¿CÓMO MEDIR DEFORMACIONES DEL TERRENO CON TELEDETECCIÓN RADAR?

Agudo M. (1), Biescas E. (1), Monserrat O. (1), Martínez J. (1), Crosetto M. (1), Herrera G (2).

(1) Instituto de Geomática, Av. Canal Olímpic s/n, 08860 Castelldefels, España, marta.agudo@ideg.es (2) Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España, g.herrera@igme.es

Palabras claves: Teledetección, SAR, DInSAR, subsidencia.

Resumen

Este artículo describe las medidas de deformación del terreno mediante la técnica DInSAR (<u>Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar</u>). Se inicia con un breve repaso de los diferentes tipos de deformaciones del terreno y de las técnicas disponibles para medirlas. A continuación se describe la adquisición de los datos SAR desde satélites, y se discuten los principios fundamentales de la técnica. Finalmente, en la Sección 3, se debaten algunos aspectos relevantes de dicha técnica, ilustrando concisamente alguna de sus limitaciones. Se trata de un artículo de introducción a los principios básicos del DInSAR. Algunos ejemplos de aplicaciones de esta técnica, que han sido desarrollados por los autores, han sido ilustrados en otro artículo presentado en esta misma conferencia, titulado "Aplicaciones de la interferometría SAR para la medida de deformaciones del terreno".

1. Introducción

El objetivo principal de este artículo es pincelar los rasgos teóricos de la técnica DInSAR (<u>Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar</u>) para la medida de deformaciones del terreno. Un artículo de esta misma conferencia, titulado "Aplicaciones de la interferometría SAR para la medida de deformaciones del terreno", ilustra algunos ejemplos de aplicación de la técnica DInSAR [1]. Como primera aproximación, nos podríamos plantear dos preguntas: ¿Por qué necesitamos medir deformaciones del terreno? Y, ¿cuáles son las técnicas disponibles para medir deformaciones?

Existen muchas causas por las cuales podemos tener movimientos del terreno, bien por acción natural o bien, provocadas por la actividad humana. Se observan movimientos causados por: actividades de extracción (ya sea petróleo, gas, agua, o extracciones mineras); obras subterráneas (metro, túneles, etc.); subsidencias vinculadas a las actividades en los acuíferos; subsidencias por dolinas; desprendimientos y movimientos de laderas; actividades sísmicas, cosísmicas e intersísmicas; actividades volcánicas; movimientos de glaciares, etc.

Mediante las medidas de deformaciones del terreno se pueden llegar a cubrir tres tipos principales de aplicaciones: la detección y estudio de nuevas deformaciones del terreno, el estudio de aquellas deformaciones de las cuales ya tenemos conocimiento, y una tercera, más ambiciosa, la predicción de los futuros efectos provocados por estas deformaciones. En muchos casos, el objetivo prioritario del análisis radica en el hecho de detectar posibles zonas de subsidencia que no han sido determinadas hasta el momento y así, planificar un estudio más exhaustivo de las zonas de interés. En otros casos, mediante estudios posteriores al conocimiento o detección de la deformación, el objetivo es analizar con detalle la zona de interés para determinar las posibles causas que provocan dicha deformación.

Existen un gran número de técnicas para medir deformaciones del terreno. Muchas de ellas están basadas en instrumentaciones de topografía y de geodesia clásica, como por ejemplo las nivelaciones geométricas basadas en niveles de precisión. Otras utilizan herramientas más modernas, como son las basadas en el sistema GPS (*Global Positioning System*). Finalmente hay una plétora de técnicas que están específicamente diseñadas para aplicaciones concretas, como la construcción de obras bajo tierra, o las herramientas usadas en la monitorización de los desprendimientos de laderas. Estas técnicas tienen características muy diversas. Algunas de ellas proporcionan medidas de tipo manual, que pueden ser muy precisas y al mismo tiempo muy costosas. Otras pueden proporcionar medidas de tipo automático, pero que conciernen a puntos aislados, permitiendo monitorizar pocos puntos a la vez.

