

## CASO PRÁCTICO

# Estimación de la subsidencia en torno a la traza de la falla de San Ramón Chile, mediante la técnica SBAS DInSAR usando imágenes TerraSAR-X

Patricio Lamperein-Polo<sup>\*1</sup>, Paulina Vidal-Páez<sup>2,3</sup>, Waldo Pérez-Martínez<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Magíster en Teledetección, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Camino La Pirámide 5750, Santiago 8580745, Chile.*

<sup>2</sup> *Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Camino La Pirámide 5750, Santiago 8580745, Chile.*

<sup>3</sup> *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España.*

---

**Resumen:** Chile es uno de los países con mayor sismicidad en el mundo y es afectado por tres tipos de fuentes sismogénicas: interplaca, intraplaca e intraplaca superficial o cortical. En este contexto, en el sector oriente de la ciudad de Santiago, capital de Chile, se localiza la Falla San Ramón (FSR). Se trata de una fuente sismogénica cortical que amenaza a sus habitantes y a las diversas actividades económicas que se ubican en ese sector, generando peligros geológicos como seísmos y remociones en masa. En relación con lo anterior, este estudio tiene por objetivo identificar y establecer las áreas de subsidencias en una franja longitudinal del frente cordillerano de Santiago y su impacto sobre las comunas aledañas a la traza de la FSR durante los años 2011 a 2017. Para ello, se utilizó la técnica DInSAR con el algoritmo *Small Baseline Subset* (SBAS) mediante una serie de tiempo de imágenes del satélite TerraSAR-X (TSX). Los resultados muestran zonas de subsidencia, con desplazamientos promedio que van desde los -13,11 mm hasta los +9,89 mm, con una tasa de velocidad anual promedio de -2,19 hasta +1,65 mm/año.

**Palabras clave:** Falla de San Ramón, SBAS, subsidencia, interferometría diferencial.

## Estimation of the subsidence around the trace of the San Ramón Chile fault, using the SBAS DInSAR technique through TerraSAR-X images

**Abstract:** Chile is one of the countries with the highest seismicity in the world and is affected by three types of seismogenic sources; interplate, intraplate and superficial or cortical intraplate. In this context, in the eastern sector of the city of Santiago, capital of Chile, the Falla San Ramón (FSR) is located. It is a cortical seismogenic source, which threatens its habitants and the various economic activities that are located in that sector, geological hazards such as earthquakes and mass removals. In relation to the above, this study aims to identify and establish the subsidence areas in a longitudinal strip of the Santiago mountain front and its impact on the neighboring communes to the FSR trace during the years 2011 to 2017. To do this, The DInSAR technique was used with the Small Baseline Subset (SBAS) algorithm through a time series of images from the TerraSAR-X (TSX) satellite.

**To cite this article:** Lamperein-Polo, P., Vidal-Páez, P., Pérez-Martínez, W. 2022. Estimation of the subsidence around the trace of the San Ramón Chile fault, using the SBAS DInSAR technique through TerraSAR-X images. *Revista de Teledetección*, 59, 87-102. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15640>

\* *Corresponding author: patricio.lamperein.polo@gmail.com*

The results show subsidence zones, with average displacements ranging from -13.11 mm to +9.89 mm, with an average annual speed rate of -2.19 to +1.65 mm/year.

**Palabras clave:** San Ramon Fault, SBAS, subsidences, diferencial interferometry.

---

## 1. Introduction

La ciudad de Santiago de Chile se ubica a los pies del flanco occidental de la Cordillera de Los Andes, uno de los cordones montañosos más activos del planeta (Rauld, 2011). En el sector oriente de Santiago se concentra el 23% de la población de la región Metropolitana, que está expuesta a riesgos socio-naturales de origen geológico como la posibilidad de terremotos corticales asociados a la Falla de San Ramón (FSR) (Vargas et al., 2015). Según Rauld (2011). La FSR es una falla activa que, en su ciclo sísmico, puede incluir ruptura cosísmica y deformación intersísmica, donde la tensión tectónica puede acumularse silenciosamente a lo largo de las fallas activas. La tasa de deformación a largo plazo es del orden de 0,4 mm/año, coherente con una estimación de un mínimo de 0,2 mm/año en el pie de monte (Rauld, 2011).

La FSR se localiza en el frente cordillerano de las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto en la Región Metropolitana, donde habitan 1.649.630 personas según censo 2017 (INE, 2017). La falla no es perceptible, sin embargo, teóricamente bordea el contacto de los depósitos sedimentarios del valle de Santiago y los contrafuertes cordilleranos y se estima que posee una extensión de 50 km (Ammirati et al., 2019). La FSR, es una falla cortical de tipo inversa, que monta las unidades que forman el bloque cordillerano sobre la depresión central de Santiago y se enraíza en la corteza con manteos de 36-62°E (Rauld, 2011).

Las imágenes SAR y técnicas DInSAR, junto con los algoritmos de análisis de imágenes en series, como el *Small Baseline Subset* (SBAS), han demostrado su utilidad para detectar deformaciones (Berardino et al., 2002). El uso de esta técnica permite obtener interferogramas sensibles a pequeñas deformaciones del terreno, lo que puede proporcionar mediciones con precisiones comparables a técnicas geodésicas tradicionales (Crosetto et al., 2002).

Numerosos estudios abordan la temática de la medición de deformación cortical con DInSAR. Cakir et al. (2005) estudiaron el desplazamiento de la falla Anatolía en Turquía con imágenes ERS y datos GPS, registrando movimientos de  $8\pm 3$  mm/año. Lagios et al. (2007) estimaron deformaciones con la técnica DInSAR y DGPS de la corteza en las islas Cephallonia y Zakynthos (Grecia), relacionadas a seísmos corticales, con deformaciones entre 6 y 34 mm con imágenes ERS y Envisat. Tobita et al. (2011) estimaron la deformación cosísmica y establecieron un modelo de la falla que provocó el terremoto de Yushu (China) el año 2010 utilizando imágenes PALSAR. Lakhote et al. (2020) estimaron la deformación en la región oriental del Kachchh en la India, sobre las islas Khadir, Bela, y Chorar, con la técnica DInSAR multisensor con datos Envisat (2003-2009) y Sentinel (2018-2020) observando desplazamientos de 0,19-0,22 y 0,16-0,18 cm, respectivamente. Por otro lado, algunos estudios establecieron la distribución espacial de la subsidencia y su relación con datos geológicos como Abidin et al. (2013), Yastika et al. (2019) y Lakhote et al. (2020). Se destacan especialmente las investigaciones de Parcharidis et al. (2009) y Fernández et al. (2009) que estudiaron fallas activas sobre ambientes urbanos.

A nivel nacional, se han realizado diversas investigaciones de subsidencia, sin embargo, sólo en el ámbito de la vulcanología, glaciología y minería en donde destacan los trabajos de Sánchez et al. (2016) y Hermosilla (2016).

El presente estudio tiene por objetivo identificar y establecer la existencia de subsidencia y elevación del terreno en torno a la traza de la FSR, entre los años 2011 y 2017. En este sentido, se utilizan imágenes TSX, técnicas DInSAR/SBAS e información geológica, nivel freático y mediciones GNSS del sector.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio

Con orientación norte/sur, gran parte de la FSR se encuentra ubicada en el sector Oriente de Santiago en el pie de monte, entre los ríos Mapocho y Maipo. La falla cruza las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto, y posee una longitud que llega hasta los 50 km según Ammirati et al. (2019). La Figura 1, muestra el área de estudio que cubre aproximadamente 72 km<sup>2</sup> y se localiza entre las siguientes coordenadas geográficas: 33°21'00" S, 70°33'37" W, 33°20'46" S 70°30'46" W, 33°30'57.08" S, 70°29'11.42" W y 33°31'24.70" S, 70°32'18.82" W.

