

APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA SAR PARA LA MEDIDA DE DEFORMACIONES DEL TERRENO

Biescas E., Agudo M., Monserrat O., Ibañez C., Crosetto M.
Instituto de Geomática, Av. Canal Olímpic s/n, 08860 Castelldefels, España, erlinda.biescas@ideg.es

Palabras clave: Teledetección, SAR, interferometría, subsidencia, sismología.

Resumen

Este artículo está enfocado a la exposición de los resultados obtenidos en el Instituto de Geomática en los últimos años usando la técnica de interferometría diferencial SAR (DInSAR). La técnica DInSAR representa una potente herramienta para la monitorización de deformaciones basada en datos radar de teledetección. Es una técnica relativamente nueva, que puede ser usada en un amplio rango de aplicaciones: subsidencias en zonas urbanas, estudios de la explotación de recursos acuíferos, actividades mineras, construcciones bajo tierra, movimientos de hielo, terremotos, volcanes, deslizamientos de tierra, etc. En este artículo se describe la capacidad de la técnica DInSAR, mostrando algunos ejemplos obtenidos con la cadena DInSAR desarrollada en el Instituto de Geomática en los últimos tres años.

1. Introducción

La interferometría SAR (*Synthetic Aperture Radar*), InSAR, es una técnica de teledetección usada para aplicaciones como la generación de modelos numéricos del terreno (MNTs) y la monitorización de deformaciones de superficie. La técnica DInSAR (InSAR diferencial) explota la fase del SAR que es sensible a la topografía del terreno y a los cambios de elevación ocurridos entre dos pasadas del satélite sobre la misma área. Si la topografía del terreno es conocida, es decir se dispone de un MNT, la correspondiente componente de fase puede ser sustraída de la fase InSAR, dejando la componente relacionada con la deformación del terreno: esto hace posible la detección de sutiles deformaciones de la superficie terrestre. La técnica DInSAR, basada en datos SAR desde satélite, ha sido usada con éxito en diferentes aplicaciones, para una revisión general véase [1]: dinámica de glaciares [2,3], terremotos [4,5], volcanes [6,7], deslizamientos [8,9] y deformaciones debidas a explotación de acuíferos, actividades mineras y trabajos de construcción [10,11,12]. Para una descripción de la técnica véase [13].

El objetivo de este artículo es describir la efectividad de la técnica DInSAR mediante tres ejemplos de aplicación desarrollados en el Instituto de Geomática. En primer lugar se muestra una deformación situada en la comarca del Vallés (Barcelona), que está relacionada con la extracción de agua subterránea. A continuación, se ilustra un ejemplo de subsidencia ocasionada por la actividad minera en la comarca del Bages (Barcelona). Finalmente se muestra un estudio de las deformaciones cosísmicas asociadas a una serie de terremotos ocurridos en Italia Central.

2. Vallés y Santa Perpetua de Mogoda

La efectividad de la cadena DInSAR desarrollada en el Instituto de Geomática ha sido probada sobre un gran número de zonas. En este apartado se exponen dos casos estudiados en la provincia de Barcelona: el Vallés y un estudio más localizado en el pueblo de Santa Perpetua de Mogoda. Ambos casos de deformación son causados por la extracción de agua del subsuelo. Los resultados sobre la región del Vallés cubren un área de unos 1800 km² (20 por 9 km²), localizada en las comarcas del Vallés Oriental y del Vallés Occidental, en la provincia de Barcelona. En la Figura 1 puede verse la situación de la zona estudiada, así como una imagen de amplitud con los resultados de velocidad de deformación obtenidos. A continuación se destacan las principales características del estudio:

- Periodo abarcado: de Junio de 1992 a Enero de 2002.
- Número de imágenes usadas: 38 imágenes descendentes, cumpliendo las siguientes características:
 - Número de imágenes ERS1: 12,
 - Número de imágenes ERS2: 26,
 - Distribución de las imágenes. Los interferogramas no se distribuyen de manera uniforme a lo largo de todo el intervalo de tiempo considerado. En este caso la distribución aproximada es la siguiente: de Junio de 1992 a Mayo de 1996 hay 11 interferogramas, de Mayo de 1996 a Febrero de 2000, 21, y de Febrero de 2000 a Enero de 2002, 3 interferogramas.

