

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN LOS TERRENOS CIRCUNDANTES DEL EMBALSE DE ARENÓS.

ESTUDIO RETROSPECTIVO MEDIANTE TÉCNICAS INSAR Y COMPARACIÓN CON LOS DATOS DE AUSCULTACIÓN.

Enrique Moreno Calle¹

Cristina Sola García²

Alejandro Donato Morales³

José Luis Lorenzo Riera³

Enrique Giménez Cañete³

RESUMEN: Se presentan en este escrito los trabajos realizados y resultados obtenidos del análisis de desplazamientos del terreno mediante técnicas InSAR en la zona perimetral del embalse de Arenós (Castellón).

Se detallan los diferentes pasos seguidos en la estimación de los desplazamientos del terreno y sus velocidades mediante interferometría radar, en análisis retrospectivo que abarcó desde 2016 hasta 2021 y se describe el procesado de los datos InSAR, previo a su posterior comparación con los movimientos registrados por los sondeos inclinométricos situados en ciertas laderas del embalse.

Finaliza el artículo con las conclusiones alcanzadas en relación con la estimación de la estabilidad en los terrenos circundantes del embalse, el resumen de los resultados obtenidos en el estudio comparativo con el control inclinométrico, y la presentación de las consideraciones generales sobre las ventajas y limitaciones de las técnicas InSAR en la estimación de la estabilidad de laderas de los embalses.

¹ Dirección General del Agua (DGA).

² Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ).

³ Land, Water and Dams S.L. (LWD).

1. INTRODUCCIÓN.

Entre los meses de abril y septiembre del 2022 se llevaron a cabo los trabajos de tratamiento interferométrico de series de imágenes radar del **embalse de Arenós**, en el río Mijares (Castellón, Comunidad Valenciana).

Estos trabajos han permitido conocer los movimientos acumulados y la tendencia del vector velocidad que se han producido en los terrenos circundantes a este embalse a lo largo del periodo 2016 a 2021. Así mismo, esta información ha podido ser comparada con las series de datos de movimientos provenientes de los controles inclinométricos existentes.

Para la consecución de los objetivos planteados se llevaron a cabo las tareas que a continuación se describen y de las cuales, el presente artículo, detallará la metodología aplicada y los resultados alcanzados en cada caso.

2. AREA DE INTERÉS Y OBTENCIÓN DE IMÁGENES RADAR

La presa de Arenós está ubicada en el río Mijares, sobre la cerrada de El Romeral, en los términos municipales de Puebla de Arenoso y Montanejos, provincia de Castellón, siendo su finalidad primordial la regulación y el aprovechamiento de las aportaciones del río para poner en regadío 27.000 ha de terrenos cultivables de la Plana de Castellón.

El embalse de Arenós constituye, junto con el embalse de Schar, situado aguas abajo

en el río Mijares, una pieza clave en la regulación anual e hiperanual del río Mijares, y su construcción significó el desarrollo de un riego tradicional en la Plana de Castellón de alta garantía y un importante aprovechamiento hidroeléctrico del río, ambos basados en los caudales garantizados (datos obtenidos del Informe de viabilidad de la actuación 3.1.h Adecuación del Embalse de Arenós de 2013).

Debido a la intensidad con la que desde hace años se viene siguiendo el comportamiento de las laderas del embalse de Arenós, se consideró adecuado que el área de estudio abarcara todo el embalse (desde la cola hasta la presa, la propia Presa de Arenós y las laderas de ambas márgenes).

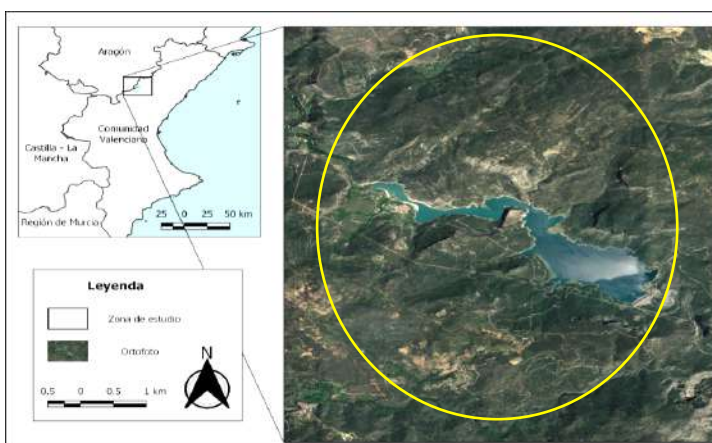


Figura 1 Ubicación del área de interés y detalle de la zona de estudio.

