

Monitorización de deformaciones del terreno desde satélite

Earth deformation monitoring from satellite

Michele Crosetto¹, & María Cuevas² & Anna Barra³ & Oriol Monserrat⁴

Para citar este artículo: Crosetto, M., Cuevas, M., Barra, A. & Monserrat, O. Monitorización de deformaciones del terreno desde satélite. Revista de Topografía Azimut (10), pp xx-xx

Fecha de Recepción: 10 de marzo de 2019

Fecha de Aceptación: 20 de mayo de 2019

Resumen

En este artículo se describe una técnica de teledetección satelital para la medida de deformaciones del terreno, infraestructuras y estructuras. La técnica se basa en datos SAR (*synthetic aperture radar*) y en el método de la interferometría. El trabajo hace referencia a dos tipos de técnicas: la interferometría SAR diferencial (DInSAR) y la *persistent scatterer interferometry* (PSI). El trabajo describe cuatro ejemplos de resultados de análisis PSI, que se han realizado usando la cadena *software* desarrollada en el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC). El primer resultado es un ejemplo de deformación del terreno inducida por la extracción de agua, que concierne a Ciudad de México (México). El segundo representa un ejemplo de deformación debida a la extracción de agua en un entorno más local. Estos dos ejemplos ilustran la potencial contribución del PSI en la gestión de recursos hídricos. El tercer ejemplo está relacionado con la monitorización de una zona de obras en la ciudad de Barcelona. Se trata de un ejemplo donde incluso pequeñas deformaciones pueden tener un impacto elevado en los edificios alrededor de la zona de obra. Finalmente, el último se refiere a una zona minera ubicada en Cataluña (España).

Palabras clave: SAR, interferometría, subsidencia, levantamientos.

Abstract

This paper describes a satellite-based remote sensing technique to measure the deformation of terrain, infrastructures and structures. The technique is based on SAR (Synthetic Aperture Radar) data and the interferometric method. The work makes reference to two types of techniques: Differential Interferometric SAR (DInSAR) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI). The work describes four examples of PSI results, which have been achieved using the software chain developed by CTTC. The first result is an example of terrain deformation due to water extraction, which concerns Mexico City (Mexico). The second result represents an example of deformation induced by water extraction in a local environment. These two examples illustrate the potential contribution of PSI in the management of water resources. The third example is related to the monitoring of a construction work area located in the city of Barcelona (Spain). This is an example where even small displacement can have a high impact on the buildings surrounding the construction work area. Finally, the last example refers to a mining area located in Catalonia (Spain).

Keywords: SAR, interferometry, subsidence, landsurvey.

¹Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Division of Geomatics, Av. Gauss 7, E-08860 Castelldefels, Barcelona, Spain. Correo electrónico: mcrosetto@cttc.cat

²Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Division of Geomatics, Av. Gauss 7, E-08860 Castelldefels, Barcelona, Spain. Correo electrónico: mcuevas@cttc.cat

³Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Division of Geomatics, Av. Gauss 7, E-08860 Castelldefels, Barcelona, Spain. Correo electrónico: abarra@cttc.cat

⁴Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Division of Geomatics, Av. Gauss 7, E-08860 Castelldefels, Barcelona, Spain. Correo electrónico: omonserrat@cttc.cat

Introducción

En este artículo se aborda una técnica de teledetección satelital para la medida de deformaciones del terreno, estructuras e infraestructuras. La técnica permite medir pequeñas deformaciones, a partir de unos pocos milímetros, que pueden ser usadas en un gran abanico de aplicaciones. La técnica se basa en datos SAR (*synthetic aperture radar*) y en el método de la interferometría. En particular, la técnica explota la fase de los datos SAR. Esta fue demostrada por primera vez en 1989 (Gabriel, Goldstein y Zebker, 1989) y desarrollada por diferentes grupos de investigación con el nombre de *interferometría SAR diferencial* (DInSAR) (véanse Bamler y Hartl, 1998; Rosen *et al.*, 2000). DInSAR ha sido explotado en los últimos 30 años, generando resultados muy relevantes en diferentes ámbitos de aplicación, *e.g.* sismología (Massonnet *et al.*, 1993; Dalla Via, Crosetto y Crippa, 2012), vulcanología (Massonnet, Briole y Arnaud, 1995; Antonielli *et al.*, 2014), glaciología (Goldstein, Engelhardt, Kamb y Frolich, 1993; Rignot, Gogineni, Krabill y Ekholm, 1997), deslizamientos de ladera (Carnec, Massonnet y King, 1996; García-Davalillo *et al.*, 2014), subsidencia y levantamientos del terreno (Galloway *et al.*, 1998; Amelung *et al.*, 1999), etc. Unas revisiones exhaustivas de aplicaciones DInSAR se proporcionan en Massonnet y Feigl (1998) y Hanssen (2001).

