

# TECNOLOGÍAS INNOVADORAS PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO: AVANCES EN TELEDETECCIÓN Y CONSERVACIÓN PREVENTIVA EN EL MARCO DEL PROYECTO *VESTIGIUM*

D. VILLALÓN TORRES, J.M. DELGADO BLASCO, Y. GONZÁLEZ-CAMPOS BAEZA, E. GARCÍA-VIÑAS, E. BERNÁLDEZ-SÁNCHEZ, M. JIMÉNEZ MELERO Y M. ALZAGA GARCÍA

**Resumen:** Las administraciones competentes en cultura enfrentan dificultades para conservar y proteger nuestro patrimonio debido a la naturaleza dispersa y de difícil acceso de sus elementos, como es el caso de buena parte de los bienes que conforman nuestro patrimonio defensivo. La falta de medios, tanto presupuestarios como de personal cualificado, agrava esta situación, dificultando el seguimiento y la prevención del deterioro. En contraste con esta realidad, se observan avances en la aplicación de técnicas, como la teledetección, que permite estudios patrimoniales avanzados de manera no invasiva. Estas técnicas facilitan el seguimiento de bienes con dificultades de acceso o directamente inaccesibles y con una periodicidad que hace posible estudios de evolución, de interés tanto para la comunidad científica como para la administración. En este contexto, se presentan varios casos de estudio para la conservación preventiva sobre elementos patrimoniales mediante teledetección utilizando datos de la misión radar Sentinel-1 de la ESA.

**Palabras clave:** Patrimonio Cultural, Teledetección, Conservación Preventiva, InSAR, Sentinel-1

**Abstract:** Cultural heritage administrations face challenges in conserving and protecting our heritage due to the dispersed nature and difficult access of its elements, as is the case with many assets that make up our defensive heritage. The lack of resources, both budgetary and qualified personnel, exacerbates this situation, hindering monitoring and prevention of deterioration. In contrast to this reality, advancements are observed in the application of techniques such as remote sensing, which allows for advanced, non-invasive heritage studies. These techniques facilitate the monitoring of assets that are difficult to access or directly inaccessible, with a frequency that enables evolution studies of interest to both the scientific community and administration. In this context, several case studies of preventive conservation on heritage elements are presented using remote sensing with data from ESA's Sentinel-1 radar mission

**Keywords:** Cultural Heritage, Teledetection, Preventive Preservation, inSAR, Sentinel-1

## 1. INTRODUCCIÓN

El litoral gaditano, con su rica historia marítima y su ubicación estratégica, alberga un valioso patrimonio defensivo. La necesidad de controlar el litoral condujo al desarrollo de un eficiente sistema de control y defensa frente a al piratería entre los siglos XVI y XVIII que, en buena parte, ha llegado hasta nuestros días. Desde las torres atalayas hasta los castillos y fortificaciones que

protegían las ciudades, conforman un legado arquitectónico de incalculable valor.

La naturaleza dispersa de estas fortificaciones a lo largo de la costa, combinada con su exposición a condiciones ambientales adversas, plantea importantes retos para su preservación. La erosión, los efectos del clima marítimo y la presión urbanística amenazan constantemente la integridad de estas estructuras históricas. Valdecantos (1996) y Villegas et al. (2005) des-

tacan la pérdida y el deterioro de muchos de sus elementos debido a estos factores. Además, muchas de estas fortificaciones se encuentran en localizaciones de difícil acceso, lo que complica su seguimiento y las tareas de conservación preventiva.

A pesar de la protección legal otorgada por diversos decretos y leyes desde finales del siglo XIX, que culminará con la Ley 16/1985 de Patrimonio Histórico Español que las protege como Bienes de Interés Cultural, la conservación de este patrimonio sigue siendo un desafío. Las administraciones competentes en materia de cultura se enfrentan a la complicada tarea de protegerlo y conservarlo con recursos limitados, tanto presupuestarios como de personal especializado.

