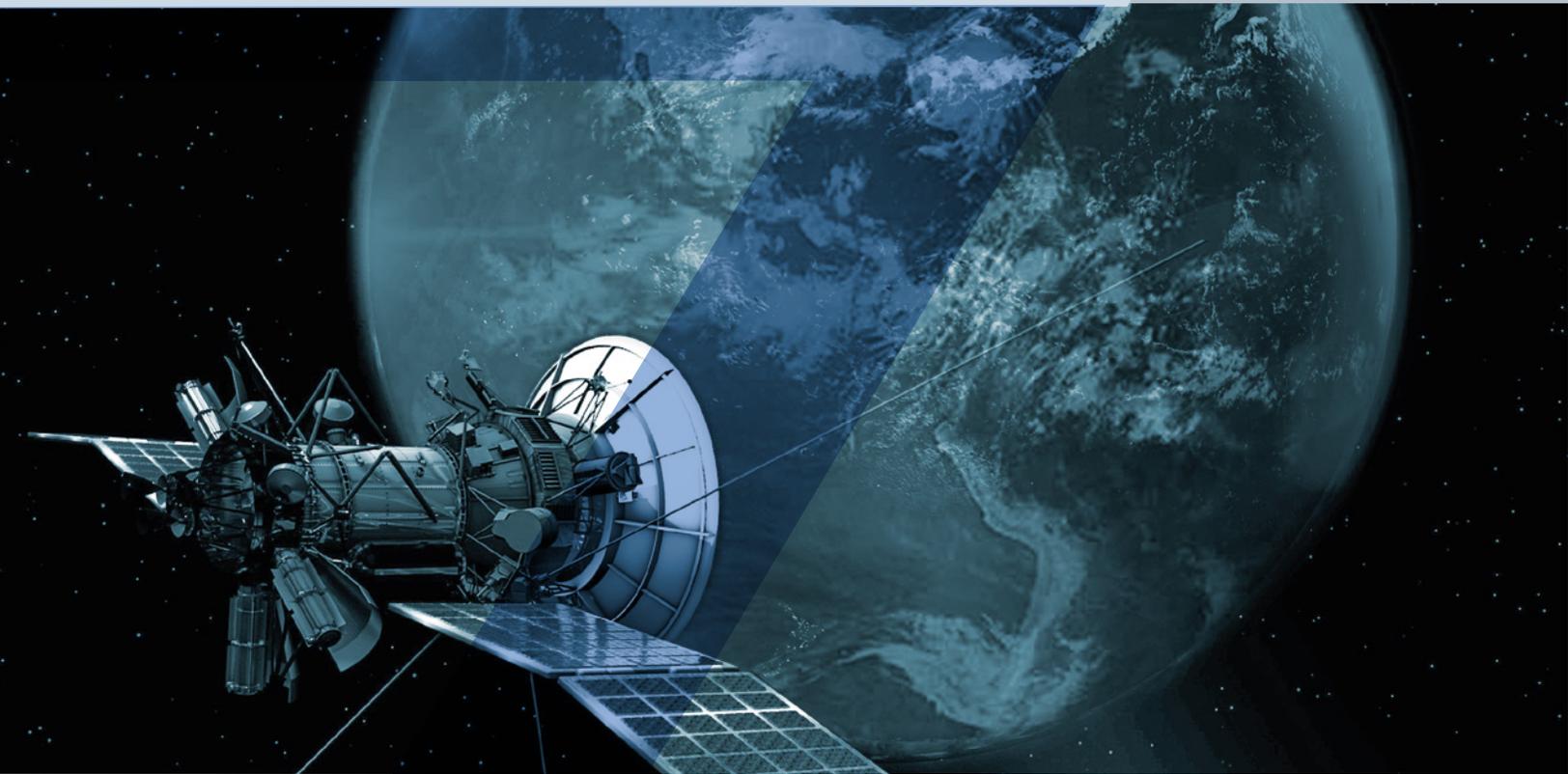


DetECCIÓN DE ZONAS DE SUBSIDENCIA EN MÉXICO CON TÉCNICAS SATELITALES

Volumen 3



Instituto Nacional de Estadística y Geografía

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

Volumen 3



Obras complementarias publicadas por el INEGI sobre el tema:

Detección de Zonas de Subsistencia en México con Técnicas Satelitales Volumen 1; Detección de zonas de subsidencia en México con técnicas satelitales Volumen 2; 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 subsidencia en México con técnicas satelitales : volumen 3 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI, c2022.

ix, 24 p.

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 © 2022, **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 que proporcionan imágenes cada vez con mayor nivel de detalle, así como 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 también el agrietamiento del suelo, y que está relacionado principalmente a actividades de minería o a la extracción de líquidos del subsuelo.

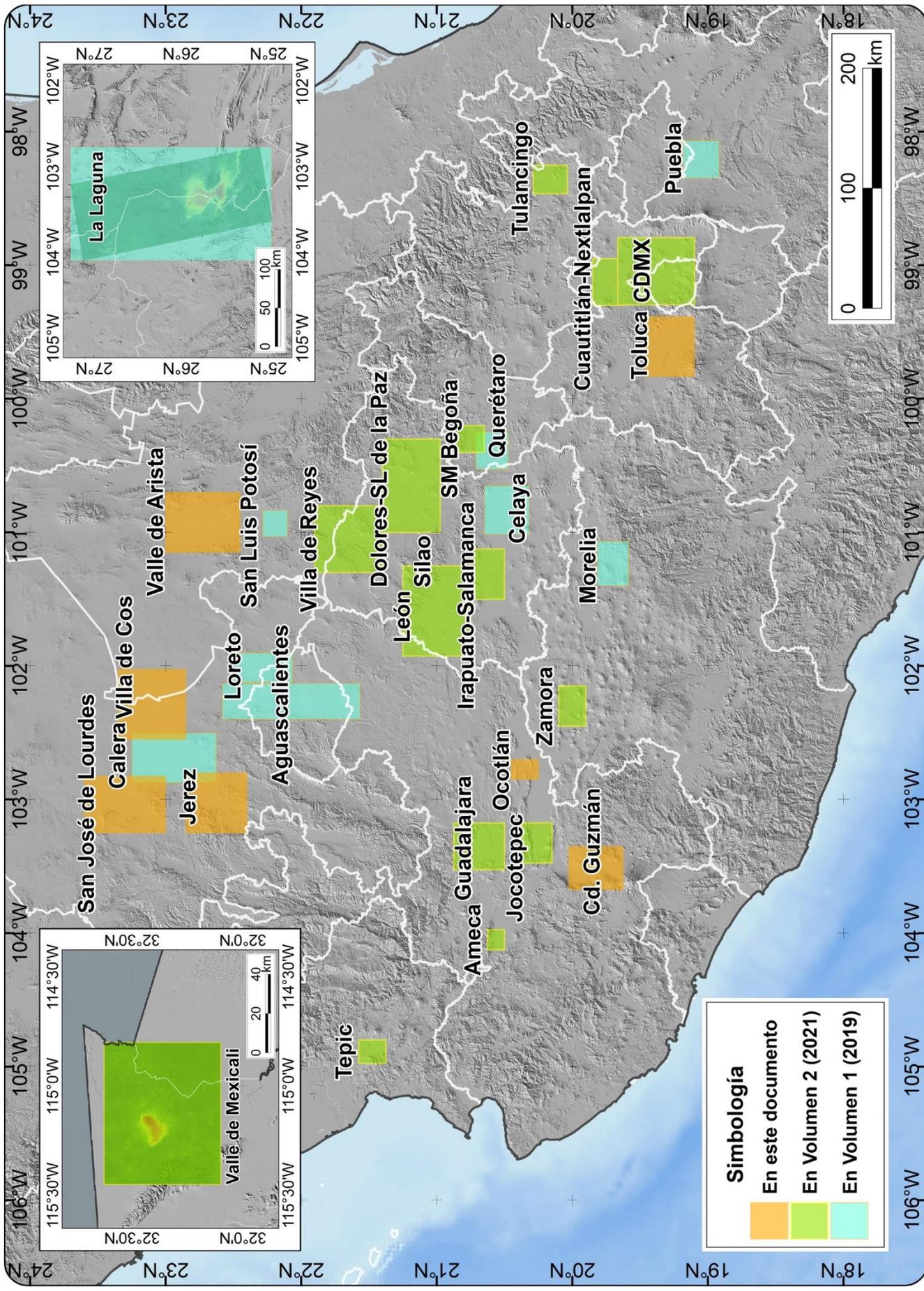
En este documento se presentan los casos de algunas regiones del país afectadas por el fenómeno de subsidencia, como complemento a las zonas publicadas en el Volumen 1 (2019) y el Volumen 2 (2021), así como un resumen estadístico de las zonas en las que se ha cuantificado su magnitud y extensión mediante interferometría SAR.

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
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SNAP	Sentinel Application Platform
StaMPS	Stanford Method for Persistent Scatterers
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GMT	The Generic Mapping Tools
TRAIN	Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise
SNAPHU	Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping

Casos de subsidencia que se presentan

Mapa 1



Índice

Introducción	IX
1. Insumos y metodología	1
1.1 Datos	1
1.2 Metodología	1
2. Precisión de los hundimientos obtenidos mediante interferometría SAR	3
2.1 Evaluación usando estaciones GNSS permanentes	3
2.2 Evaluación mediante mediciones repetidas	4
3. Resultados	5
3.1 Valle de Arista, San Luis Potosí	6
3.2 Toluca, estado de México	7
3.3 Jerez, Zacatecas	8
3.4 Villa de Cos, Zacatecas	9
3.5 Ciudad Guzmán, Jalisco	10
3.6 San José de Lourdes, Zacatecas	11
3.7 Ocotlán, Jalisco	12
4. Extensión y magnitud de la subsidencia en las zonas detectadas	13
4.1 Superficie afectada	13
4.2 Hundimientos máximos	13
Anexo	17
A. Diferencias entre las velocidades GNSS en estaciones permanentes y las obtenidas mediante interferometría SAR	19
B. Municipios afectados en las zonas de subsidencia detectada con interferometría SAR	20
Referencias	23

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 presentados en publicaciones anteriores (volumen 1 y volumen 2) de 2019 y 2021, para abordar los casos más representativos de subsidencia; sin embargo, existen otras zonas con indicios de estar afectadas por este fenómeno que, por ser de menor magnitud, presentan mayor dificultad para su cuantificación mediante interferometría SAR.

