

Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno

GUADALUPE BRU, PABLO EZQUERRO,
JUAN LÓPEZ-VINIELLES, CRISTINA REYES-CARMONA,
CAROLINA GUARDIOLA-ALBERT, MARTA BÉJAR-PIZARRO

Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno

Autores: **Guadalupe Bru, Pablo Ezquerro, Juan López-Vinielles, Cristina Reyes-Carmona, Carolina Guardiola-Albert, Marta Béjar-Pizarro**

Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno

Autores:

Guadalupe Bru, Pablo Ezquerro, Juan López-Vinielles, Cristina Reyes-Carmona,
Carolina Guardiola- Albert, Marta Béjar-Pizarro

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos UNDERGY, subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y el Programa Estatal de Liderazgo Empresarial en I+D+i, del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2021-2023 y SARAI, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de la Agencia Española de Investigación 10.13039/501100011033 (PID2020-116540RB-C22).

ISBN: 13 978-84-09-62312-9

This work is licensed under **CC BY-NC-SA 4.0**



Agradecimientos:

Los autores agradecen al Equipo Científico INTA-PAZ la aportación de los datos SAR del satélite PAZ en el marco del proyecto AO-005-002 “Erupción volcánica de Cumbre Vieja: seguimiento de la deformación del terreno y detección de cambios en las propiedades de la superficie (productos volcánicos y evolución de los materiales)” y a la Agencia Espacial Europea (ESA) por conceder el permiso para utilizar imágenes de su sitio web para la portada, contraportada y algunas ilustraciones interiores de este manual.

Acrónimos 7

01

Introducción 9

02

La técnica InSAR 12

2.1 Sensores SAR 12

2.1.1 Geometría de adquisición de los sistemas SAR 13

2.1.2 Imágenes SAR 15

2.1.3 Características de la señal retrodispersada 16

2.1.3.1 Tipos de dispersores 17

2.1.3.2 Celda de resolución y efecto speckle 18

2.1.3.3 Parámetros del sensor y parámetros del terreno 19

2.2 Satélites SAR 22

2.3 Catálogos de imágenes SAR 24

2.4 Interferometría SAR (InSAR) por satélite aplicada a la medición de deformaciones 26

2.5 Contribución atmosférica 29

2.6 Decorrelación y coherencia interferométrica 29

2.7 Técnicas InSAR: velocidad y series temporales del desplazamiento 31

2.7.1 Métodos de selección de puntos de medida 32

2.7.2 Métodos de formación de redes interferométricas 33

2.7.3 Algoritmos empleados en las técnicas InSAR 33

2.8 Interpretación de datos InSAR: recomendaciones generales 34

03

Servicios InSAR públicos 40

3.1 Productos interferométricos a escala global: proyecto LiCS 40

3.2 Servicios de movimientos del terreno nacionales y regionales 41

3.3 Servicio Europeo de Movimiento del Terreno (EGMS) 42

3.3.1 Descripción del producto 42

3.3.2 Principales limitaciones de los datos del EGMS 45

Acrónimos

Acrónimo	Descripción en inglés	Descripción en español
A-DInSAR	Advanced Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar	Interferometría diferencial avanzada de radar de apertura sintética
ASI	Agenzia Spaziale Italiana	Agencia espacial italiana
CONAE	-	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar	Interferometría diferencial de radar de apertura sintética
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Agencia espacial alemana
DS	Distributed Scatterers	Reflectores distribuidos
EO	Earth Observation	Observación de la Tierra
E-O	-	Este-oeste
ESA	European Space Agency	Agencia Espacial Europea
EW	Extra Wide Swath	Anchura de barrido extra ancho
GEP	Geohazards Exploitation Platform	Plataforma de explotación de peligros geológicos
IW	Interferometric Wide Swath	Anchura de barrido interferométrico ancho
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial
LOS	Line of Sight (of the satellite)	Línea de visión (del satélite)
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
N-S	-	Norte-sur
P-SBAS	Parallel Small BAseline Subset	Método de subconjunto de línea de base pequeña con computación paralelizada
PS	Persistent Scatterers	Reflectores persistentes
Radar	Radio Detection and Ranging	Sistema electrónico de localización
S-1	Sentinel-1 satellite	Satélite Sentinel-1
SAR	Synthetic Aperture Radar	Rádar de apertura sintética
SBAS	Small BAseline Subset	Subconjunto de línea base pequeña
SLC	Single Look Complex	Única medida compleja
TS	Time Series	Series temporales
UNAVCO	University NAVSTAR Consortium	-

01



Introducción

Introducción

Existen multitud de procesos geológicos y antrópicos con capacidad de producir desplazamientos de la superficie terrestre. Dichos procesos incluyen, entre otros, los siguientes:

- El aumento de volumen de un cuerpo magmático somero puede provocar el abombamiento de la superficie del terreno.
- La fuerza gravitacional terrestre es capaz movilizar los materiales de una ladera, provocando a menudo deslizamientos de diversa índole, desde rápidos a extremadamente lentos.
- Los terremotos superficiales pueden producir desplazamientos permanentes del suelo.
- La extracción de agua subterránea puede inducir fenómenos de subsidencia del terreno en materiales detríticos.
- La consolidación de un relleno antrópico suele conllevar movimientos verticales de la superficie del terreno.
- La disolución de rocas carbonatadas puede debilitar la estructura del terreno pudiendo provocar hundimientos o colapsos.

Por ello, la medida del desplazamiento de la superficie del terreno, su evolución temporal y su velocidad promedio es fundamental, tanto para entender el proceso causante y estimar su grado de actividad, como para diseñar medidas de prevención, mitigación y respuesta adecuadas.

Las técnicas de detección y monitorización de deformación del terreno se pueden clasificar en dos tipos, dependiendo del lugar desde donde se realicen las medidas: técnicas in situ (realizadas en campo, sobre la superficie del terreno) o técnicas remotas (mediante teledetección). Aunque las técnicas in situ son generalmente más precisas, presentan notables limitaciones debido a su cobertura espacial reducida, ya que las mediciones se realizan en un número limitado de puntos y requieren que las zonas sean accesibles para instalar la instrumentación. Además, su implementación suele implicar inversiones considerables, tanto para la toma de datos mediante campañas de campo como para el mantenimiento de los sistemas de registro continuo. Entre las técnicas de teledetección, cabe destacar la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), que utiliza señales de radar emitidas por satélites y es capaz de medir cambios milimétricos en el terreno. Esta técnica ha experimentado un notable desarrollo a lo largo de las últimas tres décadas, revolucionando la monitorización de movimientos en la superficie terrestre. Aunque la precisión de las mediciones InSAR puede ser ligeramente inferior en comparación con algunas técnicas in situ, su capacidad para realizar mediciones a escala

regional o global, de manera consistente a lo largo del tiempo, la convierte en una herramienta muy valiosa para la monitorización de procesos geodinámicos y cambios en la superficie terrestre. Entre sus principales ventajas se encuentran la capacidad de adquirir medidas en lugares inaccesibles, proporcionar una gran densidad de puntos de medida en áreas extensas y obtener información sobre áreas activas no investigadas previamente. Por todo ello, las técnicas InSAR ofrecen una alternativa eficaz y económica en comparación con las técnicas in situ, complementándolas. Con respecto al costo asociado, debe tenerse en cuenta que el manejo de datos InSAR requiere personal técnico especializado, así como hardware con suficiente capacidad de procesamiento y memoria.

Este manual, dirigido tanto a usuarios finales de productos obtenidos a partir de datos InSAR, como a aquellos sin experiencia en la explotación de este tipo de datos, tiene como objetivo ser una introducción a las técnicas InSAR. Se presenta con un lenguaje sencillo respaldado por explicaciones visuales. El documento se estructura de la manera que se describe a continuación. El Capítulo 2 ofrece una aproximación a los fundamentos de la técnica InSAR, describiendo los sensores SAR y las particularidades de las imágenes SAR. También se explican de manera simplificada las técnicas de procesamiento InSAR, haciendo especial hincapié en las precauciones para interpretar correctamente los resultados. En el Capítulo 3 se revisan los servicios públicos que proporcionan datos InSAR ya procesados, con un enfoque específico en el servicio de Copernicus European Ground Motion Service (EGMS). El Capítulo 4 recopila varios ejemplos de aplicación y explotación de los datos InSAR, todos ellos extraídos del EGMS abarcando diferentes fenómenos que ocasionan movimientos del terreno. Finalmente, el Capítulo 5 presenta una serie de ejemplos que reflejan las limitaciones y particularidades de la técnica InSAR. Asimismo, este manual se complementa con tres anexos que incluyen un glosario de términos, recursos de aprendizaje y una lista del software de procesamiento SAR libre más utilizado en la comunidad científica.



02



La técnica InSAR

La técnica InSAR

Antes de proseguir con el contenido, recomendamos consultar el glosario del Anexo I ya que contiene definiciones clave y términos técnicos para ayudar a comprender mejor el contenido de este capítulo. Todos los términos que aparecen en el texto principal y están incluidos en el glosario, se han resaltado en color azul.

Las definiciones y términos técnicos descritos en el apartado 2.1 se han extraído y sintetizado a partir de diversas fuentes (Bamler and Hartl, 1998; Campbell and Wynne, 2011; Cumming and Wong, 2005; ESA, 2004, 2018a, b, 2019; Ferretti et al., 2007a; Flores-Anderson et al., 2019; González Méndez, 2010; Hanssen, 2001; Moreira et al., 2013; Van Zyl and Kim, 2011; Woodhouse, 2017).

2.1 SENSORES SAR

Los sensores SAR tienen la capacidad de capturar imágenes de la superficie terrestre tanto de día como de noche, incluso bajo cobertura nubosa.

Un radar de apertura sintética (*Syntetic Aperture Radar*, SAR) es un sensor activo formado fundamentalmente por un transmisor, un receptor, una **antena** y un sistema electrónico para procesar y registrar los datos. El transmisor emite **pulsos** de ondas electromagnéticas a intervalos regulares, que son enfocados por la **antena** en un haz. Este haz de radar ilumina la superficie terrestre de manera oblicua. Cuando los **pulsos** alcanzan el suelo, los objetos que se encuentran sobre él (construcciones, vegetación, rocas...) **dispersan** la señal: parte de la energía transmitida se desvía y otra parte regresa hacia la **antena**. El fenómeno por el cual estos “ecos” regresan al sensor después de que la señal emitida interactúe con los objetos de la superficie se denomina **retrodispersión**. Las señales retrodispersadas se registran, procesan y almacenan en el dispositivo SAR. Estos datos se transfieren a sofisticadas estaciones de terrestres procesamiento y distribución.

El término activo hace referencia a que el sensor emite su propia fuente de energía, lo que le permite adquirir datos tanto en condiciones diurnas como nocturnas. Por el contrario, los sensores pasivos detectan la radiación electromagnética reflejada o emitida por fuentes naturales. Este último caso es el de los instrumentos ópticos o multi-espectrales, que requieren de iluminación solar (Figura 1). Los sensores activos SAR emiten **pulsos** en el rango de las microondas del **espectro electromagnético**, con longitudes de onda de entre 1 mm y 1 m. Dado que las señales en estas **frecuencias** se ven escasamente afectadas por las condiciones de humedad y cobertura nubosa de la atmósfera, los sensores SAR son también capaces de operar bajo cualquier condición meteorológica y climática.

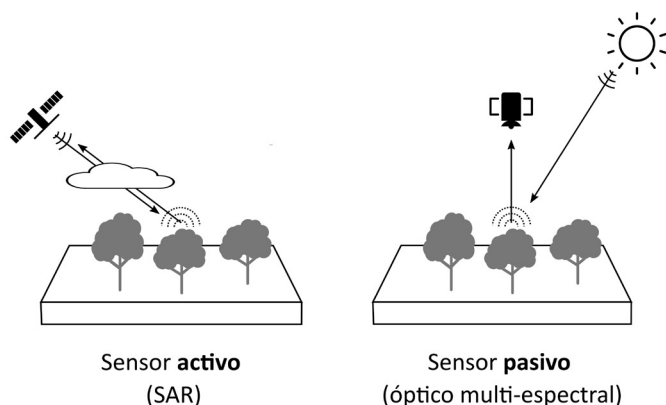


Figura 1: Los sensores activos emiten su propia fuente de energía artificial y registran la porción de señal que vuelve a la antena tras interactuar con la superficie. Pertenecen a esta categoría los sensores SAR, cuya radiación está dentro del rango de las microondas. Los sensores pasivos registran la señal dispersada por un objeto que ha sido irradiado por una fuente emisora natural. Los instrumentos ópticos o multispectrales (similares a una cámara fotográfica) necesitan la radiación externa del Sol que ilumina los objetos. Si una cámara fotográfica tiene flash, pasaría a ser un sensor activo, ya que provee su propia fuente de iluminación.

Los sensores SAR se pueden instalar en distintas plataformas, como drones, avionetas, satélites o plataformas terrestres (GB-SAR). A medida que la plataforma del sensor avanza, el registro y procesamiento de las señales retrodispersadas construyen una imagen de la superficie. En este manual nos limitaremos a tratar sistemas SAR montados en satélites, que operan en la exosfera a altitudes entre los 500 y los 800 km, siguiendo órbitas cuasi-polares. Los sensores SAR adquieren datos en dos órbitas distintas: ascendente y descendente. Se denomina órbita ascendente cuando el satélite vuela desde el polo sur hacia el polo norte y descendente cuando lo hace desde el polo norte al polo sur (Figura 2). El término cuasi-polares se emplea debido a la existencia de un cierto ángulo entre la dirección del satélite con respecto al norte geográfico, lo que se conoce como **ángulo acimutal** o de cabeceo. Esta característica tiene implicaciones importantes en el procesamiento y la interpretación de los datos, como se explicará en los próximos subapartados.

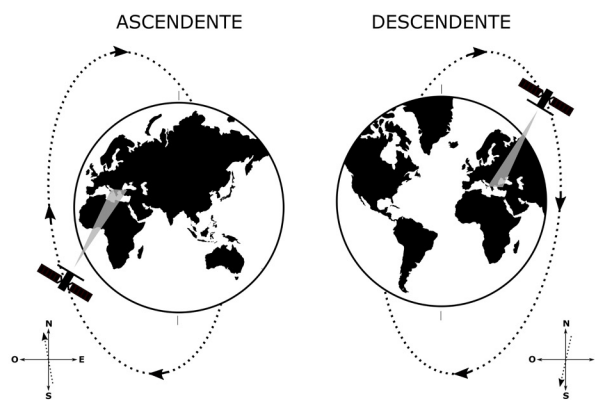


Figura 2: Órbitas ascendente y descendente de los satélites SAR. Como el haz de radar ilumina la superficie terrestre de manera oblicua y las antenas suelen estar orientadas hacia la derecha del dispositivo, en la órbita ascendente el sensor SAR “mira” desde el oeste hacia el este y en la órbita descendente sucede lo opuesto.

2.1.1 Geometría de adquisición de los sistemas SAR

Una de las características más relevantes de los sistemas SAR es que tienen geometría de visión lateral.

El término “geometría de adquisición” se refiere a la perspectiva desde la cual un sensor de teledetección adquiere datos de la Tierra. Los sistemas SAR poseen una geometría de visión lateral, lo que significa que capturan imágenes de manera oblicua, a diferencia de la mayoría de los sistemas ópticos de formación de imágenes que orientan sus sensores hacia el **nadir** o la vertical. Para explicar las implicaciones de la geometría de adquisición lateral, comenzaremos con el sistema de radar más básico, que es el radar de apertura real (*Real Aperture Radar* o **RAR**). En estos sistemas la **antena** forma un **ángulo de observación** (θ) con respecto al **nadir** e ilumina una franja continua en el suelo a medida que la aeronave o el satélite se desplaza siguiendo su órbita (Figura 3). En la mayoría de los satélites **RAR** la **antena** se orienta hacia el lateral derecho, de forma que cuando el satélite se desplaza en su órbita ascendente, observa el terreno desde el oeste hacia el este y cuando lo hace en su órbita descendente observa el terreno desde el este hacia el oeste (Figura 2). La dirección de vuelo del satélite se conoce como dirección **acimut** y forma cierto ángulo con respecto al norte geográfico (**ángulo acimutal** o de cabeceo). La dirección hacia la que se orienta la **antena**, perpendicular a la de **acimut**, se denomina dirección **rango**. La distancia entre el satélite y cada punto del terreno iluminado por el haz en la dirección del **rango** se denomina **rango oblicuo** (*slant range*), representado como R en la Figura 3, y su proyección sobre el terreno se conoce **rango terrestre** (*ground range*). La apertura del haz en la dirección **rango** está comprendida entre el **rango cercano** (*near range*) y el **rango lejano** (*far range*). El **ángulo de incidencia** (α_i) es el ángulo definido por el haz de radar incidente y la vertical (normal) a la superficie del terreno, que cambia a lo largo de la franja de imagen del radar, aumentado desde el **rango cercano** al lejano. La línea de visión (*Line Of Sight*, **LOS**) del satélite representa la trayectoria a lo largo de la cual viaja la señal electromagnética desde el sensor hasta el terreno y viceversa. Este parámetro es esencial para comprender la perspectiva desde la cual el sensor observa el área objetivo, y desempeña un papel fundamental en la interpretación de datos SAR, ya que todas las mediciones de desplazamiento del terreno se refieren a la línea de visión (**LOS**) del satélite. La franja del terreno iluminada por el haz de los **pulsos** microondas a medida que se desplaza el satélite se denomina **swath** y el área iluminada por un **pulso** particular se denomina **huella del haz**.

La **antena** emite una secuencia de **pulsos** microondas cortos de alta energía que se transmiten oblicuamente a través de la atmósfera y chocan contra una porción de la superficie del terreno de manera instantánea (**huella del haz** de la Figura 3). Una parte de esa energía rebota y vuelve a la **antena**, que registra, tanto en la dirección **rango oblicuo** (*slant range*) como en la dirección **acimut**, los retrasos de tiempo asociados a cada uno de los ecos generados por los diferentes elementos del terreno. Para que el radar pueda distinguir dos elementos cercanos entre sí, sus ecos

necesariamente deben ser recibidos en momentos diferentes. La **resolución espacial** es por tanto la capacidad de discriminar diferentes elementos sobre el terreno. En un sistema **RAR** la resolución en la dirección **rango** es mucho mejor (más fina) que la resolución en la dirección **acimut**. En la dirección **rango**, los ecos de los elementos situados a más distancia del sensor (en el **rango** lejano) llegarán más tarde que los localizados en el **rango** cercano. Dado que el **pulso** emitido por la **antena** radar debe hacer el viaje de ida y vuelta, dos elementos del terreno (por ejemplo, dos edificios) generarán dos ecos distintos si la distancia entre ellos es mayor que la mitad de la distancia que recorre el pulso en el tiempo durante el cual la antena emite su ráfaga de energía (L). Por tanto, la **resolución en rango** oblicuo (δr), es decir en la dirección de LOS, es aproximadamente equivalente a $L/2$ o $c\tau/2$ (siendo c la velocidad de la luz y τ la duración del pulso). La **resolución en rango** proyectada en el terreno o **rango** terrestre (δt) se determina a través del ángulo local de incidencia. En la práctica se emplean técnicas de compresión del **pulso** (o **pulso chirp**) con el objetivo de mejorar la **resolución en rango** (Cumming and Wong, 2005). En la dirección **acimut**, los ecos de los objetos situados a la misma distancia en la dirección del **rango** llegan a la **antena** en el mismo instante, por lo que solo pueden discriminarse si la distancia entre ellos es mayor que el ancho del haz del radar (X_a) que ilumina el terreno. Para focalizar el haz de manera que iluminase un área muy estrecha en **acimut** (lo que mejoraría la resolución en esa dirección) necesitaríamos una **antena** extremadamente larga, de varios cientos de metros, lo cual es impracticable. Por tanto, la **resolución en acimut** (δa) de un sistema **RAR** está estrechamente relacionada con las dimensiones de la **antena** radar. Como muestra la Figura 3, a una distancia R entre el sistema **RAR** y un objeto sobre el terreno, la anchura del área iluminada por el sensor (X_a) es directamente proporcional a la **longitud de onda** de la señal emitida (λ) e inversamente proporcional a la longitud de la **antena** (L_a) siendo X_a equivalente a δa . Para ilustrar esta relación, suponiendo que $\lambda=3.1$ cm, $h=500$ km, $L_a=12$ metros y $\theta=23^\circ$, se obtendría una resolución en acimut de 1.4 km. Esto significa que el sensor solo podría distinguir objetos en la imagen que tuvieran un tamaño igual o mayor a 1.4 km, lo que indica una resolución muy gruesa o muy baja.

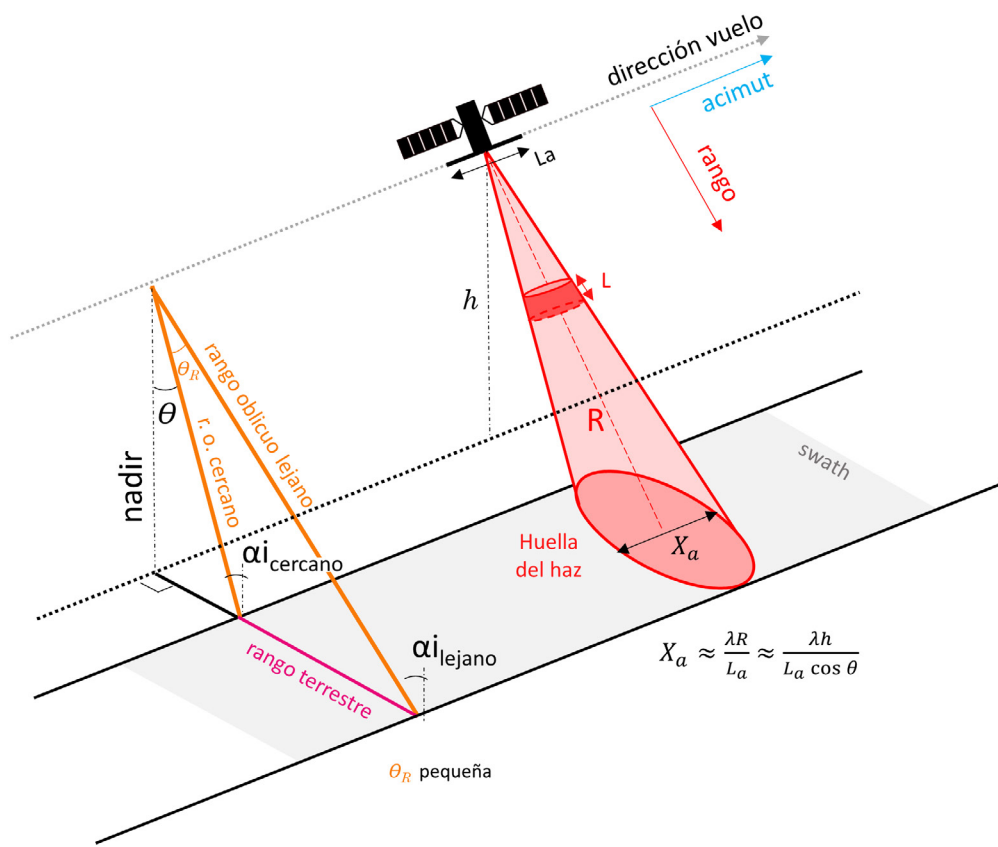


Figura 3: Geometría de adquisición de un radar de apertura real (RAR). La *antena* de visión lateral está instalada en un satélite a una altura de varios cientos de kilómetros ($h=500\text{--}800\text{km}$) sobre la superficie terrestre medida sobre el *nadir*. La dirección de vuelo se denomina dirección *acimut* y la perpendicular a ésta, dirección *range*. La *antena* emite una secuencia de *pulsos* cortos a medida que el satélite avanza. Los *pulsos* son enviados en la dirección *range* con un cierto *ángulo de observación* (θ) con respecto al *nadir*, formando un haz hacia el terreno. La apertura del haz en dirección del *range* (θ_R) se considera pequeña con respecto a θ . El *ángulo de incidencia* (α_i) es el que forman los rayos del haz con la normal sobre el terreno, por lo que va aumentando en la dirección del *range*. Cada *pulso* ilumina una porción del terreno de forma instantánea (*huella del haz*). La franja iluminada por los haces de los *pulsos* consecutivos a medida que el satélite avanza se denomina *swath*. La curvatura de la Tierra no está reflejada en esta figura.

