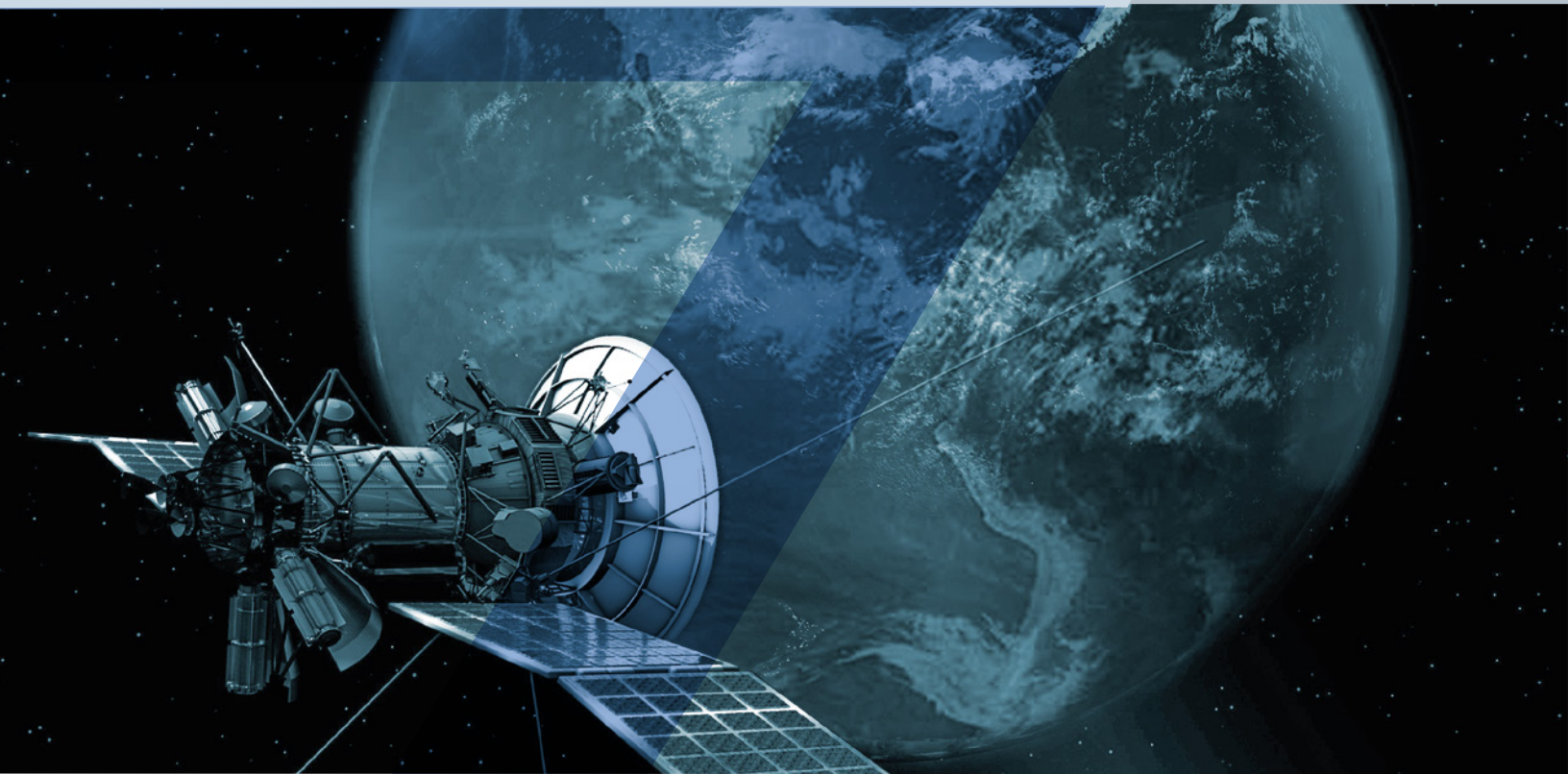


DetECCIÓN DE ZONAS DE SUBSIDENCIA EN MÉXICO CON TÉCNICAS SATELITALES

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.