En este contexto, la necesidad de métodos de seguimiento no invasivos, continuos y económicamente viables se vuelve cada vez más urgente. Es aquí donde la interferometría radar se plantea como una solución prometedora. Esta técnica de teledetección ofrece la posibilidad de monitorear de forma precisa y remota los movimientos y deformaciones estructurales de los elementos patrimoniales, incluso en zonas de difícil acceso, proporcionando una herramienta útil para la conservación preventiva de este importante patrimonio.

## 2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente trabajo se centra en la aplicación de interferometría radar para la monitorización y conservación preventiva de una serie de elementos del patrimonio defensivo de la costa de Cádiz, en el marco del proyecto Vestigium, con los siguientes objetivos:

- Evaluar la eficacia de la interferometría radar para el monitoreo de estructuras defensivas costeras
- Establecer un protocolo de seguimiento continuo y no invasivo que abarque la adquisición y procesamiento de datos y el establecimiento de umbrales de alerta para la detección temprana de problemas estructurales
- Identificar patrones de deformación y factores de riesgo específicos, correlacionando en lo posible los patrones de deformación observados, con factores ambientales, geológicos y antrópicos.
- Generar un mapa de riesgo para el patrimonio defensivo analizado en el marco

del proyecto Vestigium, clasificando las estructuras estudiadas según su grado de vulnerabilidad.

- Evaluar el potencial de la interferometría radar como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la gestión del patrimonio andaluz.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se estructura en tres fases principales: selección de casos de estudio, adquisición y procesamiento de datos, y análisis e interpretación de los resultados.

### 3.1. Elementos patrimoniales objeto de estudio

Se han seleccionado 20 elementos defensivos (torres almenaras y castillos), desde la ciudad de Cádiz hasta Tarifa (tabla 1, figura 1), coincidiendo con el ámbito territorial del proyecto Vestigium. De cada uno de ellos se ha elaborado un inventario básico incluyendo información sobre coordenadas geográficas, descripción histórica y arquitectónica, estado de conservación actual conocido, lecturas de datos inSAR, conclusiones y recomendaciones (Anexo I).

### 3.2. Adquisición y procesamiento de datos

La fuente de datos para el estudio se ha centrado en imágenes radar de la misión Sentinel-1 de la ESA, consultadas a través de la plataforma EGMS<sup>1</sup> (*European Ground Motion Service*) del Copernicus Land Monitoring Service, restringida a un período de estudio entre enero de 2018 y diciembre de 2022. Utilizando todos los datos disponibles para Sentinel-1 y haciendo un procesado manual de la información, se podrían abarcar con datos desde 2015 hasta 2024. El procesamiento inSAR se ha llevado a cabo mediante la técnica PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) para identificar puntos de medición estables en el área objeto de estudio. Una vez identificados, se ha accedido a las series temporales de desplazamiento para cada punto de medición y se han calculado las velocidades medias de desplazamiento.

<sup>1</sup> <https://egms.land.copernicus.eu/>

ID	Nombre	Localización	coordenadas	resultado inSAR	lectura inSAR
1	Castillo de Santa Catalina	Cádiz	36.53235189 -6.30786934	1	1
2	Castillo de San Sebastián	Cádiz	36.52826066 -6.31692056	1	1
3	Torregorda	San Fernando	36.46021776 -6.25418019	1	1
4	Castillo de Sancti Petri	San Fernando	36.38046338 -6.22010684	1	1
5	Torre Bermeja	Chiclana de la Frontera	36.37503520 -6.19143822	2	1
6	Torre del Puerco	Chiclana de la Frontera	36.33121578 -6.16133091	3	0
7	Torre de Roche	Conil de la Frontera	36.29551814 -6.14061754	1	1
8	Torre de Castilnovo	Conil de la Frontera	36.25339912 -6.08050297	2	1
9	Torre Nueva	Vejer de la Frontera	36.23195224 -6.07207397	1	0
10	Torre Trafalgar	Barbate	36.18276659 -6.03584755	3	0
11	Torre de Meca	Barbate	36.19450626 -6.01380945	1	0
12	Torre de Buenavista	Barbate	36.209789 -5.977339	3	0
13	Torre del Tajo	Barbate	36.1789075 -5.97289503	3	1
14	Torre de cabo de Plata	Tarifa	36.103000 -5.823899	1	0
15	Torre de cabo de Gracia	Tarifa	36.090058 -5.810557	3	1
16	Torre de la Peña	Tarifa	36.057044 -5.659129	1	0
17	Torre del Rayo	Tarifa	36.121148 -5.647077	4	0
18	Torre de las Palomas	Tarifa	36.001157 -5.609584	1	1
19	Castillo de Guzmán el Bueno	Tarifa	36.011857 -5.601953	1	1
20	Torre de Guadalmesí	Tarifa	36.036579 -5.521962	3	1