1. Insumos y metodología

1.1 Datos

El insumo principal de estos estudios fueron imágenes SAR de libre acceso de los sensores satelitales Sentinel-1A y Sentinel-1B, que son proporcionadas por el programa de observación de la Tierra Copernicus de la Agencia Espacial Europea (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 Sentinel-1, uno con imágenes adquiridas por el sensor en trayectoria ascendente de la plataforma sobre su órbita y otro conjunto en trayectoria descendente. La cantidad de imágenes y el periodo de tiempo que se utiliza

para cada estudio son variables, ya que se depende de la disponibilidad de datos de Sentinel-1 y de la variabilidad de las características reflectivas de la señal radar que presentan los elementos en la escena. A medida que se incrementa la diferencia de tiempo entre imágenes aumenta la pérdida de correlación o coherencia de la señal registrada en las imágenes, en especial en áreas que presentan cambios en la vegetación y en el contenido de humedad del suelo. La extensión de la zona de estudio, en conjunto con la capacidad del equipo de cómputo, son también aspectos a considerar para el procesamiento interferométrico de grandes cantidades de imágenes. 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, y que fue publicado en 2014.

1.2 Metodología

En las publicaciones previas relacionadas con este documento (INEGI, 2016, 2019 y 2021), se describen aspectos básicos de la interferometría SAR diferencial (DInSAR) y de los métodos PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*) y SBAS (*Small Baseline Subset*), estos dos últimos conocidos 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 SNAP (Sentinel Application Platform), desarrollado por la ESA (Delgado-Blasco *et al.* y Fomelis *et al.*, 2018), se realizaron las etapas preparativas de las imágenes de aplicación de

órbitas y corregistro de cada conjunto de imágenes para luego generar los interferogramas. Posteriormente se aplicó la técnica PSI usando el programa StaMPS (Hooper *et al.*, 2012). SNAP y StaMPS utilizan a la vez otras herramientas de uso libre como GDAL (Open Source Geospatial Foundation), y algunos otros como auxiliares para ciertos cálculos.

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 al aplicarlas 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 SNA-PHU (Chen y Zebker, 2002). En las técnicas DInSAR avanzadas 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 y los valores de la fase se obtienen los desplazamientos observados en dirección de vista del satélite (desplazamientos *LOS*).

El procedimiento anterior se aplica para cada conjunto de imágenes, en órbita ascendente y descendente. Los desplazamientos verticales en cada punto en donde se identificó un elemento

reflector permanente de la señal radar en ambos conjuntos de imágenes se calculan con base en la geometría de adquisición de ambas trayectorias, ascendente y descendente, de la órbita del sensor Sentinel-1. Debido a la geometría de observación de los sensores SAR (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, el cálculo de desplazamientos con base en las dos trayectorias de órbita proporciona una mejor precisión en la estimación de la componente vertical del desplazamiento.

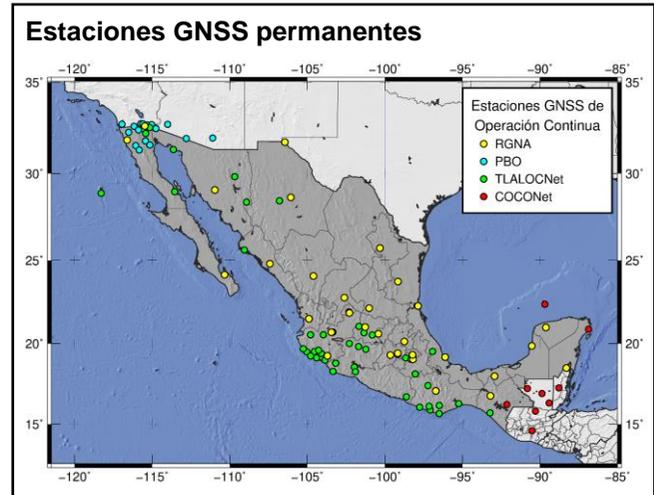
En ciertos casos los hundimientos diferenciales entre píxeles adyacentes de las imágenes, de magnitud mayor a la de la longitud de onda que utiliza el sensor SAR, que se presentan en áreas específicas de algunas zonas de estudio, producen variaciones en la fase de los interferogramas que ocasionan errores 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. Contar con estimaciones obtenidas en ambas direcciones de órbita, ascendente y descendente, permite identificar también 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. Precisión de los hundimientos obtenidos mediante interferometría SAR

2.1 Evaluación usando estaciones GNSS permanentes

Diferentes estudios en los que se evalúa la calidad de los desplazamientos obtenidos mediante técnicas DInSAR avanzadas refieren exactitudes de algunos milímetros en los valores de velocidad calculados (Crosetto *et al.*, 2016; Casu *et al.*, 2006; Raucoules *et al.*, 2009). La fuente de información con mayor exactitud en las deformaciones calculadas, con las que se pueden evaluar los resultados de la aplicación de las técnicas DInSAR, son las velocidades que se obtienen a partir del análisis de series de tiempo de las coordenadas de las estaciones GNSS permanentes. Las coordenadas diarias o semanales de estas estaciones se calculan mediante el procesamiento de los datos GNSS que recaban de manera continua, y las velocidades que se obtienen del análisis de las series de tiempo de los tres componentes (norte, este y altura) tienen una precisión de décimas de milímetros.

En el territorio mexicano se cuenta con diferentes redes de estaciones GNSS permanentes cuyos datos son de acceso público, como las redes RGNA (Red Geodésica Nacional Activa)¹, Plate Boundary Observatory (PBO)², COCONet³ y TLALOCNet⁴, así como algunas estaciones de la red WAAS (Wide Area Augmentation System), en cuyas estaciones se recaban los datos de las señales que emiten los satélites de constelaciones como GPS, GLONASS y Galileo. En las zonas afectadas por subsidencia, se utilizan las velocidades de estas estaciones, en su componente de altura, para validar o verificar las que se obtuvieron del procesamiento de imágenes SAR.



En las evaluaciones de calidad efectuadas en las zonas de subsidencia que se han estudiado mediante interferometría SAR en el INEGI, en específico para las zonas en las que se cuenta con estaciones GNSS permanentes, se observan diferencias promedio de 3 milímetros por año entre las velocidades de hundimiento obtenidas a partir de los datos GNSS y las calculadas mediante interferometría SAR, con la técnica PSI para las ubicaciones de las estaciones permanentes (ver tabla con estaciones GNSS en cada zona, periodos y diferencias Anexo A).

El error medio cuadrático de las diferencias GNSS-InSAR fue de 6 mm/año. En algunas de las estaciones GNSS permanentes no se tiene la cobertura de datos de todo el periodo de tiempo que se cubrió con las imágenes Sentinel-1 utilizadas para el estudio de interferometría, lo que reduce la correlación entre ambas velocidades debido a que la subsidencia en varias zonas presenta variaciones en el tiempo, algunas de ellas de tipo estacional; omitiendo la velocidad

¹ <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/rgna.aspx?p=22>

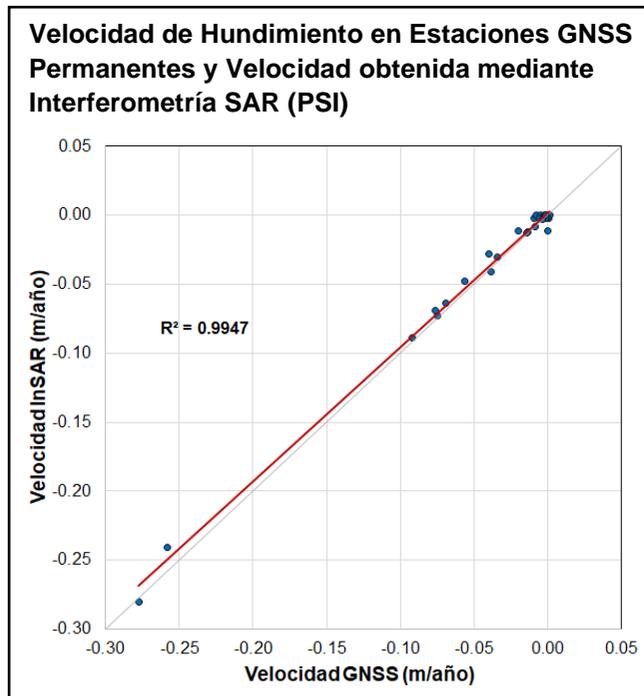
² (<http://www.unavco.org/projects/major-projects/pbo/pbo.html>)

³ (<http://coconet.unavco.org/>)

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

de estas estaciones, la diferencia promedio se reduce a 2 milímetros por año.

En el siguiente gráfico se muestra la correlación entre las velocidades GNSS, calculadas a partir de las series de tiempo de altura de las estaciones permanentes, y las velocidades de hundimiento obtenidas de la interferometría SAR. El valor del coeficiente de correlación (R^2) calculado, de 0.99, indica una muy buena correlación entre los valores obtenidos mediante ambas técnicas; y la separación de la línea de regresión lineal (en color rojo) de la línea diagonal (en color gris), indica que la magnitud de los valores que resultan de la interferometría SAR tiende a ser ligeramente menor que la de los que se obtienen a partir de los datos GNSS.



