

Interferometría SAR: una herramienta de la teledetección para nuevos desafíos en geodesia y geofísica

Sebastián Balbarani^{1,2,3}

Resumen Interferometría de radar de apertura sintética es una técnica ya conocida de la teledetección que explota la información de la fase de las imágenes para estimar modelos digitales de superficie y modelos de deformación del terreno. En este contexto, se presenta la técnica como una herramienta de gran utilidad en geodesia y geofísica para medir y modelar una porción de la superficie terrestre, y su dinámica. Se muestran las aplicaciones más importantes en el contexto de ciencias de la Tierra, y se presentan ejemplos de aplicación. Finalmente, se discute sobre nuevos paradigmas en observación de la Tierra con radares de apertura sintética y las tendencias en materia de esta tecnología.

Palabras clave Interferometría SAR, geodesia, geofísica, Sentinel-1, SAOCOM-1.

INTRODUCCIÓN

Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas) es una técnica avanzada de la teledetección en el rango de las microondas, con sensores activos, que utiliza la información de la fase de las imágenes SAR para obtener modelos digitales de elevaciones, mapas de deformación de la superficie terrestre, series temporales de desplazamiento, y más.

InSAR explota la diferencia de fase entre dos imágenes SAR complejas, corregistradas a nivel subpixel, y que fueron capturadas con una geometría de posicionamiento y observación del sensor ligeramente distintas. La señal del radar posee información coherente de fase y amplitud, que surge de las múltiples respuestas de los dispersores dentro de cada celda de resolución SAR.

El producto hermitiano complejo pixel a pixel de dos escenas corregistradas genera lo que se denomina en Interferometría SAR, un “interferograma”, cuya información correlaciona con la topografía de la cobertura común. Sin embargo, existen muchas otras contribuciones a un interferograma que potencialmente reducen la calidad del producto de elevaciones, como las perturbaciones atmosféricas, los errores de desenrollado y la falta de correlación entre las imágenes (decorrelación por línea base espacial y línea base temporal, principalmente)

La configuración interferométrica de “pasadas repetidas” permite una aplicación aún más interesante. Cuando entre la primera y la segunda adquisición ocurrió un evento de deformación cortical, la técnica detecta una contribución de fase que corresponde al desplazamiento del terreno. El movimiento en la línea de vista del radar con respecto a una ubicación de referencia en la imagen es posible medir como una fracción de la longitud de onda, con precisiones del centímetro al milímetro, para radares SAR en banda L, banda C y banda X. A esta técnica derivada se la denomina DInSAR (Interferometría Diferencial SAR) ya que utiliza un modelo digital de elevaciones externo para contrarrestar la contribución de fase topográfica, y así estimar la deformación ocurrida.

Un paso más adelante es cuando se dispone de un apilado de imágenes SAR (stack interferométrico) y, mediante DInSAR, es posible estimar la deformación de la superficie terrestre, con una precisión milimétrica, mitigando el ruido inherente por decorrelación y la aplicación de filtros atmosféricos, para así obtener mapas de velocidad y series temporales de desplazamiento.

Existen varios algoritmos multitemporales, sin embargo, desde sus inicios a principios de siglo se establecieron dos enfoques: 1) PSI - Persistent Scatterers Interferometry (Ferretti et al., 2001), y

¹Grupo de Modelado Digital del Terreno y Batimetría (GMDTyB), Departamento de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Email: sbalbara@fi.uba.ar; sbstbalbarani@fie.undef.edu.ar

²Laboratorio de Geociencias, Facultad de Ingeniería del Ejército, Universidad de la Defensa Nacional, Argentina.

³SpaceSUR (SUR Emprendimientos Tecnológicos), Buenos Aires, Argentina.

