

APLICACIÓN DE LA INTERFEROMETRÍA DE IMÁGENES RADAR PARA LA MONITORIZACIÓN DE PROCESOS RECIENTES DE SUBSIDENCIA EN MALLORCA

Jorge Lorenzo-Lacruz ¹, Celso Garcia ², Enrique Morán-Tejeda ²,
Antonio Capó ², Christian Mestre-Runge ³

¹ Grupo de investigación EUSOT, Departamento de Ciencias Humanas, Área de Geografía Física, Universidad de La Rioja, Luis de Ulloa 2, 26004 Logroño (La Rioja).

² Grupo de investigación GLOWATER, Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma (Illes Balears)

³ Grupo de investigación GAMES, Departamento de Hortofruticultura, Botánica y Jardinería, Universidad de Lleida, Avda. Alcalde Rovira Roure 191, 25198 Lleida (Catalunya).

Resumen: La subsidencia es un riesgo natural altamente destructivo, que puede estar provocado por diversas causas, tanto naturales como antrópicas. Sus impactos incluyen la creación de grietas y fisuras, daños en edificaciones e infraestructuras, el descenso de la capacidad de almacenamiento de los sistemas de acuíferos, y un incremento de la susceptibilidad de inundación. En este estudio se ha aplicado la Interferometría Dispersa Persistente (PSI) al procesado de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para la detección y análisis de procesos de deformación del terreno y subsidencia en la isla de Mallorca. La base de datos del estudio está compuesta de 120 imágenes capturadas por los satélites Sentinel 1A y 1B (entre mayo de 2016 y diciembre de 2019), a partir de las cuales se derivó un mapa de tasas de desplazamiento acumulado ocurridas durante los 3 años y medio del periodo de estudio. Los resultados muestran importantes procesos de subsidencia de hasta 30 mm año⁻¹ en amplias zonas de la cuenca sedimentaria de Palma, y de menor entidad (entre 10 y 20 mm año⁻¹) en puntos de la Depresión Central y en zonas de la Serra de Tramuntana, como los tramos finales de las cuencas fluviales del *Torrent Major en Sóller* y el *Torrent de Gorg Blau*. Asimismo, se ha observado una relación significativa entre el espesor del sedimento Cuaternario y las tasas de subsidencia registradas por el análisis PSI. Los resultados destacan el alto grado de dinamismo geomorfológico a escalas temporales muy cortas que caracteriza a la isla de Mallorca, y ponen de manifiesto la vulnerabilidad de determinadas zonas urbanas, como la ciudad de Palma (≈ 400000 habitantes), y agrícolas, en la Depresión Central, ante el riesgo de subsidencia y los daños asociados.

Palabras clave: *interferometría, imágenes de radar, subsidencia, Cuaternario, Mallorca.*

Abstract: Subsidence is a highly destructive natural hazard, which can be caused by both natural and anthropogenic causes. Its impacts include the creation of cracks and fissures, damages to buildings and infrastructures, a decrease in storage capacity of aquifer systems, and an increase of the susceptibility to flooding. In this study, Persistent Scattered Interferometry (PSI) has been used to process Synthetic Aperture Radar (SAR) images, for the detection and analysis of ground deformation and subsidence processes in the island of Mallorca. The study database is composed of 120 images captured by the Sentinel 1A and 1B satellites (between May 2016 and December 2019), from which we derived a map of accumulated displacement rates occurred during a 3 years and a half period. The results show important subsidence processes of up to 30 mm year⁻¹ in large areas of the sedimentary basin of Palma, and of lesser magnitude (between 10 and 20 mm year⁻¹) in locations of the Central Depression and in basins in the Serra de Tramuntana, such as the *Torrent Major* at Sóller and the *Torrent de Gorg Blau*. A significant relationship has also been observed between the thickness of the Quaternary sediment and the observed subsidence rates. The results highlight the high degree of geomorphological dynamism at very short time scales that characterizes Mallorca, and the vulnerability of certain urban areas, such as the city of Palma (≈ 400000 inhabitants), and agricultural areas, such as the *Central Depression*, facing the risk of subsidence and associated damages.

Keywords: *interferometry, radar images, subsidence, Quaternary, Mallorca.*

Introducción

La subsidencia es el hundimiento de la superficie de la corteza terrestre, generalmente debido a un apoyo insuficiente desde abajo, una carga superpuesta o una combinación de ambos (MARKER, 2013). Se trata de un riesgo natural de alcance global, y que afecta, potencialmente, al 19% de la población mundial (HERRERA-GARCÍA *et al.*, 2021). La subsidencia es un fenómeno estrechamente asociado a procesos de consolidación sedimentaria y compactación, que se desarrolla de forma lenta y paulatina

LORENZO-LACRUZ, J., GARCIA, C., MORÁN-TEJEDA, E., CAPÓ, A. y MESTRE-RUNGE, C. (2021): Aplicación de la interferometría de imágenes radar para la monitorización de procesos recientes de subsidencia en Mallorca. In: *De la terra a la mar i de la mar a la terra. Homenatge a Antonio Rodríguez-Perea*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 34: 243-258. ISBN: 978-84-09-34554-0.

en el tiempo, por lo que no suele causar víctimas mortales. Sin embargo, los daños materiales que ocasiona sobre viviendas e infraestructuras y su mantenimiento, ascienden a billones de euros cada año (KOK y COSTA, 2021). De forma menos habitual, la subsidencia ocurre de forma repentina, ocasionando colapsos y pudiendo desencadenar eventos catastróficos (GALLOWAY *et al.*, 2000; MARKER, 2013).

Aunque la subsidencia suele estar causada por factores naturales de tipo geológico, como procesos de consolidación sedimentaria, compactación, pliegues o fallas (SOLARI *et al.*, 2018), en los últimos años se está incrementando de forma muy notable el número de estudios que informan de causas relacionadas con la actividad del hombre (TOSI *et al.*, 2013), y especialmente con la inyección y extracción de fluidos de la corteza terrestre (BELL *et al.*, 2008; CHAUSSARD *et al.*, 2017; FIASCHI *et al.*, 2019). Las zonas en las que se han reportado elevadas tasas de subsidencia se concentran cerca de áreas urbanas densamente ocupadas y zonas de regadío con un elevado estrés hídrico o una alta demanda de agua subterránea, incluyendo puntos de España (GONZÁLEZ y FERNÁNDEZ, 2011; FERNANDEZ *et al.*, 2018), Italia (BOZZANO *et al.*, 2015; ROSI *et al.*, 2016), Grecia (SVIGKAS *et al.*, 2016), Estados Unidos (KHORRAMI *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2019; OJHA *et al.*, 2019), México (FIGUEROA-MIRANDA *et al.*, 2018; NAVARRO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020), China (ZHU *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2016; GAO *et al.*, 2019) o Irán (MOTAGH *et al.*, 2017). En este sentido, amplias zonas de Mallorca presentan las características anteriores (LORENZO-LACRUZ y MORAN-TEJEDA, 2016; LORENZO-LACRUZ *et al.*, 2017), y ya se había apuntado hacia la posibilidad de que ocurrieran procesos de subsidencia, especialmente en las zonas de acumulación sedimentaria, donde se encuentran los materiales más compresibles (CAPÓ y GARCIA, 2019; HERRERA-GARCÍA *et al.*, 2021). Sin embargo, ningún estudio hasta el momento había monitorizado el fenómeno con precisión en esta área concreta.

Existen varios métodos para la detección y medición de la subsidencia de la superficie terrestre. Entre ellos, la interferometría de imágenes de Radar de Apertura Sintética (inSAR) ha sido probada como una técnica que obtiene resultados robustos en el mapeo de este tipo de deformaciones. Frente a técnicas *in situ* y geodésicas, de muestreo muy puntual, como la nivelación y el GPS/GNSS (ZHAO *et al.*, 2019), el análisis inSAR presenta la ventaja de permitir la monitorización de la subsidencia de forma extensiva en el espacio (SOLARI *et al.*, 2018; KHORRAMI *et al.*, 2020). En este sentido, mediante la aplicación de técnicas de procesamiento inSAR como la Interferometría Dispersa Persistente (PSI) a un conjunto de imágenes radar de un área específica, es posible detectar los movimientos de la superficie con precisión milimétrica (LAZECKÝ *et al.*, 2018). Este tipo de técnicas obtiene los resultados más fiables en áreas urbanas, como la ciudad de Palma, por lo que son ideales para la monitorización de la subsidencia debida a la consolidación de secuencias sedimentarias, proceso que en ocasiones es acelerado por factores antrópicos, como excavaciones e infraestructuras subterráneas y el peso de las edificaciones (ROSI *et al.*, 2016).

El objetivo de este estudio es cuantificar con precisión los procesos de subsidencia ocurridos en los últimos años en Mallorca. Para ello, se ha aplicado el análisis PSI a un conjunto de 120 imágenes radar capturadas por los satélites Sentinel 1A y 1B, permitiendo la elaboración de un mapa de la tasa de deformación (cuasi) vertical de la superficie de la isla de Mallorca entre mayo de 2016 y diciembre de 2019 con resolución milimétrica. Los resultados muestran: i) la distribución espacial de la subsidencia ocurrida recientemente en Mallorca; ii) la relación existente entre el espesor del sedimento Cuaternario y la ocurrencia de subsidencia; y iii) ejemplos de los daños causados por el fenómeno.

La detección y cuantificación de la deformación superficial de la corteza realizadas en este trabajo aportan evidencias de la ocurrencia de subsidencia en amplias áreas de Mallorca (especialmente en la aureola suburbana de Palma), y pone de manifiesto la vulnerabilidad de éstas ante un riesgo natural que, aun siendo lento en su desarrollo, causa daños en diversas edificaciones e infraestructuras civiles.

