

Aplicaciones de la interferometría radar de satélite en ingeniería civil

Roberto Tomás

Departamento de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, E-03080 Alicante, Spain. E-mail: roberto.tomas@ua.es

Resumen

La Interferometría radar de satélite (InSAR) constituye una técnica remota empleada para determinar la magnitud de los desplazamientos de la superficie del terreno. Se basa en el cálculo de las diferencias de fase entre dos imágenes SAR para obtener información de los movimientos con precisión milimétrica. Permite identificar y cartografiar zonas activas que presentan movimientos, caracterizarlas, monitorizarlas a lo largo del tiempo y modelizar los procesos subyacentes, así como identificar y evaluar daños en infraestructuras. En el presente artículo se describe de forma sucinta el fundamento de la técnica y se muestran diversos ejemplos de aplicación en ingeniería civil.

Palabras clave: técnica remota, radar de satélite, InSAR, Ingeniería Civil, monitorización, desplazamientos.

Applications of satellite radar interferometry in civil engineering

Abstract

Satellite radar interferometry (InSAR) is a remote sensing technique used to measure the magnitude of the displacements of ground surface. It is based on the determination of the phase differences between two SAR images to obtain the movement with an accuracy of millimetres. It allows to identify and map, characterize and monitor over time active areas affected by movements, and to model the underlying processes, as well as to identify and evaluate infrastructures damage. In this work a very brief description of the basins of the technique is included and various examples of application to civil engineering are shown.

Keywords: remote sensing technique, InSAR, civil engineering, monitoring, displacement.

1. Introducción

Las infraestructuras puedan verse afectados a lo largo de su vida útil por procesos de diversa naturaleza y magnitud que se manifiestan a través de desplazamientos (e.g. asientos). Por ello, resulta necesario comprobar que funcionan según lo previsto, no presentando deformaciones excesivas que puedan poner en peligro su estabilidad, generar pérdidas de funcionalidad o situaciones críticas de seguridad.

Los desplazamientos se miden habitualmente mediante técnicas topográficas (e.g. colimaciones o nivelaciones) o instrumentación in situ (e.g. inclinómetros). Sin embargo, estas técnicas de auscultación pueden interferir con las actividades normales de la obra o con el uso de las infraestructuras o incluso generar situaciones de riesgo (e.g. toma de datos en carreteras en explotación).

Las interferometría radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica remota que constituye una buena alternativa para medir con gran precisión y resolución los desplazamientos que afectan a las infraestructuras. La InSAR proporciona tanto mapas de distribución de desplazamientos como series temporales que muestran la evolución en el tiempo de los desplazamientos de la superficie del terreno y de las estructuras asentadas sobre el mismo.

En este trabajo se lleva a cabo un breve repaso del potencial de la InSAR en el ámbito de la ingeniería civil a través de numerosos ejemplos de aplicación. Asimismo, se discuten las ventajas y desventajas principales de esta técnica.

2. Fundamento de la técnica InSAR

Los satélites SAR orbitan alrededor de la tierra a través de órbitas polares emitiendo señales radar. La señal reflejada en la superficie de la tierra es recibida de nuevo por el satélite, obteniendo así imágenes SAR de las mismas zonas a largo del tiempo. El procesado de estas imágenes mediante la técnica InSAR permite calcular la evolución de los desplazamientos de la superficie de la tierra. En el presente apartado se lleva a cabo una descripción muy sucinta del fundamento de la técnica InSAR.

La InSAR convencional compara la fase (ϕ) de dos imágenes SAR adquiridas sobre la misma escena en fechas distintas (Figura 1). El desplazamiento de cada pixel de las imágenes se calcula a partir de los interferogramas, que consisten en mapas que representan la diferencia de fase ($\Delta\phi$) durante el intervalo considerado. Por tanto, los desplazamientos (ΔR) a lo largo de la línea de vista del satélite se calculan a partir de $\Delta\phi$ tal y como se ilustra en la Figura 1.

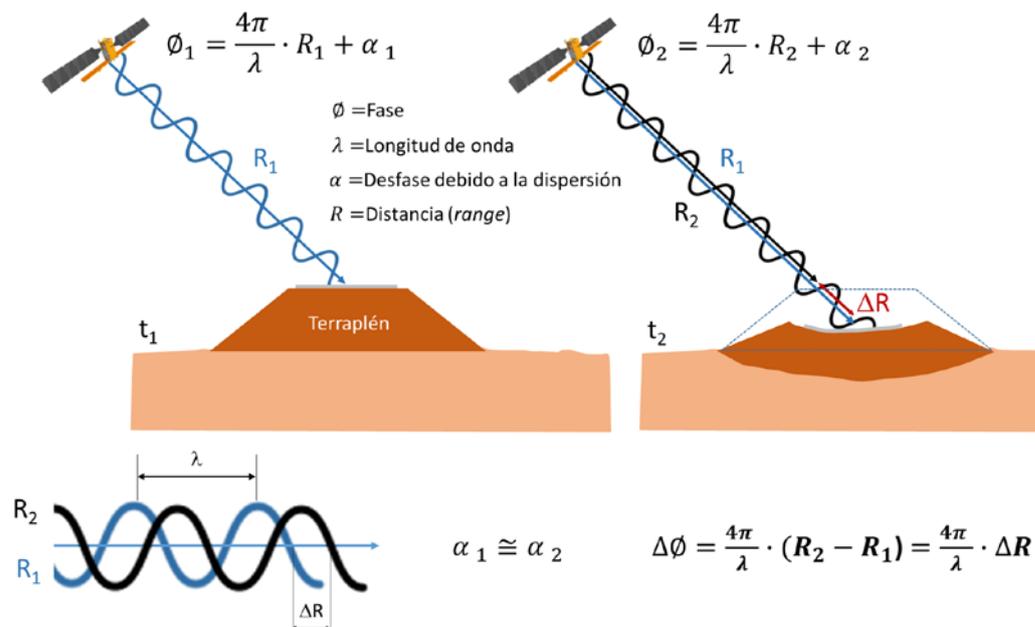


Figura 1. Fundamento de la InSAR. La comparación de las fases (ϕ_1 y ϕ_2) medidas en dos instantes diferentes (t_1 y t_2) permite determinar el desplazamiento de la superficie del terraplén al desarrollarse el asiento del suelo subyacente.