Una vez establecida la zona de estudio, se descargaron del repositorio de datos Sentinel-1 las imágenes correspondientes al periodo 11/01/2016 a 22/12/2021, tanto del satélite 1A como del 1B, correspondientes al producto SLC (Single Look Complex) y en el modo sensor IW (Interferometric Wide Swath). La descarga se hizo tanto para escenas en la órbita de sentido ascendente (277 archivos) como en la de sentido descendente (308 archivos). El periodo de revisita obtenido fue de 6 días.



Figura 2 Imagen reflectométrica en órbita descendente

Todas las imágenes utilizadas para la realización de este trabajo fueron obtenidas a través del portal PEPs del CNES (Centre National D'études Spatiales), donde se pueden descargar, de forma gratuita, los archivos de las escenas SAR (Synthetic Aperture Radar) proporcionadas por el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea denominado Copernicus.

3. PROCESADO DE IMÁGENES RADAR

La interferometría aplicada a imágenes de radares de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar – SAR), o InSAR, es la medida del cambio de fase entre las señales proporcionadas por dos imágenes radar obtenidas del mismo punto en dos instantes diferentes. Así, cuando una zona del terreno se mueve, la distancia al sensor ubicado en el satélite varía produciéndose un desplazamiento en la fase. La medida de esta diferencia de fase nos permite evaluar el desplazamiento ocurrido.

Tanto la técnica InSAR como la Differential InSAR, o DInSAR, no son capaces de neutralizar muchas de las contribuciones a los valores de fase que son debidos a fenómenos distintos al movimiento del terreno (p.e. condiciones atmosféricas). Por ello, se desarrolló una nueva técnica denominada Persistent Scattering Interferometry (PSI) (Ferretti et al., 2000) que se diferencia de las anteriores, fundamentalmente, en que hace uso de series temporales de múltiples imágenes SAR tomadas del mismo emplazamiento.

Los algoritmos PSI se encargan de buscar aquellos píxeles de la imagen radar que presentan, a lo largo de la serie temporal de múltiples imágenes, una mayor estabilidad en la señal retroreflectada. Por ello, a estos puntos los denominamos Dispersores Permanentes o Persistentes (Permanent o Persistent Scatterers).

Desafortunadamente, en el caso de las superficies altamente vegetadas, es difícil encontrar puntos (píxeles de la imagen) que cumplan estos requisitos. En estos

casos, el método QPSI (Perissin et al., 2007) suaviza las condiciones de selección, lo que permite trabajar con puntos menos estables, aunque a costa de reducir la precisión en la estimación de las deformaciones.

Por ello, dentro de la primera parte del análisis interferométrico del embalse de Arenós se procedió a efectuar un estudio de la calidad de la información que podemos esperar en cada una de las diferentes zonas del embalse, según la metodología utilizada (PSI o QPSI), la localización del punto de referencia, o el sentido de desplazamiento del satélite (ascendente o descendente).

El parámetro indicativo de la calidad de los resultados que nos puede proporcionar el método PSI es la Coherencia (Correlación Normalizada), cuyo valor se encuentra entre 0 y 1, siendo 0 el que representa la mayor decorrelación. En un proceso InSAR-PSI, un píxel o conjunto de píxeles con baja o nula coherencia no podrá aportar una información de calidad en relación con su movimiento.

Así, en este primer paso del estudio se efectuó el trabajo de calcular los valores de coherencia para aquellos píxeles de las imágenes descargadas que cumplen unas condiciones mínimas de estabilidad de señal de retrodispersión que los hace elegibles para el cálculo PSI.

