



Análisis cuantitativo de la subsidencia en la zona suroccidental de la Sabana de Bogotá mediante geodesia InSAR

Fredy Diaz-Mila ^{ID}*, Lusette Karime Escobar-Rey ^{ID}, Héctor Mora-Páez ^{ID}

¹ Servicio Geológico Colombiano. Diagonal 53 N0. 34 - 53 Bogotá D.C. Colombia.

Resumen: La subsidencia es un fenómeno geológico que consiste en el hundimiento paulatino de la superficie terrestre, el cual puede ser ocasionado por acciones naturales o por la actividad humana. El Grupo Aplicaciones Satelitales para el Estudio de la Dinámica de la Tierra (ASEDT) de la Dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano, bajo el marco del proyecto GeoRED (Geodesia: Red de Estudios de Deformación), mediante la utilización de técnicas de geodesia InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), ha cuantificado el fenómeno de la subsidencia en 13 municipios que hacen parte de la Sabana de Bogotá, empleando imágenes interferométricas Sentinel-1 (184 de órbita descendente y 225 de órbita ascendente), para el periodo comprendido entre octubre de 2014 a diciembre 2021. Se generaron 840 interferogramas, de los cuales 345 corresponden a órbitas ascendentes y 495 descendentes, lo que permitió realizar la estimación de los valores de los movimientos a lo largo de la línea de vista *LOS* (*line-of-sight*) para cada conjunto de imágenes, y posteriormente mediante técnicas de combinación se estimaron las velocidades verticales y horizontales este-oeste. Uno de los municipios con mayor subsidencia en el área de estudio es El Rosal, donde se estima una tasa de desplazamiento vertical de hasta 12 cm/año, es decir un valor aproximadamente mayor cuatro veces respecto a la estimación realizada por Mora-Páez *et al.* (2021) en la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: subsidencia, InSAR, Sabana de Bogotá, geodesia.

Quantitative analysis of subsidence in the Southwestern Sabana de Bogotá using InSAR geodesy

Abstract: Subsidence is a geological phenomenon that consists of the gradual sinking of the earth's surface, which can be caused by natural actions or by human activity. The Satellite Applications Group for the Study of Earth Dynamics (ASEDT) of the Geohazards Directorate of the Colombian Geological Survey, under the framework of the GeoRED project (Geodesy: Deformation Studies Network), using InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) geodesy techniques, has quantified the phenomenon of subsidence in 13 municipalities that are part of the Sabana de Bogotá, using Sentinel-1 interferometric images (184 of descending orbit and 225 of ascending orbit), for the period from October 2014 to December 2021. A total of 840 interferograms were generated, of which 345 correspond to ascending orbits and 495 to descending orbits, which allowed estimating the values of the movements along the line-of-sight (LOS) for each set of images, and subsequently using combination techniques the vertical and horizontal east-west velocities were estimated. One of the municipalities with the greatest subsidence in the study area is El Rosal, where a vertical displacement rate of up to 12 cm/year is estimated, i.e. a value approximately four times higher than the estimate made by Mora-Páez *et al.* (2021) in the city of Bogotá.

Key words: subsidence, InSAR, Sabana de Bogotá, geodesy.

To cite this article: Diaz-Mila, F., Escobar-Rey, L.K., Mora-Páez, H. 2025. Quantitative analysis of subsidence in the Southwestern Sabana de Bogotá using InSAR geodesy. *Revista de Teledetección*, 65, 21345. <https://doi.org/10.4995/raet.2025.21345>

* Corresponding author: fdiaz@sgc.gov.co

1. Introducción

La Sabana de Bogotá está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental Colombiana, y está constituida por depósitos de arcillas producto de la desecación de un antiguo lago, con discontinuidad de arcillas y suelos orgánicos, cuyos espesores alcanzan en algunas zonas hasta 600 metros.

El estudio de fenómenos geológicos de carácter regional, tales como la subsidencia, son necesarios para conocer y mitigar los impactos negativos, que en este caso se reflejan en mayor proporción en infraestructuras viales y edificaciones. La Sabana de Bogotá, objeto de este estudio refleja desplazamientos verticales negativos, los cuales indican una afectación directa en zonas específicas, que han sido objeto de estudio desde la década de los 90.

El avance tecnológico, ha dado lugar a la aparición de nuevas técnicas como la InSAR, permitiendo cuantificar el fenómeno en grandes áreas, garantizando precisiones de orden centimétrico y acarreando menor tiempo en la consecución de información, con respecto a técnicas convencionales que requieran recolección de información en campo.

Por tal razón, en este estudio se cuantifican las velocidades de los desplazamientos verticales en la Sabana de Bogotá, así como su distribución espacial y su comportamiento en un periodo de tiempo determinado, obteniendo como resultados municipios con subsidencias de hasta 12 cm/año.

2. Estudios previos

La subsidencia tanto en la ciudad de Bogotá como en la Sabana de Bogotá ha sido objeto de diversos estudios, dada sus implicaciones y consecuencias al futuro, de esta manera, autores como Van der Hammen *et al.* (1973) señala que la extracción de agua subterránea de los acuíferos es una de las principales causas del descenso del nivel freático en los cerros, piedemonte y la planicie, incidiendo en la desaparición de un gran porcentaje de fuentes, quebradas, y en la disminución de agua superficial del río

Bogotá y afluentes. Posteriormente, Lobo-Guerrero (1992) planteó el descenso de niveles en acuíferos libres de la Formación Guadalupe principalmente en municipios como Facatativá y el Rosal, las cuales hacen parte del área considerada para este estudio. Este mismo autor, en el año 2003, señala que la sobreexplotación del agua subterránea genera daños ambientales severos, existiendo la posibilidad que algunos se presenten en la superficie como asociados a subsidencia (Lobo-Guerrero, 2003).