2.2 Evaluación mediante mediciones repetidas

Otra de las herramientas geodésicas, útil para la evaluación de la calidad de los desplazamientos derivados del procesamiento interferométrico de imágenes SAR, es la repetición de mediciones en estaciones geodésicas, ya sea mediante nivelación geodésica o posicionamiento con receptores GNSS en modo estático. Dada la precisión en la medición de alturas mediante nivelación geodésica, con este método es posible obtener estimaciones confiables del hundimiento inclusive solo con dos mediciones. En cambio, para una estimación precisa de los desplazamientos mediante repetición de observaciones con equipo GNSS, se requieren varios levantamientos para el cálculo de una velocidad confiable del hundimiento; sin embargo, con GNSS se puede obtener además las velocidades de las estaciones en dirección horizontal con mayor precisión que en vertical, aunque en los desplazamientos asociados a subsidencia, los horizontales son de magnitud mucho menor a los verticales.

En Cigna *et al.* (2021) se describen los resultados de la evaluación de la subsidencia calculada para el valle de Aguascalientes mediante las técnicas PSI y SBAS, que se hizo con base en mediciones repetidas tanto de nivelación geodésica y GNSS, encontrando una correlación (R^2) de 0.96 y diferencias promedio de 3 mm/año en el comparativo de los resultados PSI contra las mediciones de nivelación geodésica; y R^2 de 0.91 contra las mediciones GNSS, con diferencias promedio de 4 mm/año.

3. Resultados

Como producto final de los estudios de interferometría SAR, se obtienen modelos de datos espaciales de la subsidencia en las diferentes zonas, almacenados en imágenes o capas ráster en formato GeoTIFF, con resolución de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 x 30 metros), que proporcionan el valor del hundimiento en milímetros por año en los píxeles en los que se detectaron elementos reflectores permanentes de la señal radar. Estos productos se encuentran disponibles en el portal del INEGI en internet, en la sección Temas/Marco Geodésico/Deformaciones del terreno.

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; de manera que algunos de los productos contienen dos zonas de subsidencia cercanas entre sí. En la sección 4, sin embargo, la información de la superficie afectada y los hundimientos máximos se presenta por separado para los polígonos de cada zona de subsidencia, cada una asociada a un acuífero principal afectado; con excepción del caso de la Ciudad de México, cuyos hundimientos se extienden en 3 diferentes acuíferos, de acuerdo con la zonificación de CONAGUA⁵.

Los proyectos de procesamiento de imágenes de los casos que se presentan en esta sección, como complemento a los que se describen en los volúmenes 1 y 2, se realizaron durante etapas diferentes, por lo que los periodos de tiempo de los datos Sentinel-1 utilizados difieren para cada zona. Resultados de estudios previos de interferometría SAR e información geodésica disponible muestran que la magnitud de la subsidencia en algunas zonas 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.

Como se describe en la sección 2, los valores de hundimiento en los productos de subsidencia se validan mediante los datos GNSS en estaciones permanentes. La velocidad (V_h) de las estaciones GNSS en el cuadro de información de la zona de Toluca, en esta sección, corresponde a la calculada para el periodo de datos similar al de las imágenes Sentinel-1 que se utilizaron para el estudio, en el resto de las zonas que se describen en esta sección no se cuenta con estaciones GNSS permanentes. En el Anexo A se muestra una tabla con el comparativo de los valores de hundimiento en los productos de subsidencia, detectada mediante interferometría SAR, y los calculados con la información de las estaciones GNSS permanentes disponibles; dicha tabla integra las estaciones ubicadas en las zonas de subsidencia estudiadas a la fecha.

En los mapas de hundimiento que se muestran en los apartados siguientes, las capas ráster de hundimiento están representadas sobre un sombreado del relieve del terreno derivado del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)⁶. En los casos en que se dispone de información se representan también, 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 otros rasgos lineales, como carreteras y avenidas principales, en color amarillo claro, así como los nombres de las localidades representativas de cada zona y de las que están ubicadas en donde ocurren los hundimientos de mayor magnitud.

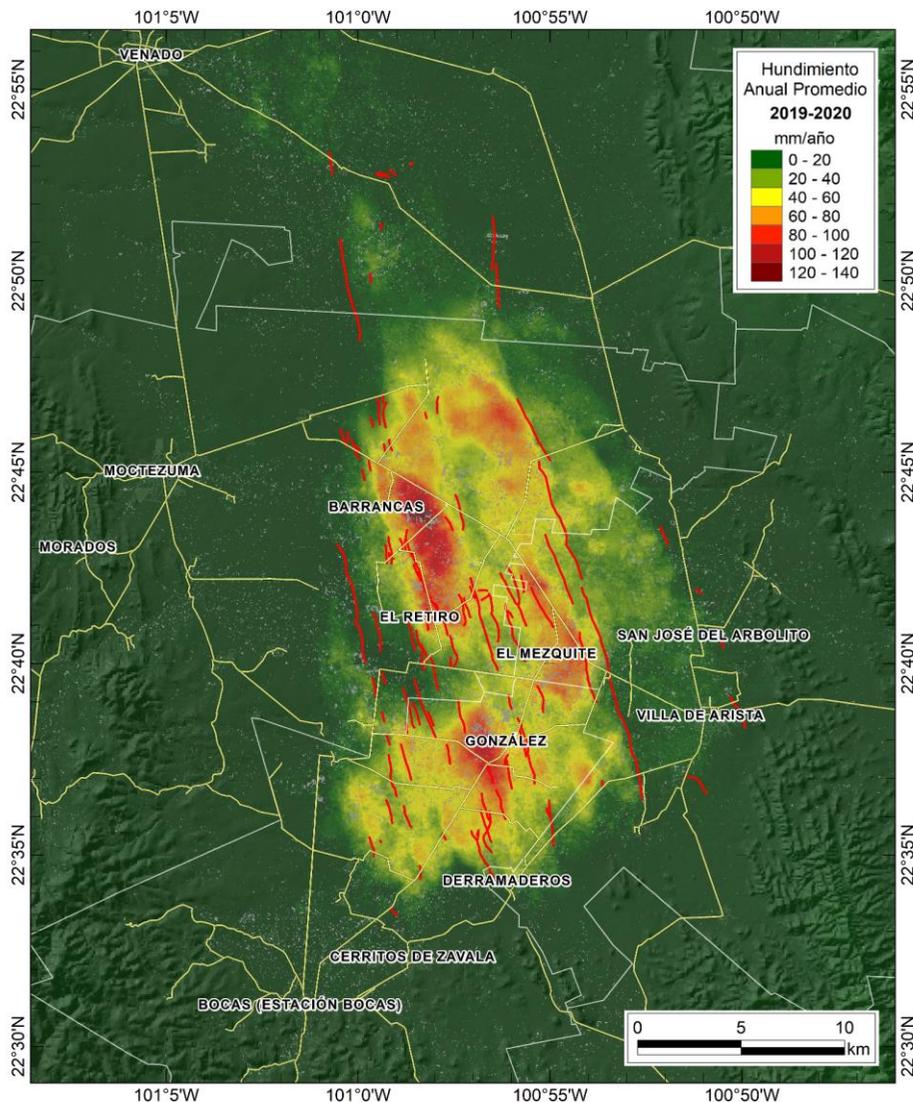
⁵ <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>

⁶ <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Metadatos>

3.1 Valle de Arista, San Luis Potosí

Acuífero	Villa de Arista
Localidades y municipios afectados	Localidad de González, al norte del municipio de San Luis Potosí; Barrancas y El Retiro en el municipio de Moctezuma; y El Mezquite en el municipio de Villa de Arista. Otras localidades rurales en los tres municipios se encuentran en zonas que presentan hundimientos de menor magnitud.
Hundimiento máximo	Los hundimientos máximos se presentan en áreas rurales, de 14.3 cm/año al Este de la localidad de Barrancas y 11.5 cm/año al Oeste de la localidad de González.
Periodo de Estudio	2019-2020. Imágenes del 9 de noviembre de 2018 al 4 de diciembre del 2020.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014 e INEGI, 2017.
Fuente de fallas y/o grietas	INEGI

