

COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA RADAR MEDIANTE DEFORMACIONES GENERADAS POR DISOLUCIÓN DE EVAPORITAS, MINERÍA Y DESLIZAMIENTOS (VALLE DEL EBRO, ESPAÑA)

C. Castañeda (*), F. Gutiérrez(**), J. P. Galve (**), N. Pourthié (***), J. C. Souyris (***), y M. Manunta (****).

(*). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda. Motañana, 930.
50059 Zaragoza, ccastanneda@aragon.es

(**) Universidad de Zaragoza, c/. Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza.

(***) Centre National Etudes Spatiales (C.N.E.S.), 18 av. E. Belin, 31401 Toulouse, France.

(****) Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment (C.N.R.), Via Diocleziano 328, 80124 Naples.

RESUMEN

Se ha aplicado la interferometría radar para detectar y medir deformaciones del terreno con distinto origen en un tramo del valle del Ebro en los alrededores de Zaragoza (NE de España). Para ello se han utilizado 29 imágenes ERS-1/2 tomadas en un intervalo de tiempo de cinco años, entre 1995 y 2000. Por un lado se ha analizado la capacidad de la interferometría convencional para detectar zonas afectadas por deformación activa. Por otro lado se ha aplicado la técnica de interferometría multitemporal SBAS proporcionando un mapa de deformación con precisión subcentimétrica. Éste ha permitido cuantificar magnitudes y tasas de subsidencia relacionadas con: (1) dolinas generadas por disolución de evaporitas del sustrato; (2) deslizamientos en el escarpe en la Fm. Yesos de Zaragoza sobre la llanura aluvial del Ebro; (3) minería de sal en Remolinos por el método de huecos y pilares. La subsidencia debida a esta explotación era anteriormente desconocida. Los resultados obtenidos mediante ambos métodos se han contrastado con la información geomorfológica disponible.

ABSTRACT

Radar interferometry has been applied in a stretch of the Ebro River valley in the surroundings of Zaragoza city (NE Spain) in order to detect and measure different types of ground deformation. A total of 29 ERS-1/2 images taken over five years (1995-2000) have been processed. First, capability of the conventional interferometry to detect areas affected by ground deformation has been analysed. Second, a deformation map with sub-centimetric accuracy has been produced by means of the SBAS multitemporal interferometry. This map has provided values of subsidence rate and magnitude associated with: (1) sinkholes caused by the karstification of the evaporitic bedrock; (2) landslides in the gypsum escarpment that constitutes the northern margin of the Ebro alluvial plain; (3) salt mining by the room and pillar method in Remolinos. Our study has provided the first account of active subsidence in the area underlain by the salt mine. The results obtained with both methods have been compared with the available geomorphological information.

Palabras clave: interferometría, SBAS, subsidencia, karst, Ebro.

INTRODUCCIÓN

La interferometría radar permite medir variaciones milimétricas de la superficie topográfica cuando se dan las condiciones adecuadas. Se ha empleado para estudiar diferentes tipos de deformación lenta a escala regional y local. Entre las aplicaciones más espectaculares se encuentran los desplazamientos cosísmicos relacionados con fallas activas (Massonet *et al.* 1993), las deformaciones asociadas a actividad volcánica e intrusiones de magma (Sigmundsson 1999), o los movimientos de las masas glaciares (Goldstein *et al.* 1993). También destacan los estudios de subsidencia urbana (Cascini *et al.* 2006), minera (Herrera *et al.* 2007), y la producida por extracción de agua subterránea (Amelung *et al.* 1999).

En los últimos años, las técnicas de interferometría multitemporal y las basadas en puntos reflectores (Berardino *et al.* 2002) han permitido reducir las limitaciones planteadas por los condicionantes atmosféricos a la técnica DInSAR convencional, proporcionando mapas de deformación de la superficie del terreno y la evolución temporal de dicha deformación. Gran parte de las aplicaciones actuales de la interferometría radar se basan en estas técnicas, desarrolladas por escasos equipos, principalmente empresas, y enfocadas a la planificación urbana y al análisis y gestión de riesgos (Ferretti *et al.* 2004) y desastres naturales (www.terrafirma.eu.com).

