

Evaluación de Modelos Digitales de Elevación (MDEs) obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 en la Región Metropolitana de Chile

Vidal, P.^(1,2), Pérez, W.^(1,2), Fernández-Sarría, A.⁽²⁾

⁽¹⁾ Hémera Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, José Toribio Medina 29, Santiago, Chile. paulina.vidal@umayor.cl

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, España,

Resumen: En este trabajo, se generaron cuatro MDEs (dos a partir de un par interferométrico ascendente y otro descendente con polarización VH y VV) a partir de imágenes Sentinel-1 en un sector de la región Metropolitana de Chile y se evaluaron en relación a un MDE de referencia. Los MDEs se generaron en el software SNAP y se evaluaron en relación a un DEM óptico elaborado a partir de fotografías aéreas de la cámara DMC (*Digital Mapping Camera*) en 34 puntos de control distribuidos en un sector urbano y un sector montañoso de la Región Metropolitana. Se obtuvo un valor de RMS de 49 m en el MDE generado a partir del par interferométrico descendente con polarización VV (menor valor de RMS) en el área urbana y un RMS de 321 m en el sector montañoso en el mismo MDE (mayor valor de RMS).

Palabras clave: Modelos Digitales de Elevación (MDEs), SAR, InSAR, Sentinel-1, Región Metropolitana de Chile.

Evaluation Digital Elevation Models (DEMs) from Sentinel-1 images in the Metropolitan Region of Chile

Abstract: In this work, four DEMs were generated (two from an ascending interferometric pair and another descending pair with VH and VV polarization) from Sentinel-1 images in a sector of the Metropolitan Region of Chile and evaluated in relation to a reference DEM. The DEMs were generated in the software SNAP and were evaluated in relation to an optical DEM elaborated from aerial photographs of the DMC camera (*Digital Mapping Camera*) in 34 control points distributed in an urban area and mountainous area of the Metropolitan Region. An RMS value of 49 m was obtained in the DEM generated from the Descending interferometric pair with VV polarization (lower RMS value) and an RMS of 321 m in the mountain area in the same DEM (higher RMS value).

Keywords: Digital elevation model (DEMs), SAR, InSAR, Sentinel-1, Metropolitan Region of Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación estadística de una superficie continua del terreno, mediante un conjunto de puntos tridimensionales (X,Y,Z) en un sistema de coordenadas arbitrarias (Miller y LaFlamme, 1958). Los MDEs son utilizados en diferentes áreas; manejo de recursos naturales, desastres naturales, ciencias forestales, mapeo topográfico, sistemas de información geográfica (SIG), entre otras aplicaciones (Makineci y Karabörk, 2016). Se pueden generar a partir de múltiples técnicas como la fotogrametría, sistemas de posicionamiento global, altimetría laser y técnicas de interferometría de radar (InSAR) (Wang et al., 2018).

Sin embargo, durante las últimas décadas, diversos autores están trabajando en la generación de MDEs con la técnica InSAR a partir de imágenes de radar provenientes de sistemas aerotransportados y satelitales debido a que esta técnica es una de las más eficientes en la construcción de MDEs a diferentes resoluciones (Gao et al., 2017; Wegmüller et al., 2009; Crossetto, 2002).

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica de teledetección basada en el proceso y análisis de imágenes SAR, que consiste en medir las diferencias de camino óptico entre el satélite y la tierra, en dos visitas del satélite por la misma área

de estudio (Ferretti et al., 2007; Geymen, 2012; Lazecky et al., 2018). La importancia de este método está relacionada con la alta resolución espacial, la precisión y la capacidad de generar MDEs de manera automatizada (Crossetto y Crippa, 2000).

Las imágenes SAR del Satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA), de libre acceso y disponibles desde el año 2014, proporcionan una resolución espacial satisfactoria, bases temporales (B_t) y perpendiculares (B_p) adecuadas para el estudio de la superficie terrestre y generación de modelos digitales de elevación.