La InSAR multitemporal comenzó a utilizarse a principios de este siglo (Ferretti et al. 2001) como una mejora de la InSAR convencional. Esta técnica utiliza un gran número de imágenes SAR para realizar una mejor estimación de los desplazamientos y minimizar el error asociado a las pérdidas de la señal introducidas por los artefactos atmosféricos. Para ello, se combinan todas las imágenes SAR disponibles para obtener los correspondientes interferogramas. A continuación, se seleccionan aquellos píxeles en los que se va a estimar el desplazamiento a través de la coherencia o la amplitud de cada pixel en todo el conjunto de interferogramas. Una vez seleccionados los píxeles (denominados reflectores permanentes o persistent scatterers en inglés, PS) se determinan los desplazamientos a través de procedimientos más o menos complejos.

Para más información sobre los procedimientos de procesamiento interferométrico se recomiendan al lector, por ejemplo, el trabajo publicado por Crosetto et al. (2016).

3. Aplicaciones en ingeniería civil

El uso de la técnica DInSAR en la ingeniería civil se ha extendido considerablemente a lo largo de las últimas décadas. En los siguientes apartados se muestran diversas aplicaciones.

3.1. Identificación y mapeo automático de anomalías

Las infraestructuras pueden verse afectadas por procesos de deformación a lo largo de su vida útil (e.g. asentamientos o inestabilidades). Habitualmente, estos procesos se manifiestan una vez que las deformaciones han alcanzado cierta envergadura a través de daños superficiales que se identifican mediante inspecciones visuales. Sin embargo, el empleo sistemático de la InSAR permite identificar, y cartografiar de forma precisa y automática estas áreas afectadas por los desplazamientos desde sus primeras fases de desarrollo (Figuras 2 y 3) a través de herramientas de análisis programadas para tal fin (e.g. Barra et al. 2017; Tomás et al. 2019). Esta metodología puede ser fácilmente integrada dentro de los procesos de planeamiento urbanístico y mantenimiento de infraestructuras para la identificación de situaciones anómalas, así como para conocer su extensión y evolución a lo largo del tiempo, y establecer planes de inspección y prioridades de actuación.

3.2. Auscultación y caracterización

La técnica InSAR también permite monitorizar la evolución de los desplazamientos a lo largo del tiempo para cada PS. Esta información resulta extremadamente relevante en el control de: (a) procesos de consolidación de suelos (e.g. control de precargas o de asentamientos de estructuras) (Figuras 4 y 5) (e.g. Hu et al. 2019); (b) monitorización de movimientos de ladera o taludes (Figura 6) (e.g. Colesanti et al. 2003); (c) asentamientos superficiales producidos por la construcción de túneles o galerías subterráneas (e.g. Sillerico et al. 2015); y (d) diseño de sistemas de alarma temprana que permitan actuar con suficiente antelación al estado de rotura para evitar pérdidas humanas y minimizar los daños materiales mediante el análisis de los movimientos precursoros (e.g. Dai et al. 2020).

Además, los datos InSAR combinados con otra información complementaria (e.g. sondeos, series temporales de lluvia, temperatura o niveles piezométricos) permiten caracterizar los procesos que producen los desplazamientos medidos, así como establecer y cuantificar su relación con

los factores condicionantes y desencadenantes (e.g. Tomás et al. 2014)(Figura 6), lo que contribuirá a una mejor gestión, corrección y planificación del riesgo asociada al fenómeno monitorizado.

Cabe indicar que, dado que existen archivos históricos de imágenes InSAR desde 1992, se pueden llevar a cabo análisis retrospectivos de gran interés para analizar situaciones anteriores a los daños observados en la actualidad.

