

Deformaciones superficiales

por los sismos de gran magnitud recientes en México detectadas mediante técnicas satelitales

Surface Deformations

Caused by the Latest Major Earthquakes in Mexico
Detected by Means of Satellite Techniques

Rubén Esquivel Ramírez, Rosío Ramírez Contreras
y Francisco Javier Huerta Juárez*

* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), ruben.esquivel@inegi.org.mx, rosio.ramirez@inegi.org.mx y javier.huerta@inegi.org.mx, respectivamente.

Aftermath of Earthquake in Mexico/Anadolu Agency/Getty Images



Los sismos, sobre todo los de gran magnitud ocurridos en México (como los del 7 y 19 de septiembre de 2017 y el del 16 de febrero de 2018), afectan diversos aspectos de nuestro entorno. En este trabajo se describe la forma en que la tecnología de posicionamiento satelital contribuye para cuantificar cambios en el medio físico con información que permite medir, de manera precisa y con un enfoque geodésico, los desplazamientos que producen en la superficie estos movimientos y otros fenómenos naturales y/o antropogénicos. También, se aborda la aplicación de la interferometría con imágenes de radar de apertura sintética para complementar la cuantificación de los desplazamientos ocurridos por los eventos sísmicos mencionados. El seguimiento a las deformaciones del terreno por terremotos de gran magnitud y por otros sucesos se han realizado desde el 2010 en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía con el objetivo de mantener la exactitud de las estaciones horizontales que integran el Marco de Referencia Geodésico.

Palabras clave: sismos; GNSS; geodesia; red geodésica; marco de referencia; interferometría SAR; Sentinel-1.

Recibido: 7 de enero de 2019.

Aceptado: 10 de septiembre de 2019.

Introducción

Las pérdidas humanas y el gran costo económico por el daño o colapso de estructuras causados por los movimientos del terreno asociados a los sismos de gran magnitud han motivado que se realicen diversos estudios: algunos de ellos para entender la naturaleza de sus causas y sus efectos, y otros con el objetivo de prevenir o minimizar daños en infraestructura y vivienda que, junto con medidas de prevención y alerta, han contribuido a reducir tanto las pérdidas humanas como las económicas en los países en los que se tiene una alta actividad sísmica.

Los grandes desplazamientos (que no se perciben a simple vista, a menos que tras el evento afloran o se magnifiquen fallas geológicas) son, también, efectos inmediatos de un sismo que, junto con

Earthquakes, especially major ones as those occurred on September 7th and 19th in 2017, and in February 16th in 2018 in Mexico, affect diverse aspects of our environment. This paper describes how GNSS (Global Navigation Satellite Systems) technology contributes to quantify changes in the physical environment through information that allows to measure, in a precise way and with a geodetic point of view, the displacements on the surface produced by earthquakes and other natural or anthropogenic phenomena. It also addresses the application of SAR interferometry (synthetic aperture radar interferometry) to complement the quantification of displacements caused by the above mentioned earthquakes. Monitoring of land deformations caused by large earthquakes and other phenomena, has been carried out by INEGI since 2010 with the aim of maintaining the accuracy of the horizontal stations of the Geodetic Reference Frame in Mexico.

Key words: Earthquakes; GNSS; Geodesy; Geodetic network; Reference frame; SAR interferometry; Sentinel-1.

otros fenómenos y con el transcurso del tiempo, van dando forma al relieve que percibimos en la superficie de la corteza terrestre.

A mediados del siglo pasado, observaciones geológicas, geofísicas y sismológicas dieron origen a la teoría de tectónica de placas, que describe el mecanismo de los movimientos e interacciones entre placas de corteza continentales y oceánicas que dan origen a los sismos y otros efectos (como el vulcanismo) en la superficie de la Tierra.

En la actualidad, las técnicas satelitales, como los sistemas satelitales de navegación global (GNSS, por sus siglas en inglés)¹ permiten medir de manera precisa los movimientos que ocurren

¹ Se refiere a las diferentes constelaciones satelitales (como GPS, GLONASS y GALILEO) que proporcionan servicios de posicionamiento y navegación.

por estos fenómenos. En el 2010, con el establecimiento de un nuevo marco de referencia oficial para México y tras el sismo en Mexicali el 4 de abril de ese año con magnitud 7.2, se inició un seguimiento a las deformaciones que producen estos seísmos de gran magnitud con el objetivo de aplicar las correcciones necesarias para que la propagación de coordenadas en dicho marco, a partir de las estaciones de la Red Geodésica Horizontal —que es parte de la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) del INEGI—, se pueda efectuar con la exactitud adecuada, de acuerdo con la normatividad vigente.

En este trabajo se describen, de manera general, las deformaciones más significativas que afectan al territorio mexicano y se presentan los resultados del procesamiento y análisis de información GNSS, así como imágenes de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés), para detectar, cuantificar y modelar los desplazamientos del terreno provocados por los sismos que ocurrieron en México en el 2017 y 2018.

Sismicidad en el territorio mexicano

La considerable actividad sísmica en México se debe a las interacciones entre las placas tectónicas en las que se encuentra situado el territorio del país o que inciden sobre este. Las zonas en las que se presentan estas interacciones y que, en consecuencia, es donde se originan la mayoría de los sismos, son parte del llamado *Cinturón de Fuego del Pacífico*.

Aunque la alta actividad sísmica se desarrolla a lo largo de la costa del Pacífico mexicano, las regiones que históricamente representan mayor riesgo para la ciudadanía y en las que se manifiestan desplazamientos significativos son la de los estados en las costas sur y occidente (desde Chiapas hasta Nayarit, y cuyos efectos se extienden hacia el centro del país, es decir, a Puebla, México, Morelos y la Ciudad de México, sobre todo) y la región noroeste, con mayores efectos al norte de Baja California y noroeste de Sonora.

La forma en que se da la interacción entre placas es diferente en ambas regiones: mientras que en la noroeste el movimiento lateral entre la del Pacífico y la Norteamericana (ver mapa 1) genera un sistema de fallas transformantes de desgarre, en la sur se presenta una subducción de la de Cocos en la Norteamericana y, de manera adicional, un efecto de la placa del Caribe. Estas interacciones condicionan la dirección de los desplazamientos que ocurren con los sismos de gran magnitud.

Si bien día a día ocurre gran cantidad de sismos en México, la mayoría de ellos son de una intensidad imperceptible o se perciben de forma ligera de manera local en las cercanías de su epicentro. Los de gran magnitud, que causan cuantiosas pérdidas económicas y, en ocasiones, también humanas, históricamente son menos frecuentes. De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN),² en el periodo 2000-2009 solo se registró uno, en el 2003, de 7.6 grados con epicentro cerca de la costa de Colima, mientras que del 2010 a la fecha han ocurrido siete (ver mapa 2); los primeros cuatro entre el 2010 y 2016, y los tres más recientes dentro de un lapso de menos de seis meses: dos en septiembre del 2017 y el último en febrero del 2018.

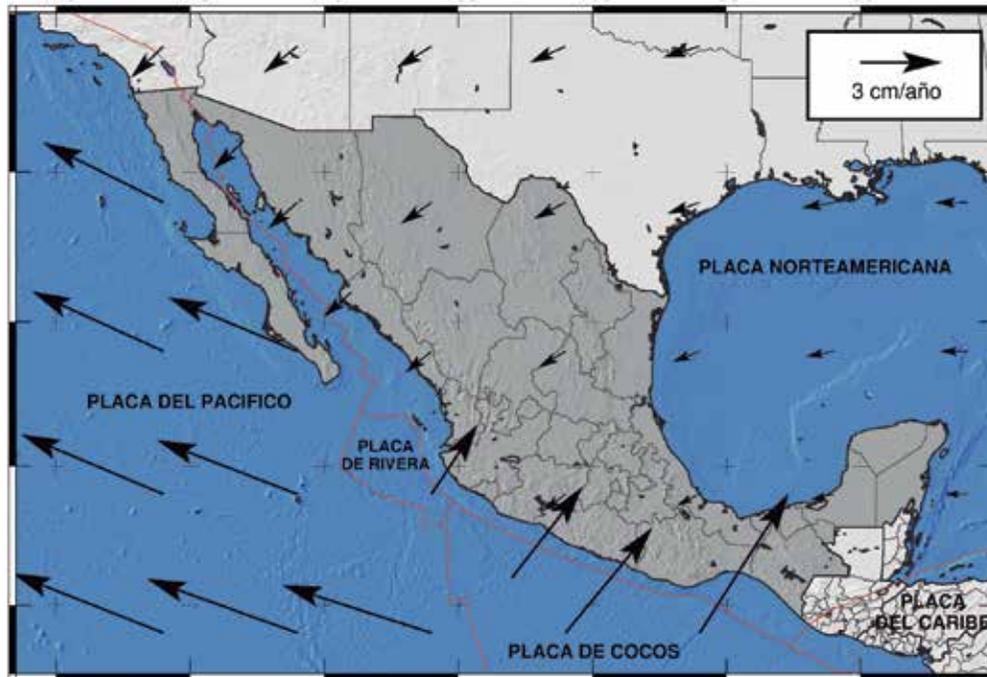
Redes GNSS y coordenadas precisas

El desarrollo de las técnicas satelitales en las décadas más recientes propició grandes avances en la geodesia, de manera que, en la actualidad, el estudio de la Tierra no se limita a su forma y dimensiones, sino que se determinan también, con detalle, los cambios que experimenta con el tiempo. Por su diversidad de aplicaciones, la técnica GNSS (mediante sus constelaciones satelitales cada vez más amplias y su aprovechamiento a través de redes de estaciones permanentes en el mundo) es la que mayor desarrollo ha tenido y que ha beneficiado enormemente a esta ciencia. De entre sus aplicaciones está el desarrollo del marco de referencia

