



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

## **Actividad E.4.1.1: Informe de evaluación sobre la operatividad de Ground Exploitation Platform (GEP)**

**Informe del GT4: Herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa**

**Due date of deliverable:** 30/09/2020

**Actual submission date:** xx/11/2020

**Lead contractor for this deliverable:** UGR

### **Autores**

Jorge P. Galve, Cristina Reyes-Carmona, Anna Barra, Marta Béjar-Pizarro, Oriol Monserrat, Ricardo Garcia Campus, Jose Luis Zezere, Paulo Sergio de Figueiredo Ferreira, Sara Alexandra Figueira Damaso, Susana Isabel Magro Siborro, Rosa M. Mateos, José Miguel Azañón

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)



## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA GEP</b> .....	<b>4</b>
2.1	Breve descripción de los servicios utilizados.....	6
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>9</b>
3.1	Zona piloto de Granada .....	9
3.1.1	Costa Tropical.....	9
3.1.2	Cuenca del río Guadalfeo.....	13
3.2	Zona piloto de Islas Baleares .....	18
3.2.1	Mallorca .....	18
3.2.2	Ibiza .....	19
3.3	Zona piloto de Lisboa .....	21
<b>4</b>	<b>OPERATIVIDAD EN LAS ZONAS DE ESTUDIO</b> .....	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>32</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El GT4 “herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa” de RISKCOAST tiene como finalidad adaptar herramientas existentes o desarrollar nuevas en caso de necesidad basadas en datos de teledetección (satelital/drones/o terrestre) para apoyar a sistemas de alerta temprana frente a diferentes tipos de riesgo y modelos de costa. El objetivo es proporcionar una solución integrada capaz de absorber datos provenientes de diferentes sensores y generar mapas que puedan ser utilizados como soporte a la prevención y alerta frente a riesgos geológicos. En este GT se desarrollarán herramientas informáticas, cartográficas y matemáticas para el apoyo a sistemas de alerta temprana y a la gestión de catástrofes. Estas herramientas estarán basadas en diferentes técnicas innovadoras como la monitorización DInSAR satelital y terrestre, drones, o en simulaciones matemáticas basadas en análisis espectral. La Actividad 4.1 se centra en la técnica de interferometría satelital con el objetivo de generar mapas para detectar, caracterizar y monitorizar movimientos superficiales asociados con riesgos costeros.

La interferometría satelital, o dicho de una manera más concreta, la Interferometría diferencial SAR (DInSAR) es una potente herramienta para la detección y el monitoreo de movimientos del terreno asociados a diferentes fenómenos geológicos [Crosetto et al. 2016]. Pese a ser una técnica relativamente joven, su consolidación llegó a principios de este siglo [Ferretti et al. 2001, Crosetto et al. 2005], es una técnica versátil, confiable y económica para el mapeo y monitoreo de subsidencias, deslizamientos del terreno, control de infraestructuras y zonas urbanas [Crosetto et al. 2016]. La técnica DInSAR está basada en sensores radar que portan determinados satélites. El radar, como sensor, tiene un principio de funcionamiento muy parecido al de un distanciómetro. Envía la señal con una inclinación con respecto a la superficie, esta interactúa con la superficie que envía parte de la señal recibida de vuelta al radar (eco). De una forma simple se puede decir que midiendo el tiempo que le cuesta su camino de ida y vuelta a la onda puede medirse la distancia entre un punto y el satélite y, con ello, cada vez que el satélite toma una medida, se puede conocer el cambio de posición de ese punto. La característica principal del DInSAR frente a otros métodos geodésicos es que es capaz de medir cambios de escala milimétrica-centimétrica ocurridos a escalas de tiempo mensuales o anuales y con

ello detectar movimientos prácticamente imperceptibles. Una explicación detallada de esta técnica viene recogida en el documento “E.4.1.2 Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el SAR satelital” elaborado para este mismo proyecto dentro del marco de la actividad 4.1. El presente informe se centra en la evaluación sobre la operatividad de una plataforma que permite realizar de manera rápida este tipo de análisis en la nube, la plataforma desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA en su acrónimo inglés) denominada Geohazard Exploitation Platform (GEP). Esta plataforma al día que se escribe este informe (Oct-2020) ya se ha puesto en servicio tras varios años de desarrollo y pruebas, una fase en la que han participado varios redactores de este informe dentro de un programa de “Pioneros” (“Early Adopters”). Así, en ese periodo han conocido cómo se ha desarrollado esta plataforma e identificado sus limitaciones y sus ventajas para servir de apoyo a la toma de decisiones en prevención y gestión de desastres. Un primer estudio de las capacidades de la plataforma se describió en el artículo de Galve et al. [2017] en la revista especializada “Remote Sensing”. Este informe añade información adicional y novedosa a aquel trabajo incluyendo descripciones sobre nuevos servicios de la plataforma GEP, además de focalizarse en los beneficios que aporta para el análisis de riesgos costeros.

## **2 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA GEP**

Las plataformas de análisis web y los proyectos colaborativos relacionados con ellas están revolucionando la manera de analizar los datos de sensores remotos. Por otro lado, el lanzamiento de nuevas misiones por parte de la ESA que ofrecen información de acceso libre permite alimentar a estas plataformas con grandes cantidades de información lista para ser analizadas por ellas.

En el conjunto de las plataformas web que se están desarrollando para el análisis de imágenes radar, destaca la plataforma Geohazard Exploitation Platform (GEP) (<https://geohazards-tep.eo.esa.int/#!>). Esta plataforma permite realizar diversos análisis interferométricos con imágenes SAR satelitales en la nube. Esta plataforma permite dar un gran paso para la generalización del uso de esta tecnología por parte de una

comunidad más amplia de la que la ha desarrollado hasta ahora. Hasta el momento, esta tecnología era aplicada solamente por solo unos cuantos equipos de investigación o empresas especializadas en el mundo y las zonas estudiadas a fondo estaban circunscritas solamente a áreas de interés científico o de grandes empresas, sobre todo del sector energético. Con la irrupción de plataformas como GEP será más sencillo ampliar los usuarios de la tecnología a miembros de instituciones públicas, a empresas medianas o pequeñas de sectores de negocio en los que todavía no se conocen su potencial de uso. De esa manera, los gestores del territorio y gestores de desastres serían uno de los grupos de usuarios objetivo de la plataforma que podrían desarrollar sus propios análisis sin conocer a fondo la matemática y física detrás de la aplicación de esta técnica. En la plataforma GEP estos análisis se realizan a través de lo que se denominan “servicios”. La plataforma aloja varios “servicios” para identificar, monitorizar y evaluar procesos peligrosos asociados a la actividad sísmica y volcánica, la subsidencia y los deslizamientos, entre otros.

A día de hoy, GEP es una plataforma comercial que ofrece un programa de sponsorización para desarrollar proyectos de investigación. Muchos de los “Pioneros” mantienen su acceso a la plataforma de forma gratuita sponsorizados por la ESA. La política de acceso y sus precios dependiendo de su uso público o comercial se está definiendo en una nueva fase.

Para más información sobre la plataforma y sus servicios se puede consultar la siguiente dirección web: <http://terradaue.github.io/doc-tep-geohazards/overview/index.html#>

En este informe analizaremos aquellos “servicios” de GEP que son adecuados y tienen mejores prestaciones para estudiar riesgos costeros, y más concretamente, deslizamientos y subsidencias. Así, en los próximos apartados ofreceremos observaciones sobre resultados obtenidos a través de los “servicios” (1) “SBAS Stripmap”, (2) “SBAS-InSAR S-1 TOPS” y (3) “FASTVEL S-1”.

## 2.1 Breve descripción de los servicios evaluados

La plataforma GEP presenta un interfaz sencillo donde poder ejecutar programas informáticos para procesar imágenes radar satélite y obtener mapas de movimientos en la superficie terrestre. En el siguiente apartado se verá como GEP tiene su propia terminología como los conceptos “Servicio”, “Trabajo” o “Aplicación Temática” (Service, Job, Thematic App) que se irá describiendo a continuación. Como se ha citado anteriormente, los programas están implementados en los denominados “Servicios” a los que se puede acceder directamente desde la página principal de análisis (Figura 1). Los “Servicios” arriba citados que contienen el acrónimo “SBAS” tienen implementado programas para aplicar el algoritmo “P-SBAS” desarrollado por Casu et al. [2014] y De Luca et al. [2015]. El “Servicio” con el acrónimo “FASTVEL” contiene los programas que aplican el algoritmo desarrollado por la empresa TRE-Altamira para obtener mapas de velocidades medias a máxima resolución. Los citados algoritmos son técnicas ampliamente contrastadas para realizar lo que se denominan análisis DInSAR multi-temporales (MTA en su acrónimo inglés), es decir, análisis sobre un periodo de tiempo donde se comparan un gran número de imágenes radar para obtener la serie temporal de los movimientos en cada punto medido en la superficie terrestre. Los datos de entrada de estos algoritmos son los siguientes:

- Conjunto de imágenes radar satélite adquiridas con la misma geometría en la zona de interés durante el periodo analizado.
- Datos sobre la posición del satélite en el momento de adquisición de cada imagen.
- Modelo digital de elevaciones de la zona de interés.

La plataforma GEP suministra el acceso a todas las imágenes radar disponibles en los archivos de la ESA y las procesa directamente en sus servidores utilizando equipos informáticos de muy altas prestaciones. Gracias a eso, los usuarios no deben descargarse toda la información necesaria, ni adquirir y mantener equipos de gran capacidad computacional o software de análisis especializado de muy alto coste.

El análisis DInSAR se realiza desde la interfaz web de las denominadas “Aplicaciones Temáticas” (“Thematic Apps”) de GEP. Estas “Aplicaciones Temáticas” son páginas compartimentadas en diversas ventanas donde se seleccionan las imágenes, los servicios

y los parámetros para realizar el análisis. Los pasos a seguir son sencillos y se pueden resumir en los siguientes:

1. Selección del “Servicio” en la “Ventana de Servicios”. Una vez seleccionado el servicio, la citada ventana muestra un formulario para ser completado con los parámetros necesarios para realizar el análisis.
2. Selección del Area de Interés (AOI en su acrónimo inglés) en la “Ventana de Mapa”. Utilizando las herramientas de visualización de esa ventana podemos desplazarnos por el mapa y dibujar un rectángulo con la zona que deseamos analizar.
3. Una vez dibujado el rectángulo se seleccionan los tipos de imágenes que deseamos analizar. Esta selección se realiza arrastrando las imágenes seleccionadas desde la “Ventana de Selección” hasta la “Ventana de Servicios”. Los “Servicios” evaluados pueden analizar imágenes de los satélites ERS 1/2, ENVISAT y Sentinel-1A/B que abarcan diversos periodos de tiempo desde los años 90 del S. XX hasta la actualidad.
4. Por último, en la “Ventana de Servicios” se deben completar los parámetros de análisis y definir sobretudo el punto de referencia que sea estable y sirva de base para determinar las zonas inestables y realizar las medidas de desplazamiento a partir de él. Este punto de referencia también se puede definir utilizando la “Ventana de Mapa”.

