

Cálculo y análisis de la subsidencia de la ciudad de Bogotá mediante técnicas de interferometría diferencial DInSAR entre los años 2016 y 2017

Calculation and analysis of the subsidence of the city of Bogotá using DInSAR differential interferometry techniques between 2016 and 2017

Angie Paola Hurtado Acosta¹, & Paola Andrea Suarez Jaimes²

Para citar este artículo: Hurtado, A., Suarez, A. (2020). Cálculo y análisis de la subsidencia de la ciudad de Bogotá mediante técnicas de interferometría diferencial DInSAR entre los años 2016 y 2017. Revista de Topografía Azimut, (11) Pp: 18-25

Fecha de Recepción: 18 de marzo de 2019

Fecha de Aceptación: 4 de diciembre de 2019

Resumen

Bogotá cuenta actualmente con más de 7.500.000 habitantes y es la ciudad más poblada de Colombia, al ser la capital del país alberga el 20 % de toda la población colombiana; esta conglomeración de personas hace que se haga cada día más necesario la búsqueda y expansión de suministro de servicios básicos para la población. Es así como con el pasar del tiempo se han venido generando sobreexplotaciones de los recursos naturales como lo son los acuíferos ubicados en la Sabana de Bogotá, lo cual ha provocado que se presente subsidencia a lo largo de toda su extensión. Dado lo anterior este proyecto pretende apoyar los estudios de subsidencia y obtener resultados a gran escala tanto a nivel espacial como temporal. Para esto, se efectuó un análisis multitemporal con imágenes de radar de apertura sintética (SAR) obtenidas del satélite Sentinel en formato Single Look Complex (SLC) las cuales ofrecen la ventaja de capturar información útil independientemente de las condiciones meteorológicas que presente la zona de estudio; y se aplicaron técnicas de interferometría DInSAR, con el fin de obtener los valores absolutos de los movimientos verticales de la superficie topográfica en unidades métricas. Los resultados obtenidos buscan brindar bases sólidas para que se pueda evaluar el efecto del

fenómeno de la subsidencia en la planificación del territorio.

Palabras clave: DInSAR, multitemporal, planificación del territorio, radar de apertura sintética (SAR), subsidencia.

Abstract

Bogotá currently has more than 7,500,000 people and is the most populated city in Colombia, as the capital of the country has 20% of the entire Colombian population; This conglomeration of people makes the search and expansion of the supply of basic services for the population increasingly necessary. Thus, over time, over-exploitation of natural resources has been generated, such as the aquifers located in the Sabana of Bogotá, which has caused subsidence to occur along its entire length. Given the above, this project aims to support the studies of subsidence and obtain large-scale results both at a spatial and temporal level, for which a multi-temporal analysis was carried out with synthetic aperture radar (SAR) images obtained from the Sentinel satellite in the format Single Look Complex (SLC) which offer the advantage of capturing useful information regardless of the weather conditions present in the study area. Likewise, DInSAR interferometry

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: aphurtadoa@correo.udistrital.edu.co

²Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: pasuarezj@correo.udistrital.edu.co

techniques were applied, in order to obtain the absolute values of the vertical movements of the topographic surface in metric units. The results obtained seek to provide solid foundations so that the effect of the phenomenon of subsidence

in the planning of the territory can be evaluated.

Keywords: DInSAR, multitemporal, territorial planning, synthetic aperture radar (SAR), subsidence.

INTRODUCCIÓN

Una subsidencia es el movimiento lento y progresivo de la superficie topográfica caracterizado por ser de componente vertical, es decir, hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina (Fernández, 2009). La subsidencia terrestre, en la cual se centra el presente trabajo, es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas (Bear and Corapcioglu, 2012).

La subsidencia es un fenómeno geológico que no suele ocasionar víctimas mortales, aunque los daños materiales que causa pueden llegar a ser cuantiosos. Es de gran importancia en zonas urbanas, donde los perjuicios ocasionados pueden llegar a ser ilimitados, suponiendo un riesgo importante para edificaciones, canales, conducciones, vías de comunicación, así como todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma (Tomás, Herrera, Delgado, y Peña, 2009).

Dado lo anterior el fenómeno de subsidencia se convierte en una variable de gran importancia para el desarrollo urbano de Colombia. En los últimos años se han realizado estudios en los cuales se determina que la principal causa de este fenómeno en los polos de desarrollo del país es por acción antrópica debido a la explotación de recursos geológicos tal como es el caso de la minería y extracción de aguas subterráneas (Blanco, Barreto y Ortiz, 2010; Sánchez, Arciniegas

y Abaunza, 2010; Tomás, Herrera, Delgado, Lopez-Sanchez, Mallorquí y Mulas, 2010).