En la ciudad de Bogotá, Rudenko y Sch (2013), estimaron una tasa de subsidencia del orden de $-44,2 \pm 0,2$ mm/año, para el periodo de tiempo 1998-2008 empleando datos de la estación BOGT, la cual pertenece a la red de estaciones de operación continua (cGNSS) de GeoRED del Servicio Geológico Colombiano. Para esta misma estación Mora-Páez *et al.* (2021), estimaron una velocidad vertical de $-28,68 \pm 1,07$ mm/año para el periodo septiembre 2011 a diciembre 2018.

En cuanto a estimaciones realizadas con InSAR en la ciudad de Bogotá, Mora-Páez *et al.* (2020), empleando imágenes TerraSAR-X, obtuvieron un mapa de desplazamiento acumulado con tasas máximas de subsidencia del orden de $-3,3$ cm/año para el periodo comprendido entre el 28 de septiembre 2011 a octubre 2017.

Posteriormente, Mora-Páez *et al.* (2021), ampliaron el periodo de observación hasta diciembre de 2018 con imágenes TerraSAR-X, e incorporaron resultados de varias estaciones geodésicas, tanto permanentes de GeoRED como de la red geodésica GNSS del Distrito Capital de Bogotá, obteniendo un mapa de desplazamiento acumulado con valores máximos de subsidencia de -24 centímetros durante el periodo de observación de septiembre 2011 a diciembre de 2018, que representa 3,3 cm/año, concordante con el valor presentado por Mora-Páez *et al.* (2020).

3. Área de estudio

La Sabana de Bogotá es una de las regiones más representativas del fenómeno de subsidencia en el país, está localizada en la cordillera Oriental

de Colombia, que corresponde a una cuenca tectónica-sedimentaria consolidada después de la elevación del Norte de los Andes hace alrededor de 5 Ma (Van der Hammen *et al.*, 1973; Wijninga, 1996).

En la Figura 1(a), se muestra la localización de la Sabana de Bogotá en el territorio colombiano, y en la Figura 1(b) la delimitación de la Sabana de Bogotá con línea amarilla, basado en Montoya y Reyes, (2007), así como el perímetro de la ciudad de Bogotá, línea blanca, tomado del portal Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital – (IDECA, 2013).

En este estudio, se extiende el área de análisis a la zona Sur occidental de la Sabana de Bogotá, área que se presenta en el mapa de la Figura 2, correspondiente aproximadamente al 50% del área total de la Sabana de Bogotá. Esta zona fue escogida por la importancia que tiene esta región para el país por ser una de las mayores productoras de bienes y servicios, agrícolas e industriales, destacándose el cultivo de flores, donde Colombia es el segundo país exportador de flores a nivel mundial después de Holanda

(Portafolio, 2022). También se destaca la influencia que tiene Bogotá, ciudad capital y la más grande del país, con una población superior a 7 millones de habitantes, que corresponde al 15% de la población colombiana según el censo de población y vivienda realizado por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en el año 2018.

4. Metodología

La técnica de geodesia InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) permite medir los desplazamientos del terreno principalmente en su componente vertical a través del tiempo (Pritchard, 2006), empleando imágenes interferométricas de radar conformadas principalmente por dos componentes, Amplitud y Fase. La primera corresponde a la radiación emitida-recibida por los diferentes elementos de la superficie terrestre, la cual está directamente relacionada con la rugosidad de los elementos detectados (Ferretti *et al.*, 2007), mientras que la segunda permite establecer las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, así como