**Tabla 1.** Relación de elementos patrimoniales estudiados y localización. Resultado inSAR: 1: estructura y entorno sin deformaciones; 2: estructura con deformaciones; 3: entorno con deformaciones; 4: límite de la técnica. Lectura inSAR: 1. con lectura en la estructura histórica, 0. sin lectura en la estructura histórica

Las herramientas de software que se han utilizado han sido:

- SNAP (*Sentinel Application Platform*) para el preprocesamiento de imágenes
- StaMPS para el análisis inSAR avanzado
- QGIS para la visualización y análisis espacial de resultados

### 3.3. Análisis e interpretación

La técnica inSAR (Interferometría Radar) que estamos utilizando para el estudio se basa en la comparación de imágenes radar satelitales adquiridas en diferentes momentos para detectar y medir cambios mínimos en la superficie terrestre. Esta técnica aprovecha las diferencias de fase entre las ondas de radar reflejadas, permi-

tiendo identificar desplazamientos milimétricos en estructuras y superficies del terreno con alta precisión y de manera no invasiva. Para la interpretación de la información, se han generado mapas de deformación, con la velocidad media de desplazamiento para cada estructura, y con el desplazamiento acumulado a lo largo del período de estudio. Al mismo tiempo, se han analizado las series temporales para identificar tendencias lineales y no lineales, detectando cambios abruptos o aceleraciones en el movimiento. En el caso en el que se han identificado dichas alteraciones (torre Bermeja), se han tratado de identificar correlaciones con factores externos (recopilación de datos meteorológicos y oceanográficos de la zona; relación con eventos climáticos extremos; consideración de intervenciones de restauración o eventos antrópicos conocidos o rastreables). Una vez correlacionados, se han



Figura 1. Localización geográfica de los elementos patrimoniales estudiados.

clasificado las estructuras según su comportamiento (basado en la magnitud y el patrón de desplazamiento observado).

### 3.4. Integración de resultados

Con los resultados de este estudio, se procederá a la creación de una base de datos geoespacial que integre la identificación y caracterización tipológica de cada estructura, los resultados del análisis inSAR y los datos contextuales (geología, clima, intervenciones humanas). Al mismo tiempo, se elaborarán informes detallados para cada estructura, incluyendo: visualizaciones de los patrones de deformación; interpretación de los resultados en el contexto de la conservación preventiva; recomendaciones para futuras acciones de monitoreo (o intervención). Por último, se propondrá la creación de un sistema de alerta temprana basado en umbrales de deformación predefinidos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Patrones de deformación observados

El análisis interferométrico de las imágenes radar reveló varios patrones de deformación en

las estructuras analizadas. Las principales observaciones destacadas incluyen:

- Deformación acumulativa: Se detectaron desplazamientos acumulativos sobre todo en los entornos de varias torres: Roche, Trafalgar, Buenavista, del Tajo, de cabo de Gracia y de Guadalmesí, con variaciones milimétricas a lo largo de los períodos de observación. Estas deformaciones son indicativas de movimientos lentos y continuos, posiblemente debidos a la combinación de factores ambientales y estructurales.
- Desplazamientos estacionales: La mayoría de las estructuras analizadas mostraron patrones de desplazamiento estacionales, correlacionados con las variaciones climáticas y meteorológicas. Por ejemplo, se observaron desplazamientos más pronunciados durante los meses de mayor precipitación, lo que sugiere un impacto significativo de la humedad en la estabilidad de las estructuras. También en los meses de más calor.