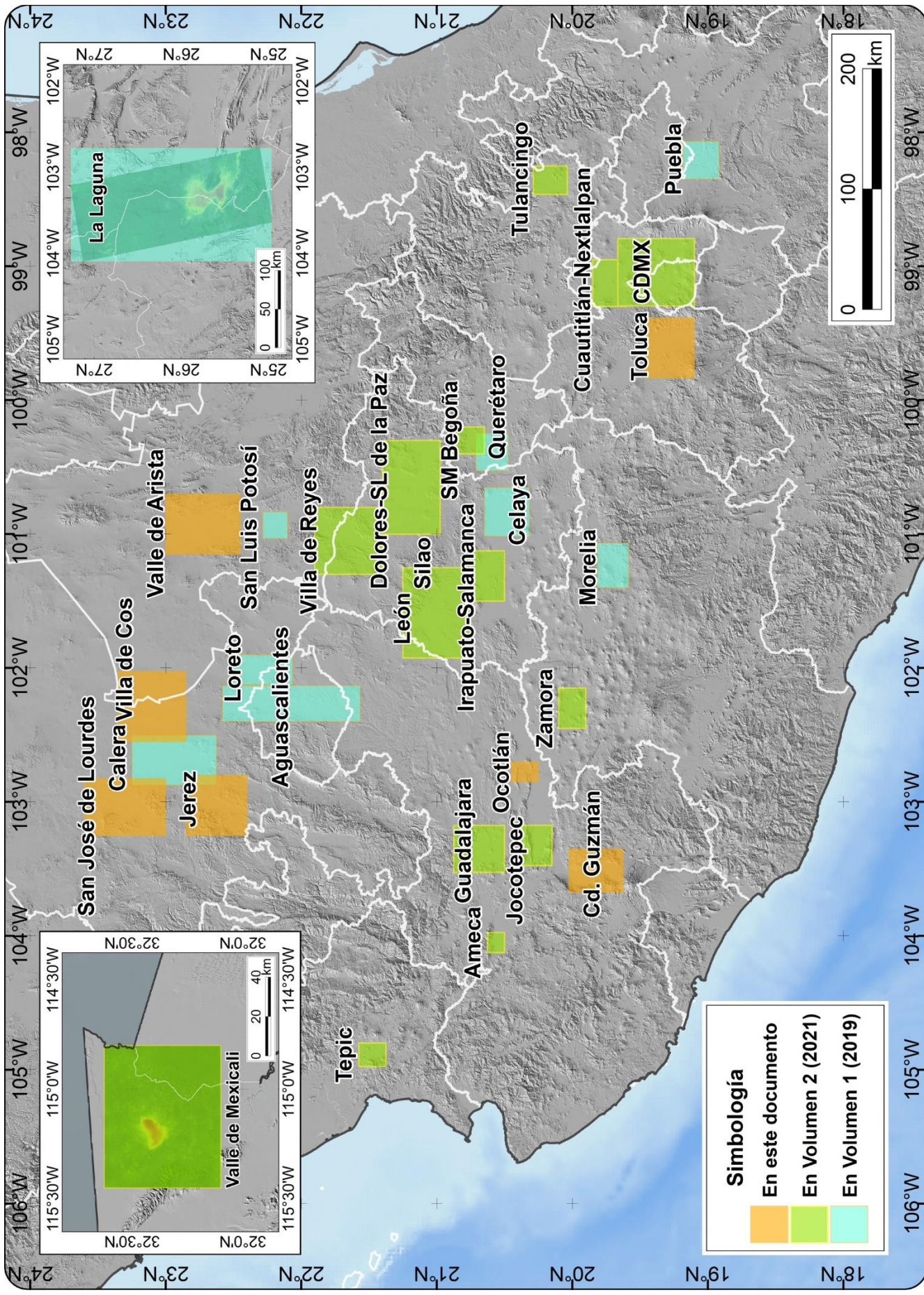
En este documento se presentan los casos de algunas regiones del país afectadas por el fenómeno de subsidencia, como complemento a las zonas publicadas en el Volumen 1 (2019) y el Volumen 2 (2021), así como un resumen estadístico de las zonas en las que se ha cuantificado su magnitud y extensión mediante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

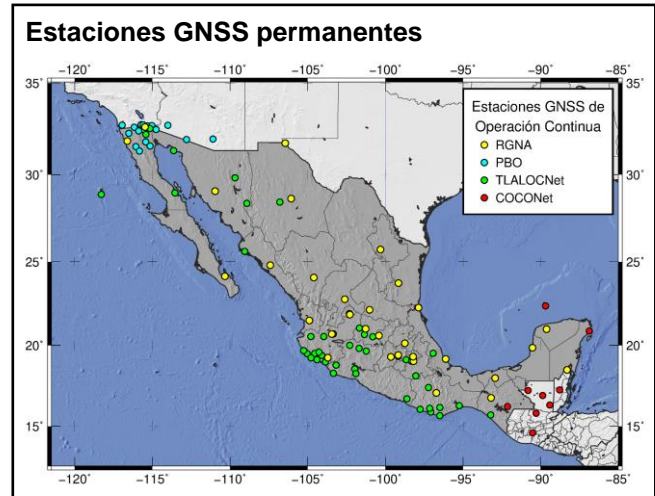
En ciertos casos los hundimientos diferenciales entre píxeles adyacentes de las imágenes, de magnitud mayor a la de la longitud de onda que utiliza el sensor SAR, que se presentan en áreas específicas de algunas zonas de estudio, producen variaciones en la fase de los interferogramas que ocasionan errores 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>