Una vez definidas la zona de estudio, las imágenes a procesar y los parámetros de análisis se ejecuta el servicio generando un “Trabajo” o “Job” que suministrará tras 24-48 h un resultado en forma de mapa digital de desplazamientos.

El procesado en algunas ocasiones no es exitoso a causa de errores técnicos como el bajo solapamiento de las imágenes, una elección errónea del punto de referencia o deficiencias en la cadena de procesado. Estas últimas pueden ser corregidas por el equipo técnico de GEP que identifica el problema y reconfigura el servicio para corregir el error. En el caso de las dos primeras, una revisión de los datos de entrada puede corregir el error y obtener un procesado exitoso.

Si el procesado es exitoso, los “servicios” de GEP evaluados suministran mapas digitales de velocidades o de tasas de desplazamiento que pueden ser directamente visualizados en la plataforma. El nuevo “servicio SBAS-InSAR S-1 TOPS” puesto en operación permite además consultar la serie temporal de movimientos en cada punto. Todo ello sirve para

tener una visualización preliminar de los datos con el que hacerse una idea general de los resultados. Para realizar análisis más detallados es recomendable descargar desde la plataforma los datos de salida en diversos formatos que es necesario importar en programas SIG para ser visualizados y contrastados con otra información como pueden ser imágenes aéreas o satelitales ópticas, mapas temáticos u otros datos geoespaciales.

El análisis posterior de los datos se ha realizado de acuerdo con las pautas descritas en en el documento “E.4.1.2 Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el SAR satelital” elaborado para este mismo proyecto dentro del marco de la actividad 4.1.

Los resultados que se presentan en este informe se han desarrollado utilizando imágenes adquiridas por los satélites Envisat y Sentinel-1A/B. Los datos Envisat son imágenes archivadas de esa misión desde 2003 a 2008. Sus imágenes cubren áreas aproximadas de 100x100 km y presentan una resolución espacial de 30x30 m y temporal de 35 días, es decir, que en los mejor de los casos se adquiere una imagen del mismo lugar cada mes aproximadamente. Estas imágenes se analizan desde el servicio “SBAS Stripmap”. Los datos Sentinel-1 cubren áreas de 250x250 km, adquieren una imagen cada 6 días, tienen una resolución nominal de 4x14 m y son completamente gratuitos. Estas imágenes son procesadas por los servicios “SBAS-InSAR S-1 TOPS”. Con respecto a los resultados que ofrece GEP, los servicios “SBAS Stripmap” y “SBAS-InSAR S-1 TOPS” suministran mapas de tasas de desplazamiento con una resolución espacial aproximada de un punto cada 40-80 m junto con la serie temporal de los desplazamientos en cada punto. En el caso del servicio “FASTVEL S-1”, sus datos de salida se presentan a mejor resolución espacial (40x40 m) pero no incorporan los datos relativos a la serie temporal. Este servicio ha mostrado mayor inestabilidad y tras varios procesados fallidos solo se ha obtenido un resultado exitoso en la zona piloto de Islas Baleares que se describe en el apartado siguiente.

### **3 RESULTADOS**

A continuación, se describen los resultados obtenidos tras el procesado de imágenes radar en varias zonas piloto definidas en el proyecto RISKCOAST con el fin de evaluar la

operatividad de GEP como herramienta para la prevención y gestión de desastres costeros. Todos los resultados de movimientos del terreno obtenidos de los procesados InSAR que se muestran a continuación están referidos a la dirección suelo – satélite o dirección "line-of-sight" (LOS).

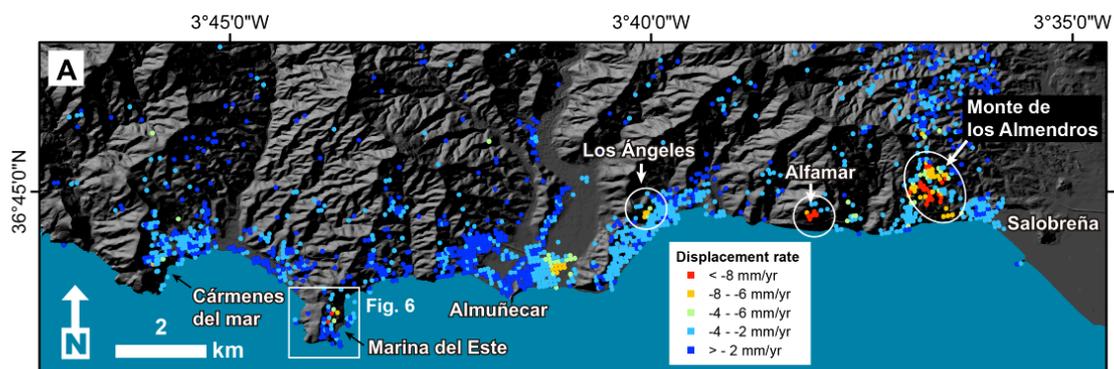
### 3.1 Zona piloto de Granada

La zona piloto de Granada cubre la comarca de la Costa Tropical y la cuenca del río Guadalfeo.

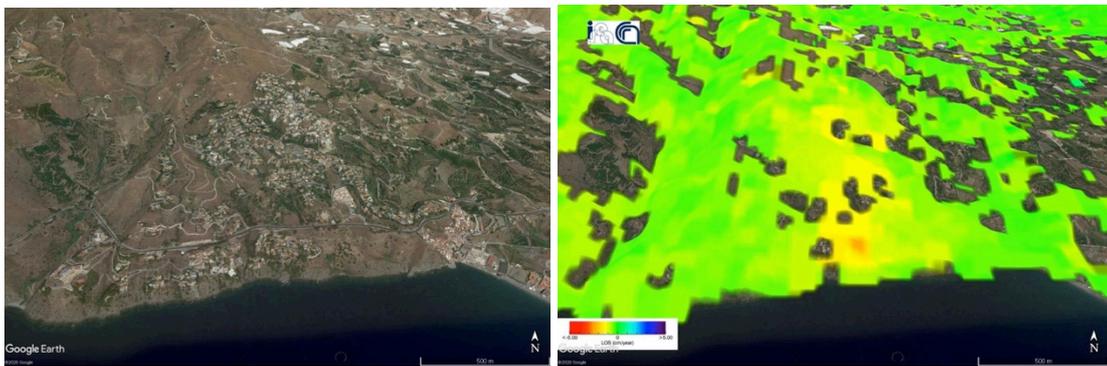
#### 3.1.1 Costa Tropical

La Costa Tropical es un contexto costero en el que se desarrollan diversas actividades económicas que se sustentan en el turismo y la agricultura a través del cultivo de especies exóticas de origen tropical. El turismo ha provocado la intensa urbanización de amplias zonas de la costa lo que favorece la obtención de medidas a través de la técnica DInSAR. Como queda reflejado en los informes presentados en RISKCOAST, esta zona está intensamente afectada por fenómenos de inestabilidad del terreno que han generado problemas socio-económicos importantes.

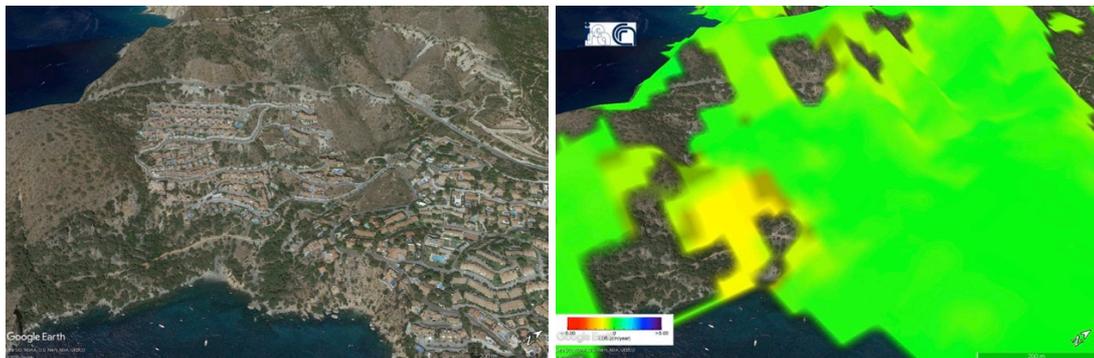
Los datos suministrados por GEP en tan solo 24 h tras el análisis de datos Envisat y Sentinel-1 han ofrecido una imagen muy ajustada a la realidad ya conocida de la región. A partir de esos datos se pueden identificar las zonas urbanizadas que presentan daños (Alfamar, Monte de los Almendros, Taramay, Marina del Este y Cármenes del Mar) a causa del terreno inestable donde se asientan sus edificios (Figuras 1 a 5). De forma adicional, GEP ha suministrado datos sobre inestabilidades afectando a infraestructuras de transporte como varios tramos de la autovía A-7 y de la N-340 (antigua carretera principal de la costa) (Figuras 6 a 7).