### 4.2. Patrones de influencia identificados

El análisis detallado de los datos ha permitido identificar varios factores que influyen en

la deformación de las estructuras defensivas analizadas:

- **Impacto antrópico:** La actividad humana, especialmente el desarrollo urbanístico, ha demostrado tener un impacto significativo en la estabilidad de las estructuras históricas y su entorno (Grassi *et al.* 2024). La alteración de cargas en el suelo, provocando asentamientos diferenciales y deformaciones; las vibraciones generadas por el tráfico o las obras de construcción, que pueden afectar a largo plazo a la integridad estructural; los cambios de drenaje, que pueden generar procesos erosivos o acumulación de agua, afectando a la cimentación. Todas estas alteraciones pueden provocar nuevos patrones de deformación en estructuras estables.
- **Impacto de la erosión costera:** Los entornos de las estructuras ubicadas cerca de la línea de costa mostraron mayores tasas de deformación debido a la erosión continua provocada por el oleaje y las mareas. Este fenómeno puede afectar a la estabilidad de la cimentación y generar desplazamientos significativos con el tiempo.
- **Condiciones meteorológicas:** La humedad, la lluvia y los vientos fuertes tienen un impacto considerable en la integridad estructural de las torres y castillos. Las precipitaciones intensas, en particular, pueden saturar los materiales constructivos, provocando desplazamientos que debilitan las estructuras.

#### 4.3. Estructuras sin problemas de movimiento significativo

4.3.1. Con medición directa sobre la estructura:

- Castillo de Santa Catalina
- Castillo de San Sebastián
- Torregorda
- Castillo de Sancti Petri
- Torre de Castil-Lobo
- Torre de las Palomas
- Castillo de Guzmán el Bueno

Estas estructuras muestran una estabilidad notable, con desplazamientos mínimos generalmente en el rango de  $\pm 2$  mm. La coherencia de los datos es alta (0.70-0.86), lo que indica una buena fiabilidad de las mediciones. Las velocidades

de medias de desplazamiento son bajas, entre  $-0.11$  mm/año y  $0.75$  mm/año, sugiriendo una estabilidad a largo plazo.

4.3.2. Sin medición directa sobre la estructura:

- Torre Nueva
- Torre de Meca
- Torre de Cabo de la Plata
- Torre de la Peña

Aunque no se dispone de mediciones directas, el análisis del entorno cercano sugiere una estabilidad similar a las estructuras con medición directa. Sin embargo, se recomienda precaución en la interpretación de estos resultados y la implementación de mediciones in situ para una evaluación más precisa.

#### 4.4. Estructuras con movimientos significativos

- Torre Bermeja

Esta estructura muestra un patrón de movimiento importante a partir de mediados de 2021, con desplazamientos de hasta  $-25$  mm en una de las mediciones (Anexo I). Parece ser debido a alteraciones antrópicas del entorno por modificaciones urbanísticas. La discrepancia entre diferentes mediciones sugiere un comportamiento complejo que requiere una investigación detallada.

#### 4.5. Estructuras con movimientos significativos en el entorno

- Torre de Roche
- Torre de Trafalgar
- Torre de Buenavista
- Torre del Tajo
- Torre de Cabo de Gracia
- Torre de Guadalmesí

Estas estructuras, aunque no muestran movimientos alarmantes en sí mismas, están ubicadas en entornos con desplazamientos significativos (Anexo I). Los movimientos en el terreno circundante, especialmente en acantilados y zonas costeras erosionables, representan un riesgo potencial para la estabilidad futura de estas estructuras.

#### 4.6. Casos no analizables por limitaciones técnicas

- Torre del Rayo

No se pudo realizar un análisis debido a la falta de datos InSAR en la plataforma EGMS, posiblemente debido a errores en el postprocesado automático que llevan a cabo desde el programa Copernicus y que eliminaron los datos existentes para esa zona.