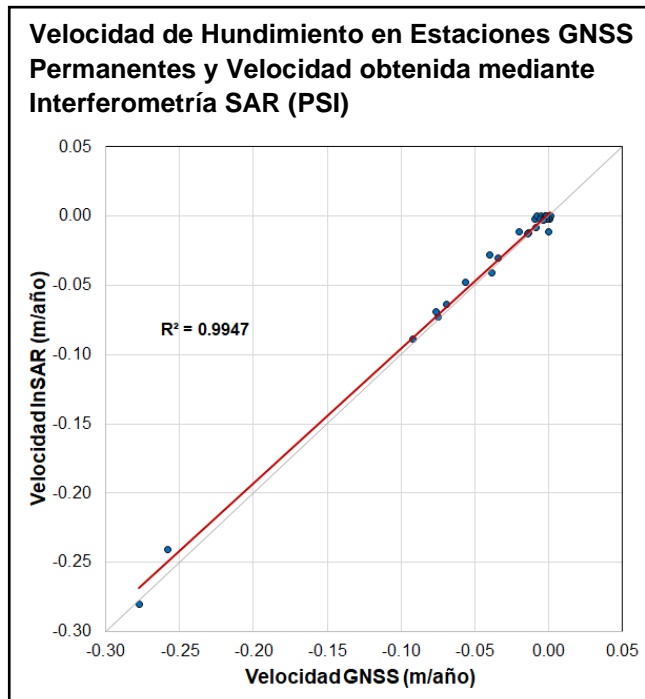
² (<http://www.unavco.org/projects/major-projects/pbo/pbo.html>)

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.

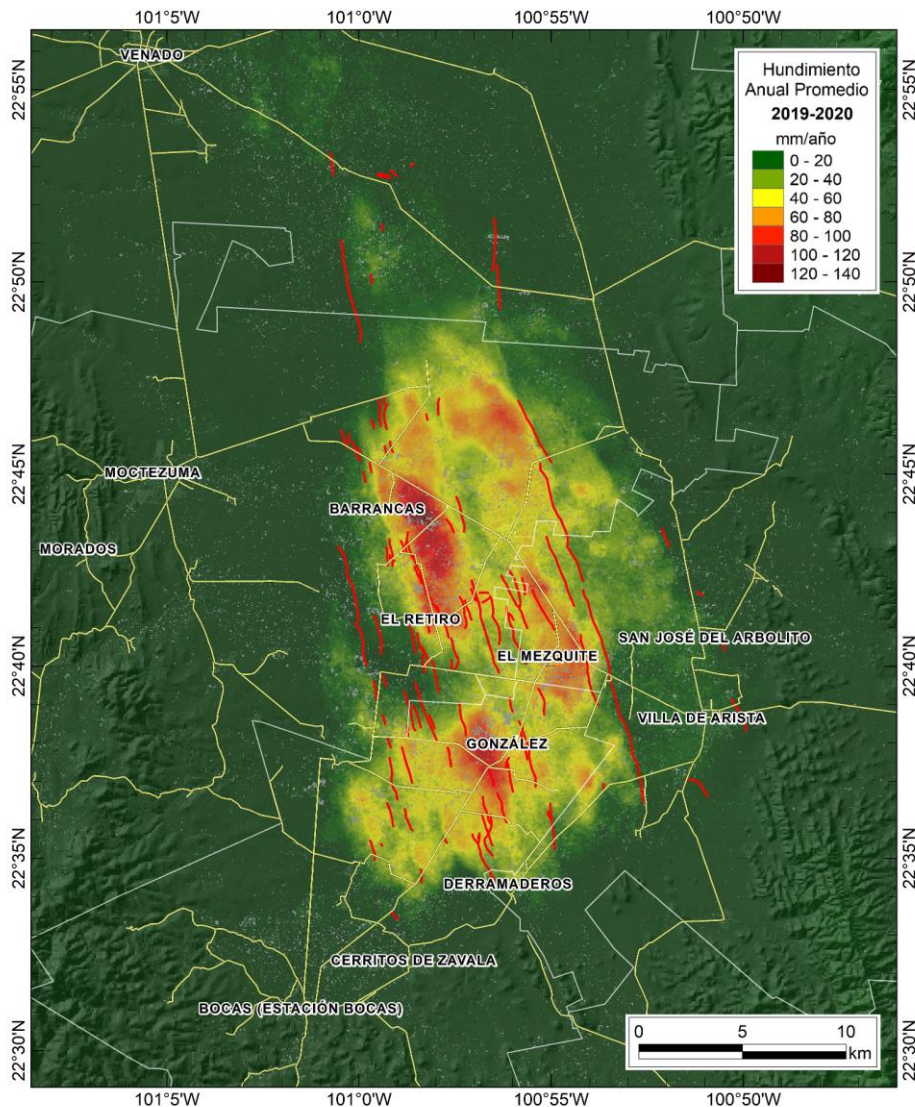
⁵ <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>