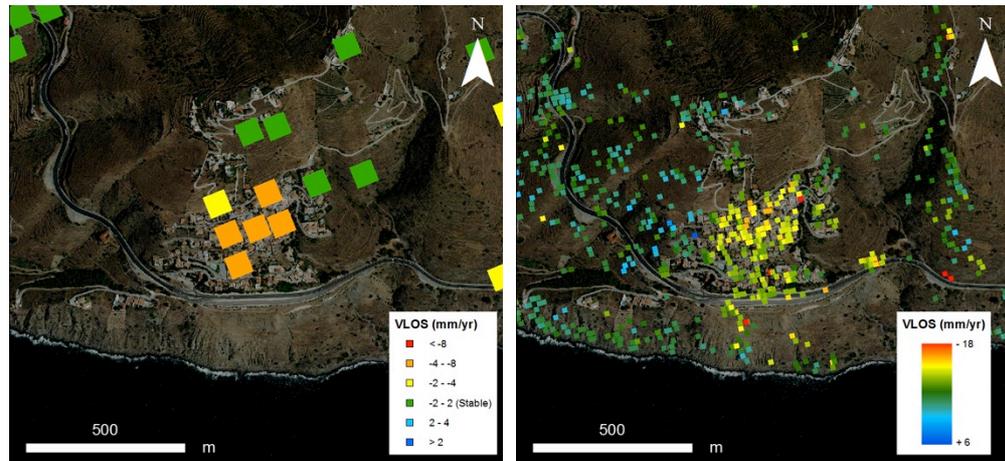
**Figura 1. Datos DInSAR obtenidos a partir de imágenes ENVISAT del tramo de costa occidental de la Costa Tropical donde se resaltan los lugares en movimiento [Galve et al. 2017]. Esos resultados se obtuvieron con el servicio “SBAS Stripmap” de GEP.**



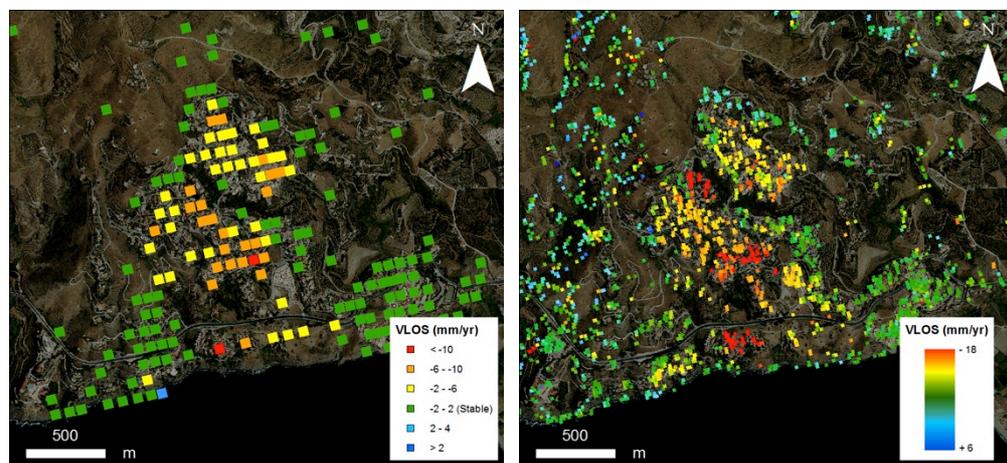
**Figura 2. Vista en Google Earth de datos DInSAR de GEP (archivo KMZ de salida) en la zona de la urbanización Monte de los Almendros (Salobreña, Granada). Los datos son resultado de procesar con el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” imágenes Sentinel-1 tomadas en órbita ascendente. Los tonos amarillos y naranjas señalan velocidades del terreno en dirección LOS (alejándose del satélite) mayores de 1 cm/año.**



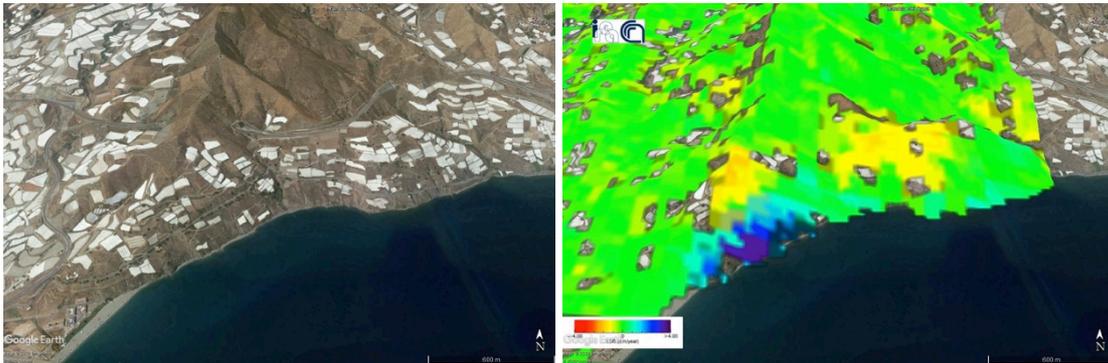
**Figura 3. Vista en Google Earth de datos DInSAR de GEP (archivo KMZ de salida) de la zona de Cerro Gordo (Almuñecar, Granada). Los datos son resultado de procesar con el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” imágenes Sentinel-1 tomadas en órbita ascendente. Los tonos amarillos señalan velocidades del terreno en dirección LOS mayores de 1 cm/año**



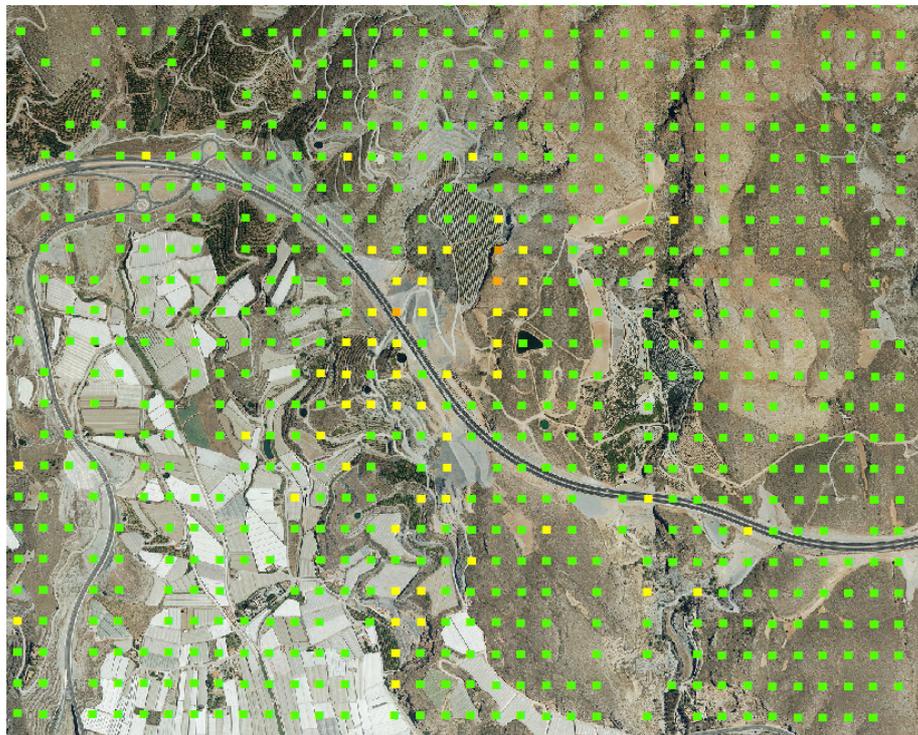
**Figura 4. Comparación de datos obtenidos por GEP (izquierda) con imágenes ENVISAT y un procesado a máxima resolución elaborado por el CTTC con imágenes Sentinel-1 (derecha) en la urbanización “Alfamar”.**



**Figura 5. Comparación de datos obtenidos por GEP (izquierda) con imágenes ENVISAT y un procesado a máxima resolución elaborado por el CTTC con imágenes Sentinel-1 (derecha) de la urbanización “Monte Almendros”.**



**Figura 6. Vista en Google Earth de datos DInSAR de GEP (archivo KMZ de salida) de la zona de Castell de Ferro (Gualchos, Granada) por donde atraviesa la carretera N-340. Los datos son resultado de procesar con el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” imágenes Sentinel-1 tomadas en órbita descendente. Los tonos azules señalan velocidades del terreno en dirección LOS (acercándose al satélite) mayores de 2 cm/año.**



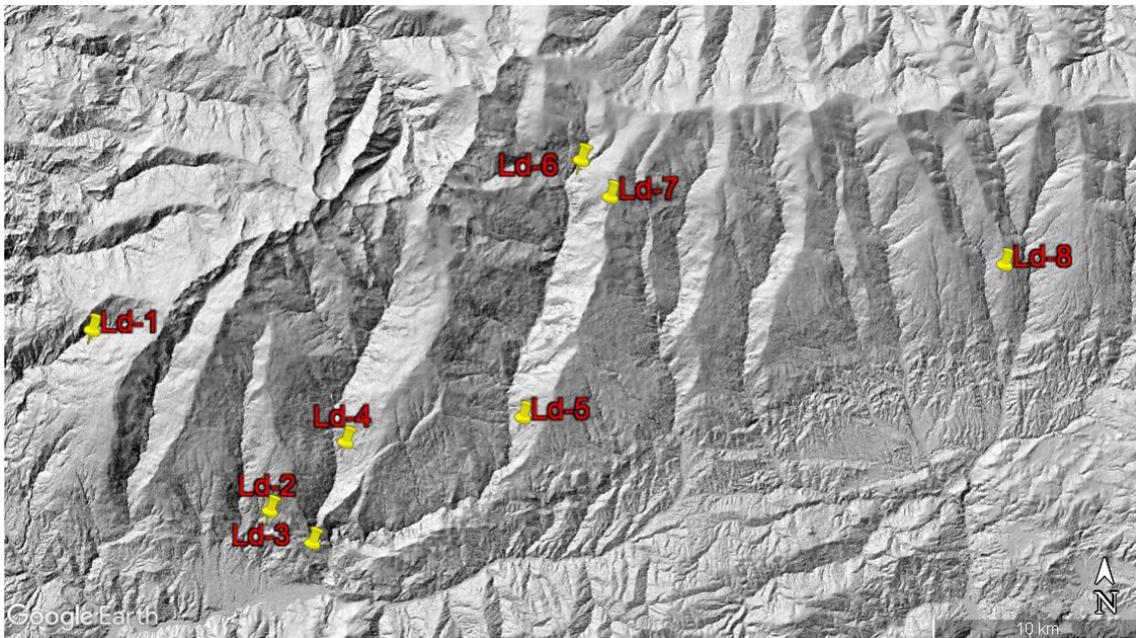
**Figura 7. Vista en Google Earth de datos DInSAR de GEP (archivo CSV de salida) de un tramo de la autovía A-7 afectado por un gran movimiento de ladera. Los datos son resultado de procesar con el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” imágenes Sentinel-1 tomadas en órbita descendente. Los tonos amarillos y naranjas señalan velocidades del terreno en dirección LOS (alejándose del satélite) mayores de 1 cm/año.**

La región ha sido estudiada con profundidad durante las últimas tres décadas y muchos de esos lugares habían sido ya identificados y estudiados por grupos de investigación, miembros de la Administración y empresas del sector de la ingeniería y la construcción. No obstante, aún en un contexto así, GEP ha sacado a la luz varias zonas inestables que no se habían identificado o registrado hasta el momento como son el tramo de la N-340 justo al este de la localidad de Castell de Ferro, donde se ha reconocido un gran movimiento de ladera.

