

Análisis de subsidencia en el Delta del Ebro mediante el uso de imágenes SENTINEL-1A/B: Resultados preliminares y lecciones aprendidas

Oscar Mora, Fernando Pérez Aragüés, Luca Pipia, Juan Fernando Marchán, Jordi Marturià, Jordi Corbera y Anna Tardà

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuïc, 08038-Barcelona, España. e-mail: oscar.mora@icgc.cat

Resumen: Este trabajo muestra el estudio del fenómeno de subsidencia en la zona del Delta del Ebro (como parte de las acciones del proyecto LIFE EBRO-ADMICLIM) basado en la aplicación de técnicas de interferometría diferencial (DInSAR) y datos de los satélites radar SENTINEL-1A y B. Para el estudio se han utilizado las órbitas ascendente y descendente, lo que ha permitido la descomposición del movimiento en sus direcciones vertical y horizontal, así como una mayor densificación de puntos de medida. El procesado de los datos se ha realizado con la cadena interferométrica desarrollada por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), que incluye corrección de las imágenes, generación de pares interferométricos, selección de puntos de medida coherentes, estimación de artefactos atmosféricos y generación de series temporales de movimiento, así como diferentes proyecciones de los vectores de movimiento.

Palabras clave: Interferometría radar, SENTINEL-1, Copernicus, subsidencia

Ebro Delta subsidence analysis using SENTINEL-1A/B data: Preliminary results and lessons learned

Abstract: This work presents a study of the subsidence phenomenon over the Ebro Delta area (as part of the actions driven by the LIFE project EBRO-ADMICLIM) based on the application of differential interferometric techniques (DInSAR) and using SENTINEL 1A/B radar data. Ascending and descending orbits have been processed, thus allowing the decomposition of motion into vertical and horizontal directions, as well as an improvement in the density of measurement points. Data processing has been performed using the interferometric chain developed by the Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), including image co-registration, interferometric pair generation, selection of coherent points, atmospheric artefact estimation and time series generation, in addition to appropriate projections of motion vectors.

Keywords: Radar Interferometry, SENTINEL-1, Copernicus, subsidence

1. INTRODUCCIÓN

La interferometría diferencial radar (DInSAR) es una técnica para la monitorización de movimientos de la superficie con precisión milimétrica (Ferretti et al, 2001, Mora et al, 2003), que utiliza imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Uno de los principales inconvenientes de dicha técnica ha sido la dificultad de obtener datos con una alta frecuencia temporal y a un precio reducido. Por ejemplo, durante las últimas dos décadas los satélites en banda C de la Agencia Espacial Europea (ESA), ERS-1/2 y ENVISAT, han proporcionado una gran cantidad de imágenes a precio reducido o gratuito, pero con una frecuencia temporal baja e irregular. Por otro lado, los satélites comerciales de la última década, tales como Radarsat-2 (banda C), Cosmo-SkyMed y TerraSAR-X (banda X), ofrecen datos bajo demanda con reducidos tiempos de revisita, pero a precios elevados y con cobertura reducida.

La puesta en órbita de los satélites SENTINEL-1A y B (banda C) por parte de la ESA, en el marco del programa Copernicus, ha supuesto un enorme impulso a los productos DInSAR, ya que las imágenes son de descarga gratuita, con una frecuencia de adquisición elevada (hasta una imagen cada 6 días en el mejor de los casos) y una cobertura extensa de cada imagen (250 x 250 Km). Estos satélites permiten, por lo tanto, la

monitorización continua de los movimientos de superficie de grandes áreas, mediante la utilización de cadenas de procesado DInSAR avanzadas como la desarrollada por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).

Por lo que respecta al proyecto LIFE EBRO-ADMICLIM (ENV/ES/001182), se han planteado acciones piloto de mitigación y adaptación al cambio climático en el Delta del Ebro (Cataluña, España), una zona muy vulnerable a la subida del nivel del mar y a la subsidencia, mediante una gestión integrada del agua, los sedimentos y los hábitats (arrozales y humedales). En este contexto, el proyecto LIFE EBRO-ADMICLIM ha de permitir el desarrollo y aplicación de nuevas estrategias de adaptación a la pérdida de elevación del Delta respecto al nivel del mar y la regresión de la costa en los humedales deltaicos. Por lo tanto, los datos interferométricos sobre ritmos actuales de subsidencia del Delta son de principal importancia para el proyecto. Como primer estudio DInSAR se realizó un procesado con imágenes SAR cubriendo un espacio temporal de dos décadas (Pipia et al, 2016), utilizando los satélites ERS, ENVISAT (banda C) y ALOS (banda L). Los resultados mostraron ritmos de subsidencia en torno a los 3 milímetros por año en diferentes zonas del Delta del Ebro. En el presente trabajo se pretende dar

continuidad a estas medidas aprovechando las ventajas ya comentadas de los satélites SENTINEL-1A y B.