Para solventar el problema de la **resolución en acimut**, se desarrollaron los sistemas radar de apertura sintética (SAR), los cuales utilizan el movimiento relativo entre el radar y el terreno para simular una **antena** de apertura más grande. En un sistema SAR, la **antena** aprovecha el efecto **Doppler**, emitiendo varios barridos laterales a medida que la plataforma espacial se mueve a lo largo de la dirección **acimut** para recrear un solo “barrido virtual” (Cumming and Wong, 2005; Hanssen, 2001). La Figura 4 muestra una ilustración simplificada del concepto de apertura sintética. El objeto P (situado sobre la superficie de la Tierra) es iluminado por varios **pulsos** radar consecutivos a medida que la plataforma espacial se mueve a velocidad constante. Una vez obtenidas las sucesivas adquisiciones, se realiza un post-procesado para combinarlas todas en un único conjunto de datos. De esta forma, el sistema SAR proporciona el mismo rendimiento que daría un radar de apertura real equipado con una **antena** mucho más larga. Dicho de otra forma, el proceso de apertura sintética, mejora la **resolución en acimut** siendo ésta aproximadamente igual a la mitad de la longitud real de la **antena**.

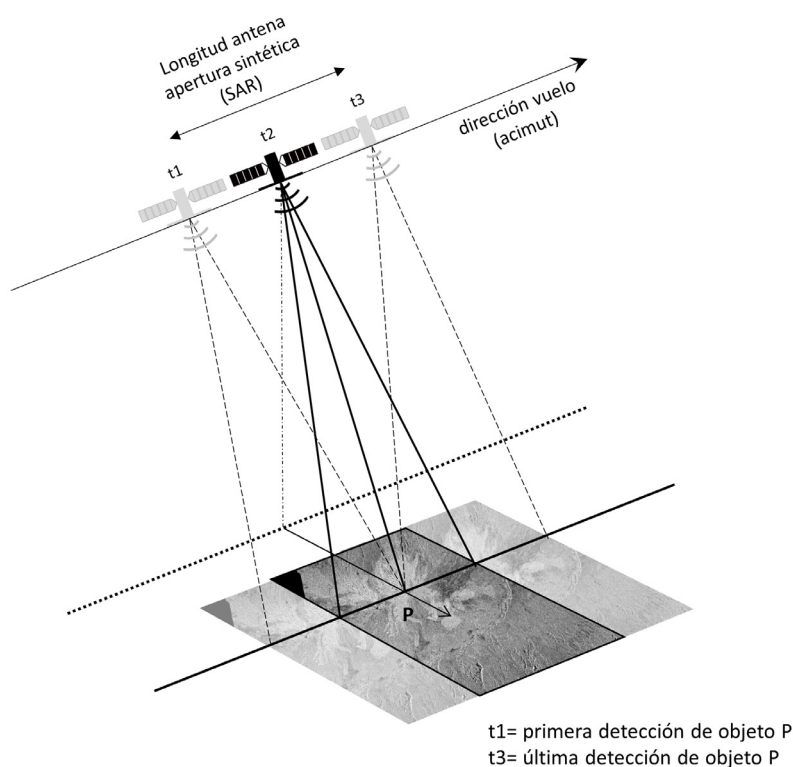


Figura 4: Concepto de radar de apertura sintética (SAR). A medida que la plataforma espacial se desplaza a una velocidad constante, el objeto P ubicado en la superficie de la Tierra es iluminado por una secuencia continua de **pulsos** radar.

2.1.2 Imágenes SAR

Cada píxel de una imagen SAR contiene información de la amplitud y de la fase de la onda retrodispersada.

Una imagen SAR se puede representar como una matriz en dos dimensiones donde cada píxel representa una fracción de la superficie de terreno. Las filas de la matriz representan la dirección en **acimut** y las columnas la dirección en el **rango** oblicuo. Cada píxel contiene un **número complejo** que proporciona dos tipos de información: la **amplitud** y la **fase** de la señal. Los valores de amplitud representan la intensidad de la señal retrodispersada, que vuelve a la **antena** tras interactuar con los objetos iluminados, y proporciona información sobre las características de la superficie del terreno (Figura 5). Por otro lado, los valores de **fase** están relacionados con el tiempo de viaje de la señal tanto de ida (sensor-objeto) como de vuelta (objeto-sensor). Así, la **fase** proporciona información acerca de la distancia sensor-objeto, siendo clave para la medición del desplazamiento de la superficie del terreno. No obstante, la intensidad de la señal retrodispersada también representa un parámetro importante cuando se busca medir desplazamientos del terreno a partir de la **fase**. En función de la estrategia de procesamiento adoptada (ver apartado 2.4), la intensidad de la señal puede ayudarnos a identificar los píxeles que son adecuados para su uso como puntos de referencia en nuestras mediciones de desplazamiento de la superficie del terreno.

Las imágenes SAR en bruto (tipo **RAW**) que registra el sensor en primera instancia contienen información de la señal retrodispersada, pero es necesario someterlas a cierto nivel de procesamiento para transformarlas en imágenes útiles para aplicar la técnica InSAR. Las imágenes SAR en formato **Single Look Complex (SLC)** tienen un cierto nivel de procesado con respecto a las imágenes **RAW** y son las comúnmente empleadas para aplicaciones InSAR. Estas imágenes **SLC** contienen datos SAR que han sido **enfocados** y **georreferenciados** utilizando datos de la órbita y la altitud del satélite.

La Figura 5 muestra la información de **amplitud** y de **fase** de una imagen SAR con formato **SLC**, a la que además se le han aplicado una serie de transformaciones, descritas en el pie de la figura, para facilitar su visualización e interpretación. La amplitud se suele visualizar mediante niveles de escala de grises. Los píxeles blancos o brillantes se corresponden con áreas de alta **retrodispersión** de la señal (por ejemplo, ciudades o laderas orientadas hacia el sensor), mientras que los píxeles oscuros corresponden a una radiación retrodispersada baja (por ejemplo, aguas tranquilas). Las características que determinan el nivel de **retrodispersión** de la señal se discutirán en el próximo subapartado. La **fase** es la fracción de un ciclo completo de onda sinusoidal (de una **longitud de onda** λ , ver Figura 5). La **fase** de la imagen SAR está principalmente determinada por la distancia entre la **antena** del satélite y el objeto sobre el terreno donde se ha retrodispersado (componente determinista), pero también hay una pequeña contribución, $\phi_{\text{retrodispersión}}$, relacionada con las características de retrodispersión del objeto (componente aleatoria). Por ello, comparando la **fase** de dos imágenes SAR de la misma zona en diferentes fechas, es posible calcular la diferencia de posición del terreno si éste se ha desplazado y la contribución de $\phi_{\text{retrodispersión}}$ se mantiene constante. En el apartado 2.4 se dará una explicación más detallada de este cálculo.

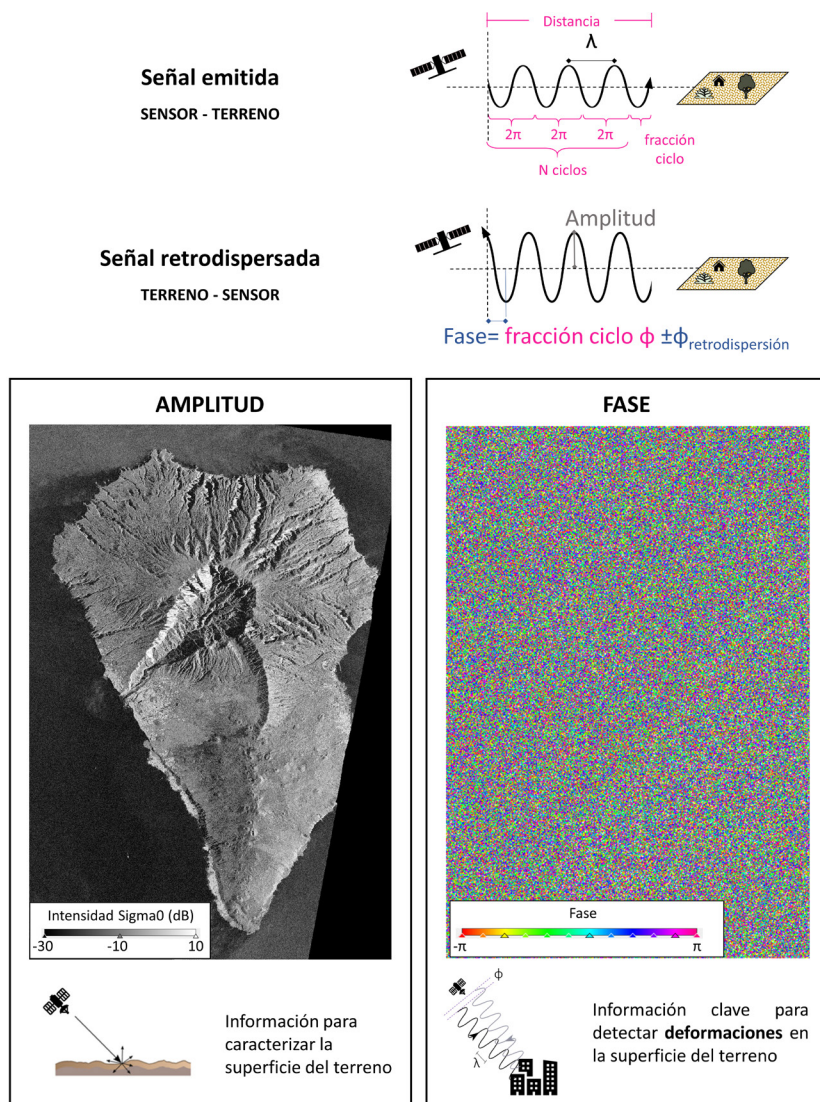


Figura 5: Ilustración del concepto simplificado de onda emitida y retrodispersada. La **longitud de onda** (λ) se mantiene, pero la onda retrodispersada vuelve al sensor tras interactuar con la superficie terrestre con una amplitud diferente (amplificada o atenuada) y con cierto desfase. En la parte inferior se muestran la información de **amplitud** y de **fase** de una imagen SAR adquirida por el satélite PAZ en su órbita descendente de la isla de La Palma (Islas Canarias, España). La amplitud se muestra como una imagen de intensidad de la señal retrodispersada a la que se le han aplicado las transformaciones de **calibración radiométrica** (aplicando el coeficiente de retrodispersión en escala logarítmica σ_0 [dB]), **geocodificación**, **ortorrectificación** y un filtro para reducir el **speckle**. En general, la **fase** de un píxel incluye una componente determinista (relacionada con la distancia sensor-terreno) y una componente aleatoria $\phi_{\text{retrodispersión}}$ (relacionado con las propiedades de **retrodispersión** del área del terreno representada por una celda de resolución en la imagen). Imagen del satélite PAZ © Hisdesat Servicios Estratégicos S.A. 2021.

2.1.3 Características de la señal retrodispersada

Las características de retrodispersión de la señal dependen tanto de los parámetros del sensor SAR como de las propiedades de la superficie del terreno.

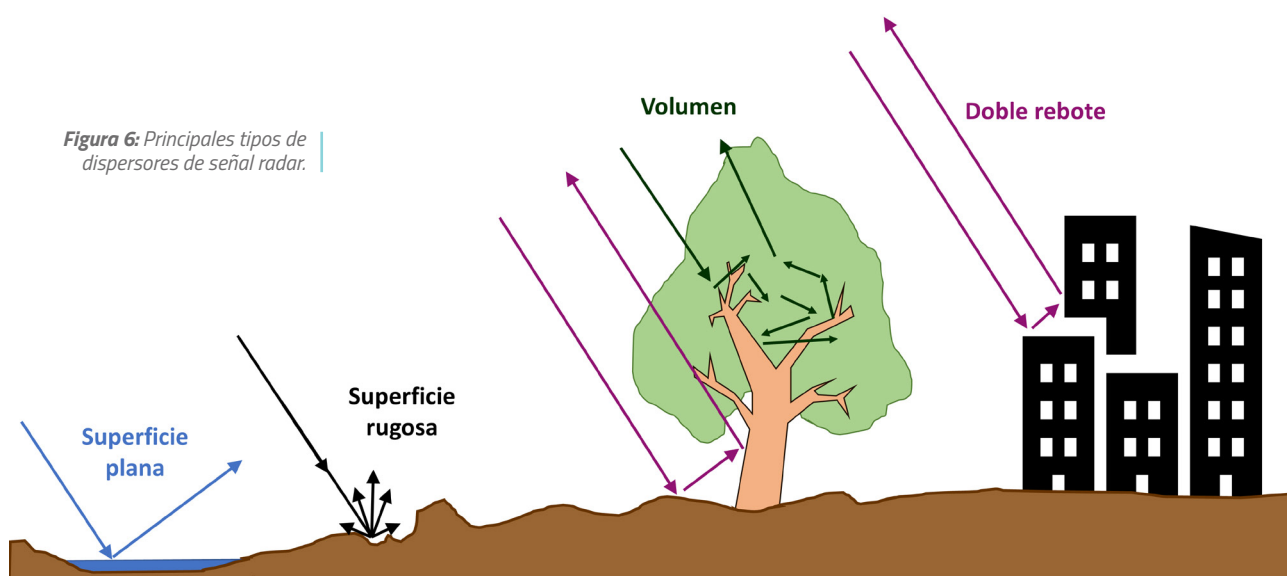
La señal retrodispersada es la porción de la señal emitida que los objetos en la superficie del terreno redirigen directamente hacia la **antena** del radar. Por tanto, la **retrodispersión** es un indicador de la cantidad de radiación que se recibe de una ubicación específica sobre la superficie terrestre, iluminada por el haz de microondas. Esta medida está intrínsecamente relacionada con los parámetros del sensor SAR, siendo fundamental la geometría de visión lateral, y con las propiedades físicas de la superficie del terreno. Para comprender las peculiaridades de las imágenes SAR, este subapartado ofrece una descripción detallada de cómo la señal radar interactúa con el terreno.

2.1.3.1 Tipos de dispersores

En primer lugar, es importante conocer los distintos tipos de dispersores que pueden producirse en la superficie terrestre. De forma simplificada existen cuatro tipos de dispersores o reflectores de la señal radar (Figura 6):

- **Dispersores de superficie plana:** Esta categoría incluye aquellas superficies lisas y planas en las que la señal es reflejada en su totalidad de forma especular, lo que significa que la señal rebota en un ángulo perpendicular y no retorna al radar. Cuando se visualiza la información de amplitud mediante el coeficiente de retrodispersión en escala logarítmica y en paleta de grises (donde el color negro representa el valor mínimo del coeficiente de retrodispersión y el color blanco el máximo, ver [calibración radiométrica](#)), estas zonas aparecerán muy oscuras, ya que la energía que vuelve a la [antena](#) es nula o despreciable. Es el caso de las carreteras, los suelos pavimentados o los cuerpos de agua en reposo (Figuras 6 y 7).
- **Dispersores de superficie rugosa:** La segunda categoría, comprende superficies rugosas que producen la [dispersión](#) difusa de la señal. Este fenómeno se produce cuando la señal radar se dispersa en múltiples direcciones al interactuar con superficies irregulares, como terrenos de tipo natural con escasa vegetación o zonas marinas con importante oleaje (imagen de amplitud de las Figuras 5 y 7). El grado de rugosidad de la superficie y la [longitud de onda](#) de la señal, determinarán el grado de retorno, y por tanto, la tonalidad de gris (más claro, mayor retorno).
- **Dispersores de volumen:** La tercera categoría abarca la dispersión volumétrica, que ocurre cuando la señal radar penetra en un objeto tridimensional (como las copas de los árboles, las zonas con vegetación densa o las superficies cubiertas por nieve seca) e interactúa con elementos de tamaño similar a la [longitud de onda](#) utilizada (ramas, hojas, etc.). Durante este proceso, la energía de la señal se dispersa en múltiples direcciones, rebotando varias veces dentro del objeto antes de efectuar su trayectoria de vuelta hacia el sensor, lo que provoca una pérdida de energía de la señal (Figuras 6 y 7).
- **Dispersores de doble rebote.** Por último, la [dispersión](#) de doble rebote, o [dispersión](#) diédrica, se produce cuando el impulso del radar incide sobre dos superficies relativamente lisas y perpendiculares entre sí. Este fenómeno minimiza la pérdida de energía de la señal retrodispersada, lo que se traduce en un aumento de la intensidad de la señal. Por esta razón, las zonas urbanizadas con elementos verticales (edificios) se ven de color blanco o brillante en las imágenes de amplitud SAR (Figura 7).

Figura 6: Principales tipos de dispersores de señal radar.



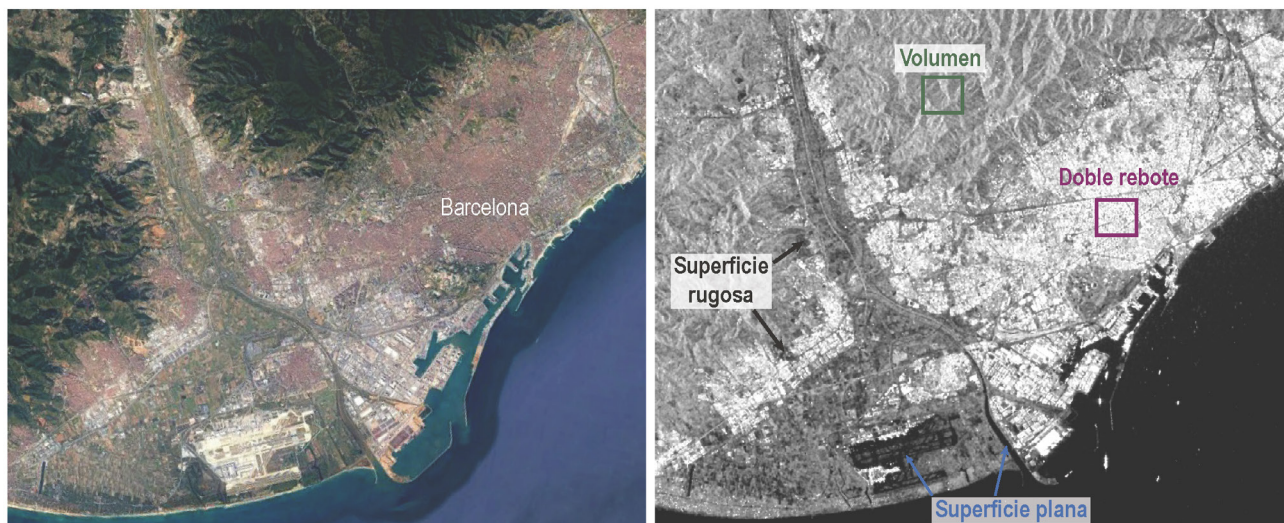


Figura 7: A la izquierda, una imagen óptica de la ciudad de Barcelona adquirida por el satélite Sentinel-2 de la ESA. A la derecha, una imagen geocodificada, que muestra el coeficiente de retrodispersión de la intensidad de la señal SAR de la misma zona. En esta imagen adquirida por el satélite Sentinel-1 podemos observar ejemplos de los diferentes dispersores de la señal radar (Figura 6). Las superficies planas, como el mar sin oleaje, aparecen de color negro. Los objetos que producen doble rebote, como los edificios o los barcos, se ven blancos o brillantes. En las zonas donde existe vegetación se produce dispersión de volumen. Las superficies rugosas adquieren diferentes tonalidades de grises. Para más detalles sobre los tipos de calibración y las escalas de visualización, consultar la [calibración radiométrica](#).

2.1.3.2 Celda de resolución y efecto speckle

Una celda de resolución se refiere a la fracción de la superficie de terreno que representa cada **pixel** en la imagen SAR y puede contener multitud de objetos que actúen como centros de **dispersión** de la señal (Figura 8). La respuesta de la señal retrodispersada es el resultado de la suma de todas las interacciones aleatorias entre la señal de radar y los diferentes objetos o rugosidades del suelo presentes en la celda de resolución, siempre y cuando tengan un tamaño similar a la **longitud de onda** utilizada. La suma de estas interacciones puede ser tanto “constructiva” (resultando en un píxel de alta **retrodispersión**) como “destructiva” (generando un píxel de **retrodispersión** baja). Este fenómeno es responsable del aspecto granular o “efecto de sal y pimienta” que se observa en las imágenes de amplitud, conocido como efecto **speckle**. Para comprender mejor el efecto **speckle** consideremos un gran campo agrícola sin cosecha (mucho más grande que el tamaño del píxel de la imagen) con una superficie rugosa que es estadísticamente homogénea (Woodhouse, 2017). En la imagen SAR, los píxeles adyacentes del campo agrícola mostrarán respuestas de **retrodispersión** muy diferentes debido a que es poco probable que la distribución real de los dispersores (por ejemplo, los surcos en la tierra) en cada fracción del terreno sea idéntica. Incluso pequeñas variaciones en las ubicaciones de los dispersores son suficientes para alterar el patrón de interferencia. Para reducir los efectos de **speckle** en una imagen existen diferentes filtros (Argenti et al., 2013), que en su mayoría consisten en promediar los valores de celdas contiguas mediante una ventana móvil de dimensiones reducidas (por ejemplo de 3x3 o de 5x5 píxeles), y sustituyendo el **pixel** central con el promedio calculado. Al calcular el promedio de una pequeña ventana alrededor de cada píxel, se logra un efecto de suavizado y se reduce la apariencia visual del **speckle**, pero resulta en un empeoramiento de la **resolución espacial** de la imagen.

Las interacciones aleatorias de la señal dentro de una celda de resolución afectan a la intensidad y **fase** con la que vuelve la onda. De esta manera, la **fase** de un píxel incluye una componente determinista relacionada con la distancia sensor-objetivo y una componente aleatoria relacionado con la **retrodispersión** dentro de una celda de resolución.

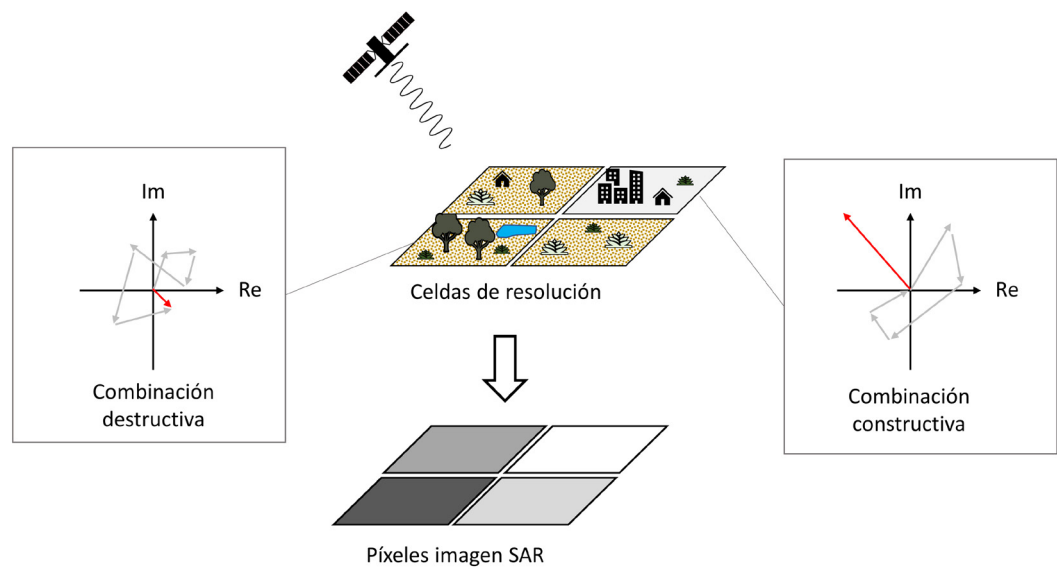


Figura 8: En cada celda de resolución de una imagen SAR puede haber varios dispersores (casas, árboles, arbustos, suelo pavimentado...). Debido a la distribución aleatoria de esos dispersores, la intensidad resultante (magnitud del vector rojo) y el cambio de fase (dirección del vector rojo) varían de píxel a píxel. La respuesta resultante del píxel es la suma de todas esas contribuciones individuales (vectores grises). La adición puede generar una interferencia aleatoria constructiva (alta intensidad, píxel brillante), así como una interferencia destructiva (intensidad baja, píxel oscuro). Es importante recalcar que la ilustración es un ejemplo didáctico y que la escala de los objetos en las celdas de resolución se encuentra deformada con el propósito de ilustrar distintos tipos de posibles dispersores.