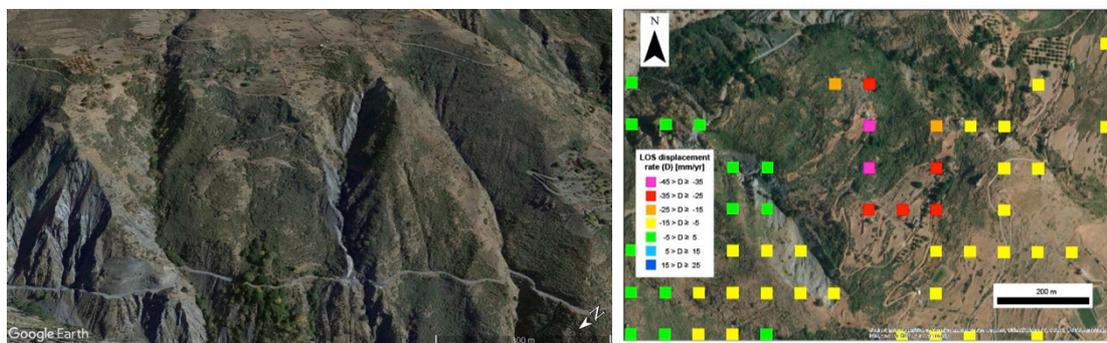
### **3.1.2 Cuenca del río Guadalfeo**

La cuenca del río Guadalfeo es la principal cuenca hidrográfica que alimenta a la Costa Tropical. Históricamente ha sido una zona conocida por la inestabilidad de sus laderas constituidas por materiales fácilmente movilizables por la gravedad como son las filitas. Allí se han desarrollado abundantes estudios sobre deslizamientos, pero los análisis InSAR son escasos y muy puntuales, solamente focalizados en movimientos concretos [ver p.ej. Fernandez et al., 2009].

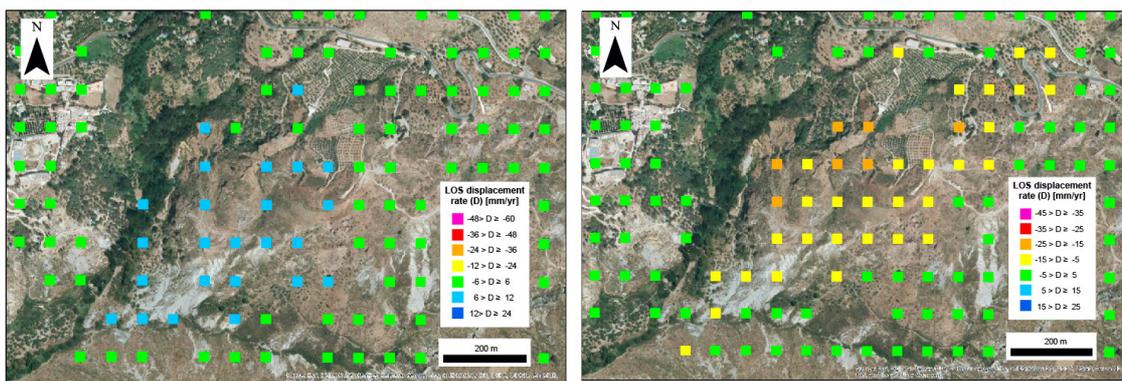
Los datos suministrados por GEP tras varios procesados realizados con esta herramienta muestran la actividad de muchos deslizamientos ya catalogados en inventarios previos, pero añade algunos movimientos hasta ahora desconocidos (Figuras 8 a 16). De nuevo GEP aporta información valiosa sobre movimientos de ladera activos de los que no se conocía su movimiento actual.



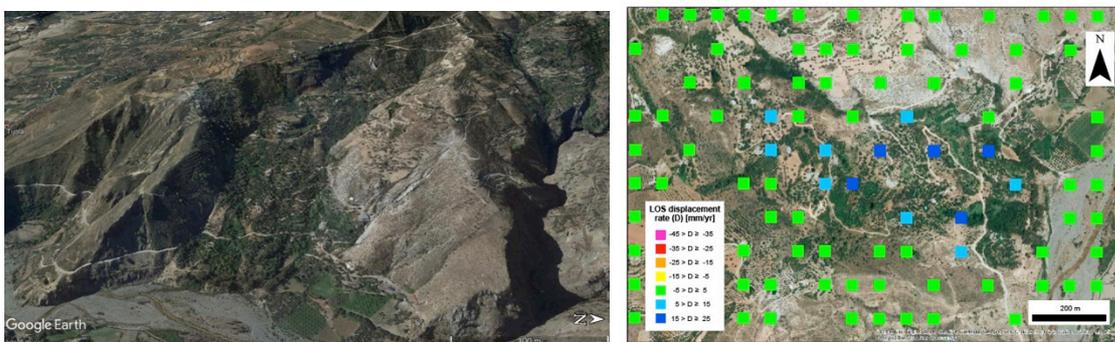
**Figura 8. Modelo de sombreado del flanco SO de Sierra Nevada que forma la cabecera de la cuenca del Guadalfeo con los lugares donde se han detectado inestabilidades a través de los datos suministrados por GEP.**



**Figura 9. Ladera (Ld-1 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).**



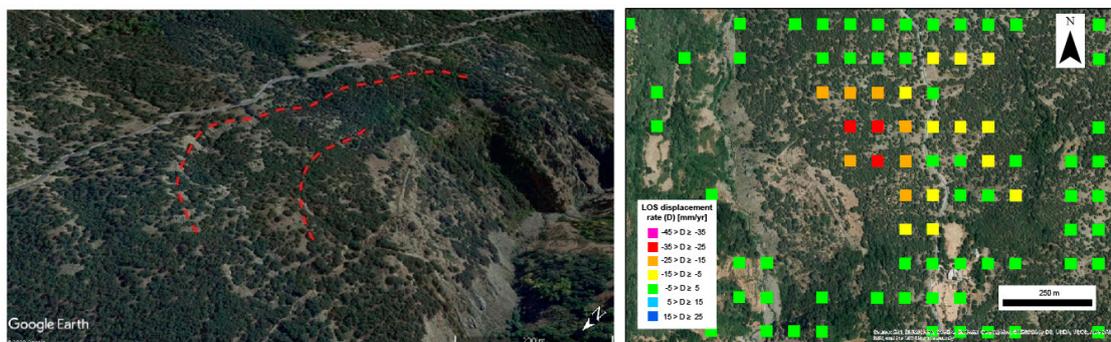
**Figura 10.** Ladera (Ld-2 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (arriba) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” de imágenes en órbita ascendente (abajo-derecha) y descendente (abajo-izquierda).



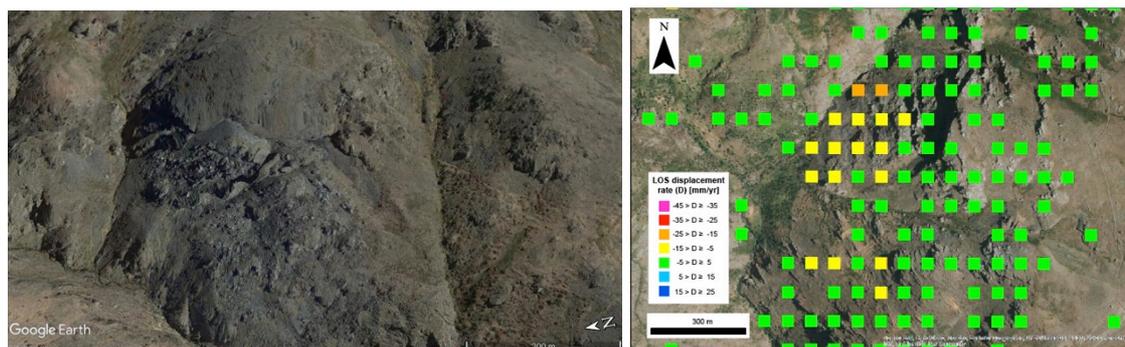
**Figura 11.** Deslizamiento tipo flujo (Ld-3 en Figura 8) ya conocido (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).



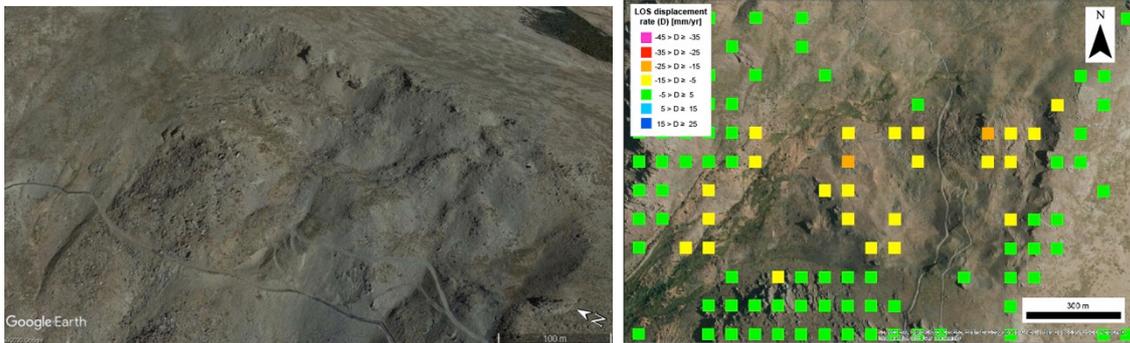
**Figura 12. Ladera (Ld-4 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).**



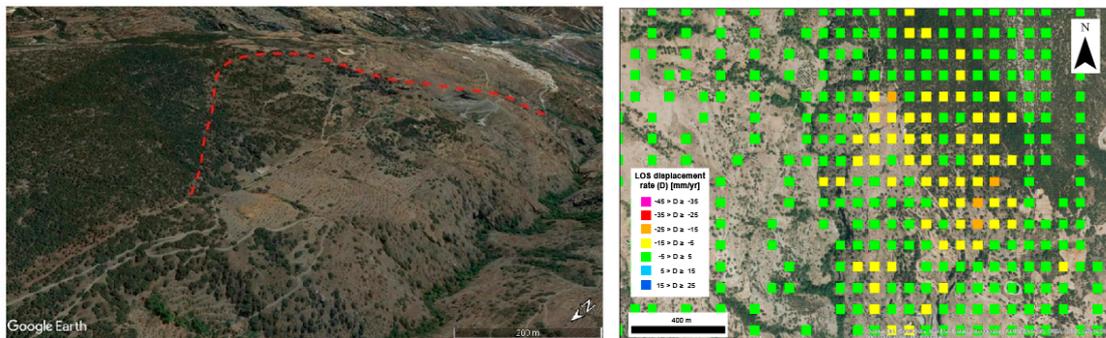
**Figura 13. Ladera (Ld-5 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).**