2. METODOLOGÍA DE PROCESADO

La cadena de procesado interferométrico del ICGC utiliza las diferentes técnicas de interferometría diferencial (Ferretti et al, 2001, Mora et al, 2003) para separar cada una de las componentes de la señal radar; es decir, artefactos atmosféricos, error topográfico y movimiento del terreno. Para ello es necesario un número mínimo de adquisiciones, que típicamente se sitúa en torno a 20-30 imágenes. Es por ello que la gran cantidad de imágenes disponible de los satélites SENTINEL-1A y B es idónea para la realización de estudios interferométricos de calidad en períodos temporales relativamente cortos (son necesarios 4 meses para la adquisición de 20 imágenes con una frecuencia temporal de 6 días).

La etapa inicial del procesado es el correregistro de todas las imágenes respecto a la geometría de la adquisición máster. Esta imagen máster se selecciona entre el conjunto de adquisiciones como aquella situada en el centro del espacio temporal y orbital. Posteriormente, se generan diferentes pares interferométricos en base a unos criterios de máxima separación temporal (días transcurridos entre el par de imágenes) y orbital (separación espacial de cada una de las órbitas). En la generación de los interferogramas es necesario eliminar la componente topográfica de la señal radar, lo cual se realiza con la ayuda de un Modelo de Elevaciones del Terreno (MET) de la zona a estudiar. Las imprecisiones del MET utilizado introducen un error en la fase que ha de ser estimado y eliminado en etapas posteriores del procesado.

Una vez se dispone de los interferogramas diferenciales (sin la contribución de fase topográfica) se seleccionan los píxeles susceptibles de ser medidos mediante la coherencia interferométrica. En este punto se inicia la parte del procesado conocida como Persistent Scatterer Interferometry (PSI) (Ferretti et al, 2001). Resaltar que durante la aplicación del PSI es necesario que el punto a medir no sufra cambios superficiales significativos durante el período temporal de monitorización (decorrelación temporal). La calidad de cada píxel puede ser medida a priori con la estimación de coherencia, y típicamente se encuentra una mayor densidad de puntos en zonas urbanas y de baja vegetación, donde la superficie sufre menos afectaciones, ya sean naturales (cambios de vegetación, erosión, etc.) o causadas por el hombre (excavaciones, construcciones activas, etc.).

Una vez se han seleccionado los puntos candidatos a ser medidos, se aplica un proceso iterativo para la estimación de los artefactos atmosféricos, el error topográfico del MET y la velocidad de movimiento. En el caso de los artefactos atmosféricos, la señal no deseada es causada por los cambios de velocidad de propagación de la señal electromagnética al avanzar por la atmósfera, que presenta condiciones diferentes en cada día de adquisición del satélite.

La componente no lineal del movimiento es estimada a partir de los residuos de fase obtenidos con los interferogramas originales y las diferentes componentes ya calculadas (artefactos atmosféricos, error topográfico y velocidad de movimiento). Esta componente no lineal junto a la velocidad permite la obtención de las series temporales finales de movimiento para cada punto candidato. Una etapa final de georreferenciación y selección de puntos, basada en la desviación estándar de las series temporales (nivel de ruido de la medida) es necesaria para la obtención de un producto final de calidad.

3. GEOMETRÍA DE ADQUISICIÓN

Uno de los aspectos más importantes a la hora de utilizar los resultados de interferometría es la geometría de adquisición. Esta geometría determina qué componente del movimiento es medida con cada órbita. El satélite radar, que observa el terreno con un ángulo de incidencia determinado, puede capturar imágenes desde su órbita ascendente (vuelo desde el polo sur hacia el norte) y descendente (desde el norte hacia el sur). Al tratarse de un sistema radar (mide variaciones de distancia respecto a su ángulo de visión), el movimiento medido es la proyección ortogonal del movimiento real sobre la línea de visión del satélite o *Line Of Sight* (LOS), tal y como se muestra en la figura 1, con un acercamiento o alejamiento del punto en la línea que une al satélite con el terreno.