² <http://www.ssn.unam.mx/>

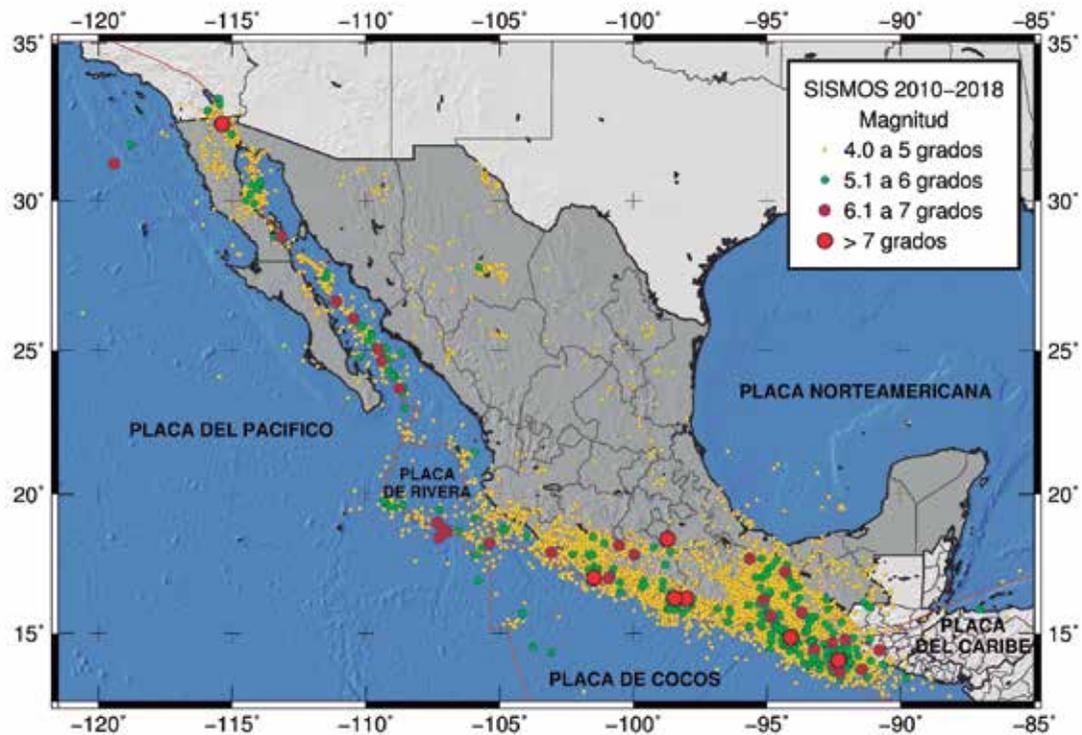
Mapa 1

Situación de México en las placas tectónicas y su desplazamiento general



Mapa 2

Sismos de magnitud mayor a 4 grados del 2010 al 2018



Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

global (ITRF, por sus siglas en inglés),³ en sus diferentes y cada vez más exactas realizaciones que, además de que es la base para la georreferencia de la cartografía y los proyectos de ingeniería de muchos países, es primordial para diversos estudios de fenómenos sobre el planeta.

En México se cuenta con redes de estaciones GNSS permanentes que proporcionan los datos para el acceso público, como la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA),⁴ PBO,⁵ COCONet⁶ y TLALOCNet,⁷ que fueron establecidas para fines geodésicos, atmosféricos y/o geofísicos. En las

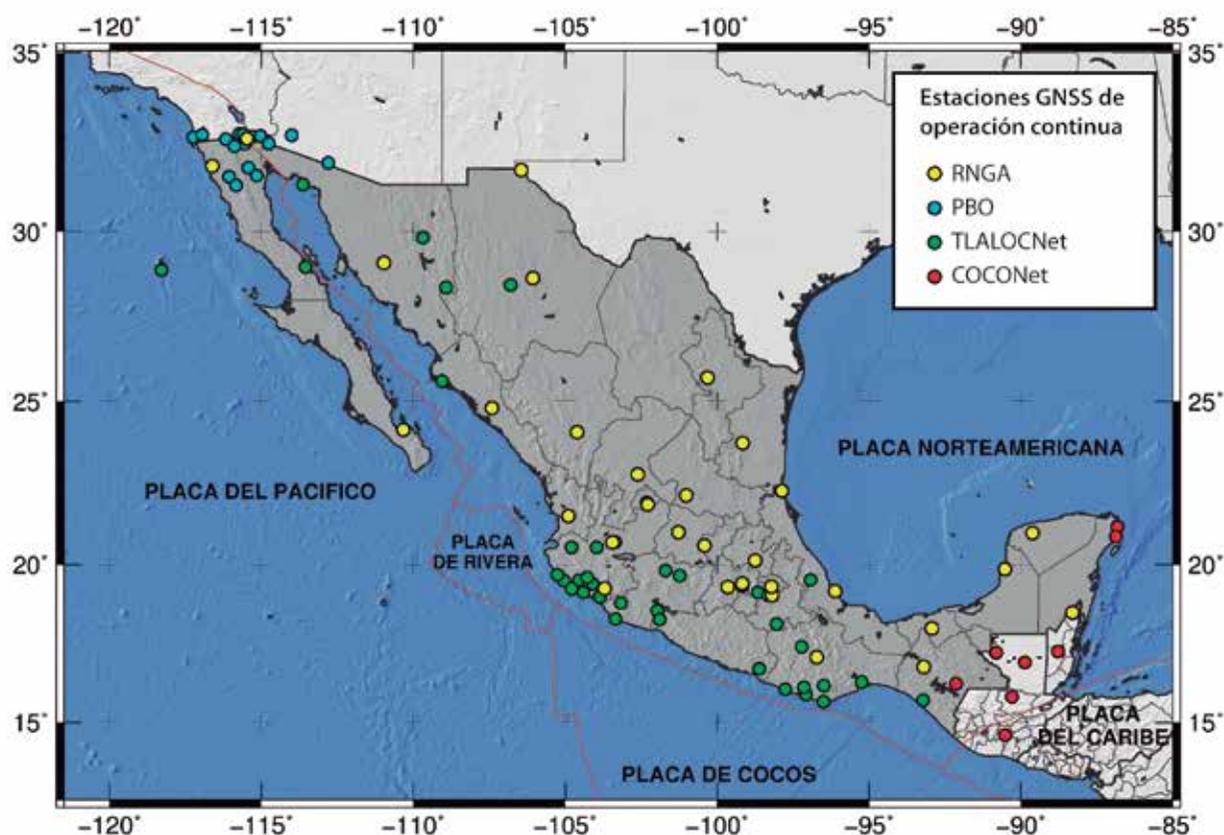
estaciones, cuya distribución actual se muestra en el mapa 3, se cuenta con equipos de tipo geodésico con capacidad de recepción de la señal que emiten en diferentes frecuencias o bandas los satélites GPS y de otras constelaciones satelitales, como GLONASS, Galileo o Beidou.

Mediante el procesamiento de las observaciones de la fase de las señales GNSS recabadas por receptores geodésicos en las estaciones permanentes, se eliminan o reducen errores propios de los GNSS (como los atmosféricos, de órbita, de reloj del satélite y del receptor) para tanto corregir las *pseudodistancias* estimadas entre el receptor y los satélites como determinar, así, las coordenadas de cada estación con exactitudes de algunos centímetros o hasta milímetros, dependiendo de la cantidad de observaciones y de la técnica de procesamiento utilizada.

3 International Terrestrial Reference Frame, <http://itrf.ensg.ign.fr/>
4 https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/default.html#Mapa
5 Plate Boundary Observatory, <http://www.unavco.org/projects/major-projects/pbo/pbo.html>
6 Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network, <http://coconet.unavco.org/>
7 <http://cardi.geofisica.unam.mx/tlalocnet/>

Mapa 3

Estaciones GNSS de operación continua



Aseguramiento de la exactitud de la Red Geodésica Nacional

La Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional⁸ establece el orden de exactitud que deben cumplir las estaciones de la Red Geodésica Nacional, que es de 5 cm para las coordenadas de estaciones de la RGNA y de 10 para las de densificación básica de la RGNP, que se determinan con respecto al nuevo marco de referencia ITRF2008 época 2010.0, establecido como oficial para México en diciembre del 2010. Dadas las exactitudes que ofrecen en la actualidad las técnicas de posicionamiento GNSS, estas resultan muy fáciles de alcanzar en regiones donde no se presentan deformaciones diferenciales. Sin embargo, la subducción de la placa oceánica de Cocos por debajo de la Norteamericana provoca que parte del territorio en la región sur de México tenga deformaciones acumulativas distintas a los desplazamientos propios de esta última (ver mapa 1).