**Figura 14. Ladera (Ld-6 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).**

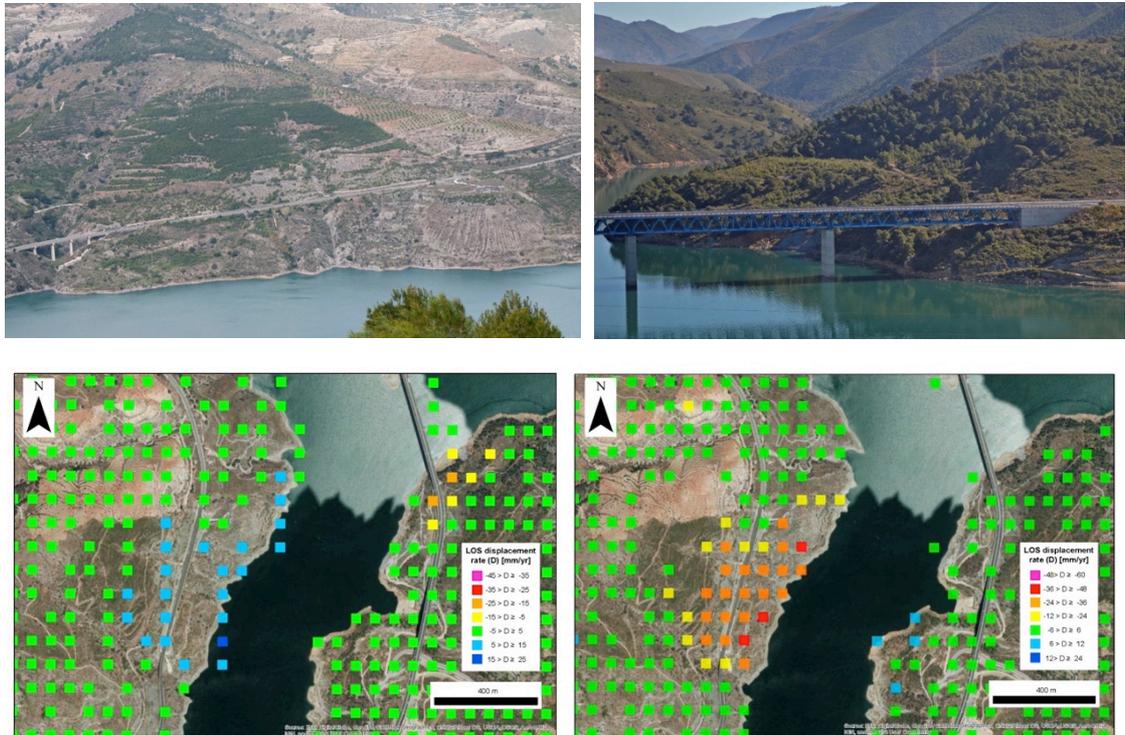


**Figura 15.** Ladera (Ld-7 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).



**Figura 16.** Ladera (Ld-8 en Figura 8) con rasgos ligados a su inestabilidad (izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” (derecha).

Un caso destacado dentro de esta zona es el Embalse de Rules donde los resultados de GEP han ayudado en el estudio de los deslizamientos que afectan a esta infraestructura. Sobre ellos ya se había realizado un análisis general [Reyes-Carmona et al., 2020] pero cada uno de los movimientos detectados está siendo objeto de un análisis de detalle de los que este informe también se nutre (ver Figura 17). Allí, GEP ha permitido realizar análisis rápidos con imágenes radar actualizadas, lo que aumenta el periodo temporal que cubren las series temporales de desplazamiento. Además, ha suministrado información de los deslizamientos en las dos geometrías (Ascendente y Descendente) en un tiempo record para poder disgregar las dos componentes de los movimientos (horizontal y vertical). Por tanto, GEP se ha convertido en una herramienta muy útil en ese caso de estudio que está guiando la aplicación de otras técnicas, como la fotogrametría y el GB-SAR dentro del marco del proyecto RISKCOAST, y la posibilidad de instalar medidas de auscultación de las laderas por parte de la Administración.



**Figura 17.** Vista desde el este de la ladera donde se desarrolla el deslizamiento de “El Arrecife” (arriba-derecha), vista desde el oeste del viaducto de Rules por delante del deslizamiento con el mismo nombre (arriba-izquierda) y datos DInSAR obtenidos para esa zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” con imágenes de orbita descendente (abajo-izquierda) y ascendente (abajo-derecha).

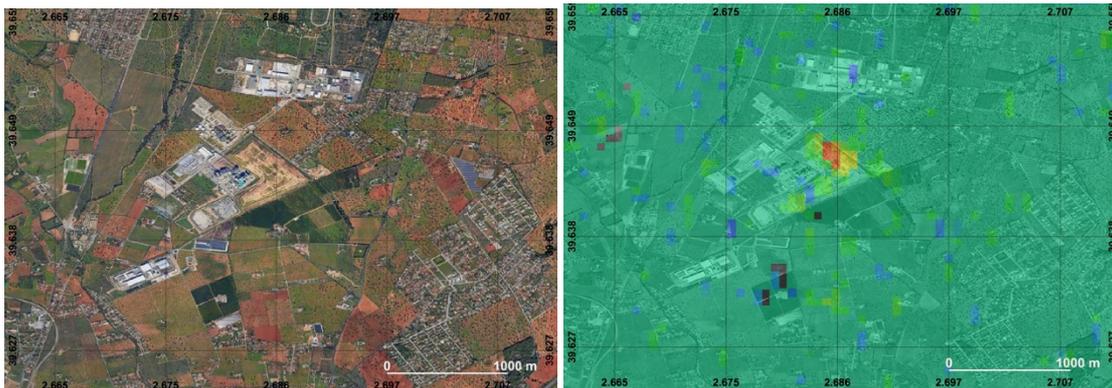
### 3.2 Zona piloto Islas Baleares

La zona piloto de las Islas Baleares cubre toda la zona costera del archipiélago. Allí nuestro análisis se ha centrado en las dos islas donde se han registrado anteriormente inestabilidades de ladera, Mallorca e Ibiza.

#### 3.2.1 Mallorca

La isla de Mallorca ha sido procesada completa, sin que haya sido posible detectar signos de desestabilización en el periodo analizado (2018-2020), lo que puede deberse a limitaciones de la técnica InSAR y del servicio de procesado empleado (para mas detalles, ver el entregable E4.1.2: Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el SAR satelital). Los únicos lugares donde el procesado SBAS ha permitido detectar movimiento son aquellos relacionados con compactación de rellenos antrópicos (Figura 18). En las laderas de la Sierra de la Tramontana, el relieve más característico de la isla,

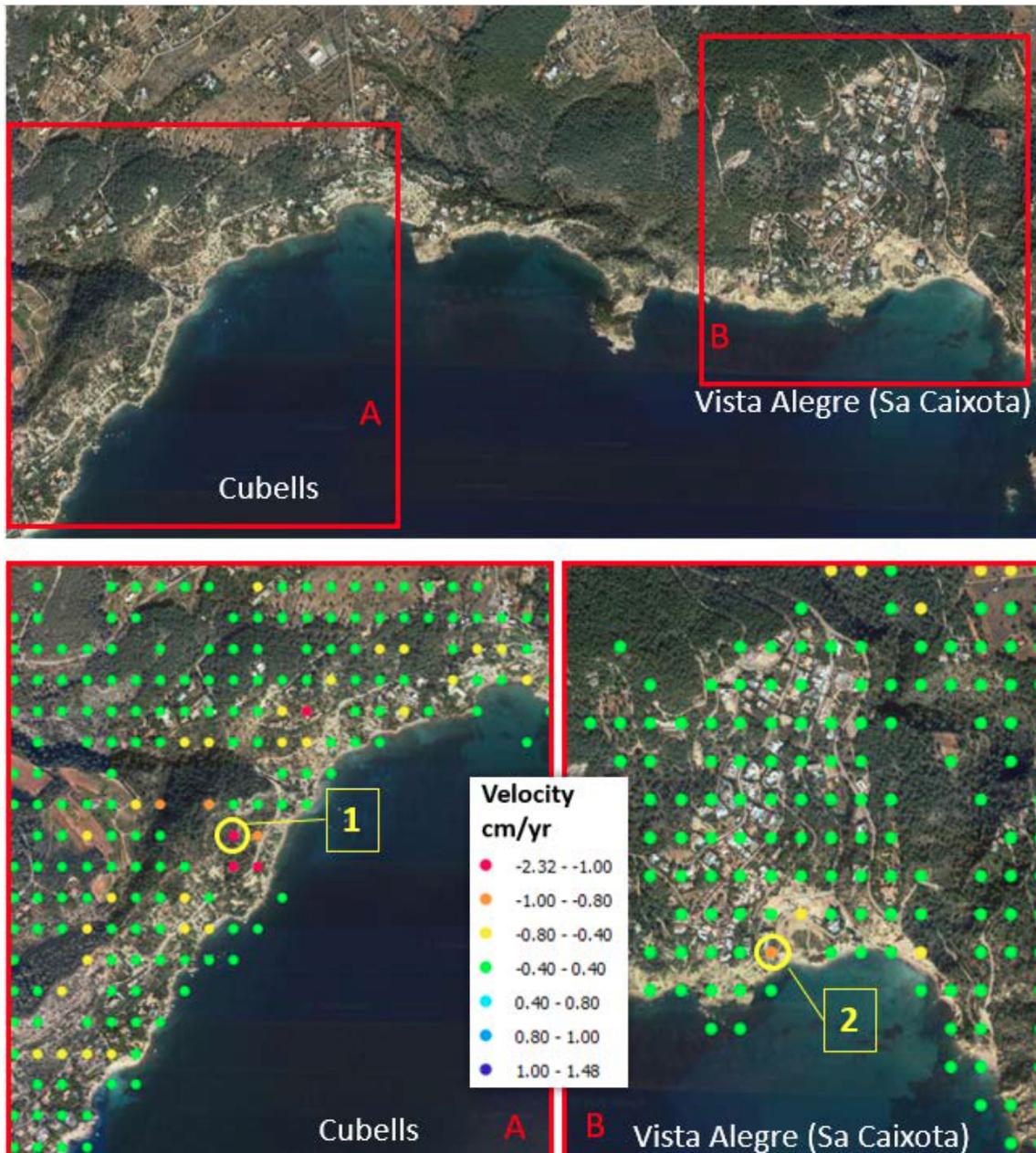
no se han detectado movimientos de ladera, si bien hay que tener en cuenta que para poder ser detectados con GEP, estos deslizamientos deben ser lentos, progresivos, de gran tamaño y estar bien orientados respecto al vector LOS. A lo largo de la costa tampoco se han identificado lugares afectados por la inestabilidad del terreno.