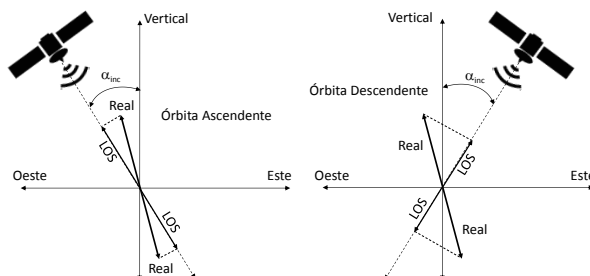


Figura 1. Geometría y mediciones de movimiento en LOS, para órbitas ascendentes (izquierda) y descendentes (derecha).

3.1. Descomposición Vertical-Horizontal

Cómo se desprende del razonamiento anterior, el procesado de imágenes ascendentes o descendentes no proporciona una medida del movimiento en la dirección vertical y/o horizontal, sino en LOS. Sin embargo, la utilización conjunta de ambas órbitas, tras una descomposición geométrica, aporta una estimación de dichas componentes, tal y cómo se muestra en la figura 2. En la ecuación que acompaña a la figura 2, el ángulo *heading* se corresponde a la inclinación de la órbita respecto a la dirección Norte-Sur, siempre pequeña en los satélites de órbita cuasi-polar y no representada en el gráfico para su simplificación. Esto implica una baja sensibilidad al movimiento en dirección Norte-Sur y por ello esta componente horizontal no se estima. Por lo

tanto, los productos interferométricos combinados se suelen limitar a la dirección vertical (arriba-abajo) y horizontal (este-oeste).

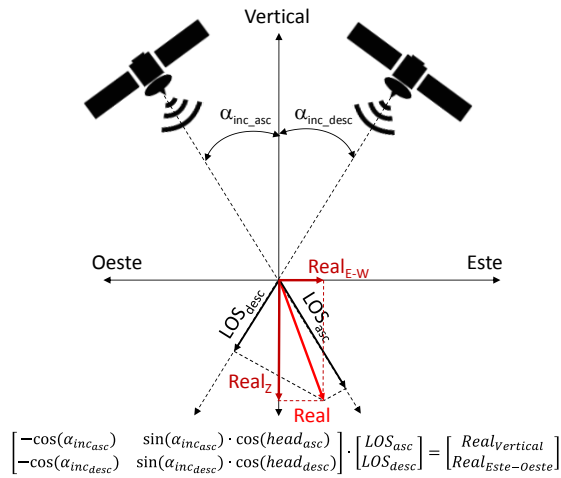


Figura 2. Descomposición Vertical y Horizontal (Este-Oeste) del movimiento a partir de las medidas de órbitas ascendentes y descendentes.

Al tener que combinar información de ambas órbitas, la descomposición sólo se puede realizar en puntos de medida comunes en ambos procesados. Esto conlleva a una reducción en el número total de puntos de medida respecto a las medidas individuales en órbita ascendente y descendente.

4. RESULTADOS

Para el presente trabajo se han procesado dos conjuntos de datos de los satélites SENTINEL-1A y B en órbitas ascendente y descendente. Las características de los productos obtenidos con la cadena interferométrica del ICGC se presentan en la Tabla 1. Los siguientes subapartados detallan los diferentes productos obtenidos.

Tabla 1. Características técnicas de los procesados SENTINEL-1.