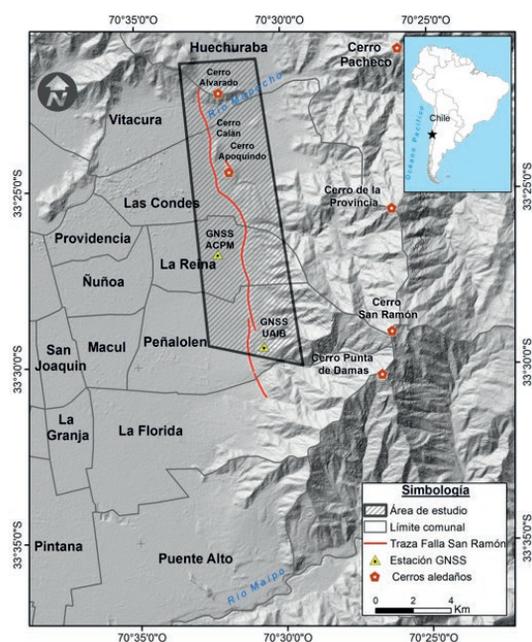


Figura 1. Ubicación del área de estudio sobre la FSR.

La geología del sector se puede describir en tres dominios según Armijo et al. (2010) y Rauld (2011): un dominio occidental o Frente Andino, que corresponde a un rasgo morfoestructural consistente en nueve fallas y pliegues. En este dominio se reconoce al oeste el Cordón del Cerro San Ramón, con altitudes de hasta 3253 m s.n.m.; en el dominio central, predominan unidades volcánicas sedimentarias del Cenozoico caracterizado por pliegues hacia el oeste (Armijo et al., 2010) y que se presentan como una serie de sinclinales, con orientación norte/sur; el dominio occidental

muestra depósitos sedimentarios continentales del Mioceno, compuesta por rocas sedimentarias marinas como calizas y lutitas calcáreas oscuras, lutitas fisibles, areniscas y conglomerados finos, con algunas intercalaciones de rocas volcánicas.

La Figura 2a muestra las unidades geológicas del sector que son del tipo depósitos aluviales antiguos

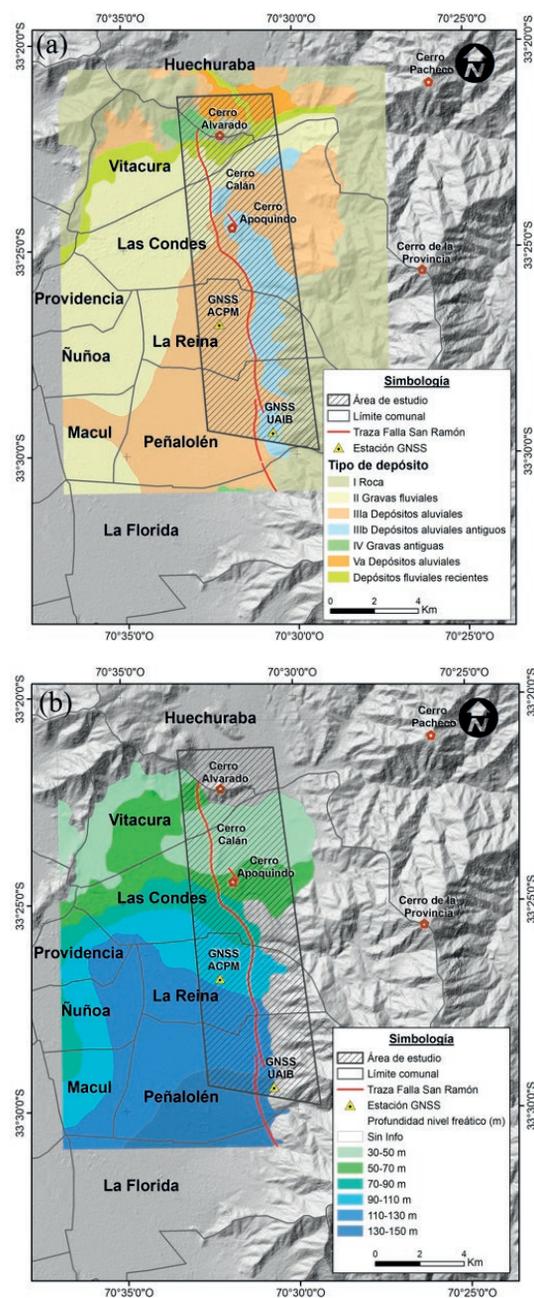


Figura 2. a) Mapa de unidades geológicas y b) nivel freático, sobre el área de estudio.

(IIIb) en base a gravas y bloques en matriz areno arcillosa y los depósitos aluviales (IIIa) con gravas con intercalaciones de arena limo y arcillas (Vergara, 2015). Esta última unidad (IIIa) cubre en gran parte las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina y Peñalolén. Por otro lado, los niveles freáticos (Figura 2b) muestran que, en la zona norte, donde se localizan las comunas de Vitacura y Las Condes, los niveles son de menor profundidad, alcanzando los 30 m. Mientras que, en las comunas del sur de la falla (La Reina, Peñalolén y La Florida), los niveles son más profundos, llegando hasta los 130 m.

### 2.2. Datos TerraSAR-X

Se utilizaron 26 imágenes, *Single Look Slant Range Complex* (SSC) entre el 14 de noviembre del año 2011, hasta el 17 de septiembre del año 2017. Las características de las imágenes se pueden observar en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de las imágenes TerraSAR-X utilizados para el estudio.

| Modo de Imagen           | StripMap (SM) SSC |
|--------------------------|-------------------|
| Tipo Órbita              | Descendente       |
| Dimensión escena[km]     | 30 × 50           |
| Resolución en Rango[m]   | 1,2               |
| Resolución en Acimut [m] | 3,3               |
| Polari-zación            | HH                |
| Ángulo de incidencia     | 37°               |

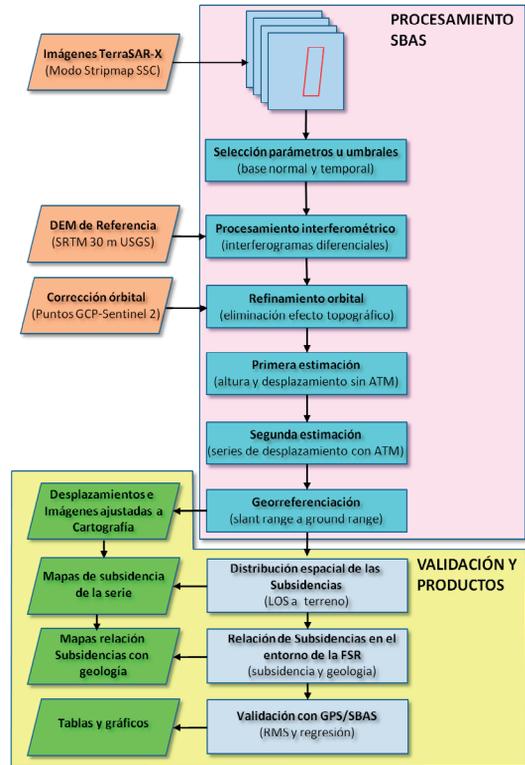
El paso descendente permitió observar la ladera oeste del pie de monte, minimizando aspectos geométricos inherentes a las imágenes SAR como la sombra, escorzo e inversión por relieve (Braun, 2020). La selección de las imágenes consideró una separación temporal entre imágenes de aproximadamente tres meses y cubren cerca del 90% de la traza norte/sur de la FSR. En la Tabla 2 se detallan las imágenes utilizadas para el estudio.

**Tabla 2.** Imágenes TerraSAR-X seleccionadas para el estudio.

| N° | Fecha Imagen | N° | Fecha Imagen | N° | Fecha Imagen |
|----|--------------|----|--------------|----|--------------|
| 0  | 14-11-2011   | 9  | 04-09-2013   | 18 | 21-01-2016   |
| 1  | 10-02-2012   | 10 | 23-12-2013   | 19 | 05-03-2016   |
| 2  | 05-04-2012   | 11 | 16-02-2014   | 20 | 01-06-2016   |
| 3  | 21-06-2012   | 12 | 26-05-2014   | 21 | 08-09-2016   |
| 4  | 04-08-2012   | 13 | 24-09-2014   | 22 | 13-11-2016   |
| 5  | 31-10-2012   | 14 | 21-12-2014   | 23 | 14-03-2017   |
| 6  | 05-01-2013   | 15 | 08-03-2015   | 24 | 21-06-2017   |
| 7  | 14-04-2013   | 16 | 13-05-2015   | 25 | 17-09-2017   |
| 8  | 08-06-2013   | 17 | 18-07-2015   |    |              |

### 2.3. Procesamiento SBAS

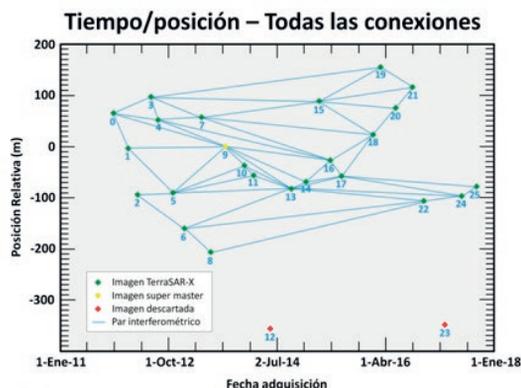
La metodología de trabajo se esquematiza en la Figura 3. El procesamiento siguió la estructura de análisis del algoritmo SBAS según Casu et al. (2006), Berardino et al. (2002) y Seppi (2016), utilizando el módulo SARSCAPE junto con el procedimiento SBAS implementado en el software ENVI® (Sarmap SA, 2017).