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 |

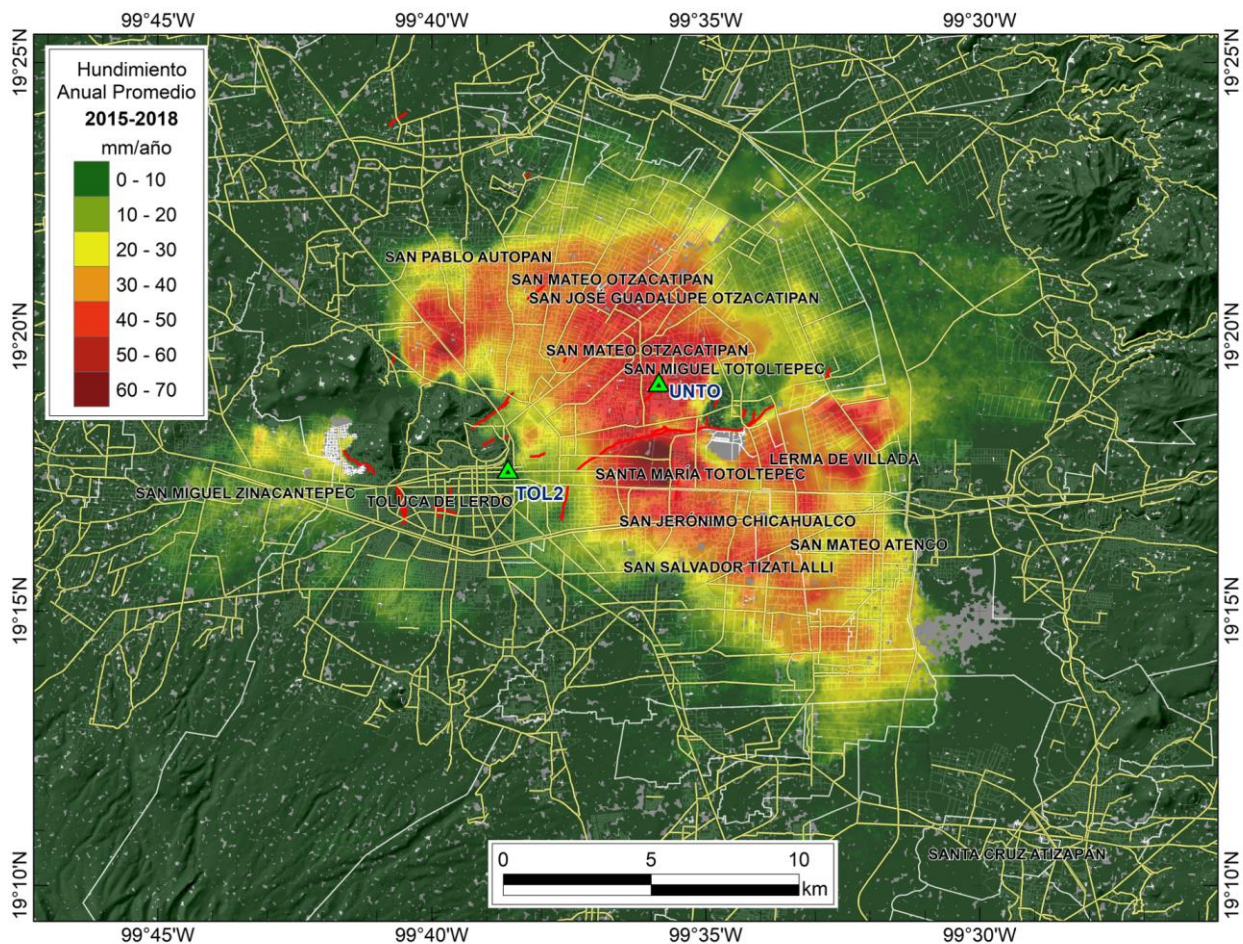
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en el valle de Arista, San Luis Potosí, en el periodo 2019-2020



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 Oztacatipan y Santa Cruz Oztacatipan 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. |