Órbita	Núm. imágenes	Fecha inicial	Fecha final	Núm. Interferogramas
Asc.	46	12/11/2014	31/12/2016	159
Desc.	85	18/11/2014	06/05/2017	211

4.1. Horizontal-Vertical

Una vez se dispone de los mapas de movimiento en la dirección LOS para las órbitas ascendente y descendente, la combinación de ambos nos permite realizar la descomposición en las direcciones vertical y horizontal (Este-Oeste), tal y como se describe en la sección 3.1. La figuras 3 y 4 muestran las dos componentes del desplazamiento, donde se aprecia la diferente densidad de puntos de medida dependiendo del tipo de superficie. En el caso de las zonas de cultivo de arroz, debido a los rápidos cambios de la vegetación y humedad, el número de puntos coherentes es mucho menor que en las zonas pobladas, por ejemplo. En los

resultados se observa que en general la principal dirección de movimiento de la zona es la vertical, tal y como se observa en las zonas más afectadas por desplazamiento. En las diferentes ilustraciones se han marcado con triángulos blancos las localizaciones de diferentes reflectores artificiales (figura 5), orientados hacia la órbita ascendente, e instalados para asegurar puntos de medida de gran calidad en diferentes zonas de interés afectadas por altos niveles de decorrelación temporal.

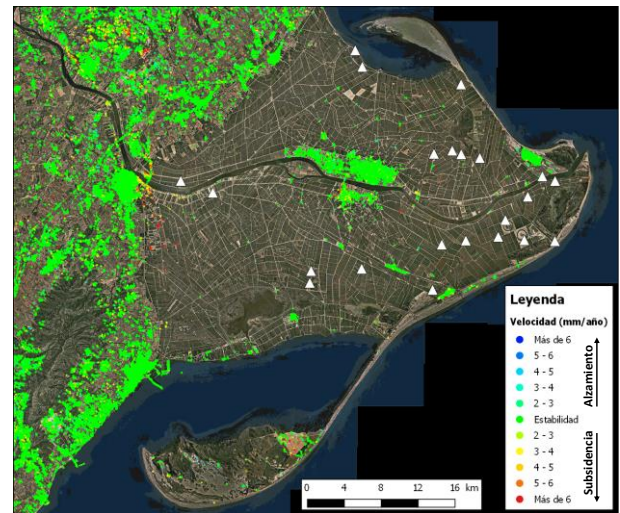


Figura 3. Mapa de movimiento vertical.

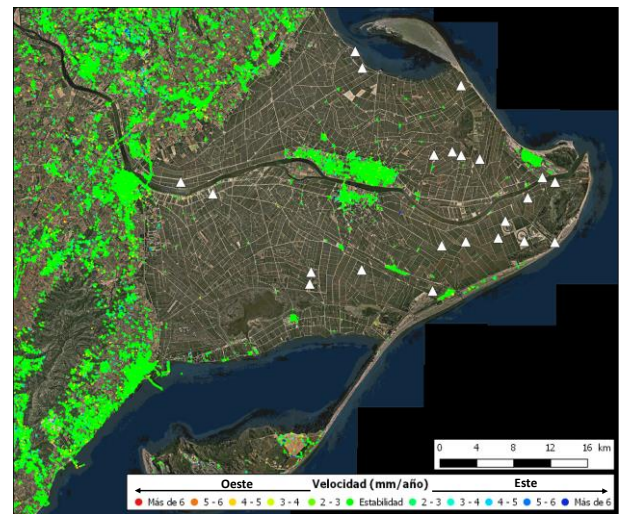


Figura 4. Mapa de movimiento horizontal (Oeste-Este).



Figura 5. Reflector artificial instalado en el Delta del Ebro.

En la figura 6 se muestra un detalle de los mapas de velocidad vertical y horizontal en la zona de Deltebre y Sant Jaume d'Enveja (centro del Delta). La figura 7 detalla las series temporales horizontal y vertical de uno de sus puntos de medida. El resultado confirma zonas de subsidencia entorno a los 3-5 mm/año con un movimiento horizontal de menor intensidad en la mayoría de las mediciones. De todas formas, cabe destacar que en un futuro, con una serie temporal más larga de adquisiciones SENTINEL-1A y B se podrán obtener medidas más precisas de velocidad, necesarias en el entorno del Delta del Ebro, ya que la velocidad de subsidencia en muchos casos está muy cerca del nivel de ruido de la tecnología radar.

