

Contribución de la interferometría SAR diferencial (InSAR) al estudio de la subsidencia del terreno de la Vega Media del Segura (Murcia): experiencias y tendencias futuras

Tomás, R. ⁽¹⁾, Herrera, G. ⁽²⁾, López-Sánchez, J. M. ⁽³⁾, Mulas, J. ⁽²⁾, Fernández-Merodo, J. A. ⁽²⁾, Mallorquí, J. J. ⁽⁴⁾, Aragón, R. ⁽²⁾, Sanabria, M. ⁽²⁾, Tessitore, S. ⁽⁵⁾, Vicente-Guijalba, F. ⁽⁶⁾, Guardiola-Albert, C. ⁽²⁾, Cano, M. ⁽¹⁾, Béjar-Pizarro, M. ⁽²⁾, Hornero, J. E. ⁽²⁾, Ezquerro, P. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante, Apdo. correos 99, 03080, Alicante, España. {roberto.tomas, miguel.cano}@ua.es

⁽²⁾ Geohazards InSAR laboratory and Modeling group. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid, España. {g.herrera, j.mulas, r.aragon, m.sanabria, c.guardiola, j.hornero}@igme.es

⁽³⁾ Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante, Apdo. correos 99, 03080, Alicante, España. juanma.lopez@ua.es

⁽⁴⁾ Departamento de Teoria Senyal i Comunicacions. Universidad Politècnica de Catalunya. Edifici D3, C/ Jordi Girona, 1-3. 08034 Barcelona, España. mallorqui@tsc.upc.edu

⁽⁵⁾ Department of Earth Sciences, Environment and Resources, Federico II University of Naples, Largo San Marcellino 10, 80138 Nápoles, Italia. serena.tessitore@unina.it

⁽⁶⁾ Dares Technology, c/ Esteve Terrades, 1, Edificio RDIT, despacho 118, Parc UPC – PMT, 08860, Castelldefels, Barcelona, España. fvicente@dares.tech

Resumen: La Vega Media del Segura (VMS) se localiza en el sector este de la Cordillera Bética. El valle está relleno por sedimentos recientes (Holoceno-Plioceno) potencialmente deformables que han sido depositados por la acción de los ríos Segura y Guadalentín. La extracción de agua subterránea de los niveles permeables que constituyen el acuífero conlleva la consolidación de los materiales deformables, dando lugar a asentamientos de la superficie del terreno. La Interferometría SAR diferencial (InSAR) es una técnica remota que permite monitorizar de forma efectiva y precisa amplias extensiones del territorio. En este trabajo se describe las diferentes experiencias llevadas a cabo por los autores en la VMS, que han permitido avanzar en el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero para la comprensión del comportamiento geomecánico del subsuelo, así como para monitorizar los desplazamientos del terreno desde el año 1994 usando imágenes ERS, ENVISAT y TerraSAR-X, contribuyendo de forma efectiva al estudio, caracterización y modelización del fenómeno. Por último, se describen las tareas futuras a desarrollar haciendo uso de nuevos sensores SAR con el fin de asegurar la continuidad de la información disponible para el estudio de este fenómeno a lo largo del tiempo.

Palabras clave: subsidencia, InSAR, monitorización, Vega Media del Segura.

Contribution of differential SAR interferometry (InSAR) to the study of land subsidence of the Vega Media of the Segura (Murcia): experiences and future trends

Abstract: The Vega Media of the Segura (VMS) is located in the eastern sector of the Betic Cordillera. The valley is filled of recent sediments (Holocene-Pliocene) potentially deformable, which have been deposited by the action of the Segura and Guadalentín rivers. Groundwater extraction from the existing permeable units that constitute the aquifer involves the consolidation of the deformable layers of soil, generating settlements on ground surface. Differential SAR Interferometry (InSAR) is a remote sensing technique which allows monitoring in an effective and precise way wide areas of the territory. In this work the different experiences developed by the authors in the VMS, which have allowed advancing in the understanding of the hydrogeological performance of the aquifer for the comprehension of the geomechanical behaviour of the ground, as well as to monitoring land subsidence from 1994 using ERS, ENVISAT and TerraSAR-X imagery contributing in an effective way to the study, characterization and modelling of the phenomenon, are described. Finally, the future tasks to be developed using new SAR sensors to ensure the continuity of the available information for the study of this phenomenon along time are depicted.