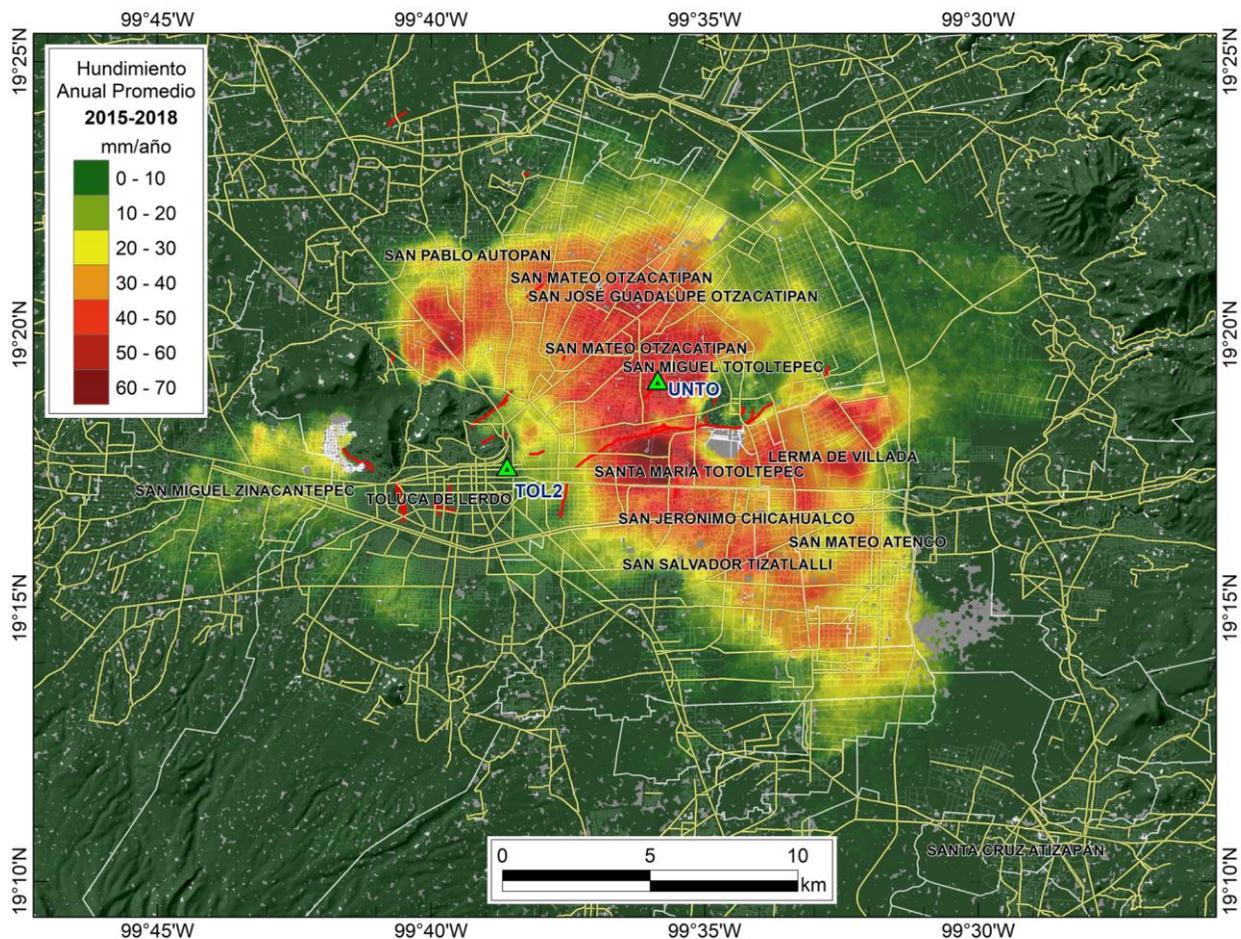
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en el valle de Arista, San Luis Potosí, en el periodo 2019-2020



3.2 Toluca, estado de México

Acuífero	Valle de Toluca
Localidades y Municipios afectados	La mayor afectación se presenta en varias localidades conurbadas al este de la ciudad de Toluca de Lerdo. Entre las que presentan los hundimientos de mayor magnitud están: Santa María Totoltepec, San Miguel Totoltepec, San Mateo Otzacatipan y Santa Cruz Otzacatipan en el municipio de Toluca; San Salvador Tizatlalli y San Jerónimo Chicahualco en el municipio de Metepec; Lerma de Villada al oeste del municipio de Lerma, y San Mateo Atenco, del municipio con mismo nombre.
Hundimiento máximo	7.1 cm/año al oeste de Santa María Totoltepec y 6.1 cm/año al este de Santa Cruz Atzacapotzaltongo (al sur de San Pablo Autopan).
Periodo de Estudio	2015-2018. Imágenes del 7 de diciembre de 2014 al 9 de enero de 2019.
Información geodésica	Estaciones TOL2 (RGNA), $V_h = -0.001$ m/año y UNTO, $V_h = -0.056$ m/año.
Antecedentes	Chaussard <i>et al.</i> , 2014.

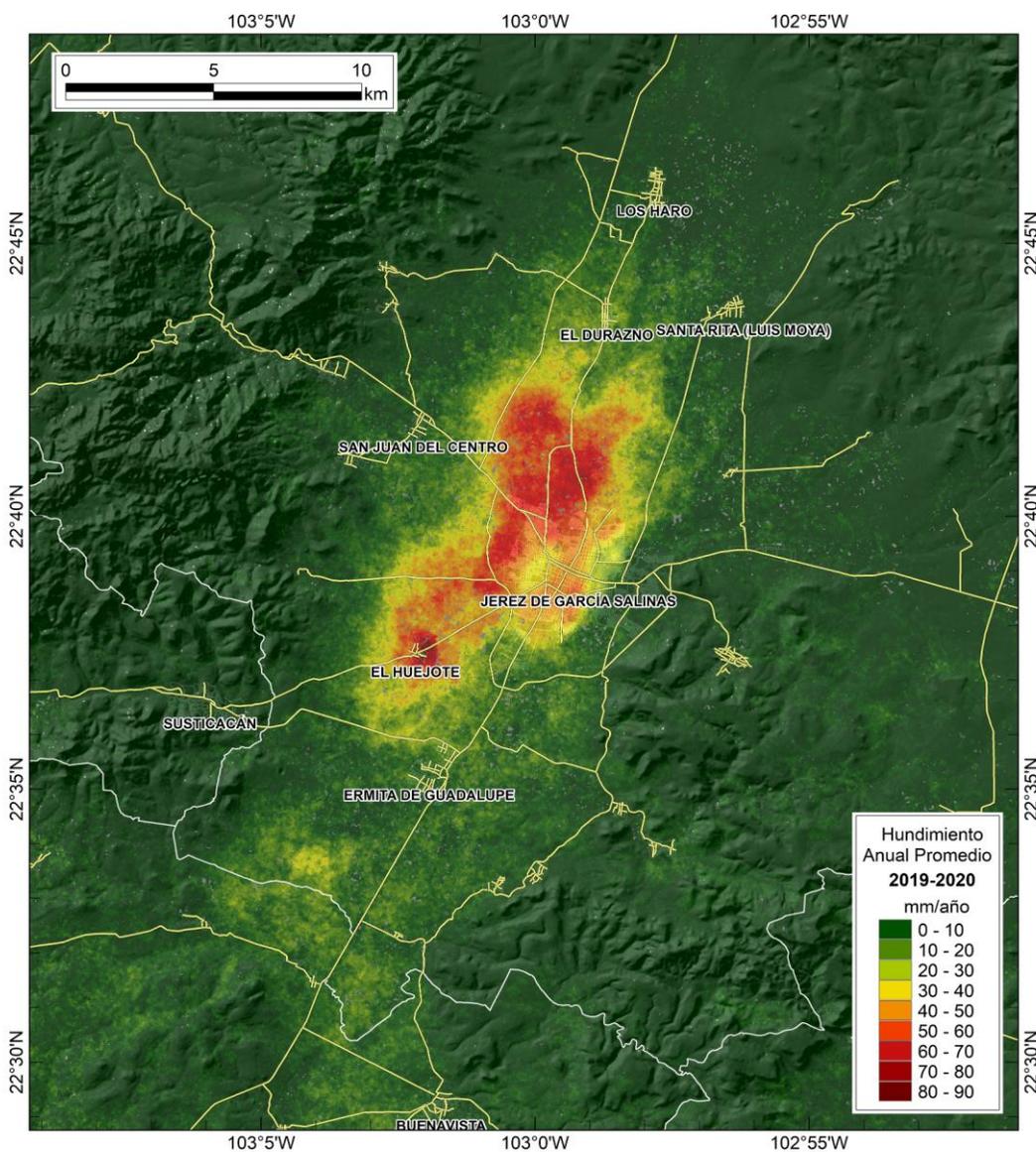
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Toluca, estado de México, en el periodo 2015-2018



3.3 Jerez, Zacatecas

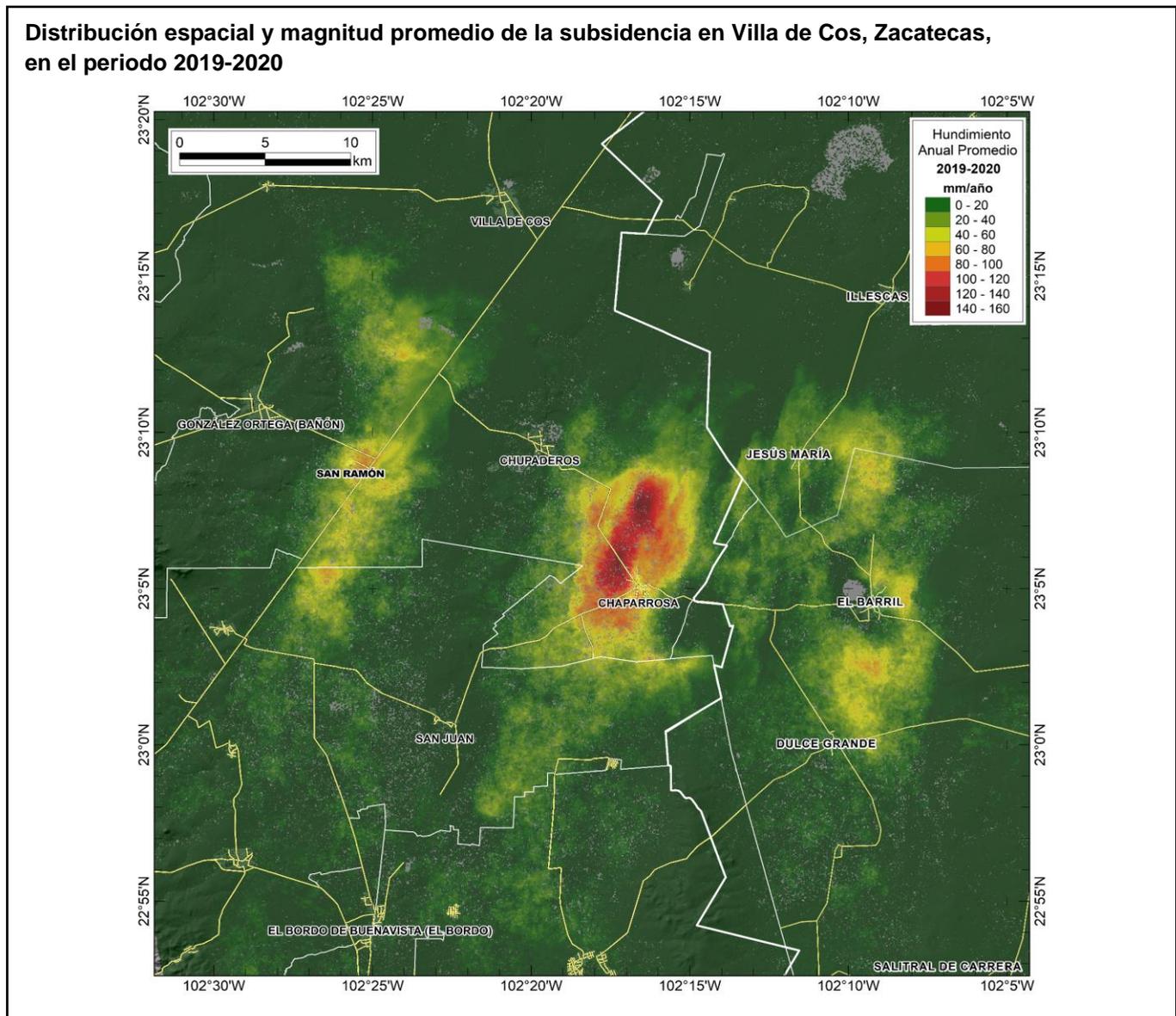
Acuífero	Jerez
Localidades y municipios afectados	La mayor afectación ocurre en las localidades de Jerez de García Salinas y El Huejote, ambas en el municipio de Jerez.
Hundimiento máximo	8.9 cm/año en la zona este de la localidad de El Huejote; 7.6 cm/año en área rural al norte de Jerez de García Salinas.
Periodo de Estudio	2019-2020. Imágenes del periodo del 12 de noviembre de 2018 al 9 de diciembre de 2020.
Antecedentes	CONAGUA, 2020 (sobreexplotación del acuífero).

Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Jerez, Zacatecas, en el periodo 2019-2020.



3.4 Villa de Cos, Zacatecas

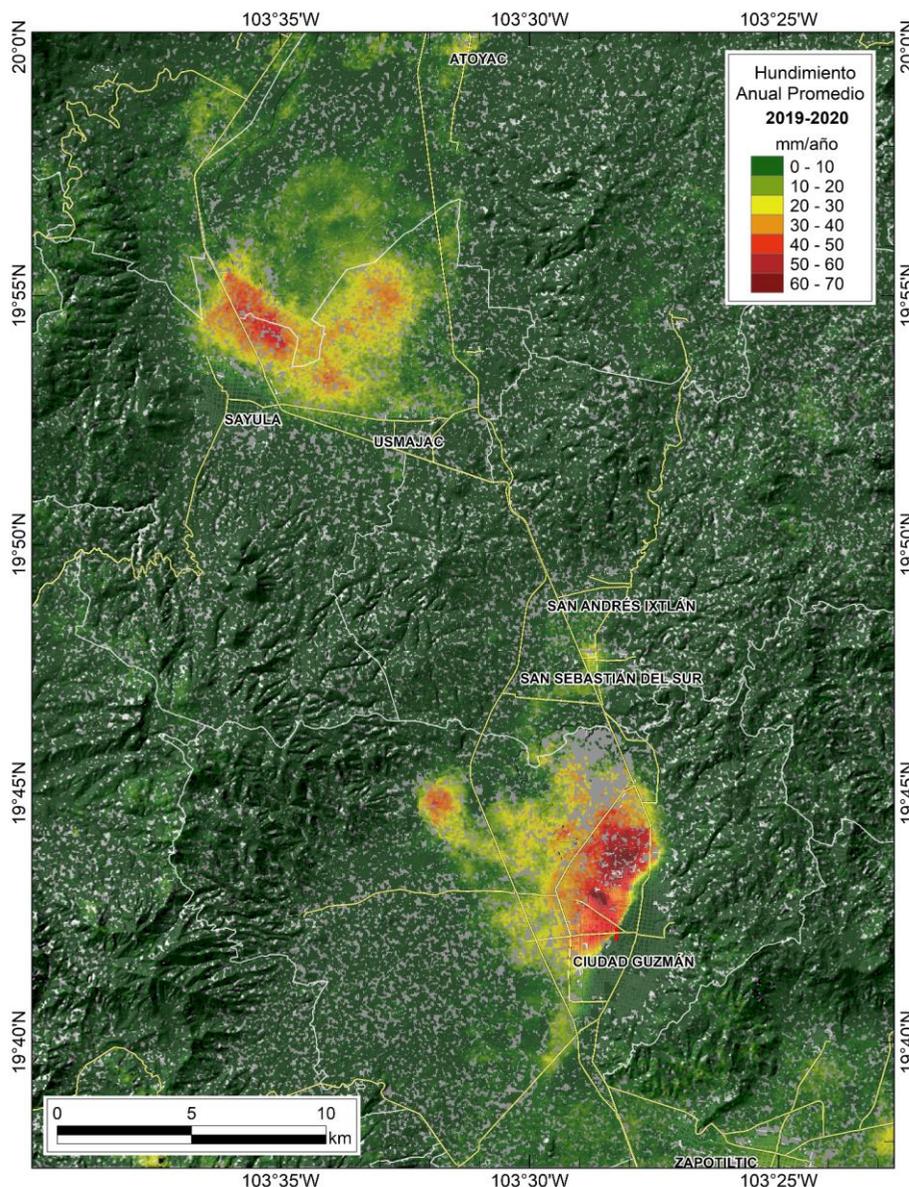
Acuífero	Chupaderos y El Barril (en San Luis Potosí)
Localidades y Municipios afectados	La zona de subsidencia principal afecta a la localidad de Chaparrosa en el municipio de Villa de Cos, Zacatecas. Otra zona de subsidencia, con menor magnitud se presenta al este de la localidad de González Ortega (Bañón), en la localidad de San Ramón, del mismo municipio. Ambos polígonos de subsidencia se extienden hacia el sur a áreas rurales del municipio de Pánuco. También se presentan áreas de subsidencia en áreas rurales del municipio de Villa de Ramos, San Luis Potosí, aledañas a las localidades de El Barril y Dulce Grande.
Hundimiento máximo	15.6 cm/año en el área rural al norte de la localidad de Chaparrosa, y de 15 cm/año también al oeste de la misma localidad. 7.6 cm/año al este de San Ramón, y de la misma magnitud entre las localidades de El Barril y Dulce Grande, en San Luis Potosí.
Periodo de Estudio	2019-2020. Imágenes del 9 de noviembre de 2018 al 7 de diciembre de 2020.
Antecedentes	CONAGUA, 2020 (sobreexplotación del acuífero).



3.5 Ciudad Guzmán, Jalisco

<i>Acuíferos</i>	Ciudad Guzmán y Lagunas
<i>Localidades y municipios afectados</i>	La localidad de Ciudad Guzmán en el municipio de Zapotlán el Grande; áreas rurales al norte de la localidad de Sayula en el municipio con mismo nombre, que se extienden hasta la región suroeste del municipio de Atoyac.
<i>Hundimiento máximo</i>	7 cm/año en el límite noroeste de la mancha urbana de Ciudad Guzmán y 5.4 cm/año al norte de la localidad de Sayula.
<i>Periodo de Estudio</i>	2019-2020. Imágenes del 17 de noviembre de 2018 al 17 de enero de 2021.
<i>Antecedentes</i>	Atlas Municipal de Peligros y Riesgos naturales, Zapotlán el Grande, 2015.

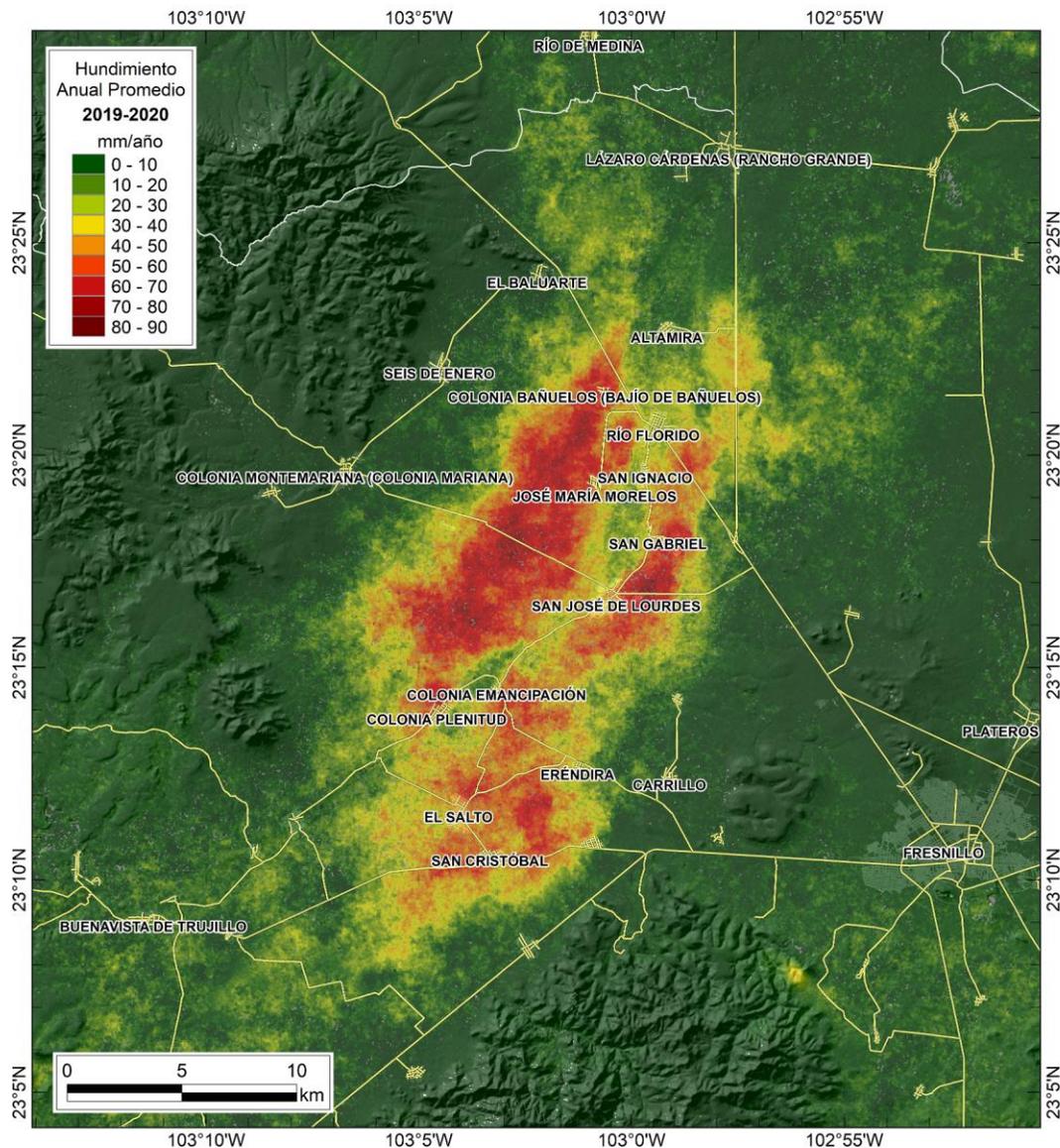
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Ciudad Guzmán, Jalisco, en el periodo 2019-2020