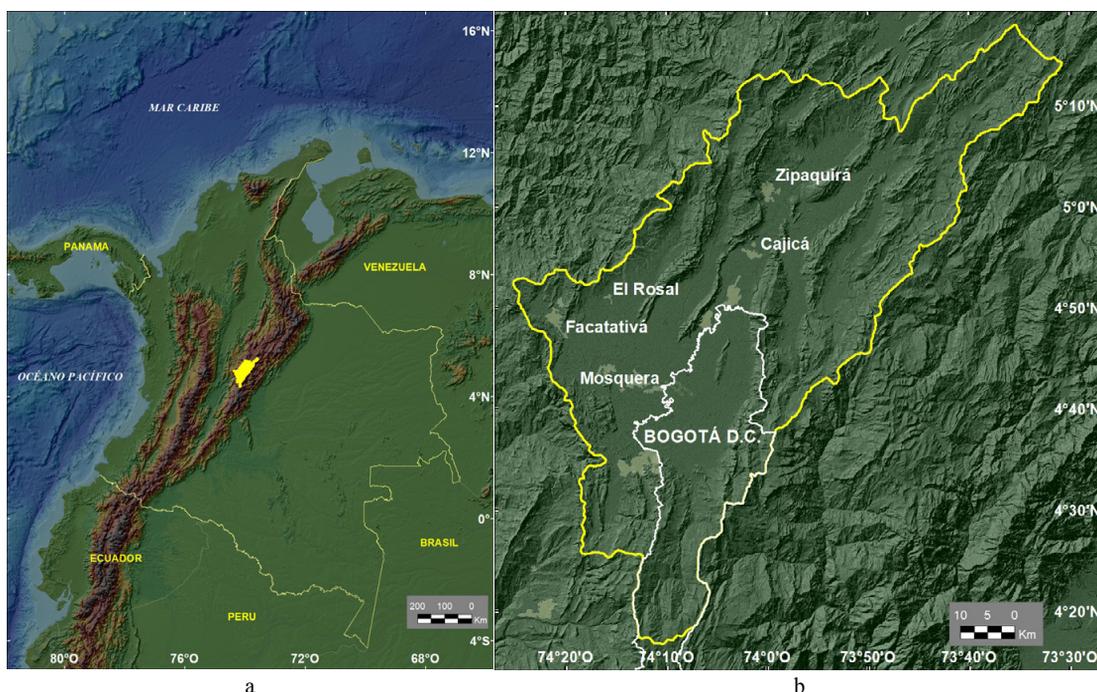


Figura 1. Localización de la Sabana de Bogotá. Fuente: (IDECA, 2013; Montoya y Reyes, 2007).

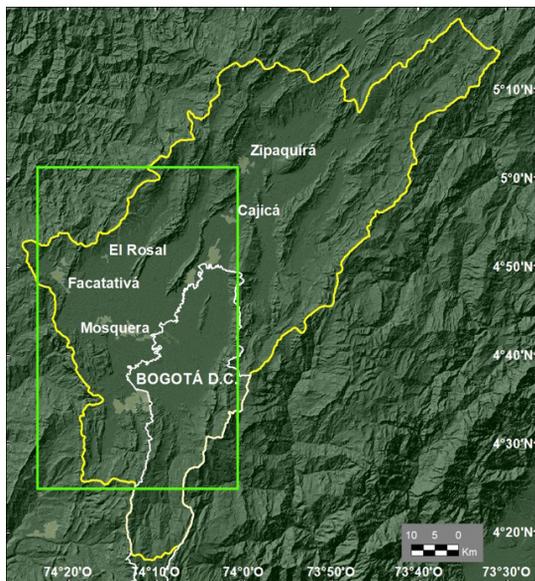


Figura 2. Localización de la zona de estudio. El rectángulo verde representa la zona de estudio. La línea amarilla corresponde a la Sabana de Bogotá y la línea blanca demarca el perímetro de la ciudad de Bogotá.

las diferencias entre dichas distancias a través del tiempo; la fase interferométrica es empleada para el análisis de desplazamientos del terreno (Ferretti *et al.*, 2007).

La calidad de la respuesta de la señal emitida-recibida es conocida como coherencia, clasificada de 0 a 1, donde 0 es nulo y 1 es alta correlación, por este motivo, la coherencia es un estimador de la calidad de la fase interferométrica. Este índice se encuentra influenciado por las características del terreno, donde los principales factores que generan pérdida de coherencia son la vegetación y el agua.

La medición InSAR se basa en la comparación de las fases entre dos imágenes SAR, tomadas en épocas distintas. Una de estas es tomada como “referencia” y otra adquirida posteriormente llamada “secundaria”. La diferencia de Fase interferométrica, se representa en colores en una imagen conocida como Interferograma diferencial, en la cual se puede establecer si se presenta desplazamientos verticales negativos que se pueden interpretar como subsidencia ó positivos como levantamiento de la superficie terrestre según el patrón de los colores. La

Figura 3 indica mediante un ejemplo, la estimación de desplazamientos verticales negativos, donde es posible obtener las medidas relativas de dos puntos interpretando el recorrido de la rampa de colores, la cual se puede observar que inicia en el color cian y termina nuevamente en este mismo color cian, además se observa que a través de esta rampa existen otros colores como morado, magenta, amarillo, verde.

Este patrón corresponde a un de ciclo colores expresado en el módulo 2π , denominado “ambigüedad” de la fase ó fase “enrollada” (Ferretti *et al.*, 2007), donde cada ciclo representa un desplazamiento vertical equivalente a la mitad de la longitud de onda (λ) del sensor. El sentido del desplazamiento vertical está dado en función del orden de colores de $-\pi$ a π , indicado en la barra de colores, para el caso del ejemplo, que los desplazamientos verticales son negativos y se pueden interpretar como subsidencia.

De esta manera, se podría estimar el desplazamiento relativo de un punto respecto a otro; por ejemplo, si se tiene como referencia un punto denominado 1 y se compara con otro denominado 2, se observa que entre los dos hay una diferencia de 3 ciclos de colores, si corresponde a un sensor como TerraSAR-X que cada longitud de onda (λ) es de 3,2 centímetros, se podría estimar un desplazamiento de $-4,8$ centímetros, que podría interpretarse como subsidencia. Cabe resaltar que es necesario contar con información topográfica externa, proporcionada por el DEM, lo cual finalmente permite establecer la deformación.