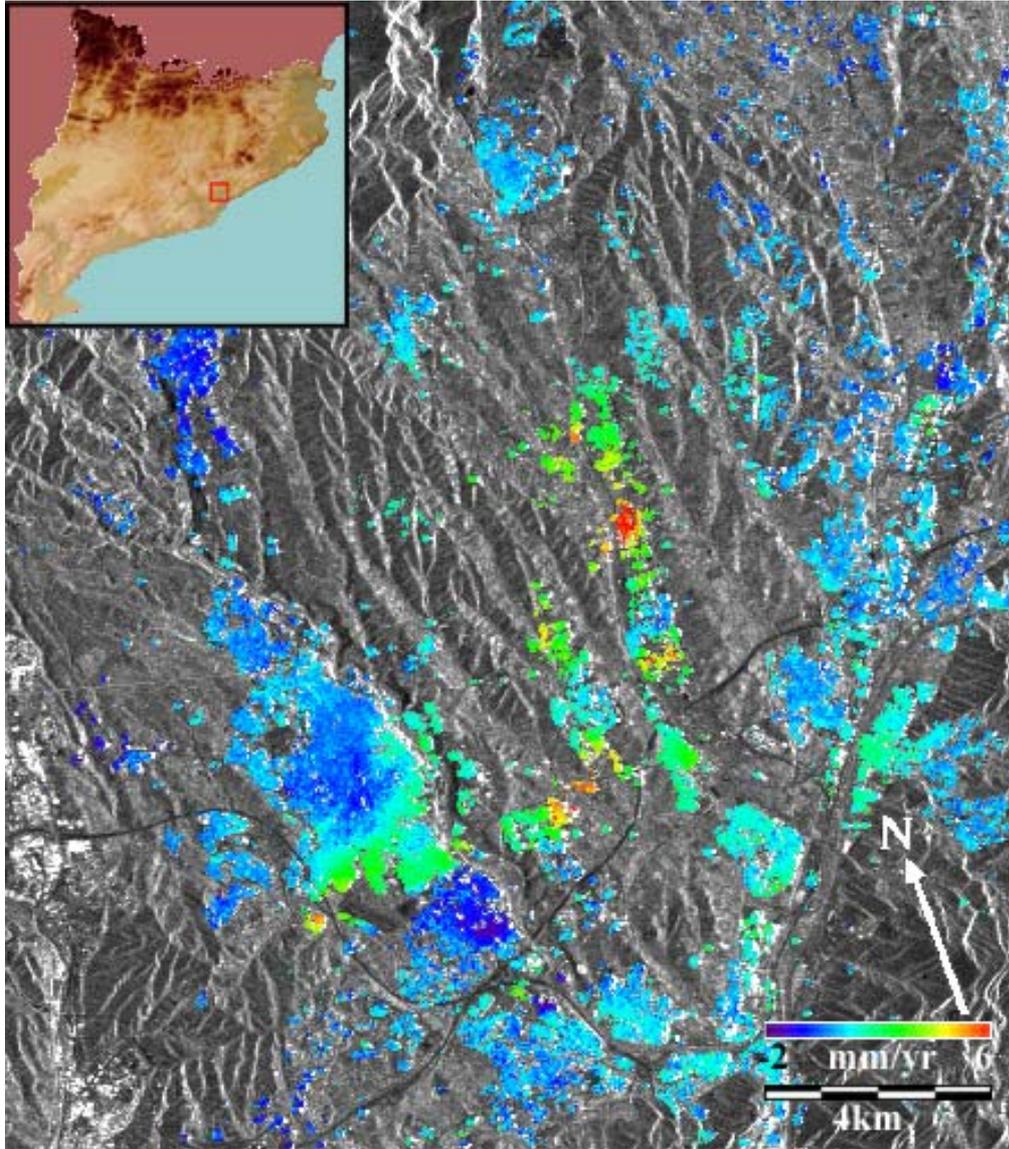


Figura 1: Velocidad de deformación sobre la comarca del Vallés, Barcelona. La imagen resultante de velocidad de deformación, que cubre unos 20 por 9 km², se sobrepone a la imagen de amplitud cubriendo la misma área. Observamos varias zonas de deformación, que llegan hasta los 6 mm/año. Estos resultados han sido obtenidos a partir de 37 interferogramas comprendidos en el periodo de Julio de 1992 a Enero de 2002. El píxel tiene un tamaño de 40 por 40 m², ya que se ha usado una compresión de 10 píxeles en *range* y 2 en *azimut*. Con un recuadro blanco indicamos la ubicación aproximada de la Figura 2.

- MNT: los interferogramas han sido elaborados mediante un MNT con paso 30 m, derivado en el Instituto Cartográfico de Cataluña en el proceso de generación de cartografía a escala 1:5000.
- Número de interferogramas: se han usado un total de 37 interferogramas. Dadas las características urbanas de la zona, se ha obtenido globalmente una alta coherencia en amplias áreas, en todos los interferogramas.
- *Unwrapping*: el proceso de desarrollo de la fase o *phase unwrapping* ha sido elaborado únicamente con aquellos píxeles que tienen valor de coherencia superior a un cierto umbral. En este estudio han sido usados umbrales comprendidos entre 0.15 y 0.2, dependiendo de las características de cada interferograma.