En este artículo se describirá una técnica específica de medida de deformaciones, la técnica DInSAR, que para diferentes tipos de aplicaciones puede representar una técnica muy prometedora. Algunas de las aplicaciones más relevantes del DInSAR incluyen: detectar o bien analizar los efectos de deformaciones en áreas urbanas [2,3,4,5,6]; en zonas afectadas por terremotos [7,8,9]; en los desplazamientos de tierras [10,11]; en zonas volcánicas [12,13,14,15]; y en movimientos de glaciares [16,17,18,19].

Observamos que existen importantes ventajas de las técnicas basadas en imágenes SAR (<u>Synthetic Aperture Radar</u>) respecto a las técnicas tradicionales como el GPS:

- Mediante SAR podemos llegar a realizar estudios o generar mapas de deformación históricos, entendiendo que nos podemos remontar hasta el punto en que existan imágenes archivadas (en el caso ERS, desde 1991 hasta nuestros días), mientras que con las técnicas tradicionales nos restringimos a estudios anteriormente planificados y motivados, generalmente, por el conocimiento a priori de la deformación.
- 2. El coste generado en el estudio de grandes áreas es menor usando técnicas SAR que si utilizamos las técnicas tradicionales. Habitualmente, las imágenes SAR cubren unos 10000 km².
- 3. Durante la adquisición de cada imagen SAR obtenemos unos 100 millones de medidas aprox., mientras que con GPS obtenemos, mediante adquisición manual, alrededor de decenas, centenares o millares de puntos.
- 4. Además, el SAR no tan sólo proporciona una adquisición masiva de datos, sino que dicha adquisición se realiza de manera regular en el tiempo. Esto facilita las tareas de seguimiento de las deformaciones a lo largo de un periodo.

En las próximas secciones se introducen los principios fundamentales de la técnica DInSAR. En la Sección 3 se discuten algunos de sus más relevantes aspectos técnicos, ilustrando alguna de sus principales limitaciones. Como ya se ha mencionado, algunos ejemplos de aplicaciones de la técnica están ilustrados en [1].

2. Principios fundamentales de la técnica

La técnica DInSAR se basa en el tratamiento y análisis de la información obtenida mediante imágenes SAR. Consideramos diferentes etapas en el desarrollo de la técnica DInSAR: la adquisición de los datos, la elaboración interferométrica y la generación de mapas de subsidencias. En las dos siguientes subsecciones se describen la adquisición de los datos SAR y se discuten los principios de la interferometría SAR.

2.1 Adquisición de los datos SAR

Consideramos un satélite, por ejemplo el satélite ERS-1 de la Agencia Europea, que se encuentra a una cota nominal de 785 km y tiene una velocidad aproximada de 10 km/s. La configuración del sistema se basa en una antena situada sobre una plataforma satelital que transmite pulsos de microondas a intervalos regulares. Los pulsos se propagan por la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, donde se producen varias reflexiones debidas a la interacción con diferentes objetos. Los ecos que vuelven en la dirección de la antena son adquiridos por la misma antena, que actúa como emisor y receptor. El retardo de cada eco es: t = 2R/c, donde R es la distancia antena-blanco y c es la velocidad de la luz. Hemos de tener en cuenta que la distancia recorrida por el pulso entre el satélite y un punto del terreno es doble (consideramos la ida y vuelta del pulso). El muestreo del terreno se obtiene mediante la repetición de los pulsos con una frecuencia que se denomina PRF (pulse repetition frequency). Mediante este muestreo obtenemos información en dos direcciones: en la dirección de range, dirección que une el satélite con el punto observado, y, en la dirección de azimuth,

dirección de vuelo del satélite.