Área de estudio y contexto geológico

Mallorca, al igual que el archipiélago Balear, forma parte de la zona emergida del Promontorio Balear. Este relieve, mayoritariamente sumergido, constituye la prolongación oriental de las Cordilleras

Béticas desde el SE de la Península Ibérica (Fig. 1A). La compleja evolución tectónica del Mediterráneo Occidental, a partir de la colisión entre las placas africana y euroasiática, deja un promontorio formado por un cinturón de pliegues y cabalgamientos, con un acortamiento del 50%, y cuencas extensivas y contraccionales (GELABERT *et al.*, 1992). La isla de Mallorca está constituida por una alternancia de bloques levantados (*horsts*) y hundidos (*grabens*) que se corresponden con las sierras y las llanuras de la morfología actual. Esta estructuración está causada por la presencia de grandes fallas normales lítricas con desplazamientos kilométricos, de edad Mioceno superior y orientadas preferentemente NE-SO (RODRÍGUEZ-PEREA y GELABERT, 1998). Los *grabens* constituyen las cuencas, que están rellenas con sedimentos del Mioceno superior, Plioceno y Cuaternario (CAPÓ y GARCIA, 2019). En los *horsts* encontramos las sierras, cinturones de pliegues y cabalgamientos, de edad Mioceno inferior, que afectó a la totalidad de la isla.

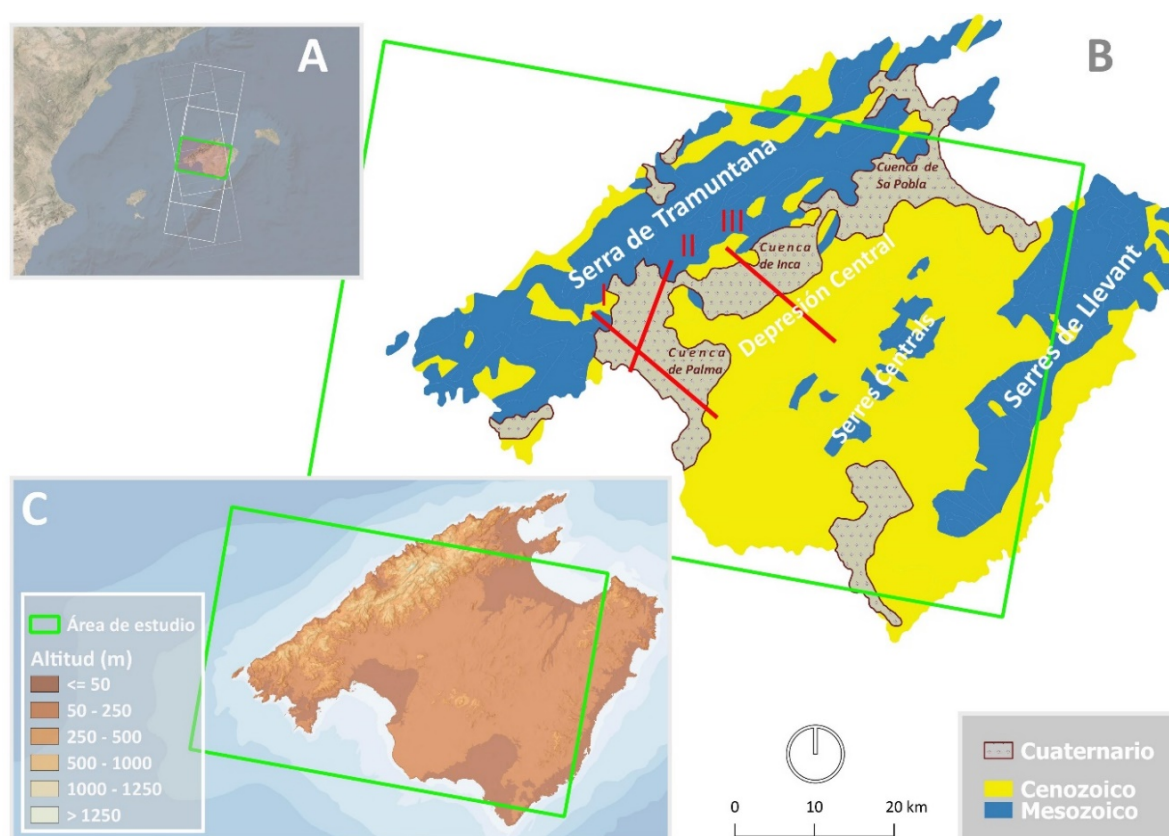


Fig. 1. A) Localización del área de estudio y huellas satelitales de las pasadas de las imágenes empleadas. B) Mapa geológico sintetizado de la isla de Mallorca y localización de las secciones correspondientes a los perfiles geológicos. C) Topografía de la isla de Mallorca.

Mallorca se puede dividir en tres unidades fisiográficas: la serra de Tramuntana, las serres de Llevant y la Depresión central (Fig. 1B). La Serra de Tramuntana constituye una unidad morfoestructural orientada de SO-NE dispuesta de forma paralela a la costa septentrional. Está formada por un conjunto de materiales plegados, mayoritariamente mesozoicos, con un buzamiento generalmente hacia el SE. Entre estos materiales se encuentran depósitos del Terciario que suelen encontrarse cabalgados por los anteriores (GELABERT *et al.*, 1992). Es en la Serra de Tramuntana donde se alcanzan las mayores altitudes de la isla (Fig. 1C), superando los 1000 metros sobre el nivel del mar en numerosas montañas dominadas por las calcáreas masivas del Jurásico inferior (Lias). Las Serres de Llevant, localizadas de forma paralela a la costa suroriental, constituyen la segunda área plegada de la isla, análoga a la Serra

de Tramuntana. La estructura de estas sierras está constituida por un sistema de cabalgamientos con pliegues asociados que afectan a rocas del Jurásico (dolomías y margas), margocalcáreas del Cretácico, calcarenitas del Eoceno y conglomerados y areniscas del Mioceno inferior. Este sistema está recubierto por capas horizontales del Mioceno superior (SABAT, 1998). Las mayores altitudes las encontramos en los dos extremos de las serres con valores superiores a los 500 m. En el centro de la isla encontramos las sierras centrales, con los relieves mesozoicos aislados del macizo de Randa (555 m.) y los de la estructura Sineu – Bonany (317 m). La Depresión Central es una llanura topográfica compuesta por tres cuencas estructurales alineadas (Palma, Inca y Sa Pobla), inicialmente desarrolladas como cuencas subsidentes que se fueron rellenando hasta el Cuaternario. Los depósitos de estas cuencas pueden alcanzar el grosor de un kilómetro (COLOM, 1975). Estas tres cuencas son objeto de estudio de este trabajo y en ellas se ha estudiado la subsidencia durante el Plio-Cuaternario (CAPÓ y GARCIA, 2019), mostrando una tasa decreciente en la cuenca de Sa Pobla y creciente en las cuencas de Inca y Palma. La subsidencia máxima total en la cuenca de Palma es casi dos veces la de Inca y mucho mayor que la de Sa Pobla. Los mismos autores reconstruyen los espesores durante el Cuaternario en las tres cuencas, siendo mucho más importantes en la de Palma, alcanzando máximos de 175 m, que en las de Inca, máximos de 100 m, y de Sa Pobla, con un máximo de 75 m (CAPÓ y GARCIA, 2019).

Métodos y materiales

Procesado de imágenes inSAR

La técnica PSI es una extensión del análisis de interferometría SAR (inSAR) convencional, enfocado a la obtención de series de deformación de la línea de visión (*Line Of Sight*; LOS), una medida de la velocidad de deformación de la superficie terrestre (FERRETTI *et al.*, 2000, 2001; COLESANTI *et al.*, 2003; BELADAM *et al.*, 2019; OTHMAN *et al.*, 2019). Esta técnica selecciona un conjunto de puntos objetivo sobre el terreno, conocidos como *Dispersores Permanentes* (*Permanent Scatterers*; PS), para los que se calcula la deformación, y que han de cumplir los siguientes requisitos: poseer propiedades de dispersión estables, presentar una coherencia de fase temporal aceptable, y un comportamiento similar durante el periodo analizado (LAZECKÝ *et al.*, 2018). Gracias a que se conoce cómo el valor de un píxel de una imagen SAR cambia su fase (Ecuación 1) dependiendo de la posición relativa satélite-PS, imprecisiones del modelo digital de elevaciones (MDE), variaciones atmosféricas (Atmospheric Phase Screen; APS), ruido, y los movimientos en el tiempo de los PS, es posible calcular estos últimos (cambios en la posición de los PS) con parámetros conocidos o que se pueden estimar (FERRETTI *et al.*, 2000):

$$\varphi^k = \left(\frac{4\pi}{\lambda} * \frac{B^k}{R \sin \theta} * h \right) + \left(\frac{4\pi}{\lambda} * T^k * v \right) + \varphi_{atm}^k + \varphi_{orb}^k + \varphi_{ruido}^k \quad [\text{Eq. 1}]$$

donde el primer sumando introduce el error del MDE (h) por las imprecisiones del MDE externo (SRTM 30m), el segundo denota la velocidad lineal de deformación (v) derivada del desplazamiento de los PS durante el periodo de observación. B^k es el valor de la Línea de Base (perpendicular) del interferograma k . R denota el rango de inclinación, T se refiere el tiempo, y λ es la longitud de onda. φ_{atm}^k , φ_{orb}^k , φ_{ruido}^k denotan el retardo de fase atmosférico, la fase del error orbital residual y el ruido de la decorrelación (temporal y geométrica), respectivamente.

El análisis de interferometría PSI se organiza en torno a la selección una imagen *Máster*, considerando las Líneas de Base temporales (días de desviación) y las Líneas de Base perpendiculares (metros de desviación) del conjunto de imágenes. Preferiblemente, la imagen *Máster* se selecciona en medio de las Líneas de Base temporales y espaciales (perpendiculares) para minimizar distorsiones en los análisis durante el periodo analizado (Tabla 1). A continuación, se generan las imágenes corregistradas (*Single Look Complex*; SLC) entre la *Imagen Máster* y el resto de imágenes (imágenes *Slave*). Finalmente, se eliminan la influencia de la curvatura terrestre y la topografía de la fase de las

imágenes corregistradas, a partir de las cuales se calculan los interferogramas (imágenes de diferencias de fase entre *Máster* y *Slaves*), con los que derivar deformaciones.

En el enfoque utilizado en este trabajo, los valores de los PS son relativos a un punto estable de referencia seleccionado de entre todos los PS, y se asume que la tasa de deformación del suelo es lineal. Es importante destacar que, por los requisitos mencionados anteriormente, las grandes densidades de PS coinciden con áreas urbanas, aunque también se observan densidades medias y bajas en áreas agrícolas, debido a la decorrelación temporal en estas zonas (KHORRAMI *et al.*, 2020)(Fig. 2).