El crecimiento desmesurado que ha llevado la ciudad de Bogotá en los últimos años ha hecho que los municipios aledaños se conviertan en ciudades dormitorio y que la capital día a día congregate más personas provenientes de estos lugares. Para la estimación de la subsidencia en la ciudad de Bogotá se efectuará un análisis multitemporal con imágenes de radar de apertura sintética (SAR) aplicando técnicas de interferometría DInSAR, con las cuales se reducen los efectos atmosféricos y se obtiene un estudio a gran escala tanto espacial como temporal para la obtención de los valores de las velocidades de deformación del terreno (Sillerico, Marchamalo, Rejas y Martínez 2010; Klees and Massonnet, 1998; Susaki, Tsujino and Anahara, 2017; Jiménez, 2013). Los resultados permiten determinar la incidencia de este fenómeno en la ciudad con el objetivo de implementar estrategias en la toma de decisiones que orienten y brinden bases sólidas en el ordenamiento y planeación del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La ciudad de Bogotá se encuentra situada en el centro del país, en la cordillera oriental, cuenta con una extensión aproximada de 33.000 m de sur a norte y 16.000 m de oriente a occidente y se encuentra situada en latitud norte 4°35'56" y longitud oeste 74°04'51". Está dentro de la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y en la

segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015). El área de estudio seleccionada para la aplicación de la técnica DinSAR, corresponde al área total de Bogotá. No obstante, con el fin de conocer los valores métricos de subsidencia el proyecto se centró en el área urbana de la ciudad. La metodología y el proceso será la descrito a continuación y resumido (figura 1).

Adquisición de imágenes de radar

Se realiza la adquisición de imágenes de radar Sentinel en formato Single Look Complex (SLC), el cual consta de datos

SAR que se encuentran georreferenciados de acuerdo con la información obtenida de la órbita y altitud del satélite. Los datos son proporcionados en geometría slant – range la cual es la coordenada de observación del rango natural del radar, definida como la línea de vista desde el radar hasta cada objeto reflector (ESA, 2018). Para el presente proyecto se utilizaron imágenes del Radar Sentinel-1 de la ciudad de Bogotá-Colombia, las cuales fueron seleccionadas para mostrar los mejores resultados en términos de coherencia y fase interferométrica; además se contó con imágenes con resolución temporal entre los 12 y 36 días.



Figura 1: Metodología.

Corregistro de imágenes

Para el procesamiento interferométrico, dos o más imágenes deben ser corregistradas, para lo cual una imagen se selecciona como la maestra y las otras imágenes son las esclavas. Los píxeles en las imágenes esclavas se moverán para alinearse con la imagen maestra a una precisión del subpíxel. El corregistro

asegura que cada objetivo contribuya al mismo píxel (rango, azimut) tanto en la imagen maestra como en la esclava (Veci, 2016).

Generación del interferograma

El interferograma se forma mediante la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la imagen esclava.

Tabla 1: Fecha de las imágenes empleadas en el presente proyecto.

Fecha			
23/12/2017	1/08/2017	26/02/2017	7/07/2016
11/12/2017	20/07/2017	14/02/2017	13/06/2016
29/11/2017	8/07/2017	21/01/2017	20/05/2016
17/11/2017	26/06/2017	28/12/2016	26/04/2016
5/11/2017	14/06/2017	4/12/2016	2/04/2016
24/10/2017	2/06/2017	10/11/2016	9/03/2016
12/10/2017	21/05/2017	17/10/2016	14/02/2016
30/09/2017	9/05/2017	11/10/2016	21/01/2016
18/09/2017	27/04/2017	4/11/2016	28/12/2015
6/09/2017	15/04/2017	17/09/2016	4/12/2015
25/08/2017	3/04/2017	24/08/2016	10/11/2015
13/08/2017	10/03/2017	31/07/2016	

va. La amplitud de ambas imágenes se multiplica mientras que la fase representa la diferencia de fase entre las dos imágenes. La fase interferométrica de cada píxel de las imágenes SAR dependerá únicamente de la diferencia en las rutas de viaje de cada uno a la celda de resolución considerada (Veci, 2016). En este paso también se genera la estimación de coherencia la cual muestra cuán similar es cada píxel entre las imágenes esclava y maestra en una escala de 0 a 1. Las áreas de alta coherencia aparecerán brillantes mientras que las áreas con poca coherencia serán oscuras.