3.1. ANÁLISIS DE COHERENCIA.

Para este proceso se generaron múltiples mapas de calor, obtenidos mediante interpolación IDW, haciendo uso del método PSI y QPSI para las órbitas ascendente y descendente y utilizando distintos puntos de referencia ubicados en diferentes emplazamientos del embalse de Arenós.

Como resultado de estos trabajos se concluyó que la órbita mas adecuada para la observación radar del embalse de Arenós era la descendente. La órbita en sentido ascendente sólo sería utilizada en los casos en que se fuera a calcular el desplazamiento obtenido en la línea de visión en sus componentes Horizontal y Vertical.

Así mismo, se observó que el punto de referencia que proporcionaba una mayor coherencia al conjunto de resultados en la órbita con sentido descendente era el punto denominado REF 1, ubicado en la margen derecha del embalse, justo enfrente del barranco de la Laguna.

Finalmente, el método de análisis QPSI no se mostró útil a la hora de proporcionar información adecuada en las zonas de baja coherencia.

3.2. MAPAS DE DESPLAZAMIENTOS.

Así, aplicando el método PSI sobre la serie de imágenes de la órbita descendente y utilizando como referencia el punto situado en la margen derecha del embalse

frente al barranco de la Laguna (REF 1), se obtuvo el siguiente mapa de puntos PS con coherencia igual o superior a 0.6 (Figura 3).

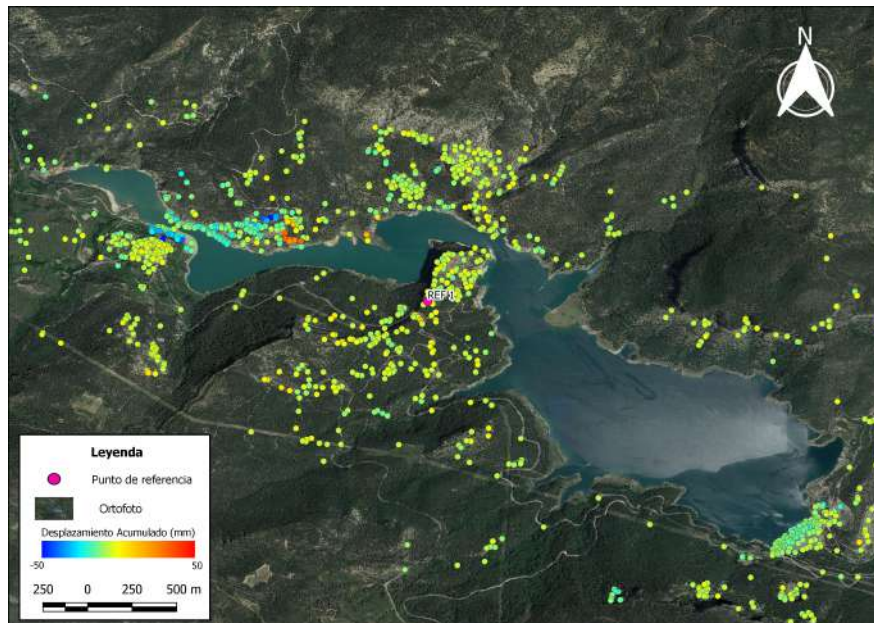


Figura 3 Mapa de puntos PS con coherencia ≥ 0.6 . Referencia 1.

Con el fin de proporcionar una visión más intuitiva de la zona perimetral del embalse, se presenta también un mapa de calor de desplazamientos acumulados en milímetros (mm) donde, los valores negativos representan subsidencias y los positivos izamientos (Figura 4).