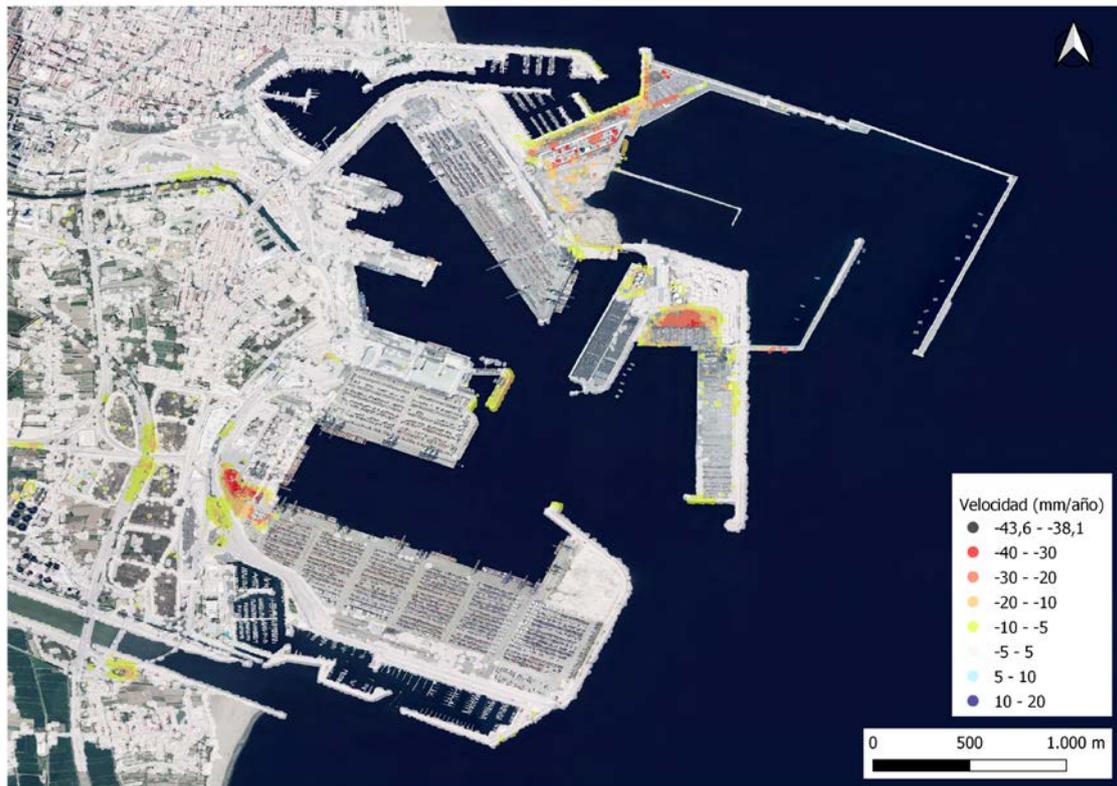


Figura 2. Velocidades de desplazamiento del puerto de Valencia obtenidas a partir del procesamiento de 54 imágenes del satélite CosmoSkyMed adquiridas entre el 14/05/2011 y el 08/08/2012. Los puntos representan los reflectores permanentes en los que se ha calculado la evolución de los desplazamientos para todo el periodo de observación. Obsérvense las zonas activas asociadas principalmente a procesos de consolidación de rellenos, precargas, y asientos de diques y estructuras.

3.3. Evaluación de daños

Los datos InSAR también pueden ser utilizados dentro del proceso de identificación y evaluación de daños de infraestructuras tanto a pequeña escala (e.g. una línea de ferrocarril) como en detalle (e.g. un puente) (Figuras 7 y 8). Los desplazamientos medidos en amplias zonas permiten llevar a cabo evaluaciones preliminares de estados límite de servicio (e.g. distorsiones angulares y asientos) para identificar partes de las infraestructuras en los que éstos hayan sido superados (e.g. Sanabria et al. 2014).

Asimismo, los datos InSAR combinados con un inventario detallado de daños permite definir curvas de fragilidad (e.g. Del Soldato et al. 2019; Ezquerro et al. 2020) que a su vez pueden ser empleadas para elaborar mapas de probabilidad de daño, que resultan de gran utilidad en la ordenación del territorio para la reducción de daños y/o víctimas.

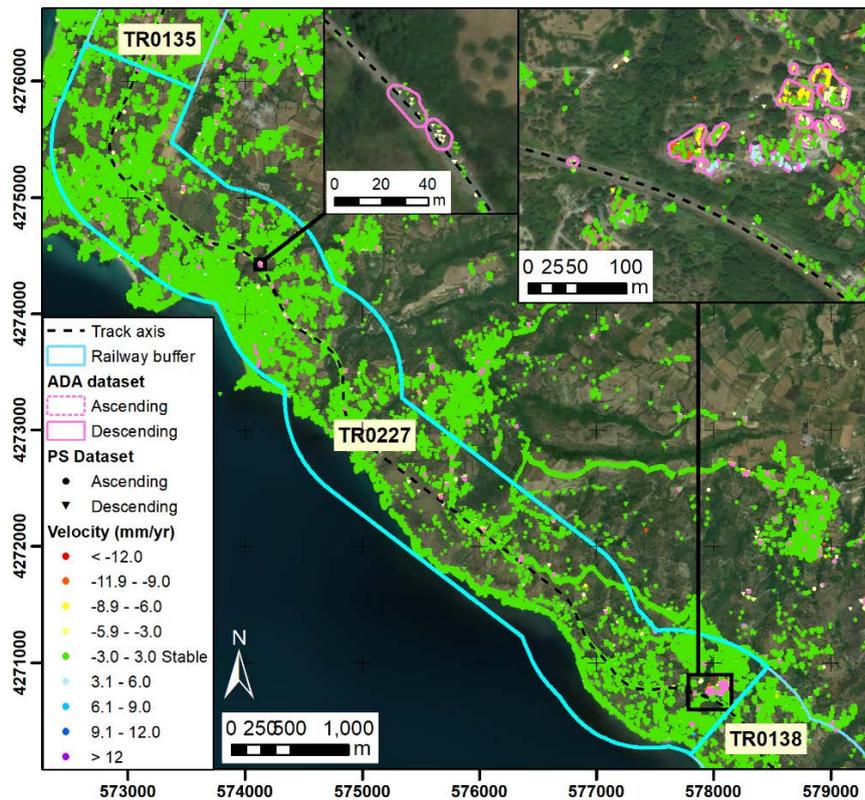


Figura 3. Mapa de desplazamientos (obtenidos a partir de órbitas ascendentes y descendentes) y de áreas activas de deformación (77 en total) identificadas en un tramo de la línea de ferrocarril Lamezia Terme-Rosarno (SW de Italia). Las imágenes empleadas corresponden al satélite COSMO-SkyMed (banda X) y fueron adquiridas entre octubre de 2011 y marzo de 2019. Obsérvense los detalles de las áreas de desplazamiento activas (ADA) situadas sobre la plataforma del ferrocarril y en sus proximidades delimitadas mediante polígonos de color rosa.

3.4. Modelización

Los datos InSAR resultan de gran utilidad para la validación de modelos analíticos y numéricos. Asimismo, han sido ampliamente empleados para su calibración, permitiendo incluso calcular parámetros del terreno (e.g. Boni et al. 2020). Asimismo, algunos programas de cálculo permiten superponer los datos InSAR a los modelos para llevar a cabo calibraciones avanzadas y refinamientos de los parámetros de entrada de los modelos.