Sobre los resultados mostrados en la Figura 1 hay que destacar una amplia zona de subsidencia situada en la parte central de la imagen. En general la zona presenta estabilidad, aunque se destacan áreas de deformaciones próximas a los 2 mm/año y puntualmente algunas que llegan a los 6 mm/año. En [14] puede verse el estudio de la misma área, pero hecho con un conjunto de imágenes ascendentes y cubriendo el intervalo comprendido entre Junio de 1995 y Agosto de 2000. La comparación entre los resultados obtenidos en estos dos estudios independientes nos sirve para confirmar la validez de los fenómenos observados.

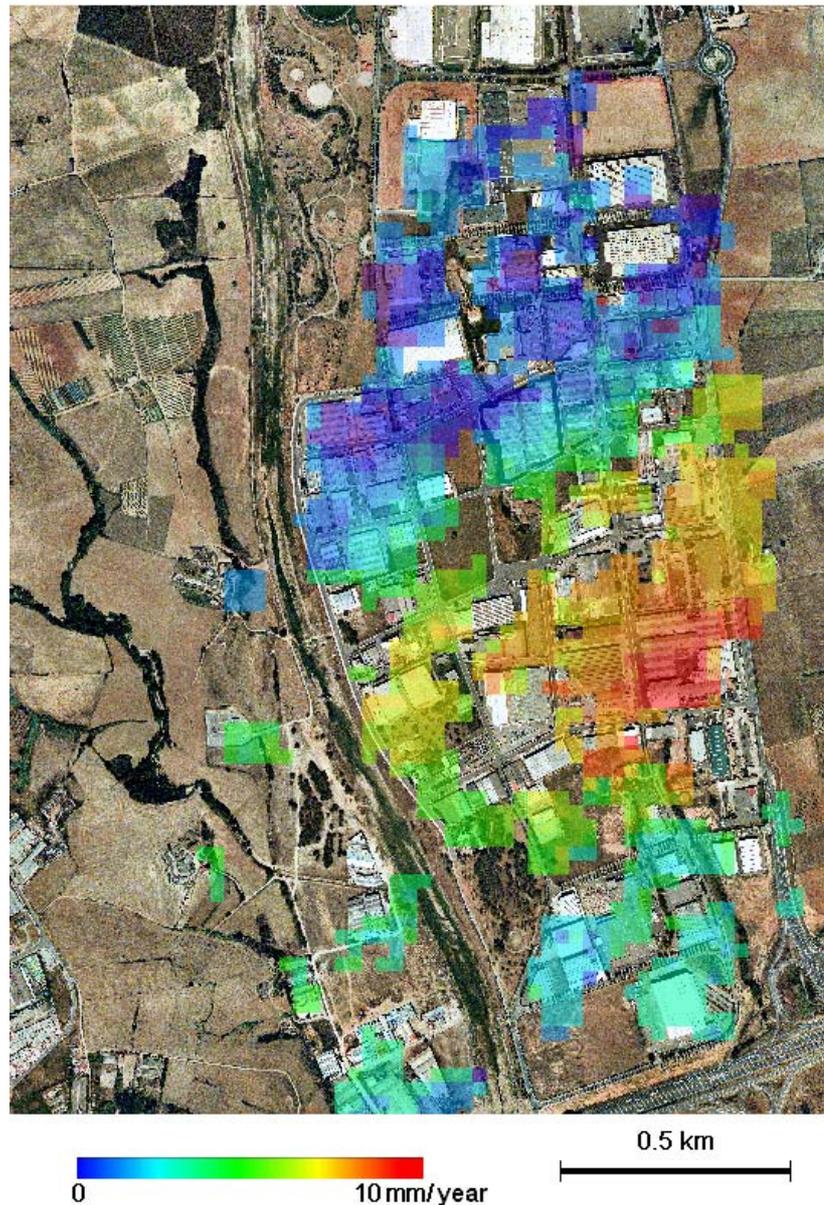


Figura 2: Resultado del estudio sobre un área industrial de Santa Perpetua de Mogoda. El campo velocidad de deformación es sobrepuesto a una ortofoto 1:5000, del Instituto Cartográfico de Cataluña. Se destaca la estabilidad en las zonas superior e inferior de la imagen, mientras que se observa una deformación en la parte central de la imagen que alcanza los 10 mm/año. El estudio comprende el intervalo de tiempo transcurrido entre Junio de 1995 y Agosto de 2000. A diferencia de los datos de la Figura 1, obtenidos con 38 imágenes descendentes, estos resultados han derivado de imágenes ascendentes.