Un sistema SAR mide distancias y fases en la dirección LOS (*Line Qf Sight*, i.e. línea que une el satélite con el punto tierra que estamos observando), con un cierto ángulo de incidencia respecto a la vertical, θ, que para los satélites ERS es de aproximadamente 23°, véase Figura 1. Como consecuencia, el sistema puede medir deformaciones en la dirección LOS. Observamos que mediante una simple transformación trigonométrica podemos pasar de movimientos en la dirección LOS a movimientos verticales, véase la Figura 2. Así, como resultado del barrido que realiza el satélite obtenemos una imagen SAR compleja (entendida como una matriz 2D de valores complejos) que para los satélites ERS cubre unos 100 por 100 km². Cada píxel contiene dos componentes, que corresponden a la parte real e imaginaria de la señal compleja adquirida. A partir de dichas componentes podemos derivar una imagen de fase y otra de amplitud. La amplitud de una imagen SAR nos desvela información sobre la potencia de la señal reflejada por el terreno. Observamos que los diferentes tipos de superficie responden de manera diferente al impacto de los pulsos de microondas. Por ejemplo, las áreas urbanas muestran típicamente valores de amplitud muy altos, a diferencia de las zonas boscosas. Por otra parte, la imagen de fase contiene dos componentes diferentes: el desplazamiento de fase (*phase shift*) que se produce durante la interacción de la señal radar con el blanco, y la denominada "fase geométrica", φ_{geom}, relacionada con el doble camino entre la antena y el blanco:

$$\Phi_{geom} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda} \tag{1}$$

donde R es la distancia antena-blanco y λ la longitud de la onda portadora (para ERS-1/2 es de 5.66 cm).

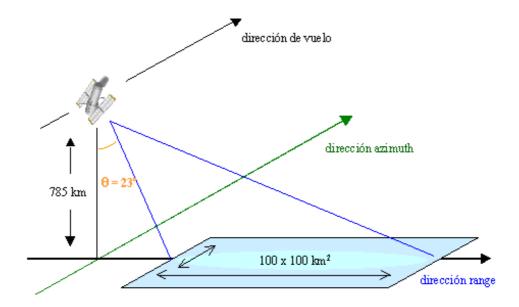


Figura 1. El satélite se desplaza en la dirección de vuelo, *azimuth*, mientras que la distancia que une la antena con el blanco la denominamos *slant-range*. Se conoce como LOS (*Line-Of-Sight*) la línea que une el satélite con el punto tierra que estamos observando. El ángulo de incidencia del satélite respecto a la vertical es de 23º aproximadamente para los satélites ERS. Mediante el SAR medimos distancias en la dirección LOS pero podemos llegar a determinar movimientos verticales mediante una pequeña transformación trigonométrica en la que interviene el ángulo de incidencia citado anteriormente.

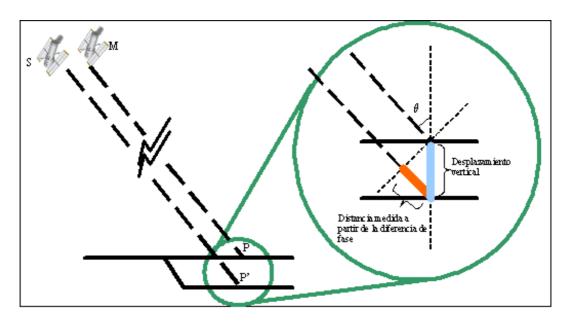


Figura 2. Transformación de la deformación medida en la dirección LOS a desplazamiento vertical. Mediante un sistema SAR medimos distancias en la dirección LOS. En el caso que tengamos cambios en las diferentes pasadas del satélite observaremos una diferencia entre las distancias SP (*slave*-blanco) y MP (*master*-blanco). Si se conoce a priori la dirección de la deformación, como es el caso de las deformaciones verticales, podemos determinar los movimientos verticales mediante una simple transformación trigonométrica. Además, pongamos por caso los desplazamientos de laderas que pueden llegar a ser detectados mediante un análisis en la dirección LOS pero que no serían detectados si se considerara el estudio tan solo mirando los movimientos verticales del terreno.