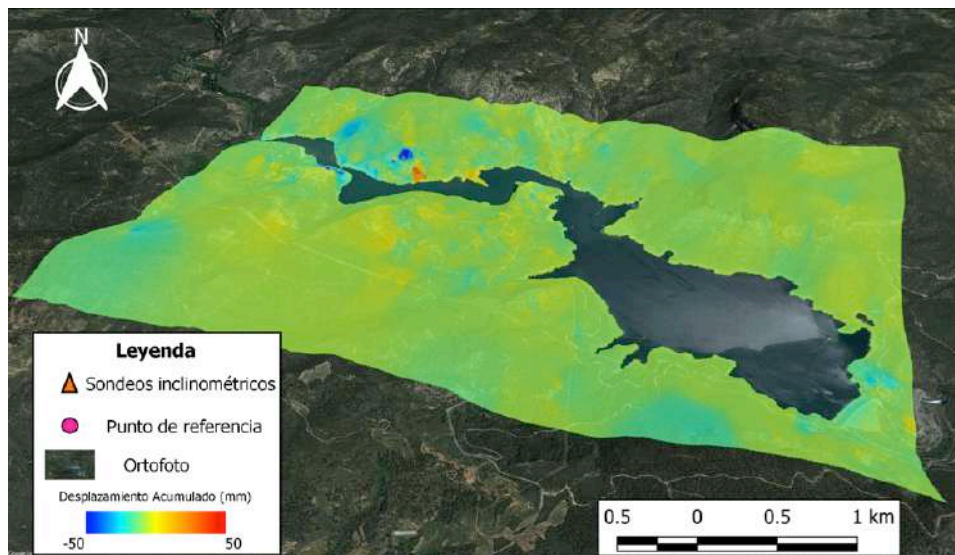


Figura 4 Mapa de calor de desplazamientos acumulados. Método PSI. Ref 1.

El mapa de calor (figura 4) se obtuvo a partir de un proceso de interpolación IDW entre todos los puntos obtenidos en el proceso interferométrico PSI, que se representan en la figura 3.

4. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Para todos aquellos puntos PS que fueron considerados de interés, se generó un gráfico donde se refleja la media móvil de 8 registros de su correspondiente serie temporal de desplazamientos, medidos en la línea de visión del satélite (LOS). Junto al gráfico se representa el ángulo de incidencia de la línea de visión del satélite (LOS), la dirección de la trayectoria de éste y el acimut de la línea de visión del satélite (LOS).

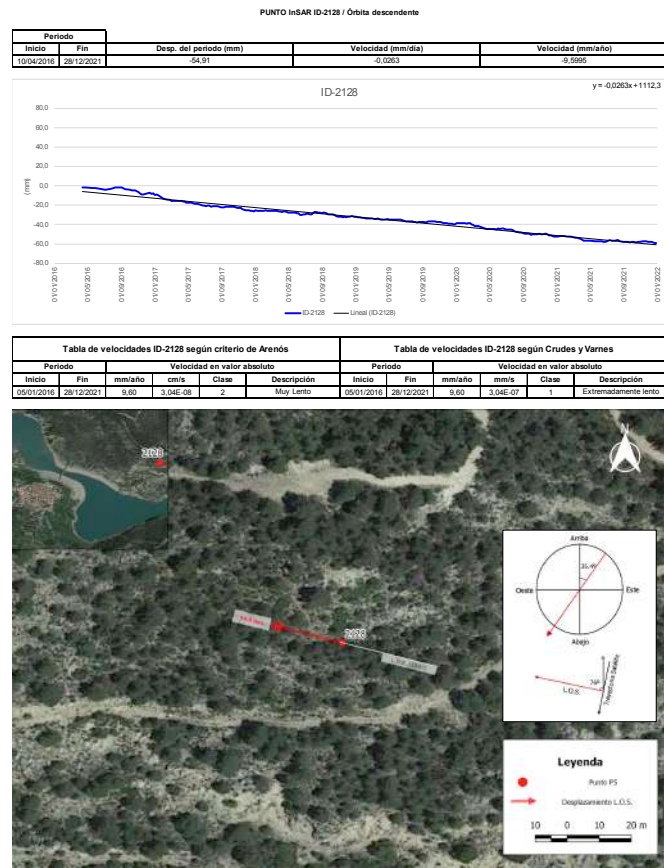
Posteriormente, sobre la serie temporal de la media móvil, se calculó la recta de regresión de los puntos de la serie temporal de desplazamientos. En base a dicha recta se obtuvo el valor de la velocidad ($V=a$), en mm/día y en mm/año.

Finalmente, con dicho valor, se determinó el desplazamiento acumulado en el periodo deseado (valores negativos para subsidencia y positivos para izamientos). Por último, la velocidad de desplazamiento se clasificó según los criterios aplicados por la CHJ en Arenós y según lo establecido por la escala de velocidades de Crudes y Varnes adaptada por Lee Jones en 2004.