La interferometría radar se ha aplicado en pocas ocasiones al estudio de dolinas, habiéndose

desarrollado la mayoría de los trabajos existentes en terrenos evaporíticos (Baer *et al.* 2002; Closson *et al.* 2005) donde las tasas de disolución y subsidencia suelen ser muy superiores a las de los carbonatados (Gutiérrez, 2009). El objetivo de este trabajo es mostrar y comparar los resultados obtenidos mediante dos métodos DInSAR sobre la deformación de la superficie del terreno en un sector del valle del Ebro con sustrato evaporítico.

CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

En el sector estudiado, el valle del Ebro se ha excavado en formaciones evaporíticas terciarias con disposición horizontal. En superficie, el sustrato es fundamentalmente yeso, mientras que en profundidad, además de yeso y anhidrita existen unidades de halita y glauberita que alcanzan decenas de metros de espesor (Salvany *et al.* 2007). El río Ebro a lo largo de su evolución ha migrado hacia el norte generando en la Fm. Yesos de Zaragoza un escarpe de más de 150 m afectado por numerosos deslizamientos, y una secuencia escalonada de terrazas y glacis en la margen opuesta (Gutiérrez *et al.* 1994). Los depósitos aluviales, con abundantes deformaciones gravitacionales, localmente rellenan cubetas de disolución de hasta 60 m de espesor generadas por subsidencia sinsedimentaria (Guerrero *et al.* 2008). Las dolinas son particularmente frecuentes en los niveles aluviales más bajos, constituyendo un riesgo de gran impacto socio-económico. El paleokarst registra tres mecanismos principales de subsidencia, que dan lugar a distintos tipos de dolinas con características distintivas: (1) migración de la cobertera detrítica a través de cavidades subsuperficiales; pequeños colapsos. (2) flexión del sustrato y la cobertera por karstificación interstratal; grandes depresiones con márgenes difusos. (3) colapso del sustrato y la cobertera situados sobre cavidades desarrolladas en el seno de la secuencia evaporítica; grandes colapsos (Gutiérrez *et al.* 2008; Guerrero 2008).

METODOLOGÍA

Se han empleado 29 imágenes radar ERS-1/2 de la pasada 277/2766, tomadas en sentido descendente (diurnas) y durante un periodo de 5 años, entre el 26 de abril de 1995 y el 21 de diciembre de 2000. Se han empleado dos modelos de elevación, el MDE fotogramétrico del SIG Oleícola (vuelo español de 1997-98) y el MDE global producido por el Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM (vuelo de febrero de 2000), con un

tamaño de píxel de 20 m y 90 m, respectivamente. Se calcularon los interferogramas mediante dos métodos implementados en los programas SARscape, desarrollado por Sarmap, y DIAPASON, desarrollado por CNES. Ambos difieren en el modo y uso del MDE en el proceso de cálculo del interferograma. Además se empleó el método de correlación de interferogramas para eliminar los efectos atmosféricos (Castañeda *et al.* en prensa). Se examinó la calidad de más de un centenar de interferogramas teniendo en cuenta la coherencia y la presencia de artefactos atmosféricos.

La técnica multitemporal de interferometría diferencial Small Baseline Subset, (Berardino *et al.* 2002) se aplicó a una serie temporal de 74 interferogramas diferenciales, generando un mapa de deformación con una extensión del 12% de la superficie de la escena radar (100 km × 100 km). Dicho mapa proporciona la velocidad de deformación medida en la dirección de iluminación del satélite y su evolución temporal en el periodo de 5 años para los píxeles (90 m × 90 m) donde la coherencia era superior a 0.75 (Castañeda *et al.* en prensa). Los interferogramas de mejor calidad obtenidos en el proceso anterior se compararon con los resultados de la técnica DInSAR SBAS.