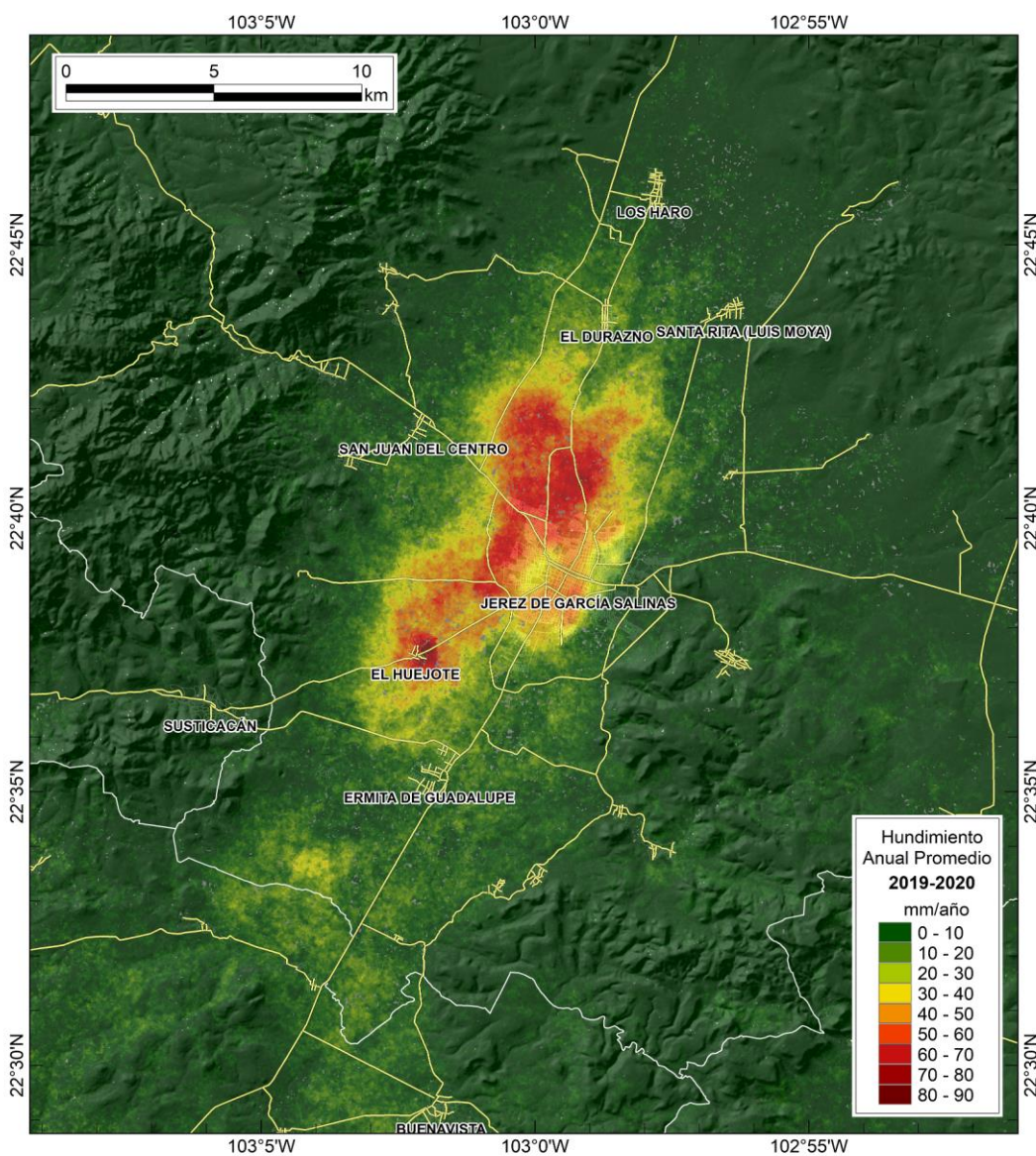
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Toluca, estado de México, en el periodo 2015-2018