8 Diario Oficial de la Federación (DOF). México, DF, 23 de diciembre de 2010.

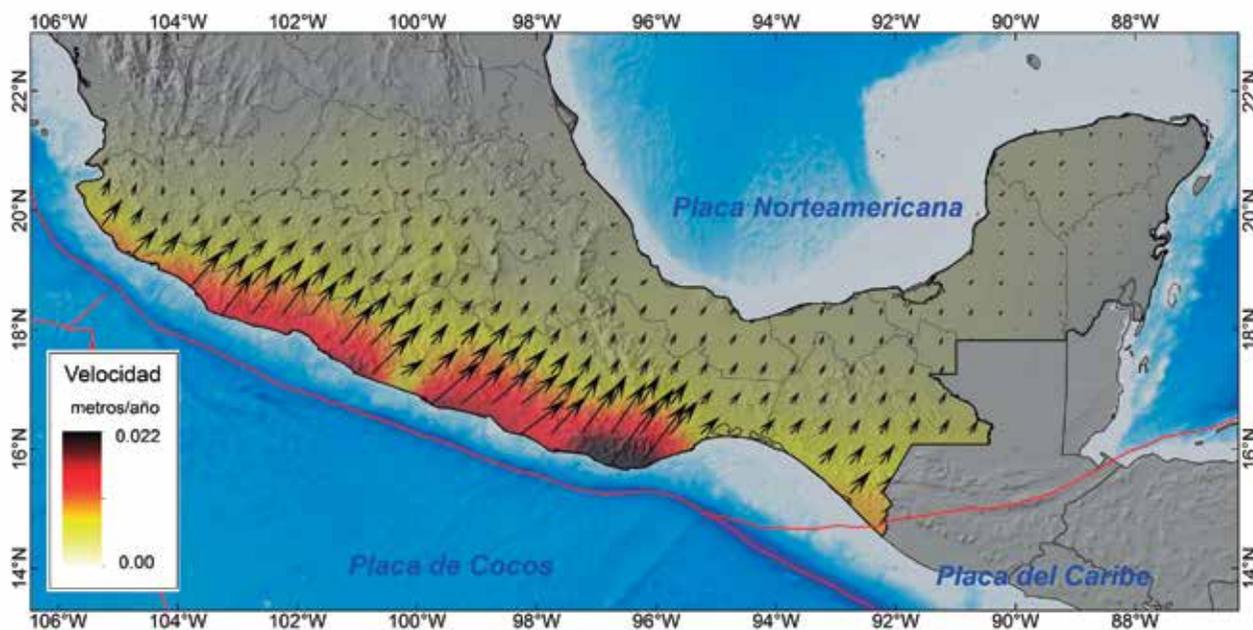
La velocidad de las deformaciones diferenciales con respecto a la placa Norteamericana en la región sur del territorio (ver mapa 4) fue determinada en el 2015 con base en el cálculo y análisis de las velocidades que se observaron en estaciones GNSS permanentes con más de 2.5 años de operación; las velocidades de cada una se calcularon a partir de coordenadas de soluciones diarias o semanales; en el caso de estaciones permanentes con variaciones en las coordenadas, provocadas por eventos de gran magnitud, se omitieron los periodos afectados por desplazamientos cosísmicos y postsísmicos.

Dada la escasez de estaciones en algunas zonas, en este cálculo inicial se consideraron velocidades de diferentes periodos de datos, las cuales se refinarán con datos más recientes de las estaciones ya contempladas y se complementarán con los de nuevas disponibles.

De manera similar, se elaboró un modelo regional de velocidades en la zona de deformación entre las placas Norteamericana y del Pacífico en la región noroeste de México, donde la interacción

Mapa 4

Velocidades con respecto al desplazamiento general de la placa Norteamericana



entre ambas produce un sistema de fallas y deformaciones complejas. Además de ellas —que ocurren de manera continua—, las que suceden con los sismos de gran magnitud afectan también la consistencia de la Red Geodésica Horizontal; es por ello que, para minimizar errores en las coordenadas de nuevos levantamientos, es necesario estimar los desplazamientos superficiales que provocan los movimientos telúricos.⁹

Desplazamientos por sismo a partir de soluciones GNSS

Contar con observaciones continuas en las estaciones geodésicas permite dar seguimiento a las variaciones de sus coordenadas y estimar velocidades que describen su desplazamiento en el tiempo con respecto a un marco de referencia determinado. De igual manera, cuando ocurre un sismo, las variaciones en sus coordenadas reflejan los desplazamientos cosísmicos (ocurridos durante el evento principal), así como de los que pudieran desarrollarse posteriormente al temblor (postsísmicos), asociados a réplicas o a reajustes de la corteza, pero que están relacionados con el evento principal.

En la figura 1 se observan los efectos que provocaron los tres sismos de magnitud mayor a 7 grados en el 2017 y 2018 para las componentes este y norte de cuatro de las estaciones GNSS permanentes (OXTH, TNNX, OXUM y TNCY); la localización de los epicentros se presenta en el mapa adjunto, al igual que la ubicación de las cuatro estaciones de las que se muestran sus series de tiempo. En cada gráfica están representadas con líneas verticales las fechas en las que ocurrieron los sismos: la color naranja corresponde al evento del 7 de septiembre de 2017; la gris, al del 19 de septiembre y la vertical verde, al de febrero del 2018.

Tras los eventos sísmicos principales, en ocasiones se observa que, de forma casi inmediata, el terreno continúa desplazándose en la misma di-

rección que lo hacía antes del sismo, como ocurrió después del acaecido el 7 de septiembre, de acuerdo con lo que indican las series de tiempo de las estaciones en la figura 1. Sin embargo, en otros casos, como en el de febrero del 2018, ocurren desplazamientos postsísmicos que pueden presentarse durante semanas o meses, hasta que el terreno vuelve a desplazarse de manera normal.

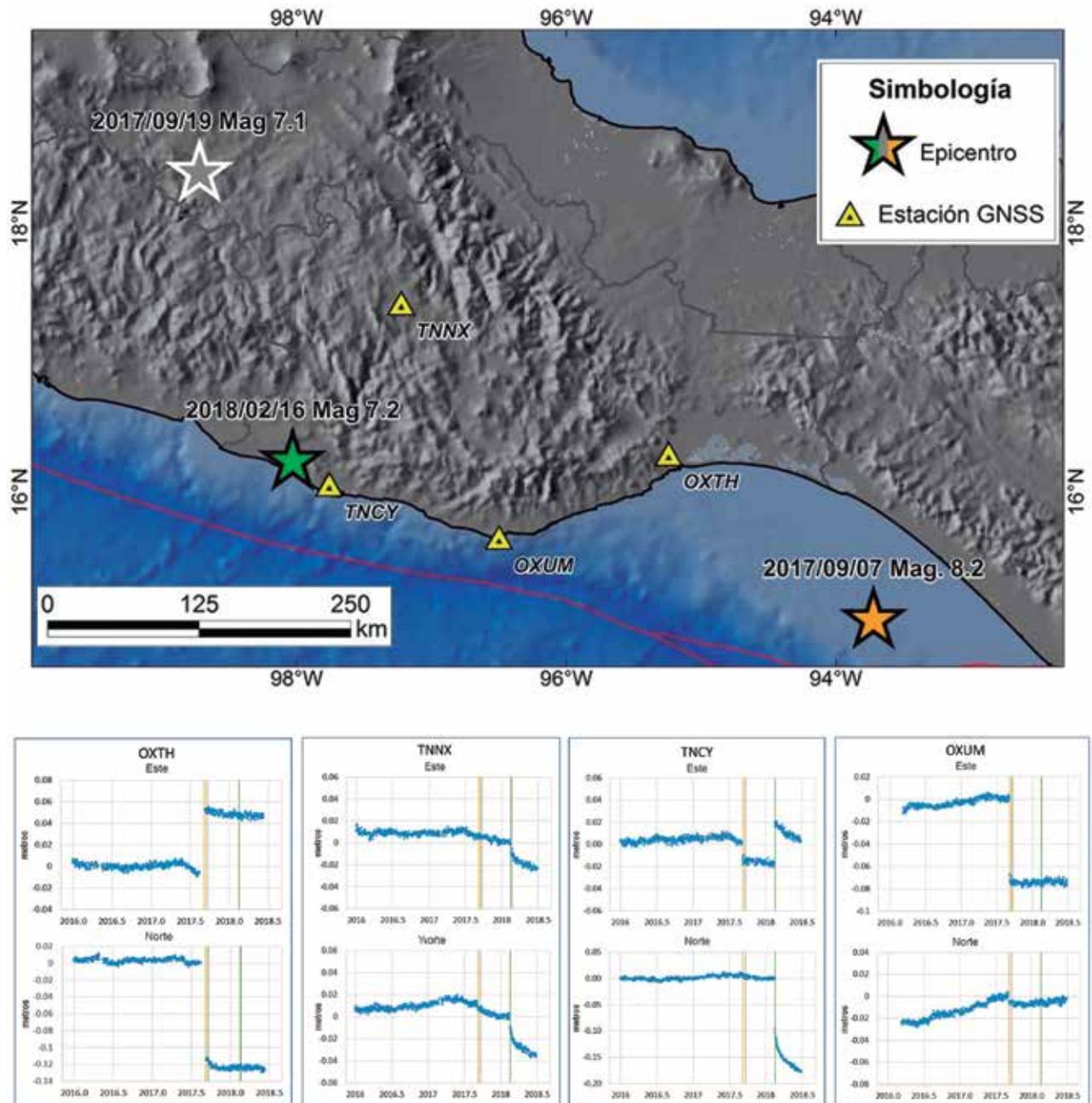
Las series de tiempo de coordenadas de las estaciones permanentes se construyen a partir de las soluciones diarias que se obtienen del procesamiento de los datos GPS o GNSS recabados en cada estación; las de las cuatro que están en la figura 1, en específico, se elaboraron con base en las soluciones disponibles en el sitio del Laboratorio Geodésico de Nevada (NGL, por sus siglas en inglés). A partir de las posiciones antes y después del sismo se calcula el desplazamiento total ocurrido en las estaciones, incluyendo, en su caso, los movimientos postsísmicos. Después de cada evento se identificaron, con base en los mapas de intensidad del temblor, las estaciones GNSS permanentes ubicadas en la región afectada, incluyendo las de regiones aledañas que pudieron registrar algún desplazamiento o en las que es necesario corroborar que permanecieron estables.