Keywords: subsidence, InSAR, monitoring, Vega Media of the Segura.

1. INTRODUCCIÓN

La subsidencia del terreno consiste en el hundimiento paulatino de la superficie terrestre debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas

(Corapcioglu, 1984) como, por ejemplo, la minería o la extracción de agua, gas o petróleo.

La subsidencia del terreno por extracción de agua es un problema creciente en todo el mundo. Actualmente, en España, se han documentado más de diez áreas afectadas por este tipo de fenómeno (Tomás *et al.*, 2014).

Las técnicas de interferometría SAR diferencial (InSAR) se han convertido en una herramienta habitual en el estudio de la subsidencia del terreno (Tomás y Li, 2017). Estas proporcionan información espacio-temporal del fenómeno que puede ser utilizada con diferentes objetivos.

En este trabajo se describe las diferentes experiencias llevadas a cabo por los autores en la Vega Media del Segura (VMS) mediante InSAR a lo largo de los últimos 15 años y que han permitido avanzar considerablemente en el conocimiento de este fenómeno.

2. LA VEGA MEDIA DEL SEGURA

La Vega Media del Segura se extiende desde la presa de Contraparada hasta el límite provincial con Alicante sumando una superficie de unos 206 km². La explotación intensiva del acuífero detrítico para satisfacer las demandas agrícolas durante los periodos de sequía (e.g. 1992-1995, 2000-2001 y 2005-2008) ocasionó descensos de los niveles piezométricos que produjeron la consolidación de los suelos como consecuencia del incremento de las tensiones efectivas y, por tanto, el asiento de la superficie del terreno (IGME-COPOT, 2010).

Desde un punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra situada en el sector oriental de la Cordillera Bética. Los sedimentos recientes se han depositado gradualmente sobre los materiales más antiguos. El basamento está constituido por materiales Permo-Triásicos de las Zonas Internas de las Cordillera Bética que sólo afloran en los bordes de la cuenca. El relleno de la cuenca queda dividido en tres unidades principales. Los materiales más antiguos están constituidos por margas del Mioceno Superior con potencias superiores a 600 m (Mulas *et al.*, 2003). Sobre estos materiales se disponen margas y arcillas con intercalaciones de conglomerados y areniscas de edad Plio-Cuaternaria que presentan un gran interés desde el punto de vista hidrogeológico. La tercera unidad está constituida por depósitos continentales recientes constituidos por abundante arcilla y limo en las zonas de llanura de inundación, y arenas en los canales y abanicos aluviales. El espesor de estos materiales varía entre 3 y 30 metros (Rodríguez-Jurado *et al.*, 2000).

Desde el punto de vista hidrogeológico, pueden diferenciarse dos unidades principales (Aragón *et al.*, 2006): a) Unidad superficial: sedimentos recientes, superficiales, de gran compresibilidad con propiedades hidrogeológicas pobres; b) Unidad profunda: presenta mejores características geotécnicas, se sitúa debajo de los sedimentos recientes y consiste en una serie de alternancias de grava y arcillas que constituyen un acuífero multicapa muy productivo.

3. DATOS INSAR

Los procesados realizados en la VMS se han llevado a cabo con imágenes procedentes de los sensores ERS-1, ERS-2, ENVISAT y TerraSAR-X y han permitido cubrir prácticamente todo el periodo temporal 1994-2012. Los primeros resultados se obtuvieron a principios de este

siglo (Tomás *et al.*, 2005), permitiendo el postprocesado de imágenes históricas de los satélites ERS-1 y ERS-2 correspondientes a periodos anteriores para los que no se disponía de ningún tipo de información cuantitativa sobre el fenómeno de la subsidencia en la VMS.

Posteriormente, se han llevado a cabo numerosos procesados con diferentes códigos e imágenes (Figura 1). El procesado de las diferentes *sets* imágenes se ha realizado utilizando dos códigos diferentes: *Coherence Pixel Technique* (CPT) y *Stable Point Network* (SPN).