La monitorización de la subsidencia mediante el análisis PSI se realizó con el software SARPROZ siguiendo los pasos que se detallan a continuación (PERISSIN, 2016; CHAUSSARD *et al.*, 2017; DECLERCQ *et al.*, 2017; LAZECKÝ *et al.*, 2018; KHORRAMI *et al.*, 2020):

- i) Selección de los PS candidatos que satisficieran la siguiente condición para el Índice de Estabilidad de Amplitud:

$$(1) D_{estabilidad} = 1 - \frac{\sigma_a}{\bar{a}} \geq 0.7 \quad [\text{Eq. 2}]$$

donde \bar{a} es el promedio de las amplitudes calculadas en cada píxel y σ_a es la desviación estándar de la variación de la amplitud en el tiempo.

- ii) Obtención de los parámetros desconocidos, error del MDE externo (SRTM 30m) y velocidad, a partir de la información de fase relativa entre PS próximos: el gráfico de conexiones de amplitud de fase entre PS sirvió para estimar los parámetros iniciales y definir las propias conexiones para la optimización del cálculo (Fig. 3). A continuación, se calcularon los valores absolutos a través de integración numérica.

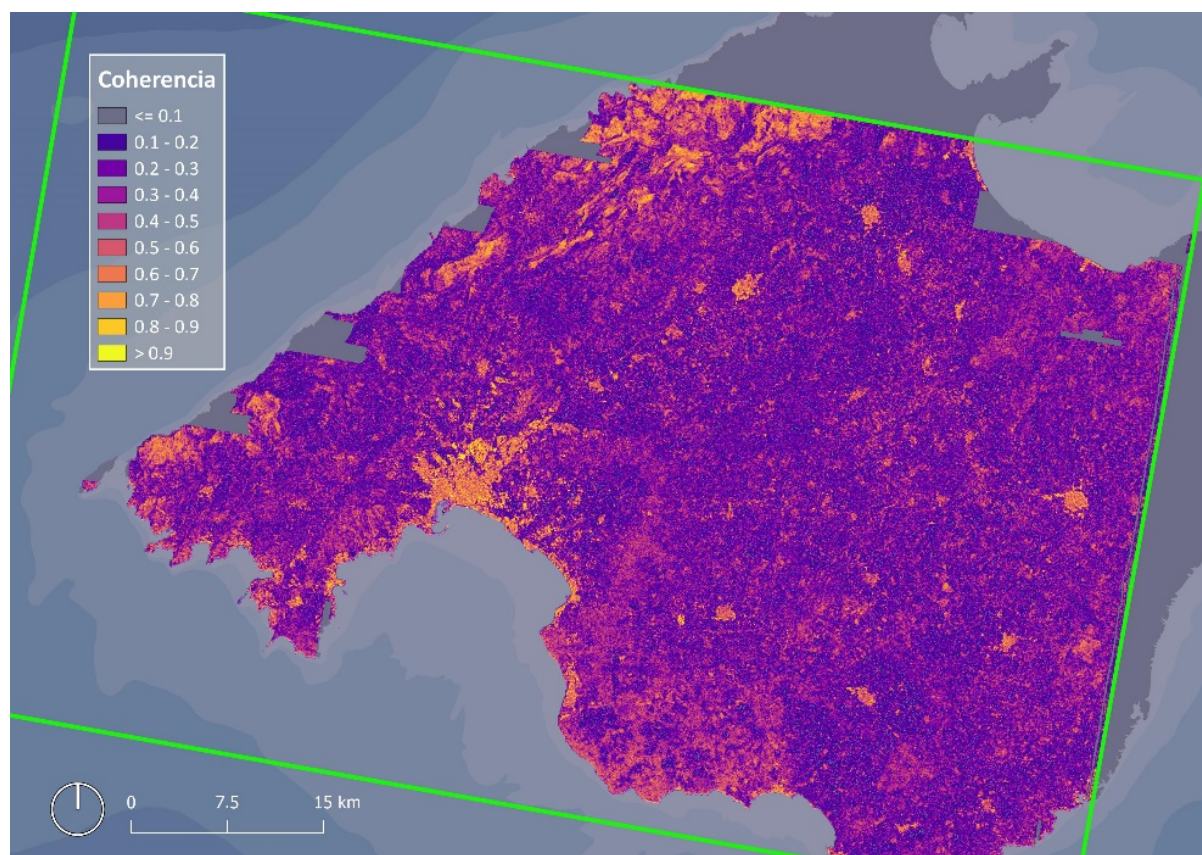


Fig. 2. Distribución espacial de la coherencia de fase promedio durante el periodo mayo 2016-diciembre 2019.

iii) Estimación de las tasas de desplazamiento a lo largo de la línea de visión LOS: tras la eliminación del papel distorsionador de la atmósfera (APS), se filtraron y seleccionaron los PS con una coherencia de fase temporal superior a 0.8 (Fig. 2), para así obtener un mapa de subsidencia (desplazamiento LOS casi vertical) lo más preciso posible. A continuación, se calcularon, para los 61355 PS, las tasas de desplazamiento a lo largo de la línea de visión LOS (desplazamiento acumulado), y las series temporales de deformación en cada PS. El cálculo de un periodograma permitió extraer los parámetros desconocidos dentro de un rango de desplazamiento dado (de -150 a +150 mm/año).

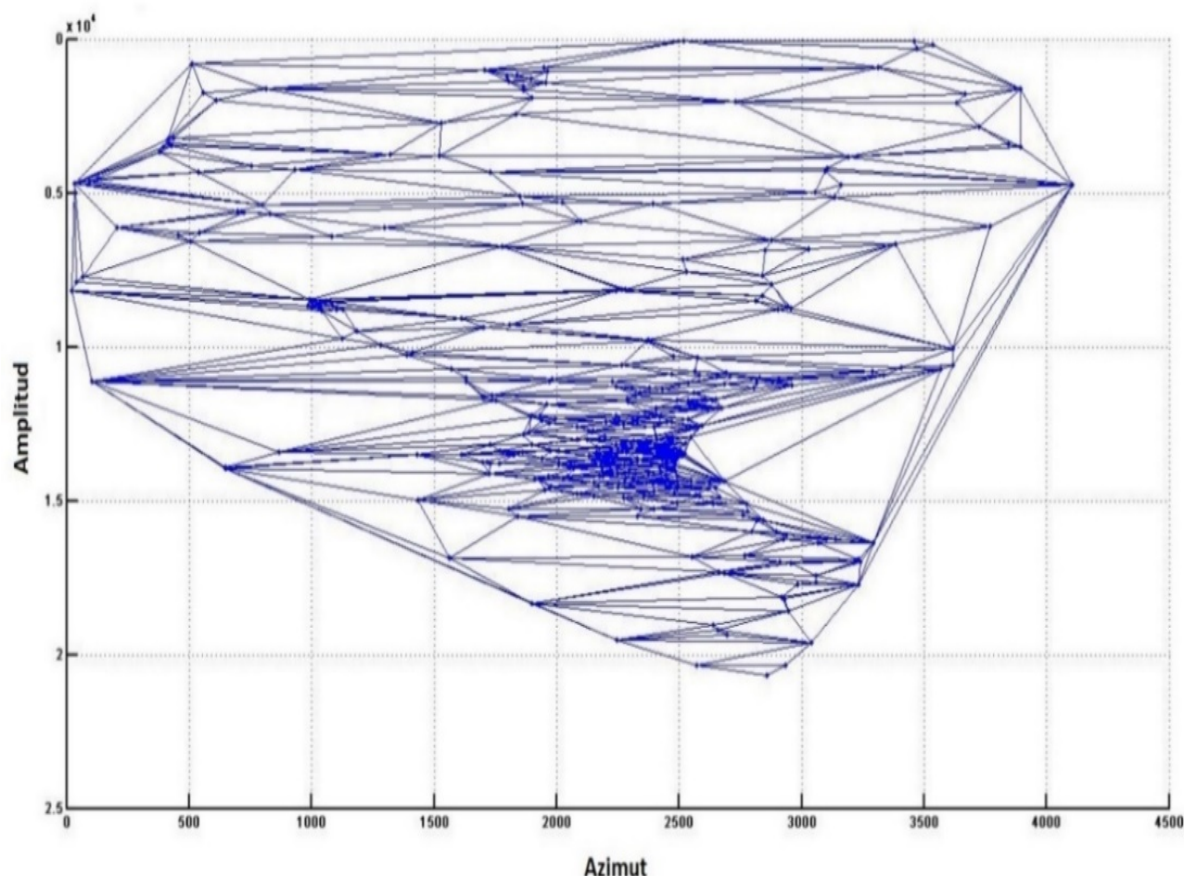


Fig. 3. Gráfico de Delaunay de conexiones de las amplitudes de fase entre los PS.

Base de datos

La base de datos del estudio la componen 120 imágenes de radar de apertura sintética (banda C) capturadas por los satélites Sentinel-1A y -1B de la Agencia Espacial Europea (ESA), y obtenidas del *Alaska Satellite Facility* (<https://search.asf.alaska.edu/>). Las fechas de observación de las escenas abarcan desde mayo de 2016 hasta diciembre de 2019; en la Tabla 1 se muestran las fechas de captura de las imágenes utilizadas para realizar el análisis multi-temporal de deformación (subsidencia). Para tal fin, se combinó el uso indistinto de imágenes capturadas por Sentinel 1A (104 imágenes) y -1B (16 imágenes). En todos los casos, el modo de captura fue *Interferometric Wide* (IW) en órbitas descendentes. Las imágenes seleccionadas pertenecen a la pista (*track*) 37 y franja (*subswath*) número 2 de la trayectoria de ambos satélites, cubriendo así la práctica totalidad de la isla de Mallorca (Fig. 1A). La polarización empleada fue vertical-vertical (VV) en todos los casos. Con el objetivo de favorecer una alta coherencia de fase (> 0.8) y asegurar la precisión de los resultados, únicamente se incluyeron en el análisis aquellas imágenes con una línea de base perpendicular menor de ± 150 m (LAZECKÝ *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019) (Fig. 4).

Tabla 1. Fechas de captura de las imágenes utilizadas. * Imagen *Máster*.