3.3 Jerez, Zacatecas

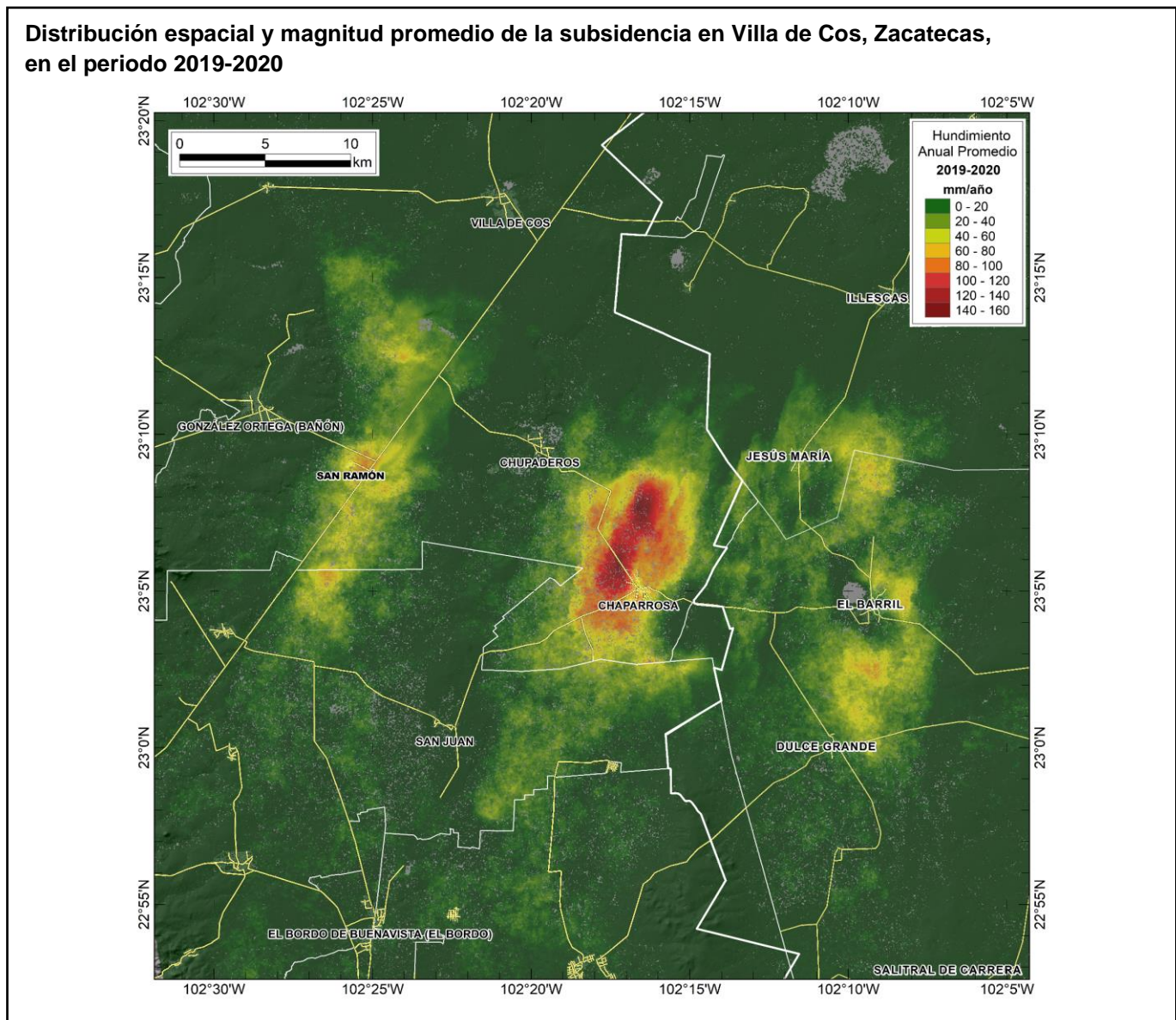
| | |
|---|---|
| Acuífero | Jerez |
| Localidades y municipios afectados | La mayor afectación ocurre en las localidades de Jerez de García Salinas y El Huejote, ambas en el municipio de Jerez. |
| Hundimiento máximo | 8.9 cm/año en la zona este de la localidad de El Huejote; 7.6 cm/año en área rural 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

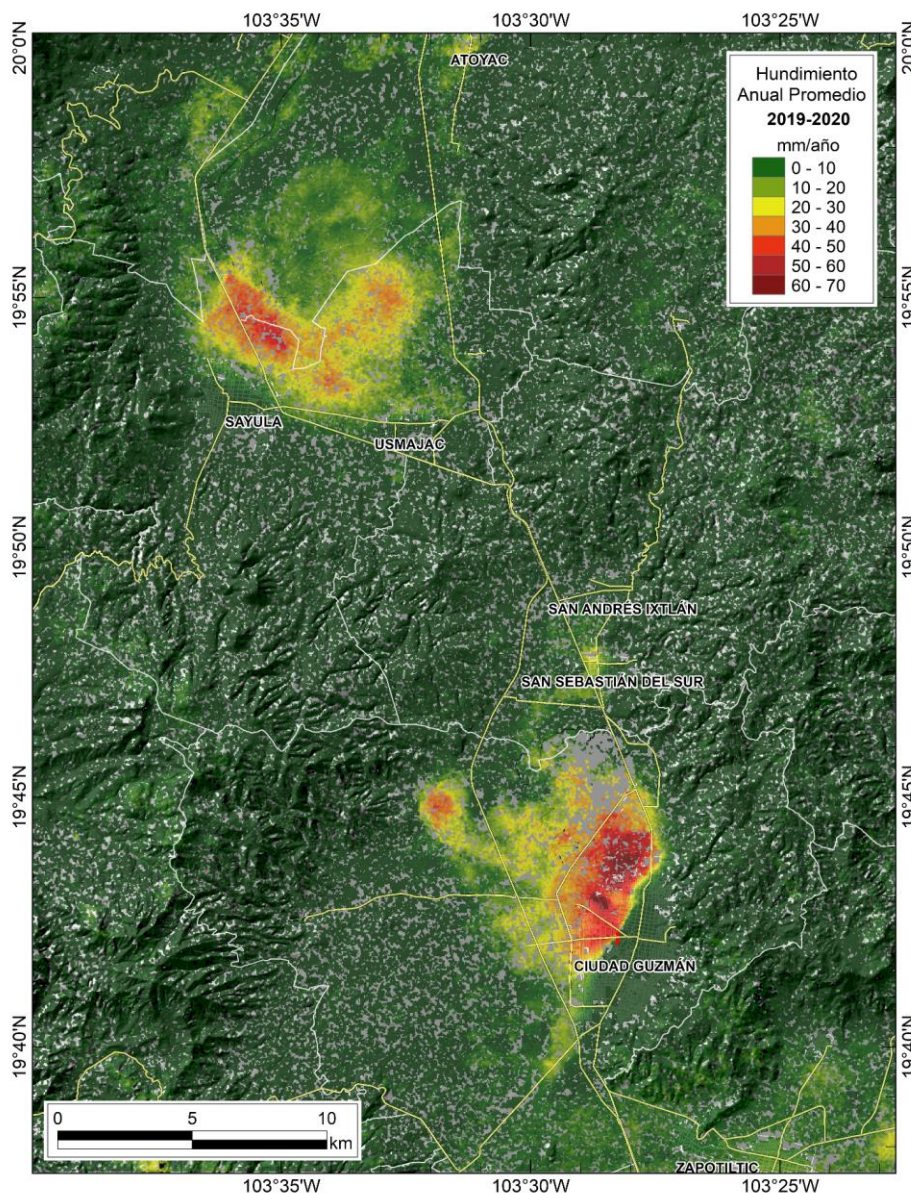
| | |
|---|---|
| Acuífero | Chupaderos y El Barril (en San Luis Potosí) |
| Localidades y Municipios afectados | La zona de subsidencia principal afecta a la localidad de Chaparrosa en el municipio de Villa de Cos, Zacatecas. Otra zona de subsidencia, con menor magnitud se presenta al este de la localidad 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. |