A partir del 2000 (Ferretti, Prati y Rocca, 2000) se ha desarrollado una versión avanzada del DInSAR, que viene llamada *persistent scatterer interferometry* (PSI). Esta se basa en múltiples imágenes SAR adquiridas sobre la misma zona; con lo cual es posible alcanzar precisiones más elevadas de las del DInSAR. Una revisión completa del PSI se proporciona en Crosetto *et al.* (2016).

El éxito y la importancia de los DInSAR y PSI está estrechamente relacionada con

la disponibilidad de datos SAR. El mayor desarrollo de DInSAR y PSI ha coincidido con la explotación de los datos SAR en banda C (longitud de onda de unos 5,6 cm) de los satélites europeos ERS-1/2 y Envisat y el satélite canadiense Radarsat. Los datos de dichos satélites cubren largos periodos, un aspecto clave para garantizar la monitorización de deformaciones. En 2007 llegaron los datos SAR de alta resolución en banda X (longitud de onda de unos 3,1 cm), con los sensores TerraSAR-X y CosmoSkyMed. Estos datos permitieron realizar unos progresos fundamentales, sobre todo de la técnica PSI (véase Crosetto, Monserrat, Iglesias y Crippa, 2010). Finalmente, un paso adelante muy significativo está asociado a los nuevos sensores en banda C de la Agencia Espacial Europea a bordo de los Sentinel-1A and 1B. Estos sensores tienen una elevada capacidad de adquisición de datos que permite una cobertura casi global del planeta, con mucha parte del globo medida regularmente cada 12 días (en Europa el muestreo es de 6 días).

En este artículo se muestran algunos ejemplos de resultados de análisis PSI, que se han realizado usando la cadena PSI desarrollada en el CTTC.

Ejemplos de resultados

El primer resultado es un ejemplo de deformación del terreno inducida por extracción de agua desde acuíferos subterráneos. La zona cubierta incluye una parte importante de Ciudad de México (México) y tiene una superficie de aproximadamente 80 por 25 km. Se ha estudiado usando 10 imágenes SAR del satélite Sentinel-1A, obteniendo una densidad media de medidas de 575 puntos/km², por un total de 720,882 puntos. La figura 1 muestra el mapa de la deformación acumulada sobre un periodo de aproximadamente cuatro meses (octubre de 2014 – febrero de 2015). En

este mapa las deformaciones estimadas son codificadas en colores. Los valores alrededor de cero (zonas estables) se muestran en color verde; los valores negativos (subsistencia, terreno que se aleja del sensor) se muestran con colores amarillos y rojos; y los valores positivos (levantamientos) son de colores azul. Estos últimos están ausentes en la zona

estudiada. El mapa incluye una amplia zona de subsidencia, con valores de desplazamiento hasta 9 cm en tan solo cuatro meses. Este resultado puede ser útil para la gestión de las aguas subterráneas, tanto para planificar los caudales de extracción como para minimizar los efectos en superficie.