Una de las deformaciones más destacadas de la zona del Vallés es la que se localiza en un área industrial del municipio de Santa Perpetua de Mogoda, cuya ubicación se indica con un recuadro blanco en la Figura 1. El estudio comprende el intervalo de Junio de 1995 a Agosto de 2000. Esta zona ha sido estudiada usando 12 interferogramas formados por 14 imágenes ERS ascendentes. La elaboración de estos interferogramas ha sido realizada con el MNT con paso 30 m, del Instituto Cartográfico de Cataluña arriba mencionado. El proceso de *unwrapping* se ha llevado a cabo sobre los píxeles con coherencia mayor que 0.15.

Los resultados obtenidos sobre el área de estudio se muestran en la Figura 2, donde se ha sobrepuesto la velocidad de deformación lineal obtenida, a una ortofoto 1:5000 del Instituto Cartográfico de Cataluña. Se destaca en la zona superior de la imagen una zona estable, al igual que en la zona inferior; en medio, vemos una deformación que alcanza los 10 mm/año. Esta deformación afecta a las construcciones, provocando grietas en algunas de las naves industriales del área, tal y como se ha podido comprobar en los trabajos de campo.

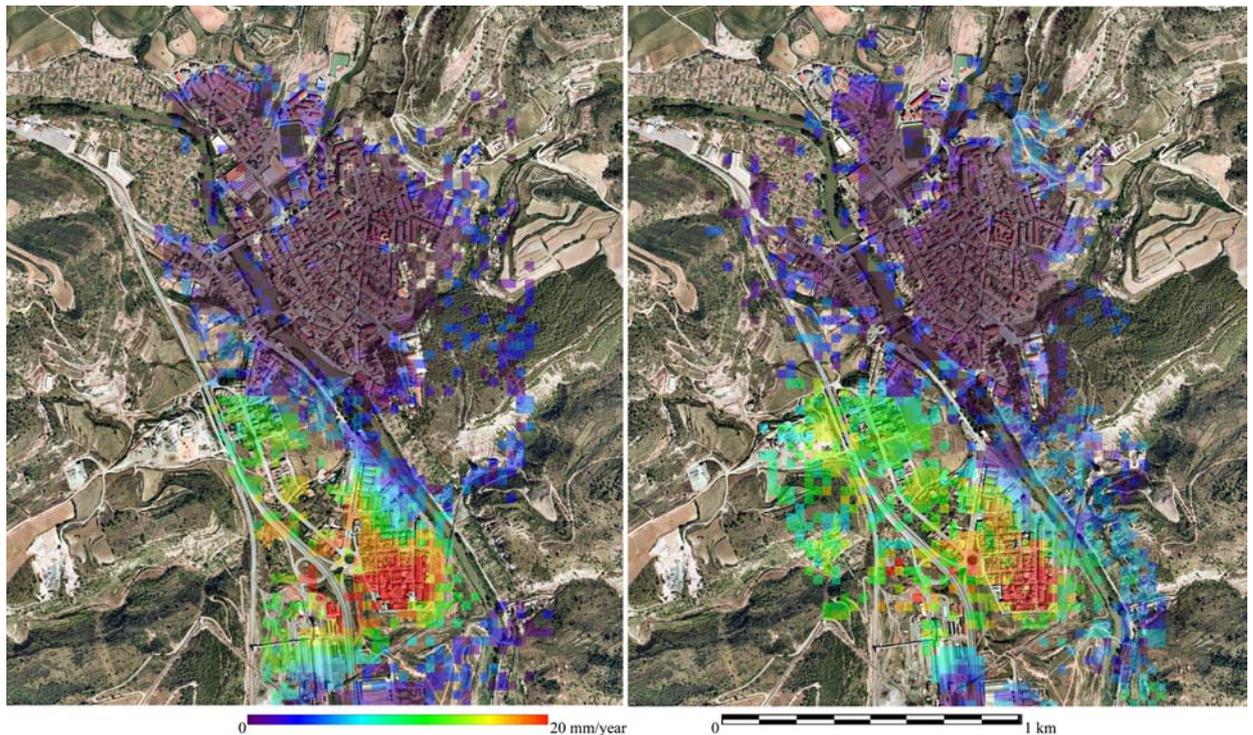


Figura 3: Resultados del análisis DInSAR de la subsidencia de Sallent, Barcelona, basado en dos conjuntos de datos independientes. Imagen izquierda: velocidad de deformación media durante 5 años geocodificada, estimada con 13 interferogramas ascendentes. Imagen derecha: velocidad de deformación media durante el mismo periodo, estimada con 14 pares interferométricos descendentes. Ambos campos están superpuestos a una ortofoto 1:5000 del Instituto Cartográfico de Catalunya.

