

Medidas de deformación del terreno a vista de satélite

Oscar Mora⁽¹⁾, Vicenç Palà⁽¹⁾, Roman Arbiol⁽¹⁾, Albert Adell⁽²⁾ y Marga Torre⁽²⁾

⁽¹⁾Unidad de Teledetección. Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Parc de Montjuïc, 08038, Barcelona.

⁽²⁾Unidad de Desarrollo Informático. Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Parc de Montjuïc, 08038, Barcelona.

Resumen

En este artículo se presenta la técnica desarrollada por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) para la generación de mapas de deformación del terreno mediante la utilización de sistemas radar embarcados en satélite. Estos sistemas radar más conocidos como SAR (Radar de Apertura Sintética) permiten la obtención de imágenes de la reflectividad del terreno, que posteriormente son procesadas mediante técnicas DInSAR (Interferometría SAR Diferencial) para la generación de mapas precisos de la deformación del suelo. La gran ventaja de estas técnicas es la posibilidad de monitorizar grandes áreas sin necesidad de medidas de campo y por lo tanto a muy bajo coste. En este trabajo se presentan diversos resultados obtenidos mediante la implementación del software DISICC (Differential Interferometry SAR ICC) de DInSAR avanzado que muestran el gran potencial de dicha técnica.

1. Introducción

Uno de los grandes problemas de la monitorización de los movimientos de un área de terreno determinada es el gran esfuerzo económico y humano necesario para establecer y medir regularmente una serie de puntos de control sobre el mismo. Si la zona a estudiar es muy extensa el problema se puede multiplicar en varios órdenes de magnitud, y más aún, si no tenemos la absoluta certeza de que se están produciendo deformaciones del terreno dicha campaña de medidas seguramente nunca llegará a realizarse.

Teniendo en cuenta todas estas limitaciones se puede concluir que sería de gran interés un sistema automático capaz de generar mapas de deformación sin la necesidad de acceder físicamente a la zona bajo estudio. Con dicho sistema sería posible monitorizar periódicamente grandes áreas para el control de riesgos a un coste muy inferior al necesario utilizando medidas de campo.

En este trabajo se presenta la implementación del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) de una novedosa tecnología conocida como Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) [1]. Dicha técnica,

mediante la utilización de imágenes radar de la reflectividad del terreno adquiridas por satélite, es capaz de generar mapas de deformación del terreno con precisión milimétrica.

Las imágenes utilizadas en este estudio proceden de los satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA) ERS-1/2 y ENVISAT, abarcando el período temporal comprendido entre el año 1992 y la actualidad. Teniendo en cuenta que cada imagen abarca una extensión de 100 x 100 Km a una resolución espacial de unos 20 metros, la cantidad de información referente a los movimientos del terreno recuperada mediante la técnica presentada por el ICC es extraordinariamente superior a cualquier campaña de medidas de campo.

El trabajo aquí presentado se ha dividido en los siguientes apartados:

- En primer lugar se realiza un repaso de la Interferometría Diferencial, presentando la formulación básica de la medida de deformación del terreno.
- Posteriormente se presenta la técnica y el software desarrollado en el ICC, denominado DISICC (Differential Interferometry SAR ICC), que aplica una técnica avanzada de DInSAR para obtener precisiones milimétricas en las medidas.
- Finalmente se presentan resultados con datos satélite (ERS-1/2 y ENVISAT) de diversas zonas de interés en Catalunya conjuntamente con medidas de campo obtenidas mediante técnicas tradicionales.

2. Interferometría Diferencial

Las técnicas DInSAR consisten en la combinación de dos imágenes SAR de la misma zona adquiridas desde posiciones ligeramente diferentes, tal y como se puede apreciar en la Fig. 1.

El resultado de esta combinación es una nueva imagen conocida como interferograma, cuya componente de fase está integrada por los siguientes términos [1] [2]:

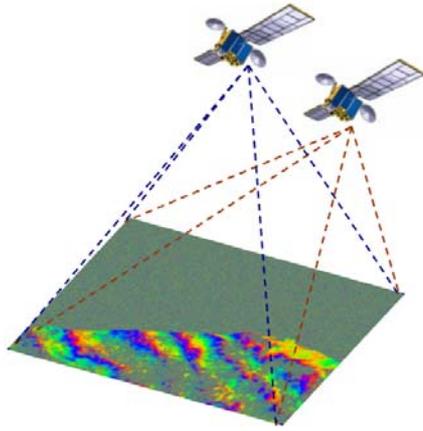


Figura 1: Esquema de adquisición de imágenes para un par interferométrico.

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} \quad (1)$$

Donde Φ_{Topo} es el término relacionado con la topografía del terreno, Φ_{Mov} es la componente de fase correspondiente al movimiento del terreno, Φ_{Atm} es la componente ruidosa causada por las diferentes condiciones atmosféricas entre las dos adquisiciones SAR y Φ_{Noise} es el ruido térmico de las medidas.