2) SBAS - Small BAseline Subsets (Berardino et al., 2002). PSI nace en el Politécnico di Milano y consiste en la generación de interferogramas diferenciales, con respecto a una imagen maestra común estratégicamente seleccionada, e independientemente de la línea base espacial, aun cuando ésta sea mayor al valor crítico (decorrelación total). SBAS fue desarrollado en el Instituto IREA-CNR (Nápoles, Italia). Consiste en la creación de subconjuntos de interferogramas diferenciales utilizando escenas caracterizadas por pequeñas separaciones orbitales, de manera tal de limitar la decorrelación espacial. Dichos subconjuntos, separados entre sí por grandes líneas de base, son conectados matemáticamente mediante la descomposición en valores singulares (SVD).

APLICACIONES

Interferometría SAR tiene aplicaciones directa o indirectamente en varios campos de desarrollo ambiental y productivo: geodesia y geofísica; vulcanología; tectónica activa; minería, petróleo y gas; infraestructura crítica; defensa y seguridad; entre otros. Müller & Roland (2022) identifican las tareas a futuro para la geodesia de cara al año 2030, y en ese contexto proponen la integración con métodos de la teledetección, como Interferometría SAR, y destacan la misión satelital Sentinel-1 del proyecto Copernicus de la Unión Europea como un actor importante en ese sentido. Además, agregan que actualmente la sinergia entre las técnicas de medición geodésica y las técnicas de observación de la Tierra es muy fluida.

Tanto en geodesia como en geofísica existe un amplio listado de soluciones a partir de Interferometría SAR. Por ejemplo: obtención de modelos digitales de elevaciones (DEM) y productos derivados (curvas de nivel, escorrentías, pendientes), medición de movimientos terrestres causado por sismos y terremotos, seguimiento de tectónica activa, cuantificación de la deformación por actividad volcánica, medición de riesgos, subsidencia de suelos por causas naturales y/o antropogénicas, procesos de remoción en masa, vigilancia geofísica de peligros naturales, refractividad atmosférica, y más.

CASOS DE ÉXITO Y DESAFÍOS

Sin espacio a dudas, la misión Sentinel-1 (banda C), conformada por los satélites Sentinel-1A (2014) y Sentinel-1B (2016), es el caso de mayor éxito en interferometría diferencial SAR. Su modo IW (Interferometric Wide) adquiere barridos de 250 km a una resolución espacial de 5×20 m. Este modo incluye tres sub-barridos utilizando la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR) en doble polarización (VV+VH). TOPSAR es una versión avanzada del modo convencional ScanSAR, logrando la misma cobertura y resolución espacial, pero con un SNR (Signal-to-Noise Ratio) y DTAR (Distributed Target Ambiguity Ratio) casi uniformes (Braun, 2021).

La clave del éxito de la misión Sentinel-1 radica en que fue concebida con fines interferométricos. La posición de los satélites fue originalmente definida por un “tubo orbital” de 100 metros de diámetro lo que garantiza la conformación de pares de línea base espacial corta, especialmente diseñado para la aplicación de técnicas de interferometría diferencial. El ciclo de repetición en el Ecuador es de doce días por satélite, con 175 órbitas por ciclo, y 98.68 minutos de duración por órbita. Con los dos satélites operando, el periodo de revisita se redujo a la mitad, seis días. Lamentablemente, en diciembre de 2021, la ESA decide dejar fuera de órbita al satélite Sentinel-1B, debido a un fallo en la alimentación de la antena de radar. Actualmente, la constelación queda conformada únicamente por el satélite Sentinel-1A, con un periodo de revisita de 12 días. Sin embargo, se prevé el lanzamiento de Sentinel-1C para Q4 de 2024, y Sentinel-1D en 2025, dando continuidad a la misión. A todo esto, el programa Copernicus planifica la próxima generación de las misiones Sentinel, y en materia SAR, la nueva generación Sentinel-1 NG-a / NG-b (Banda C) a partir de 2030. Por otro lado, Rose-L es otra misión SAR candidata con alta prioridad para la agencia europea, que va a operar en la banda L, para monitoreo del Ártico y la criósfera, cartografía de emergencias, movimiento de tierras y humedad de suelo.