Fecha de observación	Satélite	Línea base temp. (días)	Fecha de observación	Satélite	Línea base temp. (días)	Fecha de observación	Satélite	Línea base temp. (días)	Fecha de observación	Satélite	Línea base temp. (días)
30/5/2016	Sentinel 1A	-684	19/4/2017	Sentinel 1A	-360	9/3/2018	Sentinel 1A	-36	15/1/2019	Sentinel 1A	276
11/6/2016	Sentinel 1A	-672	1/5/2017	Sentinel 1A	-348	21/3/2018	Sentinel 1A	-24	27/1/2019	Sentinel 1A	288
5/7/2016	Sentinel 1A	-648	13/5/2017	Sentinel 1A	-336	2/4/2018	Sentinel 1A	-12	8/2/2019	Sentinel 1A	300
17/7/2016	Sentinel 1A	-636	25/5/2017	Sentinel 1A	-324	14/4/2018*	Sentinel* 1A	0*	20/2/2019	Sentinel 1A	312
10/8/2016	Sentinel 1A	-612	6/6/2017	Sentinel 1A	-312	26/4/2018	Sentinel 1A	12	4/3/2019	Sentinel 1A	324
22/8/2016	Sentinel 1A	-600	30/6/2017	Sentinel 1A	-288	8/5/2018	Sentinel 1A	24	16/3/2019	Sentinel 1A	336
3/9/2016	Sentinel 1A	-588	12/7/2017	Sentinel 1A	-276	14/5/2018	Sentinel 1B	30	28/3/2019	Sentinel 1A	348
27/9/2016	Sentinel 1A	-564	30/7/2017	Sentinel 1A	-258	20/5/2018	Sentinel 1A	36	9/4/2019	Sentinel 1A	360
3/10/2016	Sentinel 1A	-558	5/8/2017	Sentinel 1A	-252	1/6/2018	Sentinel 1A	48	21/4/2019	Sentinel 1A	372
9/10/2016	Sentinel 1A	-552	17/8/2017	Sentinel 1A	-240	13/6/2018	Sentinel 1A	60	3/5/2019	Sentinel 1A	384
15/10/2016	Sentinel 1A	-546	29/8/2017	Sentinel 1A	-228	19/6/2018	Sentinel 1B	66	15/5/2019	Sentinel 1A	396
21/10/2016	Sentinel 1A	-540	10/9/2017	Sentinel 1A	-216	25/6/2018	Sentinel 1A	72	27/5/2019	Sentinel 1A	408
2/11/2016	Sentinel 1A	-528	22/9/2017	Sentinel 1A	-204	7/7/2018	Sentinel 1A	84	8/6/2019	Sentinel 1A	420
8/11/2016	Sentinel 1A	-522	4/10/2017	Sentinel 1A	-192	19/7/2018	Sentinel 1A	96	20/6/2019	Sentinel 1A	432
14/11/2016	Sentinel 1A	-516	16/10/2017	Sentinel 1A	-180	31/7/2018	Sentinel 1A	108	2/7/2019	Sentinel 1A	444
20/11/2016	Sentinel 1A	-510	28/10/2017	Sentinel 1A	-168	12/8/2018	Sentinel 1A	120	14/7/2019	Sentinel 1A	456
26/11/2016	Sentinel 1A	-504	3/11/2017	Sentinel 1B	-162	24/8/2018	Sentinel 1A	132	26/7/2019	Sentinel 1A	468
2/12/2016	Sentinel 1A	-498	9/11/2017	Sentinel 1A	-156	5/9/2018	Sentinel 1A	144	7/8/2019	Sentinel 1A	480
8/12/2016	Sentinel 1A	-492	21/11/2017	Sentinel 1A	-144	17/9/2018	Sentinel 1A	156	19/8/2019	Sentinel 1A	492
14/12/2016	Sentinel 1A	-486	27/11/2017	Sentinel 1B	-138	29/9/2018	Sentinel 1A	168	31/8/2019	Sentinel 1A	504
20/12/2016	Sentinel 1A	-480	3/12/2017	Sentinel 1A	-132	11/10/2018	Sentinel 1A	180	12/9/2019	Sentinel 1A	516
1/1/2017	Sentinel 1A	-468	15/12/2017	Sentinel 1A	-120	23/10/2018	Sentinel 1A	192	24/9/2019	Sentinel 1A	528
13/1/2017	Sentinel 1A	-456	27/12/2017	Sentinel 1A	-108	4/11/2018	Sentinel 1A	204	6/10/2019	Sentinel 1A	540
25/1/2017	Sentinel 1A	-444	8/1/2018	Sentinel 1A	-96	16/11/2018	Sentinel 1A	216	18/10/2019	Sentinel 1A	552
6/2/2017	Sentinel 1A	-432	14/1/2018	Sentinel 1B	-90	28/11/2018	Sentinel 1A	228	30/10/2019	Sentinel 1A	564
18/2/2017	Sentinel 1A	-420	20/1/2018	Sentinel 1A	-84	4/12/2018	Sentinel 1B	234	11/11/2019	Sentinel 1A	576
2/3/2017	Sentinel 1A	-408	26/1/2018	Sentinel 1B	-78	16/12/2018	Sentinel 1B	246	23/11/2019	Sentinel 1A	588
14/3/2017	Sentinel 1A	-396	1/2/2018	Sentinel 1A	-72	22/12/2018	Sentinel 1A	252	5/12/2019	Sentinel 1A	600
26/3/2017	Sentinel 1A	-384	13/2/2018	Sentinel 1A	-60	28/12/2018	Sentinel 1B	258	17/12/2019	Sentinel 1A	612
7/4/2017	Sentinel 1A	-372	25/2/2018	Sentinel 1A	-48	3/1/2019	Sentinel 1A	264	29/12/2019	Sentinel 1A	624

Resultados

Mapas de desplazamiento

El análisis PSI aplicado a la base de datos de imágenes SAR Sentinel-1 generó 61355 series temporales de desplazamiento acumulado (LOS) en los PS seleccionados, los cuales cumplían los requisitos detallados anteriormente. La Figura 5 muestra las velocidades (mm año^{-1}) de desplazamiento del terreno en Mallorca en aquellos puntos (PS) con una coherencia superior a 0,8. Las tasas de deformación observadas fluctúan entre valores positivos hasta desplazamientos negativos (subsistencia) superiores a 30 mm año^{-1} . Las zonas con mayor concentración de puntos con desplazamiento negativo, son la línea de costa occidental y las estribaciones más occidentales de la serra de Tramuntana en los

municipios de Andratx y Calvià, diversas cuencas en el macizo central de la Tramuntana, como la del torrente de *Gorg Blau* o la del *Torrent Major* de Sóller y zonas del piedemonte sedimentario o *Raiguer*. Sobre todas destaca, tanto por los valores de desplazamiento, como por la densidad de puntos y extensión espacial de la subsidencia, la cuenca sedimentaria de la bahía de Palma.

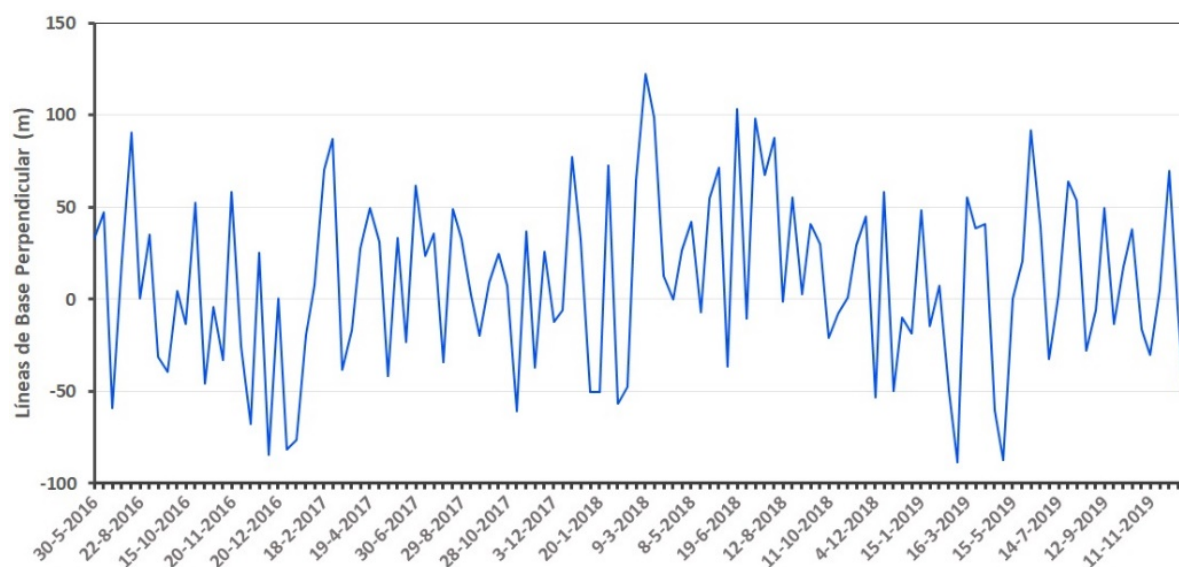


Fig. 4. Relación de las Líneas de Base perpendicular (metros) de los interferogramas derivados entre las imágenes utilizadas.

