

CONTROL DEL ASENTAMIENTO DE LOS DIQUES ESTE Y SUR DEL PUERTO DE BARCELONA MEDIANTE DATOS InSAR

Francesc Pros Llavador ⁽¹⁾, Silvia González López ⁽²⁾, Juan José Martínez Benjamín ⁽³⁾

⁽¹⁾ Dpto. Infraestructuras y conservación, Autoridad Portuaria de Barcelona, francesc.pros@portdebarcelona.cat

⁽²⁾ Ingeniero Técnico en Topografía, Mapping & Co, Barcelona.

⁽³⁾ Dpto. de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña.

RESUMEN

En este artículo se estudia la viabilidad del uso de InSAR en el control del asentamiento de los diques de reciente construcción en el Puerto de Barcelona. El análisis se realizó a partir de datos obtenidos mediante *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) validándose con datos obtenidos mediante GPS. El uso de satélites de alta resolución permite obtener una gran densidad de puntos en estas infraestructuras de carácter lineal, facilitando un análisis muy detallado del movimiento que se produce. Aunque su uso en el control de infraestructuras está limitado por la disponibilidad de las imágenes, no permitiendo su uso como sistema de control único.

Palabras clave: Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR), Dispersores Persistentes (PS), Subsistencia, Diques.

ABSTRACT

In this paper we study the feasibility of using InSAR in monitoring the settlement of newly built dikes in the Port of Barcelona. The analysis was performed using data obtained by Persistent Scatterer Interferometry (PSI), GPS measures was used to validate PSI data. The use of high-resolution satellites allows a high density of points in these linear nature infrastructures, providing a very detailed analysis of the movement that occurs. Although its use in the control infrastructure is limited by the availability of the images, not allowing use as a unique control system.

Keywords: Radar Interferometry (InSAR), Persistent Scatterer (PS), subsidence, dykes.

1. INTRODUCCIÓN

El Puerto de Barcelona comienza durante 2003 la construcción del dique Sur (de 4850 m de longitud) y la ampliación en 2024 m del dique del Este ya existente (Figura 1).



Figura 1. Tipos de diques presentes en el área de estudio. En rojo los diques en talud, y en amarillo los diques verticales o de cajón.

El suelo sobre el que se asientan estos diques forma parte del delta del Llobregat, constituido en su mayor parte por capas de materiales impermeables, que originan un drenaje muy lento del agua de su interior cuando son sometidos a grandes presiones. Debido a la compactación del terreno los diques sufren movimientos de subsidencia que pueden durar años. Por esa razón se lleva a cabo una monitorización de

esos movimientos, tanto durante la construcción de la obra, como en la fase de explotación posterior.

Históricamente el Puerto de Barcelona ha utilizado técnicas de GPS diferencial para el control de los asentamientos, tanto en RTK (*Real Time Kinematic*) como en posicionamiento estático. Complementando dichas observaciones, en el año 2011 se plantea el uso de otras técnicas, como la instalación de estaciones GPS fijas o el uso de datos InSAR. El uso de estaciones GPS fijas ofrece datos continuos sobre el movimiento de esos puntos en 3D y casi en tiempo real, pero necesitan de la puesta en marcha y el mantenimiento de dichas estaciones. Esto último puede ser demasiado costoso en diques sometidos regularmente a fuertes tormentas.

Este estudio muestra como el uso de datos obtenidos mediante interferometría diferencial avanzada (ADInSAR) resulta muy efectivo en el estudio de los movimientos sufridos por estos diques. En este proyecto se han utilizado datos InSAR obtenidos mediante la técnica de los *Persistent Scatterer* (PS), cuya principal ventaja respecto a los datos GPS es que permite monitorizar grandes áreas con un menor coste, consiguiendo además, mayor precisión vertical.

2. ESTUDIO DE LOS PS SUMINISTRADOS

Los datos de deformación del año 2009 han sido obtenidos a partir de 17 imágenes en órbita ascendente del satélite TerraSAR-X, en modo Strip map, con una resolución de 3x3 m. Los datos del año 2010 fueron obtenidos a partir de 12 imágenes del satélite Radarsat-2 en órbita ascendente, el cual en modo Multilook Fine, tiene una resolución de 5x5 m. Los PSI fueron obtenidos mediante el procesado SPN (Stable Point Network) [Crosetto *et al.* 2008].

Los PS se suministraron en formato shape y todos los análisis posteriores se han realizado con ArcGis (ESRI) y su extensión de análisis geoestadístico. Una de las ventajas de tener una elevada densidad de mediciones es que permite realizar un estudio geoestadístico de esos datos y crear mapas de subsidencia a partir de interpolación *kriging*.