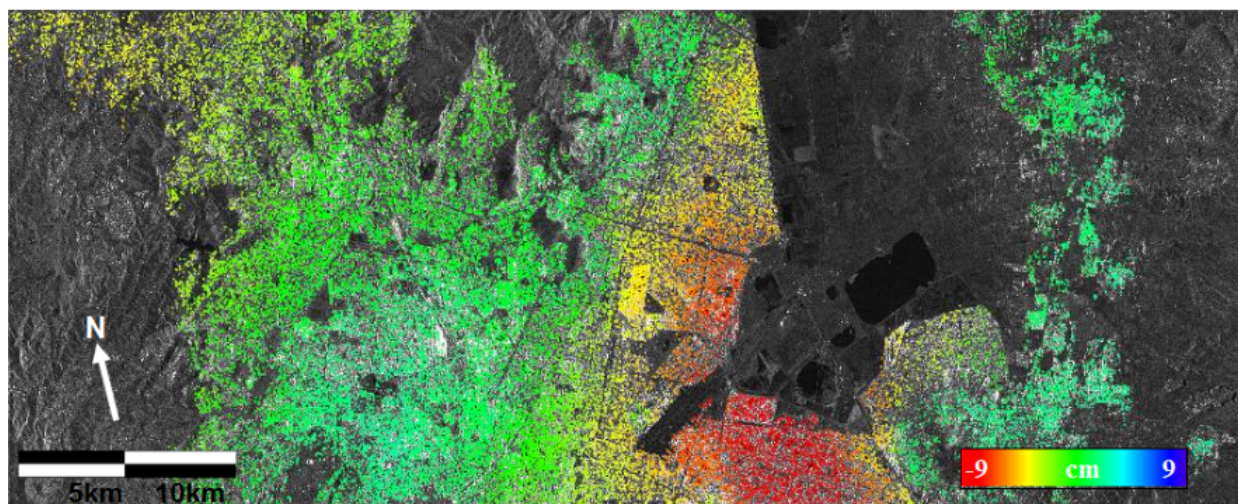


Figura 1: Mapa de deformación acumulada de la Ciudad de México. Ejemplo de deformación del terreno inducida por extracción de agua

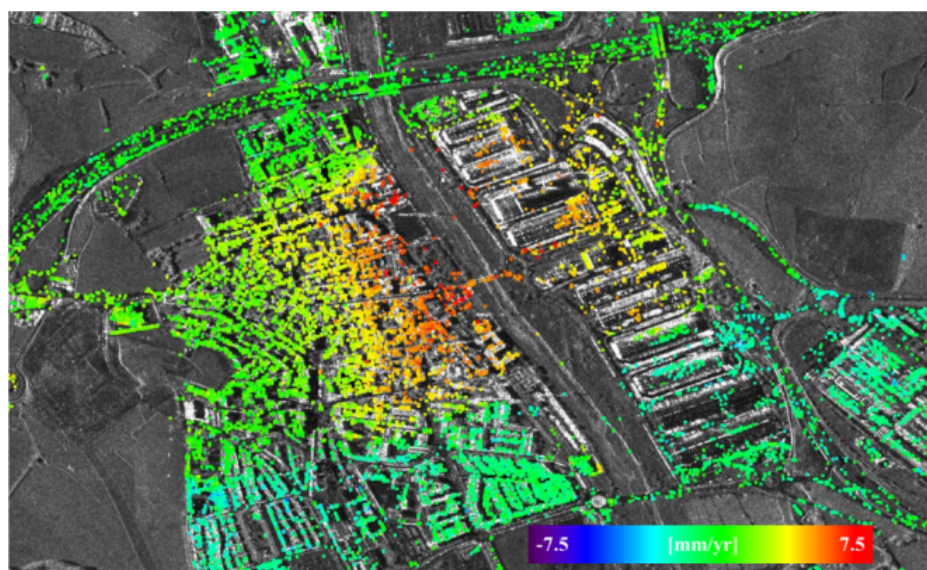


Figura 2: Mapa de velocidad de deformación de una pequeña ciudad de la zona metropolitana de Barcelona. Ejemplo de deformación por extracción de agua

El segundo resultado es también un ejemplo de deformación del terreno inducida por extracción de agua. La zona de estudio está ubicada en una pequeña ciudad del área metropolitana de Barcelona (España). En este caso, el estudio se ha basado en imágenes de alta resolución en banda X del sensor TerraSAR-X. Este dato permite realizar un estudio espacial mucho más detallado, llegando a distinguir edificios aislados (figura 2). El periodo cubierto es de 5 años: 2007-2012. La figura 2 muestra un mapa de velocidad de subsidencia. Hay una subsidencia que afecta a la mayoría de la zona, con picos de velocidad de hasta 7.5 mm/año. En este ejemplo la subsidencia tiene valores positivos. También como en el primer caso, dichos resultados pueden servir de soporte a la gestión de los recursos hídricos de la zona. Por ejemplo, pueden ayudar a detectar extracciones ilegales de agua.

El tercer ejemplo concierne a la monitorización de una zona de obras en zona urbana. La monitorización abarca unos pocos kilómetros alrededor la Plaza de les Glòries de Barcelona. Las obras incluyen la construcción de dos túneles, que involucra la bajada del nivel freático de la zona de obras.