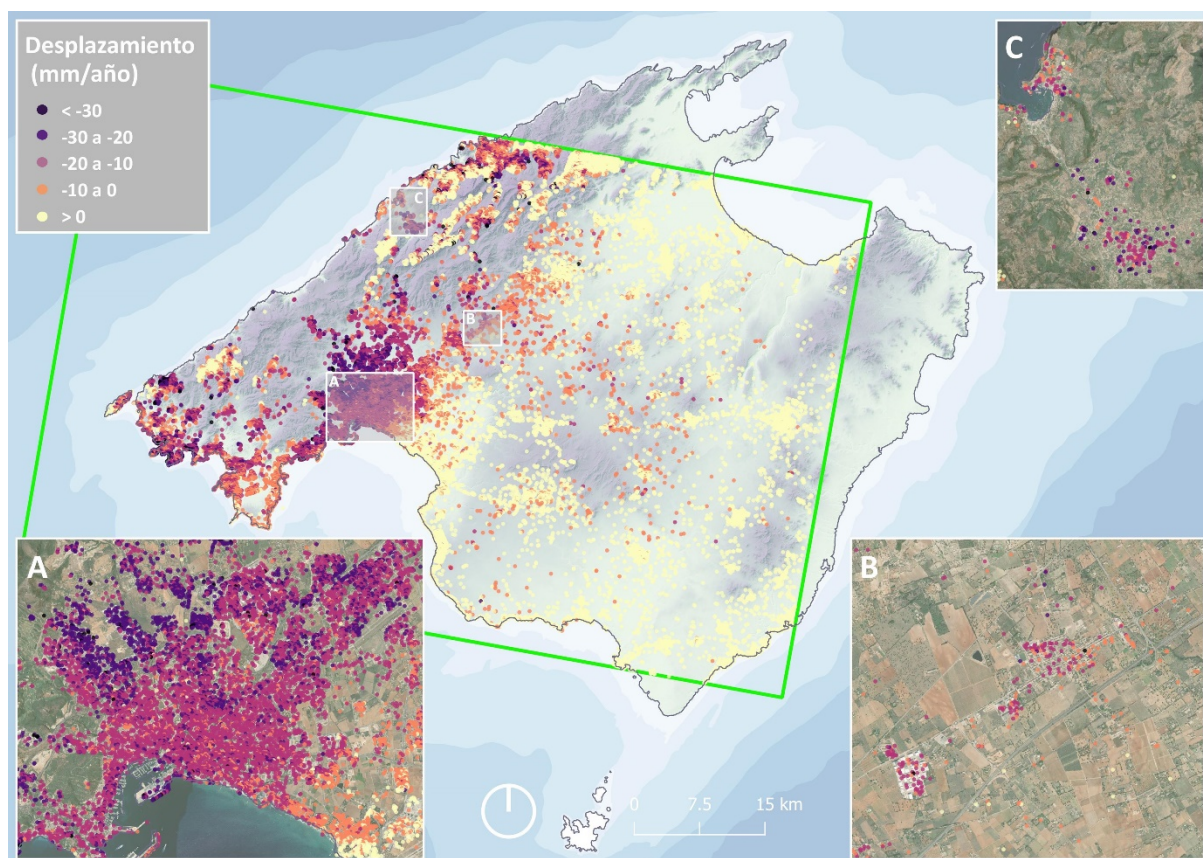


Fig. 5. Tasas de desplazamiento sobre la línea de visión (LOS) derivadas de imágenes Sentinel-1. A) Vista detallada de la ciudad de Palma. B) Vista detallada de Consell, en la cuenca de Inca. C) Vista detallada del tramo final del *Torrent Major* en Sóller.

Relación entre espesor del sedimento y subsidencia

Para poder comparar los valores de subsidencia y su relación con el espesor del sedimento Cuaternario se utilizaron las secciones transversales estratigráficas de Capó y García (2019), en particular las secciones I y II sobre la cuenca de Palma, y la III sobre la cuenca de Inca. Esto permite comprobar cómo evolucionan las tasas de desplazamiento en función del espesor del Cuaternario, del cambio en las litologías o la presencia de fracturas (Fig. 6).

Aunque las causas de desplazamiento captadas por el análisis PSI pueden ser múltiples (caídas de bloques, hundimientos, fracturas, disolución cárstica, neotectónica, etc.), en este trabajo nos centramos en la subsidencia de materiales sedimentarios recientes (Cuaternario) que sufren un asentamiento natural tras su deposición, o inducido por el peso de los edificios en zonas urbanas. En las Figuras 6 y 7 se muestra la relación existente entre el desplazamiento observado y el espesor de los materiales. A pesar de tratarse de perfiles digitalizados de dibujos a mano a partir de sondeos, a una escala pequeña y sujetos a interpretación de su autor (Alfredo Barón), se puede apreciar (Fig. 6) que a medida que aumenta el espesor de los sedimentos cuaternarios se producen mayores tasas de subsidencia. En cualquier caso, la relación entre espesor del sedimento y las tasas de subsidencia no es directa, ya que hay zonas donde esto no sucede, o se observa la relación opuesta. De ahí que la correlación observada entre tasas de subsidencia y espesor sedimentario no sea del todo elevada ni lineal (ver escala logarítmica en el gráfico de dispersión de la Fig. 7B), lo cual no deja de confirmar la múltiple casuística que puede haber detrás de los desplazamientos del terreno. Por ejemplo, en el perfil I (Fig. 6), se observa un bloque delimitado por dos fracturas, cuya parte oriental está experimentando levantamiento (tasas positivas de desplazamiento), a pesar de contar con materiales cuaternarios en superficie. No se descarta que la falla de Palma pueda estar actuando de forma residual a la vez que acomoda sedimentos (subsidencia). Al tratarse de una falla lístrica, la componente horizontal del deslizamiento provoca un empuje sobre el bloque oriental que no tiene más remedio que subir por falta de espacio, generando como consecuencia esos valores positivos. En la parte más occidental del bloque, donde el material

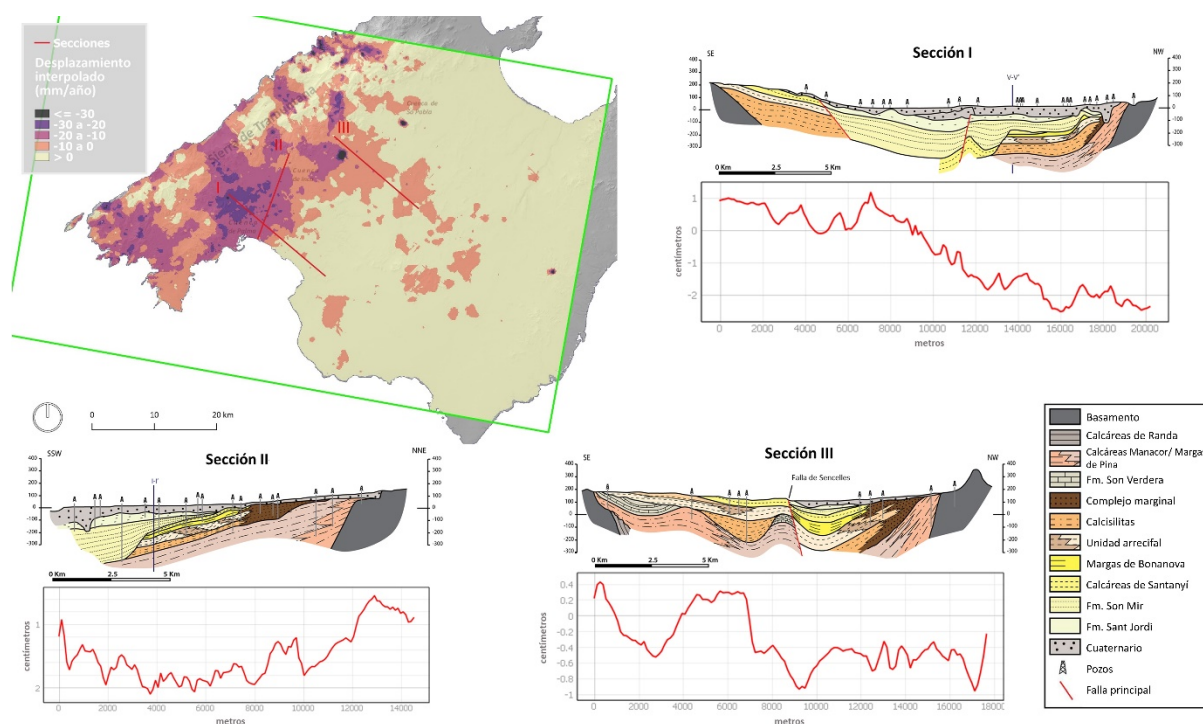


Fig. 6. Tasas de desplazamiento interpoladas y localización de las secciones de los perfiles estratigráficos y los perfiles correspondientes de desplazamiento/deformación.

cuaternario se va espesando, se empiezan a observar tasas de desplazamiento negativo, que se van acentuando hasta el límite occidental del perfil. También se puede predecir, mediante las secciones I y II, el frente de plataforma del grupo margas de la Bonanova, Complejo arrecifal y Calcsiltitas con *Heterostegina*. El frente de esta plataforma coincide tanto en el mapa como en los cortes, con un aumento en la tasa de subsidencia.