Otra fuente de información son las estaciones de la RGNP ubicadas en las zonas de mayor deformación que, de contar con mediciones GNSS recientes (previas al sismo) en modo estático, con posicionamiento mínimo de dos horas en cada estación usando receptores GNSS geodésicos, pueden ser reposicionadas para estimar su desplazamiento, aunque, en este caso, el error asociado a los movimientos obtenidos puede llegar a varios centímetros. En el mapa 5 se representan los desplazamientos (calculados en estaciones GNSS permanentes de las redes TLALOCNet, RGNA y Oaxaca GPS Network) y en algunas estaciones de la RGNP que se observaron por el sismo del 7 de septiembre de 2017, con epicentro al sur de las costas de Chiapas; la magnitud y dirección de los vectores en el mapa representan tanto los desplazamientos cosísmicos como los postsísmicos. Hay diferentes versiones sobre los límites entre placas tectónicas que,

⁹ Para ahondar sobre cómo se reducen los efectos de los desplazamientos del terreno en las coordenadas en época 2010.0 de nuevas estaciones geodésicas, ver INEGI, 2016.

Figura 1

Efecto de los tres sismos fuertes más recientes en las series de tiempo de cuatro de las estaciones GNSS permanentes



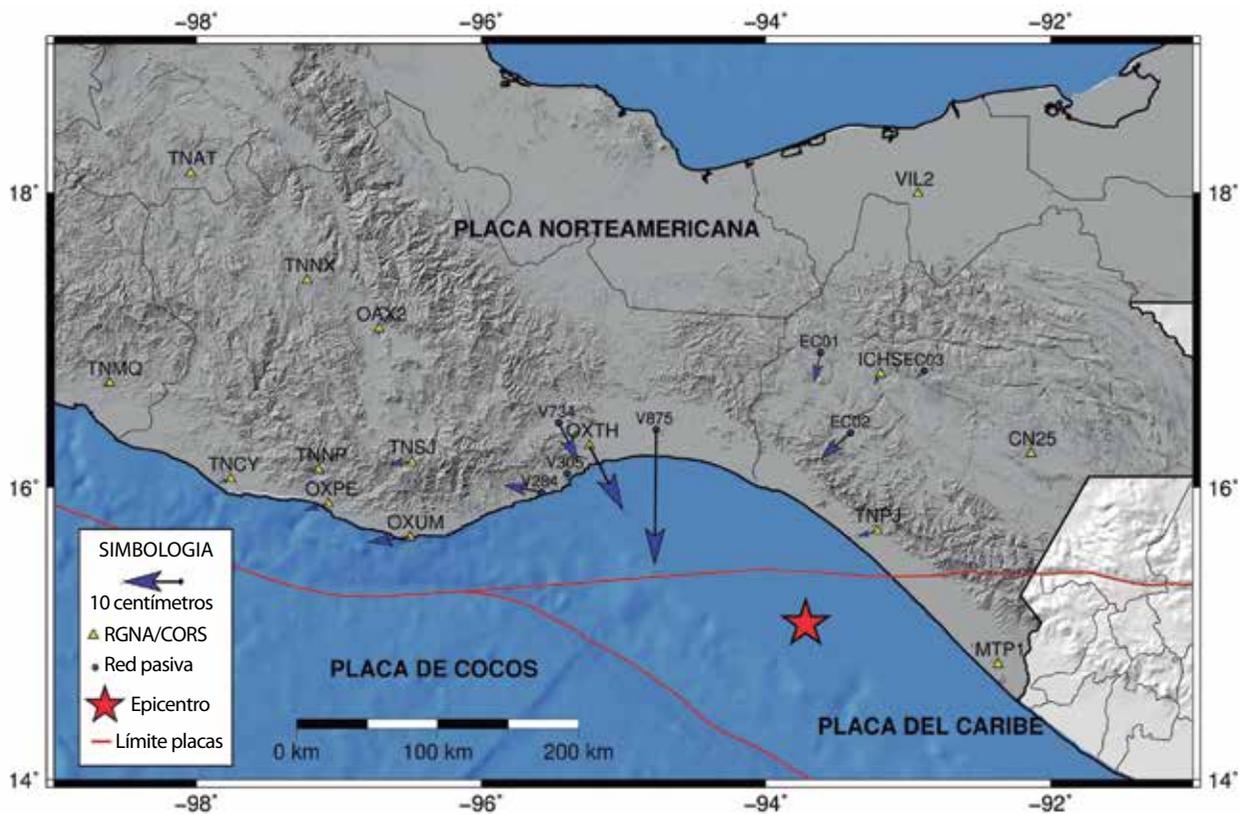
Nota: las líneas verticales en las series de tiempo indican la fecha en que ocurrieron los sismos, cuyos epicentros se muestran en el mapa.

Fuentes: soluciones diarias publicadas por Nevada Geodetic Laboratory (Blewitt *et al.*, 2018), con datos de estaciones de las redes TLALOCNet y Oaxaca GPS Network (DeMets, Ch. y E. Cabral-Cano, 2008).

en lo que se refiere al territorio mexicano, difieren sobre todo en la descripción del límite de la placa del Caribe con la Norteamericana y la de Cocos. En los mapas subsecuentes, el representado es el

descrito por Bird (2003). Para la elaboración de los mapas en este documento, además de *software* GIS comercial, se utilizó el *Generic Mapping Toolbox (GMT)*, desarrollado por Wessel *et al.*, 2013.

Desplazamientos en las estaciones geodésicas por el sismo del 7 de septiembre de 2017



Fuente: los desplazamientos se calcularon a partir de soluciones diarias publicadas por Nevada Geodetic Laboratory (Blewitt et al., 2018) con datos de estaciones de las redes TLALOCNet, Oaxaca GPS Network, COCONet y Wide Area Augmentation System (WAAS) y a partir del procesamiento de datos GNSS de estaciones de la RGNA y de la RGNP del INEGI.

Estimación de los desplazamientos mediante interferometría SAR

A diferencia de las imágenes ópticas, las de radar proporcionan información de la escena sin verse afectadas por condiciones de nubosidad e iluminación, ya que desde la misma plataforma se emite la señal que, luego de ser retrodispersada por los elementos en la escena (superficie cubierta por la imagen), se registra por medio de la antena del sensor. Esta forma de adquisición permite obtener la cobertura total de la escena, sin huecos, indistintamente del horario y bajo cualquier condición climática. En los sistemas SAR, la señal retrodispersada se procesa para obtener una mayor resolución que en los sistemas de radar comunes.

De manera similar al posicionamiento GNSS, en la técnica de interferometría SAR (InSAR) se explo-

ta la fase de la señal detectada, en este caso, para calcular las variaciones en la distancia suelo-satélite; para ello, se requiere el procesamiento de dos imágenes adquiridas desde diferentes posiciones del sensor. Una variante de la InSAR es la interferometría diferencial SAR (DInSAR), en la que el par de imágenes que se procesan, más que ser captadas desde diferente posición, deben obtenerse en fechas diferentes para que, una vez removida la componente topográfica en las diferencias de fase, se obtengan los desplazamientos que sucedieron en la escena durante el tiempo que transcurrió entre la fecha de adquisición de ambas.