Dado que las obras están ubicadas en zona urbanas, se ha planificado un seguimiento exhaustivo de las obras. Las medidas PSI se han seleccionado para proporcionar una visión global (varios kilómetros cuadrados); estas están complementadas con medidas *in situ* a partir de instrumentación topográfica. Las medidas PSI se han basado en imágenes SAR de los sensores Sentinel-1A y Sentinel-1B.

La figura 3 ilustra la serie temporal de deformación de dos puntos ubicados cerca de la zona de obras. En esta figura se observa que hay un periodo de subsidencia del terreno que va desde marzo hasta junio de 2017 (el desplazamiento es de hasta 10 mm), seguido por un levantamiento para recuperar aproximadamente su cota original. Este fenómeno es debido a la extracción de agua (que provoca subsidencia) seguido por la recuperación del nivel freático debido a la interrupción de las actividades de bombeo. Esto es evidente si se mira la evolución de un piezómetro ubicado cerca de los puntos analizados, véase la línea roja en la figura 3: los datos del piezómetro se corresponden muy bien con las series temporales de deformaciones. Este resultado representa un ejemplo de validación de los resultados PSI.

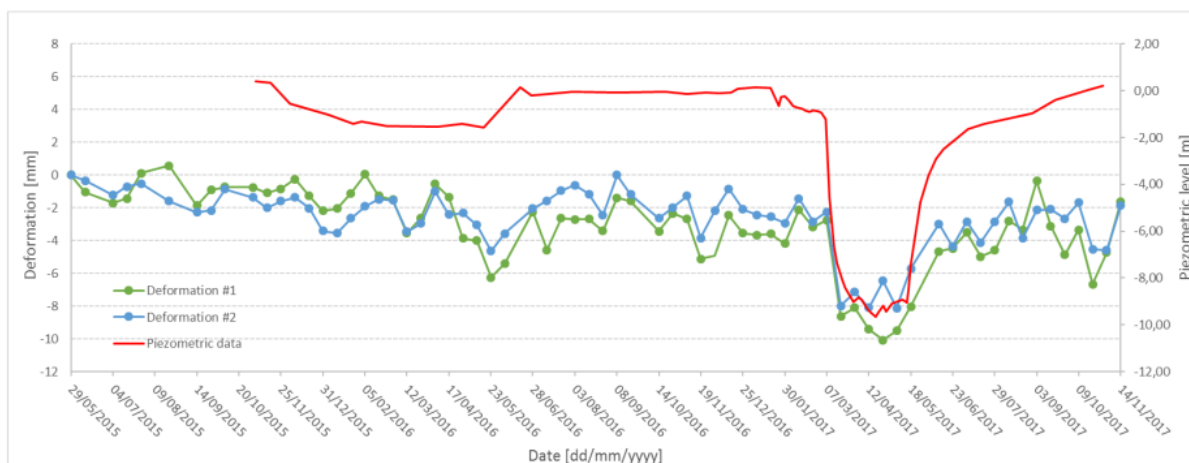


Figura 3: Ejemplo de validación de series temporales: la deformación de dos puntos está muy correlacionada con los datos de los piezómetros de la misma zona

El último ejemplo se refiere a una zona minera ubicada en Cataluña (España). Un barrio de un pueblo, Sallent, se construyó sobre una zona minera que tiene afectaciones en la superficie del terreno. Este fenómeno se ha estudiado periódicamente usando topografía clásica. La zona se estudió con 15 imágenes ERS de la Agencia Espacial Europea que cubren el periodo desde junio de 1995 hasta abril de 2000. La figura 4 ilustra la velocidad de deformación estimada en el periodo estudiado. La velocidad está codificada en colores y está superpuesta a una ortofoto a escala 1:5000 del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. En la figura se puede apreciar una deformación de hasta 20 mm/año que afecta al barrio estudiado.