4.1. Datos empleados

Para el análisis cuantitativo de la zona de estudio, se utilizaron 409 imágenes de radar del sensor Sentinel-1, que abarcan el período de tiempo comprendido entre octubre 2014 a diciembre 2021, con una resolución temporal de 12 días mínimo, de las cuales 184 son de órbita descendente y 225 órbita ascendente; estas imágenes se obtuvieron gratuitamente mediante descarga del portal Data Hub de la Agencia Espacial Europea - ESA. Adicionalmente, se empleó el Modelo Digital de Elevación - SRTM (*The NASA Shuttle Radar Topography Mission*), con una resolución espacial de 30 metros.

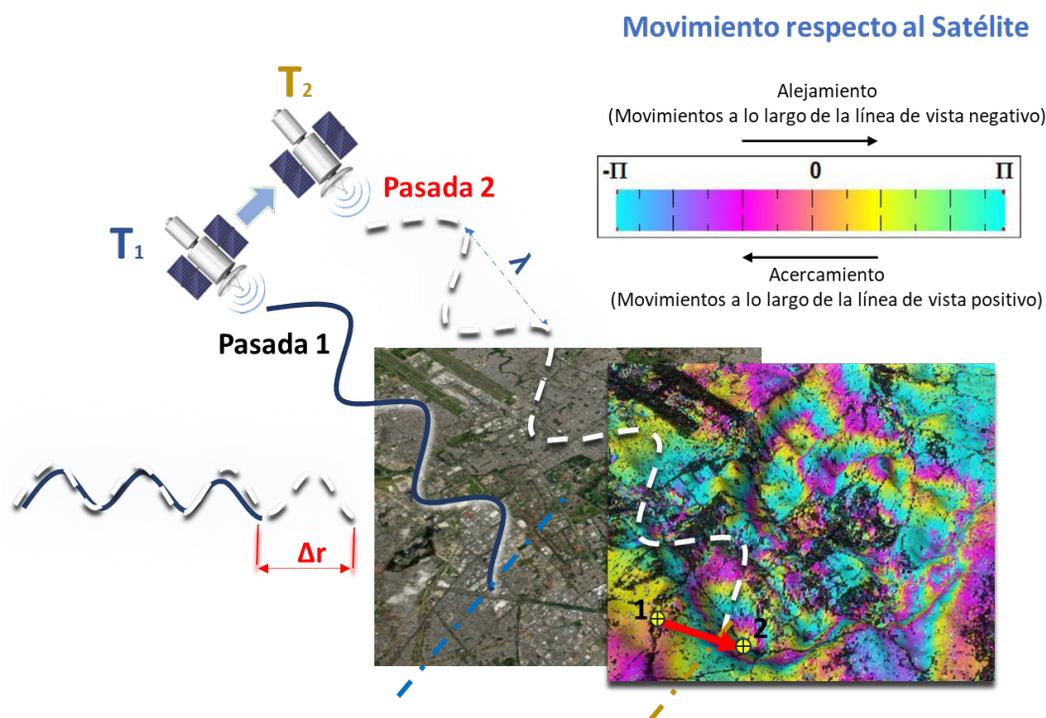


Figura 3. Ilustración de la estimación de desplazamientos verticales mediante InSAR. La “pasada” 1 corresponde a la imagen “referencia”, mientras que la “pasada” 2 a la imagen “secundaria”. La estimación del desplazamiento entre estas dos imágenes está representada como la diferencia de fase ($4\pi\Delta r/\lambda$), lo cual genera el interferograma diferencial (imagen compuesta por colores ó “franjas” interferométricas)

4.2. Procesamiento InSAR

El procesamiento y generación de los interferogramas se realizó en el Laboratorio Geodésico Internacional de GeoRED mediante el uso del paquete de procesamiento científico *Interferometric Synthetic aperture radar Scientific Computing Environment* versión 2 (ISCE2) (Rosen *et al.*, 2012), desarrollado en lenguaje de programación Python. Se consideró emplear una línea base temporal máxima de 4 meses y una base espacial máxima de 200 metros.

Mediante el algoritmo especializado “*topsStack*” (Fattahi *et al.*, 2017) de ISCE2, se procesaron las imágenes Sentinel-1 en conjunto, empleando la operación “SAR Stack”. Dentro de este operador se lleva a cabo una serie de etapas que incluyen la corrección orbital, así como el co-registro a partir del Modelo de Elevación Digital DEM (*The NASA Shuttle Radar Topography*

Mission – SRTM) de 30 metros de resolución (1° de arco), para posteriormente conformar la red de interferogramas, la remoción de la fase topográfica, la generación de los interferogramas, su respectivo “desenrollado” y la geocodificación de los interferogramas desenrollados, la cual fue realizada en el elipsoide de referencia WGS84.

Posteriormente, para el “desevolvimiento” de la fase, se empleó el software SNAPHU (*Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping*) (Chen, 2001), cuya finalidad es la recuperación de la fase original que es “desenrollada”, y proporcionar la medición de la variación de la altitud real (Ferretti *et al.*, 2007). En otras palabras, el “desenrollado” de la fase, permite realizar la conversión de la información “discreta” de las “franjas” interferométricas de los interferogramas y convertirlos en un modelo de desplazamientos con información continua en cada uno de los píxeles.

El análisis de series temporales de InSAR en los “Stack” de los interferogramas Sentinel-1, se realizó mediante el software de procesamiento MintPy (*Miami InSAR Time-series software in Python*), (Yunjun et al., 2019). Este paquete científico emplea algoritmos de inversión Small Baseline Subsets (SBAS), (Berardino et al., 2002), y utiliza el modelo ERA5 (Jolivet et al., 2011) para realizar la corrección de retardo troposférico.