**Figura 3.** Flujo de trabajo de SBAS, modificado de Seppi (2016).

Para este caso, los parámetros iniciales fueron una base perpendicular máxima de 100 m y una base temporal de 2046 días. Para este caso es la máxima, considerando la diferencia de días entre las fechas de la primera y última imagen de la serie. El primer resultado mostró los interferogramas con valores de base perpendicular desde 1,71 m como menor valor, hasta un máximo de 90,2 m. De esta forma fueron generados una serie de interferogramas con una decorrelación espacial baja (Berardino et al., 2002), aceptables para este estudio.

La Figura 4, muestra todas las conexiones de los pares de imágenes analizadas. Cada segmento corresponde a un par interferométrico diferencial, generado en base a las restricciones indicadas al momento de la ejecución de SBAS (Sarmap SA, 2017).



**Figura 4.** Gráfico de conexión, que vincula todas las imágenes con la super master del 04-09-2013.

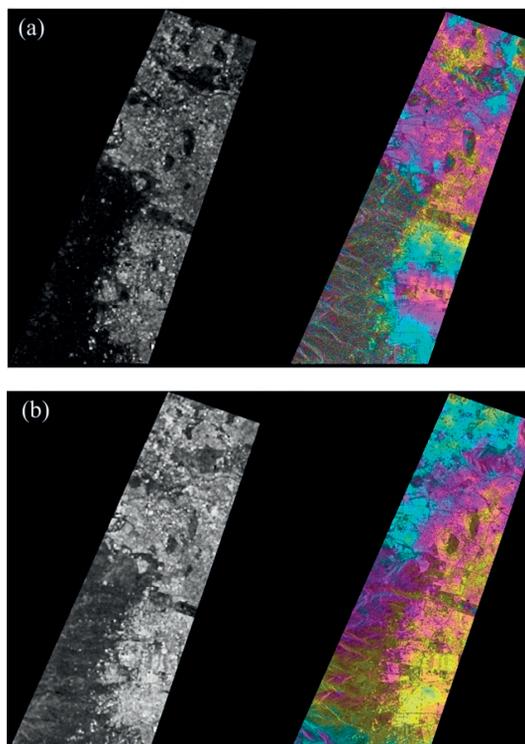
Las imágenes, (12) del 26-05-2014 y la (23) del 14-03-2017, quedaron descartadas por estar fuera de parámetros para este estudio. De esta forma el proceso interferométrico fue desarrollado con las 24 mejores imágenes, con línea base menor a 100 metros.

En la etapa de procesamiento interferométrico, se co-registraron los pares en geometría super master (*slant range*), para conformar los primeros interferogramas desenrollados. Se aplicó un filtro adaptativo Goldstein para suavizar los interferogramas (Hanssen, 2001) y se utilizó el DEM SRTM1 (30 m) para encontrar la fase absoluta de los interferogramas. La utilización del SRTM1 se justificó por ser un modelo continuo y probado en muchos proyectos de desplazamientos InSAR como en Parcharidis et al. (2009), Fernández et al. (2009), Tobita et al. (2011) o Yastika et al. (2019). EL SRTM1 cuenta con una exactitud absoluta en altura de  $6,2\sum$ m para América del Sur (Rodríguez et al., 2005) lo que lo hace totalmente comparable con la precisión de las bases locales disponibles a escala 1:25.000.

Se realizó un proceso de un multilooking de 18,04 m en rango y 18,81 m en azimut, para suavizar los interferogramas y reducir los ruidos de

la fase interferométrica con la compensación de resolución espacial. Se obtiene un píxel cuadrado y se mejora la calidad final de los interferogramas. Lo anterior ayuda al algoritmo de desenrollado *Minimum Cost Flow* (MCF) (Costantini, 1998) a modular cada ciclo ( $2\pi$ ) de los interferogramas y asignarles un valor absoluto de altura (Ferretti et al., 2007). El desenrollado de fase se realizó sobre los interferogramas ya filtrados, aplicando el algoritmo MCF con restricción de coherencia espacial de 30% (Seppi, 2016).

En la Figura 5 se muestran las imágenes de coherencia e interferogramas de la primera y última combinación de la serie. Las zonas oscuras de las imágenes de coherencia son valores bajos de correlación, asociadas a vegetación y cuerpos de agua (Braun, 2020). Las zonas brillantes, corresponden a la zona urbana con valores más altos de coherencia.



**Figura 5.** a) Coherencia e interferograma diferencial aplanado y filtrado de la imagen master/esclava 20120210\_m\_1\_20160601\_s con base temporal de 1573 días y b) Imagen 20131223\_m\_10\_20140216\_s con base temporal de 55 días.

En los dos interferogramas se logra apreciar una componente diferencial, con patrones y diferente densidad de franjas que se repiten en el resto de los interferogramas de la serie, deduciendo posibles zonas de desplazamiento.

En la etapa de refinamiento orbital, se eliminaron todos los componentes de fase remanentes relacionados con el efecto de la topografía o tierra plana (Ferretti et al., 2007). Se corrigieron los errores orbitales vinculados a las líneas base de la etapa anterior. Las franjas correspondientes al error orbital fueron refinadas aplicando una estimación polinómica de orden 3, tanto en acimut como rango (*range*) (Hanssen, 2001) y 57 puntos de control (GCP), obtenidos desde la imagen super master del 04 septiembre 2013. La fuente de coordenadas de referencia (latitud, longitud), fue una imagen Sentinel-2 con nivel de procesamiento 1C y la cota desde el DEM SRTM1 (Braun, 2020).

Para la primera estimación de desplazamiento y de topografía residual, se realizó un segundo desenrollado de fase para refinar la serie de interferogramas. El producto fue un mapa de velocidad con referencia a la línea de visión (LOS) con valores que van desde los -2,95 hasta 2,14 mm/año. El valor medio para la imagen de desplazamiento fue de -0,51 mm. El signo es positivo cuando el movimiento corresponde a un aumento de la distancia del rango de inclinación desde el sensor al objetivo, es decir, se asocia a hundimientos (subsistencia), y si el signo es negativo, a elevación (Yastika et al., 2019).

Para la segunda estimación se obtuvieron las series de desplazamiento sin los efectos atmosféricos (Sarmap SA, 2017). En esta etapa se reutilizaron los GCP para eliminar la fase curva de la tierra (*Reflattening*). Además, se emplearon los interferogramas de la primera inversión aplicando los filtros espaciales (LP) y temporales (HP) (Seppi, 2016). Los valores de velocidad LOS obtenidos para este producto, van desde los -2,47 hasta 0,93 mm y el valor medio de desplazamiento con corrección atmosférica fue de -0,38 mm, con coherencia de 92%.

En la última etapa, se georreferenciaron todos los productos obtenidos de la primera y segunda estimación de desplazamiento para orientarlas geográficamente. El sistema cartográfico de referencia y de coordenadas utilizado para los

productos finales fue datum y esferoide WGS84, en latitud y longitud. El sistema utilizó los 57 GCP obtenidos del proceso de refinamiento orbital, además del DEM SRTM1 para la corrección topográfica.

El flujo utilizado permitió reducir los ruidos de fase y los errores de muchos interferogramas, además de aislar solamente las fases que contribuyen a la deformación (Berardino et al., 2002).