2.2 Principios de interferometría SAR

Consideramos dos imágenes SAR que denominamos *master* y *slave*. Estas dos imágenes puede que no provengan de diferentes satélites ya que podemos considerar una misma antena o satélite que realiza diferentes pasadas sobre la misma zona. La primera adquisición hace el papel de *master* y la segunda de *slave*. Dado que las imágenes han sido adquiridas desde diferentes posiciones, cabe expresarlas en la misma geometría, lo que llamaremos corregistración de las imágenes. Una vez tenemos la imágenes en la misma geometría (la de la *master*), consideramos la diferencia de fase entre la imagen *master* y la *slave*, que denominamos fase interferométrica, $\Delta\Phi_{Int}$, y que podemos desglosar en diferentes componentes:

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M = \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise}$$
 (2)

donde:

- Φ_S y Φ_M fase de la *slave* y de la *master*, respectivamente;
- Φ_{Topo} componente topográfica;
- Φ_{Mov} componente debida al movimiento;
- Φ_{Atm} componente atmosférica;
- Φ_{Noise} ruido de la fase.

Tenemos dos posibles finalidades para la fase interferométrica: la generación del MNT (Modelo Numérico del Terreno) mediante interferometría SAR (InSAR) y la medida de deformaciones mediante la interferometría SAR diferencial (DInSAR). En el primer caso, si no tenemos deformación entre los dos pases del satélite (i.e. $\Phi_{\text{Mov}} = 0$), si los efectos atmosféricos son despreciables y el ruido es pequeño, la componente topográfica nos puede transmitir información de la topografía del terreno. Podemos así, generar un MNT de la zona observada. En el segundo caso nuestro objetivo es la medida de deformaciones del terreno. Consideramos que tenemos conocimiento de la topografía, y simulamos una componente de la fase que denominamos $\Phi_{\text{Topo_simu}}$ (relacionada con dicha topografía). Ello nos permite calcular la fase interferométrica diferencial $\Phi_{\text{D-Int}}$ que se basa en la fase interferométrica a la cual le sustraemos la componente topográfica:

$$\Delta\Phi_{D-Int} = \Delta\Phi_{Int} - \Delta\Phi_{Topo-Simu} = \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Res-Topo} + \Phi_{Noise}$$
 (3)

donde:

- Φ_{Topo} Simu componente topográfica simulada;
- Φ_{Res Topo} componente residual de la fase debida a errores en el MNT utilizado.

Existen técnicas muy diversas para la estimación del movimiento del terreno. Hay que destacar que los fenómenos de deformación tienen tres componentes espaciales y no lineales en el tiempo. Para describir dichos fenómenos se pueden utilizar modelos muy diferentes, por ejemplo, una deformación podría aproximarse dentro de un intervalo temporal, por una única velocidad lineal, o bien se podrían considerar varios subintervalos y aproximar el fenómeno con varias velocidades lineales. Naturalmente, cuanto más complejos son los modelos usados, más imágenes se necesitan. La descripción de algunos de estos modelos más complejos, que requieren grandes conjuntos de imágenes SAR con los cuales se han obtenido resultados interesantes, pueden encontrarse en [20, 21, 22, 23, 24, 25]. De hecho, el Instituto de Geomática ha desarrollado un método utilizando imágenes SAR múltiples, véanse [26, 27].

En el caso más sencillo, estimando el fenómeno de deformación con un modelo lineal, la principal salida de la técnica DInSAR es un mapa de velocidad de subsidencia de la zona observada. En el caso en que consideremos movimientos verticales, la relación entre la fase y el movimiento es la siguiente:

$$mov_{v} = \frac{\lambda \cdot \Phi_{Mov}}{4\pi \cdot \cos \theta} \tag{4}$$

donde:

- λ longitud de onda portadora (para ERS-1/2 de 5.66 cm);
- θ es el ángulo de incidencia local.

Mediante la técnica DInSAR se miden movimientos en la dirección LOS (véase la Figura 2). Esto representa una limitación destacable en los resultados. Sin embargo, utilizando observaciones DInSAR ascendentes y descendentes se pueden obtener dos componentes del vector deformación, que corresponderían a la dirección LOS de cada una de

las dos trayectorias. Aun así, una reconstrucción completa del vector tridimensional de movimiento necesita una información externa sobre su dirección.