Es importante mencionar, que las redes de procesamiento se formaron con los interferogramas que tienen una coherencia promedio superior a 0,5 en el área de interés definida (4,42° a 5,0°, -74° a -74,4°); además, se excluyeron los interferogramas con errores de fase de desenrollado y se aplicaron correcciones de retraso de fase troposférica utilizando el modelo de reanálisis ERA-5 (Jolivet et al., 2011), reducción lineal para eliminar una señal de fase de longitud de onda espacial larga, y también la residual de fase topográfica para compensar el error del DEM. Se enmascararon todos los puntos con coherencia temporal inferior a 0,5.

5. Resultados

5.1. Procesamiento de imágenes de orbitas ascendentes y descendentes

Como resultado del procesamiento InSAR, se generaron 345 interferogramas de órbita ascendente y 495 de órbita descendente. Adicionalmente, se estimaron las tasas de desplazamiento lineal en la línea de vista LOS por sus siglas en inglés (*Line Of Sight*), a partir de desplazamientos de series temporales.

Posteriormente, a partir de cada conjunto de datos tanto ascendente como descendente, se generaron los mapas de velocidades en vista LOS, el cual se presenta en la Figura 4 con el conjunto de datos “Ascendente”, mientras que en la Figura 5, se presenta un énfasis en la zona con mayores valores de subsidencia localizada en el municipio El Rosal, entre la cabecera municipal y el centro poblado “Puente de Piedra”. Adicionalmente, se presentan dos series de tiempo de dos sitios representativos con máximos valores de subsidencia. Debido a que en la zona se visualizan construcciones de invernaderos,

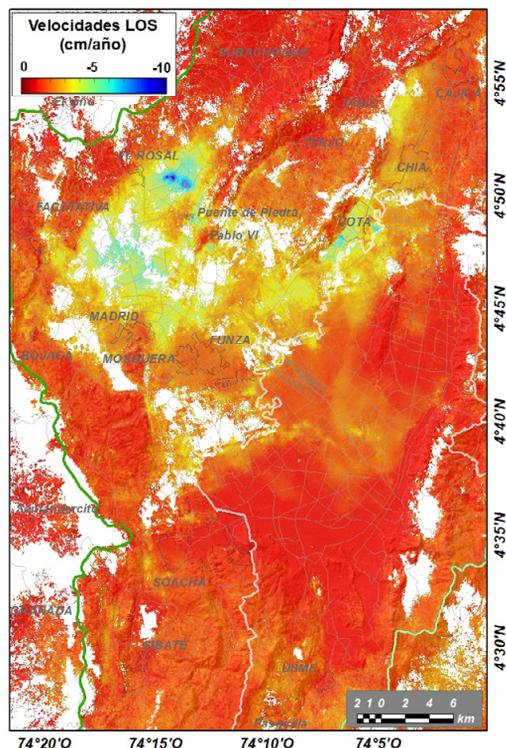


Figura 4. Mapa de velocidades en la línea de vista (LOS), para imágenes de órbita ascendente, en un periodo de tiempo comprendido entre octubre 2014 a diciembre 2021. Este mapa fue obtenido a partir del “Stack” con 345 interferogramas, en el cual se permite observar la subsidencia de forma definida en tonos azules, contrastada con la zona relativamente “estable” en tonos de rojo.

característicos en zonas de cultivo de flores, con el apoyo de herramientas como *Google Earth* y *Basemap* de ArcGIS, se tuvo especial cuidado en que los puntos escogidos fueran medidos directamente sobre la superficie libre de vegetación y no sobre el techo del invernadero, el cual esta generalmente hecho en plástico.

En cuanto al conjunto de interferogramas de órbita descendente, se generó un “Stack” con 495, para el periodo octubre 2014 a diciembre de 2021 como se muestra en la Figura 6, donde se puede observar claramente el mismo patrón de subsidencia presentado con el conjunto ascendente de interferogramas; de manera similar, se generaron las series de tiempo (Figura 7) para los mismos sitios representados en la Figura 5.