### 5. DISCUSIÓN

#### 5.1. inSAR en la conservación del Patrimonio

La técnica InSAR ha demostrado ser una herramienta valiosa para el monitoreo y conservación preventiva del patrimonio histórico defensivo. Ofrece las siguientes ventajas:

- Detección de movimientos milimétricos a escala regional.
- Monitoreo continuo y no invasivo.
- Capacidad para identificar patrones de movimiento a largo plazo.
- Detección temprana de potenciales problemas estructurales.
- Acceso en abierto a los datos a través del programa Copernicus de la ESA.

La capacidad para identificar patrones de movimiento a largo plazo ofrece una ventaja estratégica sin precedentes para valorar la evolución estructural de los bienes patrimoniales y comprender los procesos graduales de deformación, que de otra manera serían invisibles. Esta detección temprana de potenciales problemas puede ser determinante en la preservación del patrimonio, y una aliada estratégica para la administración cultural; ya que facilita la anticipación de problemas futuros mediante acciones preventivas, antes de que los daños sean irreversibles o los costes de intervención se multipliquen.

#### 5.2. Limitaciones

A pesar de sus numerosas ventajas, la técnica inSAR presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas en su aplicación a la conservación del patrimonio:

- Dependencia de la reflectividad de las superficies, especialmente en estructuras poco reflectantes o en áreas de vegetación densa.

- Limitaciones en el postproceso de la información, ya que a veces se eliminan puntos de medición interpretables como “ruido” para los algoritmos de procesado y limpieza de la información (es lo que sospechamos que ha pasado en el caso de la torre del Rayo, en Tarifa)

- Posibles ambigüedades en la interpretación de los datos, ya que la aplicación de esta técnica requiere un cierto grado de especialización.

- Necesidad de validación con mediciones *in situ* para complementar lo observado con inspecciones y mediciones en campo.

#### 5.3. Recomendaciones para la tutela y conservación preventiva

Dado el potencial analizado de la aplicación de la técnica inSAR a la conservación del patrimonio, se recomiendan las siguientes acciones futuras:

- Implementar un sistema de monitoreo InSAR continuo para todas las estructuras históricas de interés.
- Complementar los datos InSAR con inspecciones visuales periódicas y mediciones *in situ*.
- Desarrollar planes de conservación preventiva específicos para cada estructura, basados en los patrones de movimiento observados.
- Priorizar intervenciones en estructuras con movimientos significativos o ubicadas en entornos inestables.
- Realizar estudios geotécnicos detallados en zonas con movimientos significativos del terreno.
- Implementar medidas de protección en áreas con alta erosión o inestabilidad.
- Establecer un sistema de alerta temprana basado en umbrales de desplazamiento predefinidos.
- Fomentar la colaboración interdisciplinaria entre expertos en patrimonio, geólogos y otros especialistas en el análisis del territorio, para una interpretación integral de los datos.

### 6. CONCLUSIONES

Como hemos visto, la técnica inSAR se presenta como una herramienta innovadora y valiosa en

el ámbito de la conservación preventiva del patrimonio histórico, ofreciendo un primer nivel de aproximación útil para la toma de decisiones informadas (Eskandari *et al*, 2023). Su capacidad para establecer gradientes de peligrosidad basados en el movimiento de las estructuras, permite organizar y programar de manera más eficiente las actuaciones en el territorio, optimizando los recursos y enfocando la atención en aquellas estructuras que muestran signos de inestabilidad potencial.

En cualquier caso, es importante señalar que los datos obtenidos mediante InSAR no deben interpretarse de manera aislada. Deben integrarse con otras fuentes de información de datos geográficos, como la ubicación del elemento, datos climáticos locales y características geológicas del entorno (Themistocleous *et al*. 2023). Esta aproximación integrada permitirá evaluar los elementos analizados y establecer las pautas para su conservación y salvaguarda.