Mediante los histogramas se puede observar que las distribuciones normales están agrupadas en puntos localizados en el mismo tramo o fase constructiva del dique (Figura 2).

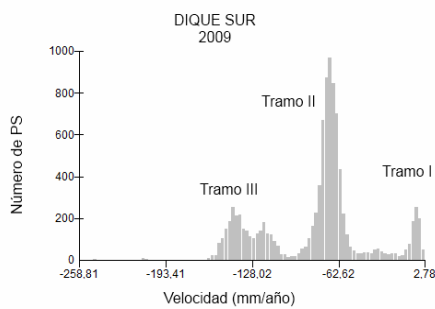


Figura 2. Histograma de la velocidad de subsidencia en los distintos tramos del dique sur durante 2009.

La detección de *outliers* (medidas que tienen un valor muy alto o muy bajo en relación a los puntos que lo rodean) es esencial, ya que podrían ser anomalías reales del movimiento o errores de medida que habría que eliminar, ya que afectarían a los valores vecinos durante la interpolación. (Figura 3).

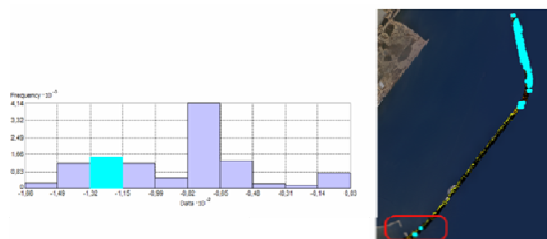


Figura 3. Detección de posibles *outliers* seleccionando valores de velocidad en el histograma que no aparecen en la zona esperada.

Mediante *kriging* ordinario se generan los mapas de subsidencia, a los que se aplica una leyenda de color para facilitar su interpretación (Figura 4). Una vez obtenido el mapa se puede realizar un *transect* y obtener un perfil longitudinal con la velocidad de subsidencia a lo largo del dique (Figura 5).

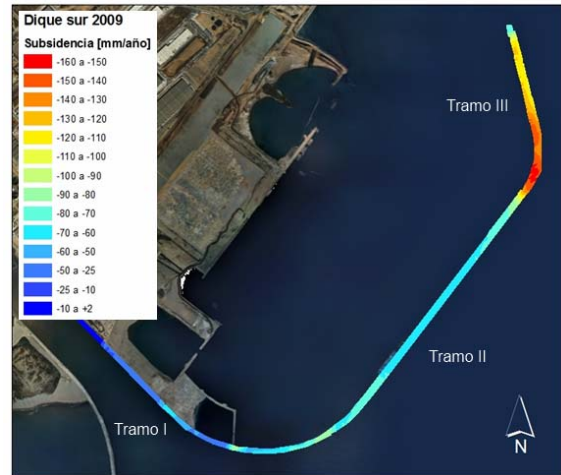


Figura 4. Mapa de Velocidad de desplazamiento en el dique sur durante 2009.

El tramo II del dique sur está construido con cajones verticales prefabricados que producen un menor asentamiento en comparación con los tramos donde se construye en talud, como se puede observar en la Figura 5.

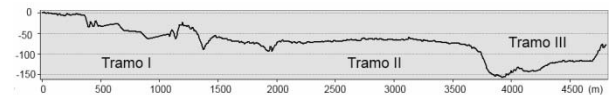


Figura 5. Perfil longitudinal con la Velocidad de subsidencia (mm/año) en los distintos tramos del dique sur durante 2009.

Las variaciones de velocidad observadas en el tramo con mayor grado de consolidación del dique sur (el tramo I, terminado en 2003) son debidas a la construcción de muelles adosados durante el año 2009.

En el caso del dique Este se aprecia claramente que el tramo ya existente permanece estable, con movimientos en torno a los -5 mm/año. Sin embargo, conforme nos vamos acercando al extremo del dique aumenta la velocidad de asentamiento, al tener el terreno un menor grado de consolidación. El tramo final del dique tiene velocidades cercanas a los -180 mm/año. (Figuras 6 y 7)