La presentación de los resultados alcanzados para cada punto PS se realizó a través de fichas de desplazamientos como la que se muestra en la figura 5.

Durante el **análisis de la evolución de los desplazamientos** detectados se pudo observar que el desarrollo temporal de los movimientos, en general, responde bien a una tendencia lineal, que es la que se representa en los gráficos de las fichas de los puntos seleccionados y con la que se calcula el desplazamiento acumulado en el periodo de estudio.

Sin embargo, en algunos casos se apreció una cierta tendencia hacia la estabilización, de forma que se produce una reducción paulatina de los desplazamientos hacia el final del periodo estudiado. En estos casos, y para los puntos seleccionados, se ha procedió a realizar el ajuste de la evolución temporal de los desplazamientos mediante una función exponencial, con la condición de que el coeficiente de determinación de tal ajuste resultara mayor de 0,75. En estos



gráficos (Figura 6), a cada serie temporal de desplazamientos se le sumó una cantidad (indicada en el eje de ordenadas) con objeto de que no existieran valores negativos. Por otro lado, en el eje de tiempo se representaron días transcurridos desde el 01/01/2016 (inclusive) para ubicar el ajuste de la función exponencial en el intervalo del periodo de estudio.

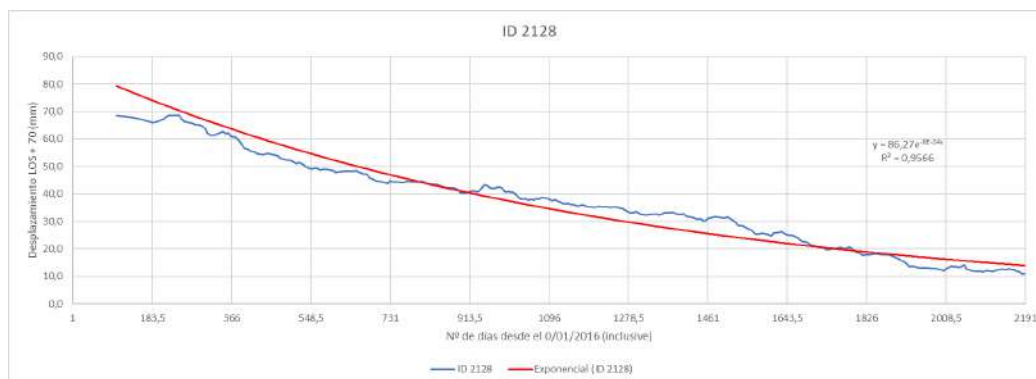


Figura 6 Ajuste exponencial de los desplazamientos del punto 2128

5. COMPARACIÓN CON INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE.

Para la comparación de los resultados aportados por el análisis InSAR con los movimientos detectados por las campañas inclinométricas de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) se hizo uso de las coordenadas de ubicación de las cabezas de los sondeos inclinométricos, los datos relativos al movimiento de la cabeza de los inclinómetros aportados por las campañas de la CHJ, y los datos InSAR del punto cercano asociado a cada sondeo.

Así, en primer lugar, se genera una gráfica de la serie temporal del movimiento total de la cabeza del inclinómetro a lo largo del periodo de comparación. Sobre dicha curva se calcula la recta de regresión en base a la cual se obtendrá el valor de la velocidad en mm/día. A continuación, con dicho valor, se calcula el desplazamiento acumulado de la cabeza del sondeo en el periodo en estudio. Conocida la dirección media del movimiento de la cabeza del inclinómetro (dato aportado por las campañas de la CHJ), se efectúa la proyección del movimiento en la dirección Este-Oeste.

Este mismo cálculo del desplazamiento acumulado en el periodo de comparación se efectúa para el punto PS asociado a cada cabeza de inclinómetro, teniendo en consideración que en este caso el movimiento se calcula en la línea de visión del satélite (LOS).

Por tanto, para poder realizar la comparación entre la información aportada por las campañas inclinométricas y el análisis InSAR es necesario descomponer el movimiento en la LOS en sus componentes vertical (subsistencia o izamiento) y horizontal (este-oeste).