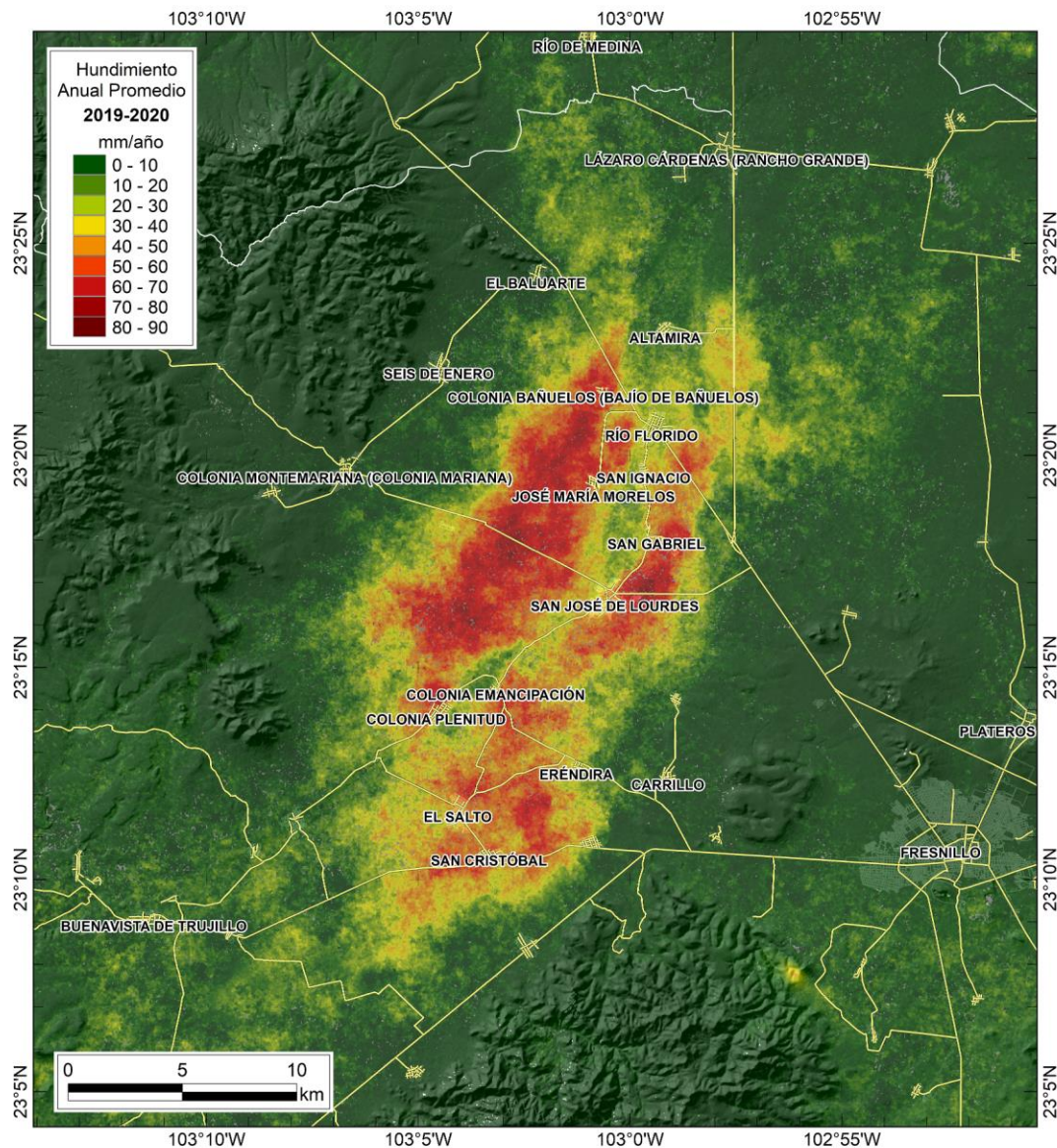
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en Ciudad Guzmán, Jalisco, en el periodo 2019-2020