## 2.4. Relación entre el desplazamiento LOS y la subsistencia

El desplazamiento calculado con la técnica DInSAR es una medida a lo largo de la línea de visión (LOS). Con la aplicación de la Ecuación (1) se convierten en subsistencias del terreno (Yastika et al., 2019). Se calculó ( $S$ ) transformando todas las imágenes de desplazamiento LOS ( $d$ ) provenientes de la segunda inversión y los ángulos de incidencia de cada imagen TerraSAR-X.

$$S = \frac{-d}{\cos\theta} \quad (1)$$

Donde  $S$  corresponde a la subsistencia del terreno,  $d$  al desplazamiento LOS y  $\cos\theta$  al ángulo de incidencia.

## 2.5. Relación de la subsistencia, el entorno geológico y nivel freático de la FSR

Las mediciones de los movimientos corticales propios de la FSR podrían verse influenciados por la geología del sector (Yastika et al., 2019). Los resultados de ( $S$ ) se relacionaron con las unidades geológicas y nivel freático.

Se utilizó el mapa geológico modificado de Vergara y Verdugo (2015). Para la cuenca de Santiago se identifican 10 unidades geológicas que se definen a partir de la información obtenida de los estudios desarrollados por Valenzuela (1978), Wall et al. (1999) y Rauld (2011). En la Falla de San Ramón se identifican de norte a sur 5 unidades geológicas: I) gravas antiguas, II) depósitos fluviales recientes, III) gravas fluviales, IV) depósitos aluviales y V) depósitos aluviales antiguos.

Se consideró el mapa de profundidades del nivel freático de la cuenca de Santiago desarrollado

por Vergara y Verdugo (2015). El mapa de aguas subterráneas utiliza la información que entregan los pozos de monitoreo que reporta la Dirección General de Aguas (DGA) y el Banco Nacional de Aguas (BNA) del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Se identifican de norte a sur en la Falla de San Ramón, sectores con niveles freáticos que varían entre los 30 y 150 m.

## 2.6. Evaluación de la subsidencia mediante puntos GNSS

Se compararon los resultados de SBAS con datos provenientes de las estaciones de monitoreo GNSS (Casu et al., 2006; Parcharidis et al., 2009; Abidin et al., 2013), del Laboratorio Geodésico de Nevada (NGL). La Tabla 3 muestra las estaciones GNSS disponibles para la zona de estudio para ser comparadas con las mediciones de subsidencia SBAS obtenidas con la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

**Tabla 3.** Identificación de las estaciones GNSS de la NGL emplazadas cerca de la FSR utilizadas para la validación de subsidencias con método SBAS.

| N°                   | 1                                      | 2                                    |
|----------------------|--|--------------------------------------|
| Nombre Est.          | ACPM                                   | UAIB                                 |
| Latitud (°)          | -33,447                                | -33,493                              |
| Longitud (°)         | -70,537                                | -70,510                              |
| Altura (m)           | 724,67                                 | 1.079,53                             |
| Ubicación geográfica | Academia Politécnica Militar, La Reina | Universidad Adolfo Ibáñez, Peñalolén |
| Año Inicio           | 2010                                   | 2015                                 |

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Distribución espacial de las subsidencias en torno a la FSR

La Figura 6 muestra la serie completa de subsidencia entre los años 2011 a 2017. Se aprecia gran dinamismo en los desplazamientos. En la primera combinación de la serie que abarca el 14 de noviembre del año 2011 al 10 de febrero del 2012, se observan movimientos que van desde los -5,69 a los +8,01 mm/año, con un promedio de +1,16 mm. Para la última combinación de la serie, que considera el 14 de noviembre del 2011 al 17 de septiembre del 2017, los movimientos van desde -15,16 a los +6,77 mm, con un promedio de -4,19 mm en el periodo señalado.

En la Figura 6 las zonas en color rojo indican las elevaciones del terreno. La mayor elevación se observa al noreste y noroeste de la traza de la FSR, donde se localizan las comunas de Vitacura, Las Condes y Peñalolén. Las zonas con elevaciones máximas se encuentran en las series de los años 2016-01-21 y 2016-09-08, con máximos de +13,55 y +16,42 mm localizados en las comunas de Las Condes y Vitacura.

Las zonas de subsidencias o hundimientos se indican en color azul (Figura 6) y se localizan en mayor medida en el extremo norte de la zona de estudio, en la comuna de Lo Barnechea, al norte del cerro Alvarado. Además, se destaca una gran zona de subsidencia ubicada al sur de la comuna de La Reina y norte de Peñalolén. El periodo que centra mayores subsidencias en el área de estudio se observa entre el 08 de junio del año 2013 y el 21 de diciembre del año 2014 y entre el 21 de diciembre del año 2014 y el 18 de julio del año 2015 con -18,50, -18,93 y -19,29 mm, respectivamente.

Con mayor detalle, las Figuras 7 y 8 muestran la subsidencia junto con las calles comunales. En la Figura 7, hacia el oeste de la FSR, se aprecian mayormente las elevaciones. Hacia el este del Cerro Apoquindo por calle el Alba y vías paralelas, como camino Las Flores, General Blanche y Calle Carlos Peña Otaegui, se aprecia un amplio sector relativamente estable con una mezcla de micro sectores tanto con elevaciones como hundimientos del terreno que van desde los -14,3 mm hasta los +5,48 mm.

La Figura 8 muestra que al sur de la comuna de La reina y norte de la comuna de Peñalolén y al oeste de la FSR, se localiza una zona de subsidencia de gran amplitud, que va desde los 0 mm hasta los -15,16 mm, en las calles del sector, destacándose la avenida Alcalde Fernando Castillo Velasco, Calle Talinay y avenida José Arrieta. Al sur oeste se aprecia una zona bien definida con elevaciones y que comienza a aparecer en esta zona desde la serie con fecha 16-02-2014. Este fenómeno podría deberse a la variabilidad del nivel freático, específicamente a los procesos de recarga flujo y descarga de aguas subterránea, entre otros (Galloway y Hoffmann, 2007; Solano-Rojas et al., 2015).

Los resultados muestran similitudes respecto de los valores detectados en la investigación de Rauld

(2011), que mide 0,2 mm/año en el pie de monte, mediante mediciones con GPS diferencial, bases topográficas, modelos digitales de elevación, entre otras tecnologías. Además, señala que la FSR

es una amenaza sísmica para Chile, la cual podría provocar sismos con desplazamiento promedio de 1 a 4 m y magnitudes  $M_w$  entre 6,9 y 7,4 con periodos de recurrencias entre 2500 y 10.000 años.