2.1.3.3 Parámetros del sensor y parámetros del terreno

En la Tabla 1 se enumeran los parámetros característicos más importantes de un sensor SAR satelital junto con los parámetros de la superficie del terreno. La combinación de cada uno de estos parámetros influye profundamente en las propiedades de retrodispersión de la señal tras su interacción con el terreno.

Tabla 1: Parámetros del sensor y del terreno que influyen en la señal retrodispersada.

Parámetros del sensor SAR	Parámetros de la superficie del terreno
✓ Longitud de onda de la señal electromagnética (λ)	✓ Constante dieléctrica
✓ Resolución espacial	✓ Rugosidad
✓ Polarización de la señal	✓ Distribución de los dispersores
✓ Ángulo de observación o de visión lateral (θ)	✓ Topografía
✓ Órbita del satélite	

La longitud de onda (λ) de las señales electromagnéticas emitidas por los sensores SAR está dentro del rango de las microondas. Las bandas características en las que operan los satélites SAR son la banda L, la banda C y la banda X, que abarcan longitudes de onda en el rango de 15 a 30 cm, 3.75 a 7.5 cm y 2.5 a 3.75 cm, respectivamente (Flores-Anderson et al., 2019), respectivamente. La penetración de la señal es diferente para cada banda, teniendo además una relación directa con otros factores característicos del terreno, como la constante dieléctrica y la rugosidad. Por regla general, a mayor longitud de onda, mayor penetración en la superficie terrestre (Figura 9). En áreas con vegetación, la banda X se dispersará o propagará en múltiples direcciones en lugar de reflejarse de manera coherente en una sola dirección (dispersión de volumen, Fig. 6), ya que su longitud de onda es del mismo orden de magnitud que el tamaño de los objetos iluminados (ramas, hojas, etc.). Por el contrario, la banda C será capaz de penetrar más profundamente en el volumen de vegetación, mientras que la L banda podrá incluso atravesar la cubierta forestal. Por este motivo la banda X es la menos idónea para medir deformaciones del terreno en zonas vegetadas, lo que pone de manifiesto la importancia de seleccionar la banda más apropiada para cada caso de estudio.

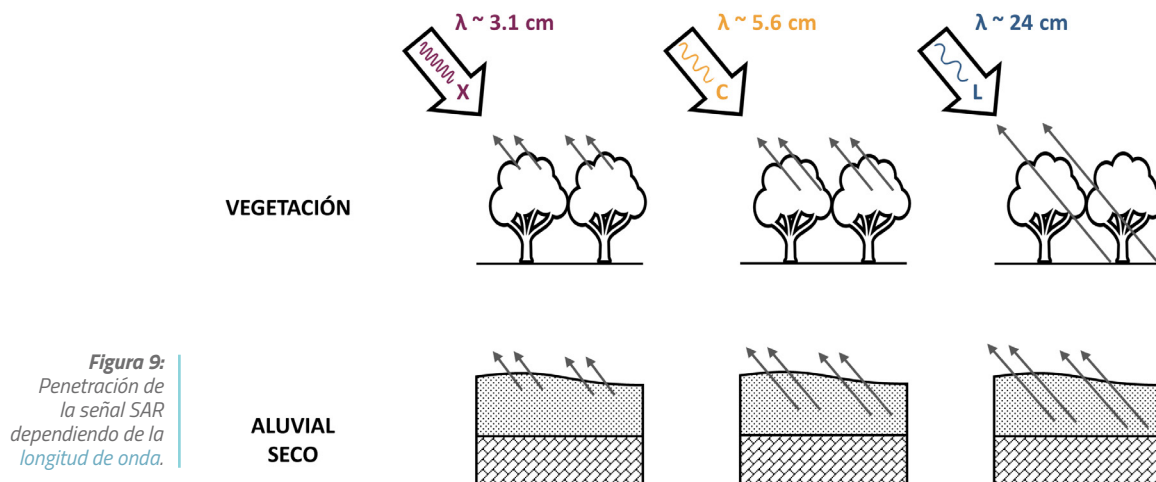


Figura 9: Penetración de la señal SAR dependiendo de la longitud de onda.

La **constante dieléctrica**, cuyo valor se relaciona principalmente con el contenido en humedad del suelo, tiene un impacto significativo en las propiedades de **retrodispersión** de la señal SAR. Dicho parámetro determina qué parte de la radiación entrante se dispersa en la superficie, qué parte penetra en el medio y qué parte se pierde en el medio a través de la **absorción**. En términos de **humedad volumétrica**, a medida que aumenta el contenido de humedad de suelo, la penetración de la señal disminuye (o, dicho de otra forma, la **retrodispersión** de la señal aumenta). Esta relación está influenciada por la **longitud de onda** utilizada (Figura 9). Cuando no hay fenómenos de **absorción de la señal**, la intensidad de la **retrodispersión** dependerá casi exclusivamente de la rugosidad de la superficie. A mayor rugosidad, mayor **retrodispersión**. Adicionalmente, la relación entre las pequeñas variaciones de altura de la superficie (h) y la **longitud de onda** de la señal SAR empleada (λ) determina el grado de rugosidad (Figura 10). Esto significa que una superficie con variaciones de altura de 2 cm representa una superficie muy rugosa para un satélite operando en banda X, pero no para un satélite operando en banda C o L.

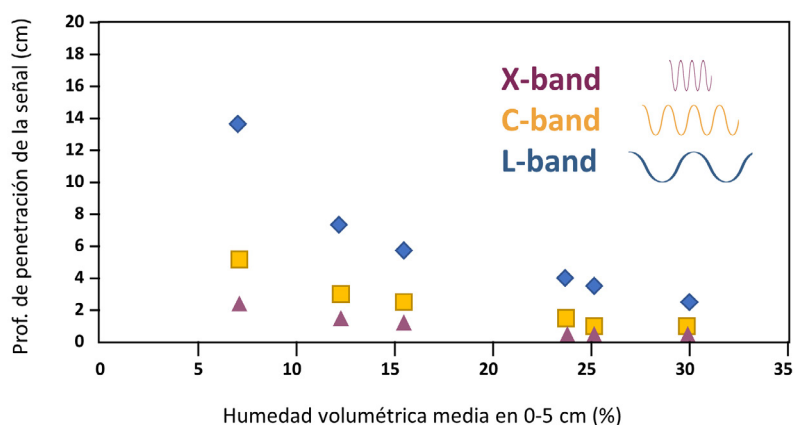
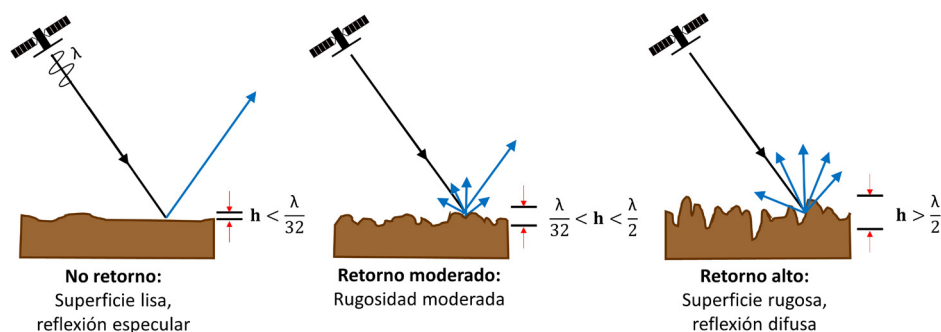


Figura 10: Penetración de la señal SAR en función del contenido en humedad. Imagen modificada de (Gorrab et al., 2014).

Figura 11: Retrodispersión de la señal dependiendo de la rugosidad del suelo. En las superficies planas la onda se refleja completamente, por lo que la señal no vuelve al sensor y esa porción del terreno se verá oscura. A medida que la rugosidad aumenta, la señal volverá al sensor con mayor intensidad. Imagen modificada de (Flores-Anderson et al., 2019).



Otra propiedad de la superficie del terreno que condicionará la amplitud y el desfase de la señal retrodispersada es la presencia, tamaño y distribución de muchos centros de **dispersión** u objetos en una celda de resolución, lo que produce el efecto **speckle** (explicado en el subapartado anterior).

La **polarización** es un parámetro propio del sensor que se refiere a la orientación del plano de oscilación de una señal electromagnética mientras se propaga. Los sensores SAR, al ser sistemas activos, permiten configurar el plano de oscilación tanto cuando se transmite la señal como cuando se recibe. Las cuatro configuraciones posibles son HH, VV, VH y HV, donde la primera letra indica el método de transmisión y la segunda el método de recepción. La respuesta de la señal retrodispersada en términos de amplitud o intensidad es diferente según la configuración de polarización empleada, por lo que la elección de una u otra es especialmente relevante en aplicaciones en las que se utilizan imágenes SAR de amplitud para caracterizar la superficie terrestre (Lee and Pottier, 2017).

Finalmente, las pendientes topográficas del terreno provocan **distorsiones geométricas** en las imágenes SAR debido a la visión lateral oblicua de la **antena** del sensor. Los tres efectos topográficos principales asociados a dichas distorsiones son, por su denominación en inglés, *foreshortening*, *layover* y *shadow* (Figura 12). Como consecuencia del efecto de *foreshortening*, las pendientes orientadas hacia el sensor aparecen “comprimidas” y brillantes en la imagen de amplitud SAR (Figura 13). Como se observa en la Figura 12a, la distancia entre los puntos A y B situados en la ladera orientada hacia el sensor, se acortará en la imagen SAR (A'B'). La cantidad de *foreshortening* depende tanto del **ángulo de observación** del sistema θ , como del ángulo de la pendiente del terreno α , siendo máxima cuando $\theta \rightarrow \alpha$. En áreas donde $\theta < \alpha$ (por ejemplo, en áreas de pendientes pronunciadas), se produce un tipo particular de *foreshortening* conocido como *layover* (Figura 12b). Este efecto provoca que las cimas de las montañas se vean como si estuvieran delante de su base (proyecciones de los puntos B y C en la Figura 12b), superponiéndose la información de la imagen en **rangos** de imagen más cercanos y más lejanos (véase las líneas verde, roja y azul en la Figura 12b). Aunque ambos efectos (*foreshortening* y *layover*) se pueden reducir si se aumenta el ángulo de visión θ , un mayor valor de θ producirá más efecto sombra (*shadow*) (Figura 12c). De esta forma, las distorsiones de imagen debidas a la topografía no se pueden eliminar por completo. Por ello, el número de puntos de medida del desplazamiento del terreno en terrenos de topografía abrupta será limitado.

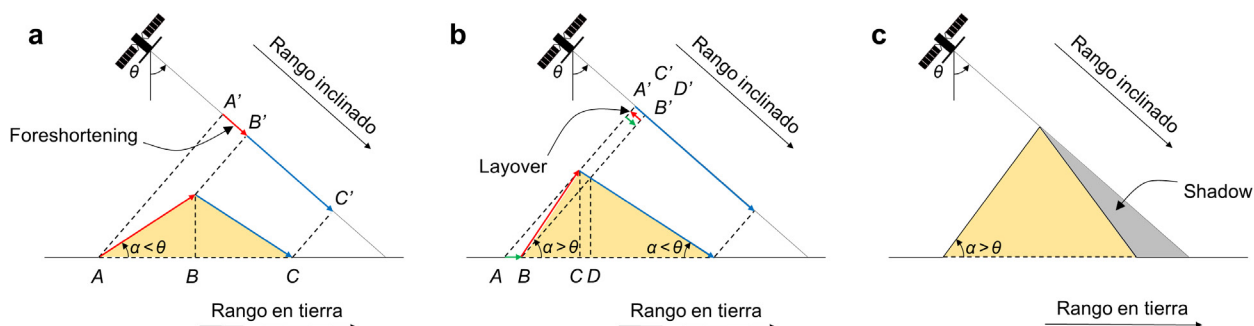


Figura 12: Distorsiones geométricas producidas por la topografía del terreno. El plano izquierdo de los triángulos representa la pendiente de la montaña orientada hacia el sensor. a) Efecto de *foreshortening*. b) Efecto de *layover*. c) Efecto de sombra o *shadow*. Imagen modificada de (Flores-Anderson et al., 2019).



Figura 13: A la izquierda, una imagen óptica de la costa malagueña adquirida por el satélite Sentinel-2 de la ESA, en la se aprecia la zona montañosa al norte de Estepona. A la derecha, una imagen de amplitud SAR de la misma zona sin **ortorrectificación**, adquirida por el satélite Sentinel-1 en órbita descendente, en la que podemos observar ejemplos de las diferentes **distorsiones geométricas** producidas por la topografía descritas en la Figura 12.

2.2 SATÉLITES SAR

Hay una amplia variedad de satélites SAR con diferentes modos de adquisición de datos.

Desde principios de los años 90, distintos proveedores comerciales y agencias espaciales han puesto en órbita una amplia gama de satélites SAR con diferentes características en relación con la banda de **frecuencia** (es decir, la **longitud de onda**) en la que operan, la **polarización de la señal**, la **resolución**, el tamaño de la imagen, el tiempo de revisita y la accesibilidad de datos. Dentro de este amplio abanico de posibilidades, lo idóneo es seleccionar la alternativa más adecuada para cada caso de estudio. La Figura 14 muestra la cronología de las misiones SAR pasadas, actualmente operativas y futuras, así como sus principales características. Nótese que, al disponer de un archivo histórico de imágenes SAR, es posible estudiar fenómenos ocurridos en el pasado. Algunas constelaciones, como la constelación Sentinel-1 de la ESA, realizan adquisiciones de forma sistemática y continua, proporcionando cobertura geográfica global y ofreciendo el catálogo completo de imágenes de manera libre y gratuita. No obstante, la gran mayoría de agencias espaciales (como la ASI), proveedores comerciales (como ICEYE) y proveedores de financiación público-privada (como DLR/HIDESAT), adoptan políticas de adquisición de datos a demanda. Esto implica que las imágenes se adquieren y almacenan únicamente a petición del usuario, y que además son de pago. Para fines científicos, en ocasiones, se ofrece la posibilidad de acceder a datos gratuitos o parcialmente financiados. La adquisición de datos a demanda también da lugar a que el archivo histórico de imágenes sea más reducido que cuando la adquisición es sistemática. La Tabla 2 muestra un resumen de las principales características de las constelaciones SAR comúnmente empleadas para medir desplazamientos de la superficie del terreno. En ella, las constelaciones se agrupan por agencia espacial proveedora, se ordenan por periodo operativo, y se indica la resolución de la imagen en las direcciones de **rango** (Rg) y **acimut** (Az) y, la cual puede variar según el **modo operacional del satélite**. El **ángulo de observación** no se refleja en la tabla, pero también varía en función de la constelación y del modo operacional considerados, aunque en general oscila entre 20° y 60°. La cobertura de la imagen se refiere al área total escaneada en cada adquisición (Moreira et al., 2013) y se describe en términos de dimensiones en las direcciones del **rango** y del **acimut**. Algunos satélites adquieren imágenes con dimensiones variables en la dirección del **acimut**, por lo que este valor no se especifica en la tabla. Por último, se incluye el tiempo que tarda un satélite en volver a iluminar una misma zona, que se conoce como “tiempo de revisita”. En el apartado 2.3 se listan los portales donde se puede acceder a los principales catálogos de imágenes de los distintos satélites SAR.

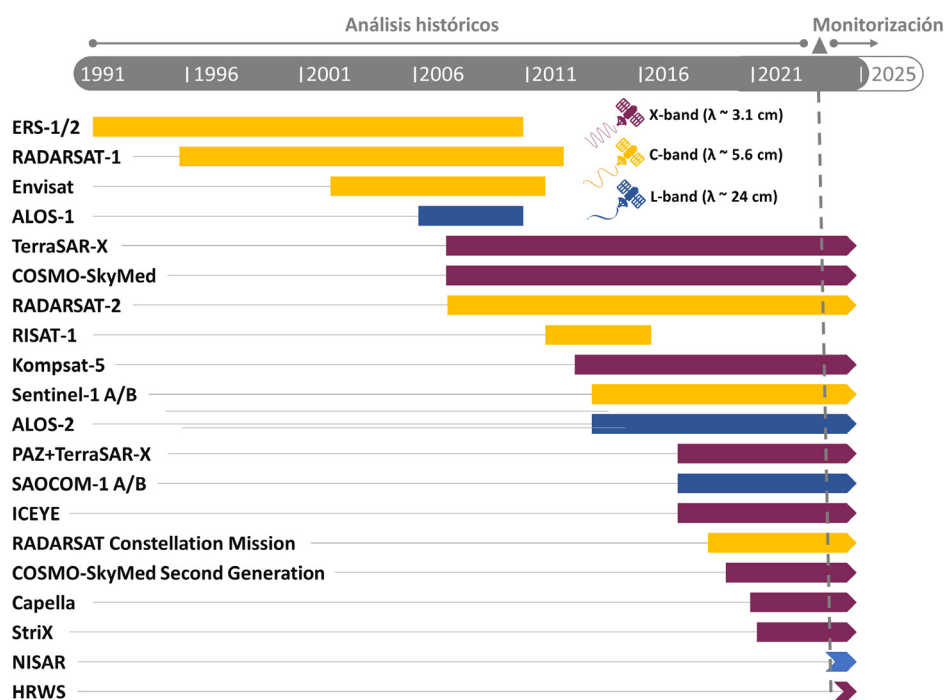


Figura 14: Cronología y bandas en las que operan las misiones SAR pasadas, presentes y futuras entre 1991 y 2025. Con los datos recopilados por los satélites SAR hasta la fecha actual (en este caso 2024, representada por un triángulo), es posible llevar a cabo análisis históricos. La continuidad de las misiones a lo largo del tiempo y la sustitución de algunos satélites cuando dejan de estar operativos por otros con características idénticas garantizan la capacidad de monitorizar los desplazamientos del terreno en el futuro. Figura modificada de (Macchiarulo et al., 2022).

Sensor satélite	Agencia espacial/ Proveedor	Vida útil	Longitud de onda	Resolución Rg x Az	Cobertura de la imagen	Tiempo de revisita	Acceso
ERS-1	ESA	1991-2001	Banda C $\lambda=5.6$ cm	26 x 6-30 m	100 km	35 días	Libre y gratuito
ERS-2		1995-2011*					
ENVISAT		2002-2012		~ 8 x 4 m			
Sentinel-1	ESA	Desde 2014	Banda C $\lambda=5.6$ cm	Stripmap: 5 x 5 m Interferometric Wide Swath (IW): 5 x 20 m Extra Wide Swath (EW): 20-40 m	Stripmap: 375 km IW: 250 km EW: 400 km	Satélite: 12 días Constelación: 6 días**	Libre y gratuito
ALOS-PALSAR	JAXA	2006-2011	Banda L $\lambda=23.6$ cm	FBS: 10x10 m FBD: 20x10 m PLR: 30x10 m ScanSAR: 100 m	FBS: 70 km FBD: 70 km PLR: 30 km ScanSAR: 250-350 km	46 días	
ALOS-2		Desde 2014		Spotlight: 1x3m Stripmap: 3-10 m ScanSAR: 25-100 m	Spotlight: 25x25 km Stripmap: 55x70 - 70x70 km ScanSAR: 355x355 km	14 días	
TerraSAR-X/PAZ	DLR/ HIDESAT	Desde 2007	Banda X $\lambda=3.1$ cm	Spotlight: 0.2x1.0- 1.7x3.5 m Stripmap: 3x3m ScanSAR: 18-40 m	Spotlight HR:5x5 km Spotlight:10x10 km Stripmap: 50x30 km ScanSAR: 150x100- 200x200 km	Satélite: 11 días Constelación: 4-7 días	Dependiente de la aplicación; restringido científico, comercial
COSMO- SkyMed	ASI	Desde 2007		Spotlight: ≤ 1 m Stripmap: 3-15 m ScanSAR: 30-100 m	Spotlight: 10x10 km Stripmap: 40x40 km ScanSAR: 100x100 - 200x200 km	Satélite: 16 días Constelación: ~horas	Comercial
RADARSAT-1	CSA	1991-2013	Banda C $\lambda=5.6$ cm	Standard: 25x28 m Fine: 9x9 m Wide1: 35x28 m Wide2: 35x28 m ScanSAR: 50x50 - 100x100 m	Standard: 100 km Fine: 45 km Wide1: 165 km Wide2:150 km ScanSAR: 305-510 km	24 días	1995-2008: Restringida 2008-2013: Comercial
RADARSAT-2		Desde 2007		Spotlight: ~1.5 m Stripmap: ~3x3- 25x25 m ScanSAR: 35x35- 100x100 m	Spotlight: 18x8 km Stripmap: 20-170 km ScanSAR: 300x300 - 500x500 km	24 días	Comercial
RADARSAT CM		Desde 2019		Very high, high, medium, and low-res modes (3- 100 m)	20x20-500x500 km	Satélite: 12 días Constelación: 4 días	Comercial
NISAR	NASA/JAXA	Programada 2024	Banda L $\lambda=24$ cm	3-20 m (mode dependent)	250 km	12 días	Libre y gratuito
SAOCOM	CONAE	Desde 2018	Banda L $\lambda=24$ cm	Stripmap: 10x10 m TopSAR: 100x100 m	Stripmap: >65 km TopSAR: 320 km	Satélite: 16 días Constelación: 8 días	Libre para determinadas zonas

* El uso de datos ERS-2 después de enero 2001 no está recomendado para aplicaciones InSAR debido al fallo de un giroscopio

** El 23/12/2021 uno de los dos satélites de la constelación Sentinel-1, el Sentinel-1B, sufrió una serie de anomalías relacionadas con la unidad del sistema de energía y dejó de enviar datos. Este problema persiste en el momento de escritura de este documento. El lanzamiento del satélite Sentinel-1C está previsto para el año 2024.

| **Tabla 2:** Principales características de los satélites y constelaciones SAR más importantes (Flores-Anderson et al., 2019).

2.3 CATÁLOGOS DE IMÁGENES SAR

Hay satélites cuyas imágenes son de acceso libre y gratuito, mientras que otras son de pago.

Los principales catálogos de imágenes SAR disponibles en la actualidad se recogen en la Tabla 3. A la hora de consultar los catálogos conviene destacar:

- Las franjas del terreno iluminadas por la **antena** (el **swath**) en cada paso orbital de cada satélite están numeradas y se denominan **tracks**.
- Una misma zona de estudio puede ser iluminada por dos **tracks** contiguos del mismo satélite registrados en diferentes momentos, entre los que suele existir cierto solape espacial (Figura 15).
- Los satélites SAR tienen varios modos de adquisición y ofrecen imágenes que varían desde datos en bruto hasta productos con un mayor nivel de procesamiento. Existen guías de usuario donde se describen las especificaciones y formatos de cada producto. Para aplicaciones interferométricas normalmente se emplean las imágenes tipo **SLC**.
- Ya sea para generar productos InSAR a partir de la información de **fase**, u otros productos a partir de la amplitud, es necesario que las imágenes que se van a procesar conjuntamente provengan del mismo tipo de sensor y **modo de adquisición**, se encuentren en el mismo **track** y hayan sido adquiridas en la misma órbita (ascendente o descendente).