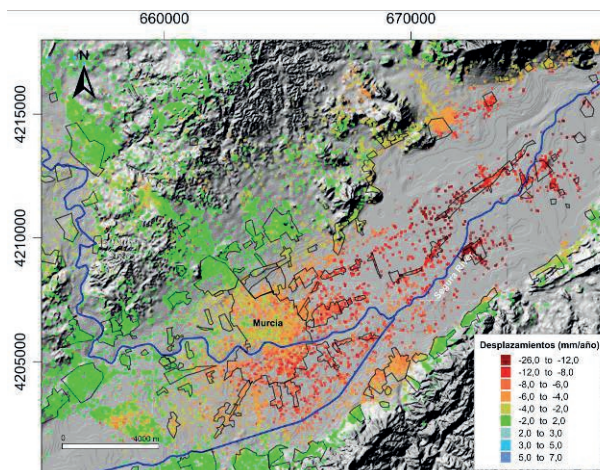


Figura 1. Tasa de desplazamiento (mm/año) de la superficie del terreno medida mediante InSAR en el periodo 2004-2008 en la VMS.

4. APLICACIONES

Los datos InSAR de la VMS disponibles han sido empleados para diferentes aplicaciones:

- Identificación de zonas afectadas por subsidencia.
- Caracterización
- Monitorización
- Modelización
- Evaluación de daños

En los subapartados siguientes se detallan cada una de las aplicaciones llevadas a cabo a partir de datos InSAR en la VMS.

4.1. Identificación de zonas afectadas por subsidencia

La aplicación sistemática de las técnicas InSAR ha permitido localizar e identificar zonas afectadas por subsidencia del terreno en las que no se tenía constancia de la ocurrencia del fenómeno, proporcionando información sobre la extensión de la zona y las tasas de deformación. En la VMS, el procesado sistemático ha permitido identificar pequeñas zonas que presentan tasas de subsidencia importantes en el sector E del valle.

4.2. Monitorización

Las series temporales obtenidas a través de las técnicas InSAR facilitan el estudio de la evolución de la subsidencia del terreno. En este sentido, en la Vega Media del Segura se han identificado periodos de estabilidad, de asiento (asociados normalmente a extracción masiva de agua

durante periodos de sequía) e incluso de levantamiento del terreno como consecuencia del hinchamiento de los suelos por la reducción incremento de las tensiones efectivas por efecto de la recuperación de los niveles piezométricos (Figura 2).

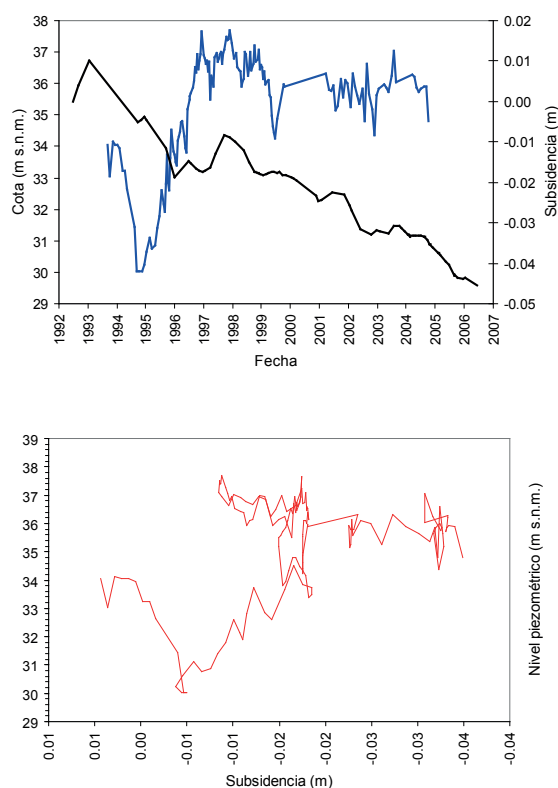


Figura 2. (Superior) Series temporales de deformaciones de la superficie del terreno (línea negra) y del nivel piezométrico en el entorno del piezómetro H-7. (Inferior) Curva tensión-deformación del sistema acuífero.