El presente trabajo, tiene por objetivo evaluar MDEs obtenidos a partir de imágenes SAR del satélite Sentinel-1 (S1), de la Agencia Espacial Europea (ESA) mediante la técnica InSAR, en relación a un MDE de referencia de la cámara DMC (SAF, 2019), en un sector urbano y otro montañoso de la región Metropolitana de Chile.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a un sector de la región Metropolitana de Chile, localizado entre los 32°56' y 34°18' de latitud sur y los 69°47' y 71°42' de longitud oeste y tiene una superficie de 15403 km² (Figura 1). Presenta un clima mediterráneo, con precipitaciones

promedio de 341 mm que se concentran en invierno y con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses (DGA, 2019). El relieve de la región Metropolitana presenta tres unidades topográficas; la Cordillera de los Andes, la depresión Intermedia y la Cordillera de la Costa.

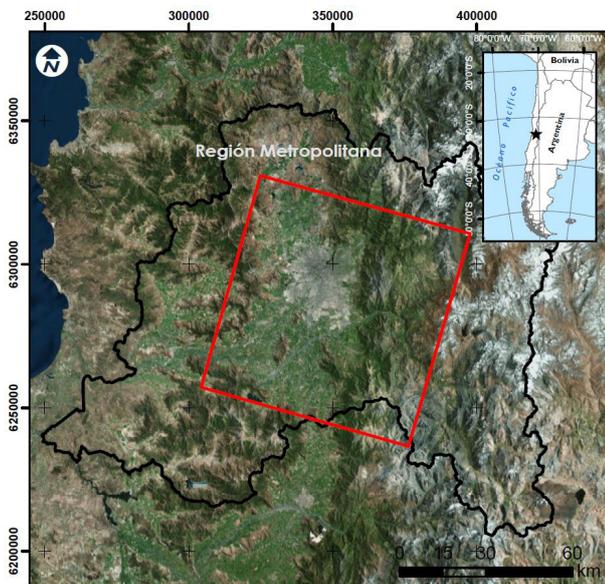


Figura 1. Área de estudio. El recuadro rojo muestra el área donde se generaron los MDEs.

2.2. Adquisición de imágenes

Las imágenes fueron descargadas del servidor gratuito del *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2019). Se utilizaron dos pares interferométricos generados a partir de las imágenes SAR del satélite Sentinel-1 (Tabla 1), de banda C (5,405 GHz) en el modo de adquisición *Interferometric Wide Swath* (IW) con un nivel de procesamiento *Single Look Complex* (SLC) de 250 km de cobertura y con una resolución espacial de 5×20 m.

Tabla 1. Pares interferométricos para la generación de MDEs.

Fecha	Polarización	Dirección	B _p (metros)	B _T (días)
19-03-2019	WVH	Descendente	83	12
31-03-2019	WVH	Ascendente	76	48
20-03-2019	WVH	Ascendente	76	48

Según datos de precipitación de las estaciones meteorológicas localizadas en el área de estudio, no se registraron lluvias en el periodo de adquisición de imágenes (CR2, 2019).

2.3. MDEs de referencia

Se utilizaron MDEs de referencia entregados por el Servicio Aerofotogramétrico de Chile (SAF) del sector urbano de las comunas de Renca y Quilicura y otro de un sector montañoso de la comuna del Cajón del Maipo para evaluar los MDEs obtenidos de imágenes S1. Estos MDEs fueron elaborados a partir de fotografías aéreas de la cámara DMC (*Digital Mapping Camera*) y sus características se muestran en la tabla 2. Los MDEs fueron remuestreados a una resolución de 13 m (al igual que la resolución espacial obtenida de los MDEs provenientes de las imágenes S1).

Tabla 2. Características de los MDEs de referencia.

MDEs de referencia	Año de adquisición	Resolución espacial original (m)	Precisión (cm)
Renca	2018	0,7 m	41,95
Quilicura	2017	1 m	35,5
Cajon del Maipo	2017	0,36 m	*

* No se cuenta con esta información.