3. Sallent

Una parte del pueblo de Sallent, situada en la provincia de Barcelona, que yace sobre una mina potásica, está sujeta a subsidencias, que son causadas principalmente por la filtración de agua en las antiguas galerías de las minas de sal subyacentes. Desde 1997 la subsidencia es regularmente monitorizada con una red de nivelación. Este área ya ha sido estudiada con DInSAR [15]. El hundimiento de Sallent, que afecta aproximadamente a una extensión de 1 km^2 , se ha utilizado para realizar un estudio profundo DInSAR basado en dos conjuntos de datos SAR, uno ascendente y otro descendente.

En este trabajo, la deformación ha sido utilizada para probar la capacidad de la cadena DInSAR del Instituto de Geomática para soportar un análisis cuantitativo de las deformaciones del terreno. Para alcanzar este objetivo se han utilizado dos conjuntos de datos SAR, uno ascendente y otro descendente, para derivar dos estimaciones independientes del mismo campo de deformación. Los dos conjuntos de datos cubren el mismo periodo de unos 5 años, de 1995 a 2000, e incluyen 13 interferogramas ERS ascendentes y 14 interferogramas ERS descendentes. Ambos conjuntos se han procesado independientemente, y se han derivado dos estimaciones de velocidad de deformación.

El trabajo aquí mostrado se centra en la comparación de los dos resultados obtenidos. En la Figura 3 vemos, a la izquierda, los resultados obtenidos con el conjunto de datos ascendentes, y a la derecha, los obtenidos con el conjunto de datos descendentes. Para ayudar a la interpretación de estos resultados, los campos de velocidad han sido superpuestos a una ortofoto 1:5000 generada por el Instituto Cartográfico de Catalunya. Los dos campos muestran un patrón absolutamente similar en términos de forma y de magnitud de la velocidad de deformación estimada. Se ha realizado una comparación cuantitativa de los resultados ascendentes y descendentes. La Figura 4 muestra dos perfiles sobre los dos campos de velocidad georeferenciados. En general, hay una similitud entre los dos perfiles, con una media de las diferencias de 0.5 mm/año , y una desviación estándar de 1.5 mm/año . Estos resultados indican una buena consistencia de las dos estimaciones. Teniendo en cuenta el bajo número de interferogramas utilizado (13 para el conjunto de datos ascendentes) se puede considerar que los resultados son satisfactorios.

Figura 4: Resultados sobre Sallent, obtenidos con dos conjuntos de datos independientes. Dos perfiles de la subsidencia hechos sobre los resultados obtenidos con el conjunto de datos ascendentes y descendentes indicados en Figura 3.

Además de la comparación entre las dos estimaciones DInSAR, se ha realizado una validación externa, considerando el máximo hundimiento obtenido por técnicas de nivelación como valor de referencia [15]. El valor máximo estimado por DInSAR es igual a 19.1 mm/año y 20.2 mm/año para los análisis ascendentes y descendentes respectivamente, mientras que el valor de referencia es de 21.2 mm/año. Estos valores confirman la capacidad de DInSAR para determinar cuantitativamente la magnitud de fenómenos de deformación.

4. Colfiorito

La cadena DInSAR desarrollada en el Instituto de Geomática ha sido utilizada en una aplicación geofísica: el control del campo de deformaciones cosísmicas asociadas a una serie de terremotos que ocurrieron en las regiones de Umbria y Marche, en Italia Central, en Septiembre y Octubre de 1997 [16, 17, 18]. El epicentro de los eventos más destructivos fue Colfiorito (Foligno), en la provincia de Perugia. El 4 de Septiembre hubo un primer terremoto con Magnitud Momento MW 4.5. Posteriormente tuvieron lugar dos eventos de MW 5.7 y 6.0 (el 26 de Septiembre), y uno de MW 5.7 (el 14 de Octubre). En Septiembre y Octubre de 1997 se registraron en la zona, más de 2400 réplicas con magnitud superior a 2, de los cuales 24 tuvieron una magnitud superior a 4. El segundo de los terremotos del 26 de Septiembre fue el que liberó la mayoría de la energía sísmica.

Para el estudio de las deformaciones cosísmicas han sido utilizadas dos imágenes de la zona afectada por los terremotos, que cubren un área de aproximadamente 10000 km². La localización de la zona está ilustrada en la Figura 5. El periodo entre la adquisición de las dos imágenes incluye los dos terremotos más importantes, del 26 de Septiembre. En particular, se usaron las siguientes imágenes:

- ERS-2 del 12 de Octubre de 1997, a las 9h 54m 31.658s, órbita 12959, usada como *master*.
- ERS-2 del 7 de Septiembre de 1997, a las 9h 54m 30.647s, órbita 12458, usada como *slave*.

La pareja de imágenes considerada tiene un intervalo de tiempo de 35 días. En la zona escogida, en este intervalo de tiempo, hay una notable caída de la coherencia. Alrededor de Colfiorito (100 por 100 píxeles), el epicentro del terremoto más importante en el intervalo de tiempo considerado, el valor medio de la coherencia es de 0.20.