4. Discusión: presente y futuro de la InSAR

La InSAR se han convertido en una herramienta de gran utilidad para la medida de los desplazamientos de la superficie del terreno y de las estructuras asentadas sobre el mismo en amplias zonas del territorio. Se ha empleado profusamente en el estudio de riesgos geológicos y cada vez es más utilizada para la auscultación de infraestructuras. La Figura 9 muestra un resumen de las aplicaciones de la InSAR en diferentes tipos de infraestructuras.

Esta técnica puede resultar de gran utilidad en las diferentes fases de las obras civiles. Durante las fases de planificación (i.e. estudios de planeamiento o estudios previos de soluciones) la InSAR permite identificar posibles zonas conflictivas (e.g. áreas afectadas por deslizamientos de ladera a lo largo del corredor de una autovía), permitiendo así evitar estas zonas o adoptar medidas correctoras para paliar posibles afecciones a la obra. Durante las fases de construcción la técnica no permite monitorizar el ámbito de la obra debido a la decorrelación producida por las modificaciones de la superficie del terreno, aunque sí las áreas o elementos contiguos que pudieran verse afectados por la actividad constructiva. Finalmente, durante el periodo de explotación, los datos InSAR permiten llevar a cabo la auscultación de la infraestructura y de sus áreas adyacentes, pudiendo ser incorporados en el proceso de conservación de las infraestructuras para la identificación y control de áreas de deformación (e.g. asentos postconstructivos o inestabilidades de taludes).

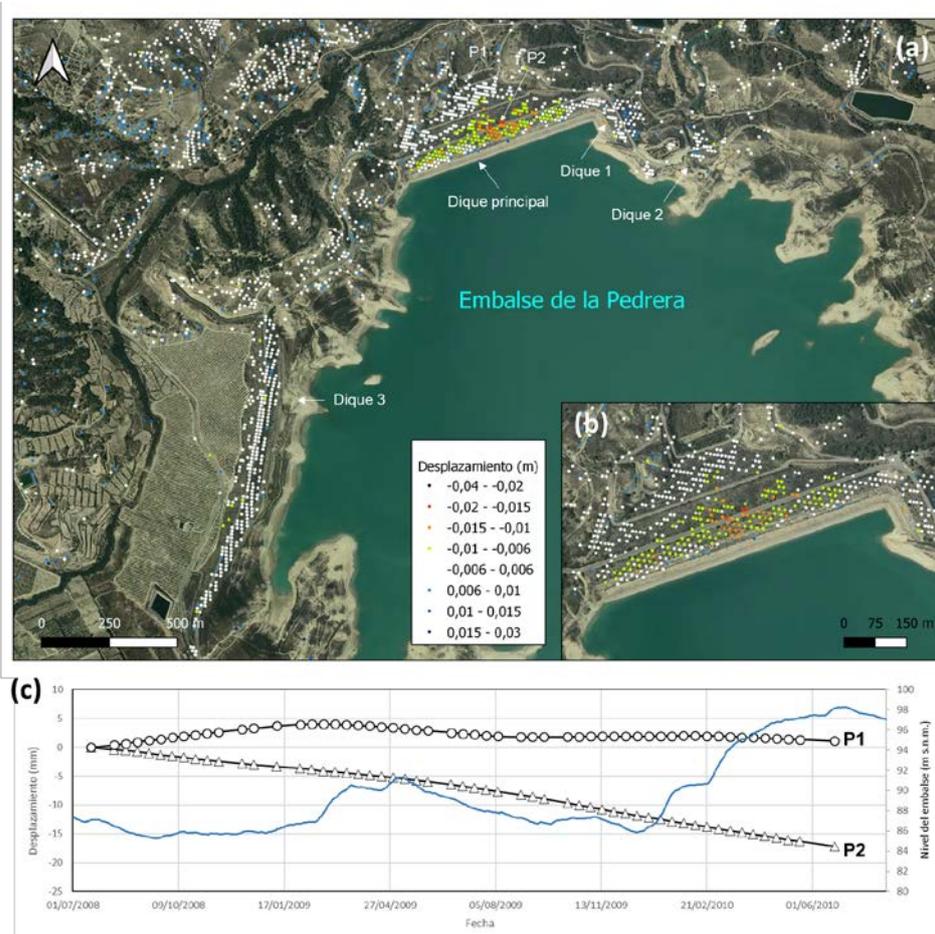


Figura 4. (a) Mapa de desplazamientos InSAR acumulados medidos en el embalse de La Pedrera (Alicante) entre julio de 2008 y junio de 2010 mediante imágenes del satélite TerraSAR-X (banda X). (b) Detalle de los desplazamientos medidos en el dique principal. (c) Evolución de los desplazamientos de dos puntos situados sobre el dique principal.