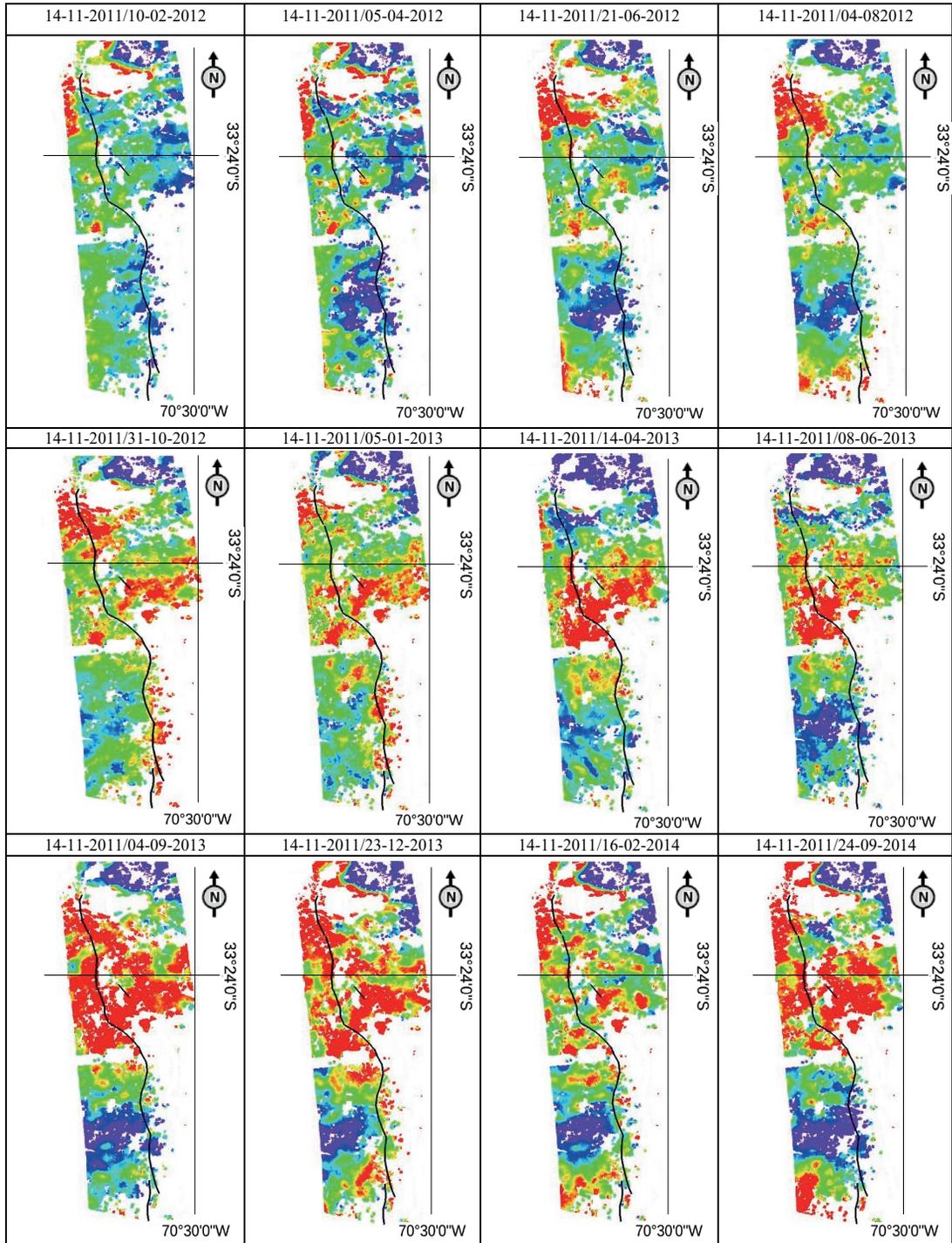
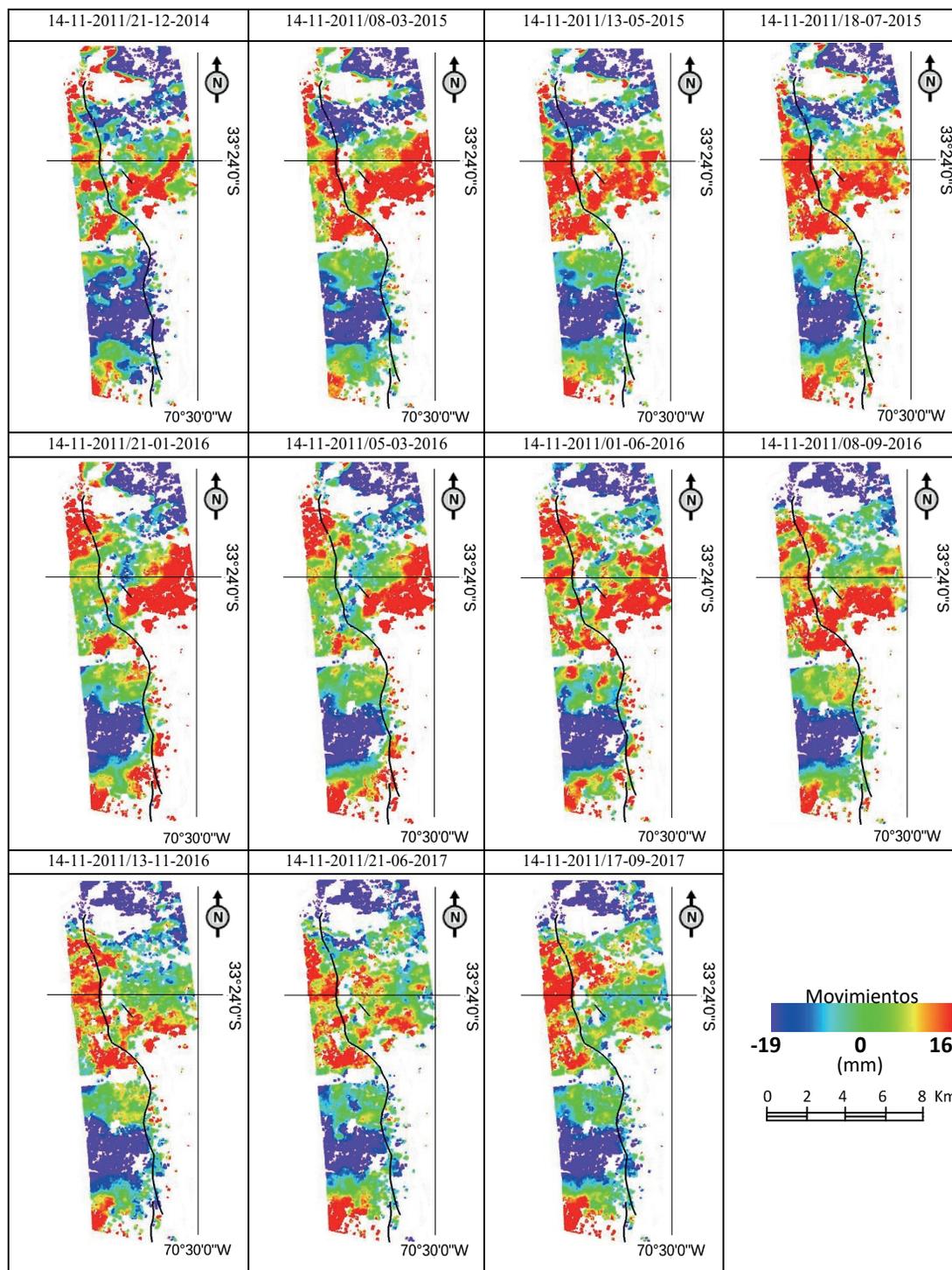


Figura 6, continúa en página siguiente.

Figura 6, continúa de página anterior.



**Figura 6.** Serie de mapas de movimientos del pie de monte. Los mapas muestran una superposición con la FSR (línea negra). Las áreas en blanco son áreas con coherencias menores al 30%, las cuales no aparecen representadas y que en su mayoría corresponden a vegetación.

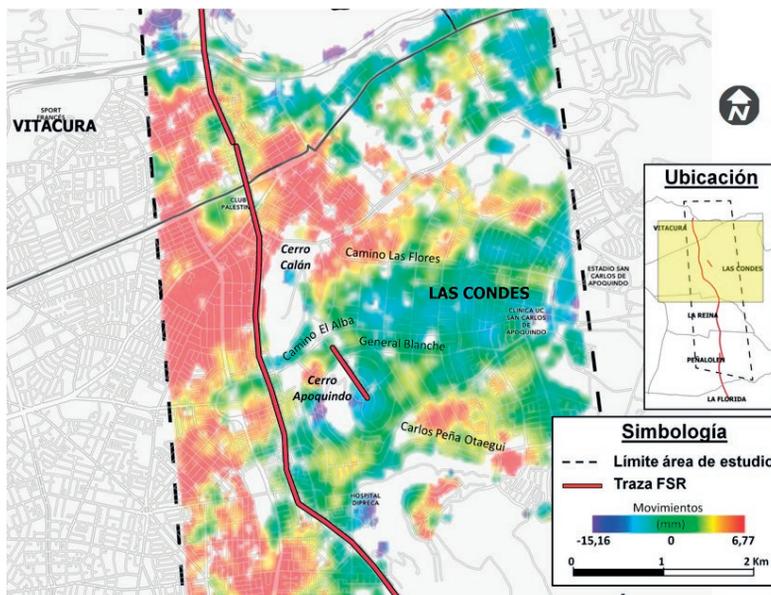


Figura 7. Elevaciones del terreno 2017-09-17 bajo calles de las Condes.