Debido a la geometría de adquisición de las imágenes SAR satelitales (ver figura 2), que emiten y registran la señal radar mediante observación lateral de la escena —por lo general hacia la derecha con respecto a la dirección de su órbita *cuasi-po-*

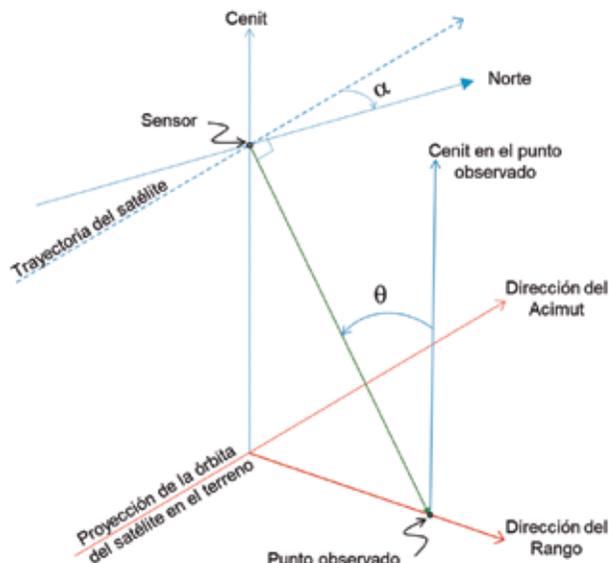
lar, que describe un ángulo (α) de alrededor de 10° con respecto al norte—, los desplazamientos que se detectan mediante DInSAR son los que ocurren en dirección perpendicular a la trayectoria del satélite (dirección LOS por *Line of Sight*) por lo que, para una misma escena, los desplazamientos se observan con diferente magnitud y sentido, lo cual depende de si el par de imágenes fue adquirido en órbita del sensor ascendente o descendente.

La proyección en dirección LOS (d_{LOS}) del desplazamiento espacial en sus componentes norte (d_n), este (d_e) y vertical (d_v) es determinado (Jo *et al.*, 2017) por los ángulos de la órbita (α) y el de incidencia (θ):

$$d_{LOS} = d_v \cos \theta - \text{seno } \theta (d_n \text{ seno } \alpha + d_e \cos \alpha)$$

Figura 2

Geometría de adquisición de imágenes SAR satelitales en modo ascendente



Si bien desde hace tres décadas existen sensores SAR satelitales, a nivel mundial solo en algunas regiones se contaba con la adquisición sistemática de imágenes que permitían realizar estudios de deformaciones en casos de sismo. Con el lanzamiento del sensor *Sentinel-1* del programa *Copernicus*¹⁰

¹⁰ <https://scihub.copernicus.eu/>

a finales del 2014, se ha facilitado la realización de estos estudios gracias a la amplia cobertura y disponibilidad de imágenes SAR de esta plataforma.

Con el objetivo de complementar la información de los desplazamientos ocurridos por los sismos en zonas no cubiertas por estaciones GNSS, sobre todo en áreas con mayor deformación, se efectuó el procesamiento DInSAR de pares de imágenes SAR *Sentinel-1*. Los pares interferométricos se formaron con tomas previas y posteriores a cada sismo, adquiridas en órbitas tanto ascendentes como descendentes de la plataforma y fueron procesados mediante el programa *Sentinel Application Platform (SNAP)*¹¹ de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). En el mapa 6 (a y b) se muestran desplazamientos en dirección a la ubicación del satélite (LOS) observados mediante pares de imágenes *Sentinel-1* modo IW en ambas órbitas para el sismo del 7 de septiembre de 2017.

La geometría de adquisición de las imágenes SAR satelitales hace a la técnica DInSAR muy sensible a los desplazamientos verticales, así como a los horizontales en dirección del rango (ver figura 2). Para la obtención de movimientos horizontales en dirección este y norte se requiere contar con imágenes en diferentes geometrías de adquisición; sin embargo, aun combinando resultados de imágenes en ambas órbitas, los desplazamientos en dirección norte resultan mucho menos exactos que los que ocurren en la este (Wright *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2007). En el mapa 7 están representados los desplazamientos horizontales estimados a partir de los resultados del procesamiento DInSAR en órbita ascendente y descendente (a), así como los correspondientes al evento del 16 de febrero de 2018 (b).

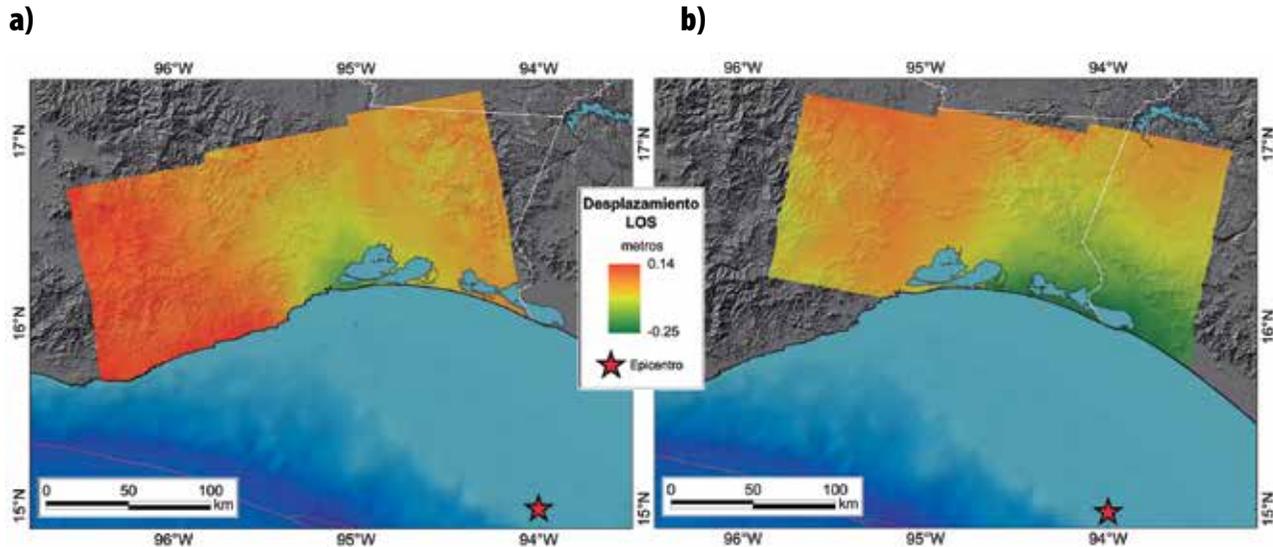
En la aplicación de la técnica DInSAR se pueden obtener inconsistencias por pérdida de correlación o coherencia en zonas que presentan variaciones en las propiedades reflectantes debido, entre otros posibles factores, a cambios en la vegetación y/o contenido de humedad del suelo, como los que se presentan en áreas de cultivo. Aunque una de las

¹¹ <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

ventajas de las imágenes SAR es que son poco afectadas por condiciones de nubosidad, las variaciones atmosféricas entre las fechas de adquisición de cada imagen que forma el par interferométrico pueden también afectar los valores de fase en los productos, lo que puede resultar en cálculos erróneos de desplazamientos en zonas con marcados cambios atmosféricos, por lo que los movimientos calculados mediante

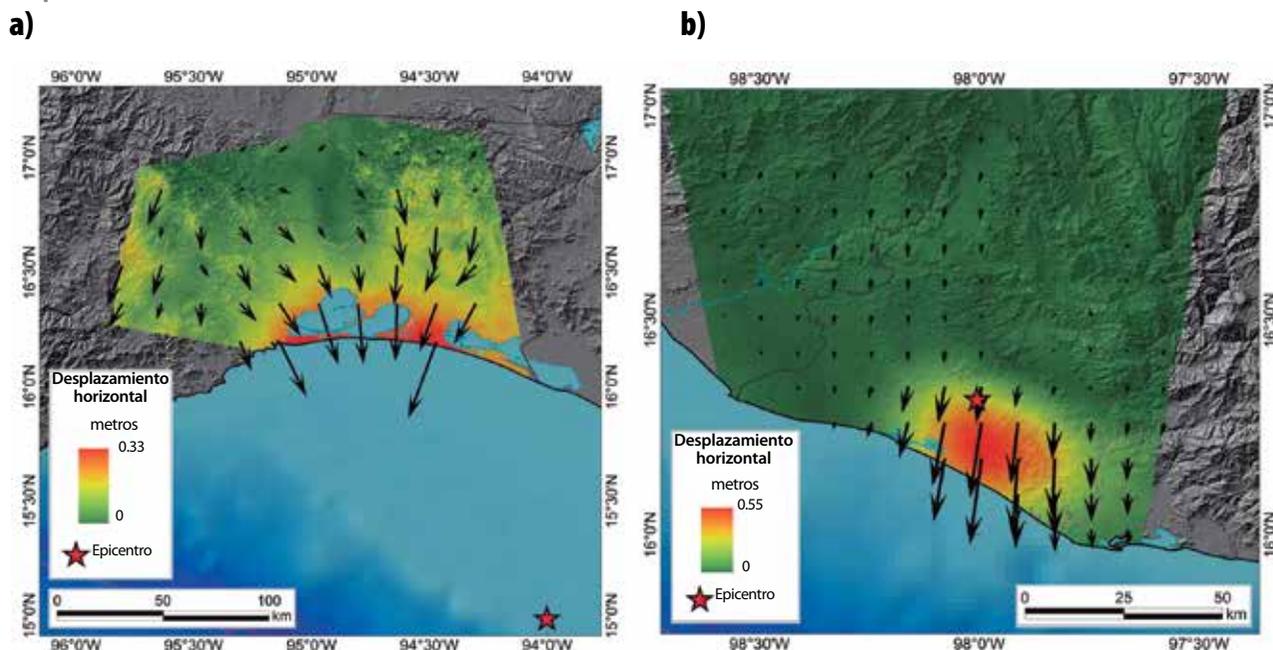
interferometría SAR deben ser validados por medio de las observaciones geodésicas con GNSS. En los resultados del procesamiento DInSAR de las imágenes con cobertura del sismo del 7 de septiembre (a del mapa 7), el ruido en la fase de los interferogramas se tradujo en errores en los desplazamientos al noroeste y al noreste de la cobertura obtenida de la intersección de las imágenes ascendentes y descendentes.