Deburst

Cada imagen de submatriz consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se procesó como una imagen SLC separada, por lo cual las imágenes complejas de ráfaga enfocadas individualmente se incluyen en orden de azimut en una sola imagen de subsuperficie, con demarcación de relleno negro en el medio (European Space Agency, 2018). Dado lo anterior es necesario realizar un deburst en

el cual las imágenes para todas las ráfagas en todas las franjas secundarias de un producto Interferometric Wide Single Look Complex (IW SLC) se reexaminan en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en el rango y azimut.

Remoción de la topografía

En esta etapa se remueven los cambios de fase dados por la topografía del terreno, ya que se presentan valores de fase debido a la curvatura de la superficie de la tierra, los cuales pueden ser confundidos con los valores de diferencia de fase obtenidos al final del proceso. En la remoción se estima y resta la fase topográfica del interferograma, por lo cual primero se codifica el Modelo de Digital Elevacion (MDE) en este caso se empleó el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el cual se codifica por radar a los sistemas de coordenadas de la imagen maestra (valor real) y junto con la fase de referencia calculada se guardan en un archivo. Al final la fase de referencia se interpola a la grilla entera de las coordenadas maestras y esto se resta

del interferograma complejo (European Space Agency, 2018).

Filtro Goldstein

Se agrega un filtro con el fin de homogeneizar los datos de fase. En este paso se emplea un algoritmo adaptativo no lineal propuesto por Goldstein y Werner en 1998 en el cual se reduce el ruido de la fase interferométrica y de esta forma se mejora la precisión en el desenvolvimiento de fase (Goldstein and Werner, 1998). El filtro mejora significativamente la visibilidad de las franjas en el interferograma y reduce el ruido de fase.

Desenvolvimiento de la fase

En este paso la fase pasa de ser relativa a ser absoluta (Unwrapping). Este proceso se realiza mediante el algoritmo SNAPHU, donde el enfoque de la interferometría de radar es trabajar con la señal de fase relativa bidimensional, que es el módulo 2 de la señal de fase absoluta (Chen and Zebker, 2002).

Cálculo de deformaciones

Con los valores de fase absolutos se calculan los movimientos de la superficie en unidades métricas, teniendo en cuenta los puntos de vista de la antena. En caso de que algunos de los dispersores de puntos en el suelo cambien ligeramente su posición relativa en el intervalo de tiempo entre dos observaciones SAR (como por ejemplo, en caso de hundimiento, deslizamiento de tierra, terremoto, etc.), entonces el siguiente término de fase aditiva, independiente de la línea base, aparece en la fase interferométrica (Fletcher *et al.*, 2007).

RESULTADOS

Con las imágenes disponibles desde el 10 de noviembre de 2015 hasta el 23 de diciembre de 2017 se formaron 50

pares interferométricos de los cuales se seleccionaron 27 con el fin de minimizar el ruido en la fase interferométrica y garantizar mejores resultados, por lo cual se obtuvieron 7 pares de imágenes con una resolución temporal de 12 días, 17 pares de imágenes con una resolución temporal de 24 días, y 3 pares con una resolución temporal de 36 días. De acuerdo con la depuración anterior se seleccionaron dos temporalidades 2016 y 2017.

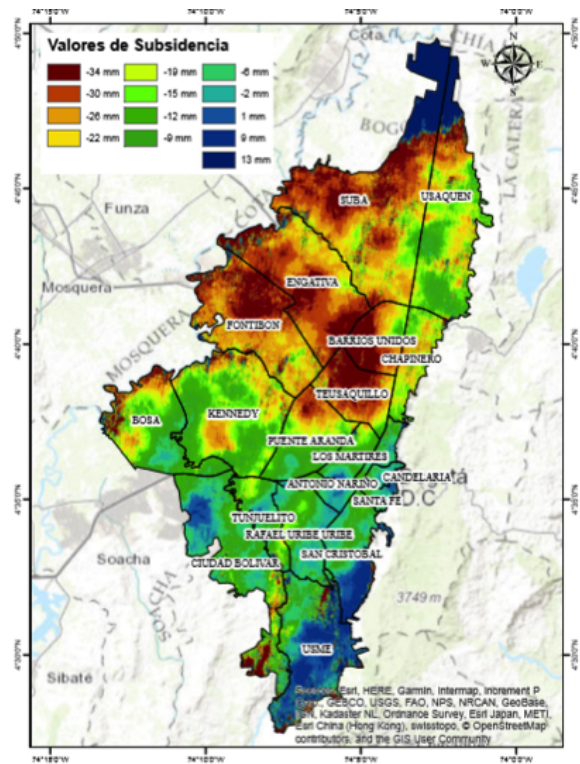


Figura 2: Subsidencia presentada en el año 2016.