El interferograma diferencial contiene errores debidos al desarrollado de fase y a los efectos atmosféricos. Una estrategia para evitar los errores de desarrollado de fase ha consistido en el cálculo de diversas versiones, variando el valor de umbral de coherencia con el que se determina qué píxeles son desarrollados. Para comparar dos versiones de desarrollado de fase se han sustraído una de la otra, obteniendo un mapa de diferencias. El mapa así formado tiene valores que son múltiplos de 2π ; se obtiene una buena versión de desarrollado de fase si diversos mapas muestran un valor constante sobre el área de interés. Disponiendo de varios mapas de diferencias ha sido posible construir un mapa de calidad que indica la fiabilidad de los valores de fase diferencial.

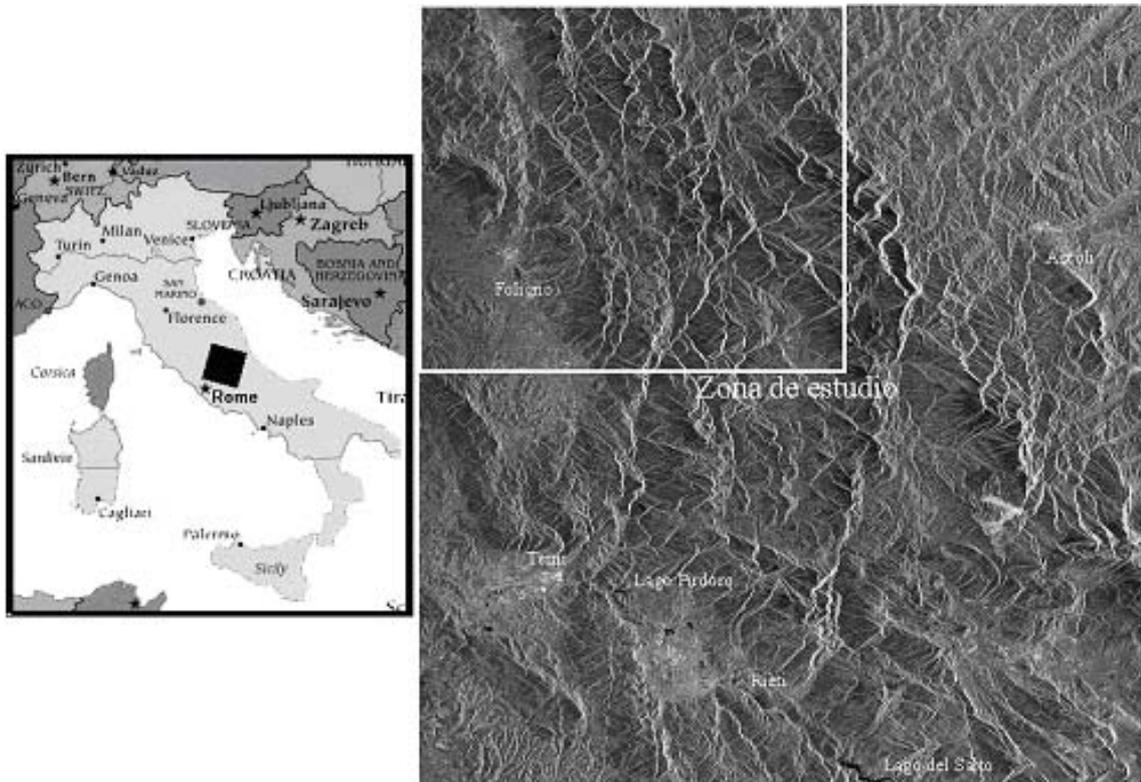


Figura 5: Imagen de amplitud SAR cubriendo una zona de 100 por 100 km² en las regiones de Umbria y Marche, en Italia Central. En la imagen se pueden identificar algunas áreas urbanas. El marco blanco indica la zona de estudio. A la izquierda, se puede ver la situación global del área de estudio.

En la Figura 6 se muestra una composición de cuatro figuras de diferentes datos DInSAR sobre el área de Colfiorito. En (a) se ve una imagen de amplitud SAR en la que se aprecian las características montañosas de la zona. En (b) se muestra una imagen de coherencia de la misma zona. Cabe destacar los bajos valores de ésta, en concreto la coherencia sobre el área de deformación tiene una media de 0.22. En (c) se encuentra el interferograma co-sísmico usado, enrollado. En (d) se ve la solución desarrollada sobre 8909 puntos y se indican diferentes contornos en los que se encuentran diferencias de $\pm 2\pi$ entre esta solución y otras obtenidas usando una selección de píxeles diferente.