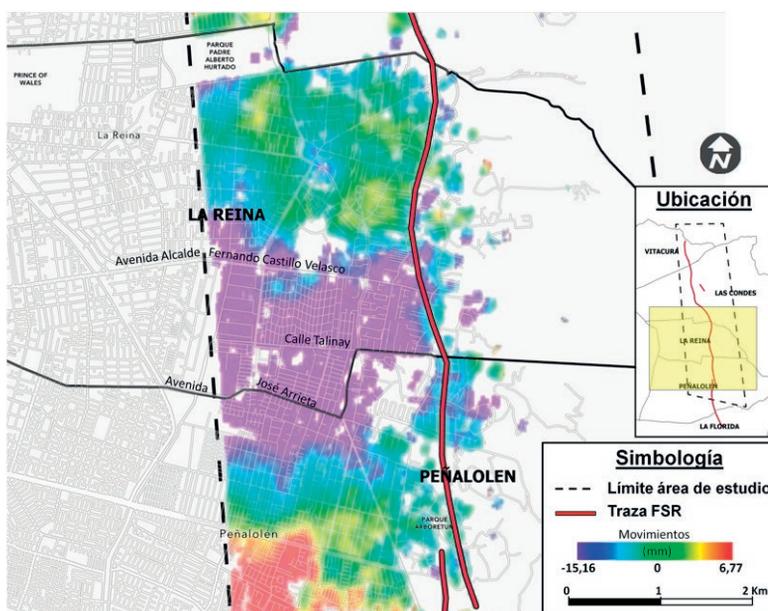
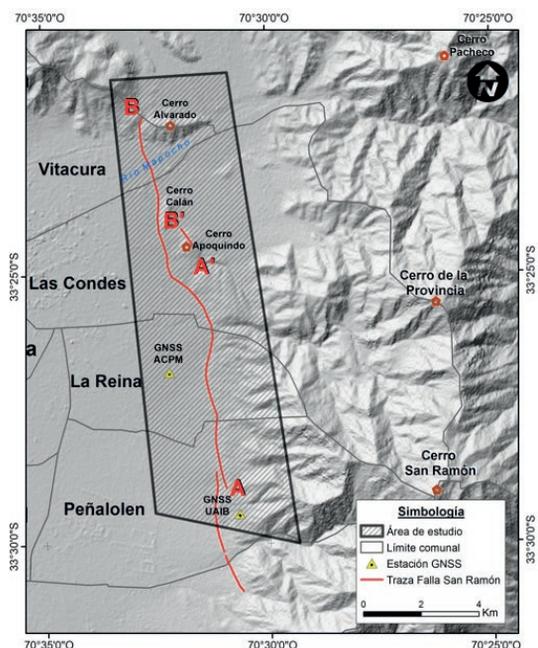


Figura 8. Subsidiencias del terreno 2017-09-17 bajo las calles de la Reina y Peñalolén.

### 3.2. Distribución espacial de la subsidencia en perfiles longitudinales en la traza de FSR

La Figura 9 muestra la identificación de los perfiles longitudinales que coinciden con la traza de la FSR para el análisis lineal de subsidencia. El

perfil AB corresponde a gran parte de la longitud de la traza sur/norte de la FSR con aproximadamente 13,5 km pasando por 4 comunas. El perfil A'B' al este del AB, corresponde al segmento de la FSR sobre el cerro Apoquindo en Las Condes, con aproximadamente 650 m.



**Figura 9.** Identificación de perfiles longitudinales sobre la FSR.

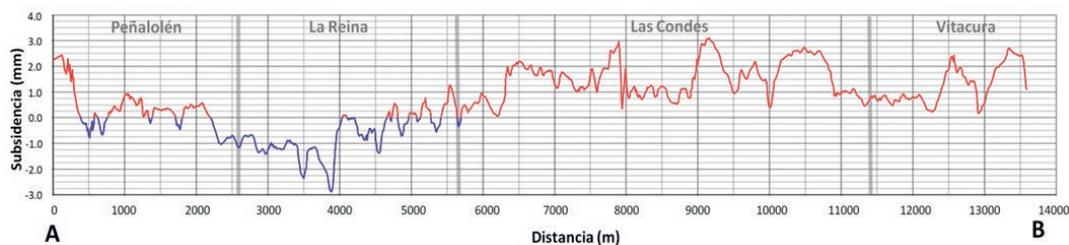
Ambos perfiles facilitan la observación de la tendencia y el análisis de los desplazamientos sobre la traza de la FSR de forma continua. La Figura 10, muestra que en los primeros 300 m, sobre la

comuna de Peñalolén, la elevación promedio de la traza es de +2,3 mm, luego entre los 500 y 2500 m fluctúa la subsidencia en torno a “0”. En la Comuna de la Reina las subsidencias llegan a ser máximas, con promedio de -2,92 mm, y una tasa de -0,49 mm. Sin embargo, en las comunas de Las Condes y Vitacura, la tendencia de la traza es elevarse, llegando en promedio hasta +3,11 mm, con una tasa promedio de +0,52 mm.

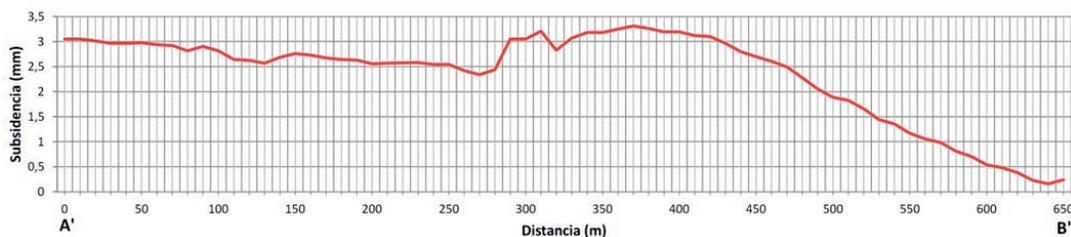
La Figura 11, muestra el segmento de la FSR sobre el Cerro Apoquindo (perfil A'B'). Se muestran valores de subsidencia promedio de +0,16 mm hacia el norte (B'), con una tasa anual promedio de +0,03 mm. La elevación máxima observada es de +3,31 mm a una distancia de 370 m del punto A'.

### 3.3. Subsidencia relacionada con el entorno geológico y nivel freático de la FSR

Las Figuras 12a y 12b muestran una superposición de las subsidencias entre los años 2011 y 2017 (serie 14-11-2011 / 17-09-2017) con las unidades geológicas y nivel freático modificados de Vergara (2015). En la Figura 12a se observa que en gran parte la elevación del terreno llega hasta +6,8 mm. Se localiza en una franja de Las Condes sobre gravas fluviales (II y IIIa) y gran parte de ella al oeste



**Figura 10.** Perfil AB promedio de subsidencia sobre la traza FSR periodo 2011-2017.



**Figura 11.** Perfil A'B' promedio de subsidencias en FSR en segmento Cerro Apoquindo periodo 2011-2017.

de la FSR. También se observa al suroeste de la zona y sobre la comuna de Peñalolén con valores que llegan hasta los +5,2 mm sobre gravas fluviales y entre los niveles freáticos más profundos (110 a 150 m). En este sentido, los trabajos de Yastika et al. (2019) y Fernández et al. (2009) establecen una influencia de la geología y las mediciones DInSAR/SBAS para calcular la subsidencia.

En la Figura 12b se visualiza el mapa de nivel freático y la subsidencia entre el año 2011 y 2017 (serie 14-11-2011 / 17-09-2017). Se observa que las zonas de mayor hundimiento del terreno, entre 0 mm hasta -15,16 mm, se concentran en la franja con nivel freático 110 a 130 m bajo las comunas de La Reina y Peñalolén. Se aprecian también las zonas de mayor acumulación de elevaciones al norte de la zona de estudio en las comunas de Las Condes y parte de Vitacura, que coincide con los rangos de nivel freático menos profundos, entre los 15 a 50 m.