Es importante observar que la fase interferométrica, $\Phi_{\Delta Int}$, tiene una sensibilidad diferente con respecto a la topografía y con respecto a los movimientos:

- Φ_{Topo} es función de la base SM entre *slave* y *master*:

$$\Phi_{Topo} = \frac{SP - MP}{\lambda / 4\pi} \tag{5}$$

- mientras que Φ_{Mov} es independiente de la base:

$$\Phi_{Mov} = \frac{SP^1 - SP}{\lambda / 4\pi} \tag{6}$$

El hecho que Φ_{Mov} sea independiente de la base repercute en la diferente sensibilidad de la fase interferométrica respecto a la topografía y a los movimientos. Por ejemplo, un movimiento de 1 cm en la dirección LOS, implica un Φ_{Mov} aproximado de 127°. Considerando que un típico ruido en la fase interferométrica es del orden de 25-30°, podemos destacar como la técnica DInSAR puede observar movimiento de unos pocos milímetros. La misma sensibilidad no se verifica en relación con la generación de MNT. Dada una cierta diferencia de cota topográfica, el valor de Φ_{Topo} depende de la base topográfica SM, en particular, de la componente de dicha base perpendicular a la LOS, B_{\perp} . Por ejemplo, con una diferencia de cota de 20 m y una B_{\perp} de 50 m, obtendríamos una Φ_{Topo} de 43°, mientras que con la misma diferencia de cota y con una B_{\perp} de 10 m obtendríamos tan solo una Φ_{Topo} de 8.6°, o sea, una baja sensibilidad de la fase interferométrica respecto a la topografía.

3. DInSAR: discusión de algunos aspectos técnicos

En esta sección se discuten brevemente algunos aspectos importantes de la técnica DInSAR. Uno de los productos más importantes en la elaboración interferométrica es la coherencia, que nos aporta información sobre la calidad de la fase interferométrica $\Phi_{\text{D-Int}}$. La coherencia es el grado de correlación entre dos imágenes SAR (*master* y *slave*) y toma valores entre 0 y 1. Hay diferentes fuentes de decorrelación, como son la decorrelación geométrica, consecuencia de la diferencia entre el ángulo de incidencia de las dos adquisiciones SAR, y el ruido del sistema. Una fuente importante es la denominada decorrelación temporal, debida a los cambios en las propiedades físicas y geométricas de la zona observada entre dos adquisiciones (*master* y *slave*) que originan una pérdida de coherencia. Generalmente, la decorrelación aumenta al incrementar el intervalo de adquisición, ya que a mayor intervalo de tiempo más probabilidad hay de que hayan tenido lugar cambios en el terreno. Cuanto más alta es la decorrelación más baja es la coherencia y una baja coherencia conlleva problemas a la hora de realizar el desarrollo de fase (*phase unwrapping*), que representa una de las etapas críticas de un proceso DInSAR.

En la Figuras 3 se ilustran dos ejemplos de coherencia en imágenes SAR sobre la zona de Barcelona. Se constata en primer lugar cómo en ambas imágenes la zona con coherencia alta corresponde al área urbanizada. De hecho, las construcciones de carácter humano son generalmente buenos reflectores de la señal SAR y conservan dicha propiedad a lo largo del tiempo. Por esta razón, se pueden mantener coherentes a lo largo de muchos años, como es el caso de la imagen de la derecha, donde hay un periodo de separación entre *master* y *slave* de aproximadamente 3.8 años. Por el contrario, las zonas afectadas por continuas variaciones de las propiedades físicas y geométricas aparecen oscuras (coherencia nula o casi nula), como es el caso de las zonas boscosas de la sierra de Collserola, de la superficie del mar, de las zonas de cultivo en los márgenes del río Llobregat, o bien de los parques interiores del casco urbano. Un segundo punto a destacar es la influencia del lapso de tiempo en las imágenes de coherencia. En la imagen de la izquierda, que corresponde a un intervalo de tiempo de 665 días, hay una coherencia más elevada que en la imagen de la derecha, correspondiente a 1401 días.