Para una correcta estimación de la superficie de deformación cosísmica es necesario extraer, de la fase diferencial, la contribución debida a los efectos atmosféricos. En este caso se ha explotado el conocimiento de zonas estables (no afectadas por las deformaciones cosísmicas), utilizando la técnica descrita en [19]. Para la identificación de las zonas estables se ha utilizado el hecho de que la magnitud del evento sísmico de Colfiorito no causa deformaciones significativas en un área más allá de 15 km del epicentro [20]. Sobre las zonas estables, la correlación de la fase diferencial es debida casi exclusivamente a los efectos atmosféricos.

Aplicando el método de la colocación [21, 22] se ha estimado la señal del efecto atmosférico sobre la zona estable, y posteriormente se ha predicho sobre la zona de movimiento. Finalmente se ha sustraído la componente predicha de la fase diferencial. La fase diferencial ha sido geocodificada, véase la Figura 7. La geocodificación es un instrumento para evaluar la extensión y la localización geográfica de la superficie de deformación cosísmica. El valor máximo de deformación encontrado es de unos 25 cm. El mapa de valores de deformación ha sido utilizado para estimar, mediante un modelo de inversión, parámetros de interés sismológico del fenómeno analizado [23].

Agradecimientos

Una parte de este trabajo ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia, mediante el proyecto del Programa Nacional de Recursos Naturales AURORAE (Aplicaciones de la teledetección para la gestión de recursos naturales), bajo el contrato número REN2003-00742. Los autores agradecen la colaboración en este trabajo del Prof. Bruno Crippa, de la Università degli Studi di Milano.

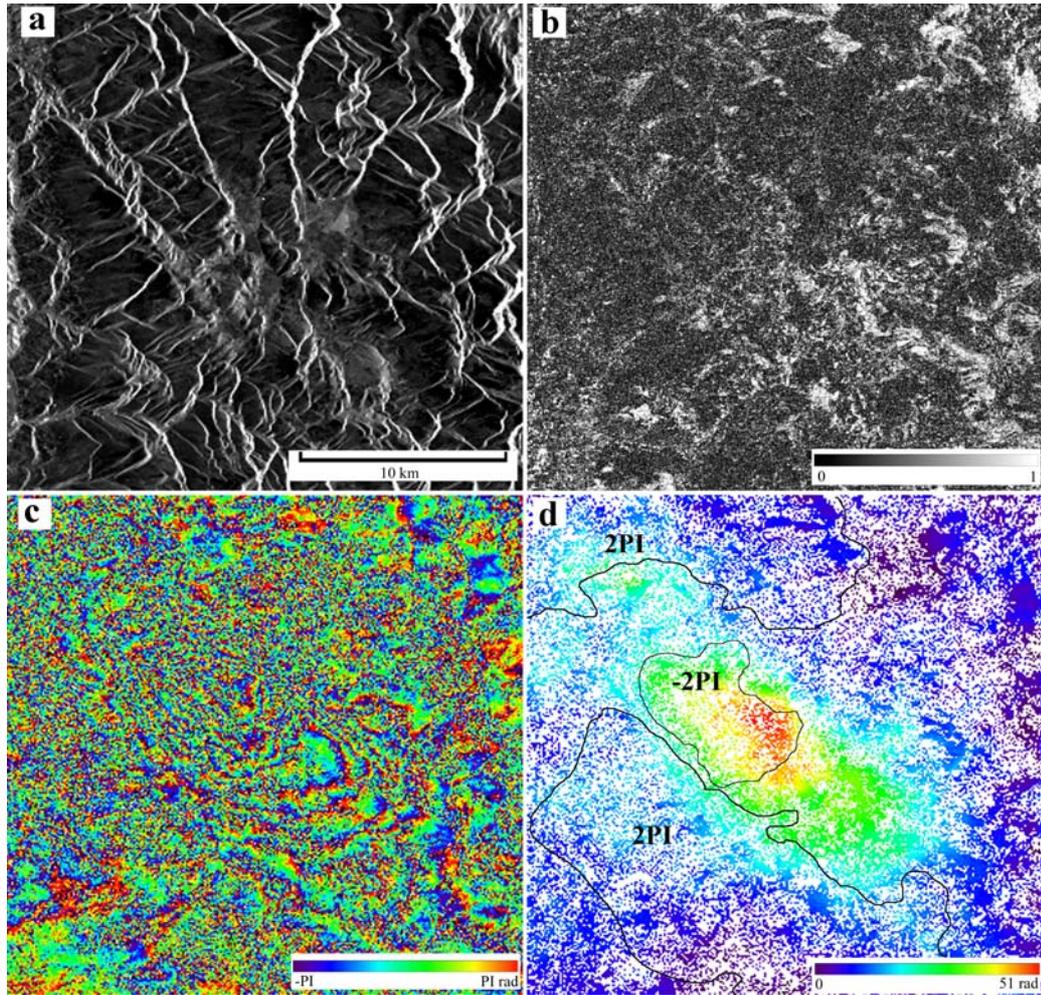


Figura 6: Datos DInSAR sobre el área de Colfiorito: imagen de amplitud SAR (a), imagen de coherencia (b), interferograma co-sísmico enrollado (c), solución desarrollada sobre 8909 puntos (d). En la solución desarrollada se indican diferentes contornos en los que se encuentran diferencias de $\pm 2\pi$ entre esta solución y otras obtenidas usando una selección de píxeles diferente.