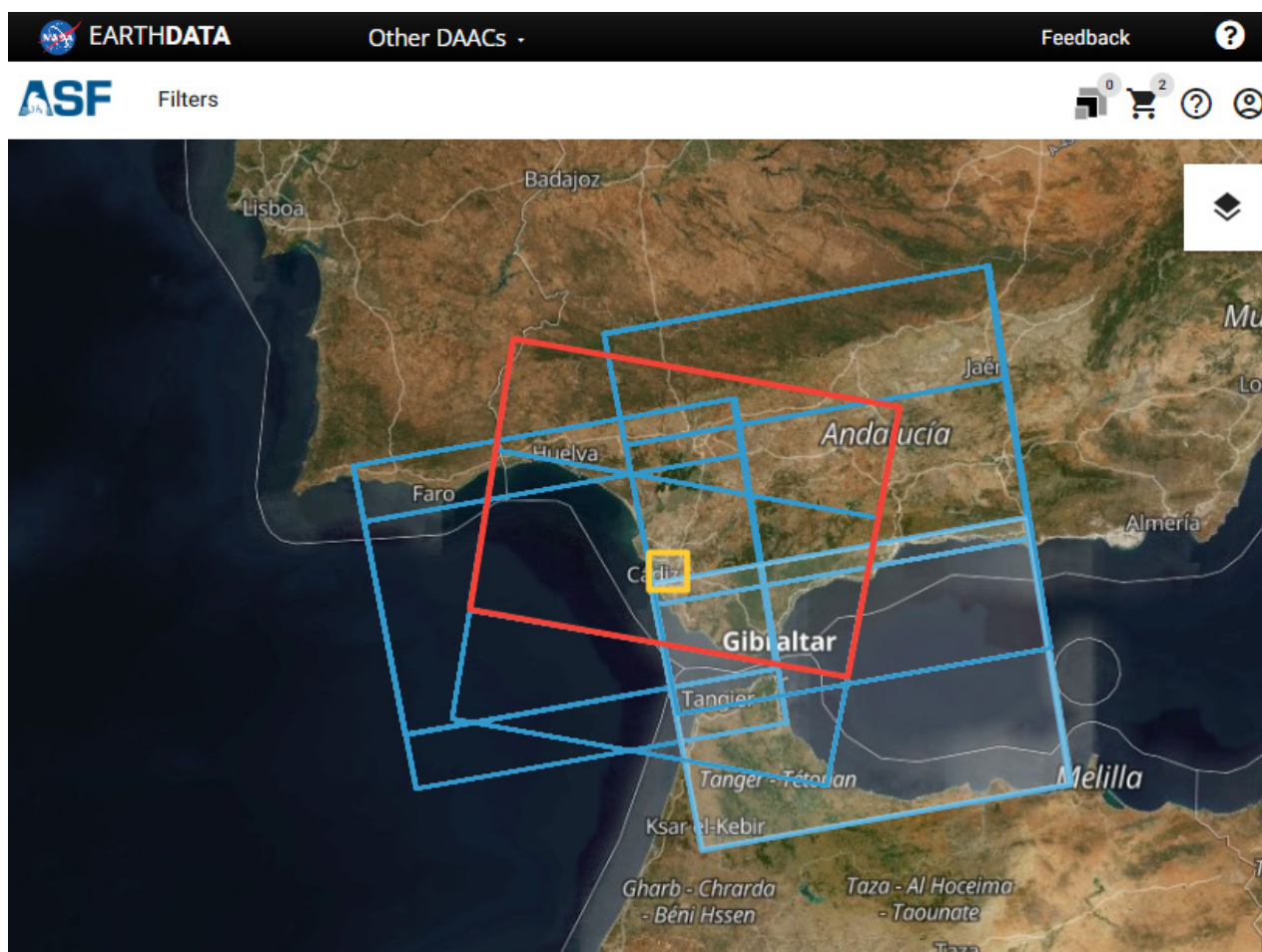


Figura 15: La zona de estudio marcada con el polígono amarillo está cubierta por dos tracks de la órbita ascendente y un track de la órbita descendente del satélite Sentinel-1. Captura del portal de imágenes ASF Data Search.

Satélite	Catálogos de datos	Guías usuario
ERS-1 y ERS-2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ESA EO Multimission Catalogue (EO CAT) https://eocat.esa.int/ ▪ NASA Earthdata https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=ers&fi=SAR ▪ ESA ERS and Envisat (A)SAR dedicated Online Dissemination Service http://esar-ds.eo.esa.int/socat/ASA_IMS_1P/search 	https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/ERS-products-specification-with-Envisat-format.pdf
ENVISAT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ESA EO Multimission Catalogue (EO CAT) https://eocat.esa.int/ ▪ ESA ERS and Envisat (A)SAR dedicated Online Dissemination Service http://esar-ds.eo.esa.int/socat/ASA_IMS_1P/search 	https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/ASAR-Product-Handbook.pdf/f8e2c953-2e3f-da26-dae8-c3db5f39b1aa?version=1.2&t=1610383274452
SENTINEL-1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Copernicus Open Access Hub https://dataspace.copernicus.eu/ ▪ ASF Data Search https://search.asf.alaska.edu/#/ 	https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar
TerraSAR-X y PAZ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TerraSAR-X Archive https://terrasar-x-archive.terrasar.com/ 	https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf
CosmoSky-Med	<ul style="list-style-type: none"> ▪ e-GEOS Portfolio of SAR commercial missions (es necesario darse de alta) https://www.cleos.earth/ccrz__CCSiteLogin?store=DefaultStore&cclcl=en_US 	https://www.asi.it/wp-content/uploads/2021/04/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description_rev3-1-1.pdf
ALOS PALSAR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ASF Data Search https://search.asf.alaska.edu/#/ 	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/handbk.htm https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf
ALOS-2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Earth Observation Data Utilization Promotion Platform https://satpf.jp/spf/?lang=en 	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos-2/datause/a2_format_e.htm

Tabla 3: Catálogos de imágenes SAR y enlaces a las guías de usuario.

2.4 INTERFEROMETRÍA SAR (INSAR) POR SATÉLITE APLICADA A LA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

El movimiento del terreno es tridimensional, pero la metodología InSAR puede medirlo solo en una dirección, en la dirección de la línea de visión (LOS).

Un interferograma es esencialmente un mapa de deformación entre dos fechas. Se crea a partir de dos imágenes SAR que deben haber sido adquiridas por el mismo sensor (misma longitud de onda y ángulo de visión), mismo modo de adquisición, misma polarización, misma área iluminada y misma órbita.

La interferometría radar (SAR Interferometry, InSAR) es una técnica consolidada de teledetección que permite la medición precisa de parámetros geofísicos tales como la topografía de la superficie y la deformación del suelo (Bamler and Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Massonnet and Feigl, 1998; Rosen et al., 2000). Este manual se centra únicamente en la aplicación del InSAR para medir las deformaciones del terreno, que en muchas referencias se denomina como interferometría diferencial (DInSAR). El InSAR se basa en estimar la diferencia, **pixel a pixel**, de la información de **fase** de dos imágenes SAR y un interferograma es el resultado de dicha operación. Supongamos que tenemos dos imágenes de un satélite SAR adquiridas sobre la misma zona, pero en diferentes momentos, donde la primera imagen (imagen de referencia) se tomó en un tiempo concreto (t_0) y la segunda imagen (imagen secundaria) se tomó unos días después ($t_0 + \Delta t$). La **fase** en cada **pixel** de las imágenes de referencia ($\Phi_{\text{Referencia}}$) y secundaria ($\Phi_{\text{secundaria}}$) vendrá definida por:

$$\Phi_{\text{Referencia}} = \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda} R_1 + \Phi_{\text{retrodispersión}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\Phi_{\text{Secundaria}} = \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda} R_2 + \Phi_{\text{retrodispersión}} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde el factor de multiplicación por 2 se debe al recorrido de ida (sensor-terreno) y vuelta (terreno-sensor) de la onda, R es la distancia entre el sensor y un punto del terreno y $\Phi_{\text{retrodispersión}}$ es la contribución de **fase** aleatoria relacionada con las propiedades de **retrodispersión** de la celda de resolución del terreno (ver subapartado 2.1.3.2). Como la contribución es diferente para cada **pixel**, la **fase** de una imagen SAR es aleatoria y no nos aporta ninguna información. Pero si suponemos que la $\Phi_{\text{retrodispersión}}$ del terreno permanece constante en el tiempo, la **fase** interferométrica (Ψ) únicamente dependerá de la diferencia de distancias (Δr) recorridas por la señal entre las dos imágenes. La **fase** interferométrica en cada **pixel** se calcula mediante la multiplicación de la imagen compleja de referencia, por la conjugada compleja de la secundaria:

$$\Psi = \Phi_{\text{Secundaria}} - \Phi_{\text{Referencia}} = \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{2\pi}{\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \Delta r \quad \text{Ecuación 3}$$

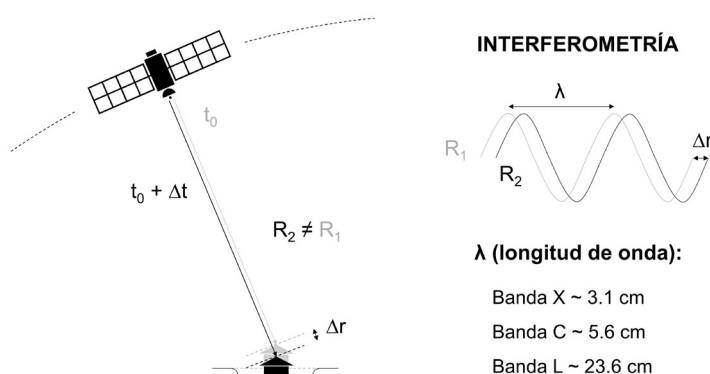


Figura 16: El cambio de **fase** entre dos imágenes SAR adquiridas sobre una misma zona en tiempos diferentes está intrínsecamente relacionado con el movimiento de la superficie del terreno. La flecha trazada desde el satélite hasta el terreno indica la dirección LOS (Line Of Sight), que representa el vector sensor-objetivo. Imagen modificada de <https://site.tre-altamira.com/insar/>.

Sin embargo, la **fase** interferométrica descrita en la Ecuación 3 es una simplificación que se basa únicamente en el cambio de las distancias recorridas que se produciría en el caso de que el terreno se haya desplazado (Figura 16). La diferencia de **fase** en realidad implica una adición de diferentes contribuciones, las cuales engloban el movimiento del terreno (Ψ_{def}), los efectos relacionados con la curvatura de la Tierra o efecto de la Tierra plana (Ψ_{tp}), la topografía (Ψ_{topo}), la variabilidad atmosférica asociada al período de tiempo comprendido entre los dos momentos de adquisición de las imágenes SAR (Ψ_{atm}), los cambios de las propiedades de **retrodispersión** del terreno con el tiempo (Ψ_{rtd}) y los errores intrínsecos del instrumental y procesado (ε):

$$\Psi_{\text{int}} = \Psi_{\text{def}} + \Psi_{\text{tp}} + \Psi_{\text{topo}} + \Psi_{\text{atm}} + \Psi_{\text{rtd}} + \varepsilon$$

Ecuación 4

Para extraer únicamente la componente asociada al desplazamiento del terreno es necesario eliminar los cinco últimos términos de la Ecuación 4. En condiciones ideales, cuando las contribuciones orbital, topográfica y atmosférica son despreciables, las propiedades del terreno son constantes y el nivel de ruido es bajo, los valores de **fase** de un interferograma son proporcionales al desplazamiento del terreno ocurrido entre las dos fechas de adquisición (Ψ_{def}). Sin embargo, esta circunstancia rara vez ocurre en la práctica. La contribución de la curvatura de la Tierra (Ψ_{tp}) se puede calcular y sustraer del interferograma de manera sencilla mediante el conocimiento de las órbitas precisas del satélite que se publican regularmente por los operadores de los mismos y un modelo del elipsoide terrestre. La determinación de la contribución topográfica (Ψ_{topo}) debe llevarse a cabo utilizando lo que se conoce como interferometría radar diferencial (Differential SAR Interferometry, DInSAR). Ésta se basa en compensar los efectos topográficos mediante la utilización de un modelo digital del terreno (MDT), a partir del cual se genera una **fase** sintética que se resta de la **fase** interferométrica. La corrección de la contribución atmosférica (Ψ_{atm}) puede ser compleja (por ejemplo, cuando se intentan medir deformaciones de gran longitud de onda y pequeña magnitud) y supone uno de los mayores desafíos de la comunidad científica InSAR. Por otro lado, la contribución debida a los cambios de **retrodispersión** del terreno Ψ_{rtd} no se pueden modelar. En el siguiente apartado se discutirá el efecto de estas contribuciones en los interferogramas.

La Figura 17 muestra la formación de un interferograma a partir de dos imágenes SAR adquiridas por un satélite sobre la misma zona en tiempos diferentes (t_0 y $t_0 + \Delta t$). Para facilitar la interpretación visual de la información, los interferogramas se representan en una escala de colores tipo arcoíris. Comúnmente se denomina franja (*fringe* en inglés) a un ciclo completo en el espectro de tonalidades desde el púrpura al rojo, que simboliza un ciclo completo de la **fase**, de 0 a 2π . La relación de la Ecuación 3 indica que un desplazamiento igual a la mitad de la **longitud de onda** genera un cambio de **fase** interferométrico de 2π , es decir, un ciclo de **fase**. Esto se debe a que el desplazamiento Δr es recorrido dos veces por el **pulso** de radar: una vez en la trayectoria sensor-terreno y una segunda vez de vuelta al sensor. Por tanto, el desplazamiento en LOS representado por una franja equivale a la mitad de la **longitud de onda** de la banda del sensor SAR ($\lambda/2$). El aspecto de las franjas se asemeja al de curvas de contorno en un mapa topográfico, donde podemos apreciar la variación relativa en la elevación entre cada curva, pero no conocemos el valor absoluto de la altitud. Para eliminar las repeticiones cíclicas en la información de **fase**, permitiendo una representación continua del desplazamiento entre dos fechas más fácil de interpretar, se utiliza el procedimiento de **desenrollado de fase** (*phase unwrapping*) que requiere operaciones matemáticas complejas (Ferretti et al., 2007a; Hanssen, 2001). Aunque existen diversos algoritmos de desenrollado (Yu et al., 2019), de forma simplificada y general, consiste en agregar el número adecuado de ciclos de **fase** a cada píxel de la imagen progresivamente, comenzando desde un punto de referencia dentro de la imagen SAR. Por este motivo las mediciones InSAR no son absolutas, sino que los datos hacen referencia a uno o varios puntos seleccionados dentro de la imagen SAR, supuestos inmóviles o con movimiento conocido.

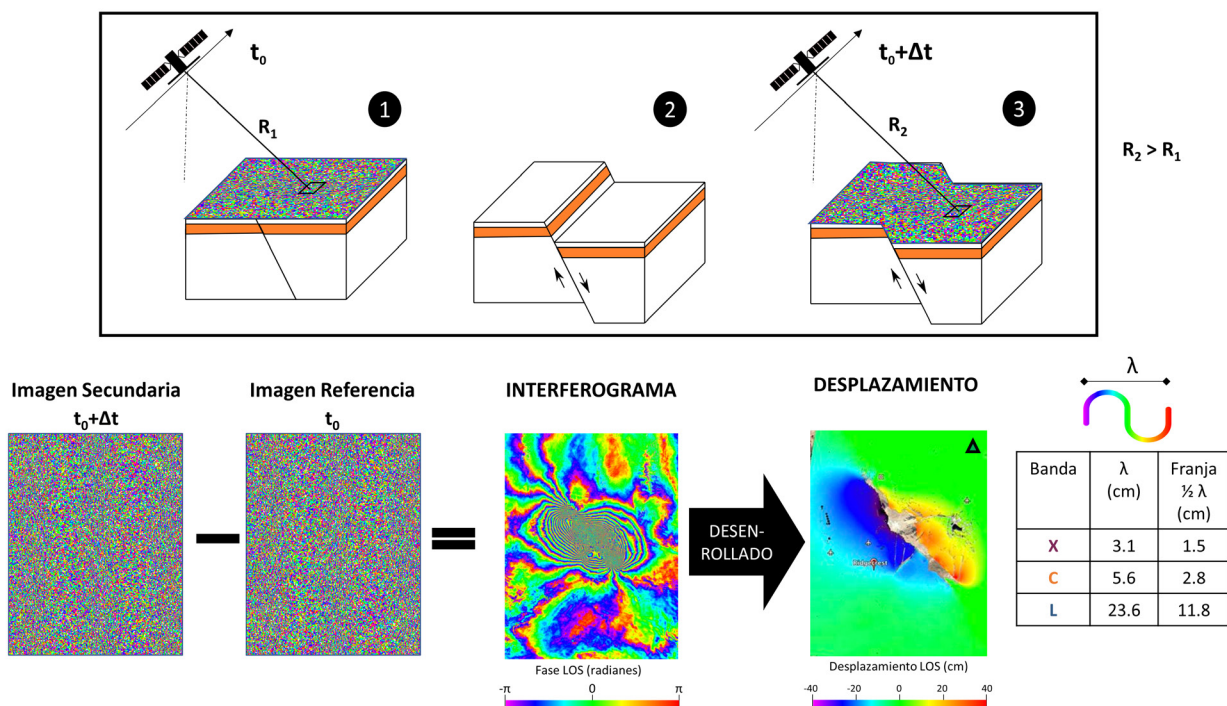


Figura 17: Explicación conceptual de la formación de un interferograma. El recuadro negro muestra la siguiente secuencia temporal: 1) El satélite adquiere una imagen SAR sobre una zona en un determinado momento (t_0). 2) Ocurre un desplazamiento del terreno (por ejemplo, debido a un terremoto). 3) Al cabo de los días ($t_0 + \Delta t$) el satélite sobrevuela la misma zona y adquiere otra imagen SAR. El *pixel* marcado con un polígono negro que representa una pequeña porción de la superficie del terreno se ha desplazado; la distancia entre el terreno y el sensor en esa coordenada ha aumentado ($R_2 > R_1$). En la parte inferior se muestran la información de *fase* de dos imágenes SAR, que se diferencian, *pixel a pixel*, para formar el interferograma. Suponemos que la contribución de la *fase* debida al movimiento del terreno (γ_{def}) domina y el resto de las contribuciones son despreciables (Ecuación 4). Cada franja de color del interferograma representa un cambio de *fase* (de $-\pi$ a π , o 2π) correspondiente a la mitad de la *longitud de onda* de la señal emitida. La secuencia de colores siempre debe definirse en una barra de escala en el interferograma, junto con la información de la banda empleada, porque no todos los interferogramas utilizan la misma secuencia de colores y no todos los satélites de radar tienen la misma *longitud de onda*. En el caso de que el interferograma se haya formado con dos imágenes en banda C (cuya *longitud de onda* es de 5.6 cm), cada franja de color (que va del púrpura al rojo) representa un desplazamiento de 2.8 cm. Podemos contar el número de franjas desde el exterior al interior y multiplicar el valor por 2.8 para obtener el desplazamiento total. También es fundamental establecer el criterio de signos para diferenciar si el terreno se aleja o se acerca desde la perspectiva del satélite (LOS), ya que dependiendo de la aplicación (si es para el estudio de volcanes o de subsidencia del terreno) se suele usar uno u otro. Tras el *desenrollado*, obtenemos un mapa del desplazamiento del terreno relativo al punto de referencia sin movimiento marcado con un triángulo verde. En este ejemplo, el interferograma *desenrollado* indica que un bloque de la falla se ha alejado del satélite tras el terremoto y el otro bloque se ha acercado con respecto a la posición del satélite.

A la hora de generar un interferograma a partir de dos imágenes SAR deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- La técnica InSAR solo permite combinar imágenes SAR adquiridas por el satélite en una configuración espacial idéntica. En términos generales, solo es posible generar interferogramas a partir de imágenes que provengan del mismo tipo de sensor (en general de mismo satélite o constelación, lo que implica misma *longitud de onda*), mismo ángulo de visión, mismo *modo de adquisición* y misma polarización. Además, las imágenes deben pertenecer al mismo *track* (misma área iluminada) y a la misma geometría (ascendente o descendente).
- Se recomienda seleccionar el *track* más apropiado para cada caso de estudio, de modo que la zona de interés se encuentre lo más alejada posible de los bordes de las imágenes SAR.
- Por lo general, para generar productos interferométricos se utiliza la polarización paralela (VV o HH). Además, se requiere que cada imagen utilizada en un par InSAR sea de la misma polarización: dos imágenes HH de la misma área podrían formar un par válido, mientras que una imagen HH con una VV de la misma área no sería válida.

2.5 CONTRIBUCIÓN ATMOSFÉRICA

Las imágenes SAR pueden experimentar alteraciones atmosféricas que introducen errores en las mediciones de desplazamiento.

Si bien se ha comentado que las imágenes SAR no se ven afectadas por la climatología, sí que se pueden producir alteraciones relacionadas con la situación de la troposfera (zona inferior de la atmósfera en contacto con la superficie terrestre) y la ionosfera que atraviesa la onda emitida (Hanssen, 2001). Estas alteraciones están relacionadas con variaciones espaciales y temporales de la temperatura, la presión y la humedad relativa. Las perturbaciones atmosféricas producen retrasos de **fase** de la onda, por lo que pueden introducir errores en las mediciones de desplazamiento de la superficie terrestre con InSAR ya que la trayectoria de la señal de cada una de las imágenes SAR puede verse afectada de forma diferente por la atmósfera (Ferretti et al., 2007a).

Existen fundamentalmente tres tipos de alteraciones atmosféricas:

- Efectos de la ionosfera: Estos efectos se producen por variaciones en la densidad de electrones libres y pueden ser bastante importantes para sensores SAR de baja **frecuencia** (banda L), pero tienen un impacto limitado en los análisis de InSAR basados en sensores de banda X o banda C (Rosen et al., 2010).
- Troposfera estratificada: correlacionado con la topografía debido a cambios en la presión, la temperatura y la humedad relativa con la altura.
- Troposfera turbulenta: patrones que varían aleatoriamente en tiempo y espacio, sin correlación con la topografía y que por tanto pueden suceder tanto en zonas montañosas como llanas. Pueden atribuirse a condiciones meteorológicas locales, efectos de aire convectivos intensos o diferentes ecosistemas. Esta contribución es la más compleja de eliminar.

Existen varios métodos para estimar y corregir la contribución atmosférica (Ψ_{atm}) en los interferogramas. En el caso de la ionosfera se emplean métodos de procesamiento de señales y filtros de polinomios de bajo orden (Meyer, 2011). En el caso de la troposfera se emplean relaciones empíricas lineales o no-lineales con la topografía, modelos atmosféricos globales o locales y correlaciones con retardos de señal de estaciones **GNSS** (Bekaert et al., 2015; Kirui et al., 2021).

2.6 DECORRELACIÓN Y COHERENCIA INTERFEROMÉTRICA

La coherencia es un indicador de la calidad de las medidas de la fase interferométrica.

La decorrelación es un fenómeno que ocurre cuando ciertos píxeles de dos imágenes SAR, que representan la misma ubicación geográfica, carecen de la calidad de fase necesaria para extraer información del desplazamiento al generar un interferograma con ambas imágenes. En otras palabras, estos píxeles no mantienen una correlación adecuada en términos de fase, dificultando el proceso de obtención de información significativa mediante la interferometría SAR. Uno de los estimadores de calidad de fase más común es la coherencia interferométrica (Hanssen, 2001), cuyo módulo proporciona una estimación de la precisión de la fase interferométrica. En la práctica, la coherencia toma valores entre $[0, 1]$, donde 1 representa correlación máxima (totalmente coherente, toda la información de fase se conserva) y 0 mínima (sin coherencia, la señal es todo ruido).

Cuando utilizamos sistemas satelitales SAR, hay un gran número de fuentes de decorrelación que pueden afectar a la coherencia y, por tanto, comprometen la calidad de la fase interferométrica. Estas fuentes son multiplicativas, lo que significa que la coherencia total es el resultado de la contribución de todas ellas (Zebker and Villasenor, 1992):

- Decorrelación de **línea de base espacial** o geométrica causada por la diferencia en los ángulos de incidencia entre las dos adquisiciones.
- Decorrelación volumétrica causada por la penetración de la onda radar en un medio de dispersión (por ejemplo, en hielo).
- Diferencias de Doppler causada por las diferencias en los centroides Doppler entre las dos adquisiciones.

- Ruido térmico o del sistema causado por las características del sistema SAR incluidos los factores de ganancia y las características de la antena.
- Decorrelación inducida por factores inherentes a los algoritmos elegidos (como imprecisiones en el corregistrado).
- Errores de la información orbital de los satélites.
- Falta de precisión de los MDT empleados.
- Decorrelación temporal.