3.6 San José de Lourdes, Zacatecas

Acuífero	Aguanaval
Localidades y municipios afectados	Localidades de San José de Lourdes, Colonia Bañuelos (Bajío de Bañuelos), José María Morelos, San Gabriel, Colonia Plenitud, Colonia Emancipación, El Salto, y San Cristóbal, todas ellas en el municipio de Fresnillo.
Hundimiento máximo	8.3 cm/año al noreste de la localidad de San José de Lourdes. Se presentan también hundimientos de más de 7.5 cm/año en otras zonas, principalmente áreas de cultivo.
Periodo de Estudio	2019-2020. Imágenes del 12 de noviembre de 2018 al 9 de diciembre de 2020.
Antecedentes	Brunori <i>et al.</i> , 2015.

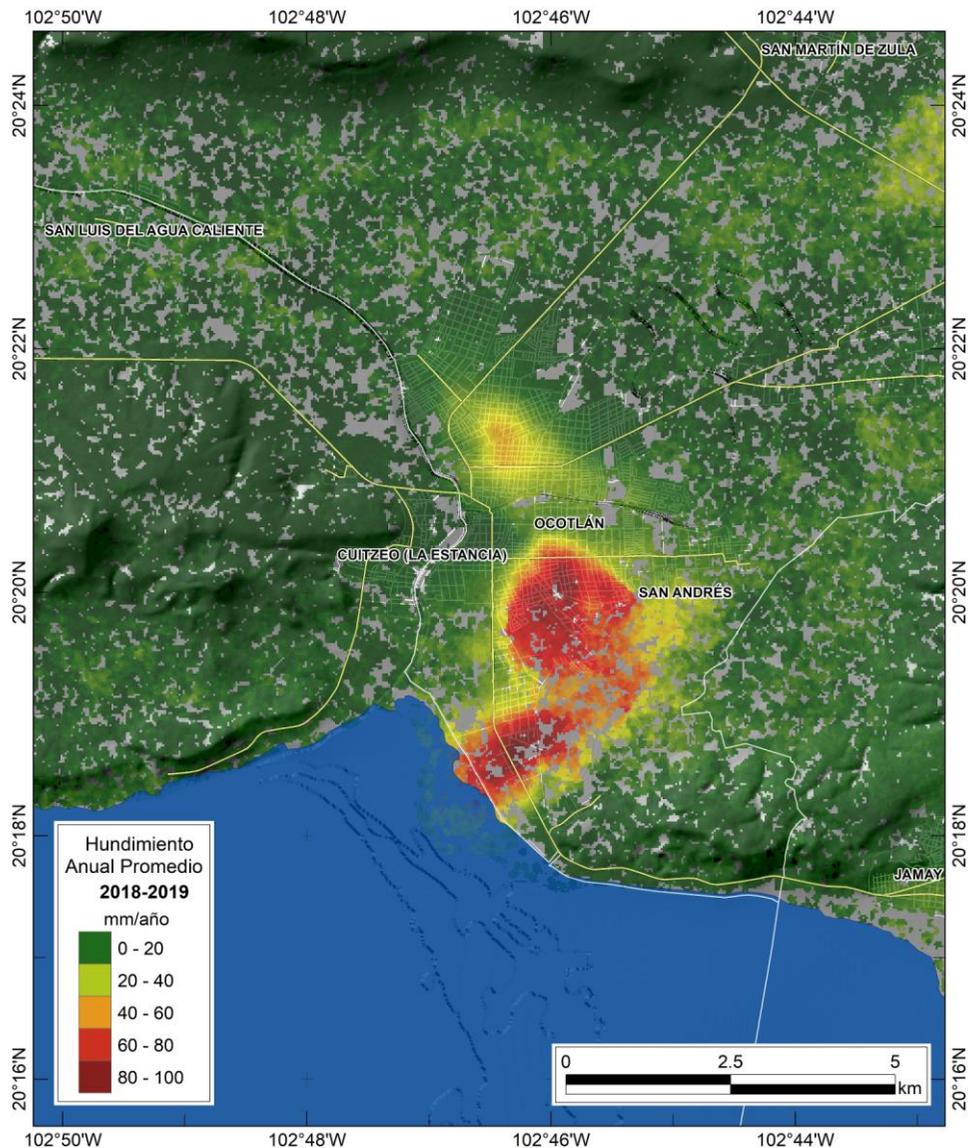
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en San José de Lourdes, Zacatecas, en el periodo 2019-2020



3.7 Ocotlán, Jalisco

Acuífero	Ocotlán
Localidades y municipios afectados	La superficie afectada se presenta mayormente en la ciudad de Ocotlán, en el municipio con mismo nombre y se extiende, con hundimientos de menor magnitud, al suroeste de la localidad conurbada de San Andrés. Se presenta también una zona con hundimientos de 3 cm/año al sureste de la localidad de San Martín de Zula.
Hundimiento máximo	10.5 cm/año al sur de la ciudad.
Periodo de Estudio	2018-2019. Imágenes del 4 de enero de 2018 al 27 de enero de 2020.
Antecedentes	No se identifican antecedentes documentados.

Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Ocotlán, Jalisco, en el periodo 2018-2019



4. Extensión y magnitud de la subsidencia en las zonas detectadas

A la fecha de elaboración de este documento se cuenta con la cobertura de interferometría SAR de las zonas en las que la subsidencia se manifiesta de manera más significativa, para la mayoría de las cuales se tienen antecedentes bibliográficos en los que se abordan ya sea estudios especializados o bien solo se documenta la detección de agrietamientos superficiales del suelo, así como posibles hundimientos del terreno. En los apartados siguientes se enlistan las zonas en las que en los resultados de los trabajos de interferometría SAR fue posible detectar de manera clara la señal de subsidencia para cuantificar su magnitud y determinar la extensión de la superficie afectada, algunos de ellos presentados en la sección anterior de este documento y el resto en los volúmenes 1 (2019) y 2 (2021).

En algunos de los proyectos de interferometría para detección de subsidencia, además de las zonas de interés, se detectaron además otras áreas afectadas, de las que no se cuenta con antecedentes documentados. Para algunas de esas zonas fue posible caracterizar la extensión y magnitud de la subsidencia y se cuenta con el producto (imagen raster en formato GeoTiff) con el que se documentaron los resultados. Sin embargo, algunas no se pudieron caracterizar para su representación cartográfica debido a la escasez de elementos reflectores de la señal radar en esas regiones, que son principalmente áreas de cultivo y su extensión es de algunas decenas de kilómetros cuadrados.

4.1 Superficie afectada

En el cuadro 4.1 se presentan las zonas de subsidencia detectadas, ordenadas conforme a la extensión territorial o superficie afectada, en kilómetros cuadrados. Si bien el de la Ciudad de México es el caso más conocido en nuestro país,

y uno de los más representativos a nivel mundial, destaca también el caso de la región de La Laguna que se extiende por más de 3000 kilómetros cuadrados afectando también a dos entidades federativas. Sin embargo, el del área metropolitana del valle de México representa una zona de riesgo mayor por la cantidad de habitantes en los municipios afectados y los daños que ocasiona a la infraestructura urbana.

Para el cálculo de la superficie afectada, a partir de las imágenes de subsidencia elaboradas se generaron polígonos que delimitan cada zona. Debido al ruido inherente y el error asociado a los resultados de interferometría SAR, la mayoría de los polígonos, en las zonas más aptas para la interferometría como áreas urbanas y de suelo desnudo, se generaron considerando los hundimientos mayores a 5 mm/año. En las áreas de cultivo, que presentan más ruido en los resultados, se consideraron los mayores a 1 o 1.5 cm/año, y en un par de casos, en los que además se tiene poca información en los límites del área afectada, el polígono se delimitó con los hundimientos mayores a 2 cm/año.

4.2 Hundimientos máximos

Otro indicativo del riesgo que representan y el posible grado de afectación al acuífero es la magnitud de los hundimientos. En este sentido, el de la Ciudad de México es el caso más grave, como se muestra en el cuadro 4.2 presentó un máximo de poco más de 40 cm/año en 2019. De acuerdo con algunos estudios (Solano-Rojas *et al.*, 2015; Chaussard *et al.*, 2021), la subsidencia en la Ciudad de México parece no estar asociada solo a la extracción de agua subterránea, sino también a la consolidación del antiguo lecho del lago en el que está asentada gran parte del área metropolitana.