Se representa una rampa cromática de colores (figura 2 y 3), en donde a simple vista se pueden evidenciar variaciones en el nivel de subsidencia de la ciudad de Bogotá, presentando mayor oscilación en la parte noroccidental y central de la ciudad. Cabe resaltar que en los pares interferométricos escogidos para el presente trabajo, se pueden presentar cambios en las condiciones del terreno, tales como la humedad debido a las

variaciones en las condiciones climáticas o las variaciones presentadas en los acuíferos puesto que existen distintas técnicas de recuperación de estos. Dado lo anterior, los resultados finales están afectados por estas variables lo que genera algunos valores atípicos y ruido en las imágenes.

En esta figura se evidencian las localidades de la ciudad de Bogotá que más subsidencia presentan en el periodo de tiempo 10 de noviembre de 2015 a 10 de noviembre de 2016, estas son:

- Teusaquillo: Presenta una subsidencia que oscila entre los 15 mm y 30 mm.
- Barrios Unidos: Presenta una subsidencia que oscila entre los 11 mm y 30 mm.
- Engativá: Presenta una subsidencia que oscila entre los 15 mm y 28 mm.
- Fontibón: Presenta una subsidencia que oscila entre los 11 mm y 30 mm.
- Puente Aranda: Presenta una de las mayores oscilaciones en su subsidencia la cual va desde 2 mm hasta 28 mm en su costado norte.
- Suba: Presenta una subsidencia con valores que oscilan entre 15 mm y 28 mm.

- Barrios Unidos: Presenta una subsidencia que oscila entre los 11 mm y 32 mm.
- Engativá: Presenta una subsidencia que oscila entre los 15 mm y 28 mm.
- Fontibón: Presenta una subsidencia que oscila entre los 11 mm y 30 mm.
- Puente Aranda: Presenta una de las mayores oscilaciones en su subsidencia la cual va desde 2 mm hasta 28 mm en su costado norte.
- Suba: Presenta una subsidencia con valores que oscilan entre 15 mm y 29 mm.

Las localidades de Kennedy y Bosa presentan un foco de subsidencia de 20 mm. Las demás localidades no presentan subsidencia fuerte y hay zonas que se mantienen muy estables.

Como se evidencia en la figura expuesta, las localidades de la ciudad de Bogotá que más subsidencia presentan en el periodo de tiempo 10 de noviembre 2016 a 11 de diciembre de 2017, estas son:

- Teusaquillo: Presenta una subsidencia que oscila entre los 15 mm y 32 mm.

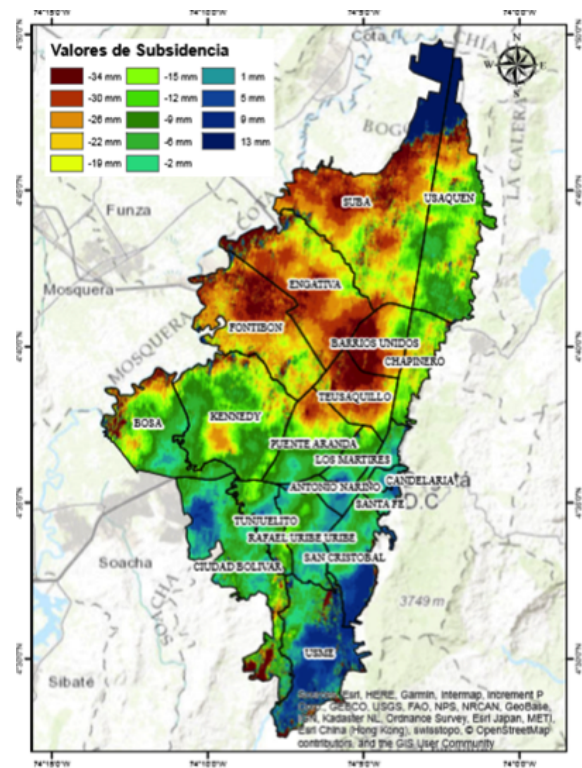


Figura 3: Subsidencia presentada en el año 2017.

Las localidades de Kennedy y Bosa presentan un foco de subsidencia de 20 mm. Las demás localidades no presentan subsidencia fuerte y hay zonas que se

mantienen muy estables.

