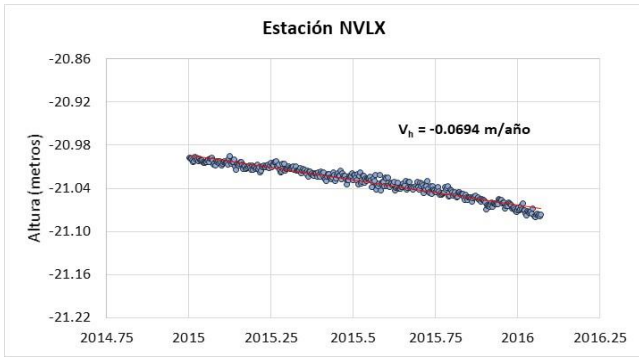
Los valores representados en los gráficos de este anexo son de las alturas geodésicas (llamadas también elipsoidales) diarias o semanales, derivadas de la información publicada por el NGL (Blewitt *et al.*, 2018) en <http://geodesy.unr.edu/>.

Para que fueran comparables con las que se obtuvieron de la interferometría SAR, las velocidades de la altura geodésica para cada una de las estaciones GNSS permanentes se calcularon usando periodos de datos GNSS similares a los de las imágenes Sentinel-1 que se emplearon para el procesamiento PSI de cada zona de subsidencia.

En los casos en que los datos GNSS de los periodos correspondientes a los de la interferometría SAR no estuvieron disponibles, se utilizaron los periodos más cercanos, con un lapso de tiempo similar.







Referencias

- Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J., and Parker, D.J. *Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques*. 2015. *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2015.08.035
- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. 2002. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, 40, 2375–2383.
- Blewitt, G., Hammond, W. C. and Kreemer, C. *Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science*. 24 September 2018. *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Demets, C., Cigna, F., Díaz-Molina, O. *Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in Central Mexico*. 2010. *IAHS AISH Publ.* 339, 255–259
- Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Oliver-Cabrera, T., Wdowinski, S., Chaussard, E., Salazar-Tlaczani, L., Cigna, F., DeMets, C., and Pacheco-Martínez, J.: *Satellite geodesy tools for ground subsidence and associated shallow faulting hazard assessment in central Mexico*, *Proc. IAHS*, 372, 255–260, <https://doi.org/10.5194/piahs-372-255-2015>, 2015.
- Castillo, R. R., and Aguirre, A. S. *Structural control on the subsidence faults alignment in Irapuato-Mexico*. 2010. *AQUA mundi*, 01007, 045–049, <http://dx.doi.org/10.4409/Am-009-10-0007>.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Amelung, F. Land subsidence in Central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. 2014. *Remote Sens. Environ.* 140, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>.
- 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.
- Cigna, F., Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T.H., Wdowinski, S. *Detecting subsidence-induced faulting in Mexican urban areas by means of persistent scatterer interferometry and subsidence horizontal gradient mapping*. 2011. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE, pp. 2125–2128. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049585>.
- Cigna, F., Tapete, D. *Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR*. 2021. *Remote Sens. Environ.* 253, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112161>, 112161.
- Consejo de Recursos Minerales – Municipio de Ameca. *Estudio de riesgos por hundimiento en la zona urbana y conurbada de la ciudad de Ameca, Jalisco*, 2012. Convenio de colaboración entre el municipio de Ameca y el Consejo de Recursos Minerales.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., Crippa, B. *Persistent Scatterer interferometry: a review*, 2016. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- Delgado Blasco, J.M., Fomeils M. *Automated SNAP sentinel-1 DInSAR processing for StaMPS PSI with open source tools*, 2018.
- Ferretti, A.; Monti-Guarnieri, A.; Prati, C.; Rocca, F.; Massonnet, D. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. 2007. ESA Publications: ESTEC, The Netherlands.
- Glowacka, E., Sarychikhina, O., Suárez, F., Nava, F.A., Mellors, R. *Anthropogenic subsidence in the Mexicali Valley, Baja California, México, and slip on the Saltillo fault*. 2010. *Environmental Earth Sciences*, 59, 1515–1524.

Gonzalez-Ortega, A., Galetzka, J. E., Gonzalez, J., *CICESE REGNOM GPS Network - NVLX-nvlxREGNOMmx2010* P.S. 2019. The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. <https://doi.org/10.7283/Z3C9-M798>.

Hernández-Marin, M., Pacheco-Martinez, J., Ramirez-Cortes, A., Burbey, T. J., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeño-de-Leon, M. E., Guinzberg-Velmont, J. & Pinto-Aceves, G. *Evaluation and análisis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico*. 2014. *Environmental Earth Sciences*, 72, 5, pp. 1491-1501.

INEGI. *Estudio de los Hundimientos por Subsistencia en Aguascalientes con Métodos Satelitales. Reporte Técnico 2015*. 2016. INEGI, 95 p.

INEGI. *Detección de Zonas de Subsistencia en México con Técnicas Satelitales*. 2019. INEGI, pp. 14-16.

M. Fomelis, 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).

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.

Hooper, A.; Zebker, H.; Segall, P.; Kampes, B. *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. 2004. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31.

Rodriguez R., and Lira J. *A risk analysis of abstraction-related subsidence based on roughness analysis*. 2008. *Bull. of Engineering Geology and Environment*, 67 (1), 105–109.

Samieie-Esfahany, S., Hanssen, R., van Thienen-Visser, K., Muntendam-Bos, A. *On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates*. 2009. In: *Proceedings of Fringe 2009 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italy, 30 Nov – 4 Dec 2009. ESA, pp. 1–7.

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez Vidal, F., Mellors R. y Ramírez-Hernández, J. *Aplicación de DInSAR a los estudios de subsistencia en el Valle de Mexicali*. 2011. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Volumen 63, núm. 1, 2011, p. 1-13. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2011v63n1a1>.

SGM. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 1999. Tomo LVII, núm. 1, 2005, p.65-68.

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.