Por último, nos gustaría señalar que la técnica InSAR representa una oportunidad sin precedentes para mejorar los métodos de tutela y conservación preventiva del patrimonio histórico. Su implementación sistemática, combinada con métodos tradicionales de seguimiento, puede contribuir significativamente a la preservación a largo plazo de nuestro patrimonio, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos dedicados a la conservación del patrimonio.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto de I+D+i  $\square$  Vestigium. Arqueología y paleobiología intermareal: el patrimonio en las playas de Cádiz como motor económico y de participación social del Plan Complementario de Ciencias Marinas y del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Eskandari, Rasoul; Scaioni, Marco. 2023. «Validation of full-resolution dInSAR-derived vertical displacement in cultural heritage monitoring: integration with geodetic levelling measurements». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, doi: 10.5194/isprs-annals-x-m-1-2023-79-2023

Fernández Cánovas, Manuel. 2019. «Torres de vigilancia en la costa del antiguo reino de Granada (S XV-XVIII)». *Informes de la Construcción*, 71(553): e276. <https://doi.org/10.3989/ic.67478>

Grassi, Francesca; Mancini, Francesco; Dallari, Veronica; Bassoli, Elisa; Vincenzi, Loris. 2024. Mapping the buildings stability at urban extent based on MT-InSAR and 3D rigid motion reconstruction method. doi: 10.5194/egusphere-egu24-9924

Sáez Rodríguez, Angel. «Las torres de la costa en 1616». *Almoraima. Revista de Estudios Campogibraltareños*, 48: 189-206.

Valdecantos, Rodrigo. 1996. «Las torres almenara del litoral de la provincia de Cádiz (las torres de marina): estudio tipológico y consideraciones terminológicas». *Estudios de Historia y de Arqueología Medievales XI*: 481-501.

Ruiz Jaramillo, Jonathan, García Pulido, Luis José; Alba Dorado, María Isabel., Revisión, cualificación y actualización de la información sobre arquitectura defensiva de la comunidad autónoma andaluza. *Torres de Cadiz*. 2019

Themistocleous, Kyriacos; Fotiou, Kyriaki; Tzouvaras, Marios. 2023. Monitoring natural and geohazards at cultural heritage sites using Earth observation: the case study of Choirokoitia, Cyprus. doi: 10.5194/egusphere-egu23-16436

Guía Digital del Patrimonio Cultural de Andalucía. Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico. Consejería de Turismo, Cultura y Deporte. <https://guiadigital.iaph.es/>

## REFERENCIAS ÚTILES

Herramienta European Ground Motion Service (EGMS) del programa Copernicus:

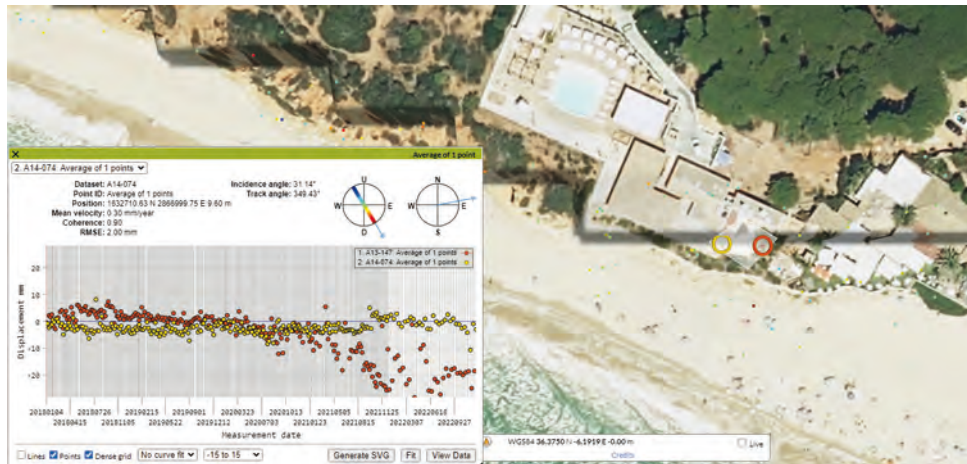
<https://egms.land.copernicus.eu/>

Buscador de castillos y fortificaciones, de la Asociación Española de Castillos: <https://www.xn--castillosdeespa-lub.es/es/buscador-castillos>

Aplicaciones Sentinel para Análisis de Riesgos (Curso en el Marco del XIX Simposio Internacional SELPER 2021) [https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/11/CONAE\\_SAOCOM-intro\\_JMilovich.pdf](https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/11/CONAE_SAOCOM-intro_JMilovich.pdf)