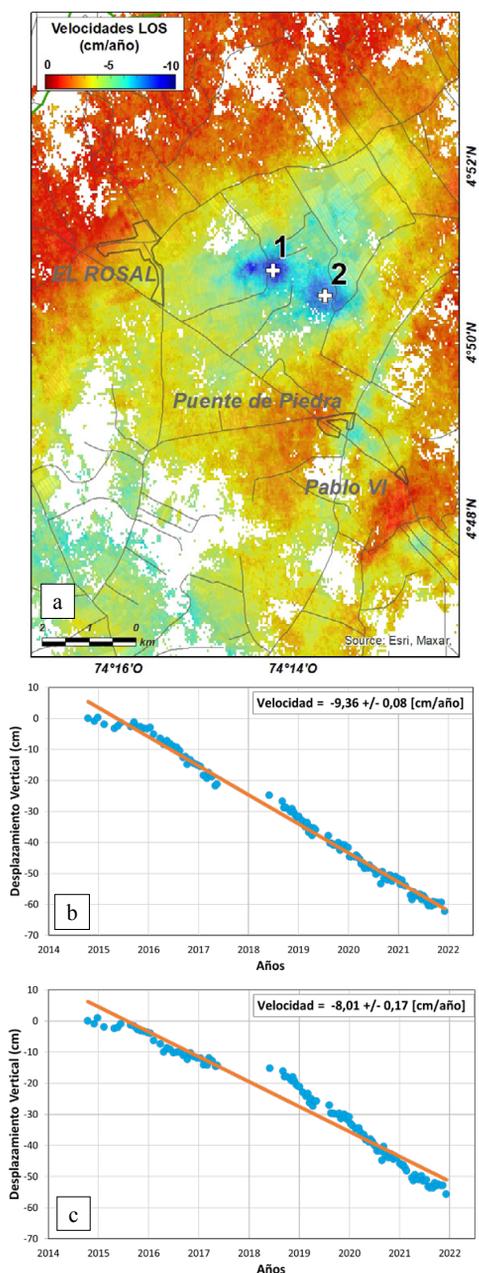


Figura 5. Mapa de velocidades (LOS) órbita ascendente de la zona de máxima subsidencia (2014-2021). (a) representa la zona con mayor subsidencia del estudio, en donde se han seleccionado dos puntos representados por una cruz blanca. (b) muestra la serie de tiempo correspondiente al punto 1. (c). muestra la serie de tiempo del punto 2. Los puntos azules de las series de tiempo corresponden a los valores de desplazamiento acumulado, estimado para cada época de imagen Sentinel-1 adquirida, mientras que la línea naranja corresponde a la línea de tendencia calculada mediante Mintpy (Yunjun *et al.*, 2019). Se muestran también los valores de estimación de la velocidad, así como las incertidumbres.

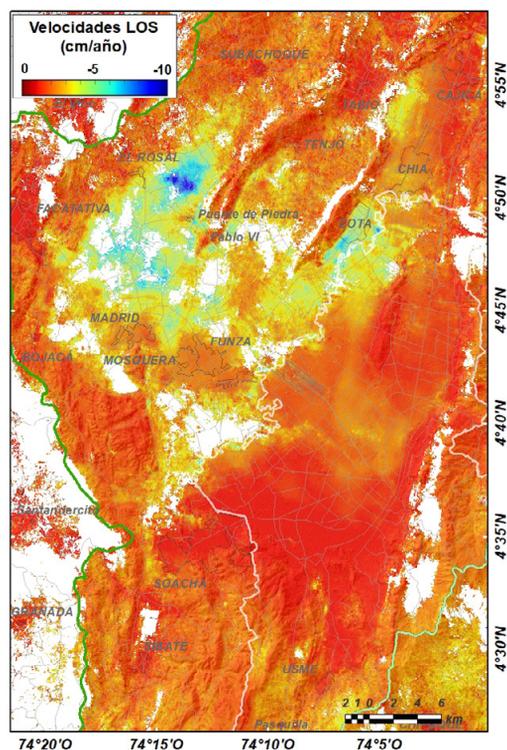


Figura 6. Mapa de velocidades (LOS) órbita descendente, del periodo octubre 2014 a diciembre 2021. Mapa obtenido a partir del “Stack” con 495 interferogramas, que permite corroborar los resultados obtenidos con las imágenes de órbita ascendente.

5.2. Combinación de “stack” ascendente y descendente

Dado que los resultados de ambos “stack” ascendente y descendente, están expresados en la línea de vista (LOS), es posible estimar los valores de velocidad vertical, aplicando técnicas de combinación de estos “Stack”, mediante la descomposición de estos valores en vectores con los componentes Este, Norte y vertical (ENU), para ello se empleó el algoritmo *asc_desc2horz_vert.py* (Yunjun *et al.*, 2019) de Mintpy. Para la aplicación de este algoritmo, es necesario geocodificar ambos “stack” Ascendente y Descendente, seleccionar los píxeles con coherencia superior a 0.5, y emplear los parámetros estimados en la Tabla 1. Como resultado se obtuvieron las tasas de desplazamiento verticales y horizontales de Este a Oeste, con un píxel de salida de 20 metros de resolución espacial,