Además del ruido de fase Φ_{Noise} , asociado a una baja coherencia de los datos SAR interferométricos, hay otras fuentes de error en la fase interferométrica: los efectos atmosféricos que inciden sobre la componente Φ_{Atm} y los errores asociados al desarrollo de fase (*unwrapping*). Estas dos componentes pueden representar una importante limitación del método. En la Figura 4 se ilustra un ejemplo de efecto atmosférico sobre la zona de Barcelona. En este caso, los efectos atmosféricos son muy importantes y provocan una variación de fase de unos 6-7 rad. Es importante notar que dichos valores de fase, si fuesen provocados por movimientos del terreno, se corresponderían a una deformación vertical de unos 3.5 cm. La componente atmosférica puede ser tratada con diversas técnicas, véase [20, 21, 27, 28]. En general, teniendo en cuenta los efectos atmosféricos, para obtener buenas estimaciones de las deformaciones es necesario utilizar múltiples imágenes SAR de la misma zona.



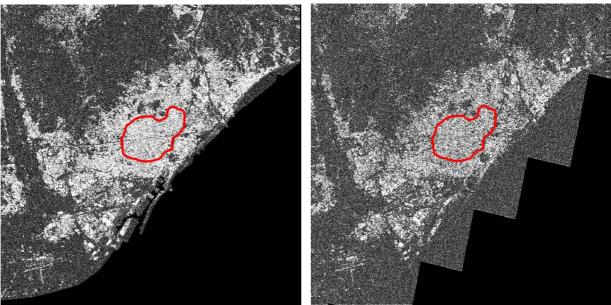


Figura 3: Imagen de amplitud SAR ascendente de la ciudad de Barcelona (arriba). Imagen de coherencia de la misma zona calculada a partir de dos imágenes SAR con separación temporal $\Delta T=665$ días (abajo, a la izquierda). Imagen de coherencia de dos imágenes SAR con $\Delta T=1401$ días (abajo, a la derecha). Las dos zonas indicadas con el perímetro en rojo se corresponden a la zona central de la ciudad, que está densamente urbanizada. La coherencia media en dicha zona es de 0.67 en el caso del $\Delta T=665$ días y de 0.50 con $\Delta T=1401$ días. Los valores de coherencia están distribuidos entre 0 (falta de coherencia, en negro) y 1 (datos completamente coherentes, en blanco) [m1].

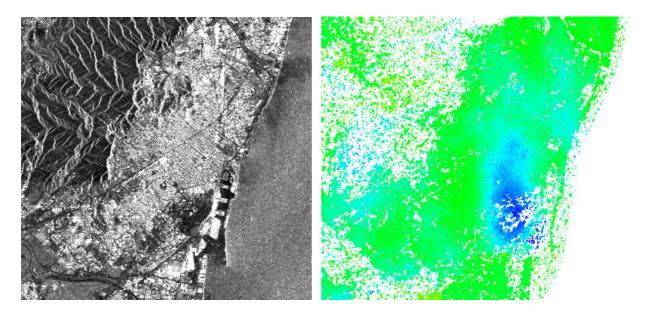


Figura 4: Ejemplo de efecto atmosférico sobre la zona de Barcelona. A la izquierda, imagen de amplitud SAR descendente de la ciudad de Barcelona (se puede observar la diferente geometría en relación con la imagen de la Figura 3). A la derecha, fase de un interferograma de la misma zona. En este caso, los efectos atmosféricos son importantes y provocan una variación de fase de unos 6-7 rad.

4. Conclusiones

La técnica DInSAR para la medida de deformaciones del terreno es una técnica en continua evolución. Actualmente, se están desarrollando nuevos métodos que aumenten su precisión y con los cuales podamos obtener resultados rápidos en el tiempo, véase [29].

Unos de los objetivos prioritarios de esta técnica son la generación de mapas de deformación históricos y la detección de nuevas zonas de subsidencia. En este artículo hemos destacado algunos principios básicos para la comprensión del DInSAR. Además, hemos constatado ciertas limitaciones de esta técnica a lo largo de su elaboración, como son: la decorrelación temporal que provoca una coherencia baja, los problemas en el *phase unwrapping*, y la existencia de efectos atmosféricos. Para paliar dichas limitaciones se han desarrollado métodos alternativos que mejoran los resultados obtenidos, véase por ejemplo [30].