5.1. DESCOMPOSICIÓN DEL MOVIMIENTO EN LA LÍNEA DE VISIÓN.

En los casos en los que, para un punto PS determinado obtenido en la órbita descendente, disponemos de un punto PS coincidente o muy próximo obtenido con la órbita ascendente, podemos realizar los cálculos necesarios para descomponer el desplazamiento InSAR obtenido en la LOS en su correspondiente movimiento vertical (elevación-asentamiento) y en la proyección del movimiento horizontal en la línea Este-Oeste. No es posible, con dos imágenes de satélite tomadas desde distintas posiciones, realizar la descomposición tridimensional del movimiento, por lo que el vector

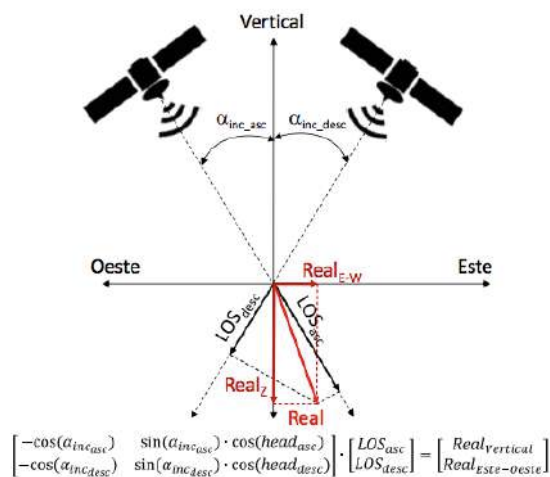


Figura 7. Descomposición de movimientos en la LOS

desplazamiento total horizontal queda indeterminado, si bien puede obtenerse, y así se ha hecho, su proyección sobre la línea Este-Oeste obviando la participación de la componente Norte-Sur en base a que, la órbita cuasi-polar del Sentinel-1 hace que las medidas InSAR sean muy poco sensibles a los desplazamientos en la componente Norte-Sur.

Para el cálculo de la descomposición se utiliza la formulación expuesta en la Figura 7 obtenida del artículo “Análisis de subsidencia en el Delta del Ebro mediante el uso de imágenes SENTINEL-1A/B: Resultados preliminares y lecciones aprendidas”, de Óscar Mora, Fernando Pérez Aragués, Luca Pipia, Juan Fernando Marchán, Jordi Marturià, Jordi Corbera y Anna Tardà, Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Octubre de 2017 XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección

5.2. FICHAS DE COMPARACIÓN.

Los resultados alcanzados en los puntos anteriores se incluyen en una ficha comparativa que recoge, para el caso de los inclinómetros, la dirección media del movimiento de la cabeza del inclinómetro, el desplazamiento acumulado en el periodo en mm, la velocidad del movimiento en mm/día, y el sentido y la amplitud del desplazamiento en la componente Este-Oeste.

Para la comparación del movimiento del punto PS asociado a cada sondeo inclinométrico, se genera una ficha con la identificación del punto PS de la órbita descendente y ascendente, las fechas inicial y final del periodo analizado, el desplazamiento acumulado en dicho periodo (mm) y la velocidad del movimiento en mm/día para cada uno de ellos. Debajo de esta tabla se muestra el resultado de la descomposición del movimiento del punto PS de la órbita descendente indicando la

amplitud del movimiento en mm para cada componente (vertical u horizontal) y su sentido de desplazamiento (arriba-abajo o Este-Oeste). La ficha se completa con una ortofoto donde se representan los distintos vectores de desplazamiento, tanto de la cabeza del inclinómetro como del punto PS asociado a él.

Obviamente, estas comparaciones solo fueron posibles en aquellos casos en los que, próximos a la ubicación de la cabeza de sondeo inclinométrico, se pudieron encontrar PS (Persistent scatterer) coincidentes tanto en la órbita en sentido ascendente como en sentido descendente que permitieran descomponer el movimiento en la LOS en sus componentes vertical y Este-Oeste. Todo ello explica el motivo por el cual, finalmente, solo pudieron hacerse un reducido número de comparaciones.