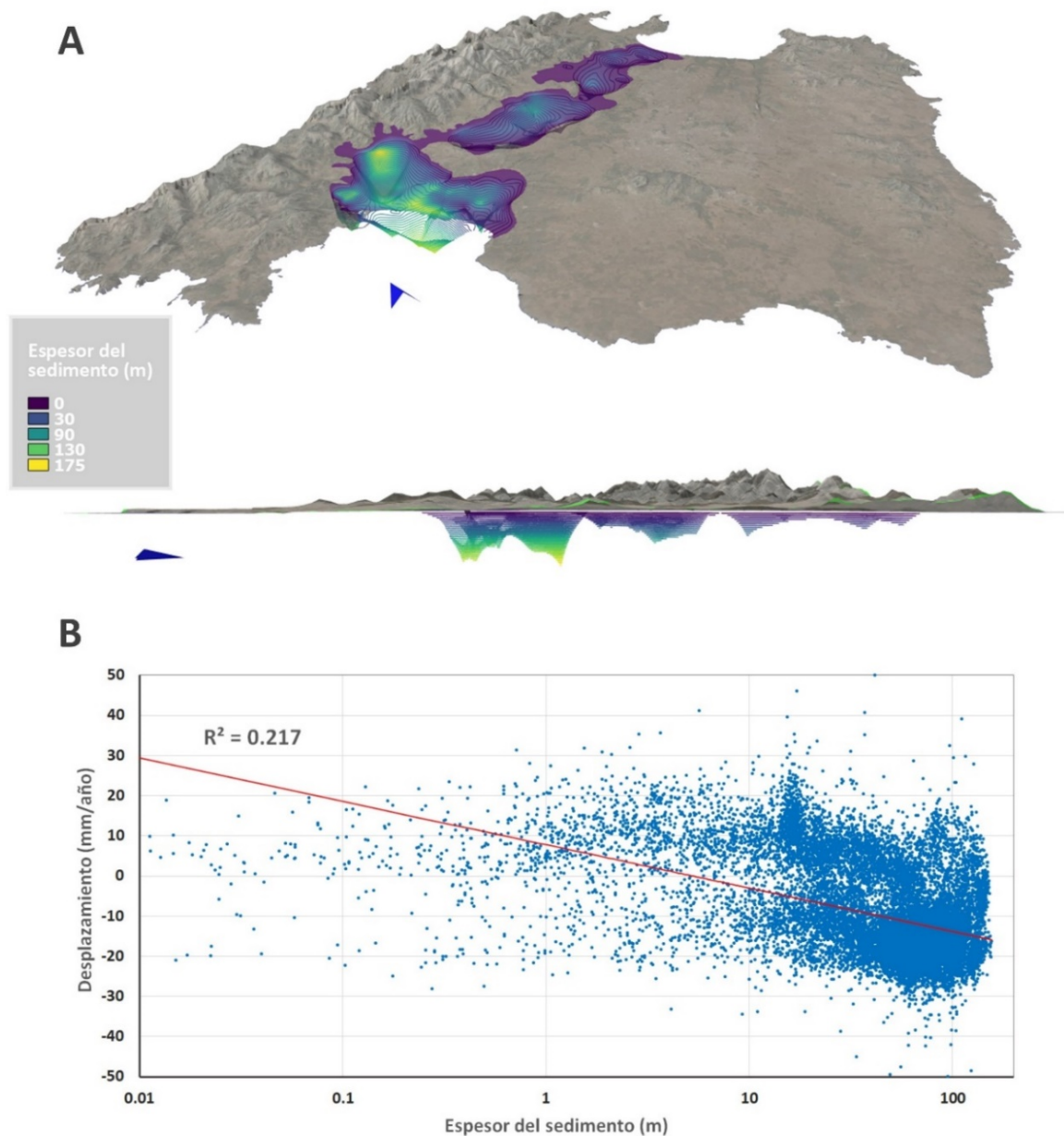


Fig. 7. A) Distribución espacial del espesor del sedimento Cuaternario en Mallorca (exageración vertical x10) Fuente: Capó y Garcia (2019). B) Relación entre el espesor del sedimento Cuaternario y las tasas de desplazamiento.

La Fig. 7A muestra la distribución del sedimento cuaternario en Mallorca (CAPÓ y GARCIA, 2019). Como se puede apreciar, la acumulación sedimentaria se ha producido esencialmente en la Depresión Central, en las cuencas de Palma, Inca y Sa Pobla, alimentadas por la red de torrentes que drenan desde la Serra de Tramuntana. Se observa un claro gradiente en el espesor que alcanzan los depósitos en las distintas cuencas, con valores máximos en torno a los 175 metros en la de Palma, 100 metros en la de Inca y menos de 75 metros en la de Sa Pobla. Estas zonas coinciden, a grandes rasgos, con aquellas

áreas en las que el análisis PSI detectó mayores tasas de subsidencia (Fig. 5). También se aprecia un claro gradiente en las tasas de subsidencia, similar al gradiente de espesor de sedimento: los mayores valores de subsidencia se alcanzan en la cuenca de Palma ($\approx 30 \text{ mm año}^{-1}$; morado en el mapa), seguida de la de Inca ($10\text{-}20 \text{ mm año}^{-1}$; violeta y naranja en el mapa), y de la de Sa Pobla ($< 10 \text{ mm año}^{-1}$; naranja y amarillo en el mapa). La relación entre ambas variables es inversa (Fig. 7B), indicando que grandes espesores de sedimento cuaternario están generalmente asociados a desplazamientos negativos de la superficie de la corteza. Sin embargo, como se ha mencionado antes, esta relación no es lineal, y está afectada por muchos otros factores que desdibujan la fuerza de la correlación, lo que pone de manifiesto la complejidad casuística que explica la subsidencia.

Impactos y daños observados sobre el terreno

Tal como se ha indicado líneas arriba, entre los efectos más palpables de la subsidencia destacan los daños que provoca en las infraestructuras y edificaciones. En un recorrido por zonas afectadas por subsidencia en los alrededores de Palma (Fig. 5), se pudieron apreciar las señales típicas de este desplazamiento vertical. Por ejemplo, la Fig. 8 muestra las grietas en los muros y en el contacto entre el edificio y el suelo en un punto con una alta afectación por subsidencia en el polígono industrial de Son Castelló.

Los efectos de la subsidencia también se aprecian en el patio de un colegio en Son Sardina (Figura 9). En este caso es evidente el hundimiento en la zona de entrada del colegio y la consiguiente aparición de grietas; aspecto que confirma la serie de deformación del punto de análisis con el aumento lineal de la subsidencia en la zona.

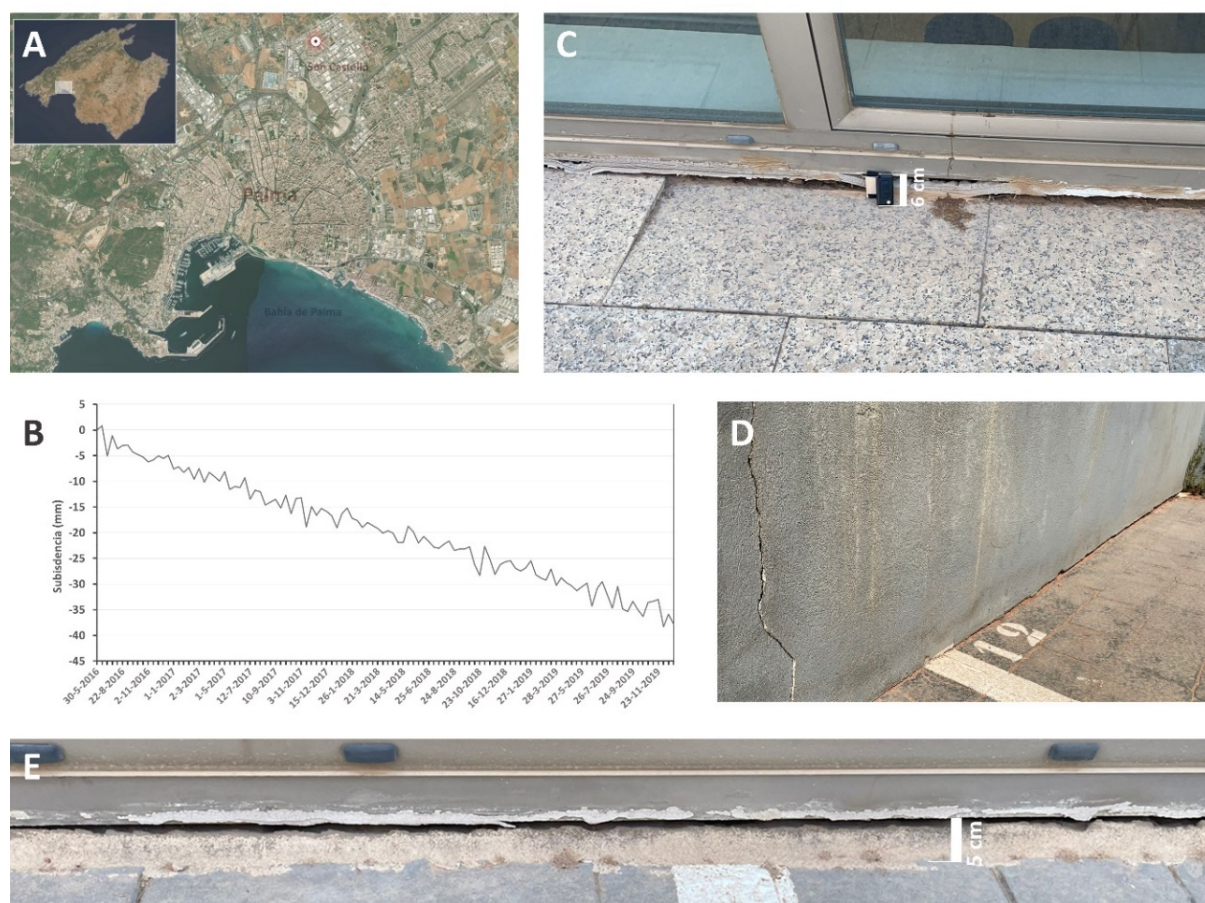


Fig. 8. Ejemplos de daños en edificaciones causados por la subsidencia: A) localización, B) serie de deformación del punto de análisis (PS) más próximo (≈ 5 metros de distancia) y fotografías de detalle de los daños (C, D, E).

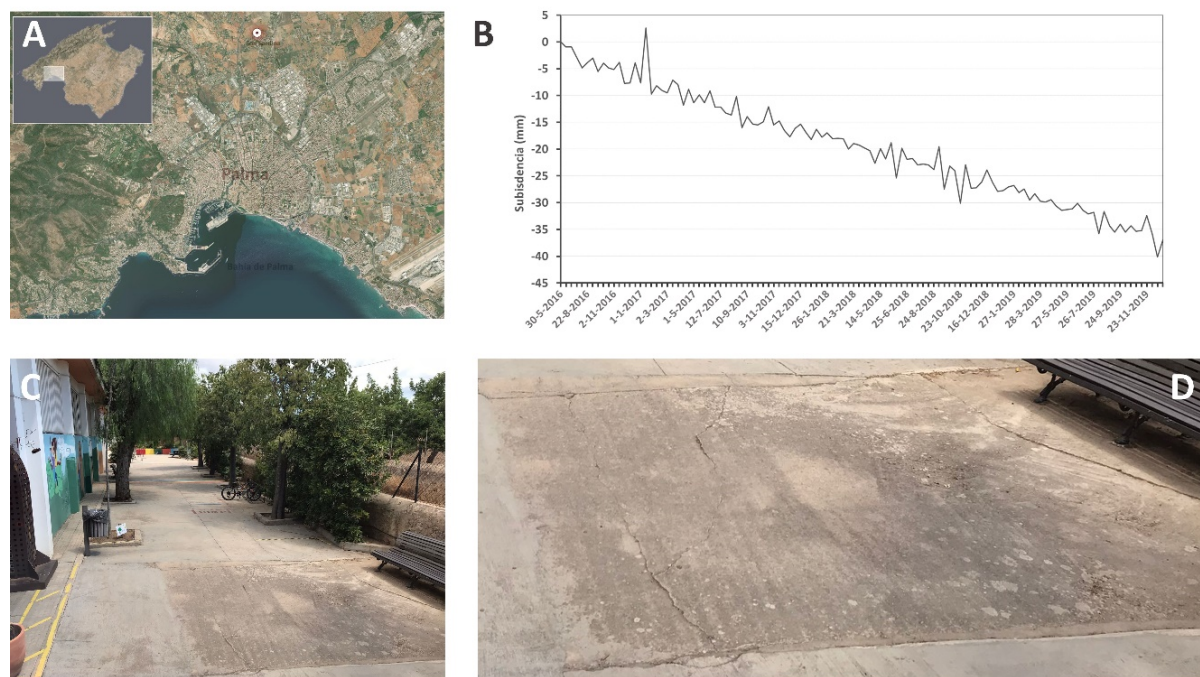


Fig. 9. Ejemplos de daños en edificaciones causados por la subsidencia: A) localización, B) serie de deformación del punto de análisis (PS) más próximo (≈ 15 metros de distancia) y fotografías de detalle de los daños (C y D).