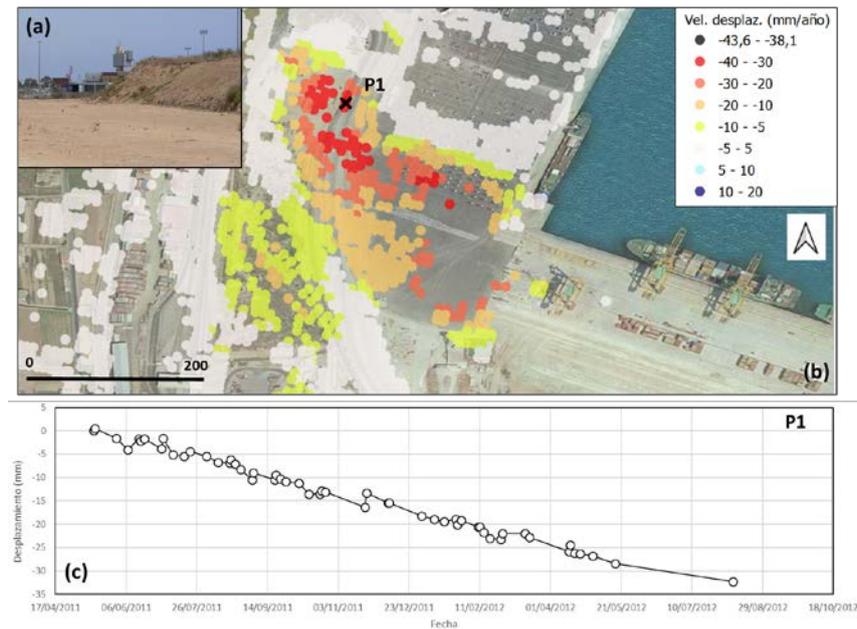


Figura 5. Monitorización de una precarga en el puerto de Valencia mediante InSAR mediante imágenes del satélite CosmoSkyMed (banda X) adquiridas entre el 14/05/2011 y el 08/08/2012: (a) Fotografía del relleno de la precarga; (b) Distribución de PS en la zona de colocación del relleno de la precarga; (c) Evolución de los desplazamientos del punto P1 situado sobre el relleno de la precarga.

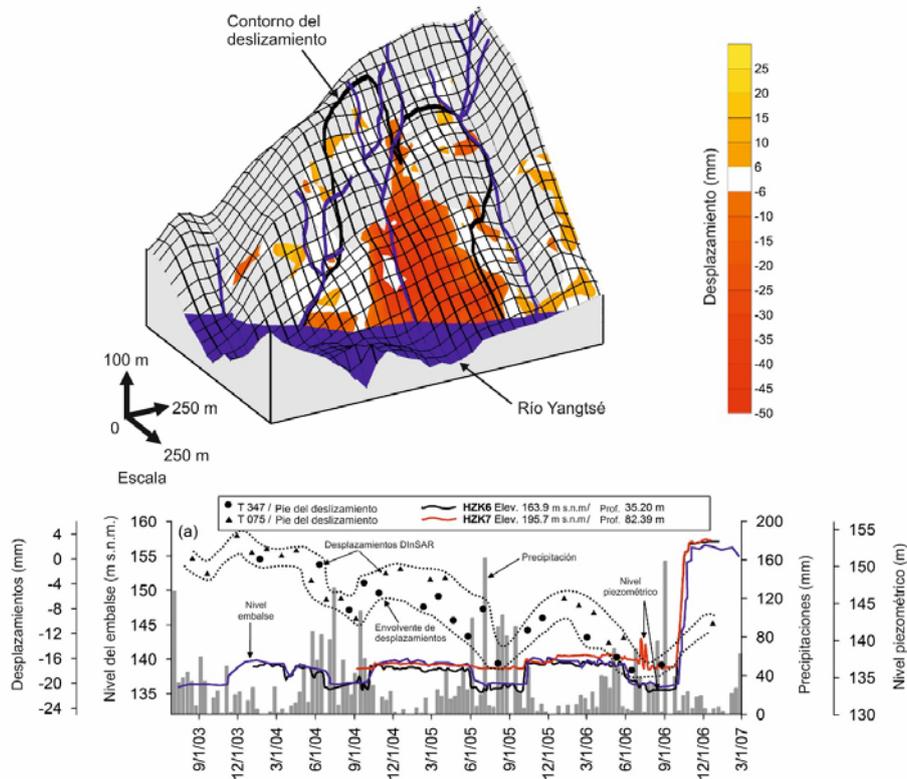


Figura 6. (a) Desplazamientos del deslizamiento de Huangtupo en una ladera del río Yangtsé (embalse de las Tres Gargantas) medidos mediante InSAR a partir de imágenes del satélite ENVISAT ASAR (banda C) entre agosto de 2003 y julio de 2010. (b) Evolución de los desplazamientos (puntos y triángulos) y relación con las precipitaciones (barras verticales), los niveles piezométricos (líneas negra y roja) y el nivel del embalse (línea azul). Las líneas negras discontinuas representan las envolventes de los desplazamientos. Cabe indicar que la ciudad de Badong fue trasladada sobre la ladera mostrada en 1982 con motivo de la construcción de la presa Gezhouba en las tres Gargantas. El

deslizamiento de Huangtupo es uno de los deslizamientos más grandes de las tres gargantas con riesgo de afectación a la población.