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.

Referencias

- [1]. Biescas E., Agudo M., Monserrat O., Ibañez C., Crosetto M., 2005. Aplicaciones de la interferometría SAR para la medida de deformaciones del terreno. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [2]. Hoffmann, J., Zebker, H.A., Galloway, D.L., Amelung, F., 2001. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. Water Resources Research, 37 (6), 1551-1566.
- [3]. Amelung, F., Galloway, D., Bell, J., Zebker, H., Laczniak, R., 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.
- [4]. Wicks, C., Thatcher, W., Monastero, F., Hasting, M., 2001. Steady-state deformation of the Coso Range, East-Central California, inferred from satellite radar interferometry. Journal of Geophys. Res., 106 (B7), 13769-13780.
- [5]. 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.
- [6]. Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. IEEE TGRS, 42 (7), 1377-1386.
- [7]. Sandwell, D. T., Sichoix, L., Agnew, D., Bock, Y. and Minster, J.-B. (2000), Near real-time radar interferometry of the Mw 7.1 Hector Mine Earthquake, Geophysical Research Letters, 27(19):3101-3104.

- [8]. Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adagna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993), The displacement field on the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364 (8):138-142.
- [9]. Peltzer, G., Hudnut, K. W. and Feigl, K. L. (1994). Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry: New insights into the Landers earthquake, Journal of Geophysical Research, 99(B11):21971-21981.
- [10]. Delacourt, C., Allemand P., Squarzoni, C., Picard, F., Raucoules, D., Carnec, C., 2004. Potential and limitation of ERS-Differential SAR Interferometry for landslide studies in the French Alps and Pyrenees. Proceedings of Fringe 2003 Workshop, SP-550, ESA (CD-ROM).
- [11]. Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003b. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. Engineering Geology, 68, 3-14.
- [12]. Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. Nature, 375, 567-570.
- [13]. 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.
- [14]. Lu, Z., Mann, D., Freymueller, J.T., Meyer, D.J., 2000. Synthetic aperture radar interferometry of Okmok volcano, Alaska: Radar observations. Journal of Geophysical Research, 105 (B5), 10791-10806.
- [15]. Salvi, S., Atzori, S., Tolomei, C., Allievi, J., Ferretti, A., Rocca, F., Prati, C., Stramondo, S., Feuillet, N., 2004. Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique. Geophysical Research Letters. 31 (12), L12606
- [16]. 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.
- [17]. Kwok, R., Fahnestock, M.A., 1996. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. IEEE TGRS, 34 (1), 189-200.
- [18]. Rignot, E.J., Gogineni, S.P., Krabill, W.B., Ekholm, S., 1997. North and northeast Greenland ice discharges from satellite radar interferometry. Science, 276, 934-937.
- [19]. Joughin, I.R., Kwok, R., Fahnestock, M.A., 1998. Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (1), 25-37.
- [20]. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE TGRS, 38 (5), 2202-2212.
- [21]. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE TGRS, 39 (1), 8-20.
- [22]. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE TGRS 40 (11), 2375-2383.
- [23]. Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. IEEE TGRS, 41 (10), 2243 –2253.
- [24]. Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2003. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique. IEEE TGRS, 41 (7), 1685-1701.
- [25]. Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. IEEE TGRS, 42 (7), 1377-1386.
- [26]. Crosetto M., Crippa B., Biescas E., 2004. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. Engineering Geology (accepted, in press).
- [27]. Crosetto M., 2004. Deformation measurement using interferometric SAR data. Submitted to ISPRS Journal.
- [28]. Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., Spreckels, V., 2001. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67 (11), 1261-1270.
- [29]. Biescas E., Herrera G., Fradua I., Crosetto M., Crippa B. Detección y análisis de deformaciones en regiones amplias. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [30]. Monserrat O., Crippa B., Biescas E., Fernandez A., Crosetto M. Advanced modelling tools in SAR interferometry. 6ª Semana Geomática, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.