**Figura 18.** Imagen aérea de gran escombrera en la isla de Mallorca (izquierda) y datos DInSAR obtenidos mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” a partir de imágenes Sentinel-1 de órbita descendente de esa zona (derecha). Los píxeles amarillos y naranjas indican velocidades del terreno en dirección LOS (alejándose del satélite) de más de 3 cm/año.

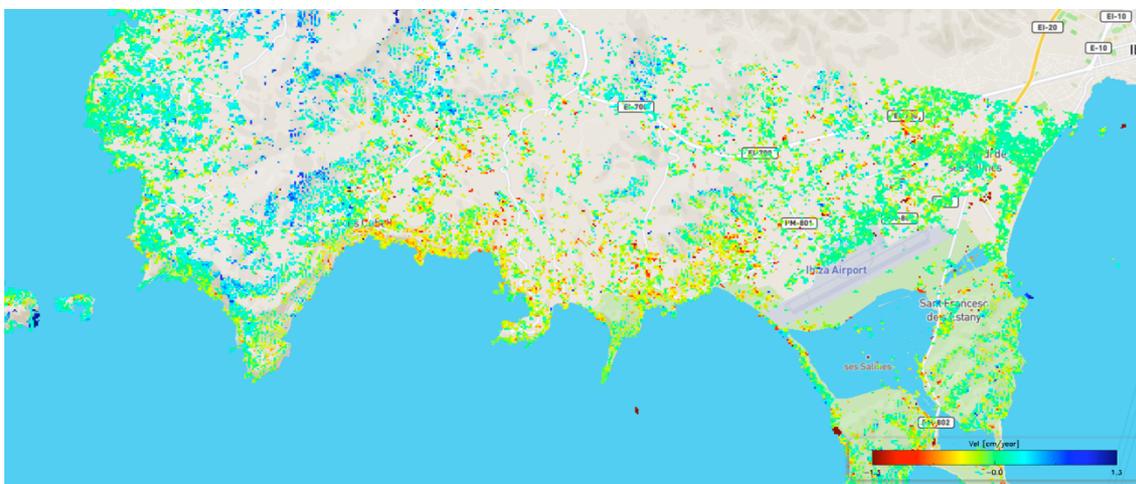
### 3.2.2 Ibiza

En la isla de Ibiza gracias a GEP se han identificado dos zonas inestables en su costa sur, justo en zonas ocupadas por lo que parecen viviendas de lujo. Una zona se encuentra en Es Cubells y la otra en Sa Caixota (Figura 19). En esta segunda zona está situada la urbanización Vista Alegre donde varios edificios sufrieron daños y debieron ser derribados a causa de un movimiento de ladera.



**Figura 19.** Zona costera afectada por movimientos de ladera en Ibiza (arriba) donde se señalan los movimientos activos más destacados detectados en Es Cubells (abajo-izquierda) y Sa Caixota (abajo-derecha). Los datos DInSAR fueron obtenidos para esta zona mediante el servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” procesando imágenes Sentinel-1 de orbitas ascendentes. Las velocidades se refieren a movimiento del terreno en dirección LOS, con movimientos negativos

La costa sur de Ibiza es el único lugar donde el servicio “FASTVEL S-1” nos ha suministrado resultados. No obstante, el mapa de desplazamientos obtenido presenta un “ruido” importante y se hace difícil su interpretación (Figura 20).



**Figura 20. Datos InSAR obtenidos a través del servicio “FASTVEL S-1” en la costa sur de la isla de Ibiza. Se aprecia una gran gama de colores en los puntos medidos lo que indica una gran cantidad de “ruido” en los datos, debido posiblemente a errores atmosféricos o a la selección de un punto de referencia inestable.**

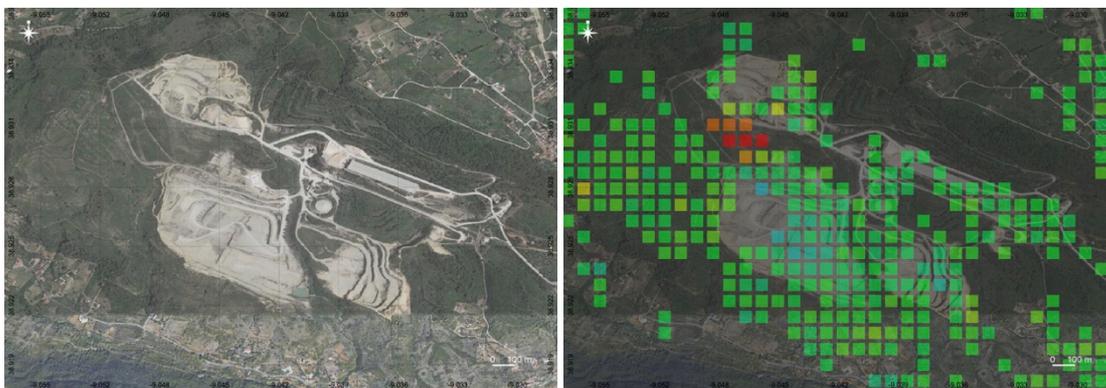
Los datos de GEP en estos dos casos suministran información valiosa sobre el estado del terreno en esa zona señalando que en Es Cubells varios edificios podrían estar en riesgo y que la zona limítrofe donde se situaba la urbanización Vista Alegre sigue siendo terreno inestable. Así, GEP de nuevo aporta información inédita que puede ser de gran interés para los gestores de la costa y los propietarios de viviendas en ella.

### **3.3 Zona piloto de Lisboa**

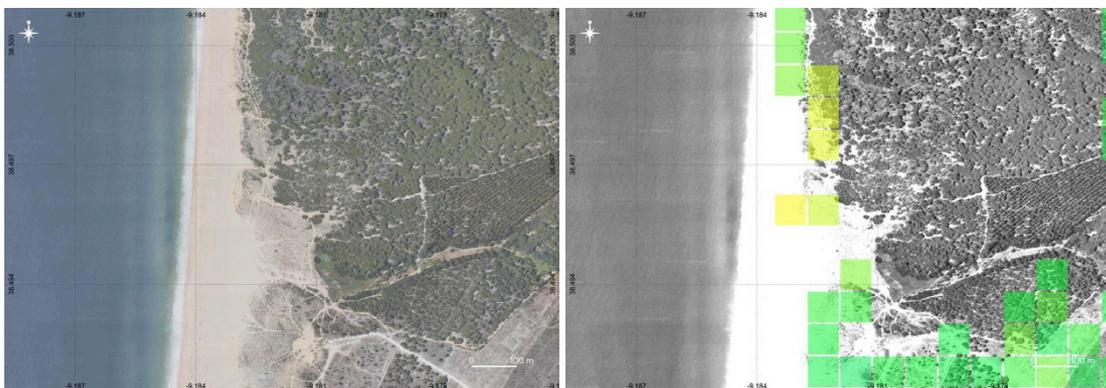
En la zona piloto de Lisboa se ha explorado toda la línea de costa del área metropolitana de Lisboa incluido el estuario del río Tajo, así como las cuencas hidrográficas que desembocan en esa línea de costa.

El área cubierta por el mapa de desplazamiento obtenido con GEP ofrece mucha información sobre procesos de movimiento imperceptible que se dan en el entorno de la ciudad de Lisboa. El proceso más recurrente detectado en esos mapas es la compactación de material extraído en las numerosas canteras que se distribuyen por la región (Figura 21). También es habitual la compactación o acomodación de depósitos

dunares de arena cercanos a la costa (Figura 22) y de depósitos de la llanura mareal (Figura 23).



**Figura 21.** Cantera situada en el este de la zona metropolitana de Lisboa (derecha) donde se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año alejándose del satélite (píxeles con tonos amarillos, naranjas y rojos en la imagen de la derecha) ligados a la consolidación de materiales de relleno (escombreras). Los datos fueron obtenidos a través del servicio “SBAS-InSAR S-1 TOPS” procesando imágenes Sentinel-1 de órbita ascendente. Esto se aplica al resto de figuras que se presentan en este apartado a partir de este punto.

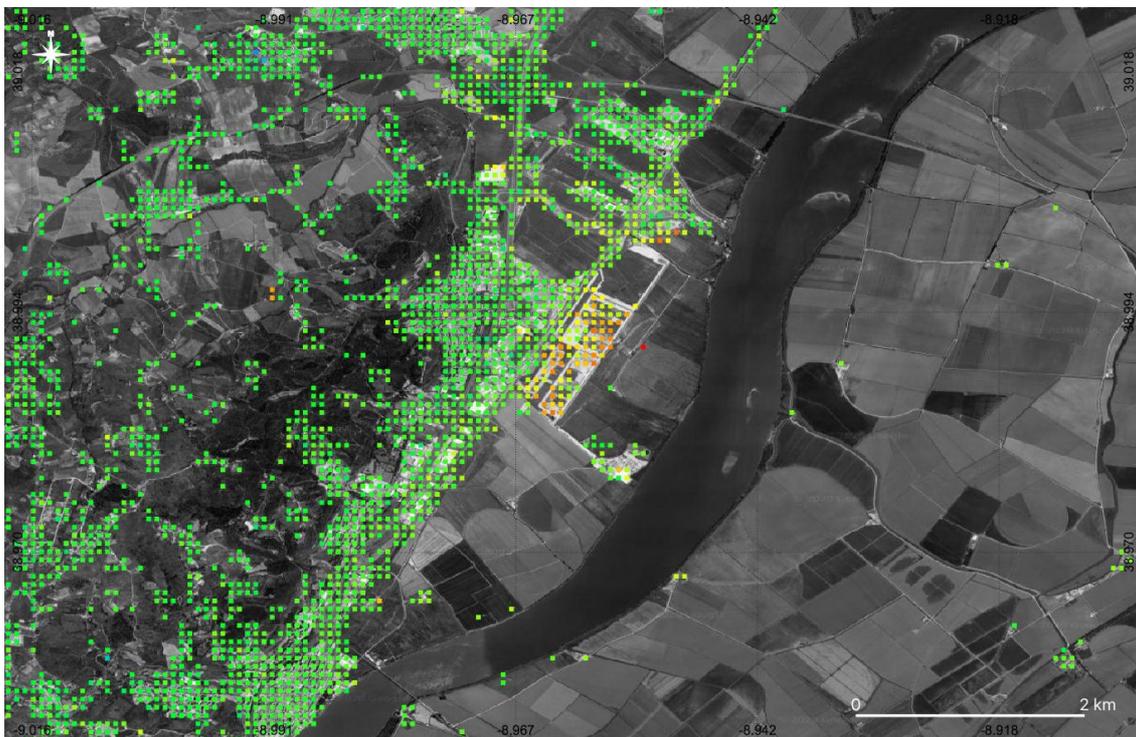


**Figura 22.** Playa situada al sur de Lisboa (derecha) donde se aprecian movimientos con velocidades muy lentas (píxeles amarillos: 1-1,5 cm/año) posiblemente ligados al movimiento de la arena de un cordón de dunas litorales (derecha).