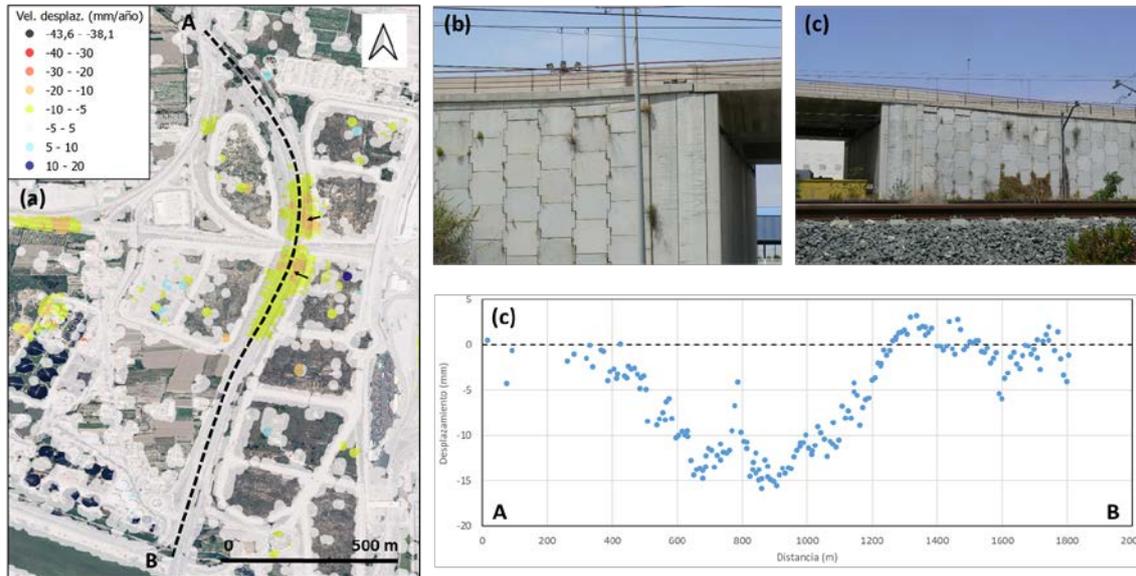
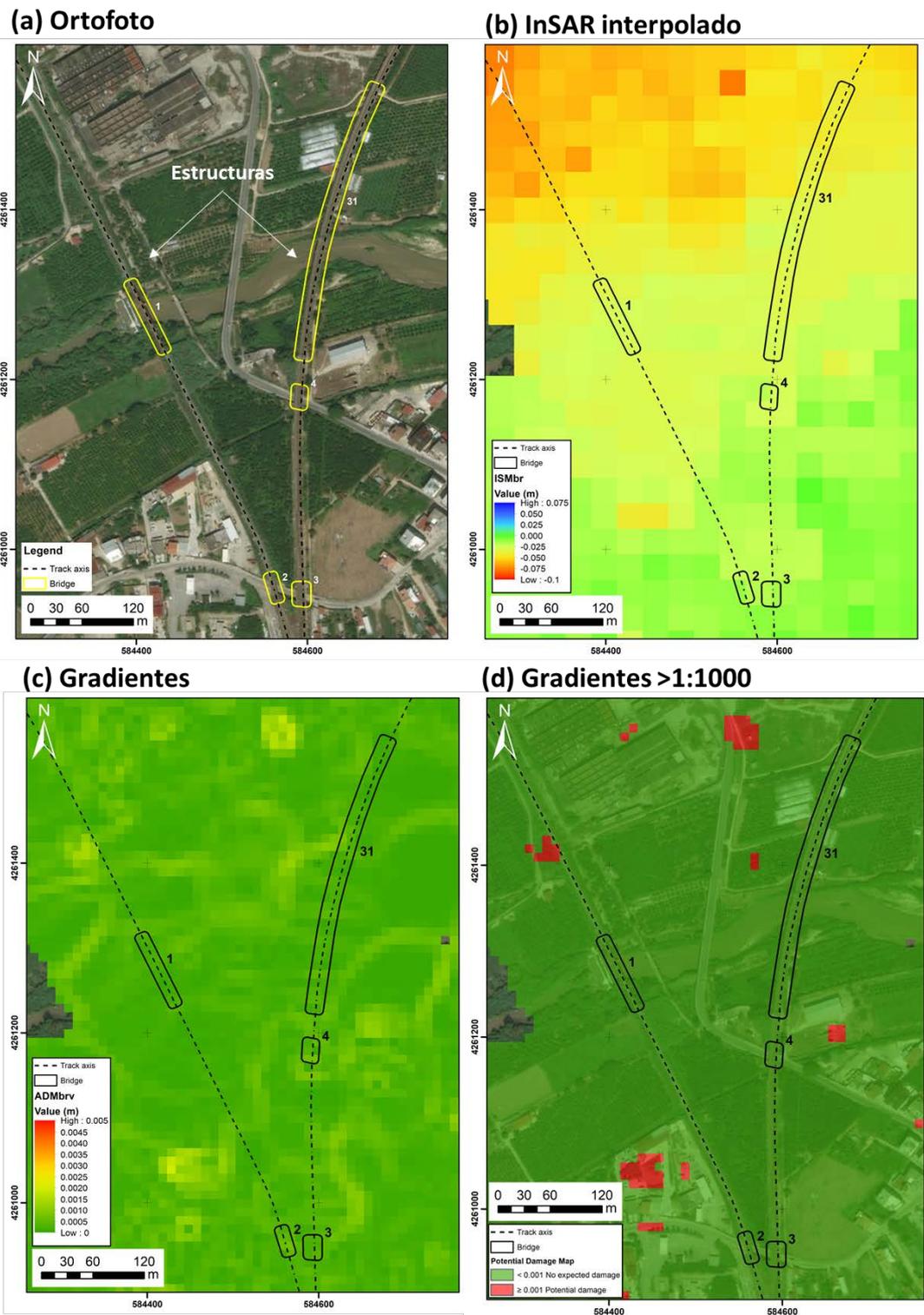


Figura 7. (a) Mapa de desplazamientos de una estructura en el puerto de Valencia mediante InSAR usando imágenes del satélite CosmoSkyMed (banda X) adquiridas entre el 14/05/2011 y el 08/08/2012; (b) y (c) Detalle de las deformaciones producidas por los asientos (obsérvese la apertura de las escamas de los estribos de tierra armada cuya localización se indica mediante flechas en la Fig. (a)). (d) Perfil longitudinal de desplazamientos a lo largo del eje de la carretera.

Las principales ventajas de la InSAR en el ámbito de la ingeniería civil son:

- Permite obtener miles de puntos (i.e. PS) con información espacio-temporal de los desplazamientos en amplias zonas del territorio como por ejemplo una ciudad, el vaso y las presas de embalses o largos tramos de carretera (e.g. las imágenes de Envisat cubren áreas de 100x100 km).
- Proporciona una frecuencia de muestreo superior a la de las técnicas geodésicas clásicas, lo que permite asegurar la calidad de las tendencias de desplazamiento tanto temporales como espaciales y actualizar continuamente los datos. El tiempo de revisita depende del sensor empleado. Por ejemplo, los satélites ERS-1, ERS-2 y ENVISAT (banda C) presentaban un periodo de revisita de 23 días, CosmoSkyMed, PAZ y Terra-SAR-X (banda X) de 11 días y Sentinel-1 (banda C) de 6 días.
- Presenta una precisión muy elevada, situándose en torno a 0.5 mm/año para la velocidades y 5 mm para la deformación (Prati et al. 2010).
- La resolución depende del tipo de sensor empleado. Cuando mayor es su longitud de onda, menor es la resolución. Por ejemplo, los satélites de banda L presentan la menor resolución de procesamiento, los de banda X presentan una mayor resolución y los de banda C proporcionan resoluciones intermedias.
- Permite llevar a cabo análisis históricos desde 1992 de la mayor parte de la superficie de la tierra.