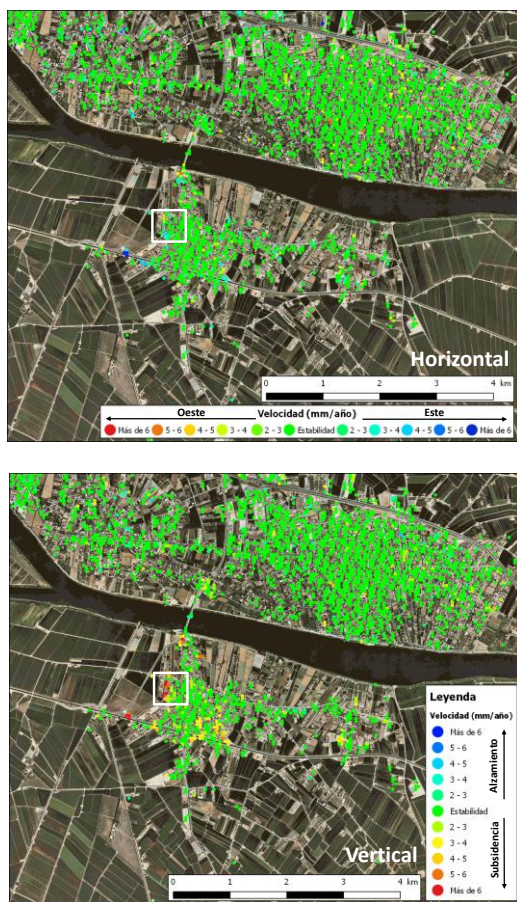


Figura 6. Mapa horizontal y vertical de Deltebre y Sant Jaume d'Enveja. Localización aproximada del punto de la figura 7 en rectángulo blanco.

4.2. Proyección vertical LOS

Finalmente, se ha realizado el ejercicio de considerar, como se desprende de los resultados de la sección anterior, que la principal componente de movimiento es la vertical. Bajo esta premisa se han combinado los resultados de las órbitas ascendente y descendente, después de haber proyectado los mapas sobre la dirección vertical. Con ello, y tal como se muestra en la figura 8, se ha conseguido una mayor densificación de puntos, y por lo tanto una mejor determinación de las áreas afectadas por subsidencia.

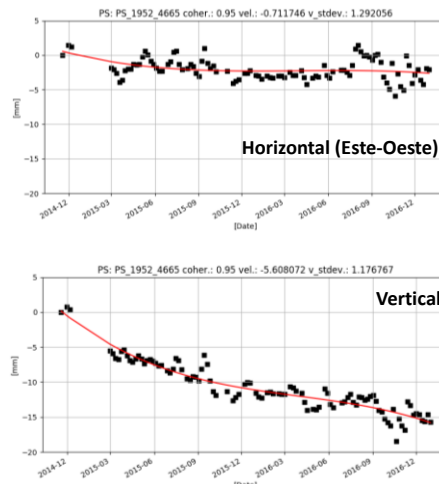


Figura 7. Serie temporal del punto de la figura 6.

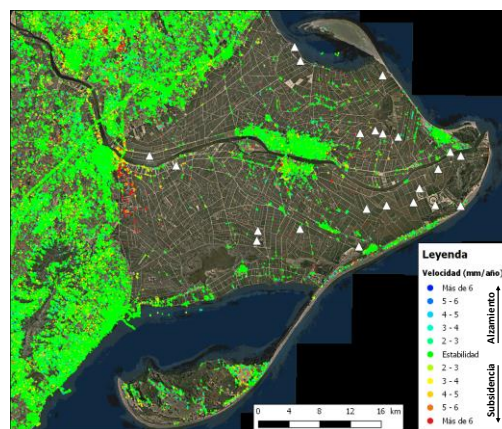


Figura 8. Mapa de movimiento vertical proyectado con combinación de órbitas ascendente y descendente.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se muestran las capacidades de medida de movimientos superficiales con los satélites SENTINEL-1A y B. La disponibilidad de gran cantidad de imágenes en órbitas ascendente y descendente permite medir desplazamientos verticales y horizontales, de gran valor para monitorizar zonas de especial interés, como en este caso el Delta del Ebro.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ferretti, A. et al 2001. *Permanent scatterers in SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39:8-30.
- Mora, O. et al 2003. *Linear and nonlinear terrain deformation maps from reduced set of interferometric SAR images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(10):2243-2253.
- Pipia, L. et al 2016. *Two decades of multi-sensor subsidence monitoring over Ebro Delta using coherence-based DInSAR techniques*. Living Planet Symposium, Praga, 9-13 Mayo 2016.
- EBRO-ADMICLIM LIFE1 (ENV/ES/001182). <http://www.lifebroadmiclim.eu/es/>