RESULTADOS

Se presenta la deformación obtenida en tres sitios representativos de tres procesos diferentes: dolinas, deslizamientos y subsidencia minera. Tanto los interferogramas como el mapa de deformación detectan desplazamiento en una pequeña parte de las numerosas dolinas activas conocidas en la zona de estudio y de los deslizamientos funcionales cartografiados en el escarpe de la margen norte del Ebro. Además se ha detectado subsidencia sobre las minas de sal de Remolinos, no documentada previamente. En esta zona se han detectado también movimientos precursores de un deslizamiento catastrófico que obtuvo la bocamina atrapando un camión.

A pesar de sus limitaciones, los datos obtenidos complementan la información geomorfológica permitiendo cuantificar la deformación de forma retrospectiva y en un gran número de puntos. Las velocidades de deformación medidas alcanzan 1.68 cm/año en las dolinas, 0.80 cm/año en los deslizamientos y 1.45 cm/año en la mina de sal de Remolinos.

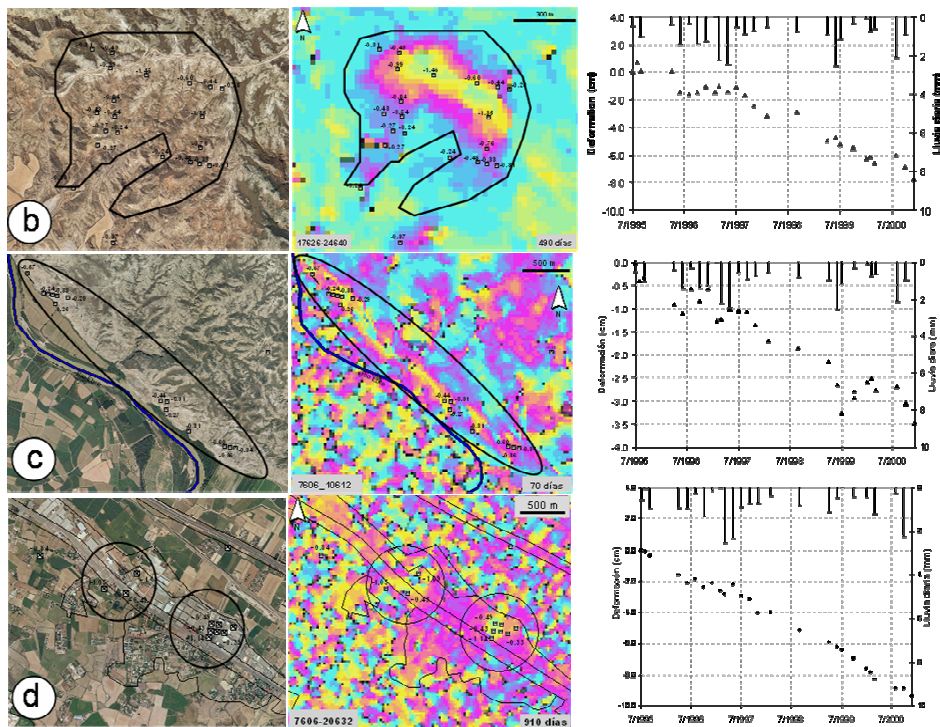
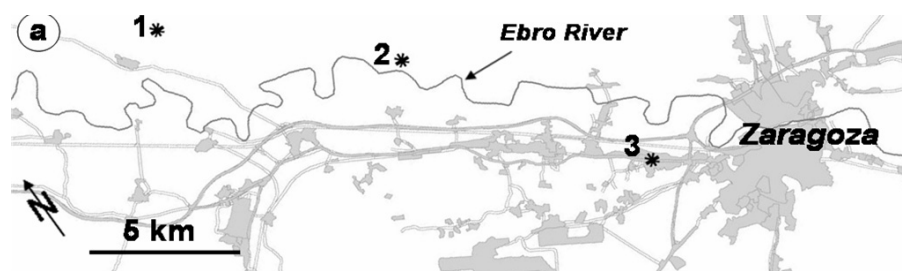


Figura 1.- Localización de las tres áreas de deformación analizadas (a) y mapas de deformación de las tres áreas superpuestos a la ortofoto correspondiente y a uno de los interferogramas obtenidos mediante SARscape: Remolinos (b), escarpe (c) y dolinas (d). Las gráficas muestran la deformación temporal máxima en cada sitio estudiado y la precipitación diaria correspondiente.