A continuación, explicaremos la última fuente de decorrelación con algo más de detalle, ya que en los ejemplos del apartado 4 haremos mención a este fenómeno en varias ocasiones. Para profundizar en el tema se recomienda consultar el capítulo 4 de Hanssen (2001).

La decorrelación temporal se produce en un interferograma cuando la contribución de **fase** relacionada con las propiedades de **retrodispersión** del terreno (Ψ_{rtd}) no se mantienen constantes en el tiempo. Esto sucede cuando los reflectores o dispersores de señal dentro de una celda de resolución cambian y por tanto la suma total de la **fase** también lo hace (ver subapartado 2.1.3.2 y Figura 8). Algunos ejemplos de modificaciones en la superficie del terreno que pueden producir decorrelación temporal incluyen el crecimiento de vegetación, diversos estadios de cultivos agrícolas y cambios en el uso del suelo. Es importante tener en cuenta que la decorrelación temporal está relacionada con la **longitud de onda** del satélite SAR. Los interferogramas formados con imágenes SAR en las bandas X o C experimentarán una decorrelación temporal en áreas con vegetación, debido a que la orientación y ubicación de las hojas y ramas que generan la **dispersión** volumétrica de la señal en estas longitudes de onda (consultar Figuras 6 y 9) varían significativamente con el tiempo. En cambio, en la banda L, que tiene la capacidad de penetrar la cobertura vegetal, la decorrelación será menor. También debe considerarse que, de forma general, en terrenos no urbanos y sin vegetación, cuanto mayor sea la **línea de base temporal** entre las dos adquisiciones SAR utilizadas para realizar un interferograma, mayor será el efecto de la decorrelación temporal. Esto se debe a que es más probable que la distribución de los reflectores o dispersores de señal dentro de una celda de resolución haya cambiado.

La Figura 18 muestra la relación entre el tipo de suelo, la coherencia interferométrica y el ruido presente en un interferograma creado a partir de dos imágenes del satélite Sentinel-1 (banda C) que cubren la isla de La Palma (España). Las zonas vegetadas en el norte y este de la isla coinciden con las regiones de baja coherencia interferométrica (zonas oscuras que representan valores cercanos a cero) y con las zonas ruidosas (de aspecto similar al del confeti) en el interferograma. Por el contrario, las zonas rocosas, urbanas y con escasa vegetación tienen mayor coherencia interferométrica y mayor nitidez de las franjas interferométricas. Es importante señalar que las islas volcánicas oceánicas con grandes desniveles, como en este caso, también son propensas a experimentar efectos troposféricos laminados y turbulentos que pueden distorsionar significativamente los interferogramas diferenciales.

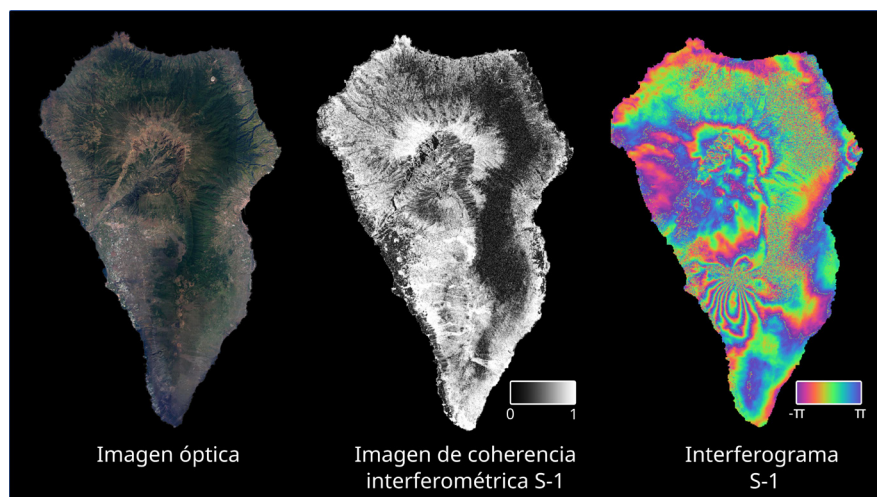


Figura 18: Imágenes de la isla de La Palma (Canarias, España) de izquierda a derecha: óptica, coherencia interferométrica e interferograma. El interferograma que se muestra está formado por una imagen en órbita descendente previa (16/09/2021) y posterior (22/09/2021) al comienzo de la erupción del volcán de Tajogaite (19/09/2021). Las franjas en forma de mariposa muestran la deformación del terreno producida por el ascenso del magma a la superficie (De Luca et al., 2022; Ezquerro et al., 2023; Fernández et al., 2022). Las franjas en el resto de la isla pueden ser debidas a errores atmosféricos, ya que en este interferograma no se ha realizado la corrección de la contribución de la **fase** atmosférica (Ψ_{atm}). La topografía abrupta y la climatología local de la isla (afectada frecuentemente por los vientos alisios) hacen que la contribución atmosférica sea relevante y difícil de corregir (González et al., 2010).

2.7 TÉCNICAS INSAR: VELOCIDAD Y SERIES TEMPORALES DEL DESPLAZAMIENTO

Las técnicas InSAR multitemporales generan mapas con información sobre la velocidad media en el periodo estudiado y series temporales de desplazamiento en cada punto de medida.

Las limitaciones relacionadas con la decorrelación temporal, así como con los errores debidos a residuos topográficos y artefactos atmosféricos (Hanssen, 2001) anteriormente descritos, pueden minimizarse empleando las técnicas de interferometría radar diferencial avanzadas o multitemporales. En muchas referencias estas técnicas se denominan como *Advanced Differential Interferometric SAR* (A-DInSAR) o *Multi-temporal Differential Interferometric SAR* (MT-DInSAR), pero en este documento se utiliza el término común “técnicas InSAR”. Estas técnicas se basan en el empleo de múltiples interferogramas formados a partir de un conjunto de imágenes SAR adquiridas sobre una misma zona (Figura 19). En estos interferogramas se identifican píxeles o conjuntos de píxeles adyacentes cuyas propiedades de **retrodispersión** se mantienen constantes en el tiempo. Estos píxeles son seleccionados como puntos de medida para calcular las velocidades y las series temporales de desplazamiento, que en condiciones óptimas pueden alcanzar niveles de **exactitud** de deformación milimétrica (Casu et al., 2006; Ferretti et al., 2007b; Lanari et al., 2007). En algunos softwares InSAR, los resultados se presentan como un fichero de datos de puntos, por ejemplo, en formato csv o shapefile. Por este motivo, es común utilizar indistintamente los términos “píxel” y “punto” para hacer referencia a la información contenida en los mapas de velocidad y las series temporales.

En las últimas dos décadas, las técnicas InSAR se han consolidado como una de las herramientas de teledetección más ampliamente utilizadas, tanto en el ámbito científico como en el comercial, para estudiar la evolución espacio-temporal de la deformación en la superficie terrestre. En comparación con los métodos de monitorización in-situ, que a menudo limitan la adquisición de datos a los puntos donde se estaciona la instrumentación, las técnicas InSAR proporcionan una elevada densidad espacial de puntos de medida. Asimismo, ofrecen información cuantitativa sobre la velocidad de desplazamiento media y la **serie temporal** de desplazamiento en cada punto de medida.

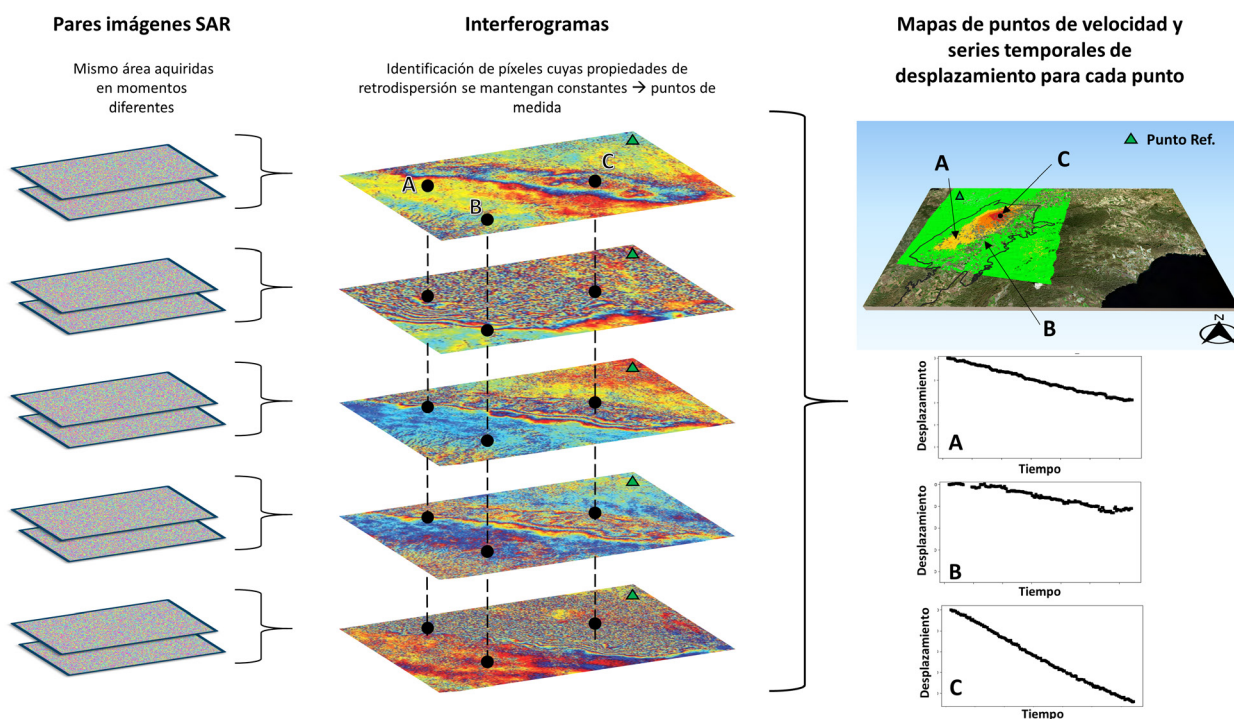


Figura 19: Diagrama explicativo sobre la obtención de puntos de medida que dan lugar a los mapas de velocidad y series temporales de desplazamiento (InSAR multitemporal). Cada punto de medida lleva asociada su posición geográfica (coordenadas), el valor promedio de velocidad LOS durante el periodo analizado y los valores de desplazamiento LOS para cada fecha de adquisición de las imágenes SAR utilizadas en el procesamiento (es decir, la serie temporal). Es importante tener en cuenta que las medidas de velocidad y desplazamiento no son absolutas, sino que están dadas con respecto a un punto de referencia que se considera estable o cuyo movimiento es conocido.

2.7.1 Métodos de selección de puntos de medida

Principalmente, existen dos tipos de técnicas de procesamiento multitemporal InSAR que se diferencian en el criterio que emplean para seleccionar los puntos de medida: las que se basan en el uso de la amplitud y las que se basan en la coherencia. Los métodos basados en la amplitud se fundamentan en la selección de píxeles individuales en los que un dispersor predominante controla la respuesta de la señal dentro de la celda de resolución de manera continua en el tiempo (véase Figura 20). Estos píxeles se conocen como reflectores persistentes (*Persistent Scatterers*, PS) y son característicos de la **dispersión** de doble rebote producida por superficies relativamente lisas y perpendiculares entre sí, como los edificios, lo que resulta en una alta intensidad de la señal retrodispersada (consultar subapartado 2.1.3.1). Por esta razón, el método PS es el más adecuado para estudiar desplazamientos en zonas urbanizadas. Además, al seleccionar puntos de medida en píxeles individuales, se mantiene la **resolución espacial** original de las imágenes SAR empleadas.

Por otro lado, los reflectores distribuidos (*Distributed Scatterers*, DS) representan píxeles en los que no existe un reflector dominante dentro de la celda de resolución, sino que varios reflectores pequeños ejercen una influencia similar en la respuesta SAR. En este caso, la respuesta en **fase** y amplitud de la señal retrodispersada será la suma de las interacciones que la señal tenga con los pequeños reflectores, lo que provoca variaciones en el tiempo y, por tanto, fenómenos de decorrelación temporal (Figura 20). En estas circunstancias, se emplea una operación denominada *multilook* (ML), que consiste en definir una ventana bidimensional en la cual se promedia la respuesta de varios píxeles vecinos reduciendo la contribución de ruido a la fase (Lee et al., 1998; Pepe and Calò, 2017) (Figura 21). Generalmente el punto de medida resultante estará localizado en el centro del conjunto de píxeles y será representativo del área ocupada por ellos, lo que implica una pérdida de **resolución espacial** en comparación con la de las imágenes SAR originales. La elección del tamaño de la ventana para el *multilook* es, por tanto, un compromiso entre una mejor coherencia y una menor resolución.

Figura 20: Reflector persistente (*Persistent Scatterer*, PS), a la izquierda, vs reflector distribuido (*Distributed Scatterer*, DS), a la derecha. La presencia de un PS (objetivo brillante y estable) en una celda de resolución domina y estabiliza la medición de **fase**. La **fase** de DS cambia rápidamente con el tiempo debido al movimiento relativo de los dispersores igualmente brillantes dentro de una celda de resolución.

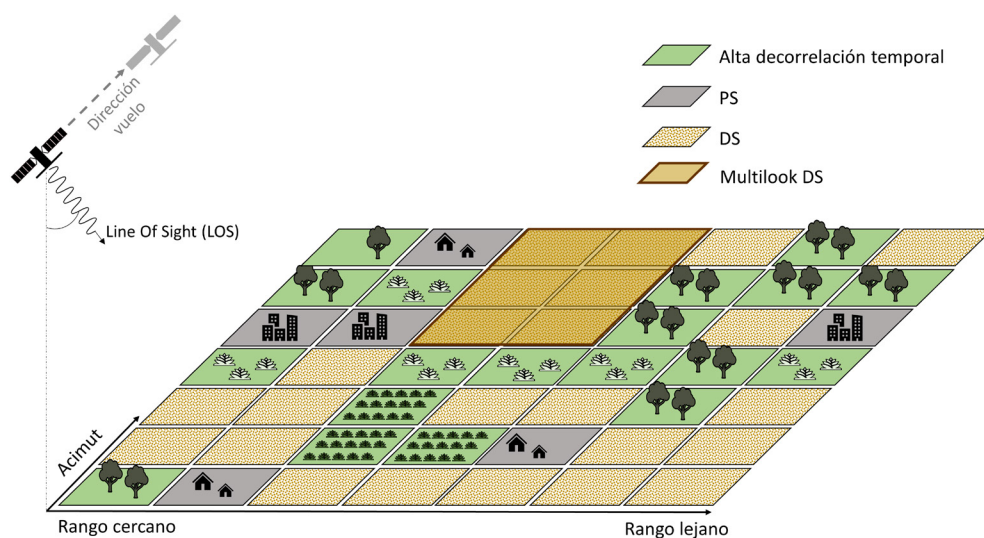
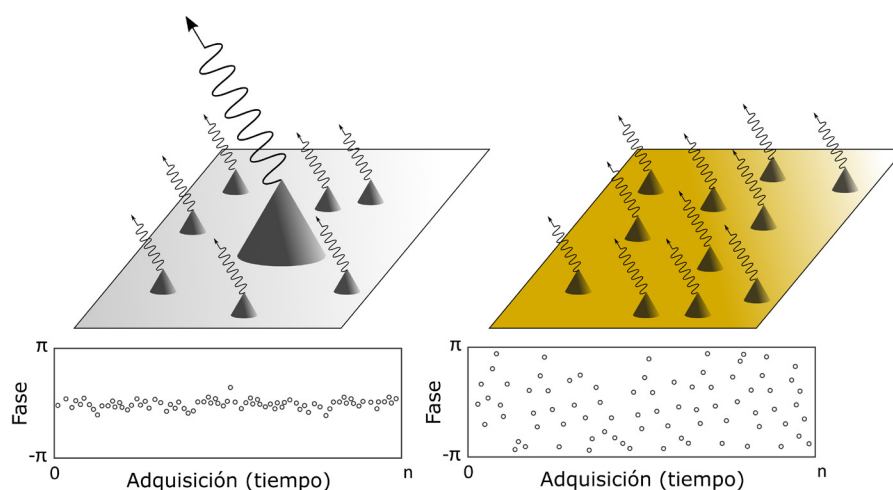


Figura 21: Ilustración conceptual que representa celdas de resolución de una imagen SAR y relación entre los usos del suelo y los distintos tipos de reflectores (PS o DS).

2.7.2 Métodos de formación de redes interferométricas

Para formar el conjunto o red de interferogramas a partir de múltiples pares de imágenes SAR tomadas en diferentes momentos existen esencialmente dos métodos (Figura 22). El primero utiliza una única imagen SAR de referencia (*Single Reference*), que se compara **pixel a pixel** con todas las imágenes SAR restantes. Esto resulta en un número total de interferogramas igual a $N-1$, siendo N el número de imágenes SAR. De esta forma, la red de interferogramas se articula en torno a una imagen central, a partir de la cual se generan interferogramas con todas las demás imágenes en un esquema radial. Generalmente, las técnicas de procesamiento por PS aplican el método *Single Reference*. El segundo método vincula múltiples imágenes SAR unas con otras (*Multi-Reference*), formando un mayor número de interferogramas (Figura 22). El criterio de selección de dos imágenes SAR para formar un interferograma en el método *Multi-Reference*, consiste en minimizar tanto la **línea de base espacial** (distancia entre las posiciones del satélite en dos momentos diferentes de adquisición de imágenes SAR), como la **línea de base temporal** (período de tiempo comprendido entre los dos momentos de captura de las imágenes). Este criterio de selección se denomina configuración de línea de base pequeña (*Small Baseline*). El empleo de líneas de base temporales cortas permite reducir la decorrelación temporal. El método *Multi-Reference* suele aplicarse a técnicas de procesamiento por DS, aunque algún método también lo aplica a PS (Minh et al., 2020).

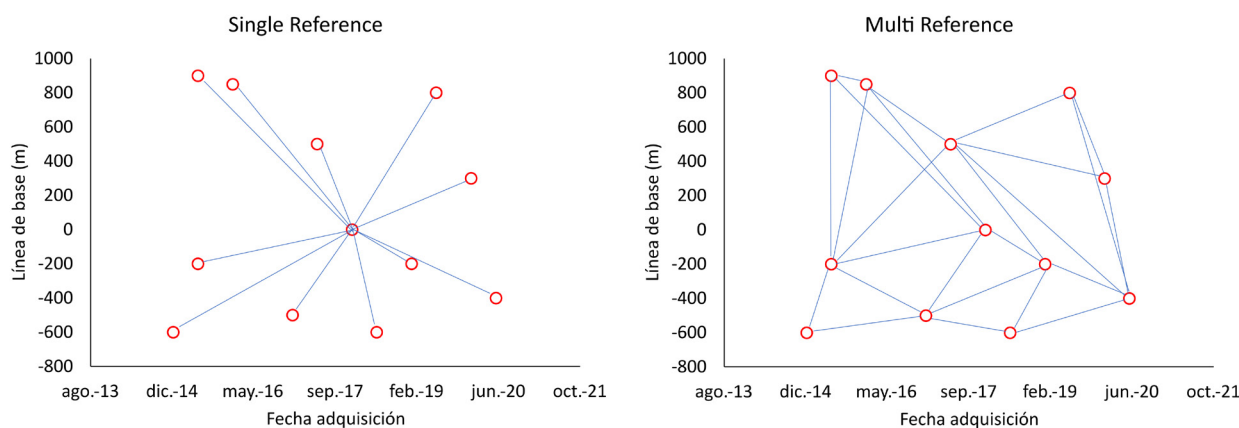


Figura 22: Métodos de formación de redes interferométricas. Cada círculo rojo representa una imagen SAR y las líneas azules representan el interferograma formado entre dos imágenes SAR.

2.7.3 Algoritmos empleados en las técnicas InSAR

Existen numerosos algoritmos que abordan el procesamiento de imágenes SAR con el fin de extraer velocidades promedio y series temporales de desplazamiento de la superficie del terreno. Estos algoritmos emplean alguno de los métodos de selección de puntos de medida y formación de interferogramas descritos previamente, e incluso en ocasiones utilizan métodos híbridos. Asimismo, emplean diferentes modelos de deformación para extraer las series temporales. Para obtener una visión general y más información acerca de los diferentes algoritmos de InSAR multitemporal disponibles hoy en día, se recomienda consultar artículos científicos de revisión y sus referencias (Crosetto et al., 2016; Minh et al., 2020; Osmanoğlu et al., 2016). Independientemente del algoritmo empleado, para aplicar la técnica InSAR es necesario llevar a cabo una serie de pasos básicos de manera secuencial, tal y como se muestra de forma conceptual en la Figura 23 (Casu et al., 2014). Dichos pasos pueden resumirse como sigue:

1. Preparación de los datos de entrada. **Enfoque** de las imágenes SAR en bruto (tipo **RAW**) empleando información orbital y de **Doppler**. Este es un paso complejo que no es necesario realizar si se utilizan directamente imágenes SAR ya focalizadas del tipo **SLC**. Asimismo, es necesario un modelo de elevación digital (MDE) externo del área de estudio que se convierte a coordenadas de imagen SAR.
2. **Corregistrado** o alineación precisa del conjunto de las imágenes SAR utilizando el MDE externo y las órbitas precisas. El **corregistrado** es un requisito estricto y componente crítico de cualquier cadena de procesamiento interferométrico. Es un paso esencial tras el que cada píxel (que representa una misma porción de terreno) queda perfectamente alineado en todas las imágenes SAR.

3. Generación de interferogramas mediante alguno de los métodos descritos en el subapartado 2.7.2. En este paso se calculan las diferencias de **fase** píxel por píxel de todos los pares de imágenes SAR considerados (ver apartado 2.4).
4. Selección de los píxeles o conjuntos de píxeles candidatos a ser puntos de medida (ver subapartado 2.7.1), estimación/modelización y eliminación de los efectos atmosféricos y orbitales y **desenrollado** de las fases obtenidas.
5. Cálculo de la velocidad de desplazamiento media y los desplazamientos acumulados (series temporales).

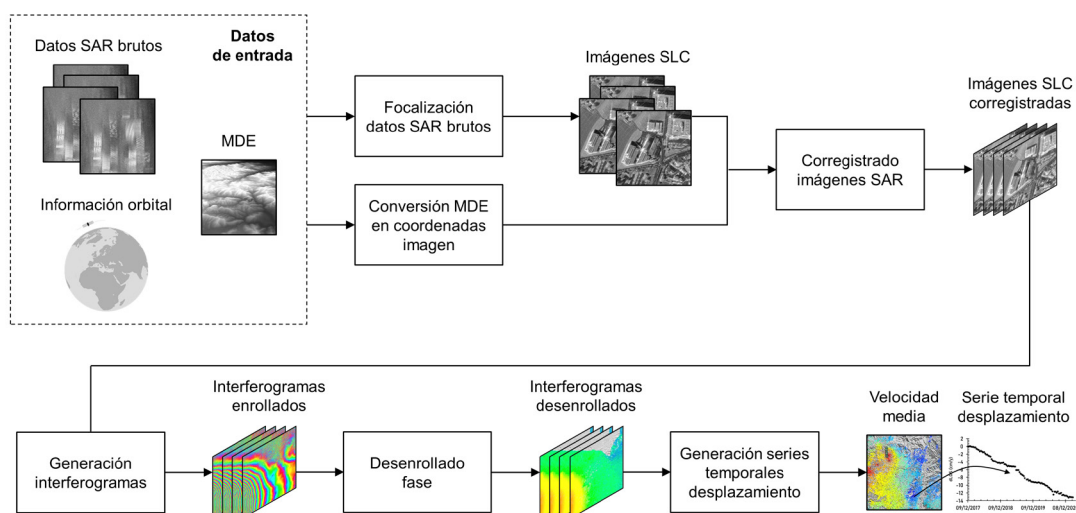


Figura 23: Bloque diagrama mostrando los pasos principales del procesamiento InSAR multitemporal. Imagen modificada de (De Luca et al., 2015).