Mapa 6



Desplazamientos en la dirección de observación (LOS) del sensor Sentinel-1 obtenidos con la técnica DInSAR para el sismo del 7 de septiembre de 2017 usando imágenes en órbita ascendente con fechas 2017-09-03 y 2017-09-15 (a) y descendente con fechas 2017-09-07 y 2017-09-13 (b).

Mapa 7



Desplazamientos horizontales estimados a partir de resultados DInSAR usando imágenes Sentinel-1 para los sismos del 7 de septiembre de 2017 (a) y del 16 de febrero de 2018 (b). Para este último se utilizaron las imágenes ascendentes con fecha 2018-02-05 y 2018-03-07 y descendentes con fecha 2018-02-14 y 2018-03-10.

Desplazamientos por los sismos recientes

7 de septiembre de 2017

Con magnitud de 8.2 grados, este sismo, con epicentro al sur de la costa de Chiapas, fue el más fuerte que se haya registrado en México en varias décadas; por ello, aunque el origen se ubicó a más de 100 kilómetros del litoral, sus efectos se sintieron en gran parte del territorio mexicano. La devastación que ocurrió en localidades de las regiones sureste de Oaxaca y suroeste de Chiapas se manifestó también en cambios de posición de varias estaciones GNSS permanentes, incluso en algunas ubicadas hasta cientos de kilómetros del epicentro.

De las estaciones GNSS que mostraron afectación por este sismo, en OXTH, a 211 kilómetros del origen, se observó un desplazamiento de 8 cm con dirección sur-sureste y en TNCY, a unos 450 kilómetros, de 2 cm hacia el oeste, lo cual se puede observar en el mapa 5 y en las series de tiempo de la figura 1. En la estación de la RGNP (identificada como V875 en ese mismo mapa),

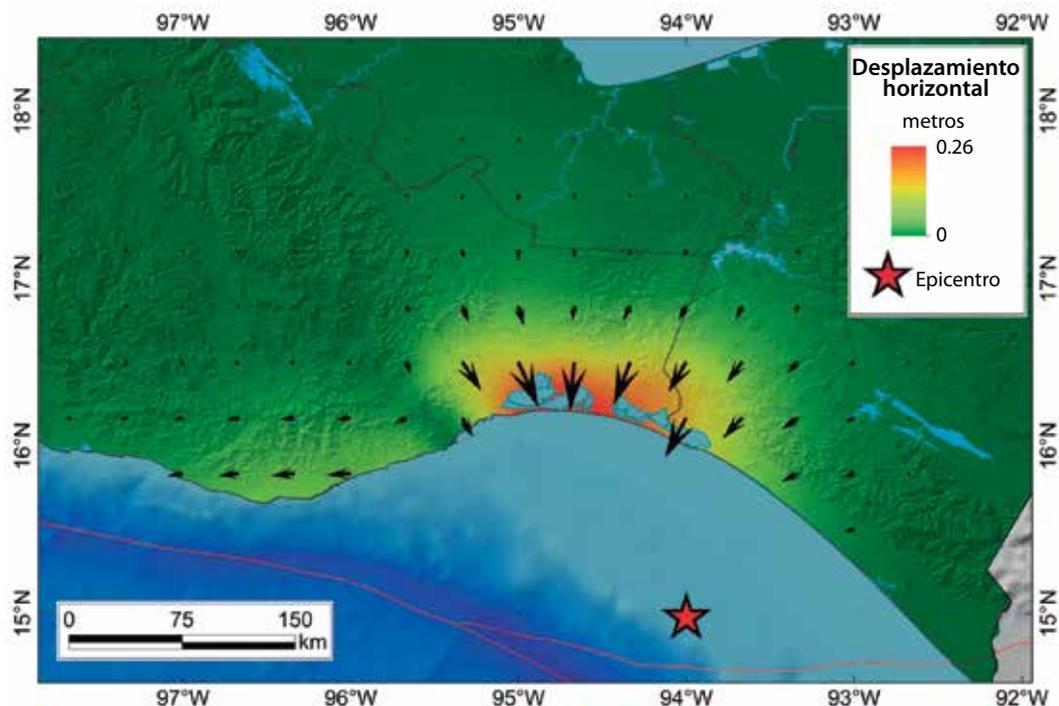
que fue reobservada después del sismo, se registró un desplazamiento de 25 cm hacia el sur.

Los resultados del procesamiento de imágenes SAR se utilizaron como referencia para identificar el alcance de los deslizamientos más significativos y para complementar observaciones de desplazamiento en zonas con poca cobertura de estaciones GNSS, con lo que se estimaron los movimientos horizontales en toda la región (ver mapa 8) mediante interpolación de las observaciones puntuales con el método *Spline* (Smith and Wessel, 1990). Después, se generaron mallas regulares que se incorporaron a los modelos de velocidades regionales y a los de desplazamientos por sismos de gran magnitud previos, para minimizar errores en las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 que se obtienen de los levantamientos GNSS de estaciones de la Red Geodésica Nacional Pasiva.

Del análisis de información geodésica para cuantificar las deformaciones por los terremotos ocurridos en México del 2010 a la fecha, los desplazamientos verticales que se han detectado han

Mapa 8

Desplazamientos horizontales por el sismo del 7 de septiembre de 2017



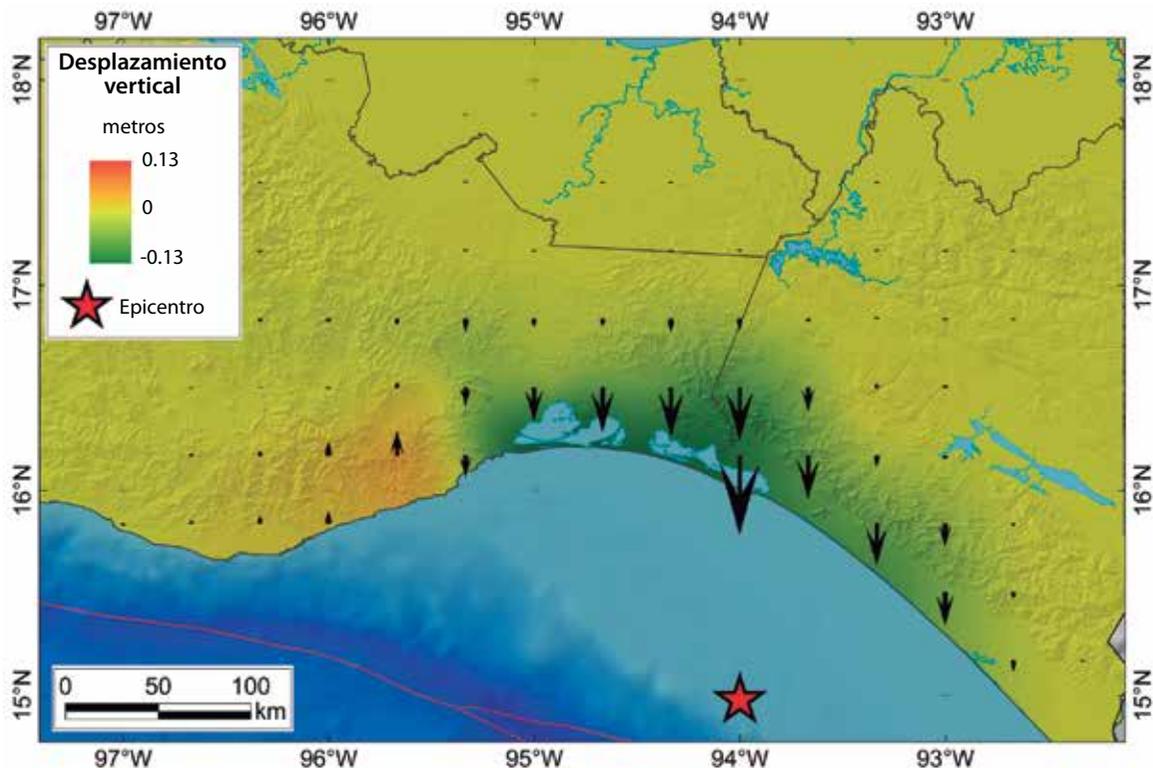
sido de menor magnitud que los horizontales. El hecho de que la técnica GNSS proporcione menor exactitud en el posicionamiento vertical que en el horizontal —y la escasez de estaciones geodésicas— hacían complicada la estimación de los movimientos en dirección vertical tras los eventos sísmicos previos. Ahora, con el aumento en la cantidad de estaciones GNSS y la disponibilidad de imágenes SAR, para los temblores recientes fue posible una estimación de los desplazamientos verticales; en el mapa 9 se muestran los asociados al sismo del 7 de septiembre de 2017.