2.4. Generación de MDEs

Se generaron cuatro MDEs mediante la técnica InSAR; dos obtenidos a partir de la imagen con dirección de pasada del satélite ascendente (polarización VV y VH) y dos descendente (polarización VV y VH) (Tabla 1).

La generación de MDEs se realizó en el software SNAP (*Sentinel Application Platform*) desarrollado por la ESA y se utilizó el software SNAPHU (Chen y Zebker, 2000) para desarrollar la fase (*phase unwrapping*). Se utilizó el tamaño de píxel que entrega SNAP de 13 m para los MDEs generados.

En la Figura 2, se muestran los pasos aplicados en la generación de los MDEs usando la técnica InSAR.

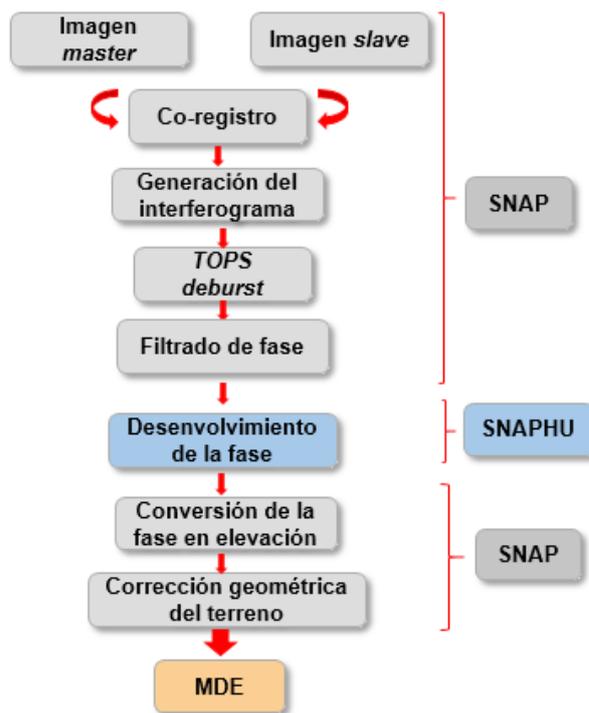


Figura 2. Metodología para la generación de MDE en SNAP.

2.5. Evaluación de los MDEs

La evaluación de los modelos digitales de elevación generados, se realizó en base a un MDE de referencia (SAF, 2019), mediante 34 puntos de control localizados tanto en sectores urbanos (comuna de Renca y Quilicura; 21 puntos), como en sectores montañosos (Cajón del Maipo, 13 puntos), los cuales fueron distribuidos aleatoriamente en los sectores con coherencia > 0,5. Los valores de elevación de los 34 puntos de control de los MDEs generados,

se evaluaron en base al MDE de referencia mediante el método *Root Mean Square* (RMS) como se muestra en la Ecuación 1 (Makineci y Karabörk, 2016):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_{Ri} - Z_{Ni})^2}{N - 1}} \quad (1)$$

Donde Z_{Ri} es el valor de la elevación del punto i en el MDE de referencia; Z_{Ni} es el valor de la elevación del punto i en el MDE creado y N es el número de puntos evaluados.

3. RESULTADOS

Se obtuvieron cuatro MDEs; dos generados a partir del par interferométrico ascendente con polarización VV y VH, y dos a partir del par interferométrico descendente con polarización VV y VH de 13 m de resolución espacial. En la figura 3 se observan los MDEs obtenidos con polarización VV del par ascendente y descendente respectivamente. En rojo de muestra el área que cubre el MDE de referencia del sector urbano y en negro el MDE de referencia que cubre el sector montañoso.