NISAR (NASA-ISRO SAR MISSION) es una misión satelital con radar de apertura sintética para estudiar la Tierra, peligros naturales, criósfera y ecosistemas. Desarrollada por Estados Unidos y la India, va a operar en la banda L (24 cm) y banda S (10 cm) con un barrido de más de 240 km con resoluciones de hasta 3 m dirección del rango, con polarización completa. Se prevé el lanzamiento para la segunda mitad de 2024.

Por otro lado, en los últimos años ha surgido un nuevo sector de empresas aeroespaciales que invierten en el desarrollo de constelaciones de pequeños satélites SAR, principalmente en banda X. A este ecosistema se lo denomina New Space. Y se espera que en los próximos años aumente radicalmente el abanico de ofertas comerciales en este tipo de datos satelitales, de gran impacto en aplicaciones de vigilancia, cartografía militar, infraestructuras urbanas, principalmente. Ejemplo de ello son las empresas: ICEYE (<https://www.iceye.com/>), Capella Space (<https://www.capellaspace.com/>) y UMBRA (<https://umbra.space/>).

PROYECTOS NACIONALES

SAOCOM-1 (Satélite Argentino de Observación COon Microondas) es la primera constelación argentina de dos satélites de radar (SAOCOM-1A y SAOCOM-1B) que operan en la banda L (23 cm) de alta resolución y cuádruple polarización. La banda L permite obtener información penetrando la cobertura vegetal y el terreno, capturando información de la humedad. La misión fue diseñada y creada para brindar productos satelitales de valor agregado y estratégicos para la producción agropecuaria de la región pampeana de la Argentina. Sin embargo, la tecnología ofrece un variado abanico de soluciones, tales como: detección de barcos, mapas de humedad de suelos, pronósticos de fusariosis en el trigo, interferometría SAR, entre otros. La resolución espacial máxima es de 10 m. y el tiempo de revisita máximo es de 16 días para un satélite y de 8 días para los dos satélites, pudiéndose reducir según los requerimientos.

En materia de interferometría SAR, [Seppi et al. \(2021\)](#) presentan una metodología de corrección orbital para compensar errores en los interferogramas de SAOCOM-1. Recientemente, [Ibarra et al. \(2024\)](#) proponen una metodología de apilado de MDE mediante imágenes Sentinel-1 y SAOCOM-1 para mejorar la precisión de los productos topográficos nacionales. En tanto, [Roa et al. \(2021\)](#) muestran por primera vez el potencial de las escenas SAOCOM-1 para medir la deformación de edificios volcánicos.

Por otro lado, la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) y junto a las empresas SpaceSUR y VENG apuntan a lanzar en 2026 el primer satélite de la misión espacial FOCUS, un satélite SAR pequeño, de longitud de onda corta, con uso dual: FOCUS GLOBAL: monitoreo predictivo de Infraestructura crítica (puentes, edificios y represas) a muy bajo costo; y FOCUS DEFENSA: vigilancia del mar argentino y fronteras. A través de esta tecnología de alta resolución, será posible medir movimientos de deformación del suelo y de las infraestructuras, de unos pocos milímetros, con el objeto de prevenir accidentes y desastres naturales y/o antropogénicos.

CONCLUSIONES

Interferometría SAR es una técnica avanzada de la teledetección activa en el rango de las microondas que posee variadas aplicaciones en el campo de la geodesia y la geofísica. Si bien la técnica permite la obtención de modelos digitales de elevaciones con resoluciones y precisiones similares a los sistemas ópticos de teledetección, la técnica ofrece una solución aún más interesante: la posibilidad de medir la deformación de la superficie terrestre con precisiones milimétricas, bajo ciertos condicionamientos de adquisición de las imágenes. Mas aún, mediante un apilado de imágenes sobre la misma zona, es posible generar series temporales de desplazamiento, minimizando los errores inherentes de la técnica. En este sentido, interferometría diferencial SAR surge como una novedosa técnica geodésica de tipo areal que se diferencia con los tradicionales métodos de medición puntual en geodesia y

geofísica.