4.3. Caracterización

Una vez identificadas las diferentes zonas afectadas por subsidencia del terreno, las técnicas InSAR han permitido obtener una mayor comprensión de los patrones de deformación (Figura 2). Asimismo, los datos remotos facilitan la realización de análisis de la influencia de diferentes factores desencadenantes (e.g. las variaciones piezométricas) y condicionantes (e.g. el espesor de suelos) sobre la magnitud y extensión de los asentamientos mediante su integración en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las relaciones entre el espesor de suelos deformables y magnitud de los asentamientos, la evolución del nivel freático y de la magnitud de los asentamientos, la proximidad a los pozos de bombeo, las litologías presentes en el valle o la distancia al río Segura son algunas de las relaciones estudiadas por Herrera *et al.*, (2009), Tomás *et al.* (2011), Tessitore *et al.* (2016) y Conesa *et al.* (2016).

4.4. Modelización

La modelización constituye la última etapa en los estudios de subsidencia del terreno. Esta tarea puede resultar extremadamente compleja si no se dispone de información complementaria. Normalmente, los datos InSAR pueden emplearse de dos formas diferentes para este propósito:

- Para calibrar el modelo de subsidencia y posteriormente emplearlo para la predicción de escenarios futuros de subsidencia.
- Para validar modelos hidrogeológicos o geotécnicos desarrollados con información independiente.

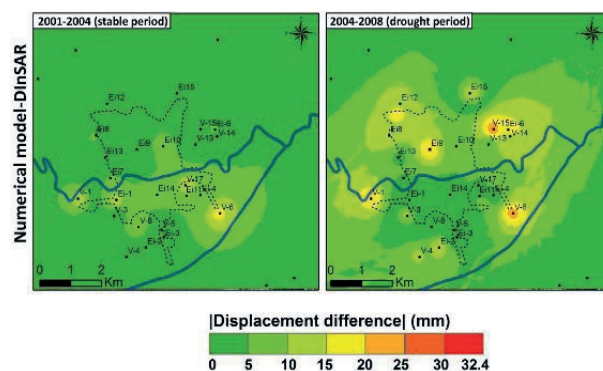


Figura 3. Diferencias absolutas entre los datos InSAR y los resultados del modelo numérico interpolados para los periodos de estudio 2001-2004 y 2004-2008, respectivamente. Los puntos corresponden a la localización de los extensómetros (Tessitore *et al.*, 2016).

Herrera *et al.*, (2009) desarrollaron un modelo geotécnico 1-D mediante el método de elementos finitos, obteniendo diferencias entre ambas series temporales de $5,5 \pm 4,7$ mm. De forma similar, Tessitore *et al.* (2016) modelizaron la subsidencia del terreno en 21 sondeos de la VMS. La interpolación de la información y su comparación con los datos InSAR y otra información disponible (i.e. extensómetros) (Figura 3) permitió discriminar aquellas zonas que presentaban un comportamiento elástico y por lo tanto estaban, presumiblemente, sobreconsolidadas. En ambos trabajos, el software empleado fue el Gehomadrid, desarrollado por el grupo de Modelos Matemáticos en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Madrid. Por otro lado, Tomás *et al.* (2010) aplicaron un sencillo modelo hidrogeológico implementado en Excel que fue calibrado a través de las curvas tensión-deformación (Figura 2) elaboradas con los datos InSAR. El modelo mostró resultados satisfactorios en la predicción de periodos posteriores con diferencias medias de $3,2 \pm 2,5$ mm.

4.5. Evaluación de daños

La subsidencia del terreno asociada al descenso piezométrico ocurrido entre 1992 y 1995 en la VMS produjo daños en las infraestructuras urbanas y en unos 150 edificios de la ciudad de Murcia valorados en unos 50 millones de euros (Rodríguez y Mulas, 2002; Mulas *et al.*, 2003).

En la Vega Media del Segura se ha hecho uso de datos InSAR para llevar a cabo la evaluación preliminar de daños en edificios y otras infraestructuras, así como información de apoyo para la interpretación de los daños observados. Herrera et al. (2010) y Bru et al. (2013) mostraron ejemplos de aplicación de la interferometría SAR para la identificación de daños en edificaciones e infraestructuras urbanas afectadas por la subsidencia del terreno.