- Figura 5. Evaluación preliminar de estado límite de servicio de estructuras a partir de datos DInSAR en un tramo de la línea de ferrocarril Lamezia Terme-Rosarno (SW de Italia): (a) Ortofoto de las estructuras; (b) Mapa de asentos DInSAR interpolado; (c) Mapa de distorsiones angulares; (d) Clasificación de las distorsiones angulares. Para el cálculo de las distorsiones se ha tenido en cuenta la dimensión media de los vanos de las estructuras. Obsérvese que las zonas en las que los desplazamientos superan la distorsión angular 1:1000 no afectan a las estructuras.

Por otro lado, los inconvenientes principales en relación a su aplicación en ingeniería civil son:

- Imposibilidad de estudiar las zonas sumergidas de puertos, canales o presas, por ejemplo, dado que las ondas radar son incapaces de penetrar en el agua dispersando o reflejando la señal.
- Los movimientos de componente N-S no pueden ser detectados por la InSAR debido a las órbitas polares descritas por los satélites. Esta es una limitación importante para ciertas infraestructuras en las que los movimientos esperados presentan esta componente de desplazamiento.
- Decorrelación de la señal por la ocurrencia de cambios significativos en la escena, impidiendo la monitorización durante la ejecución de obras que alteren significativamente la superficie del terreno, permitiendo únicamente medir los desplazamientos cuando estas son finalizadas o se detienen temporalmente. La vegetación y la nieve pueden también producir importantes decorrelaciones. A su vez, los artefactos atmosféricos pueden introducir ciertos errores en las mediciones InSAR aunque el desarrollo de técnicas de corrección cada vez más avanzadas ha reducido considerablemente esta fuente de error.

Aunque todos los ejemplos mostrados anteriormente corresponden a procesados realizados con imágenes adquiridas desde satélite, existe la posibilidad de monitorizar desplazamientos de la superficie del terreno usando datos de radar de apertura sintética terrestre (Ground-based SAR, GB-SAR, en inglés). Este es un sistema en el que las imágenes SAR se adquieren desde un sensor situado en tierra que apunta a la infraestructura que se desea monitorizar, mejorando considerablemente la resolución, la precisión y la frecuencia de las medidas. Este sistema ha sido aplicado con éxito en la monitorización de presas, edificios y movimientos de ladera ([e.g. Wang et al. 2020](#)). Asimismo, en los últimos años se han desarrollado diversas experiencias exitosas de interferometría SAR con sistemas montados sobre vehículos aéreos no tripulados ([Rosen et al. 2006](#)).

El incremento de la capacidad de cálculo y la disponibilidad de imágenes SAR de forma regular y gratuita desde el lanzamiento del satélite europeo Sentinel-1 permite llevar a cabo una actualización continua del procesado InSAR, es decir, proporciona una actualización de los mapas y las series temporales de desplazamiento cada vez que el satélite adquiere una nueva imagen de la zona de interés cada pocos días ([e.g. Bakon et al. 2020](#)). Esto permite hacer un seguimiento continuo muy preciso de las infraestructuras afectadas por desplazamientos, facilitando la implementación de sistemas de alarma temprana y la toma de decisiones en función de la evolución de los movimientos medidos.

Por último, cabe indicar que, por su carácter espacio-temporal, los datos InSAR pueden ser fácilmente integrados en sistemas de información geográfica (SIG) o en modelos BIM para facilitar la gestión de proyectos, la construcción de obras y la gestión de las infraestructuras.

5. Comentarios finales

La InSAR es una técnica remota que permite medir los desplazamientos de la superficie de la tierra. Las principales bondades de la InSAR son su gran cobertura espacial (de hasta 10.000 km²)

y temporal (se dispone de imágenes desde 1992), la elevada precisión (subcentimétrica) y la gran frecuencia de muestreo (cada pocos días) que la convierten en un sistema de medida de los desplazamientos en el ámbito de la ingeniería civil sin precedentes. Puede ser empleada en todas las fases de la obra (i.e. planificación, construcción y explotación) y en diferentes tipos de infraestructuras (i.e. túneles y obras subterráneas, presas y embalses, infraestructuras lineales, puertos, aeropuertos, planeamiento urbanístico y edificación).

	Vías de comunicación y transporte	Identificación (mapas de ADA), caracterización y monitorización de anomalías de asientos de estructuras e inestabilidades de taludes/laderas a lo largo de la traza y zonas adyacentes. Evaluación de ELS de las estructuras.
	Túneles y obras subterráneas	Control de asientos durante la construcción de las obras. Monitorización y evaluación de ELS de los edificios adyacentes durante la excavación de túneles y obras subterráneas.
	Puertos y costas	Identificación (mapas de ADA), caracterización y monitorización de anomalías de asiento e inestabilidades de los diques, muelles, precargas, rellenos y taludes/laderas costeros.
	Presas y embalses	Monitorización de deformaciones de presas. Identificación (mapas de ADA), caracterización, monitorización y sistema de alarma temprana de movimientos de ladera en embalses.
	Aeropuertos	Identificación de anomalías (mapas de ADA) y monitorización de desplazamientos en las pistas de aterrizaje, aproximación y despegue, plataformas y terminales.
	Edificación	Identificación y monitorización de anomalías de asiento de edificaciones. Evaluación de ELS de los edificios. Monitorización de afecciones a edificios por obras adyacentes.
	Planeamiento urbanístico	Identificación (mapas de ADA), caracterización y monitorización de anomalías para la elaboración de cartografías de zonación de riesgos.