Esta herramienta satelital permite análisis de movimientos del terreno como los generados por un sismo o un terremoto, sin embargo, con un cierto número de imágenes ofrece la posibilidad de efectuar un análisis retrospectivo en cada pixel coherente de la zona de estudio, y mas aun, monitorizar un determinado fenómeno geodinámico en cuasi tiempo real. Sentinel-1 es la misión SAR de la ESA que fue diseñada y pensada para aplicaciones de interferometría diferencial. Adquisiciones regulares con línea base espacial y temporal corta, y el acceso libre a los datos, propician soluciones de monitoreo ambiental y de infraestructuras.

En los últimos años se observa un crecimiento notable del mercado InSAR por parte de usuarios principiantes, y también de la oferta de imágenes, principalmente en banda X, por parte de spin off que surgen de universidades, agencias espaciales y del sistema científico tecnológico en general. Estas constelaciones de satélites pequeños están creciendo exponencialmente gracias a importantes inversiones mundiales, que a futuro se convertirá en una baja del precio de los productos satelitales, para su uso masivo. Argentina se encuentra a la vanguardia en materia de desarrollo de proyectos de misiones de radar de apertura sintética, y en este punto el SAOCOM-1, si bien nace con otro enfoque (medición de la humedad de los suelos) ha demostrado sus capacidades en interferometría SAR. FOCUS es un nuevo proyecto, con aplicaciones específicas que brindará soluciones con mayor nivel de detalle y precisión, de la deformación.

Actualmente existen varias herramientas, libres y comerciales, con la posibilidad de procesar interferometría SAR. Sin embargo, dado el tamaño de los archivos de los datos y los bancos de imágenes disponibles, es menester, que los nuevos motores de procesamiento en la nube incluyan colecciones de apilados interferométricos y los procesos para la cadena de producción completa. Hoy en día solo unas pocas herramientas comerciales en la nube lo permiten.

Finalmente, cabe agregar la necesidad de la formación de recursos humanos altamente calificados para desarrollar capacidades en estas líneas de desarrollo tecnológico, mediante planes de trabajos para tesis de grado, maestrías y doctorado. Es necesario aunar esfuerzos desde varios sectores, para motivar y sumar a jóvenes geodestas y geofísicos en el trabajo colaborativo e interdisciplinario, en favor de soluciones disruptivas e innovadoras para el desarrollo de la geodesia y geofísica, principalmente en la Argentina.

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.
- Braun, A.** (2021). Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – Open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences*, 13(1), 532–569. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F.** (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 8–20.
- Ibarra, F., Cuello, A., Gotusso, L., Guerrieri, M., Ludueña, S., Marquez, J., Micou, A. N., Migliorini, R., Ortone, A., Perez, M., Posadas, A., Seco, J. L., Soldano, A., Sotelo, A., Tamayo, C., & Chiarito, E.** (2024). Exploring C and L band InSAR digital elevation model stacking: A case study in Córdoba, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105006>
- Müller, J. & Roland, P.** (2022). Geodesy 2030. *DGK Division Geodesy (Erdmessung)*. <https://doi.org/10.12902/zfv-0243-2018>
- Roa, Y., Rosell, P., Solarte, A., Euillades, L., Carballo, F., García, S., & Euillades, P. A.** (2021). First assessment of the interferometric capabilities of SAOCOM-1A: New results over the Domuyo volcano, Neuquén, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102882>
- Seppi, S. A., Solarte Casanova, E. A., Roa, Y. L. B., Euillades, L., & Gaute, M.** (2021). On the feasibility of applying orbital corrections to SAOCOM-1 data with Free Open-Source Software (FOSS) to generate digital surface models: A case study in Argentina. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volumen XLVI-4/W2-2021. FOSS4G 2021.