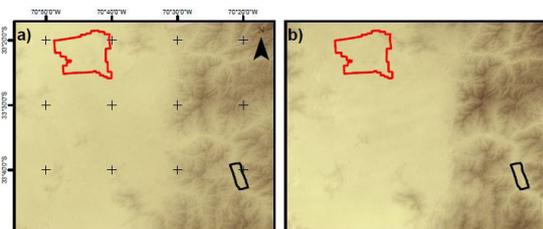


Figura 3. MDE a partir de imágenes Sentinel-1: a) par ascendente VV b) par descendente VV.

Para la evaluación de los MDEs a partir de imágenes Sentinel 1, se consideraron valores de coherencia mayores a 0,5, debido a que Crosseto y Crippa (2000) señalan que valores superiores a 0,5 son considerados como un buen indicador de la calidad de la fase interferométrica para la generación de un MDE.

En la figura 4 se pueden observar los sectores en blanco con valores de coherencia mayores a 0,5 y en negro los sectores con baja coherencia (<0,5) para los pares con polarización VV.

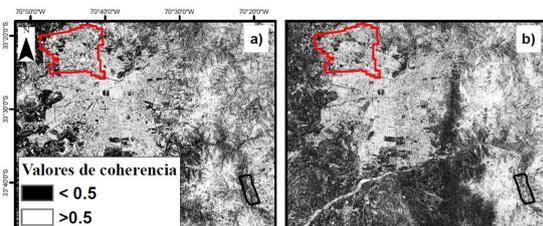


Figura 4. Imágenes de coherencia: a) par ascendente b) par descendente. En rojo de muestra el área que cubre el MDE de referencia del sector urbano y en negro el MDE de referencia que cubre el sector montañoso.

Los valores de RMS se muestran en la tabla 3, en donde se obtuvo un valor de 49 m en el sector urbano a partir del par interferométrico descendente con polarización VV y un RMS de 321 m en el MDE obtenido del par interferométrico descendente con polarización VH en el

sector montañoso (mayor valor de RMS). Los valores de RMS menores se obtienen en el sector urbano tanto en el par descendente como ascendente para las polarizaciones VH y VV. Los valores mayores de RMS corresponden a los MDEs con topografía montañosa.

Tabla 3. RMS obtenidos en sectores urbanos y montañosos en el par ascendente y descendente para las polarizaciones VH y VV.

		RMS (m)			
		Par ascendente		Par descendente	
Topografía		VH	VV	VH	VV
	Montañosa		210	297	321
Urbana		156	104	85	49

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los MDEs son utilizados en numerosas áreas y son uno de los insumos fundamentales de los sistemas de información geográfica (SIG) y la cartografía, por lo que la utilización de datos gratuitos como lo son las imágenes SAR del satélite Sentinel-1 permite la generación de MDEs de manera sencilla y de una amplia superficie (250 km²).

Sin embargo, son varios los factores a considerar en la generación de un MDE, como la base temporal, la base perpendicular, las condiciones climáticas al momento de la adquisición de las imágenes, la vista del satélite, entre otros. Los RMS mayores se obtuvieron en el sector montañoso del Cajón del Maipo con un valor de 321 m en el MDE generado a partir del par interferométrico descendente con polarización VH y el menor valor lo obtuvo el DEM generado a partir del par descendente con polarización VV en el área urbana. Un estudio en la región de Konya en Turquía (Makineci y Karabörk, 2016) estimó RMS de 8,7 m en sectores montañosos y 2,9 m en sectores planos en donde muestran una importante variación de RMS entre las áreas montañosas y áreas urbanas. Por otro lado, Crosseto y Crippa (2000), señalan que existe una importante disminución de la precisión de los MDEs en las áreas montañosas con respecto a las áreas urbanas, como es el caso de este trabajo. La baja precisión de los MDEs en áreas montañosas se debe entre otros factores, a la baja coherencia entre las parejas interferométricas (artefactos atmosféricos correlacionados con la topografía) y la baja periodicidad de la adquisición de los datos). Además, en relación los resultados, se recomienda la utilización de MDEs generados a partir de imágenes Sentinel 1 solo para áreas urbanas, debido a que la penetración de la banda C es limitada. Por otro lado, se recomienda la utilización de pares interferométricos descendentes con polarización VV para la generación de MDEs en sectores urbanos. No obstante, los valores de RMS obtenidos a partir de este estudio, siguen siendo altos.