La Tabla-5 muestra un resumen de los resultados obtenidos en la comparación entre los sondeos inclinométricos y los puntos PS, mostrando la proyección horizontal en el eje Este-Oeste en milímetros y el sentido del movimiento (hacia el Este, o hacia el Oeste).

Tabla 1: Comparación sondeos inclinométricos con puntos PS.

Inclinómetro	Proyección E-O (mm)	Dirección E-O	ID-PS	Componente E-O (mm)	Sentido del movimiento
ARE-99	3.26	Este	3160	4.24	Este
ARE-105	61.27	Oeste	1483	8.59	Oeste
ARE-106	14.13	Oeste	2128	11.29	Oeste
D-001	3.37	Oeste	6035	6.07	Oeste

6. CONCLUSIONES.

El mapa de calor de los desplazamientos detectados en el embalse de Arenós durante el periodo 2016 a 2021 nos muestra una escasa actividad general, a excepción hecha de la ladera frente a la Puebla de Arenoso, de la zona de la Puebla próxima al embalse y de ciertas subsidencias detectadas en los estribos izquierdo y derecho de la presa (Figuras 3 y 4). Se trata de una situación totalmente compatible con la información ya conocida por la CHJ en relación con la estabilidad de sus laderas. Por otro lado, el estudio realizado viene a indicar que aquellas zonas en las que no se han venido realizando medidas *in situ* no han mostrado, a lo largo de estos últimos seis años, una actividad digna de mención según se desprende del análisis InSAR.

Por otra parte, las fichas de desplazamientos (ver figura 5) nos indican unos movimientos generalmente lineales a lo largo del tiempo y con unas velocidades que se encuentran siempre en la categoría de movimientos muy lentos o extremadamente lentos.

En algunos de los puntos seleccionados se observa cierta tendencia a la reducción paulatina de los desplazamientos con el tiempo, obteniendo velocidades al final del periodo analizado muy pequeñas, inferiores a 3 mm/año en la mayoría de estos puntos (ver figura 6).

Por lo que se refiere a la comparación con los datos de inclinometría aportados por la CHJ, observamos cómo, de los cuatro casos que analizamos, tres dan un resultado bastante coherente al comparar el desplazamiento Este-Oeste del sondeo inclinométrico con el movimiento en la misma componente del punto PS asociado a él. Sólo en uno de los casos hay una decorrelación evidente entre la amplitud informada por las campañas inclinométricas y los resultados alcanzados con InSAR-PSI. Debe tenerse en cuenta a este respecto que los desplazamientos obtenidos con InSAR-PSI no corresponden exactamente al mismo punto donde se sitúa el sondeo inclinométrico, sino a algún punto PS cercano.

Cabe destacar en este punto la información adicional que proporciona InSAR-PSI al obtener, además del desplazamiento horizontal del punto, los movimientos verticales (izamiento o subsidencia) del terreno, siendo ésta una información de notable interés para el estudio de la estabilidad de las laderas del embalse.

En base a lo anterior se concluye que la aplicación de la técnica InSAR-PSI para la obtención de los movimientos del terreno en el embalse de Arenós ha proporcionado una información muy útil, compatible con la información de que dispone la CHJ mediante sus campañas de medidas inclinométricas, y complementaria a ésta, al abarcar gran parte de toda la zona perimetral del embalse, sin necesidad de disponer de instrumentación *in situ*.

Cabría así plantear la conveniencia de realizar el seguimiento de los desplazamientos de la presa, el embalse y su entorno en dos zonas diferenciadas, por un lado la zona que abarca las laderas del embalse y, por otro lado, la zona de la presa, estribos y entorno inmediato.

De cara a futuros trabajos de aplicación de la metodología InSAR podría plantearse también la mejora de la coherencia en zonas de abundante vegetación mediante el uso de diedros o triedros reflectores.

Como conclusión final, se destaca que este trabajo contribuye a la validación de la metodología InSAR-PSI para el control y monitorización del movimiento y estabilidad en laderas de embalses, así como de los movimientos en las propias presas, especialmente en aquellos embalses con escasa o nula instrumentación o de difícil acceso, etc., siendo una técnica que conviene potenciar y conocer en el ámbito de la seguridad de presas y embalses.