Para obtener medidas de deformación del terreno tendremos que cancelar o minimizar los efectos de las componentes no deseadas, que serán la topografía, los efectos atmosféricos y el ruido térmico. Al trabajar con técnicas DInSAR clásicas el problema principal radica en la presencia de los artefactos atmosféricos, difíciles de eliminar utilizando un solo par interferométrico. Sin embargo, el término relacionado con la topografía del terreno podrá ser cancelado con la ayuda de un Mapa de Elevaciones del Terreno (MET) y los parámetros orbitales de las adquisiciones.

De todas formas, tanto la imposibilidad de eliminar la componente atmosférica como las imprecisiones del MET condicionarán en gran medida la precisión obtenida en la medición del movimiento del terreno. Por esta razón, son necesarias técnicas avanzadas como la que se presenta a continuación [2].

3. El software DISICC

El paquete de software DISICC ha sido creado para superar las limitaciones intrínsecas de la

Interferometría Diferencial clásica. Su funcionamiento está basado no en la creación de un único interferograma (dos imágenes SAR), sino en la generación de un conjunto de pares interferométricos con imágenes adquiridas en diferentes fechas. Con este preámbulo se consigue una redundancia de los datos obtenidos que permitirá la minimización de los errores topográficos y artefactos atmosféricos.

La primera etapa de la técnica implementada consiste en la selección de aquellos píxeles de la imagen que presentan una buena calidad para la medición de la deformación del terreno. Esto es necesario puesto que dependiendo del tipo de terreno (urbano, boscoso, desértico...) la calidad de la fase interferométrica variará considerablemente. Por ejemplo, los suelos urbanos suelen proporcionar una gran calidad de señal incluso para pares interferométricos con separaciones temporales de diversos años. Por el contrario, los suelos boscosos pueden perder la calidad de medida en pares separados sólo algunos días. DISICC realiza esta selección de píxeles utilizando la información de coherencia del conjunto de interferogramas disponibles mediante un umbral seleccionable por el usuario.

Una vez se han seleccionado los píxeles útiles para el estudio de subsidencia se procede a una triangulación de la superficie, donde cada vértice de los triángulos se corresponde con uno de los píxeles seleccionados en la etapa anterior. Esto se realiza de esta manera porque DISICC calcula los gradientes de deformación del terreno para cada arista de la red de triangulación, ya que trabajando de esta forma la fase interferométrica (en este caso incrementos de fase) presenta una mayor calidad. Una gran ventaja de este procedimiento es que los artefactos atmosféricos, que presentan una baja variabilidad en el espacio, quedan minimizados al relacionar píxeles cercanos en la triangulación.

La siguiente etapa del software DISICC consiste en calcular los gradientes de deformación a partir de los incrementos de fase interferométrica para cada arista de la triangulación. Esto se realiza mediante el ajuste por mínimos cuadrados de los datos correspondientes a cada arista para todos los interferogramas generados respecto al siguiente modelo:

$$\Delta\Phi_{mod}(T) = C_1 \cdot \Delta\varepsilon + C_2 \cdot T \cdot \Delta v \quad (2)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes, $\Delta\varepsilon$ es el incremento de error topográfico, T es el intervalo temporal y Δv el incremento de velocidad de deformación del terreno.

Finalmente, una vez calculados los gradientes del movimiento se procede al cálculo de la velocidad absoluta de cada pixel mediante la integración de los incrementos obtenidos del ajuste de la ecuación 2. Después de este proceso, el software DISICC devuelve al usuario el mapa de velocidad media del terreno para el intervalo temporal comprendido entre la primera y la última imagen SAR utilizadas en el estudio.

4. Resultados

A continuación se presentan resultados con datos SAR reales correspondientes a diversas zonas de Catalunya. Las imágenes SAR utilizadas han sido adquiridas por los satélites ERS-1/2 y ENVISAT entre los años 1992 y 2004. La combinación de datos de diversas plataformas demuestra la gran flexibilidad de la metodología presentada y asegura su funcionamiento con datos de futuros satélites, permitiendo la realización de estudios con amplios rangos temporales.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos sobre la zona sur de la ciudad de Barcelona para el intervalo temporal comprendido entre Noviembre de 1992 y Septiembre de 2004 (ver Fig. 2). Se puede apreciar cómo la zona de la ciudad es claramente estable presentando tonos de color verdoso que se corresponden con valores de velocidad de deformación entorno a cero. Sin embargo la zona de la desembocadura del río Llobregat al sur de la ciudad presenta diversas zonas de color amarillo (velocidad entre -0.5 y -1.0 centímetros al año) e incluso tonalidades naranjas (entre -1.0 y -1.5 centímetros al año). Cabe destacar que estos valores de deformación del terreno se ajustan perfectamente a las previsiones de los geólogos sobre esta zona, sin embargo, la imposibilidad de disponer de medidas de campo de control impide realizar una comparación entre las diferentes metodologías. Es en estos casos dónde la técnica presentada tiene su mayor valor, ya que nos permite observar zonas que nunca antes habían sido medidas.