How to guides de land.copernicus.eu: <https://land.copernicus.eu/en/how-to-guides>

Tutoriales de la ESA: <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/>



**Figura 2.** Gráfica de desplazamiento acumulado generada a partir del visor del European Ground Motion Service (EGMS) para la zona de la Torre Bermeja. El eje horizontal representa las fechas correspondientes a las distintas pasadas del satélite Sentinel-1, mientras que el eje vertical muestra el desplazamiento acumulado en milímetros respecto al valor inicial de referencia. Los datos reflejan la evolución temporal del movimiento del terreno, medido mediante técnicas de interferometría radar por satélite (InSAR).



**Figura 3.** Localización de la Torre Bermeja, donde se aprecia el acantilado de la playa de la Barrosa y las intervenciones de consolidación que se han ido llevando a cabo en los últimos años.

## ANEXO I: FICHAS DE ELEMENTOS

### 05. TORRE BERMEJA (CHICLANA DE LA FRONTERA)

#### Análisis de la gráfica de desplazamiento:

1. Línea A13-147 (naranja): Representa el desplazamiento en la línea de visión del satélite en una órbita ascendente. Muestra una

tendencia estable hasta mediados de 2021, seguida de un desplazamiento negativo pronunciado, llegando a -25 mm.

2. Línea A14-074 (amarilla): También representa el desplazamiento en órbita ascendente. Muestra un patrón más estable a lo largo del tiempo, con fluctuaciones menores, generalmente entre -5 mm y +5 mm.

**Detalles técnicos:**

- Ángulo de incidencia: 31.14°
- Ángulo de trayectoria: 349.43°
- Velocidad media: 0.30 mm/año (para A14-074)
- Coherencia: 0.90 (excelente calidad de datos)
- RMSE: 2.00 mm (error cuadrático medio, indica muy buena precisión)

**Interpretación:**

- Hay una discrepancia significativa entre las dos mediciones ascendentes, especialmente después de mediados de 2021.
- La línea A13-147 sugiere un movimiento repentino y significativo, posiblemente indicando un problema estructural o un cambio en el entorno inmediato.
- La línea A14-074 muestra una estabilidad mayor, lo que plantea preguntas sobre la causa de la discrepancia.

**Conclusiones:**

1. La Torre Bermeja muestra un comportamiento complejo y potencialmente preocupante.
2. La discrepancia entre las dos mediciones sugiere la necesidad de una investigación más detallada.
3. El movimiento repentino observado en A13-147 podría indicar un problema estructural significativo o cambios en el terreno circundante. Esta conclusión es coherente con la actividad observada en la comparativa de ortofotos del PNOA de 2019 y 2022.
4. La alta coherencia (0.90) sugiere que los datos son muy confiables, lo que aumenta la importancia de investigar la discrepancia observada.

**Recomendaciones:**

1. Realizar una inspección in situ inmediata de la Torre Bermeja, con especial atención a signos de deformación, grietas o cambios en el terreno circundante.



**Figura 4.** Ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) correspondientes a los años 2019 y 2022 del entorno geográfico de la Torre Bermeja, en las que se aprecian las alteraciones sufridas por el inmueble histórico en el contexto de una actuación urbanística vinculada al desarrollo turístico de la zona.

2. Implementar un sistema de monitoreo in situ (como inclinómetros, extensómetros y estación total) para validar y complementar los datos InSAR.
3. Llevar a cabo un estudio geotécnico detallado del área circundante para evaluar posibles cambios en el suelo o erosión costera.
4. Investigar cualquier intervención humana o evento natural que pudiera haber ocurrido alrededor de mediados de 2021 que explique el cambio repentino. Investigando con las ortofotos históricas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), se identifica una importante transformación urbanística del entorno.
5. Desarrollar un plan de acción inmediato para mitigar posibles riesgos estructurales, especialmente si se confirma el movimiento significativo.
6. Considerar la posibilidad de realizar un escaneo láser 3D de la torre para obtener un modelo preciso de su geometría actual.
7. Establecer un programa de monitoreo más frecuente y detallado para esta estructura específica.