Extensión de las zonas de subsidencia detectadas mediante interferometría SAR

Cuadro 4.1

	Zona de subsidencia	Acuífero(s)	Entidad(es)	Superficie (km ²)
1	La Laguna	Principal - Región Lagunera	Coahuila de Zaragoza, Durango	3208
2	Ciudad de México	Zona Metropolitana de la Cd. de México, Texcoco y Chalco - Amecameca	Ciudad de México y estado de México	962
3	Valle de Aguascalientes	Valle de Aguascalientes, Ojocaliente	Aguascalientes, Zacatecas	878
4	Valle de Arista	Villa de Arista	San Luis Potosí	394
5	San José de Lourdes	Aguanaval	Zacatecas	371
6	Celaya	Valle de Celaya	Guanajuato	353
7	Irapuato-Salamanca	Irapuato - Valle	Guanajuato	308
8	León	Valle de León	Guanajuato	281
9	Toluca	Valle de Toluca	México	281
10	Villa de Cos	Chupaderos	Zacatecas	261
11	Cuautitlán-Nextlalpan	Cuautitlán - Pachuca	México	214
12	Dolores Hidalgo	Cuenca Alta del Río Laja	Guanajuato	178
13	Valle de Mexicali	Valle de Mexicali	Baja California	164
14	Silao de la Victoria	Silao - Romita	Guanajuato	150
15	Calera	Calera	Zacatecas	148
16	Villa de Reyes	Jaral de Berrios - Villa de Reyes	Guanajuato, San Luis Potosí	133
17	Villa de Ramos	El Barril	San Luis Potosí	127
18	San Luis de la Paz	Laguna Seca	Guanajuato	110
19	Ciudad de San Luis Potosí	San Luis Potosí	San Luis Potosí	107
20	Valle de Loreto	Loreto	Zacatecas, Aguascalientes	98
21	Ciudad de Puebla	Valle de Puebla	Puebla	96
22	Zamora	Zamora	Michoacán de Ocampo	82
23	Jerez	Jerez	Zacatecas	81
24	Tepic	Valle de Matatipac	Nayarit	76
25	Sayula	Lagunas	Jalisco	74
26	Morelia	Morelia - Queréndaro	Michoacán de Ocampo	74
27	Tulancingo	Valle de Tulancingo	Hidalgo	70
28	Ciudad Guzmán	Ciudad Guzmán	Jalisco	63
29	Guadalajara	Toluquilla	Jalisco	45
30	Jocotepec-Ajijic	Chapala	Jalisco	35
31	San José Iturbide	Dr. Mora - San José de Iturbide	Guanajuato	33
32	Ameca	Ameca	Jalisco	29
33	Ocotlán	Ocotlán	Jalisco	23
34	San Francisco del Rincón	Río Turbio	Guanajuato	21
35	Ciudad de Querétaro	Valle de Querétaro	Querétaro	16
36	Santa María Begoña	Valle de Amazcala	Querétaro	14
37	Villa Juárez	Valle de Chicalote	Aguascalientes	9
38	Tesistán	Atemajac	Jalisco	4

Fuente: INEGI. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Dirección General Adjunta de Información Geográfica Básica. Dirección del Marco Geodésico.

Hundimiento máximo observado en las zonas de subsidencia detectadas mediante interferometría SAR

Cuadro 4.2

Zona de subsidencia	Acuífero(s)	Periodo de las imágenes SAR	Hundimiento Máximo (cm/año)
1 Ciudad de México	Zona Metropolitana de la Cd. de México, Texcoco y Chalco - Amecameca	2019	40.7
2 Valle de Aguascalientes	Valle de Aguascalientes y Ojocaliente	2019	22.9
3 Villa de Cos	Chupaderos	2019-2020	15.6
4 Jocotepec-Ajijic	Chapala	2018	15.1
5 La Laguna	Principal - Región Lagunera	2016-2019	14.9
6 Valle de Arista	Villa de Arista	2019-2020	14.3
7 Valle de Mexicali	Valle de Mexicali	2019	11.2
8 Valle de Loreto	Loreto	2016	11.0
9 Ocotlán	Ocotlán	2018-2019	10.5
10 Zamora	Zamora	2016-2019	10.2
11 Calera	Calera	2019-2020	9.8
12 Guadalajara	Toluquilla	2018	9.6
13 León	Valle de León	2017-2019	9.3
14 Jerez	Jerez	2019-2020	8.9
15 Cuautitlán-Nextlalpan	Cuautitlán - Pachuca	2019-2020	8.4
16 San José de Lourdes	Aguanaval	2019-2020	8.3
17 Dolores Hidalgo	Cuenca Alta del Rio Laja	2018-2020	8.0
18 Celaya	Valle de Celaya	2019-2020	7.9
19 Villa de Ramos	El Barril	2019-2020	7.6
20 Irapuato-Salamanca	Irapuato - Valle	2017-2019	7.1
21 Toluca	Valle de Toluca	2015-2018	7.1
22 Ciudad Guzmán	Ciudad Guzmán	2019-2020	7.0
23 San José Iturbide	Dr. Mora - San José de Iturbide	2018-2020	6.7
24 Morelia	Morelia - Queréndaro	2019-2020	6.5
25 Villa Juárez	Valle de Chicalote	2016	6.5
26 Villa de Reyes	Jaral de Berríos - Villa de Reyes	2018-2019	6.5
27 Ciudad de San Luis Potosí	San Luis Potosí	2018-2019	6.4
28 San Luis de la Paz	Laguna Seca	2018-2020	5.9
29 Sayula	Lagunas	2019-2020	5.4
30 Silao de la Victoria	Silao - Romita	2017-2019	5.3
31 Tepic	Valle de Matatipac	2018-2019	5.3
32 Tulancingo	Valle de Tulancingo	2018-2019	4.7
33 Santa María Begoña	Valle de Amazcala	2018-2019	4.5
34 Ameca	Ameca	2017-2019	4.0
35 Ciudad de Puebla	Valle de Puebla	2019-2021	4.0
36 Tesislán	Atemajac	2018	3.4
37 San Francisco del Rincón	Río Turbio	2017_2019	2.4
38 Ciudad de Querétaro	Valle de Querétaro	2015-2018	1.5

Nota: La magnitud de los hundimientos presenta variaciones en el tiempo; los hundimientos máximos se refieren a los que ocurrieron en el periodo de estudio (periodo de las imágenes SAR que se utilizaron para aplicar las técnicas de interferometría SAR).

Fuente: INEGI. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Dirección General Adjunta de Información Geográfica Básica. Dirección del Marco Geodésico.

Anexo

A. Diferencias entre las velocidades GNSS en estaciones permanentes y las obtenidas mediante interferometría SAR

En las zonas de subsidencia en las que se cuenta con estaciones GNSS permanentes se realizó el cálculo de la velocidad de hundimiento en cada estación, mediante el análisis de la serie de tiempo de las alturas diarias de cada estación, para validar los resultados de la interferometría. Una de las fuentes de las coordenadas diarias, de las estaciones GNSS cuyos datos son de acceso público, es la página del NGL, en <http://geodesy-unr.edu/> (Blewitt *et al.*, 2018).

Las velocidades de la altura para cada una de las estaciones 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 utilizó la información de las fechas más cercanas al periodo de las imágenes.

Zona de Subsidencia	Periodo de Imágenes Sentinel-1	Estación GNSS	Longitud	Latitud	Periodo de datos GNSS	Velocidad GNSS (m/año)	Velocidad PSI (m/año)	Diferencia (m/año)
Tepic	nov. 2017 – ene. 2020	INAY*	-104.8961	21.5043	nov 2017 - ene 2020	-0.014	-0.012	-0.002
		ICMX*	-99.1709	19.4056	sep 2018 - oct 2019	-0.014	-0.013	-0.001
		MMX1**	-99.0684	19.4317	sep 2018 - ago 2019	-0.277	-0.280	0.003
Ciudad de México	sep. 2018 – ago. 2019	MXTM	-98.9785	19.4844	sep 2018 - may 2019	-0.258	-0.241	-0.017
		TNGF***	-99.1762	19.3269	sep 2018 - oct 2019	0.001	-0.002	0.003
		UTUL***	-99.0163	19.2558	sep 2018 - oct 2019	-0.034	-0.030	-0.004
Irapuato	dic. 2016 – nov. 2019	UIRA***	-101.3480	20.6539	jun 2017 - nov 2019	-0.038	-0.041	0.003
Guadalajara	dic. 2017 – dic. 2018	IIEG*	-103.4460	20.6845	oct 2017 - mar 2019	-0.009	-0.002	-0.007
		UGEO***	-103.3511	20.6938	jun 2018 - ene 2019	-0.008	0.000	-0.008
León-Silao	dic. 2016 – nov. 2019	UGTO*	-101.2717	21.0027	ene 2017 - nov 2019	0.000	0.000	0.000
Zamora	dic. 2015 – ene. 2020	TNZA***	-102.2903	19.9989	dic 2015 - sep 2018	-0.075	-0.073	-0.002
		QUEX†	-115.1532	32.5492	ene 2019 - feb 2020	-0.009	-0.008	-0.001
Mexicali	ene. 2019 – feb. 2020	NAYX†	-115.2955	32.3243	ene 2019 - feb 2020	0.000	-0.011	0.011
		NVLX†	-115.1832	32.3935	ene 2015 - ene 2016	-0.069	-0.064	-0.005
Toluca	dic. 2014 – ene. 2019	TOL2*	-99.6435	19.2932	dic 2014 - ene 2019	-0.001	0.000	-0.001
		UNTO	-99.5976	19.3196	dic 2014 - ene 2019	-0.056	-0.048	-0.008
Aguascalientes	dic. 2018 – ene. 2020	UAGU	-102.3150	21.9185	dic 2018 - ene 2020	-0.092	-0.089	-0.003
		INEG*	-102.2842	21.8562	dic 2018 - ene 2020	-0.076	-0.069	-0.007
Calera-Zacatecas	nov. 2018 – dic. 2020	IZAC*	-102.6127	22.7781	nov 2018 - dic 2020	-0.005	0.000	-0.005
Celaya	dic. 2018 – ene. 2021	CEFA***	-100.8107	20.5226	dic 2018 - oct 2019	-0.020	-0.011	-0.009
		CEGA***	-100.8778	20.4701	dic 2018 - ene 2021	-0.006	-0.002	-0.004
Morelia	nov. 2018 – ene. 2021	MOIT***	-101.2503	19.6891	nov 2019 - dic 2020	-0.040	-0.028	-0.012
		TNMO***	-101.2278	19.6488	nov 2018 - ene 2021	-0.001	-0.002	0.001
		UTON***	-98.3162	19.0334	nov 2018 - may 2021	0.001	0.000	0.001
Puebla	nov. 2018 – may. 2021	ICEP*	-98.1876	19.0330	nov 2018 - may 2021	-0.002	0.000	-0.002
		PUPB	-98.2024	19.0018	nov 2018 - may 2021	0.000	-0.001	0.001
San Luis Potosí	dic. 2017 – ene. 2020	ISLP*	-101.0155	22.1442	dic 2017 - ene 2020	-0.001	-0.002	0.001
		TNSL***	-100.9742	22.1803	jun 2018 - ene 2020	-0.004	-0.003	-0.001
Querétaro	dic. 2014 – dic. 2018	UJUR***	-100.4470	20.7042	dic 2014 - dic 2018	-0.002	0.000	-0.002
		UQRO*	-100.4127	20.5911	jun 2016 – dic 2018	-0.001	0.000	-0.001