Para el caso de este estudio, no se encontraron pares con la base perpendicular óptima (entre 150 y 300 m) según lo señalado por Ferreti et al. (2007). Además, la base temporal del par ascendente es de 48 días y la del par descendente de 12, por lo que este parámetro puede ser un

factor influyente en los valores altos de RMS obtenidos en los puntos evaluados del área urbana y montañosa.

Para un futuro trabajo, se propone disminuir la resolución espacial de los MDEs generados, para así disminuir el ruido de fase y generar un modelo digital de elevación a partir de una fusión de datos proveniente de pares ascendentes y descendentes y compararlo a su vez con el MDE SRTM, que tiene una precisión aceptable y es uno de los más utilizados a nivel global.

Disponer de modelos digitales de elevación de alta resolución para considerables extensiones de terreno, sigue siendo en la actualidad limitado y costoso. Sin embargo, las imágenes Sentinel-1 proveen la posibilidad de obtener MDEs de resoluciones medias a través del acceso a datos gratuitos, con mayor resolución y frecuencia en el tiempo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ASF. 2019. Alaska Satellite Facility. Último acceso: 7 febrero de 2019, de <https://www.asf.alaska.edu/>
- Chen, C.W., Zebker, H. A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(3), 401-414. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.000401>
- Crosetto, M., Crippa, B. 2000. Quality Assessment of Interferometric SAR DEMs. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII (part B1), 46–53.
- Crosetto, M. 2002. Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(3), 213–227. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00107-7)
- CR2. 2019. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Explorador climático CR2. Último acceso: 4 de marzo de 2019, de <http://explorador.cr2.cl/>
- DGA. 2019. Boletines hidrológicos y pronóstico anuales, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas de Chile. Retrieved March 11, 2019, from <http://www.dga.cl/Paginas/default.aspx>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8
- Gao, X., Liu, Y., Li, T., Wu, D. 2017. High Precision DEM Generation Algorithm Based on InSAR Multi-Look Iteration. *Remote Sensing*, 9(7), 741. <https://doi.org/10.3390/rs9070741>
- Geymen, A. 2012. Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 827-837. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0811-3>
- Lazecký, M., Hlaváčová, I., Martinovic, J., Ruíz-Armenteros, A.M. 2018. Accuracy of Sentinel-1 Interferometry Monitoring System based on Topography-free Phase Images. *Procedia Computer Science*, 138, 310-317. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.044>
- Makineci, H.B., Karabörk, H. 2016. Evaluation Digital Elevation Model Generated by Synthetic Aperture Radar Data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B1, 57-62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-2016>
- Miller, C.L., LaFlamme, R.A. 1958. The Digital Terrain Model - Theory & Application. *The American Society of Photogrammetric*, XXIV(3), 11.
- Mohammadi, A., Bin Ahmad, B., Shahabi, H. 2018. Extracting digital elevation model (dem) from Sentinel-1 satellite imagery: Case study a part of Cameron highlands, Pahang, Malaysia. *Proceedings of 176th The IIER International Conference, Kuala Lumpur, Malaysia*, 18th-19th July 2018.
- SAF. 2019. Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile. Modelo digital de elevación elaborado a partir de fotografías aéreas de la cámara DMC, 2017-2018 From <https://www.saf.cl>
- Wang, X., Holland, D., Gudmundsson, H. 2018. Accurate coastal DEM generation by merging ASTER GDEM and ICESat/GLAS data over Mertz Glacier, Antarctica. *Remote Sensing of Environment*, 206, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.041>
- Wegmüller, U., Santoro, M., Werner, C., Strozzi, T., Wiesmann, A., Lengert, W. 2009. DEM generation using ERS-ENVISAT interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.04>