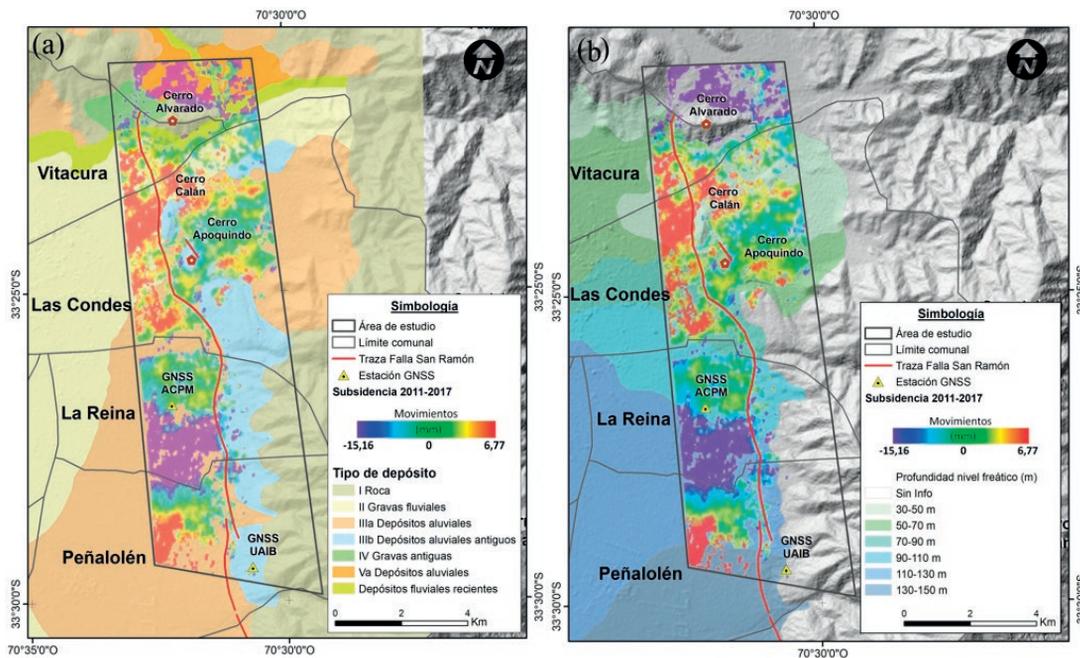
Por otra parte, no se puede establecer una correlación entre la velocidad de subsidencia del terreno, la geología y el nivel freático, porque existen variables adicionales que condicionan de manera importante los procesos de subsidencia, como la

litología, el comportamiento elastoplástico de la hidroestratigrafía, potencia de los acuíferos, contenido de agua, volumen de extracción, procesos de recarga del flujo y descarga de aguas subterráneas, entre otros (Galloway and Hoffmann, 2007; Solano-Rojas et al., 2015). Estas variables no fueron consideradas en el estudio debido a la escasez de información y a que se podrán abordar en futuras investigaciones.

### 3.4. Comparación de resultados entre GNSS y la técnica SBAS

La Figura 13 muestra una comparación de las observaciones de los valores de subsidencia obtenidas de las estaciones GNSS disponibles y los desplazamientos de la serie SBAS obtenidos con la Ecuación (1) para la estación Universidad Adolfo Ibáñez (UAIB). Se muestran ocho mediciones en común, desde el 18 de julio 2015 hasta el 17 de septiembre 2017. Los datos muestran una alta coherencia entre las observaciones de los sistemas GNSS/SBAS.

La observación del 13 de noviembre del 2016 presenta la mayor diferencia con -7,83 mm y la menor la del 21 de enero del mismo año con -1,66 mm. La



**Figura 12.** a) Mapa de unidades geológicas y b) Mapa con nivel freático con sobreposición de mapa de subsidencia del periodo 2011-2017 (serie 14-11-2011 / 17-09-2017).

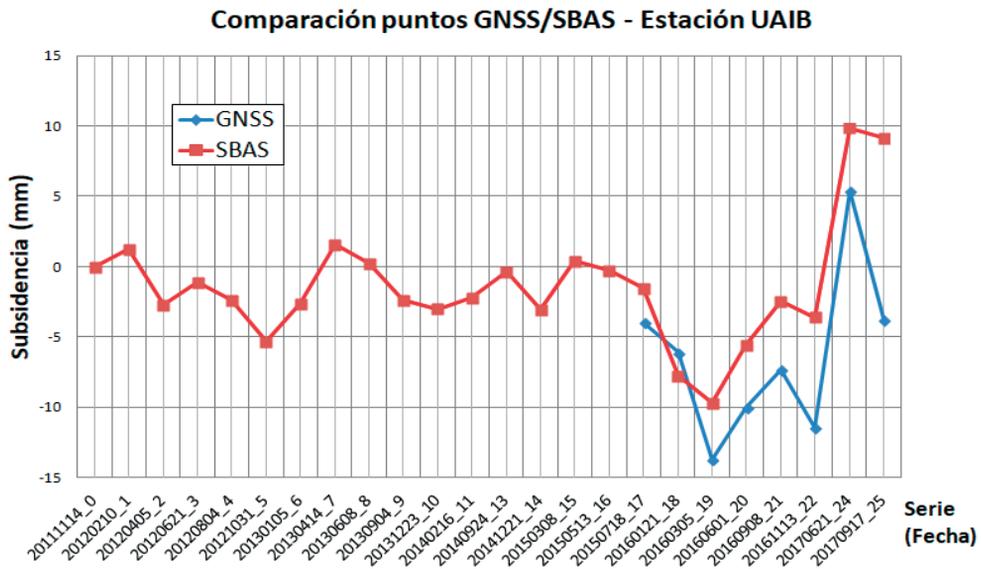


Figura 13. Comparación de las observaciones GNSS y SBAS de la estación UAIB.

Figura 14 muestra el RMSE total con un valor de 1,75 mm y una regresión media de 67% (Yastika et al., 2019). En seis de los ocho puntos en común se observan subsidencias y la observación sobre la serie con fecha 21-06-2017 detecta una elevación del terreno tanto en GNSS y SBAS. Por el contrario, existe una discrepancia en la observación de la serie con fecha 17-09-2017 medida entre ambas tecnologías. Utilizando GNSS se midió la subsidencia y con SBAS se midió la elevación con una importante diferencia de 12,85 mm.

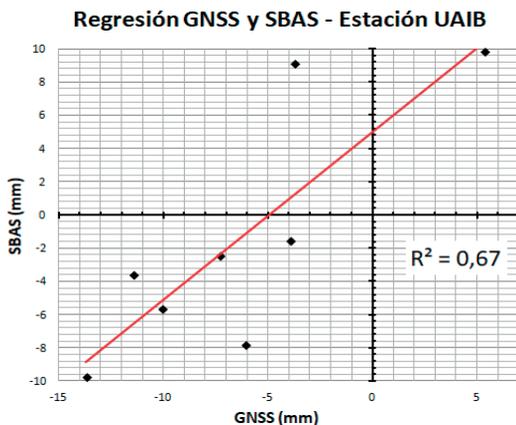


Figura 14. Regresión entre las observaciones GNSS y SBAS para la estación UAIB.

Las variaciones en algunas observaciones entre GNSS y SBAS pueden haber sido causadas por las condiciones locales del sitio o por las condiciones del suelo sobre las imágenes TerraSAR-X (Yastika et al., 2019). La estación ACPM no fue analizada por no ser representativa, dispone de sólo dos puntos en común entre GNSS y SBAS.

El análisis de los resultados GNSS y SBAS comprueban parcialmente los resultados, porque el acceso de solo dos estaciones GNSS sobre la zona de estudio y una ventana de tiempo de colección de datos GNSS muy estrecha, son insuficientes para la evaluación. Solo la estación UAIB con ocho observaciones obtuvo un RMSE de 1,75 mm con una correlación de 67%. Diversos estudios (Cabral-Cano et al., 2010; Osmanoglu, et al., 2010), establecen que el análisis comparativo de series de tiempo derivadas de GNSS con una alta densidad de puntos, muestran que la distribución espacial de la deformación del terreno se mantiene dentro de los mismos parámetros que aquellos realizados con sensores SAR.

Una de las limitaciones de las imágenes SAR es encontrar imágenes que cumplan con la base temporal (BT) y base perpendicular (BP) óptimas para este tipo de estudios, según lo señalado por Ferretti et al., 2007. Asimismo, por el relieve y geomorfología típica de esta área (sector montañoso), es posible que se obtenga baja coherencia entre los

pares interferométricos debido a los artefactos atmosféricos correlacionados con la topografía y a las distorsiones geométricas al momento de la adquisición de las imágenes, lo que podría afectar a los resultados.