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. |

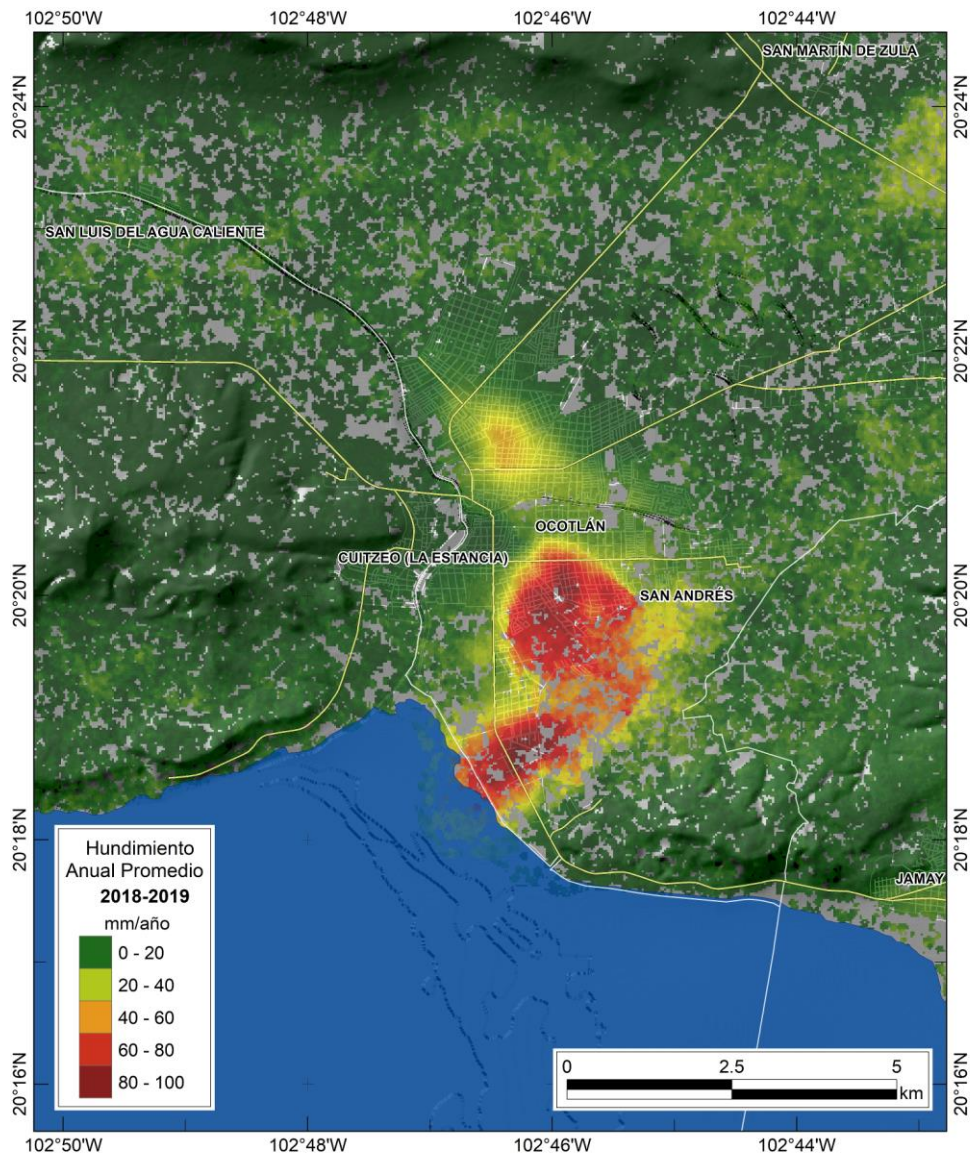
Distribución espacial y magnitud promedio de la subsidencia en San José de Lourdes, Zacatecas, en el periodo 2019-2020



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 Rio 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., Devanthy, 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>.