observó un desplazamiento máximo de solo 4 centímetros. Las observaciones GNSS se complementaron con el cálculo de desplazamientos mediante la técnica DInSAR con imágenes *Sentinel-1* en la zona del epicentro, al suroeste de Puebla, para detectar y cuantificar los desplazamientos horizontales (ver mapa 10) y verticales (ver mapa 11) ocasionados por el sismo.

La magnitud de estas deformaciones superficiales y la extensión territorial que afectaron no se consideran significativas para comprometer

Mapa 9

Desplazamientos verticales por el sismo del 7 de septiembre de 2017



19 de septiembre de 2017

A pesar de los cuantiosos daños que provocó este sismo en los estados de Puebla, Morelos, México y la Ciudad de México, los desplazamientos que se registraron en las estaciones GNSS permanentes ubicadas en esa región fueron menores a 1 cm, y de la remediación de estaciones de la RGNP con receptores GNSS geodésicos en modo estático se

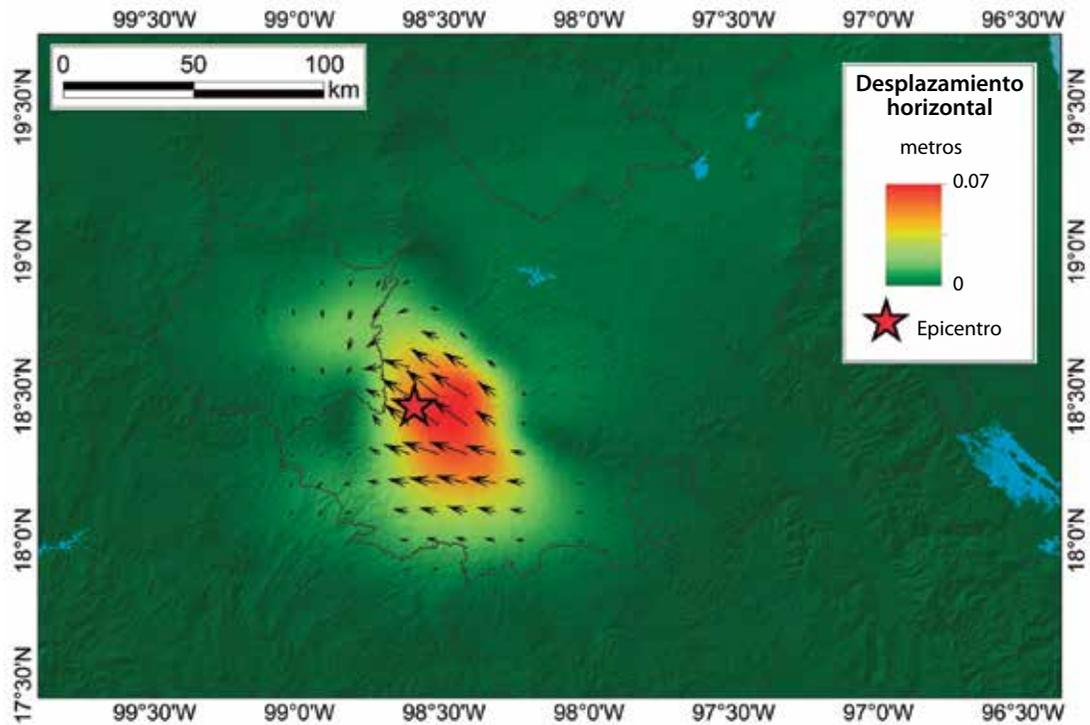
el cumplimiento de los estándares de exactitud de nuevas estaciones de la Red Geodésica Nacional.

16 de febrero de 2018 al suroeste de Oaxaca

La estación permanente más cercana a su epicentro (TNCY) registró un desplazamiento de 18 cm hacia el sur-sureste, (ver serie de tiempo en la