#### 4. Conclusiones

Esta investigación es la primera en Chile en donde se obtuvo un mapa de la subsidencia o elevaciones provocadas por la falla geológica cortical urbana de San Ramón mediante imágenes TSX y la técnica DInSAR/SBAS. Los resultados de los mapas de distribución de subsidencia obtenidos muestran que la tasa de desplazamiento lineal detectada en la traza de la Falla de San Ramón con la tecnología DInSAR/SBAS fue del orden de los 0,4 mm/año. Durante el periodo 2011 a 2017, mediante 24 imágenes TerraSAR-X, se estimó que las zonas de mayor velocidad de subsidencia del terreno se encuentran en la comuna de La Reina, y los sectores con una tendencia a elevarse se localizan en las comunas de Peñalolén, Las Condes y Vitacura.

Por otro lado, en relación con el nivel freático, las zonas de mayor hundimiento del terreno se concentran en sectores con altos niveles freáticos y las zonas de mayor acumulación de elevación del terreno en sectores con niveles freáticos menos profundos. En cuanto a la geología, se observa que la mayor elevación del terreno corresponde a sectores asentados sobre gravas fluviales, sin embargo, debido a la heterogeneidad de la distribución de la subsidencia o elevaciones del terreno, no es posible establecer una correlación entre la velocidad de subsidencia, la geología y el nivel freático. Se validaron los resultados de la técnica SBAS mediante el uso de mediciones del sistema GNSS (8 mediciones en común) y se observa entre ambas una alta correlación ( $R^2$  0,67).

Se destaca la importancia del uso de las imágenes TerraSAR-X como fuente de información continua en estudios de monitoreo a largo plazo y gestión integrada del riesgo de desastre, que deben ser complementadas con datos de campo. Los métodos basados en percepción remota para estimar la subsidencia o elevaciones del terreno han sido aplicados con éxito, encontrándose que al combinar datos de apertura sintética (SAR), junto a técnicas DInSAR, algoritmo SBAS y

mediciones GNSS, se obtiene una correlación de la deformación del terreno.

#### Agradecimientos

Este artículo es parte del trabajo para obtener el grado de Magíster en Teledetección de la Facultad de Ciencias de la Universidad Mayor de Chile. El autor agradece a la Universidad por su incondicional apoyo. En especial agradecer a Marcela Vivanco, Walter Tapia, y especialmente al Dr. Dominique Derauw del Centro Espacial de Lieja, Bélgica. Finalmente, al Centro Aeroespacial Alemán DLR a través del convenio PROPOSAL ID: GEO3642 suscrito para la utilización de las imágenes TerraSAR-X.

#### 5. Referencias

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P., Fukuda, Y. 2013. Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(3), 226-240. <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.692336>
- Ammirati, J.B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., Ruiz, S. 2019. The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°-34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area. *Bulletin of the Seismological Society of America* 109(5), 1985–1999. <https://doi.org/10.1785/0120190082>
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., and Kausel, E. 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2), 1–34. <https://doi.org/10.1029/2008TC002427>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Braun, A. (2020). *Sentinel-1 Toolbox: DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges*. ESA online publications, 27 p.
- Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Demets, C., Cigna, F., Diaz-Molina, O. 2010. Subsidence and fault hazard maps using PSI and permanent GPS networks in central Mexico. In *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development* (p. 255-259). (IAHS-AISH Publication; Vol. 339).

- Cakir, Z., Akoglu, A.M., Belabbes, S., Ergintav, S., Meghraoui, M. 2005. Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1–2), 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.044>
- Casu F., Manzo M., Lanari, R. 2006. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102 (3-4), 195-210. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.023>
- Costantini, M. 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 813-821. <https://doi.org/10.1109/36.673674>
- Crosetto, M., Tscherning, C.C., Crippa, B., Castillo, M. 2002. Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 26-1-26-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013544>
- Fernandez, P., Irigaray, C., Jimenez, J., El Hamdouni, R., Crosetto, M., Monserrat, O., Chacon, J. 2009. First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique. *Engineering Geology*, 105(1-2), 84–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.005>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Milano, P. 2007. InSAR Principles - Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation SAR Interferometry Processing and Interpretation . ESA Publications, TM-19 . ISBN 92-9092-233-8.
- Galloway, D.L., Hoffmann, J. 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15, 133–154. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0121-5>
- Hanssen, R.F. 2001. *Radar interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* (Vol. 2). Springer Science, Dordrecht, 308 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- Hermosilla Díaz, D.E. 2016. *Interferometría Radar de Apertura Sintética (INSAR) aplicada al Estudio del movimiento de ladera aldeaña al Volcán Calbuco con la ayuda de imágenes Sentinel 1A*. Tesis para optar al Título de Ingeniero en Aviación Comercial, Academia de Ciencias Aeronáuticas, Universidad Federico Santa María, Chile, 82 p.
- INE. 2017. *Resultados Censo de Población y Vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago, Chile.
- Lagios, E., Sakkas, V., Papadimitriou, P., Parcharidis, I., Damiata, B.N., Chousianitis, K., Vassilopoulou, S. 2007. Crustal deformation in the Central Ionian Islands (Greece): Results from DGPS and DInSAR analyses (1995–2006). *Tectonophysics*, 444(1–4), 119–145. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.08.018>
- Lakhote, A., Thakkar, M.G., Kandregula, R.S., Jani, C., Kothiyari, G.C., Chauhan, G., Bhandari, S. 2020. Estimation of active surface deformation in the eastern Kachchh region, western India: Application of multi-sensor DInSAR technique. *Quaternary International*, 575-576, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.010>
- Osmanoglu, B., Dixon, T.H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Jiang, Y. 2010. Mexico City subsidence observed with Persistent Scatterer InSAR. *International Journal Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>
- Parcharidis, I., Kokkalas, S., Fountoulis, I., Foumelis, M. 2009. Detection and Monitoring of Active Faults in Urban Environments: Time Series Interferometry on the Cities of Patras and Pyrgos (Peloponnese, Greece). *Remote Sensing*, 1(4), 676–696. <https://doi.org/10.3390/rs1040676>
- Rauld, R. 2011. *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33° S)*. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Mención Geología, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 445 p.
- Rodríguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S. 2005. *An Assessment of the SRTM Topographic Products*. Technical report JPL D-31639. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, NASA.
- Sánchez, C. Monells, D, Manso A., Fariás, E. 2016. Aplicación de metodología InSAR en la detección de deformaciones en el cráter de subsidencia y entorno minero. Caso de Estudio: Codelco Mina Andina. In *1st International Conference of Underground Mining*, October 19-21, Santiago, Chile.
- Sarmap SA. 2017. SARscape 5.1 Help Manual. Section 1.7.3.
- Seppi, S. 2016. *Uso de interferometría diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia*. Tesis para Optar al Grado de Magíster en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, IG-CONAE/UNC.

- Solano-Rojas, D., Cabral-Cano, E., Hernández-Espriú, A., Wdowinski, S., Demets, C., Salazar-Tlaczani, L., Falorni, G., Bohane, A. 2015. 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. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2).
- Tobita, M., Nishimura, T., Kobayashi, T., Hao, K.X., Shindo, Y. 2011. Estimation of coseismic deformation and a fault model of the 2010 Yushu earthquake using PALSAR interferometry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(3–4), 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.017>
- Valenzuela, G. (1978). Suelo de Fundación de Santiago. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 33(Boletín N°33), 21.
- Vargas, G., Rebolledo, S. 2015. La Falla San Ramón y el peligro sísmico de Santiago: Nuevos antecedentes morfoestratigráficos e implicancias normativas. In *XIV Congreso Geológico Chileno*, 4-8 Octubre, La Serena, Chile, p. 379-381 (Vol. 1).
- Vergara, L., Verdugo, R. 2015. Condiciones geológicas-geotécnicas de la cuenca de Santiago y su relación con la distribución de daños del terremoto del 27F. *Obras y Proyectos*, 17, 52-59. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132015000100007>
- Wall, R., Sellés, D.G. 1999. Área Títul-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa Geológico N°11, escala 1:100.000.
- Yastika, P.E., Shimizu, N., Abidin, H.Z. 2019. Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang , Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. *Advances in Space Research*, 63(5), 1719–1736. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.008>