Figura 2: Mapa de deformación del terreno (cm/año) de la zona sur de la ciudad de Barcelona. Combinación de datos ERS y ENVISAT desde Noviembre de 1992 hasta Septiembre de 2004.

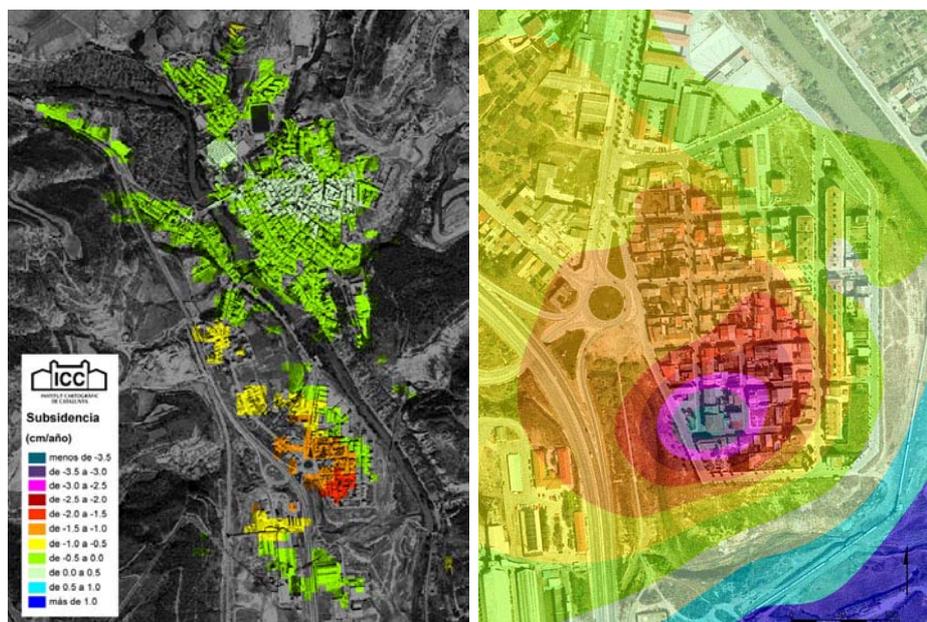


Figura 3: Izquierda: Deformación del terreno (cm/año) en Sallent. Datos ERS desde Noviembre de 1992 hasta Diciembre de 1999. Derecha: Medidas de deformación sobre el barrio de la Estación de Sallent durante 2004.

El segundo caso estudiado es el de Sallent en la comarca del Bages. Se trata de una zona muy interesante ya que uno de sus barrios (el Barri de l'Estació) está afectado por fuertes subsidencias del terreno ocurridas durante los últimos años. Además, y a diferencia del estudio de la ciudad de Barcelona, se dispone de medidas de campo realizadas mediante nivelación precisa. De todas formas, dichas medidas se corresponden al año 2004, y los datos de satélite disponibles en este estudio van desde 1992 hasta 1999. Como se puede comprobar, los espacios temporales son totalmente disjuntos, y por lo tanto, al tratarse de una subsidencia con una componente importante de no linealidad, los valores absolutos de las medidas serán dispares. Sin embargo, tal y como se puede apreciar en la Fig. 3, esta comparación permite observar como el proceso de deformación se ha acelerado en los últimos años (con un máximo de -2 cm/año antes de 1999 y -4 cm/año para el 2004), demostrando como en la actualidad el proceso sigue totalmente activo. Igualmente, se puede observar como el patrón de deformación en el Barri de l'Estació se corresponde perfectamente entre el resultado obtenido por el DISICC y las medidas de campo, corroborando el perfecto funcionamiento del software del ICC. Además, la nueva técnica permite monitorizar el

centro del municipio (zona norte) donde se puede apreciar la estabilidad del terreno.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la implementación de las herramientas DInSAR avanzadas (DISICC) por parte del ICC. Destacan la flexibilidad para utilizar datos procedentes de diversos satélites y su robustez para monitorizar grandes áreas. Finalmente, el buen funcionamiento del software ha quedado demostrado mediante el análisis de dos zonas afectadas por subsidencias.

6. Referencias

- [1] Arbiol, R., Palà, V., Pérez, F., Castillo, M., Crosetto, M. "Aplicaciones de la tecnología INSAR a la cartografía", *IX Congreso Nacional de Teledetección*, Lleida, 19-21 Septiembre de 2001.
- [2] Mora, O., Mallorquí, J., Broquetas, A. "Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps From a Reduced Set of Interferometric SAR Images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 10, Octubre 2003.