CONCLUSIONES

Se han aplicado dos técnicas de interferometría radar en una zona con dolinas y deslizamientos activos, durante un periodo de 5 años. La comparación de los resultados obtenidos con ambas técnicas y su contrastación con la información geomorfológica disponible permiten valorar las posibilidades y limitaciones de ambas técnicas. Además se aportan los primeros datos de deformación por subsidencia minera en Remolinos.

BIBLIOGRAFÍA

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

Baer, G., Schattner, U., Wachs, D., Sandwell, D., Wdowinski, S., Frydman, S. 2002. The lowest place on Earth is subsiding — An InSAR

- (Interferometric Synthetic Aperture Radar) perspective. *Geol. Soc. Am. Bull* 114: 12-23.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansoti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40: 2375-2383.
- Cascini, L., Ferlisi, S., Fornaro, G., Lanari, R., Peduto, D., Zeni, G. 2006. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique. *Int. J. Remote Sens.* 27: 1709-1716.
- Castañeda, C., Pourthié, N., Souyris, J.C. (en prensa). Dedicated SAR interferometric analysis to detect subtle deformation in evaporite areas around Zaragoza, NE Spain. *Int. J. Rem. Sen.*
- Castañeda, C., Gutiérrez, F., Manunta, M., Galve, J.P.(en prensa). Detecting and measuring ground deformation caused by sinkholes, mining subsidence and landslides in the Ebro River valley (NE Spain) by means of the SBAS DInSAR technique. *Earth Surf. Proc. Land.*
- Closson, D., Karaki, N.A., Klinger, Y., Hussein, M.J. 2005. Subsidence and sinkhole hazard assessment in the Southern Dead Sea area, Jordan. *Pure Appl. Geophys.* 162: 221-248.
- Ferretti, A., Marco, B., Fabrizio, N., Claudio, P. 2004. Possible utilizzo di dati radar satellitari per individuazione e monitoraggio di fenomeni di sinkholes. In: Nisio, S.; Panetta, S. and Vita, L. (Eds.). *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*, APAT, Roma, 331-340.
- Goldstein, R.M., Engelhardt, H., Kamb, B., Frolich, R.M. 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice-sheet motion - Application to an Antarctic ice stream. *Science* 262: 1525-1530.
- Guerrero, J. 2008. *Dinámica fluvial y riesgos naturales derivados de la subsidencia kárstica en los valles del Huerva y del Ebro*. Universidad de Zaragoza, 348 p.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Lucha, P. 2008. The impact of halite dissolution subsidence on fluvial terrace development. The case study of the Huerva River in the Ebro Basin (NE Spain). *Geomorphology* 100: 164-179.
- Gutiérrez, F., en prensa. Hazards associated with karst. En: Alcántara, I. y Goudie, A. (Eds.). *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P. 2008. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environ. Geol.* 53: 993-1006.
- Gutiérrez, F., Arauzo, T., Desir, G. 1994. Deslizamientos en el escarpe en yesos de Alfajarín. *Cuaternario y Geomorfología* 8: 57-69.
- Herrera, G., Tomas, R., López-Sánchez, J.M., Delgado, J., Mallorquí, J.J., Duque, S., Mulas, J. 2007. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Unión case study (Murcia, SE Spain). *Eng. Geol.* 90: 148-159.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaut, T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by means of radar interferometry. *Nature* 364: 138-142.
- Salvany, J.M., García-Veigas, J., Ortí, F. 2007. Glauberite-halite association of the Zaragoza Gypsum Formation (Lower Miocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentology* 54: 443-467.
- Sigmundsson, F., Durand, P., Massonnet, D. 1999. Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measured by Radarsat satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 26: 533-536.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado con los proyectos AGL2006-01283 (MICINN), PM008/2007 (Gobierno de Aragón) y CGL2007-60766 (Gobierno de Aragón-Caixa). La Agencia Espacial Europea suministró las imágenes ERS mediante el proyecto CIP-3462. Ibérica de Sales S.A. facilitó información acerca de las labores mineras en Remolinos.