5. OBSERVACIONES FINALES Y TENDENCIAS FUTURAS

La técnica InSAR ha sido utilizada de forma efectiva en la VMS para la identificación de zonas de afectadas por subsidencia desde 1994, la monitorización del fenómeno, su caracterización, para el desarrollo de modelos que reproduzcan el fenómeno, así como como herramienta de apoyo en el estudio y evaluación de daños en edificios e infraestructuras. Por lo tanto, la técnica InSAR se ha convertido en una herramienta imprescindible que proporciona una visión espacio-temporal global del fenómeno en la VMS.

El reciente lanzamiento del satélite europeo Sentinel-1 (2014-actualidad) y el próximo satélite español PAZ que previsiblemente entrará operativo a partir del año 2018, permitirán mejorar la cobertura espacial y temporal de imágenes en la VMS asegurando la continuidad en los trabajos de investigación a desarrollar en la zona. Además, el empleo de otros sensores de mayor resolución (e.g. CosmoSkyMed o TerraSAR-X) permitirá mejorar algunas de las aplicaciones en las que ya se están trabajando, como la evaluación de los estados límites de servicio (ELS) de las edificaciones atendiendo a criterios de diseño geotécnico.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aragón, R., Lambán, J., García Aróstegui, J.L., Hornero, J., Fernández Grillo, A.I. 2006. Efectos de la explotación intensiva de aguas subterráneas en la ciudad de Murcia (España) en épocas de sequía: orientaciones para una explotación sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 117(3), 389-400.
- Bru, G. et al. 2013. Control of deformation of buildings affected by subsidence using persistent scatterer interferometry. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9, 188-200,
- Conesa-García et al. 2016. Deformational behaviours of alluvial units detected by advanced radar interferometry in the Vega Media of the Segura river, southeast Spain. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 98, 15-38.
- Corapcioglu, M.Y. 1984. Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), *NATO ASI Series E.82*, Martinus Nijhoff Publishers, 369-444.
- Herrera, G. et al. 2009. Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data – modelling and validation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 647-661.
- Herrera, G. et al. 2010. Analysis of subsidence using TerraSAR-X data: Murcia case study. *Engineering Geology*, 116, 284-295.
- IGME-COPOT. 2010. *La Subsidencia del terreno en la ciudad y área metropolitana de Murcia: Modelización, seguimiento y control*. Mulas J., Aragón R., Clemente A.A. (coord.). Instituto Geológico y Minero de España y Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. 242 pp.
- Mulas, J., Aragón, R., Martínez, M., Lambán, J., García-Arostegui, J.L., Fernández-Grillo, A.I., Hornero, J., Rodríguez, J., Rodríguez, J.M. 2003. Geotechnical and hydrological analysis of land subsidence in Murcia (Spain). *Proc. 1ª International Conference on Groundwater in Geo-logical Engineering, RMZ-M&G, Materials and Geoenvironment*, Bled, Slovenia, 50, 249-252.
- Rodríguez Jurado, J., Martínez Corbella, M., Mulas, J., Rodríguez Ortiz, J.M. 2000. Establecimiento de un modelo geológico para el estudio de la subsidencia por rebajamiento del nivel freático. *Geotemas*, 1, 155-158.
- Rodríguez Ortiz, J.M., Mulas, J. 2002. Subsidencia generalizada en la ciudad de Murcia (España). En Ayala Carcedo, J. y Olcina Cantos Coords., *Riesgos Naturales* (pp. 459-463). Barcelona: Editorial Ariel.
- Tessitore, S. et al., 2016. Comparison of water-level, extensometric, DInSAR and simulation data for quantification of subsidence in Murcia City (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, 24, 727-747.
- Tomás, R. et al. 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, 98, 269-283.
- Tomás, R., et al. 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental Earth Sciences*, 71, 163-181.
- Tomás, R., Li, Z. 2017. Earth Observations for Geohazards: Present and Future Challenges. *Remote Sensing*, 9, 194.
- Tomás, R. et al. 2011. Persistent Scatterer Interferometry subsidence data exploitation using spatial tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study. *Journal of Hydrology*, 400, 411-428.