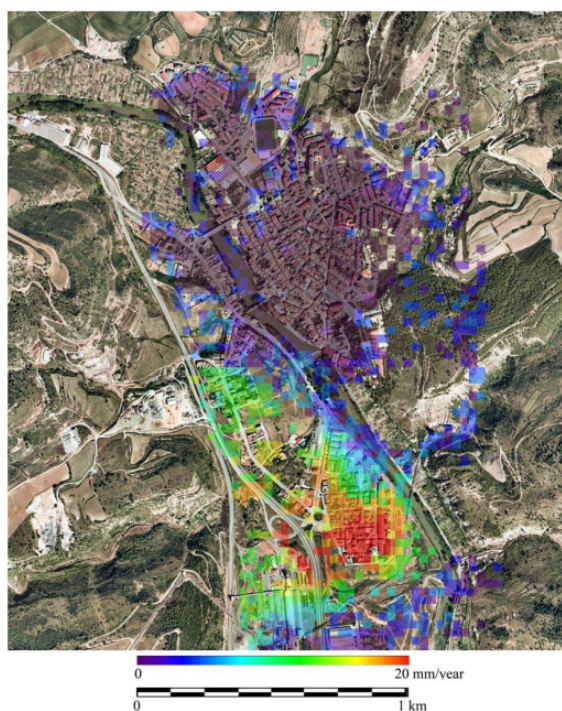


Figura 4: Mapa de velocidad de deformación de Sallent, Cataluña (España). Deformación debida a actividades mineras subterráneas

Conclusiones

Las técnicas DInSAR y PSI proporcionan herramientas muy potentes para medir y monitorizar las deformaciones del terreno,

estructuras e infraestructuras. En este trabajo se han ilustrado cuatro ejemplos basados en las herramientas de procesamiento y análisis desarrollados en el CTTC. El primer resultado es un ejemplo de deformación del terreno inducida por extracción de agua, que concierne a Ciudad de México (México). Este resultado puede ser útil para la gestión de las aguas subterráneas.

El segundo es también un ejemplo de deformación del terreno inducida por extracción de agua, cuyo resultado puede servir para soporte a la gestión de los recursos hídricos de la zona.

El tercer ejemplo concierne a la monitorización de una zona de obras en la ciudad de Barcelona. En este ejemplo se puede apreciar una buena correspondencia entre los resultados SPI y datos de los piezómetros: se trata de un ejemplo de validación de los resultados PSI.

El último ejemplo se refiere a una zona minera ubicada en Cataluña (España). Las medidas PSI permiten realizar una medida detallada de las afectaciones de esta mina en un barrio del pueblo estudiado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea, mediante el contrato No. 740689 del proyecto Heimdall, Multi-Hazard Cooperative Management Tool for Data Exchange, Response Planning and Scenario Building

Referencias bibliográficas

Amelung, F., Galloway, D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A. y Lacznia, R.J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6), 483-486.

- Antonielli, B., Monserrat, O., Bonini, M., Righini, G., Sani, F., Luzi, G., Feyzullayev, A.A. y Aliyev, C.S. (2014). Pre-eruptive ground deformation of Azerbaijan mud volcanoes detected through satellite radar interferometry (DInSAR). *Tectonophysics*, 637, 163-177.
- Bamler, R. y Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl*, 14, R1- R54.
- Carnec, C., Massonnet, D. y King, C. (1996). Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent. *Geophysical Research Letters*, 23(24), 3579- 3582.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R. y Crippa, B. (2010). Persistent Scatterer Interferometry: potential, limits and initial C- and X-band comparison. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(9), 1061-1069.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N. y Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Dalla Via, G., Crosetto, M. y Crippa, B. (2012). Resolving vertical and east-west horizontal motion from differential interferometric synthetic aperture radar: The L'Aquila earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 117(B2).
- Ferretti, A., Prati, C. y Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE TGRS*, 38(5), 2202-2212.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. y Zebker, H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *J. Geophys Res*, 94(B7), 9183-9191.
- Galloway, D.L., Hudnut, K.W., Ingebritsen, S.E., Phillips, S.P., Peltzer, G., Rogez, F. y Rosen, P.A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34(10), 2573-2585.
- García-Davalillo, J.C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T. y Álvarez-Fernández, I. (2014). DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslides*, 11(2), 225-246.
- Goldstein, R.M., Engelhardt, H., Kamb, B. y Frolich, R.M. (1993). Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream. *Science*, 262(5139), 1525-1530.
- Hanssen, R. (2001). *Radar interferometry*. Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- Massonnet, D. y Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. y Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433), 138-142.
- Massonnet, D., Briole, P. y Arnaud, A. (1995). Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375, 567-570.

Rignot, E.J., Gogineni, S.P., Krabill, W.B. y Ekholm, S. (1997). North and northeast Greenland ice discharge from satellite radar interferometry. *Science*, 276(5314), 934-937.

Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. y Goldstein, R.M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.