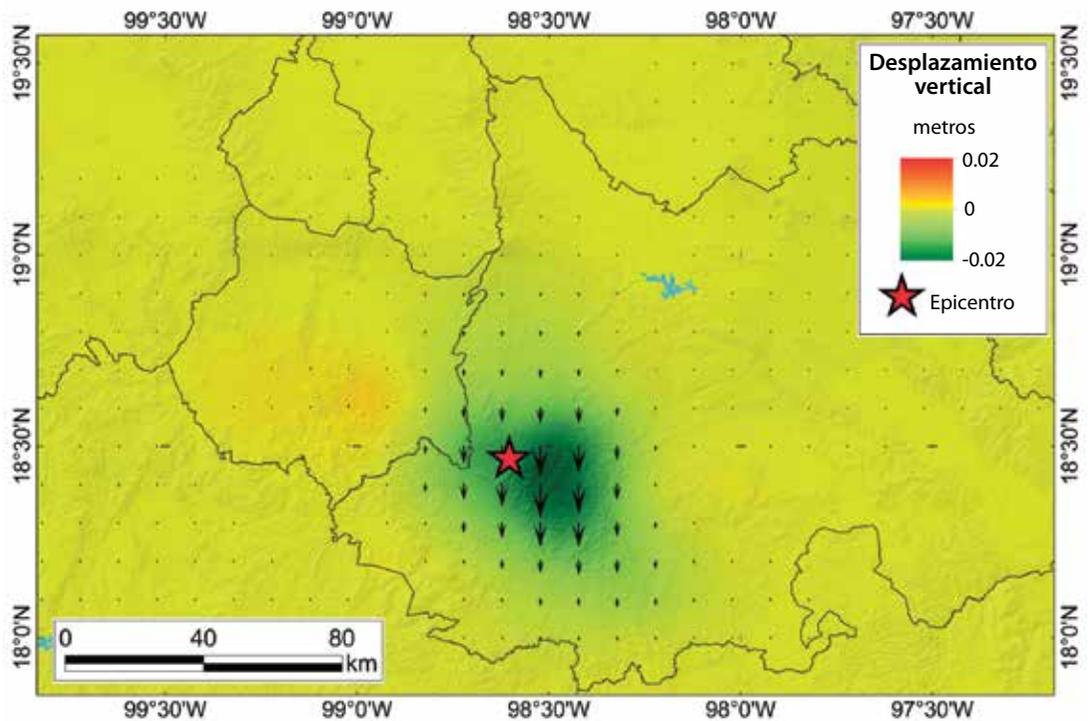
Mapa 10

Desplazamientos horizontales por el sismo del 19 de septiembre de 2017



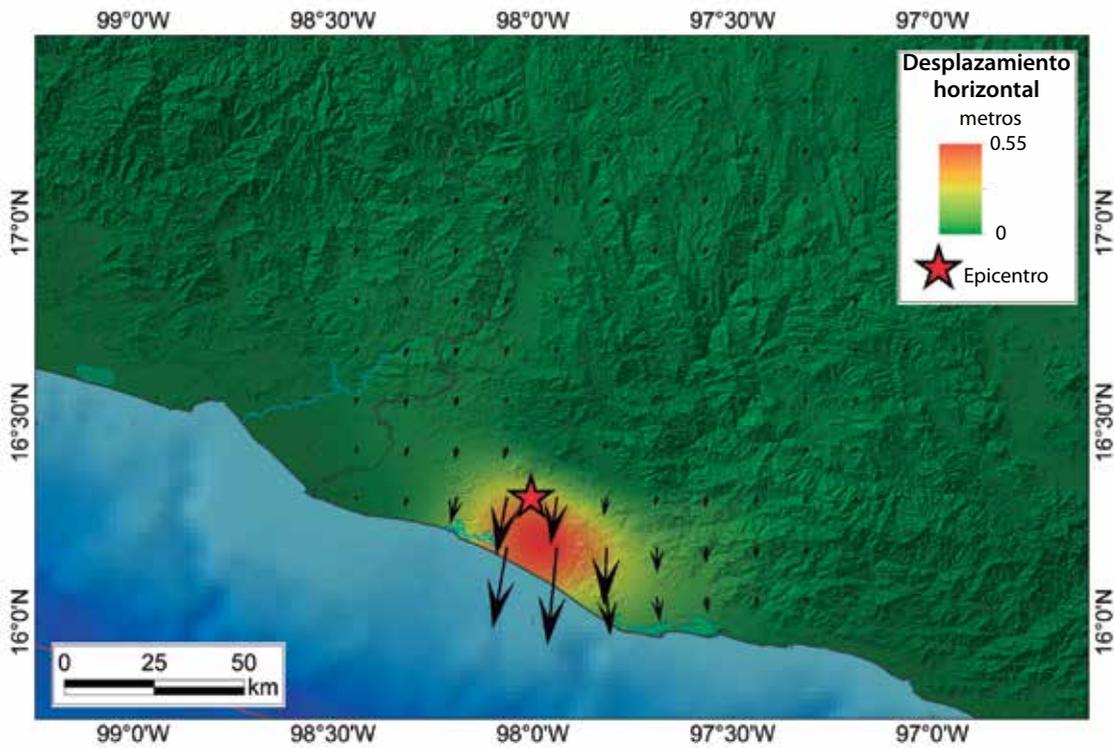
Mapa 11

Desplazamientos verticales por el sismo del 19 de septiembre de 2017



Mapa 12

Desplazamientos horizontales por el sismo del 16 de febrero de 2018



Mapa 13

Desplazamientos verticales por el sismo del 16 de febrero de 2018

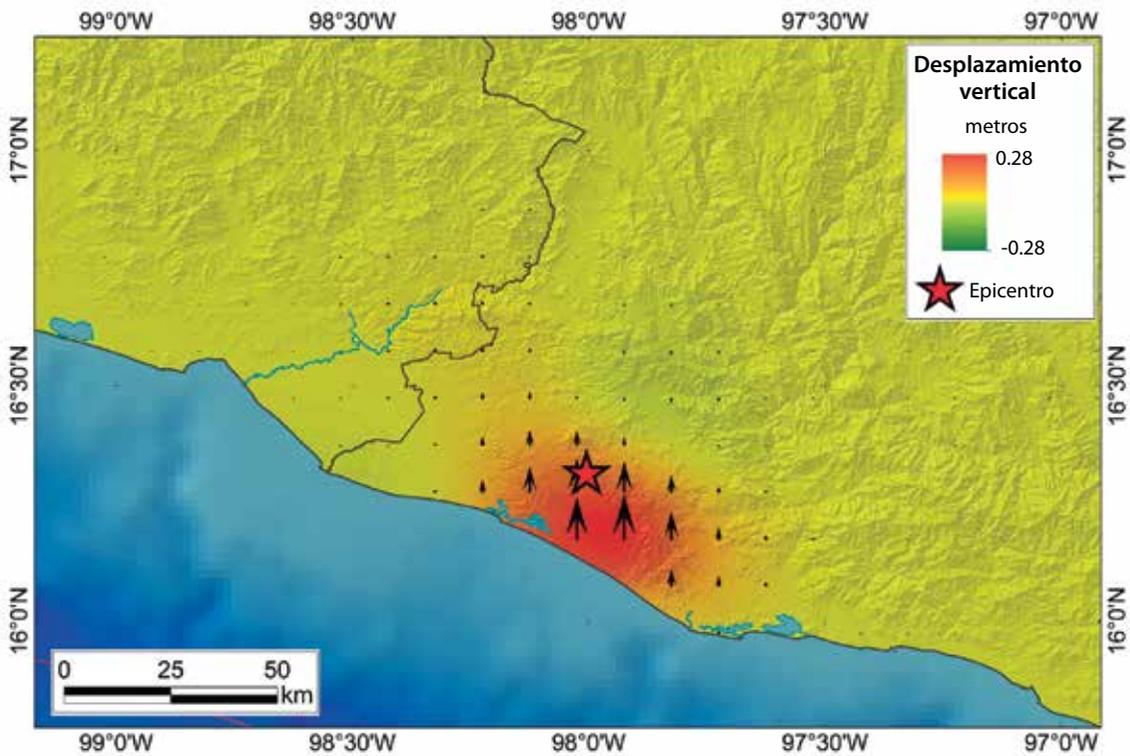


figura 1), incluyendo el deslizamiento postsísmico asociado a este mismo evento, que tuvo una magnitud de 7.2 grados; sin embargo, de los resultados del procesamiento DInSAR (b del mapa 7) se estimaron movimientos máximos de alrededor de 50 cm al sur del epicentro. Mediante la combinación de los resultados de ambas técnicas satelitales, se obtuvo un modelo de los desplazamientos en toda la región, de la cual, en el mapa 12 se muestra solo la zona más afectada, al suroeste de Oaxaca y sureste de Guerrero.

Por la escala de los desplazamientos máximos en el mapa 12, los de magnitud menor a 5 cm pierden notoriedad; sin embargo, en estaciones permanentes a más de 100 kilómetros al norte del epicentro, al sur del estado de Puebla, así como en la ciudad de Oaxaca, se registraron movimientos del orden de 2 cm ocasionados por este sismo. De las estaciones GNSS solo se registró un desplazamiento vertical significativo en la estación TNCY, de 7 cm hacia arriba, por lo que la estimación de los deslizamientos verticales plasmados en el mapa 13 se realizó sobre todo de las observaciones SAR.

Conclusiones

La cuantificación (mediante técnicas satelitales GNSS y DInSAR) de los desplazamientos superficiales ocasionados por los sismos permite identificar los efectos en el marco de referencia geodésico e implementar modelos para mantener la calidad de la Red Geodésica Nacional, de acuerdo con las especificaciones de las normas técnicas.

El orden de exactitud de milímetros que proporcionan las estaciones GNSS permanentes en el cálculo de los desplazamientos horizontales se complementa con la cobertura que proporcionan las imágenes SAR, en especial en las zonas de mayor afectación y donde ocurren deslizamientos del orden de decímetros. Contar con información SAR en esas zonas, aunque no se tenga la exactitud que proporcionan las estaciones GNSS, representa un insumo relevante para complementar los modelos.

El hecho de que cada vez se cuente con más estaciones GNSS y nuevos sensores SAR satelitales con-

tribuye a que se disponga de mayor información para identificar los efectos de nuevos sismos en cuanto al alcance de la región afectada por desplazamientos superficiales, así como su magnitud y dirección. Sin embargo, aún se tienen algunas zonas, como en Guerrero y en el Istmo de Tehuantepec, donde no se cuenta con estaciones GNSS que se puedan utilizar para apoyar estas aplicaciones.

Fuentes

- Bird, P. "An updated digital model of plate boundaries", en: *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 4(3), 2003, p. 1027 (DE) http://peterbird.name/publications/2003_PB2002/2003_PB2002.htm
- Blewitt, G.; W. C. Hammond y C. Kreemer. "Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science", en: *EOS, Earth and Space Science News*. Vol. 99. Washington, DC, USA, American Geophysical Union, 2018 (DE) <https://eos.org/science-updates/harnessing-the-gps-data-explosion-for-interdisciplinary-science> y <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>, consultados el 26 de octubre de 2018.
- DeMets, Ch. and E. Cabral-Cano. *Oaxaca GPS Network-OXTH-Tehuantepec*. P. S. UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset, 2008 (DE) <https://doi.org/10.7283/T5Q81B5V>
- INEGI. *Procesamiento de datos GPS considerando deformaciones del marco geodésico en el tiempo. Procedimiento para la minimización de errores debido a la deformación del marco de referencia ITRF*. Aguascalientes, México, INEGI, 2016 (DE) <https://www.inegi.org.mx/temas/gnss/default.html#Publicaciones>
- Jo, M. J.; H. S. Jung and S. H. Yun. "Retrieving Precise Three-Dimensional Deformation on the 2014 m6.0 South Napa Earthquake by Joint Inversion of Multi-Sensor SAR", en: *Scientific Reports*. Vol. 7, 2017, p. 5485 (DE) <https://www.nature.com/articles/s41598-017-06018-0> y <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06018-0>, consultados el 6 de julio de 2018.
- Liu, H.; Z. Zhao y K. Jezek. "Synergistic Fusion of Phase Unwrapping and Speckle Tracking Methods for Deriving Surface Velocity from Interferometric SAR Data", en: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol. 4, No. 1, 2007, pp. 102-106.
- Smith, W. H. F. and P. Wessel. "Gridding with continuous curvature splines in tension", en: *Geophysics*. Vol. 55, No. 3. Tulsa, OK, USA, Society of Exploration Geophysicists, 1990, pp. 293-305.
- Wessel, P.; W. H. F. Smith; R. Scharroo; J. Luis and F. Wobbe. "Generic mapping tools: Improved version released", en: *Eos, Transactions, AGU*. Vol. 94, No. 45, 2013, pp. 409-410.
- Wright, T. J.; B. E. Parsons y Z. Lu. "Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR", en: *Geophysical Research Letters*. Vol. 31. American Geophysical Union, Washington, DC, USA, 2004, pp. 1-5.