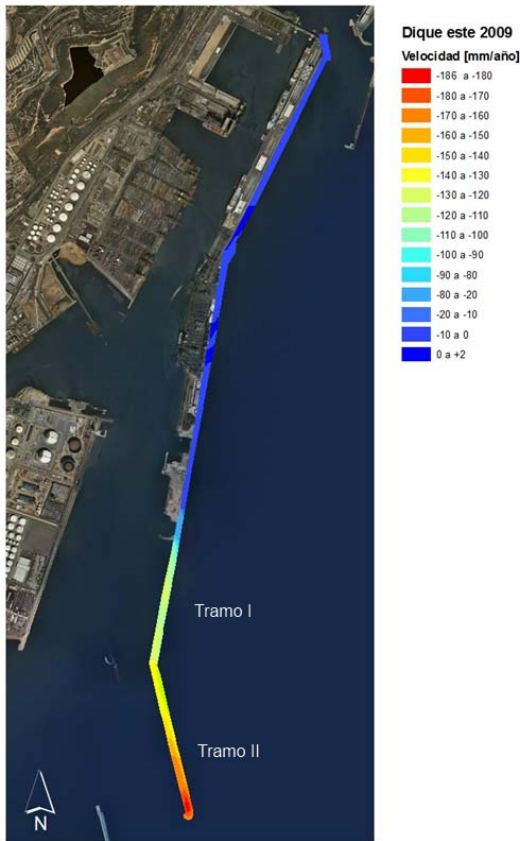


Figura 6. Mapa de Velocidad de desplazamiento en el dique este durante 2009.

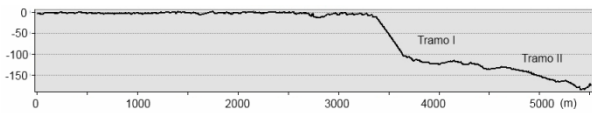


Figura 7. Perfil longitudinal con la Velocidad de subsidencia (mm/año) en el dique este durante 2009.

Para realizar la comparación GPS-InSAR hubo que realizar la concatenación de las series temporales de datos InSAR, ya que son series obtenidas con datos de diferentes sensores (TerraSAR en 2009 y RadarSAT en 2010) y con un hueco de 72 días entre ambas.

A partir de los 45 puntos de control GPS (medidos con RTK) de los que se disponían datos, se realiza un buffer de 25 m calculando la media de los valores InSAR dentro ese radio para los puntos con presencia de un mínimo de 2 PS, y usando esos valores promedio en la regresión. La concatenación se realizó mediante regresiones de segundo grado entre las dos series.

Una vez obtenida la serie temporal completa 2009-2010 se proyectan los datos GPS, que son datos de movimiento en las 3 dimensiones, a la dirección LOS (acrónimo de *Line of Sight*, o línea de visión del satélite) para poder comparados con los PS. Para realizar esta proyección se usaron las fórmulas (1) y (2):

$$A = (-1) \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta_i) \\ \text{sig}(\text{head}) \cdot \text{sen}(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_h) \\ \text{sig}(\text{head}) \cdot \text{sen}(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_h) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$d_{LOS} = A \cdot [d_u \quad d_e \quad d_n] \quad (2)$$

Donde,

d_u, d_e, d_n , deformación en x, y, z (medida con GPS)

θ_i ángulo de incidencia del satélite. 33° para el RadarSAT-2 y 35° para el TerraSAR-X

α_h , *track heading*, o azimut del satélite. En órbita ascendente (-14°) y en descendente (14°)

sig(head), signo del azimut, positivo para orbita descendente y negativo en ascendente

En la Figura 8 se observa la gran coincidencia entre serie temporal obtenida con datos PSI entre 2009 y 2010 en un punto situado el tramo III del dique sur, y las medidas obtenidas con GPS (unidades en mm).

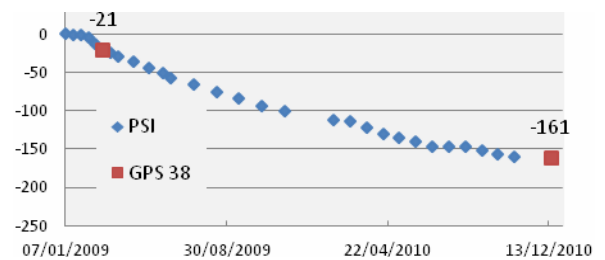


Figura 8. Ejemplo de concatenación de series temporales y su comparación con las medidas GPS.

3. LIMITACIONES Y VENTAJAS

Este proyecto se centra en el uso de datos InSAR para realizar un análisis histórico del movimiento producido durante los años 2009- 2010. Si se comparan las deformaciones obtenidas en los puntos de control con DGPS y los datos InSAR se observa la gran correspondencia existente. (Figura 9)

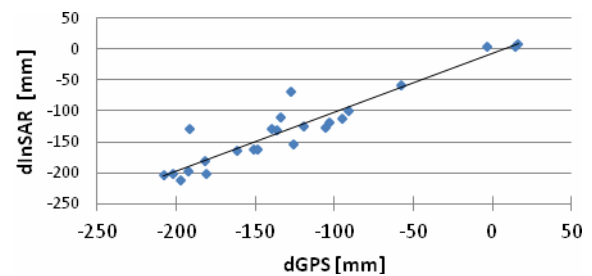


Figura 9. Gráfico de dispersión entre los movimientos obtenidos con datos InSAR y con datos DGPS.