Figura 9. Aplicaciones de la InSAR en diferentes tipos de infraestructuras. ADA: Área de desplazamiento activo; ELS: Estado límite de servicio.

Una de las aplicaciones principales de la InSAR consiste en la identificación y mapeo de anomalías. Sin embargo, el principal uso de la InSAR es la monitorización de desplazamientos a lo largo del tiempo (e.g. asientos del terreno, movimientos de ladera y taludes, asientos en superficie producidos por el paso de un túnel). También se han llevado a cabo algunas experiencias para la detección de movimientos precursores previos a la rotura o fallo de estructuras mediante InSAR. El análisis conjunto de datos InSAR con información complementaria permite además caracterizar adecuadamente los procesos subyacentes y establecer relaciones con los factores desencadenantes o condicionantes de los desplazamientos. Por otro lado, los movimientos medidos adecuadamente tratados permiten evaluar los ELS de ciertas infraestructuras. Por último, la información InSAR permite estimar parámetros del terreno, así como calibrar y refinar los modelos analíticos y numéricos.

El radar de apertura sintética terrestre y los sensores radar montados sobre vehículos aéreos no tripulados construye una alternativa al radar de satélite a la hora de medir desplazamientos de infraestructuras con gran precisión, resolución y/o frecuencia. Además, la adquisición continua de imágenes SAR de la superficie de la tierra abre las puertas a la implementación de estrategias de actualización continua de la información sobre las deformaciones de las infraestructuras.

En definitiva, la técnica InSAR es una herramienta con un enorme potencial dentro del campo de la ingeniería civil que ofrece multitud de posibilidades y aplicaciones que contribuyen a mejorar el diseño, la construcción, la conservación y la seguridad de las infraestructuras.

Referencias bibliográficas

Bakon, M., Czikhardt, R., Papco, J., Barlak, J., Rovnak, M., Adamisin, P. & Perissin, D. 2020. remotIO: A Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR Infrastructure Monitoring Service with Automatic Updates and Data Mining Capabilities. *Remote Sensing*, 12, 1892.

Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., Mateos, R., Ligüerzana, S., López, C. & Moretti, S. 2017. A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*, 9, 1002.

Bonì, R., Meisina, C., Teatini, P., Zucca, F., Zoccarato, C., Franceschini, A., Ezquerro, P., Béjar-Pizarro, M., Antonio Fernández-Merodo, J., Guardiola-Albert, C., Luis Pastor, J., Tomás, R. & Herrera, G. 2020. 3D groundwater flow and deformation modelling of Madrid aquifer. *Journal of Hydrology*, 585, 124773, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124773>.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68, 3-14, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00195-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3).

Dai, K., Li, Z., Xu, Q., Bürgmann, R., Milledge, D.G., Tomás, R., Fan, X., Zhao, C., Liu, X., Peng, J., Zhang, Q., Wang, Z., Qu, T., He, C., Li, D. & Liu, J. 2020. Entering the Era of Earth Observation-Based Landslide Warning Systems: A Novel and Exciting Framework. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8, 136-153, doi: 10.1109/MGRS.2019.2954395.

Del Soldato, M., Solari, L., Poggi, F., Raspini, F., Tomás, R., Fanti, R. & Casagli, N. 2019. Landslide-Induced Damage Probability Estimation Coupling InSAR and Field Survey Data by Fragility Curves. *Remote Sensing*, 11, 1486.

Ezquerro, P., Del Soldato, M., Solari, L., Tomás, R., Raspini, F., Ceccatelli, M., Fernández-Merodo, J.A., Casagli, N. & Herrera, G. 2020. Vulnerability Assessment of Buildings due to Land Subsidence Using InSAR Data in the Ancient Historical City of Pistoia (Italy). *Sensors*, 20, 2749.

Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., Shi, X., Chen, M., Zhang, R., Qiu, Q. & Lu, Y. 2019. Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101886, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.019>.

Prati, C., Ferretti, A. & Perissin, D. 2010. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49, 161-170, doi: 10.1016/j.jog.2009.10.011.

Rosen, P.A., Hensley, S., Wheeler, K., Sadowy, G., Miller, T., Shaffer, S., Muellerschoen, R., Jones, C., Zebker, H. & Madsen, S. 2006. UAVSAR: a new NASA airborne SAR system for science and technology research. 2006 IEEE Conference on Radar, 8 pp., doi: 10.1109/RADAR.2006.1631770.

Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H. & Tessitore, S. 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1341-1360, doi: 10.5194/nhess-14-1341-2014.

Sillerico, E., Ezquerro, P., Marchamalo, M., Herrera, G., J. D. & Martínez Marín, R. 2015. Monitoring ground subsidence in urban environments: M-30 tunnels under Madrid City (Spain). *Ingeniería e Investigación*, 35, 30-35, doi: <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n2.46614>.

Tomás, R., Li, Z., Liu, P., Singleton, A., Hoey, T. & Cheng, X. 2014. Spatiotemporal characteristics of the Huangtupo landslide in the Three Gorges region (China) constrained by radar interferometry. *Geophysical Journal International*, 197, 213-232, doi: 10.1093/gji/ggu017.

Tomás, R., Pagán, J.I., Navarro, J.A., Cano, M., Pastor, J.L., Riquelme, A., Cuevas-González, M., Crosetto, M., Barra, A., Monserrat, O., Lopez-Sanchez, J.M., Ramón, A., Ivorra, S., Del Soldato, M., Solari, L., Bianchini, S., Raspini, F., Novali, F., Ferretti, A., Costantini, M., Trillo, F., Herrera, G. & Casagli, N. 2019. Semi-Automatic Identification and Pre-Screening of Geological–Geotechnical Deformational Processes Using Persistent Scatterer Interferometry Datasets. *Remote Sensing*, 11, 1675.

Wang, P., Xing, C. & Pan, X. 2020. Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20, 396, doi: 10.3390/s20020396.