*RGNA (INEGI, IIEG), **WAAS (FAA), †CICESE REGNOM, ***TLALOCNet

***Los datos son proporcionados por *Trans-borderary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network* (TLALOCNet) operada por el Servicio de Geodesia Satelital (SGS) en el Instituto de Geofísica – Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en colaboración con UNAVCO Inc.

B. Municipios afectados en las zonas de subsidencia detectada con interferometría SAR

Zona de Subsidencia	Entidad	Municipios
Ameca	Jalisco	Ameca
Calera	Zacatecas	Calera, Fresnillo, General Enrique Estrada
Celaya	Guanajuato	Apaseo el Grande, Celaya, Cortazar, Santa Cruz de Juventino Rosas, Villagrán
Ciudad de México	Ciudad de México	Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac, Tlalpan, Xochimilco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza
	Estado de México	Atenco, Chalco, Chiautla, Chiconcuac, Chimalhuacán, Ecatepec de Morelos, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz, Temamatla, Texcoco, Valle de Chalco Solidaridad
Ciudad de Puebla	Puebla	Cuatlancingo, Puebla, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula
Ciudad de Querétaro	Querétaro	Querétaro
Ciudad de San Luis Potosí	San Luis Potosí	San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez
Ciudad Guzmán	Jalisco	Zapotlán el Grande, Gómez Farías
Cuautitlán-Nextlalpan	Estado de México	Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Ecatepec de Morelos, Jaltenco, Nextlalpan, Tecámac, Tultepec, Tultitlán, Zumpango, Cuautitlán Izcalli, Tonanitla
Dolores Hidalgo	Guanajuato	San Miguel de Allende, Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional
Guadalajara	Jalisco	El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, San Pedro Tlaquepaque, Zapopan
Irapuato-Salamanca	Guanajuato	Irapuato, Pueblo Nuevo, Salamanca, Valle de Santiago
Jerez	Zacatecas	Jerez
Jocotepec-Ajijic	Jalisco	Jocotepec, Chapala
La Laguna	Coahuila de Zaragoza	Francisco I. Madero, Matamoros, San Pedro, Torreón, Viesca
	Durango	Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí, Tlahualilo
León	Guanajuato	León, San Francisco del Rincón
Morelia	Michoacán de Ocampo	Morelia, Tarímbaro
Ocotlán	Jalisco	Ocotlán
San Francisco del Rincón	Guanajuato	San Francisco del Rincón
San José de Lourdes	Zacatecas	Fresnillo
San José Iturbide	Guanajuato	Doctor Mora, San José Iturbide
San Luis de la Paz	Guanajuato	Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional, San Luis de la Paz
Santa María Begoña	Querétaro	El Marqués
Sayula	Jalisco	Atoyac, Sayula
Silao de la Victoria	Guanajuato	Irapuato, Romita, Silao de la Victoria
Tepic	Nayarit	Xalisco, Tepic
Tesistán	Jalisco	Zapopan
Toluca	México	Chapultepec, Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca, Zinacantepec
Tulancingo	Hidalgo	Metepec, Tulancingo de Bravo
	Aguascalientes	Aguascalientes, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos, Tepezalá, San Francisco de los Romo
Valle de Aguascalientes	Zacatecas	Cuauhtémoc, Luis Moya
	San Luis Potosí	Moctezuma, San Luis Potosí, Venado, Villa de Arista
Valle de Loreto	Zacatecas	Loreto, Noria de Ángeles
	Aguascalientes	Asientos

Villa Juárez	Aguascalientes	Asientos
Valle de Mexicali	Baja California	Mexicali
Villa de Cos	Zacatecas	Guadalupe, Pánuco, Villa de Cos
Villa de Ramos	San Luis Potosí	Santo Domingo, Villa de Ramos
Villa de Reyes	Guanajuato	San Felipe
	San Luis Potosí	Villa de Reyes
Zamora	Michoacán de Ocampo	Jacona, Zamora

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>.
- Brunori, C.A., Bignami, C., Albano, M., Zucca, F., Samsonov, S., Groppelli, G., Norini, G., Saroli, M., Stramondo, S. *Land subsidence, ground fissures and buried faults: InSAR monitoring of Ciudad Guzmán (Jalisco, Mexico)*. 2015. Remote Sens. 7, 8610–8630. <https://doi.org/10.3390/rs70708610>.
- Cabral-Cano, E.; Pérez-Campos, X.; Márquez-Azúa, B.; Sergeeva, M. A.; Salazar-Tlaczani, L.; DeMets, C.; Adams, D.; Galetzka, J.; Hodgkinson, K.; Feaux, K.; Serra, Y. L.; Mattioli, G. S.; Miller, M. *TLALOCNet: A continuous GPS-net backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research*. 2018. Seismological. Research. Letters 2018, 89, 373–381, doi:10.1785/0220170190.
- Cabral-Cano, E., Salazar-Tlaczani, L. *TLALOCNet - TNMO-tnmo_tnet_mx2008 P.S. - TLALOCNet - UAGU-uagu_tnet_mx2008 P.S. - TLALOCNet - UTON-uton_tnet_mx2001 P.S. / TLALOCNet GPS Network - TNGF_Geofisica-UNAM_Mexico_City_TNET_mx2015 P.S.* 2015 / 2016. The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Datasets. <https://doi.org/10.7283/T5RR1WMF>; <https://doi.org/10.7283/T5513WK7>; <https://doi.org/10.7283/T5WH2NB5> / <https://doi.org/10.7283/T53X851M>.
- Casu, F.; Manzo, M.; Lanari, R. *A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data*. 2006. Remote Sensing Environment, 102, 195–210.
- 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., Esquivel, R., Tapete, D. *Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data*. 2021. Remote Sens. 2021, 13, 4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>.
- CONAGUA. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Aguanaval (3214) Estado de Zacatecas*. 2020. CONAGUA-Subdirección General Técnica-Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México, Diciembre 2020.
- CONAGUA. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Chupaderos (3226) Estado de Zacatecas*. 2020. CONAGUA-Subdirección General Técnica-Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México, Diciembre 2020.
- CONAGUA. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Jeréz (3205) Estado de Zacatecas*. 2020. CONAGUA-Subdirección General Técnica-Gerencia de Aguas Subterráneas. Ciudad de México, Diciembre 2020.
- 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., Foumeils 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.

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

Gonzalez-Ortega, A., Galetzka, J. E., Gonzalez, J. *CICESE REGNOM GPS Network - QUEX-quexREGNOMmx2010 P.S. - CICESE REGNOM GPS Network - NAYX-nayxREGNOMmx2010 P.S. - CICESE REGNOM GPS Network - NVLX-nvlxREGNOMmx2010 P.S.* 2018. UNAVCO, GPS/GNSS Observations Datasets. <https://doi.org/10.7283/JHBF-6D68>; <https://doi.org/10.7283/W2YN-FX25>; <https://doi.org/10.7283/Z3C9-M798>.

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.

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.

INEGI. *Mapa de susceptibilidad del fenómeno de subsidencia en el graben de Villa de Arista, San Luis Potosí*. 2017. INEGI.

Marquez-Azua, B., DeMets, Ch., Cabral-Cano, E., Salazar-Tlaczani, L. *TLALOCNet - UGEO-ugeo_tnet_mx1998 P.S.* 2015. The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset, <https://doi.org/10.7283/T58S4N9N>.

Marquez-Azua, B., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., and DeMets, C. *A model for Mexican neotectonics based on Nationwide GPS measurements 1993-2001*. 2004., Geofísica Internacional, v. 43, p.319-330.

McHugh, T. *WAAS GPS Network - MMX1 Station*. 2019. Federal Aviation Administration (FAA).

Raucoules, D.; Bourguin, B.; de Michele, M.; Le Cozannet, G.; Closset, L.; Bremmer, C.; Veldkamp, H.; Tragheim, D.; Bateson, L.; Crosetto, M.; *et al.* *Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results*. 2009. Journal of Applied Geophysics. 2009, 68, 335–347.

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.

Solano Rojas, D., Cabral Cano, E., Hernández Espriú, A., Wdowinski, S., DeMets, C., Salazar Tlaczani, L., Falorni, G., Bohane, A. *La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México*. 2015. Bol. Soc. Geol. Méx. 67, 273–283. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n2a10>.