En este sentido, se puede apreciar que los valores de subsidencia tanto para el año 2016 como para el 2017 son muy similares por lo cual presentan una variación mínima entre cada periodo de tiempo. Por tanto, se determinó que en ambos periodos de tiempo se puede apreciar que tanto en la localidad de Suba como en la de Usaquén hacia el norte no fue posible obtener los valores de subsidencia debido a que los datos fueron afectados por la baja coherencia causada por la vegetación existente.

CONCLUSIONES

Se analizaron y procesaron pares interferométricos con imágenes de Sentinel obtenidas desde el año 2015 hasta el año 2017 y se generó cartografía que permite visualizar y obtener variaciones que oscilan entre 15 mm y 32 mm en algunos sectores de la ciudad. Las imágenes de Radar de Sentinel permitieron obtener resultados óptimos para el análisis de subsidencia del área urbana de una región, sin embargo como se comprobó en los resultados obtenidos, las zonas donde se presenta una mayor cobertura vegetal generan una coherencia baja por lo cual no se pueden conseguir valores fiables.

Se debe tener en cuenta que variables como la atmosfera y la ionosfera afectan los datos en el momento de la adquisición de las imágenes por lo cual el proceso interferómetro se ve afectado y es necesario contar con varios pares de imágenes con diferentes temporalidades con el fin de seleccionar las más adecuadas y depurar las que contienen mayor ruido o las que presentan un interferograma incoherente. Así, las condiciones en el momento de la toma de datos, la variedad de imágenes y constelaciones, la inclusión de factores tales como puntos de control, la presencia de distorsiones geométricas tales como sombras,

inversión por relieve *overlay*, escorzo o *foreshortening*, entre otros, pueden influir en la variación de los resultados obtenidos en el presente trabajo. Finalmente, los datos obtenidos en los dos años presentan una diferencia mínima en los valores de deformación del terreno, por lo cual se logró detectar que las localidades de Engativa, Fontibon, Barrios Unidos, Teusaqueillo y Suba cuentan con una tendencia a presentar mayores niveles de subsidencia.

REFERENCIAS

- Alcaldía mayor de Bogotá. (2015). Ubicación de la Ciudad. Obtenido de: <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>.
- Bear, J., and Corapcioglu, M. Y. (2012). *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. EE.UU: Springer Science & Business Media.
- Blanco, P., Barreto, G., y Ortiz, D. (2010). *La Interferometria diferencial DInSAR- Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. (Conocimiento y reflexión)*.
- Bogotá: Institut Cartografic de Catalunya. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá. Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias.
- Chen, C., and Zebker, H. (2002). Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms "Statistical Segmentation and Generalized Network Models". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709-1719.
- ESA. (2018). Sentinel-1 - Data Distribution Schedule - Missions. Obtenido de: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-distribution-schedule>.

- European Space Agency. (2018). The Sentinel Application Platform (SNAP) (Versión 6.0.0). Obtenido de <http://step.esa.int/main/download/> 47-53. <https://doi.org/10.3989/ic.09.063>
- Fernández, P. (2009). “Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR”. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. p. 212. ISBN: 978- 84- 692- 5962- 0.
- Fletcher, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., and Rocca, F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA.
- Golstein, R., and C.L.Warner. (1998). Filtrado de fase de interferograma radar para aplicaciones geofísicas. *Geophysical Research Letters*, 25(1), 4035-4038.
- Klees, R., and Massonnet, D. (1998). Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. *Geologie en Mijnbouw*, 77(2), 161–176.
- Sánchez, P. B., Arciniegas, G. B., y Abaunza, D. O. (2010). La interferometría diferencial dinsar—una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá de (conocimiento y reflexión). Obtenido de http://www.icc.es/index.php/cat/content/download/20083/64365/file/12_ARTICULO%20Boletin%20Colombiano%20de%20Geotecnia%20GBA.pdf
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rejas, J. G., y Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, 62(519), 47-53. <https://doi.org/10.3989/ic.09.063>
- Susaki, J., Tsujino, M., and Anahara, T. (2017). Fusion of different frequency SAR images for DInSAR-based land subsidence monitoring. En 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 945-948. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127109>
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., y Peña, F. (2009). Subsidencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 295-302.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., Lopez-Sanchez, J. M., Mallorquí, J. J., and Mulas, J. (2010). A Ground Subsidence Study Based on Dinsar Data: Calibration of Soil Parameters and Subsidence Prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology*, 111(1-4), 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.1.004>
- Veci, L. (2016). Sentinel-1 Toolbox Interferometry Tutorial, 41.