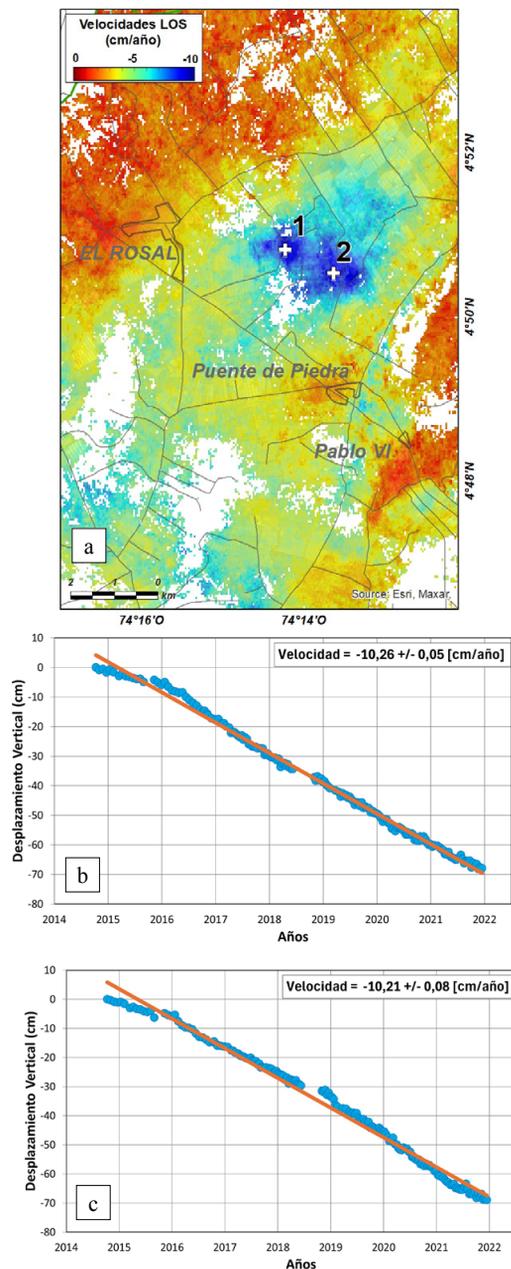


Figura 7. Mapa de velocidades (LOS) órbita Descendente de la zona de máxima subsidencia (2014-2021). (a) Representa la zona con mayor subsidencia del estudio, en donde se han seleccionado dos puntos representados por una cruz blanca. (b). Muestra la serie de tiempo correspondiente al punto 1. (c). Muestra la serie de tiempo del punto 2. Los puntos azules de las series de tiempo corresponden a los valores de desplazamiento acumulado, estimado para cada época de imagen Sentinel-1 adquirida. La línea naranja corresponde a la línea de tendencia calculada mediante Mintpy (Yunjun *et al.*, 2019), y se señalan los valores de estimación de las velocidades e incertidumbres.

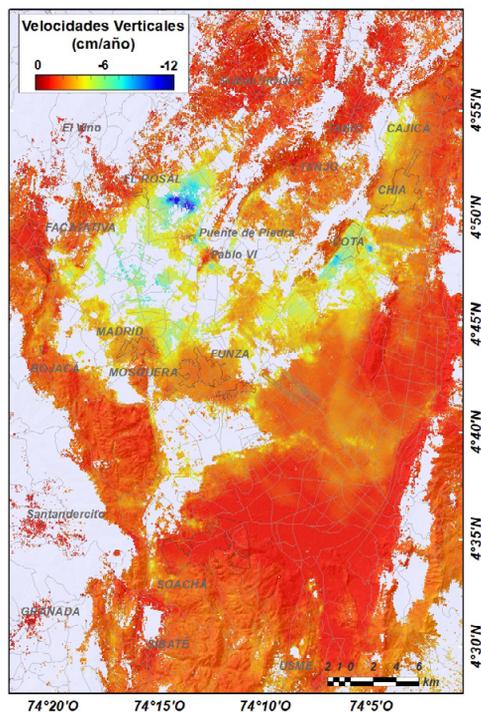


Figura 8. Mapa del campo de velocidades verticales del periodo octubre 2014 a diciembre 2021. Este mapa es producto de la combinación de los conjuntos Ascendente y Descendentes.

para la ventana de observación octubre 2014 a diciembre 2021, como se observa en los mapas de las Figuras 8 y 9 respectivamente.

Los tres componentes del vector del desplazamiento LOS por cada conjunto de datos se muestran en la Ecuación (1):

$$\begin{bmatrix} Sentinel1LOS.asc \\ Sentinel1LOS.desc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,136 & -0,639 & 0,653 \\ 0,129 & 0,603 & 0,787 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} UNS \\ UEW \\ UV \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde [UNS, UEW, UV] representan los desplazamientos en dirección horizontal Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, respectivamente.

Tabla 1. Parámetros estimados para la combinación órbitas ascendente y descendente.

Orbita	Ángulo de incidencia (°)	Azimuth del satélite (°)
Ascendente	40,784	347,962
Descendente	38,085	192,041

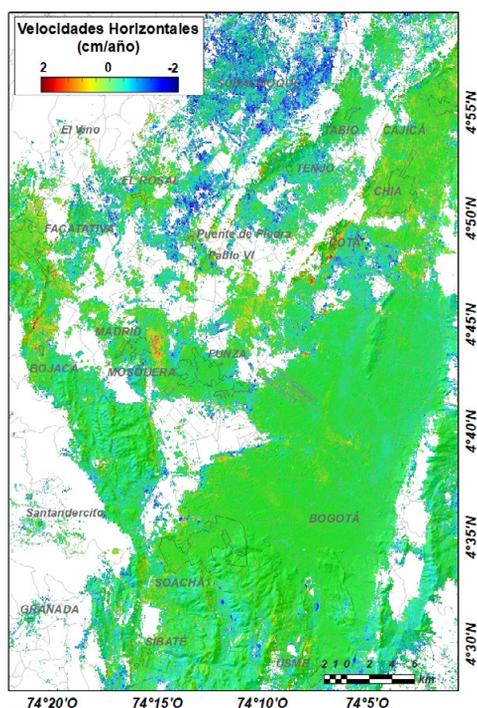


Figura 9. Mapa del campo de velocidades horizontales Este-Oeste para el periodo octubre 2014 a diciembre 2021. Este mapa es producto de la combinación de ambos set Ascendente y Descendente.