3.1 Dirección LOS vs movimiento en X, Y, Z

Los sistemas InSAR solo pueden medir movimiento en la dirección de observación del satélite, con lo que en realidad miden la proyección del movimiento a la dirección LOS (Bateson *et al.* 2010). Con los satélites usados en este estudio se pueden conseguir precisiones de 2-3 mm, pero el error aumenta si el movimiento real del terreno no coincide con la dirección de observación del satélite.

Para el caso de las deformaciones verticales debidas al asentamiento son especialmente útiles, ya que se consiguen mejores precisiones que con GPS (desviación estándar de 3-6 mm en altimetría). Pero si en la zona de estudio también se producen deformaciones en dirección horizontal, estas no son fácilmente detectables solo por medio de InSAR, haciendo necesario complementarlas con GPS (desviación estándar de 1-2 mm en planimetría).

3.2 Resolución espacial vs resolución temporal

La elevada densidad de datos obtenida con PSI permite la creación de superficies de interpolación kriging, facilitando un estudio exhaustivo de la deformación producida. Cabe destacar lo importante que es la elección del satélite en función del tipo de superficie sobre la que se trabaje, en el caso de los diques estudiados se obtiene mayor densidad de datos con un satélite en banda X y de gran resolución, como es el TerraSAR-X.

La elevada resolución espacial permite detectar movimientos muy localizados facilitando el diagnóstico de posibles afectaciones en la estructura, pero la disponibilidad de estos datos depende del tiempo de revisita del satélite, haciendo imposible su uso como sistema de alarma. Con datos GPS procedentes de una estación fija se obtiene una buena resolución temporal, al ser datos continuos en el tiempo, complementando de este modo las mediciones PSI.

3.3 Movimientos milimétricos vs movimientos rápidos

Una de las grandes ventajas de las técnicas PSI es la gran sensibilidad a los movimientos milimétricos producidos entre dos adquisiciones del satélite. Pero, esta misma precisión en las pequeñas deformaciones impide detectar los movimientos rápidos de la superficie.

En el caso de los satélites usados en este proyecto el gradiente máximo de movimiento es de 7.75 mm para el TerraSAR-X y de 14 mm para el Radarsat-2 (Duro *et al.* 2012). Esto hace que no se puedan utilizar estas

técnicas durante la fase constructiva, en la que se alcanzan velocidades de 50-100 cm/año.

En el posterior control durante la fase de explotación, hay que tener en cuenta, además del asentamiento, los posibles desplazamientos laterales sufridos por efecto de las olas, esto solo se puede controlar de manera efectiva con DGPS, que ofrece mayor precisión en horizontal que el InSAR.

4. CONCLUSIONES

El control de deformaciones en este tipo de infraestructuras es siempre complicado, pues ninguna técnica (GPS, InSAR o LIDAR) se ajusta totalmente a las condiciones particulares de estas obras, haciendo necesario la integración de varias técnicas para conseguir los mejores resultados. En obras portuarias es necesario conocer con gran precisión los movimientos planimétricos y altimétricos, lo que hace necesario combinar InSAR y DGPS. Además, el gran inconveniente del InSAR, como instrumento único de control en la monitorización de diques, es la disponibilidad 'real' de las imágenes, ya que aunque se usen satélites con tiempos de revista que pueden llegar a ser diarios, se necesita contratar con antelación esas imágenes. En obra civil puede ser necesario disponer de un día para otro de unos datos de subsidencia para una zona en concreto, y solo el GPS permite desplazar un equipo a la zona y realizar la medición de manera casi inmediata.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado dentro del proyecto CGL2009-13435/CLI financiados por el Plan Nacional I+D+i del MEC.

Los datos GPS e InSAR han sido facilitados por la Autoridad Portuaria de Barcelona y Altamira Information, esta última encargada del procesado de los *Persistent Scatterer*.

6. BIBLOGRAFÍA

BATESON, L., NOVALI, F. y COOKSLEY, G. 2010, *TerraFirma User Guide: A guide to the use and understanding of Persistent Scatterer Interferometry*. GMES TerraFirma.

CROSETTO, M., BIESCAS, E., DURO, J., CLOSA, J., ARNAUD, A. 2008, *Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 74, No. 4, April 2008, pp. 443-450.

DURO, J., ALBIOL, D. 2012. *Product Handbook*. Altamira Information.