**Figura 23. Zona costera del margen este del estuario del Tajo (izquierda) donde se observa una llanura mareal ocupada por terrenos de cultivo (izquierda Se observa una deformación del terreno en la dirección LOS alejándose del satélite muy probablemente asociada a una subsidencia de ese terreno (píxeles naranjas: 2-2,5 cm/año) ligada a la consolidación del sedimento.**

Desde el punto de vista de procesos que pudieran generar situaciones de riesgo o daños en edificaciones o infraestructuras se han detectado movimientos ligados a subsidencia en materiales aluviales del río Tajo (Figura 24) e inestabilidades de ladera en el relieve de colinas que rodea la ciudad y que han sido objeto de gran número de estudios [e.g. Zêzere et al., 2017]. Entre ellos, solamente uno de ellos había evidenciado el movimiento de manera clara y se había ya identificado un deslizamiento y su actividad (Figura 25) pero del resto no se conocía la inestabilidad de la zona (Figura 26 a 30). Así, los resultados de GEP han permitido localizar nuevas zonas en el área metropolitana de Lisboa ligadas a movimientos de ladera activos.



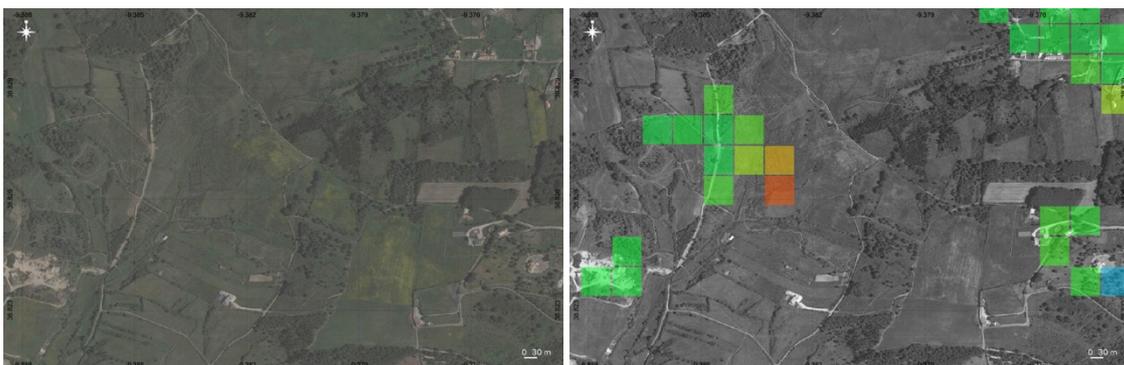
**Figura 24. Zona de Castanheira do Ribarejo (Lisboa) junto al río Tajo poco antes de su desembocadura en el estuario (arriba). Las velocidades del terreno en dirección LOS observadas están en un rango entre los 1 y 3 cm/año en sentido de alejamiento del satélite. Se interpreta como una zona subsidente de origen desconocido que coincide con una zona urbanizada (abajo).**



**Figura 25. Zona del Monte Mourão (358 m) (derecha). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 1,5-2 cm/año ligados a deslizamientos conocidos en esa zona (izquierda).**



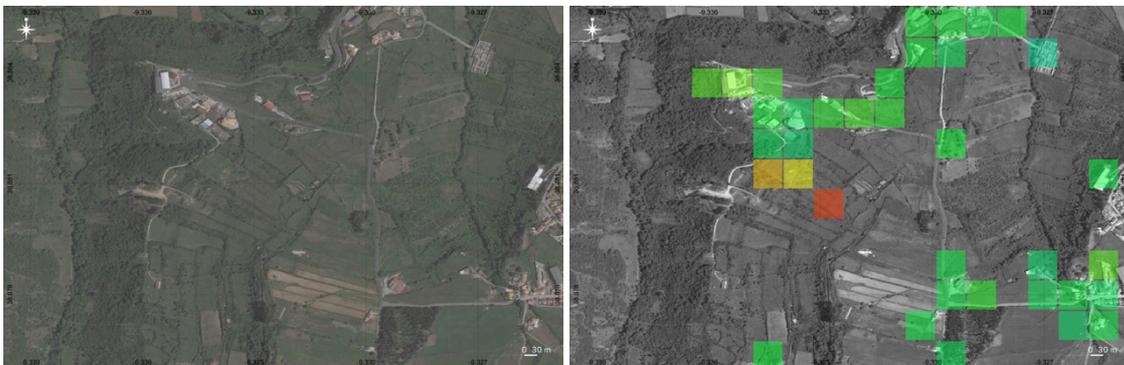
**Figura 26. Zona de Aveiras de Cima (izquierda). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año de origen desconocido (derecha).**



**Figura 27. Zona de Varzea de Sintra (izquierda). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año posiblemente ligados a un movimiento de ladera (derecha).**



**Figura 28. Zona de Cotovios (izquierda). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año posiblemente ligados a un movimiento de ladera (derecha).**



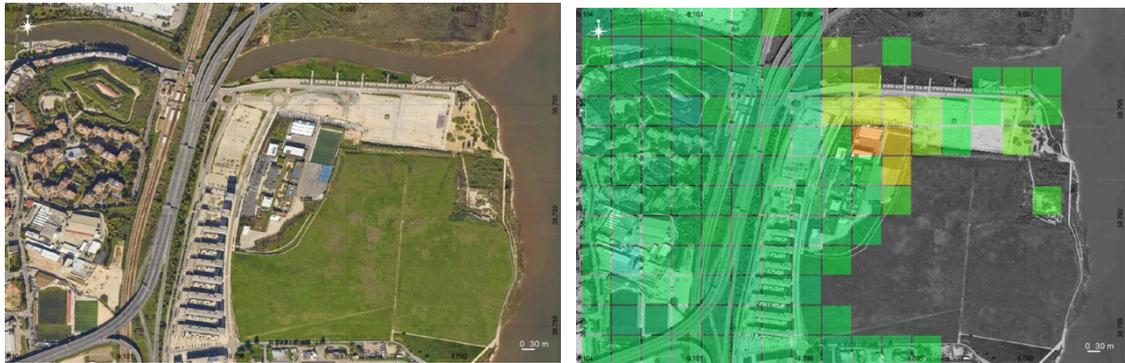
**Figura 29. Zona de Cheleiros (izquierda). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año posiblemente ligados a un movimiento de ladera (derecha).**



**Figura 30. Zona de Catribana (izquierda). Se observan velocidades de movimiento del terreno en dirección LOS de más de 2 cm/año posiblemente ligados a un movimiento de ladera (derecha).**

En el área urbana son destacables dos casos, la inestabilidad observada en la zona del Colegio “Pedro Arrupe” situado en el norte de Lisboa (Figura 31) y el movimiento del terreno alejándose del satélite (interpretado como un hundimiento) observado en la zona

donde se situaría el “Parque das Artes e do desporto”, la zona alta de un talud orientado hacia la autovía IC-16 de entrada a la ciudad (Figura 32).



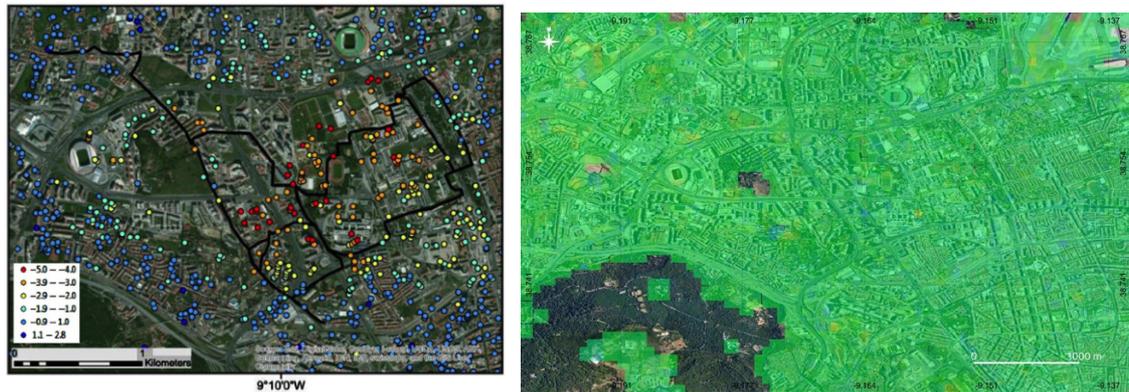
**Figura 31. Zona del Colegio “Pedro Arrupe” (Lisboa) (izquierda). Se han detectado ligeros movimientos del terreno alejándose del satélite, posiblemente asociados con una subsidencia de origen desconocido (derecha).**



**Figura 32. Zona del “Parque das Artes e do desporto” (Lisboa) (izquierda). El área parece ser un gran relleno antrópico donde se ha perfilado un talud. En la zona alta se observan movimientos del terreno alejándose del satélite de más de 2 cm/año en la dirección LOS posiblemente relacionados con la consolidación del relleno (derecha).**

Algo destacable de los nuevos análisis con imágenes Sentinel-1 realizados en GEP ha sido comprobar que la zona subsidente detectada en análisis previos con imágenes ERS 1/2 y ENVISAT en el Campus de la Universidad de Lisboa [cf. Catalao et al., 2011, 2015] ya no es activa (Figura 33). Este hundimiento fue interpretado por Catalao et al. [2015] como una subsidencia asociada a la extracción de agua subterránea para la construcción de una línea de metro justo en una zona donde existían capas de arenas de grano fino que se consolidaron por esa causa, añadido a la urbanización de la zona y el sellado del

suelo por esta causa. Estos fenómenos pueden volver a producirse en el futuro en la ciudad o su zona metropolitana, lo que hace muy útil la plataforma GEP para tener una idea de primer orden de la evaluación del proceso.