6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se logró evidenciar, que el área de estudio se presenta zonas definidas con valores verticales negativos (subsidencia) en forma de “parches” y con diferentes tasas de desplazamiento, específicamente en los municipios de Bojacá, Cajicá, Chía, El Rosal, Facatativá, Funza, Madrid, Mosquera, Soacha, Subachoque, Tabio, Tenjo y la ciudad de Bogotá, encontrando que los mayores valores en el municipio de El Rosal con una tasa estimada de 12 cm/año, seguido por otros sitios localizados en los municipios de Cota, Funza, Tenjo, Chía, Cajicá, Madrid y Facatativá, con valores que oscilan entre 5 y 8 cm/año; estos dos últimos municipios presentan mayores áreas de subsidencia.

Este tipo de análisis constituye un importante insumo para la gestión del riesgo, los planes de ordenamiento territorial y ambiental, planes de manejo ambiental, entre otros, para la adopción de medidas que pudieran reducir el efecto a mediano y largo plazo del fenómeno de subsidencia.

Este tema ha sido subestimado y no se le ha dado la suficiente importancia, a pesar de que en algunos municipios ya es notorio el daño en la infraestructura.

Se logró demostrar además que la técnica de geodesia InSAR es adecuada para medir los desplazamientos verticales, orientado a establecer el comportamiento del fenómeno de subsidencia en un determinado periodo de tiempo, permitiendo además determinar su distribución espacial. Sin embargo y dado que esta técnica es discreta en el tiempo, es recomendable complementar las mediciones mediante estaciones permanentes de operación continua (cGNSS) y episódica (eGNSS), que permitan dar continuidad y precisar aquellas zonas donde la subsidencia se evidencia con mayores magnitudes.

Adicionalmente y considerando la magnitud y el área afectada por la subsidencia a partir de la estimación cuantitativa, se recomienda correlacionar estos resultados con otros estudios de orden hidrogeológico, geotécnico y geofísico entre otros, para la generación de modelos que incluyan un análisis cualitativo y cuantitativo, con el propósito de encontrar las posibles causas de este descenso vertical del terreno.

Referencias

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Chen, C. 2001. *Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry*. PhD Thesis, Stanford University, 159 p.
- Fattahi, H., Agram, P., Simons, M. 2017. A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2), 777–786. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2614925>
- Ferretti, A., Andrea, M.G., Prati, C., Rocca Fabio. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19*, European Space Agency, The Netherlands, 250 p.
- IDECA. 2013. *Datos abiertos Bogotá*. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/>

- Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.P., Peltzer, G. 2011. Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011GL048757>
- Lobo-Guerrero, U.A. 1992. *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana*, VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia, Sociedad Colombiana de Ingenieros-Sociedad Colombiana de Geotécnica, Bogotá, 20 p.
- Lobo-Guerrero, U.A. 2003. Effects of aquifer overexploitation on the surface infrastructure in the Bogotá Sabana (Colombia). *RMZ Materials and Geoenvironment* 50, 193–196.
- Montoya, D.M., Reyes, G.A. 2007. Geología de la sabana de Bogotá, *Publicaciones Especiales de Ingeominas No. 28*, 103 p. [https://www2.sgc.gov.co/biblioteca/Documents/Biblioteca/Geologia de la sabana de bogota.pdf](https://www2.sgc.gov.co/biblioteca/Documents/Biblioteca/Geologia%20de%20la%20sabana%20de%20bogota.pdf)
- Mora-Páez, Héctor, Díaz-Mila, F., Cardona, L. 2020. Mapping land subsidence in Bogotá, Colombia, using the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique with TerraSAR-X images. *Quaternary. Servicio Geológico Colombiano*, 4, 515–548. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.16>
- Mora-Páez, Héctor, Díaz-Mila, F., Sagiya, T., Londoño, L.G., Corchuelo Cuervo, Y. 2021. Contribución de la geodesia espacial en la gestión del riesgo en Colombia. Casos de estudio. En UNGRD (Ed.), *Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia. Avances, perspectivas y casos de estudio. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*. <https://online.pubhtml5.com/pxou/mckv/index.html#p=26>
- Portafolio. 2022. Sector floricultor repuntó, pese a la pandemia. *Finanzas*. portafolio.co/economia/finanzas/sector-floricultor-repunto-pese-a-la-pandemia-564938
- Pritchard, M.E. 2006. InSAR, a tool for measuring Earth's surface deformation. *Physics Today* 59(7), 68-69. <https://doi.org/10.1063/1.2337843>
- Rosen, P.A., Gurrrola, E., Sacco, G.F., y Zebker, H. 2012. The InSAR scientific computing environment. *EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 730–733.
- Rudenko, S., Sch, N. 2013. *Reprocessed height time series for GPS stations. 2008*, 23–41. <https://doi.org/10.5194/se-4-23-2013>
- Van der Hammen, T., Werner, J.H., y van Dommelen, H. 1973. Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: A study of the pliocene and lower quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 16(1–2), 1–42. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(73\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(73)90031-6)
- Wijninga, V.M. 1996. Paleobotany and Palynology of Neogene sediments from the High Plain of Bogota (Colombia). Evolution of the Andean flora from a paleoecological perspective. En *Amsterdam: Elsevier Science Publishers* (p. 370). <https://hdl.handle.net/11245/1.120063>
- Yunjun, Z., Fattahi, H., y Amelung, F. 2019. Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers and Geosciences*, 133. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2019.104331>