Discusión y conclusiones

En este estudio hemos detectado y monitorizado los procesos de subsidencia ocurridos recientemente en Mallorca mediante la técnica de análisis PSI (Interferometría Dispersa Persistente) aplicada a imágenes radar capturadas por la constelación de satélites Sentinel-1. Además, el estudio muestra la relación existente entre las dinámicas sedimentarias más recientes y los procesos de subsidencia, así como evidencias de los daños causados por el fenómeno en infraestructuras y edificaciones civiles. El objetivo y el alcance espacial del presente estudio (más del 80% de la isla), representan una novedad relevante para la geomorfología y la gestión de riesgos naturales en Mallorca. Asimismo, los resultados confirman los *outputs* de la modelización de HERRERA-GARCÍA *et al.* (2021), que advertían, con una resolución espacial más grosera, de la alta susceptibilidad a la subsidencia que caracterizaba a las cuencas sedimentarias de Palma e Inca. Queda claro, a partir del presente estudio, que la cuenca de Palma es la más subsidente, y que los valores de subsidencia más altos siempre se encuentran más cercanos al límite noroccidental de la misma. Este hecho tiene una relación directa con el sistema falla de Palma y su cuenca de antepaís, sin poder confirmar que la subsidencia esté causada únicamente por la compactación o si también existe subsidencia tectónica.

Los análisis InSAR ya habían sido aplicados en Mallorca, aunque enfocados a la detección de deslizamientos en una zona muy específica de la Serra de Tramuntana (MATEOS *et al.*, 2018), y no a la monitorización de procesos de subsidencia en zonas más amplias. Como puede observarse en la Figura 5, la zona central de la serra de Tramuntana presenta una densidad importante de puntos con desplazamiento; aspecto que muestra una importante movilidad localizada en las zonas más altas, con caídas de bloques, hundimientos y disolución. Del mismo modo, también se han detectado tasas altas de velocidad de deformación en la cuenca de Palma, aspecto que sí está relacionado con la subsidencia, al ocurrir sobre materiales sedimentarios más compresibles. En este trabajo, la anchura de la franja de observación de las imágenes capturadas por los satélites Sentinel-1 (240 km), ha resultado una característica fundamental para conseguir un alcance espacial amplio y homogéneo en las condiciones de detección, que permitiera la comparación de los resultados obtenidos entre diferentes zonas de

Mallorca (BELADAM *et al.*, 2019; EZQUERRO *et al.*, 2020). Este aspecto es muy importante para que las inferencias realizadas sean robustas, ya que las zonas en las que se ha detectado subsidencia se extienden por gran parte de la isla, y aspectos relacionados con el fenómeno de la subsidencia, como el espesor del sedimento, también presentan una alta variabilidad espacial.

Para la monitorización de la subsidencia con el análisis inSAR se recomienda un mínimo de 20 a 25 imágenes (COLESANTI *et al.*, 2003). En este sentido, la base de datos empleada en este estudio está compuesta de 120 imágenes que abarcan 3 años y medio, con una frecuencia de paso siempre inferior al mes (Tabla 1), aspecto que añade robustez a los resultados obtenidos. Asimismo, la observación de los impactos de la subsidencia (grietas, hundimientos, abombamientos, etc.) (Figs. 8 y 9) en localizaciones para las que el análisis PSI reveló importantes tasas de deformación, confirman la validez del método para monitorizar este tipo de procesos. No obstante, queda pendiente la validación de los resultados de deformación a partir de las coordenadas recogidas por las 4 estaciones permanentes GNSS localizadas dentro del área de estudio (FERNANDEZ *et al.*, 2018; NAVARRO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Asimismo, la validación cruzada con otras técnicas inSAR, como la *Small Baselines Subset* (SBAS) (BERARDINO *et al.*, 2002), también representa una futurible línea de trabajo. La técnica SBAS, a diferencia de la PSI (que utiliza un conjunto fijo y limitado de PS con una alta coherencia temporal), se basa en minimizar la decorrelación geométrica utilizando Líneas de Base Perpendiculares más pequeñas, limitando el efecto de la falta de coherencia de fase entre imágenes. Por ello, aunque es menos precisa que el análisis PSI, la técnica SBAS presenta la ventaja de obtener mayor densidad de observaciones (series de deformación) (SVIGKAS *et al.*, 2016); una característica que eventualmente podría ampliar el grado de detalle y resolución espacial del análisis presentado aquí.

Los resultados obtenidos por el análisis PSI de subsidencia aplicado en Mallorca están en la línea de trabajos como los de ROSI *et al.* (2016), FERNANDEZ *et al.* (2018), o GONZÁLEZ y FERNÁNDEZ (2011), que obtuvieron unas tasas de subsidencia muy similares (máximos de 30 a 80 mm año⁻¹) a las observadas en este estudio, en áreas con unas características comunes. Sin embargo, estas cifras quedan muy lejos de las observaciones realizadas en las zonas más densamente pobladas del mundo, como las áreas metropolitanas de Pekín, donde se superan los 100 mm año⁻¹ (CHEN *et al.*, 2016), o México D.F., donde se alcanzan tasas de subsidencia de hasta 500 mm año⁻¹ (CHAUSSARD *et al.*, 2021).

Como otra futura línea de trabajo queda pendiente la comprobación de la hipótesis de que las dinámicas (recarga y descarga) de los acuíferos causan, o al menos influyen, en la ocurrencia de episodios, tanto de subsidencia cuando hay descarga y agotamiento del acuífero (OJHA *et al.*, 2019), como de *uplift* o levantamiento, cuando se produce la recarga (SVIGKAS *et al.*, 2016). En los últimos años, multitud de trabajos han mostrado una relación estrecha entre las dinámicas de los acuíferos y la subsidencia en áreas densamente pobladas, que presentan a su vez una alta demanda hídrica (MOTAGH *et al.*, 2008; ZHU *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2016; BÉJAR-PIZARRO *et al.*, 2017; FIGUEROA-MIRANDA *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2019; NAVARRO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020). En este sentido, la contribución de la subsidencia cuantificada de forma regular y extensiva en la predicción o modelización del nivel de los acuíferos (EZQUERRO *et al.*, 2020), es una posibilidad prometedora que herramientas como el análisis inSAR han abierto en los últimos años (PEPE y CALÒ, 2017). Por lo tanto, quedaría pendiente una comparativa sistemática de puntos cercanos “pozo – punto PS”, para cuantificar la relación entre las series de niveles de los acuíferos y las series de deformación (LIU *et al.*, 2019; NAVARRO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020). En este sentido, en Mallorca existen zonas con una gran densidad de pozos con series de datos de cuaternario que permitiría mejorar la calidad y representatividad de las comparaciones e inferencias causa-efecto planteadas en este trabajo.

Agradecimientos

Las imágenes de la constelación Sentinel-1 fueron proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) y descargadas desde el *Alaska Satellite Facility Data Search Vertex*. Las imágenes se procesaron

con los softwares SARPROZ (Copyright © 2009-2020 Daniele Perissin) y SNAP (Agencia Espacial Europea).

A Antonio, por su honestidad y su inestimable ayuda durante nuestra carrera académica.

Bibliografía

- BÉJAR-PIZARRO, M., EZQUERRO, P., HERRERA, G., TOMÁS, R., GUARDIOLA-ALBERT, C., RUIZ HERNÁNDEZ, J. M., FERNÁNDEZ MERODO, J. A., MARCHAMALO, M. y MARTÍNEZ, R. (2017): Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain. *J. Hydrol.*, 547: 678–689.
- BELADAM, O., BALZ, T., MOHAMADI, B. y ABDALHAK, M. (2019): Using ps-insar with sentinel-1 images for deformation monitoring in northeast Algeria. *Geosci.*, 9 (7): 315.
- BELL, J. W., AMELUNG, F., FERRETTI, A., BIANCHI, M. y NOVALI, F. (2008): Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resour. Res.*, 44(2), doi:10.1029/2007WR006152.
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R., MEMBER, S. y SANSOSTI, E. (2002): A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40(11): 2375-2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792.
- BOZZANO, F., ESPOSITO, C., FRANCHI, S., MAZZANTI, P., PERISSIN, D., ROCCA, A. y ROMANO, E. (2019): Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. *Remote Sens. Environ.*, 168: 219–238, doi:10.1016/j.rse.2015.07.010, 2015.
- CAPÓ, A. y GARCIA, C. (2019): Basin filling evolution of the central basins of Mallorca since the Pliocene. *Basin Res.*, 31(5): 948–966, doi:10.1111/bre.12352, 2019.
- CHAUSSARD, E., MILILLO, P., BÜRGMANN, R., PERISSIN, D., FIELDING, E., y BAKER, B. (2017): Remote Sensing of Ground Deformation for Monitoring Groundwater Management Practices: Application to the Santa Clara Valley During the 2012-2015 California Drought. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122(10): 8566–8582, doi:10.1002/2017JB014676.
- CHAUSSARD, E., HAVAZLI, E., FATTAHI, H., CABRAL-CANO, E. y SOLANO-ROJAS, D. (2021): Over a Century of Sinking in Mexico City: No Hope for Significant Elevation and Storage Capacity Recovery. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126(4): e2020JB020648, doi:10.1029/2020JB020648.
- CHEN, M., TOMÁS, R., LI, Z., MOTAGH, M., LI, T., HU, L., GONG, H., LI, X., YU, J. y GONG, X (2016): Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sens.*, 8(6): 468, doi:10.3390/rs8060468.
- COLESANTI, C., FERRETTI, A., NOVALI, F., PRATI, C. y ROCCA, F. (2003): SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41: 1685–1701, doi:10.1109/TGRS.2003.813278.
- COLOM, G. (1975): *Geología de Mallorca*. Dip. Prov. Baleares. Inst. Est. Baleares (CSIC).
- DECLERCQ, P.Y., GERARD, P., PIRARD, E., PERISSIN, D., WALSTRA, J. y DEVLEESCHOUWER, X. (2017): Subsidence related to groundwater pumping for breweries in Merchtem area (Belgium), highlighted by Persistent Scatterer Interferometry. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 63: 178–185, doi:10.1016/j.jag.2017.07.012.
- EZQUERRO, P., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., FERNÁNDEZ-MERODO, J.A., GUARDIOLA-ALBERT, C., STALLER, A., SÁNCHEZ-SOBRINO, J.A. y HERRERA, G. (2020): Improving multi-technique monitoring using Sentinel-1 and Cosmo-SkyMed data and upgrading groundwater model capabilities. *Sci. Total Environ.*, 703: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134757, 2020.
- FERNÁNDEZ, J., PRIETO, J.F., ESCAYO, J., CAMACHO, A.G., LUZÓN, F., TIAMPO, K.F., PALANO, M., ABAJO, T., PÉREZ, E., VELASCO, J., HERRERO, T., BRU, G., MOLINA, I., LÓPEZ, J., RODRÍGUEZ-VELASCO, G., GÓMEZ, I. y MALLORQUÍ, J. (2018): Modeling the two-and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Sci. REPoRTS*, 8: 14782, doi:10.1038/s41598-018-33128-0.
- FERRETTI, A., PRATI, C., y ROCCA, F. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38: 2202–2212, doi:10.1109/36.868878.
- FERRETTI, A., PRATI, C., y ROCCA, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(1): 8–20, doi:10.1109/36.898661.