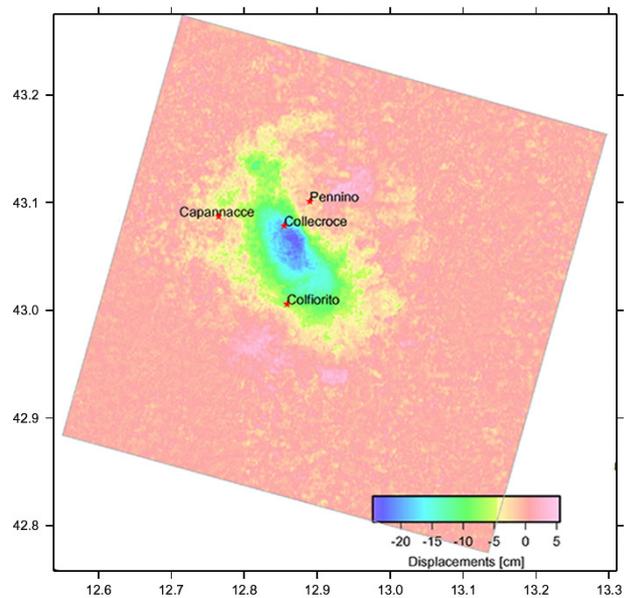


Figura 7: Mapa geocodificado de la deformación estimada en el área de Colfiorito. Destaca una velocidad máxima de deformación de 25 mm/año aproximadamente.

Referencias

- [1]. Hanssen, R., 2001. Radar interferometry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, p. 308.
- [2]. Goldstein, R.M., Englehardt, 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.
- [3]. Kwok, R., Fahnestock, M.A., 1996. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(1):189-200.
- [4]. Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaute, T., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364:138-142.
- [5]. Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Adragna, F., 1994. Radar interferometry mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369:227-230.
- [6]. Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375:567-570.
- [7]. Amelung, F., Jonson, S., Zebker, H.A., Segall, P., 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, 407:993-996.
- [8]. Carnec, C., Massonnet, D., 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.
- [9]. Kimura, H., Yamaguchi, Y., 2000. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(3):337-344.
- [10]. Amelung, F., Galloway, D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A., 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.
- [11]. Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, G., Franceschetti, G., 2000. Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(13):1961-1964.
- [12]. Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., Spreckels, V., 2001. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(11):1261-1270.
- [13]. Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., Herrera, G., 2005. ¿Cómo medir las deformaciones del terreno con teledetección radar?. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [14]. Biescas E., Herrera G., Fradua I., Crosetto M., Crippa B., 2005. Detección y análisis de deformaciones en regiones amplias. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [15]. Crosetto, M., Castillo, M., Arbiol, R., 2003. Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (7), 775-783.
- [16]. Cello, G., Calamita, F., 1994. Structural styles, chronology-rates of deformation and time space relationships in the Umbria-Marche Thrust system (Central Appennines, Italy). *Tectonics*, 13:873-881.
- [17]. Cinti, F., Cucci, L., 1999. The 1997 Umbria-Marche (Italy) earthquake sequence: relationship between ground deformation and seismogenic structure. *Geophysical Research Letters* (26)7:895-898.
- [18]. Basili, R., Meghraoui, M., 2001. Coseismic and postseismic displacements related with the 1997 earthquakes sequence in Umbria-Marche (central Italy). *Geophysical Research Letters* (28)14:2695-2698.
- [19]. Crosetto M., Tscherning C.C., Crippa B., and M. Castillo. Subsidence Monitoring using SAR interferometry: reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 9, 26-29, 2002.
- [20]. Donald, L., Wells, Kevin, J., Coppersmith, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Seismological Society of America*, 84, 4, 974-1002.
- [21]. Moritz, H., 1978. Least-squares collocation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 421-430.
- [22]. Dermanis, A., 1984. Kriging and collocation: A comparison. *Manuscripta Geodaetica*, 9, 3, 159-167.
- [23]. Crippa B., Crosetto M., Biescas E., Troise C., Pingue F., De Natale G., 2004. Coseismic displacements observed by SAR interferometry: quality check of the estimates and impact on the geophysical parameters. *Geophysical Journal International*.