2.8 INTERPRETACIÓN DE DATOS INSAR: RECOMENDACIONES GENERALES

La interpretación de los datos InSAR puede ser compleja y debe hacerse con precaución, considerando las limitaciones propias de la técnica.

Si bien la técnica InSAR es una herramienta muy potente para detectar y monitorizar movimientos del terreno asociados a diferentes procesos geológicos y antrópicos, la interpretación de los resultados que genera a menudo representa una tarea compleja. Esto se debe principalmente a las limitaciones intrínsecas de la técnica, ya que las mediciones no son absolutas, sino relativas a un punto de referencia y a la línea de visión del satélite, como se detalla más adelante. Cuando las condiciones son óptimas, es decir, cuando se comprende bien el fenómeno causante de la deformación del terreno y la zona responde favorablemente al radar (por ejemplo, con una topografía poco influyente, sin efectos atmosféricos y propiedades de **dispersión** adecuadas), la interpretación suele resultar sencilla y concluyente. Sin embargo, bajo condiciones menos óptimas, como en grandes áreas donde no se tiene un conocimiento preciso de los distintos procesos activos, con presencia de vegetación y topografía desigual, la interpretación de los resultados puede ser complicada. En este contexto, es esencial que los usuarios finales conozcan las características principales de las imágenes SAR, los fundamentos del InSAR y las limitaciones de la técnica.

A continuación, se enumeran aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar datos InSAR:

- La capacidad de la técnica InSAR para detectar movimientos en la dirección norte-sur es muy limitada, debido a la geometría de observación y a las órbitas cuasi-polares de los satélites SAR. Por tanto, la técnica InSAR es adecuada para detectar únicamente las componentes este-oeste y vertical del desplazamiento.

- La técnica InSAR mide la componente proyectada del desplazamiento real a lo largo de la línea de visión (LOS) del satélite. Es decir, mide si el terreno se aleja o se acerca al satélite en una dimensión, a pesar de que el movimiento que ocurre en la realidad sea tridimensional (Figura 24). Si por ejemplo consideramos la órbita ascendente, el movimiento del terreno hacia el satélite puede ocurrir cuando el suelo se eleva, se desplaza hacia el oeste, o una combinación de ambos. Del mismo modo, el movimiento alejándose del satélite puede corresponder a un desplazamiento hacia abajo y/o hacia el este. Además, pueden existir otras combinaciones. Por ejemplo, podríamos identificar un alejamiento en LOS en la órbita ascendente mediante una combinación en la que haya un marcado desplazamiento hacia abajo y un desplazamiento más limitado hacia el oeste. La cuestión radica en cómo se compensan las direcciones del movimiento al sumarse. Esta particularidad de las mediciones InSAR debe tenerse en cuenta si se comparan con otras técnicas que miden el desplazamiento en 3D (por ejemplo, desplazamientos a partir de datos [GNSS](#)).

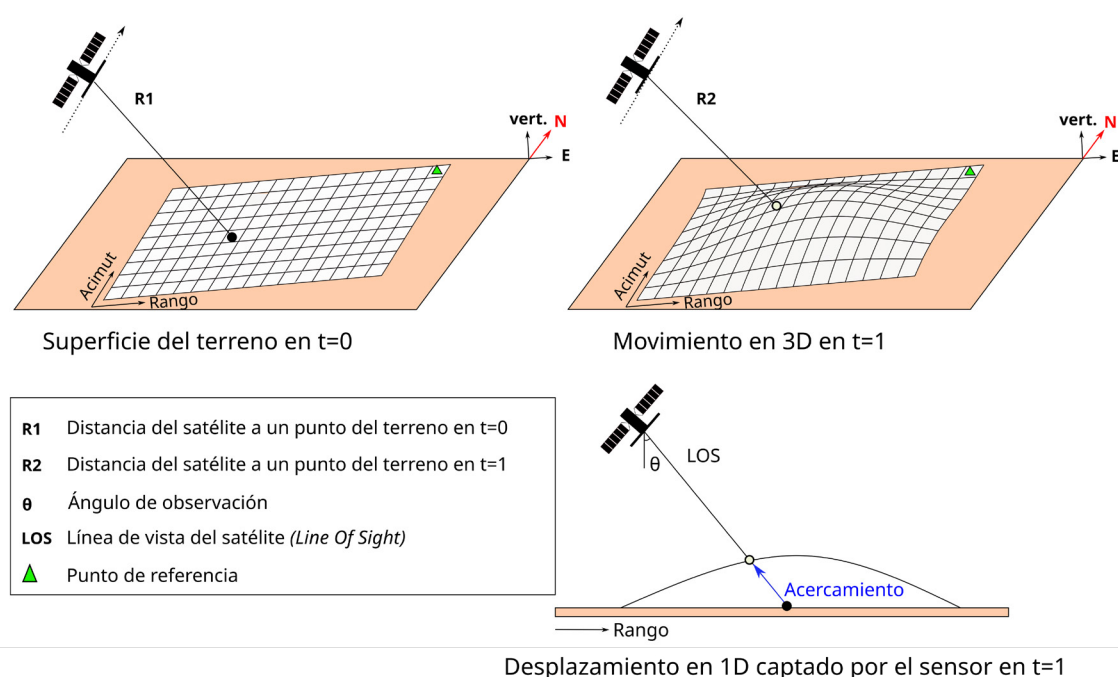


Figura 24: Representación de la medición en la dirección de LOS de los satélites SAR. El satélite en órbita ascendente adquiere una imagen del terreno en el momento $t=0$. La imagen SAR, o un recorte de la misma, está representada por una matriz de píxeles en la figura. La dirección de acimut o de vuelo del satélite no coincide exactamente con el norte geográfico, sino que forma un cierto ángulo (*ángulo de acimut*). Esta es la razón por la cual se denomina a las órbitas de los satélites SAR cuasi-polares y no polares. La distancia entre el satélite y un punto del terreno en $t=0$ es $R1$. Antes del segundo paso del satélite ($t=1$) se produce un abombamiento de la superficie del terreno, que tiene componentes de desplazamiento en 3D (N-S, E-O y vertical). El satélite mide la nueva distancia entre el sensor SAR y el terreno ($R2$) a lo largo de su línea de visión (LOS). La magnitud del acercamiento del terreno al satélite se puede cuantificar mediante la diferencia entre $R1$ y $R2$. En la imagen SAR representada por una matriz de píxeles se ha identificado una zona o un punto que no se ha deformado (triángulo verde). Por tanto, en este punto el desplazamiento es igual a cero y sirve como referencia del conjunto de datos InSAR. Si, por ejemplo, escogemos como referencia una zona que se ha acercado 5 cm en LOS, todos los resultados InSAR tendrán un sesgo de 5 cm. El orden de los factores en la resta entre $R1$ y $R2$ determinará el signo (positivo o negativo) de la magnitud del desplazamiento. Conociendo el *ángulo de acimut* y el *ángulo de incidencia* podemos proyectar el vector de desplazamiento LOS en las componentes vertical y horizontal (E-O) mediante cálculos trigonométricos (Catalão et al., 2011; Hu et al., 2014). Sin embargo, esta aproximación asume que la componente N-S del desplazamiento es nula, lo cual no siempre se corresponde con la realidad.

- Las medidas InSAR son relativas, es decir, están referidas a un punto o zona de referencia dentro del área de interés procesada que se considera estable o sin movimiento (ver apartado 2.4). El área de interés puede abarcar toda la extensión de la imagen SAR o un recorte de ésta. Si el punto o zona de referencia seleccionado experimenta desplazamientos, estos podrían influir en los datos, lo que resultaría en la introducción de un sesgo.
- El criterio de signos adoptado puede variar entre los diferentes algoritmos InSAR y siempre debe ser conocido por el usuario final de los datos. Esto es fundamental para poder interpretar correctamente si el movimiento del terreno es de alejamiento o de acercamiento con respecto a la posición del satélite.

- En aquellos casos en los que se dispone de datos LOS en órbita ascendente y descendente, que cubren el mismo periodo y la misma zona, pueden calcularse las componentes del desplazamiento vertical (elevación - hundimiento) y horizontal (este - oeste) (Figura 25). Para ello es necesario conocer los **ángulos de acimut** y el **ángulo de incidencia** y realizar unos cálculos trigonométricos sencillos (Catalão et al., 2011; Hu et al., 2014). La principal limitación de esta aproximación es que asume que la componente norte-sur del movimiento es despreciable, debido a que el InSAR tiene casi nula sensibilidad a los movimientos en esa dirección.
- Cada procesado InSAR proporciona unos niveles de **precisión** y **exactitud** específicos.

- La **precisión** suele expresarse en términos de la desviación estándar de las medidas de desplazamiento para cada fecha o de la velocidad, y depende de varios factores, como la calidad de los dispersores (por ejemplo, de su coherencia) y del número de observaciones disponibles (Adam et al., 2009; Cigna and Sowter, 2017). Dado el gran número de variables implicadas, no es sorprendente que, incluso explotando los mismos conjuntos de imágenes SAR, distintos enfoques de procesado InSAR conduzcan a resultados algo diferentes. Por este motivo resulta esencial evaluar la **precisión** de cada procesado.
- Por otro lado, la **exactitud** indica los errores sistemáticos de las estimaciones InSAR frente a los valores reales (o mediciones externas independientes que tomamos como valores de referencia). Cuando sea posible, es recomendable validar las mediciones obtenidas utilizando datos independientes como, por ejemplo, medidas de deformación a partir de datos GNSS, de nivelación, medidas InSAR a partir de datos de otros satélites, etc. (Bovenga et al., 2013; Casu et al., 2006; Cigna et al., 2021; Ferretti et al., 2007b; Quin and Loreaux, 2012). Esta validación puede informar sobre la capacidad del InSAR para proporcionar estimaciones fiables sobre el proceso de deformación bajo investigación. En condiciones óptimas, se ha demostrado que la exactitud puede alcanzar unos 5 mm para una sola medición de desplazamiento y de alrededor de 1 mm/año para velocidad promedio de desplazamiento (Casu et al., 2006; Ferretti et al., 2007b).

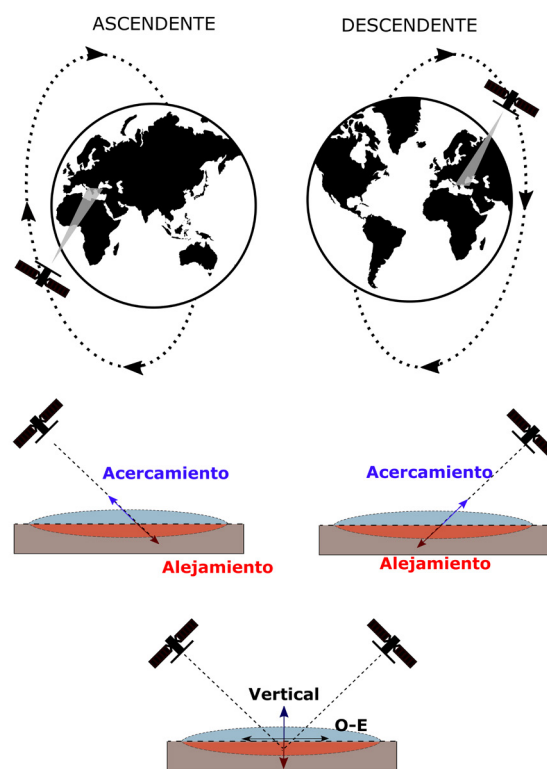


Figura 25: A partir de los datos de desplazamiento obtenidos de las imágenes SAR con órbitas ascendente y descendente que cubren el mismo periodo y la misma zona, pueden calcularse las componentes del desplazamiento vertical (elevación - hundimiento) y horizontal (este - oeste).

- Generalmente, el umbral de estabilidad (es decir, el umbral considerado para distinguir las zonas que no se mueven de las que sí se mueven) se fija en un valor de entre 1.5 y 2.0 veces la desviación estándar de la velocidad de desplazamiento media o del desplazamiento acumulado de los datos InSAR. En el caso de conocer por otras fuentes fiables las zonas en movimiento, se recomienda excluirlas del cálculo de la desviación estándar para evitar sesgos. Utilizando este valor como umbral, se establece un rango de estabilidad del terreno que típicamente oscila entre los $[-5, 5]$ y $[-10, 10]$ mm/año, aunque en procesados de alta resolución y escaso ruido puede llegar a ser de $[-2, 2]$ mm/año. Por tanto, el rango de estabilidad es una medida de la **precisión** del procesado y también representa el rango de ruido, entendiendo éste como el rango de valores en los que la técnica InSAR no puede detectar desplazamientos del terreno. Por ejemplo, si en un caso de estudio hay una zona moviéndose a 7 mm/año, pero el umbral de estabilidad de los datos InSAR se ha establecido en $[-10, 10]$ mm/año, el desplazamiento de esa zona no es detectable por ese análisis InSAR.

- Se debe considerar la posibilidad de que una zona con puntos de medida dentro del rango de estabilidad anteriormente descrito presente movimientos relevantes, pero que no sean detectables mediante la técnica InSAR. Este hecho puede deberse a varios factores como al empleo de una órbita de adquisición inadecuada o a la presencia de movimientos en dirección norte-sur.
- La velocidad máxima v_{max} que se puede medir con las técnicas InSAR está limitada, lo que significa que no se pueden detectar movimientos rápidos. Como se vio en el apartado 2.4, las franjas que simbolizan el desplazamiento del terreno en un interferograma están “enrolladas” en un ciclo completo de la **fase** correspondiente a 2π y cada franja equivale a la mitad de la **longitud de onda** de la señal SAR ($\lambda/2$). Para estar seguros de medir correctamente no sólo el desplazamiento sino también la dirección del movimiento (es decir, el objeto se ha acercado o alejado con respecto a la posición del satélite en una cantidad Δr), es necesario que el objeto no se mueva más de $\lambda/4$ entre dos pasadas de satélite. Este umbral teórico de detección de desplazamiento entre dos imágenes SAR consecutivas y/o entre dos píxeles vecinos, hace que la velocidad máxima detectable sea la definida en la Ecuación 5 (Colombo et al., 2012; Wasowski and Bovenga, 2014), donde dt es el tiempo de revisita del satélite. Esta ecuación nos proporciona una cifra de referencia, ya que la velocidad máxima también depende del gradiente espacial de la deformación del terreno y de la densidad de puntos de medida. Los valores de referencia teóricos de v_{max} para cada satélite se resumen en la Tabla 4.

$$v < \frac{\lambda}{4 \cdot dt} = v_{max}$$

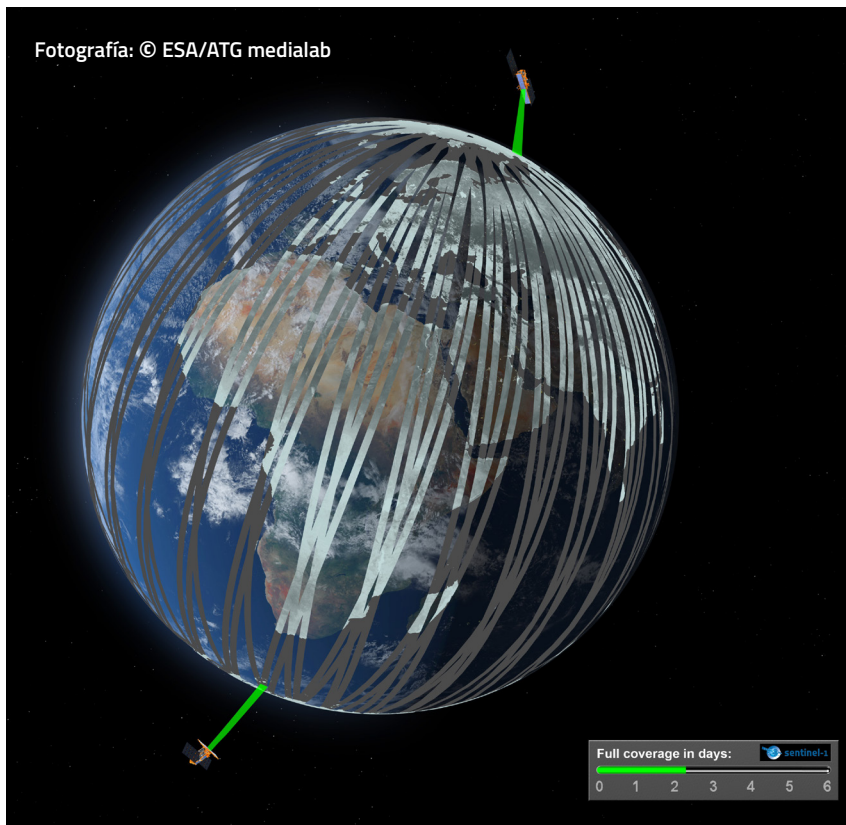
Ecuación 5

Sensor satélite	Longitud de onda λ (cm)	Tiempo de revisita dt (días)	$\approx v_{max}$ (cm/año)
ERS-1/2	5.6	35	14.6
ENVISAT	5.6	35	14.6
Sentinel-1	5.6	Satélite: 12 Constelación: 6	42.6 85.2
RADARSAT-1/2	5.6	24	20.4
RADARSAT CM (3 sat.)	5.6	Satélite: 12 Constelación: 4	42.6 127.8
TerraSAR-X	3.1	11	25.7
COSMO-SkyMed CSK/CSG (6 sat.)	3.1	Satélite: 16 Constelación: 5 (strip mode)	17.7 56.6
ALOS-PALSAR	23.6	46	46.8
ALOS-2	23.6	14	149.2
SAOCOM (2 sat.)	24	Satélite: 16 Constelación: 8	140.3 280.6

Tabla 4: Valores de la velocidad máxima teórica detectable entre píxeles vecinos para algunos de los satélites SAR de misiones actuales y pasadas, en función de la **longitud de onda** empleada y el tiempo de revisita (Wasowski and Bovenga, 2014).

- La interpretación de la presencia de áreas de deformación a partir de resultados InSAR en una zona específica es válida únicamente cuando se dispone de un número suficiente de puntos próximos entre sí que exhiban deformación. Es altamente desaconsejable basar la interpretación en puntos de medida aislados. A modo de referencia, para interpretar que una zona está sufriendo deformación, Barra et al. (2017) recomienda que ésta al menos contenga 5 puntos vecinos que presenten una velocidad superior a la del umbral de estabilidad. Se consideran puntos vecinos a aquellos que comparten un área de influencia ligeramente mayor que la huella aproximada de los puntos de medida en el terreno, para lo cual se multiplica por un factor de 1.3, garantizando así la selección adecuada de los puntos. Esto significa que si hemos empleado imágenes del satélite TerraSAR-X que tienen una resolución proyectada en el terreno de 3x3 m y empleado el método PS que conserva la máxima resolución, se considera como puntos vecinos a aquellos que estén a una distancia de aproximadamente 3.9 m.
- Las interpretaciones de las deformaciones en puntos de medida InSAR deben hacerse con precaución cuando se observan cambios bruscos en los datos que no siguen un patrón espacial o temporal continuo. Esto podría deberse a diversos factores, como errores en las mediciones, ruido en los datos, eventos locales anómalos o problemas en la calidad de las imágenes SAR. Por lo tanto, es importante realizar un análisis detenido antes de llegar a conclusiones definitivas sobre las causas de tales variaciones.

Fotografía: © ESA/ATG medialab



03



Servicios InSAR públicos

Servicios InSAR públicos

En el año 2024 están en marcha múltiples iniciativas a nivel local y regional con el propósito de establecer servicios basados en datos InSAR para monitorizar los movimientos del terreno en grandes áreas. Esto se debe a la sofisticación de las técnicas InSAR, el lanzamiento de nuevas misiones SAR (lo que ha incrementado drásticamente el volumen de datos) y el aumento de la capacidad computacional (Crosetto et al., 2020). A continuación, se describen algunos de estos servicios, operativos principalmente en Europa, pero también a escala global.

3.1 PRODUCTOS INTERFEROMÉTRICOS A ESCALA GLOBAL: PROYECTO LICS

El proyecto LiCS se centra en generar productos InSAR destinados a la monitorización de procesos tectónicos y volcánicos. Mediante el uso de imágenes SAR adquiridas por la constelación Sentinel-1, el proyecto genera automáticamente interferogramas y mapas de coherencia. Estos productos están diseñados para posibilitar la medición de desplazamientos inducidos por este tipo de procesos entre dos fechas específicas, como puede ser la deformación repentina del terreno causada por un terremoto. Los productos están disponibles para su descarga gratuita en la página web del proyecto (<http://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>). La cobertura global del servicio se puede consultar en el visor web (Figura 26).

Además de estos datos, el proyecto LiCS ofrece la posibilidad de utilizar LiCSBAS, un paquete de código abierto desarrollado en el lenguaje de programación Python y el lenguaje de script para sistemas operativos tipo Unix/Linux bash, que permite llevar a cabo análisis de series temporales InSAR utilizando los productos LiCSAR (es decir, interferogramas **desenrollados** y mapas de coherencia) disponibles gratuitamente en el portal web COMET-LiCS. Dicho paquete software de procesamiento interferométrico se encuentra disponible en <https://github.com/yumorishita/LiCSBAS>.

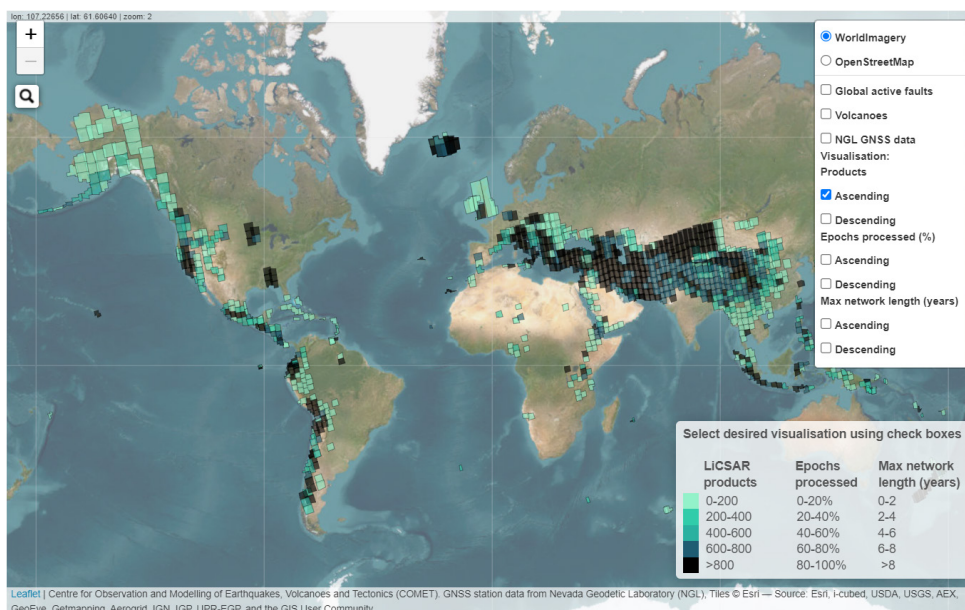


Figura 26: Cobertura de los interferogramas disponibles a nivel global <https://comet.nerc.ac.uk/comet-lics-portal/>.

3.2 SERVICIOS DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO NACIONALES Y REGIONALES

A continuación, se listan algunos de los servicios de monitorización de libre acceso que ofrecen mapas de desplazamiento del terreno y series temporales de desplazamiento a partir de datos InSAR en distintos países europeos.

1. Noruega (Figura 27): Datos de velocidad media y series temporales de desplazamiento de la superficie del terreno en LOS obtenidos de los satélites RADARSAT y Sentinel-1 para diferentes periodos a partir de 2008.
2. Alemania (Figura 28): Datos de desplazamiento del terreno y series temporales de desplazamiento obtenidos del satélite Sentinel-1 a partir del 2015, tanto en sus componentes LOS, como en sus componentes vertical y este-oeste.
3. Región de la Toscana (Figura 29): Datos de desplazamiento del terreno y series temporales de desplazamiento obtenidos del satélite Sentinel-1 en LOS adquiridas en continuo desde 2018 hasta la actualidad.