**Figura 33. Zona del Campus de la Universidad de Lisboa con datos InSAR obtenidos a partir de imágenes ERS [Catalao et al., 2015] (izquierda). Datos obtenidos de GEP tras el procesado de imágenes Sentinel-1 (derecha). El color verde de los píxeles indica estabilidad de toda la zona.**

Otro resultado interesante es que los movimientos registrados por Oliveira et al. [2015] obtenidos tras el procesado de imágenes TerraSAR X no han sido detectados por el análisis realizado con GEP. Es probable que la resolución espacial del análisis haya evitado obtener resultados como los descritos en el citado trabajo. Esa limitación para detectar terrenos inestables que afectan zonas menores a varias hectáreas impide que los servicios SBAS de GEP tengan una sensibilidad suficiente para detectar la mayoría de los movimientos de ladera presentes en la zona.

Como se ha mostrado, los resultados de GEP, aún con sus limitaciones ligadas a la resolución de los datos de salida, llegan a completar los abundantes estudios sobre movimientos de ladera y subsidencias ya realizados en la región lisboeta y aportan tasas de desplazamiento de algunos movimientos. Eso es un logro en una zona donde existe un profundo conocimiento sobre terrenos inestables. Así, en la zona de Lisboa se puede demostrar la capacidad de GEP para analizar rápidamente regiones litorales completas y tener una idea preliminar de posibles zonas inestables. En este caso, en un día obtuvimos un mapa de desplazamientos que cubre una superficie de terreno de 3.000 km<sup>2</sup> aproximadamente donde viven más de 2,8 millones de personas.

## 4 OPERATIVIDAD DE GEP EN ZONAS DE ESTUDIO

La plataforma GEP en todos los casos ha sido útil para realizar análisis preliminares de manera muy rápida (24-48 h) que permiten optimizar esfuerzos en la elaboración de procesados DInSAR más detallados. A partir de los resultados suministrados por la plataforma se han podido localizar lugares donde no se conocía o no se habían registrado problemas de inestabilidad como por ejemplo el tramo de la N-340 en la costa de Granada, la franja de costa de Es Cobells en Ibiza o los varios puntos identificados en el área metropolitana de Lisboa. Es probable que la población local de esos lugares conociera de la inestabilidad del terreno por algunas señales en estructuras como muros, vías y edificios con paredes agrietadas. Sin embargo, esos daños tan ligeros no han llegado a trascender y ser reconocidos por los gestores del territorio, obviándolos en la toma de decisiones. Esos lugares pueden representar zonas de alta peligrosidad durante eventos extremos de precipitación donde los ligeros movimientos detectados pueden acelerarse y generar daños más severos como ya ocurrió en las urbanizaciones de la costa de Granada e Ibiza.

Como en todos los análisis DInSAR, una de sus ventajas es que permite analizar una gran superficie de terreno. Con GEP además se puede hacer en un cortísimo espacio de tiempo como bien ejemplifica el análisis de la zona metropolitana de Lisboa. Por tanto, se puede tener una idea preliminar de la estabilidad general de centenares de kilómetros de costa con un esfuerzo mínimo en comparación con el uso de otros métodos de monitoreo aplicados in-situ.

Desde el punto de vista técnico, GEP es una herramienta compleja que, aunque de fácil manejo para el usuario, no permite tener control sobre casi ningún parámetro del procesado, por lo que es necesario contactar con el equipo técnico cuando surgen problemas con el procesado de imágenes. Además, dependiendo de la disponibilidad de imágenes, su calidad y la zona analizada puede ofrecer resultados difíciles de interpretar por el “ruido” que pueden mostrar los datos. En algunos de los casos aquí presentados se debieron hacer diversos procesados con parámetros e imágenes diferentes para obtener un resultado para poder analizarlo con garantías como en la zona de la cuenca

hidrográfica del río Guadalfeo (zona piloto de Granada), donde las zonas de alta montaña y su baja coherencia (a causa de la vegetación y la nieve invernal) impedían tener datos limpios de ruido. Todas estas deficiencias se contraponen a la posibilidad de obtener resultados en 24-48 h lo que permite realizar varios test en un corto espacio de tiempo hasta obtener un mapa de desplazamientos fiable.

Otra limitación de las herramientas de GEP evaluadas es la escala de los datos de salida. Así, los mapas de desplazamientos obtenidos por los servicios “SBAS Stripmap” y “SBAS-InSAR S-1 TOPS” ofrecen un dato cada 40-80 m con el que solo se pueden detectar terrenos inestables que cubran varias hectáreas como mínimo. Eso impide utilizar estos servicios para localizar inestabilidades muy locales que sean precursores de deslizamientos o desprendimientos en la costa. El servicio “FASTVEL S-1” ofrece datos con mejor resolución espacial (40x40 m) pero no suministra información sobre series temporales. Además, se ha constatado que este servicio es más inestable que los servicios SBAS y son necesarios varios test previos para obtener un procesado exitoso. En el desarrollo de este informe se ha constatado su inestabilidad al solo obtener un procesado exitoso en Ibiza con datos muy “ruidosos”. No obstante, la plataforma GEP está en continuo desarrollo y las aplicaciones se van mejorando con el uso de los participantes en el proyecto.

La plataforma GEP ofrece unas posibilidades que se acrecentarán conforme estén disponibles más imágenes de los satélites Sentinel-1. Allí donde todavía no se han desarrollado estudios InSAR, GEP es una herramienta básica para tener una idea preliminar de posibles zonas inestables y en el futuro esta herramienta puede ser muy útil para la prevención de los riesgos costeros en aquellos lugares donde coincidan terrenos inestables con zonas pobladas e infraestructuras. Ejemplos de esto son los casos estudiados e identificados con GEP en RISKCOAST descritos en el apartado anterior. Además, los resultados de GEP, y en general los datos DInSAR, pueden señalar, en casos de emergencia, qué zonas han podido ser más afectadas dada su inestabilidad previa. Esta información sería muy valiosa durante una evaluación preliminar de daños tras un desastre tal y como lo hacen los modelos de Intensidad sísmica, utilizados para estimar daños potenciales en las primeras horas tras un terremoto.

## 5 CONCLUSIONES

La plataforma GEP desarrollada por la ESA es una herramienta útil para realizar análisis rápidos de la franja costera para localizar posibles terrenos inestables que presenten un movimiento continuado en el tiempo de unos pocos mm-cm al año. Los servicios “SBAS Stripmap” y “SBAS-InSAR S-1 TOPS” permiten localizar solamente zonas inestables de varias hectáreas, pero suministran la serie temporal de desplazamientos. El servicio “FASTVEL S-1” ofrece datos a mejor resolución, pero sin la serie temporal.

La plataforma suministra resultados de análisis no supervisados, es decir, sin poder modificar mucho los parámetros del procesado para optimizar el análisis, pero en un tiempo de 24-48 h lo que permite una valoración rápida y preliminar de la situación de inestabilidad. Además, en los servicios citados aporta series temporales de desplazamiento, lo que también ayuda a la interpretación de los movimientos y puede guiar en la identificación de que factores causales provocan la inestabilidad detectada.

Para el usuario, la plataforma es como una caja negra en la que en muchas ocasiones es necesario el apoyo del soporte técnico para resolver errores de procesado. Por otro lado, dependiendo de la zona, las imágenes disponibles y la selección de los parámetros de entrada se pueden obtener resultados de mayor o menor calidad que se identifica por el “ruido” existente en los datos de salida.

Tanto los resultados descritos en este informe, como los ya publicados [Galve et al., 2017] permiten afirmar que los resultados que se pueden obtener a través de GEP sirven para identificar y analizar rápidamente potenciales lugares inestables que sufren deformaciones imperceptibles y que, durante un evento climático extremo, pueden ser las zonas más proclives a moverse de manera más rápida generando amplios daños materiales o incluso catastrófica. Antes de existir GEP, para obtener esta información se necesitaba la participación de un equipo de expertos en técnicas DInSAR. Con GEP, un usuario con un entrenamiento básico puede obtener datos DInSAR de manera relativamente sencilla, aunque siempre se trata de un resultado preliminar con todas las limitaciones mencionadas mas arriba. En ese punto, aplicar la técnica ya no supone un obstáculo y es la interpretación de los datos de manera rigurosa lo que adquiere importancia.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Casu, F., Elefante, S., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C. and Lanari, R., 2014. SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), pp.3285-3296.
- Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R. and Catita, C., 2011. Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), pp.2354-2360.
- Catalão, J., Nico, G., Lollino, P., Conde, V., Lorusso, G. and Silva, C., 2015. Integration of InSAR Analysis and Numerical Modeling for the Assessment of Ground Subsidence in the City of Lisbon, Portugal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4), pp.1663-1673.
- Crosetto, M., Crippa, B. and Biescas, E., 2005. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, 79(1-2), pp.81-91.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N. and Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, pp.78-89.
- De Luca, C., Cuccu, R., Elefante, S., Zinno, I., Manunta, M., Casola, V., Rivolta, G., Lanari, R. and Casu, F., 2015. An on-demand web tool for the unsupervised retrieval of earth's surface deformation from SAR data: The P-SBAS service within the ESA G-POD environment. *Remote Sensing*, 7(11), pp.15630-15650.
- Fernandez, P., Irigaray, C., Jimenez, J., El Hamdouni, R., Crosetto, M., Monserrat, O. and Chacon, J., 2009. First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique. *Engineering Geology*, 105(1-2), pp.84-101.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), pp.8-20.
- Galve, J.P., Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Closson, D., Caló, F., Reyes-Carmona, C., Jabaloy, A., Ruano, P., Mateos, R.M., Notti, D. and Herrera, G., 2017. Evaluation of the SBAS InSAR service of the European space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP). *Remote Sensing*, 9(12), p.1291.
- Oliveira, S.C., Zêzere, J.L., Catalão, J. and Nico, G., 2015. The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, 12(4), pp.703-719.
- Reyes-Carmona, C., Barra, A., Galve, J.P., Monserrat, O., Pérez-Peña, J.V., Mateos, R.M., Notti, D., Ruano, P., Millares, A., López-Vinielles, J. and Azañón, J.M., 2020. Sentinel-1 DInSAR for Monitoring Active Landslides in Critical Infrastructures: The Case of the Rules Reservoir (Southern Spain). *Remote Sensing*, 12(5), p.809.

Zêzere, J.L., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S.C. and Garcia, R.A., 2017. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the total environment*, 589, pp.250-267.