- FIASCHI, S., HOLOHAN, E.P., SHEEHY, M. y FLORIS, M. (2019): PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: A case study in the Republic of Ireland. *Remote Sens.*, 11(3), doi:10.3390/rs11030348.
- FIGUEROA-MIRANDA, S., TUXPAN-VARGAS, J., RAMOS-LEAL, J.A., HERNÁNDEZ-MADRIGAL, V.M. y VILLASEÑOR-REYES, C.I. (2018): Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Eng. Geol.*, 246: 91–106, doi:10.1016/j.enggeo.2018.09.023.
- GALLOWAY, D., JONES, D.R., e INGBRITSEN, S.E. (2000): *Land subsidence in the United States*. USGS Report USGS FS-165-00. USGS, Reston.
- GAO, M., GONG, H., LI, X., CHEN, B., ZHOU, C., SHI, M., GUO, L., CHEN, Z., NI, Z., y DUAN, G. (2019): Land Subsidence and Ground Fissures in Beijing Capital International Airport (BCIA): Evidence from Quasi-PS InSAR Analysis. *Remote Sens.*, 11: 1466, doi:10.3390/rs11121466.
- GELABERT, B., SABAT, F. y RODRIGUEZ-PEREA, A. (1992): A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands), *Tectonophysics*, 203(1–4): 167–183, doi:10.1016/0040-1951(92)90222-R.
- GONZÁLEZ, P.J., y FERNÁNDEZ, J. (2011): Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry. *Geology*, 39(6): 551–554, doi:10.1130/G31900.
- HERRERA-GARCÍA, G., EZQUERRO, P., TOMÁS, R., BÉJAR-PIZARRO, M., LÓPEZ-VINIELLES, J., ROSSI, M., MATEOS, R.M., CARREÓN-FREYRE, D., LAMBERT, J., TEATINI, P., CABRAL-CANO, E., ERKENS, G., GALLOWAY, D., HUNG, W.-C., KAKAR, N., SNEED, M., TOSI, L., WANG, H. y YE, S. (2021): Mapping the global threat of land subsidence, *Science*, 371(6524): 34–36.
- KHORRAMI, M., HATAMI, M., ALIZADEH, B., KHORRAMI, H., RAHGOZAR, P. y FLOOD, I. (2019): Impact of Ground Subsidence on Groundwater Quality: A Case Study in Los Angeles, California. In: A.A.V.V. *Computing in Civil Engineering 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019*: 162–170, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- KHORRAMI, M., ABRISHAMI, S., MAGHSOUDI, Y., ALIZADEH, B., y PERISSIN, D. (2020): Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. *Sci. Reports*, 10(1):1–16, doi:10.1038/s41598-020-67989-1.
- KOK, S., y COSTA, A. (2021): Framework for economic cost assessment of land subsidence. *Nat. Hazards*, 106(3): 1931–1949, doi:10.1007/s11069-021-04520-3.
- LAZECKÝ, M., HLAVÁCOVÁ, J., MARTINOVIC, J., y RUIZ-ARMENTEROS, A.M. (2018): Accuracy of sentinel-1 interferometry monitoring system based on topography-free phase images. *Procedia Comput. Sci.*, 138: 310–317, doi:10.1016/j.procs.2018.10.044.
- LIU, Z., LIU, P., MASSOUD, E., FARR, T.G., LUNDGREN, P. y FAMIGLIETTI, J.S. (2019): Monitoring groundwater change in California 's Central Valley using Sentinel-1 and GRACE observations. *Geosciences*, 1–18: 2019.
- LORENZO-LACRUZ, J. y MORÁN-TEJEDA, E. (2016): Spatio-temporal patterns of meteorological droughts in the Balearic Islands (Spain). *Geogr. Res. Lett.*, 42(1): 49, doi:10.18172/cig.2948.
- LORENZO-LACRUZ, J., GARCIA, C., y MORÁN-TEJEDA, E. (2017): Groundwater level responses to precipitation variability in Mediterranean insular aquifers. *J. Hydrol.*, 552: 516–531, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.07.011.
- MARKER, B.R. (2013): Land Subsidence, *Encycl. Earth Sci. Ser.*: 583–590, doi:10.1007/978-1-4020-4399-4_208.
- MATEOS, R.M., EZQUERRO, P., AZAÑÓN, J.M., GELABERT, B., HERRERA, G. FERNÁNDEZ-MERODO, J.A., SPIZZICHINO, D., SARRO, R., GARCÍA-MORENO, I. y BÉJAR-PIZARRO, M. (2018): Coastal lateral spreading in the world heritage site of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). The use of PSInSAR monitoring to identify vulnerability. *Landslides*, 15(4): 797–809, doi:10.1007/s10346-018-0949-5.
- MOTAGH, M., WALTER, T.R., SHARIFI, M.A., FIELDING, E., SCHENK, A., ANDERSSOHN, J. y ZSCHAU, J. (2008): Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophys. Res. Lett.*, 35(16), L16403, doi:10.1029/2008GL033814.
- MOTAGH, M., SHAMSHIRI, R., HAGHSHENAS HAGHIGHNI, M., WETZEL, H.U., AKBARI, B., NAHAVANDCHI, H., ROESSNER, S. y ARABI, S. (2017): Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Eng. Geol.*, 218: 134–151, doi:10.1016/j.enggeo.2017.01.011.
- NAVARRO-HERNÁNDEZ, M.I., TOMÁS, R., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.M., CÁRDENAS-TRISTÁN, A. y MALLORQUÍ, J. (2020): Spatial analysis of land subsidence in the San Luis potosi valley induced by aquifer overexploitation using the coherent pixels technique (CPT) and sentinel-1 insar observation. *Remote Sens.*, 12(22): 1–23, doi:10.3390/rs12223822.
- OJHA, C., WERTH, S. y SHIRZAEI, M. (2019): Groundwater Loss and Aquifer System Compaction in San Joaquin Valley During 2012–2015 Drought. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124(3): 3127–3143, doi:10.1029/2018JB016083.

- OTHMAN, A.A., AL-MAAMAR, A.F., AL-MANMI, D.A.M., LIESENBERG, V., HASAN, S.E., AL-SAADY, Y.I., SHIHAB, A.T., y KHWEDIM, K. (2019): Application of DInSAR-PSI Technology for Deformation Monitoring of the Mosul Dam, Iraq. *Remote Sens.*, 11(22): 2632, doi:10.3390/rs11222632.
- PEPE, A. y CALÒ, F. (2017): A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Appl. Sci.*, Vol. 7: 1264, doi:10.3390/AP7121264.
- PERISSIN, D. (2016): Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *Remote Sens. Digit. Image Process.*, 20: 145–176, doi:10.1007/978-3-319-47037-5_8.
- RODRÍGUEZ-PEREA, A. y GELABERT, B. (1998): Geologia de Mallorca. In: Fornós, J.J. (ed.), *Aspectes geològics de les Illes Balears (Mallorca, Menorca i Cabrera)*: 11-38. Universitat de les Illes Balears, Palma.
- ROSI, A., TOFANI, V., AGOSTINI, A., TANTERI, L., TACCONI STEFANELLI, C., CATANI, F. y CASAGLI, N. (2016): Subsidence mapping at regional scale using persistent scatters interferometry (PSI): The case of Tuscany region (Italy). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 52: 328–337, doi:10.1016/j.jag.2016.07.003.
- SABAT, F. (1998): Estructura de les serres de Llevant de Mallorca. n: Fornós, J.J. (ed.), *Aspectes geològics de les Illes Balears (Mallorca, Menorca i Cabrera)*: 117-134. Universitat de les Illes Balears, Palma.
- SOLARI, L., DEL SOLDATO, M., BIANCHINI, S., CIAMPALINI, A., EZQUERRO, P., MONTALTI, R., RASPINI, F. y MORETTI, S. (2018): From ERS 1/2 to Sentinel-1: Subsidence Monitoring in Italy in the Last Two Decades. *Front. Earth Sci.*, 6: 149, doi:10.3389/feart.2018.00149.
- SVIGKAS, N., PAPOUTSIS, J., CONSTANTINOS, L., TSANGARATOS, P., KIRATZI, A., y KONTOES, C.H. (2016): Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece. *Eng. Geol.*, 209: 175–186, doi:10.1016/j.enggeo.2016.05.017.
- TOSI, L., TEATINI, P. y STROZZI, T. (2013): Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Sci. Rep.*, 3, doi:10.1038/srep02710.
- ZHAO, Q., MA, G., WANG, Q., YANG, T., LIU, M., GAO, W., FALABELLA, F., MASTRO, P. y PEPE, A. (2019): Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: The case study of the Shanghai coastal area. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 154: 10–27, doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.05.005.
- ZHU, L., GONG, H., LI, X., WANG, R., CHEN, B., DAI, Z. y TEATINI, P. (2015): Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Eng. Geol.*, 193: 243–255, doi:10.1016/j.enggeo.2015.04.020.

Data recepció: 28.07.21

Data revisió: 01.09.21

Revisió acceptada: 01.09.21