Para una revisión de diferentes servicios InSAR regionales y nacionales, se puede consultar Crosetto et al. (2020).

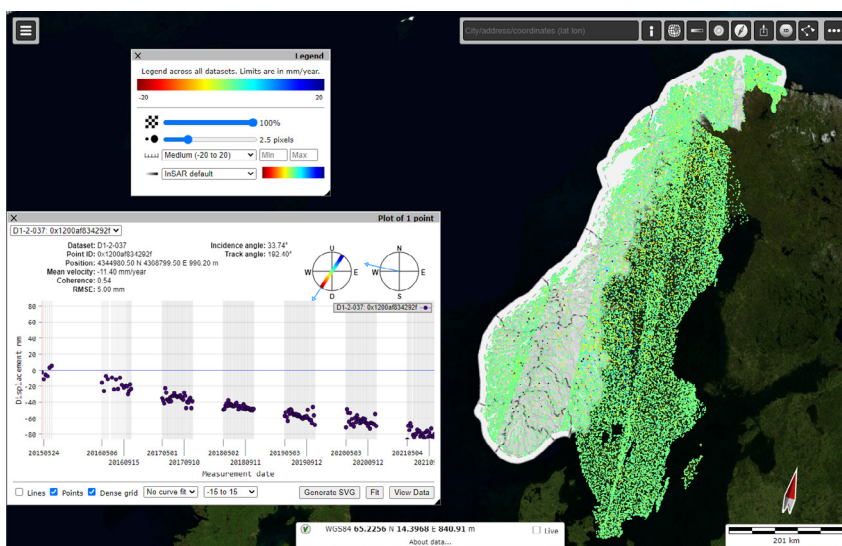
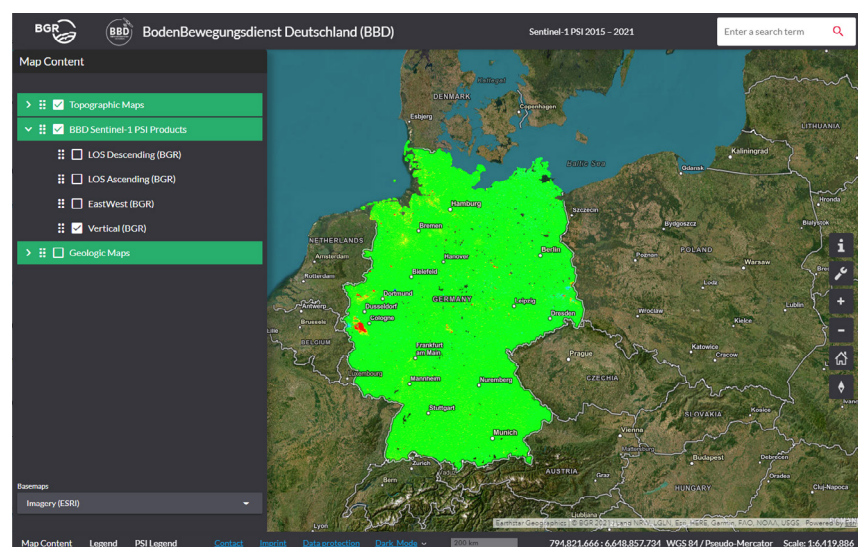


Figura 27: Visor de datos InSAR del servicio noruego
<https://insar.ngu.no/>.

Figura 28: Visor de datos InSAR del servicio alemán
<https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/mapapps/resources/apps/bbd/index.html?lang=en>.



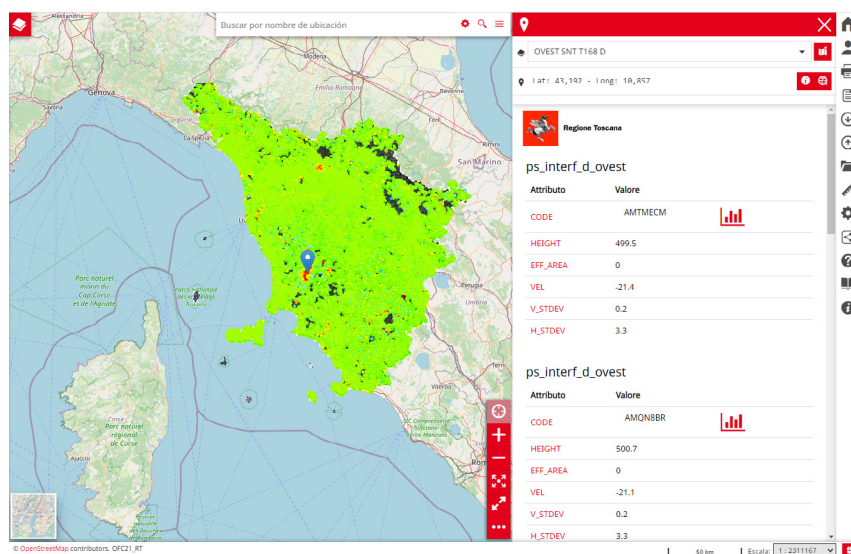


Figura 29: Visor de datos InSAR del servicio de la región de la Toscana (Italia)
https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa_suolo/#/viewer/openlayers/326.

3.3 SERVICIO EUROPEO DE MOVIMIENTO DEL TERRENO (EGMS)

3.3.1 Descripción del producto

El EGMS proporciona datos libres y gratuitos de desplazamiento del terreno a escala europea.

El Servicio Europeo de Movimiento del Terreno (*European Ground Motion Service*, EGMS) es el primer servicio que proporciona datos de desplazamiento del terreno a escala continental. Cubre todos los Estados del territorio europeo que pertenecen al Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea Copernicus (<https://www.copernicus.eu/es>): Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumania y Suecia. El EGMS, como el resto de datos y productos de Copernicus, es de acceso libre y gratuito. En la fecha de escritura de este manual, los datos del EGMS cubren dos períodos de observación: desde febrero de 2015 hasta diciembre de 2021 y desde enero de 2018 hasta diciembre de 2022. La razón de dividir los procesados en periodos de 5-6 años es preservar una buena densidad de puntos de medida ya que, si se emplean periodos temporales muy largos, la densidad de puntos se vería reducida por fenómenos de decorrelación temporal (ver apartado 2.6). El servicio EGMS establece realizar actualizaciones de datos anuales, por lo que es altamente recomendable mantenerse informado sobre los cambios y novedades a través de sus canales de difusión. La metodología utilizada para generar los datos de desplazamientos es la aplicación de diferentes técnicas InSAR mediante el procesamiento masivo de imágenes SAR adquiridas por la constelación Sentinel-1. Los datos son accesibles a través de un mapa interactivo en <https://egms.land.copernicus.eu/>, que cumple la función tanto de visor como de repositorio (Figura 30). El producto se muestra como un mapa de puntos de medida InSAR, codificados por colores según la velocidad promedio del periodo estudiado. A cada punto de medida se asocia su correspondiente *serie temporal* de desplazamiento. El visor permite tanto seleccionar un punto concreto para visualizar su serie temporal, como seleccionar un área y analizar el desplazamiento promedio (Figura 30). A fecha de la escritura de este documento, se pueden descargar tanto los datos del periodo 2015-2021 como los del 2018-2022, pero en el mapa interactivo sólo se pueden visualizar los datos del último periodo actualizado por el servicio, 2018-2022.

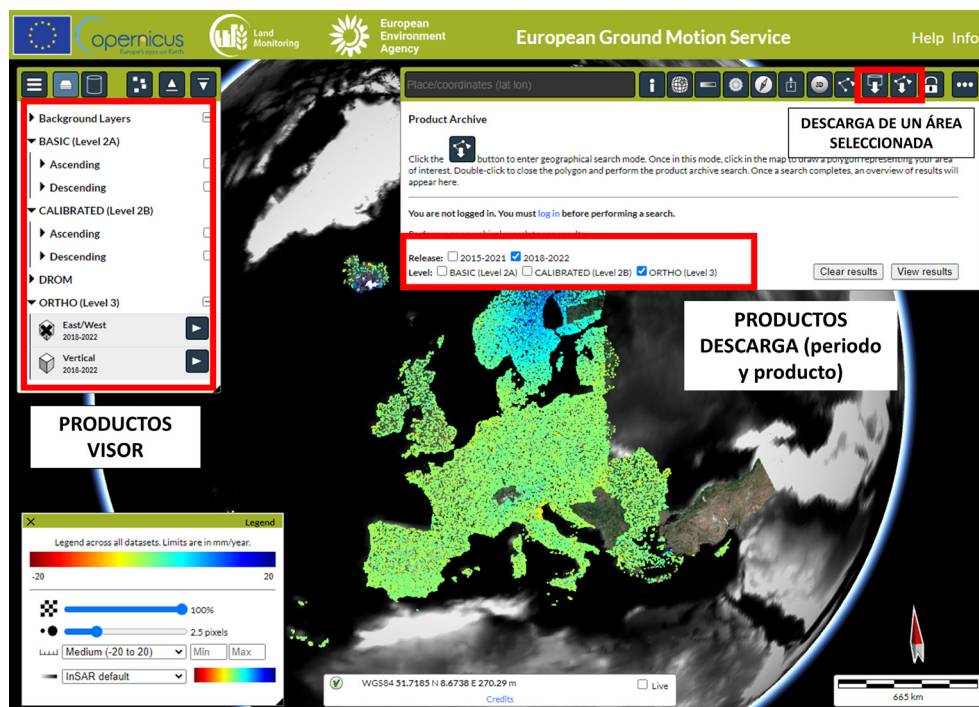


Figura 30: Aspecto del visor EGMS <https://egms.land.copernicus.eu/> a fecha de redacción de este documento (2024). Los recuadros rojos indican las opciones de visualización y de descarga. Las series temporales del desplazamiento se pueden visualizar haciendo click en un punto o seleccionando un área para obtener la *serie temporal promedio* de los puntos contenidos en ella.

El servicio EGMS ofrece tres tipos de productos con diferentes características y recomendaciones de uso (Figura 31). Para una descripción detallada de las particularidades de cada producto, cómo se generan los datos, formato de los archivos de descarga y aplicaciones, se recomienda consultar el manual de usuario y los documentos técnicos que se encuentran en la página del servicio (<https://land.copernicus.eu/pan-european/european-ground-motion-service>). Estos documentos están enumerados en el Anexo II de este manual. Las características básicas de los tres productos son:

- **BASIC:** Proporciona datos de velocidad y desplazamiento en la línea de visión del satélite (LOS) en geometría ascendente y descendente. El área que representa cada punto de medida está a la máxima **resolución espacial** que ofrece el satélite Sentinel-1, que es 20 m x 5 m. Las mediciones están referenciadas a un punto de referencia local (mediciones relativas). Esto implica que la interpretación sólo es válida para fenómenos locales, ya que no es posible comparar las deformaciones de zonas adyacentes pertenecientes a diferentes **burst** de una imagen Sentinel-1. Por ello este producto está recomendado para uso experto. En cuanto a las series temporales, el muestreo temporal es de ciclos de 12 días antes de abril de 2016 y de 6 días a partir de abril de 2016 utilizando dos satélites (Sentinel-1A y 1B). Desde diciembre de 2021, el muestreo temporal vuelve a ser de 12 días debido a la avería del Sentinel-1B. Los valores de desplazamiento positivos indican movimientos de acercamiento del terreno al satélite, mientras que los valores negativos indican movimientos de alejamiento del satélite.
- **CALIBRATED:** Proporciona datos de velocidad y desplazamiento LOS generados a partir del producto BASIC, que han sido referenciados a un modelo regional de movimiento derivado de los datos del Sistema Mundial de Navegación por Satélite (**GNSS**). Al combinar el producto BASIC con la consistencia y **precisión** de los datos **GNSS** se garantiza la comparabilidad de las mediciones en diferentes ubicaciones y momentos en el tiempo. Las mediciones son pues absolutas en vez de relativas, haciendo posible el estudio de deformaciones en áreas adyacentes, y por tanto, para fenómenos más extensos. Todas las demás características son idénticas al producto BASIC. El área que representa cada punto de medida está a la máxima **resolución espacial** que ofrece el satélite Sentinel-1, que es 20 m x 5 m. El producto CALIBRATED satisface las necesidades de la mayoría de los usuarios. Los valores de desplazamiento positivos indican movimientos de acercamiento al satélite, mientras que los valores negativos indican movimientos de alejamiento del satélite.

- **ORTHO:** Proporciona datos de velocidad y desplazamiento en las componentes vertical y horizontal este-oeste, obtenidos a partir de la interpolación y proyección de los datos ascendente y descendente del producto CALIBRATED. Los productos ascendentes y descendentes tienen diferentes geometrías de adquisición, lo que significa que la distribución de puntos de medida no es idéntica entre los dos conjuntos de datos. Por este motivo se hace un remuestreo de los datos ascendentes y descendentes a una malla común de 100x100 m. Después, se calcula el promedio de los puntos dentro de cada celda de la malla por separado, para obtener un punto referenciado en el centro de la misma. Finalmente, los datos ORTHO se calculan en celdas donde hay tanto datos ascendentes como descendentes mediante la descomposición de los vectores de desplazamiento en las direcciones este-oeste y vertical (Figura 25 y 32). Como las fechas de adquisición entre las imágenes ascendentes y descendentes adquiridas por el Sentinel-1 tampoco coinciden, se realiza un remuestreo temporal de 6 días desde enero de 2016 y de 12 días desde diciembre de 2021. Al igual que el producto CALIBRATED, el producto ORTHO proporciona mediciones absolutas. La información proporcionada por el producto ORTHO es más fácil de entender para el usuario no experto en datos InSAR, ya que representa el movimiento de la superficie en un sistema de coordenadas estándar, independiente de la geometría inherente del satélite. En los datos de componente vertical, los valores de desplazamiento positivos indican un levantamiento del terreno, mientras que los valores negativos indican un hundimiento del terreno. En los datos de componente horizontal este-oeste, los valores de desplazamiento positivos indican un movimiento del terreno hacia el este, mientras que los valores negativos indican un movimiento hacia el oeste.

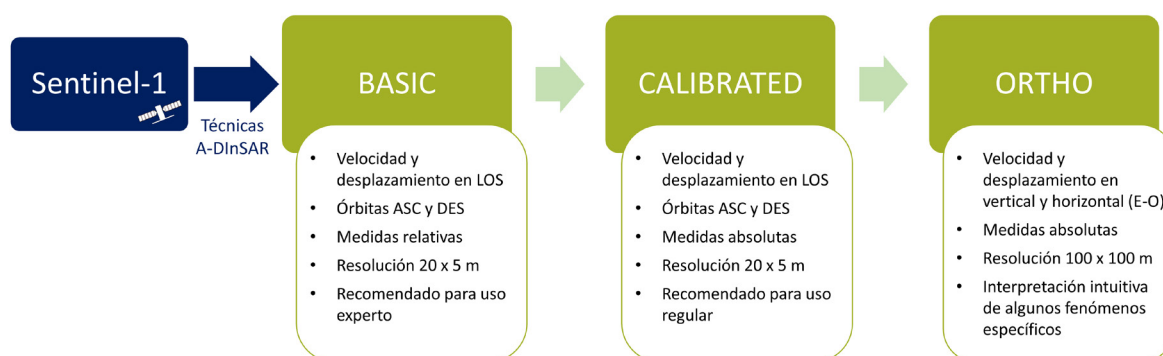


Figura 31: Características principales de los productos EGMS obtenidos a partir de imágenes del satélite Sentinel-1. La información y las recomendaciones de uso están extraídas del manual de usuario del EGMS (Kotzerke et al., 2022b).

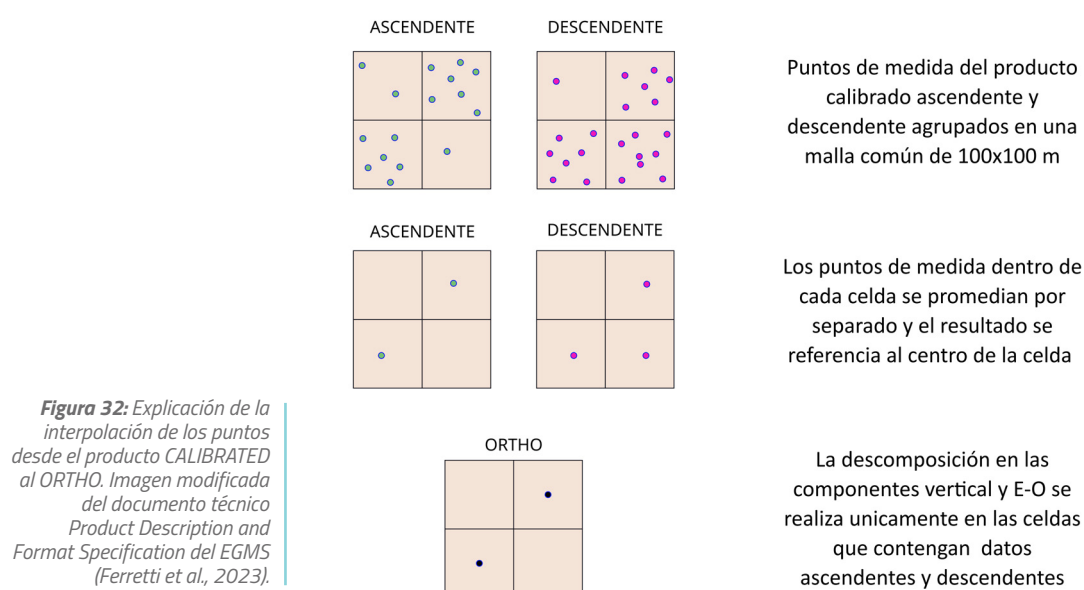


Figura 32: Explicación de la interpolación de los puntos desde el producto CALIBRATED al ORTHO. Imagen modificada del documento técnico Product Description and Format Specification del EGMS (Ferretti et al., 2023).

La primera validación de los productos del EGMS del periodo 2015-2021 fue publicada a finales de 2023 (Calero et al., 2023). El documento se puede consultar en <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/validation-report-2015-2021-dataset/@download/file>. El ejercicio de validación se ha realizado en 38 zonas distribuidas por toda Europa y se ha basado en la comparación o concordancia entre los conjuntos de datos de los emplazamientos y el producto EGMS. Lo realiza el consorcio de validación compuesto por diferentes empresas y proveedores de datos, entre los que se encuentra el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), en el marco de la licitación cuya referencia es EEA/DIS/Ro/20/011.

3.3.2 Principales limitaciones de los datos del EGMS

Los productos del EGMS tienen ciertas limitaciones, algunas inherentes a la técnica InSAR y otras relacionadas con la producción de este servicio. El conocimiento preciso de estas limitaciones es fundamental para evitar un uso incorrecto o inadecuado, especialmente por parte de usuarios sin experiencia en el análisis de datos InSAR. Las limitaciones comunes a las técnicas InSAR están relacionadas con las propiedades de la superficie del terreno, las propiedades del sensor SAR y las características intrínsecas del procesado (ver apartado 2.8). Hay que recordar que en el caso particular del EGMS: i) la zona de estudio tiene escala continental abarcando todo tipo de terrenos, ii) todos los datos provienen del satélite Sentinel-1 que tiene unas propiedades específicas de adquisición de datos SAR y iii) el procesado de los datos ha sido elaborado de forma homogénea para todo el territorio por un consorcio formado por cuatro empresas de procesamiento InSAR, que usan distintos algoritmos. Para una descripción detallada de los algoritmos que usa cada empresa, así como los requisitos comunes que deben cumplir en términos de calidad, coherencia y homogeneidad, se recomienda consultar los documentos técnicos del EGMS (Ferretti et al., 2023). Otras limitaciones propias del EGMS son las derivadas de las técnicas de post-procesado aplicadas en los productos CALIBRATED y ORTHO del EGMS. Éstas consisten en la referenciación a un modelo regional de movimiento y la interpolación de los datos a las componentes vertical y este-oeste. A continuación, se ofrece una síntesis de las principales limitaciones de los productos del EGMS.

- La cobertura espacial de los productos del EGMS es discontinua. Las técnicas InSAR proporcionan puntos de medición en aquellas zonas en las que la señal retrodispersada es detectable y las propiedades de **dispersión** del terreno son estables a lo largo del periodo de toma de datos. Esto provoca que haya zonas sin datos de desplazamiento en los siguientes casos:
 - Relieves topográficos desfavorables: La orientación y pendiente de una ladera produce **distorsiones geométricas** de la señal que pueden ocasionar la ausencia de datos cuando se producen los efectos de *shadow* y *layover* (ver apartado 2.1).
 - Zonas vegetadas y de cultivo: El crecimiento de la vegetación hace que las propiedades de **dispersión** cambien en el tiempo, produciendo fenómenos de decorrelación temporal en los interferogramas (apartado 2.5).
 - Hidrosfera: Las técnicas InSAR no permiten medir el movimiento de la superficie en zonas cubiertas por masas de agua.
 - Zonas en las que se produce un cambio sustancial en la superficie del terreno durante el periodo de estudio, que puede originar la pérdida total de coherencia (nuevas construcciones, movimiento de tierras en zonas mineras, deslizamiento rápido del terreno, etc.).
 - Cobertura de nieve: La calidad de los resultados InSAR puede verse afectada por la presencia de una capa de nieve, ya que esto incrementa el ruido en las series temporales. Los periodos en los que la nieve está presente de manera estacional o perpetua están excluidos de las series temporales del EGMS. Esto ocurre en las zonas más septentrionales de Europa y afecta de forma importante, en mayor o menor medida, a los datos de los países de Islandia, Noruega, Suecia, Dinamarca, Estonia, Lituania y Letonia. Por lo tanto, los análisis y aplicaciones específicas para el estudio del hielo y la nieve quedan fuera del alcance del EGMS.

- La geolocalización (lon, lat) de los puntos de medida del EGMS tienen una **exactitud** de orden métrico (< 10 m). Por lo tanto, no siempre es posible establecer una relación exacta entre el punto de medición y el objeto real reflejado en la superficie. Sin embargo, la estructura topológica de los reflectores, que representan el objeto real, se mantiene. Por ejemplo, los puntos de medida detectados a lo largo de un puente, pueden aparecer desplazados pero distribuidos de manera coherente con su forma.
- El área representada por los puntos de medida del EGMS viene determinada por la **resolución espacial** de las imágenes SAR Sentinel-1, que es 20 x 5 m (a excepción del producto ORTHO que está resampleado y cuya resolución es de 100 x 100 m). Por este motivo los productos del EGMS resultan en ocasiones inapropiados para algunas aplicaciones como la monitorización exhaustiva del movimiento de una edificación de dimensiones reducidas. Para estos casos es recomendable recurrir a procesados InSAR ad hoc utilizando satélites de mayor resolución (como COSMO-SkyMed o TerraSAR-X).
- El EGMS proporciona un registro histórico del desplazamiento de la superficie del terreno desde principios de 2015 hasta finales de 2022, por lo que no puede utilizarse para monitorizar a tiempo real. Para estudiar periodos específicos es recomendable recurrir a procesados InSAR ad hoc, en los que se pueden utilizar otros satélites con datos anteriores a 2015 o utilizar imágenes SAR más recientes.
- Los algoritmos de procesado empleados para generar las series temporales del producto EGMS realizan el **desenrollado de fase basado en un modelo lineal del movimiento** (Ferretti et al., 2023). Esto implica que las deformaciones o desplazamientos del terreno grandes y/o no lineales (que producen saltos en las series temporales), como las originadas por algunos terremotos o inflaciones volcánicas rápidas, no se detecten con exactitud. El EGMS ha adaptado los parámetros de **desenrollado** para hacer frente a estos desplazamientos no lineales solamente en algunos casos. Para ello, ha empleado catálogos de terremotos. Por este motivo, hay terremotos en los que sí se aprecian los saltos de desplazamiento en las series temporales (como los explicados en el subapartado 4.1.3), mientras que otros procesos, como el rápido ascenso del magma previo a la erupción de La Palma en 2021 (Ezquerro et al., 2023), no quedan reflejados de manera adecuada en las series temporales de desplazamiento.
- El procesado masivo y homogeneizado de los datos que requiere generar un producto como el EGMS hace imposible adaptar los parámetros a las particularidades de zonas de estudio específicas. Por este motivo, aunque el EGMS es un producto muy valioso para estudios preliminares, no debe sustituir a los procesados ad hoc si se quiere analizar con exactitud un fenómeno que produzca la deformación del terreno.
- Aunque en el EGMS la componente norte-sur del movimiento se modela y se recupera del **CNSS** para la calibración, se considera que esta componente no existe para la descomposición de la información en el producto ORTHO. En la horizontal, la técnica es sensible al movimiento paralelo a la dirección este-oeste, pero asume que la componente norte-sur del movimiento es despreciable.

Para más detalles sobre las características y limitaciones de los productos del EGMS se recomienda consultar el apartado 4.2 de manual de usuario del EGMS (Kotzerke et al., 2022b) y la sección de preguntas frecuentes (<https://land.copernicus.eu/en/faq/products/european-ground-motion-service>).

04

Identificación de
desplazamientos del terreno
con InSAR. Casos tomados
del EGMS

Identificación de desplazamientos del terreno con InSAR. Casos tomados del EGMS

En conexión con el subapartado 3.3 del capítulo anterior, centrado en la descripción de las características y productos ofrecidos por el servicio EGMS, este capítulo recoge diferentes ejemplos de fenómenos de origen geológico y antrópico en Europa que producen deformaciones de la superficie terrestre. Todos los casos de estudio que se describen (Figura 33) han sido objeto de estudios InSAR previos y publicados en revistas científicas. En cada ejemplo, se incluye primero una descripción del caso según los estudios previos publicados, y a continuación se muestra cómo han sido identificados utilizando el servicio EGMS. Los datos utilizados se han extraído fundamentalmente de los productos CALIBRATED y ORTHO del visor del EGMS. Los mapas de velocidad y las series temporales que se muestran corresponden al periodo 2015-2021 o al 2018-2022. Hay que recordar que el EGMS es un servicio dinámico con actualizaciones programadas cada año, por lo que los periodos que se pueden visualizar en el mapa interactivo pueden variar, aunque estén todos disponibles para su descarga (subapartado 3.3.1).

Es importante señalar que en este manual no se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de los datos del EGMS presentados, siendo el propósito de estos ejemplos únicamente ilustrar el efecto en el terreno de diferentes fenómenos de deformación mediante el visor EGMS. Aunque en cada ejemplo se hace referencia a si los resultados del EGMS concuerdan con los obtenidos en trabajos previos, esta comparación es exclusivamente cualitativa, no habiéndose llevado a cabo un análisis comparativo formal de los resultados InSAR. En este sentido, hay que tener en cuenta que las deformaciones detectadas en el EGMS pueden ser diferentes a las obtenidas mediante otros procesados InSAR ad hoc adaptados a un caso de estudio concreto, debido al enfoque de procesamiento adoptado en el EGMS (ver subapartado 3.3.2).

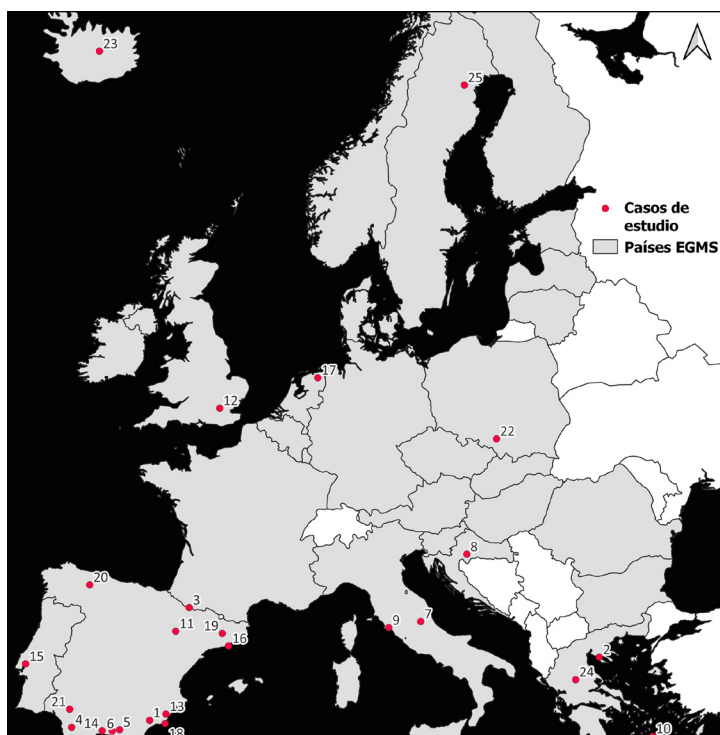


Figura 33: Mapa que muestra la ubicación geográfica de los casos de estudio descritos en este capítulo. La numeración en este mapa corresponde con la numeración de los casos proporcionada en el texto.

También es necesario recordar que las técnicas InSAR son complementarias a otras técnicas de detección y monitorización de desplazamientos. Los resultados obtenidos con InSAR deben ser analizados conjuntamente con datos procedentes de otras fuentes de información independientes. Éstas pueden ser la monitorización de desplazamientos in-situ (estaciones totales y prismas, nivelación, sistemas globales de navegación por satélite o GNSS, inclinómetros, extensómetros, etc.), otras técnicas de teledetección (radar terrestre o GB-SAR, *light detection and ranging* o LiDAR, fotogrametría digital o SfM, etc.) o los parámetros del fenómeno que está causando el movimiento de la superficie del terreno (como cambios del nivel piezométrico). Los datos del EGMS son muy útiles para estudios preliminares, pero provienen de un procesamiento masivo realizado para un intervalo temporal específico. Por ello, el estudio detallado de fenómenos concretos puede requerir procesados InSAR adaptados a las particularidades específicas de cada zona.

Para la correcta comprensión de los casos de estudio descritos en este capítulo, conviene tener en cuenta ciertos aspectos:

- En relación con el criterio de signos, en los productos BASIC y CALIBRATED el signo positivo indica acercamiento al satélite en la dirección de la línea de visión del satélite (*Line Of Sight*, LOS), y el negativo alejamiento. En el producto ORTHO vertical el signo positivo indica levantamiento o *up* (U) y el negativo hundimiento o *down* (D). En el producto ORTHO horizontal el signo positivo indica movimiento hacia el este (E) y el negativo hacia el oeste (O) (Figura 34).

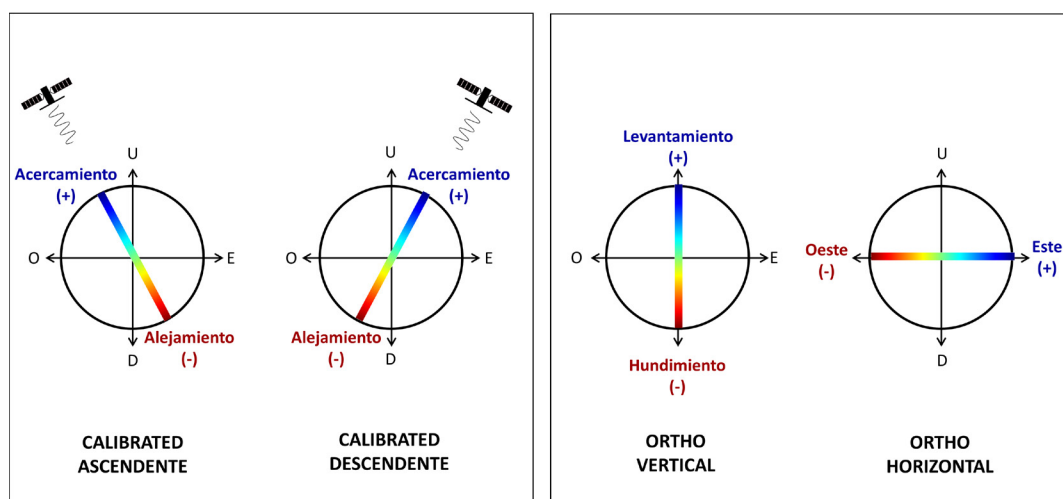


Figura 34: Criterio de signos en los casos de estudio del EGMS.

- La leyenda del mapa del visor permite configurar la apariencia de los puntos de medida del mapa, como el tamaño del punto, la escala de color, la escala numérica, etc. En los casos de estudio descritos en este apartado se han empleado diferentes leyendas.
- Los gráficos de las series temporales de desplazamiento también ofrecen distintas opciones de visualización.

Para más información sobre el uso del entorno del visor EGMS, se recomienda consultar el manual de usuario de la interfaz (*End User Interface Manual*), disponible en <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-end-user-interface-manual>.

4.1 PELIGROS GEOLÓGICOS

4.1.1 Subsistencia del terreno por sobreexplotación de agua subterránea en acuíferos detríticos

La subsistencia es el fenómeno de hundimiento repentino o asentamiento gradual de la superficie del suelo en dirección predominantemente vertical y con sentido descendente, con poco o ningún movimiento horizontal. Las causas pueden ser varias, como la consolidación natural de los sedimentos, la producida por el peso de construcciones o la debida al descenso del nivel piezométrico en materiales compresibles (Galloway et al., 1999; Tomás et al., 2014). La subsistencia del terreno por sobreexplotación de acuíferos detríticos ocurre en cuencas con estrés hídrico, donde la extracción de agua subterránea supera la recarga (Gambolati and Teatini, 2023). La extracción de agua subterránea provoca un descenso del nivel piezométrico. Esto, en formaciones detríticas, conlleva una disminución de la presión intersticial en las capas formadas por arenas y gravas (acuífero) y en los sedimentos arcillo-limosos no consolidados adyacentes (acuitardos). Como resultado, la tensión ejercida por la carga litostática de las formaciones suprayacentes, se transfiere a los contactos grano a grano aumentando la tensión efectiva entre ellos. Dependiendo de la compresibilidad de los materiales del suelo, éstos se compactan, lo que a su vez puede inducir fenómenos de subsistencia dependiendo de la cantidad y distribución que haya de éstos (Figura 35). Los riesgos asociados a este proceso son la disminución permanente de la capacidad de almacenamiento de agua en los acuíferos, el incremento de la probabilidad de inundaciones y los daños en edificios e infraestructuras. La subsistencia del terreno por explotación de acuíferos detríticos es un proceso lento y gradual que se desarrolla en escalas de tiempo grandes (de meses a años), lo que provoca una pérdida progresiva de la elevación del terreno (de centímetros a decímetros por año) típicamente en áreas muy extensas (de decenas a miles de kilómetros cuadrados) y afecta de manera variable a áreas urbanas y agrícolas en todo el mundo (Herrera-García et al., 2021).

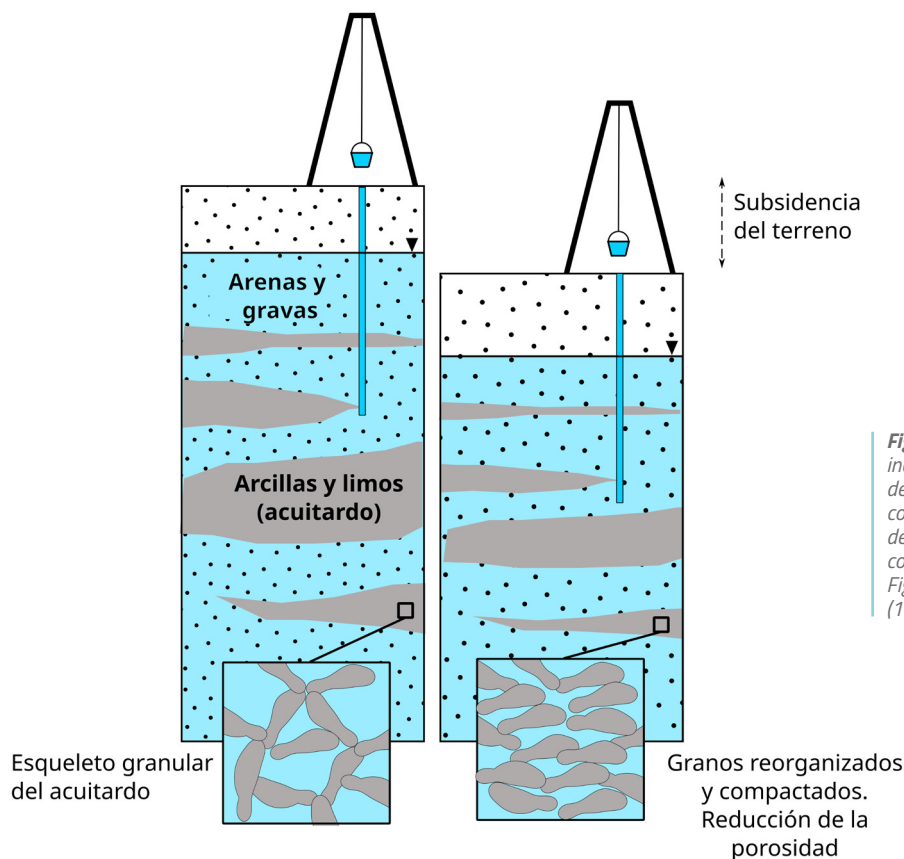


Figura 35: Subsistencia del terreno inducida por la extracción prolongada de agua subterránea que provoca la compactación inelástica e irreversible del sistema acuífero, la cual está concentrada en las capas del acuitardo. Figura modificada de Galloway et al. (1999).

4.1.1.1 Caso 1. Valle del Guadalentín (Murcia, España)

El valle del río Guadalentín se encuentra en la provincia de Murcia (sureste de España) y tiene una extensión de más de 500 km². El valle posee un sistema acuífero sobreexplotado formado por dos unidades contiguas e hidráulicamente conectadas: los acuíferos del Alto Guadalentín y del Bajo Guadalentín. Ambos han sido explotados de manera intensiva para el riego agrícola desde la década de 1960, y fueron oficialmente declarados como sobreexplotados en 1987 (IGME, 1997). Actualmente los acuíferos se encuentran en un estado de deterioro cuantitativo debido a la sobreexplotación, aunque los niveles piezométricos que descendieron en el pasado están estabilizados (CHS, 2021). El acuífero del Alto Guadalentín presenta una de las mayores tasas de subsidencia del terreno por extracción de agua subterránea registradas en toda Europa, superando los 10 cm/año en determinados periodos (Bonì et al., 2015; González and Fernández, 2011). Este fenómeno de deformación ha sido objeto de numerosos estudios previos (Béjar-Pizarro et al., 2016; Bonì et al., 2015; Bru et al., 2023; Ezquerro et al., 2017; Ezquerro et al., 2020; Fernández-Merodo et al., 2021; Rigo et al., 2013).

En el EGMS, el valle presenta una alta densidad de puntos de medida InSAR debido a la presencia de construcciones, carreteras y terrenos áridos (que preservan la coherencia) entre las zonas cultivadas (Figura 36). La deformación vertical se concentra a lo largo de la parte central del valle, superando los -8 cm/año en la sección noroeste del Alto Guadalentín, cerca de la ciudad de Lorca. El Bajo Guadalentín presenta tasas de desplazamiento vertical más bajas, llegando hasta -5 cm/año en la parte norte de la cuenca, donde se encuentra el polígono industrial de Alhama de Murcia. También se detecta movimiento horizontal inducido por la subsidencia, que teóricamente tiende a cero en el punto más profundo y en los límites externos de una cubeta de subsidencia y alcanza su máximo en las zonas de máxima inclinación (Samieie-Esfahany et al., 2010). La magnitud de la deformación horizontal este-oeste es mucho menor que la vertical, oscilando entre -1 y 1 cm/año. Se detecta principalmente en la mitad izquierda del Alto Guadalentín, con dirección hacia el este. En el lado derecho de la cuenca, la densidad de píxeles es menor debido a una menor coherencia. Además, hay pocos datos que indiquen movimiento hacia el oeste. Las series temporales de desplazamiento del EGMS en el Alto Guadalentín presentan un comportamiento sin fluctuaciones estacionales (Figura 37).

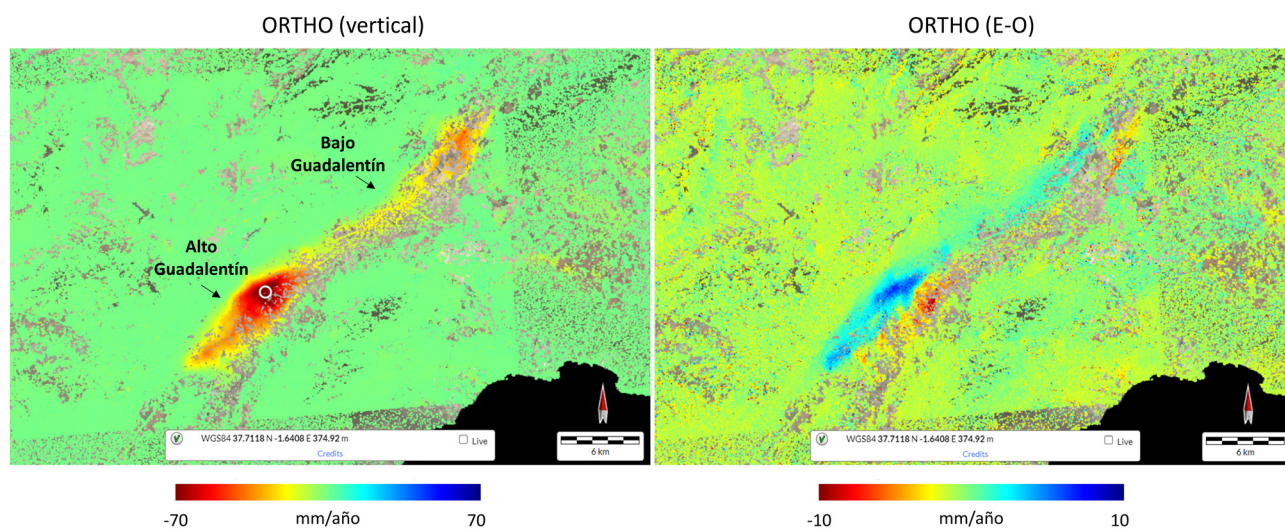
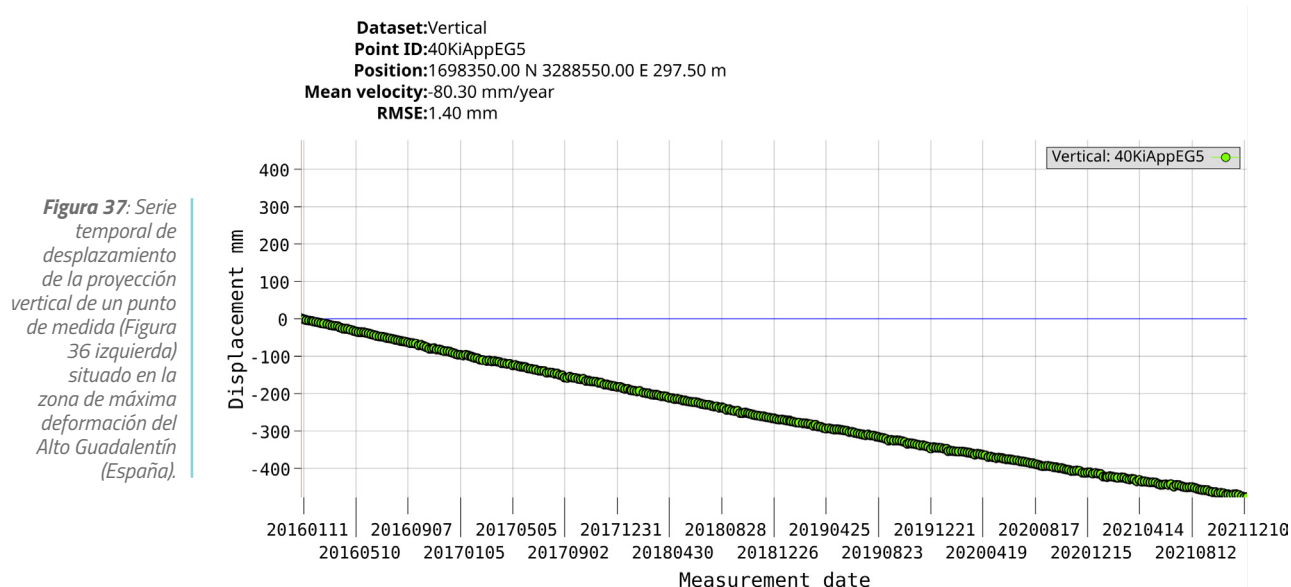


Figura 36: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO del EGMS en el Alto Guadalentín (España). Nótese que la escala de la leyenda es diferente entre ambos mapas. El círculo blanco del mapa vertical indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 37. Localización: WGS84 - 1.533 E, 37.686 N.



4.1.1.2 Caso 2. Nea Moudania (Chalkidiki, Grecia)

La llanura de Nea Moudania se encuentra en Grecia oriental, al sur de Tesalónica. En esta zona existen dos acuíferos, uno superficial libre y otro profundo confinado de más de 200 m de espesor que se explota desde comienzos de los 90 del siglo pasado (Svigkas et al., 2020). La extracción de agua provocó el comienzo de una intrusión salina a lo largo de la zona costera en mayo de 2008 (Siarkos and Latinopoulos, 2016) y a partir de 2016 el área de descenso piezométrico se extendió, afectando a las zonas interiores. El estudio de Svigkas et al. (2020) identificó con datos del satélite Sentinel-1 unas tasas de subsidencia con un valor máximo de -2.3 cm/año, durante el periodo 2015-2019.

En los mapas de velocidad del EGMS se aprecia que los puntos de medida están restringidos a las zonas urbanas, debido a la decorrelación en las zonas de cultivo circundantes. La magnitud de la velocidad proyectada en la vertical supera los -2 cm/año (Figura 38). La velocidad proyectada en la dirección este-oeste no es tan evidente como en el caso anterior, debido a la baja densidad espacial de puntos de medida. Nótese que la escala de color seleccionada en este caso permite destacar este movimiento. La serie temporal de la zona con mayor velocidad vertical (Figura 39), tiene un comportamiento estacional: en los periodos de marzo a septiembre la tasa de desplazamiento (o velocidad) es pronunciada mientras que de octubre a febrero no se producen movimientos.

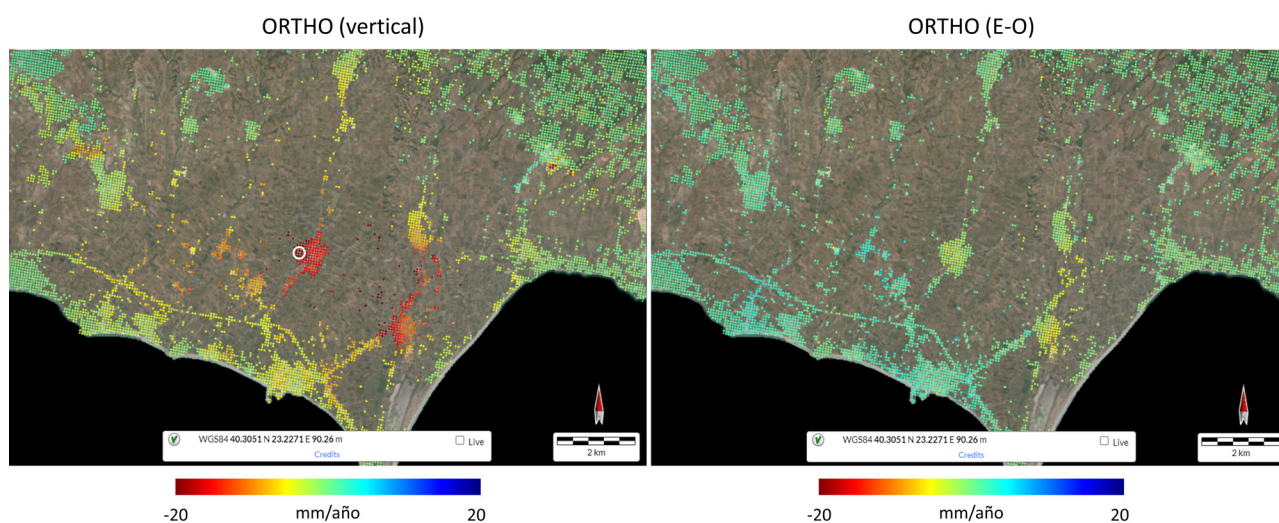
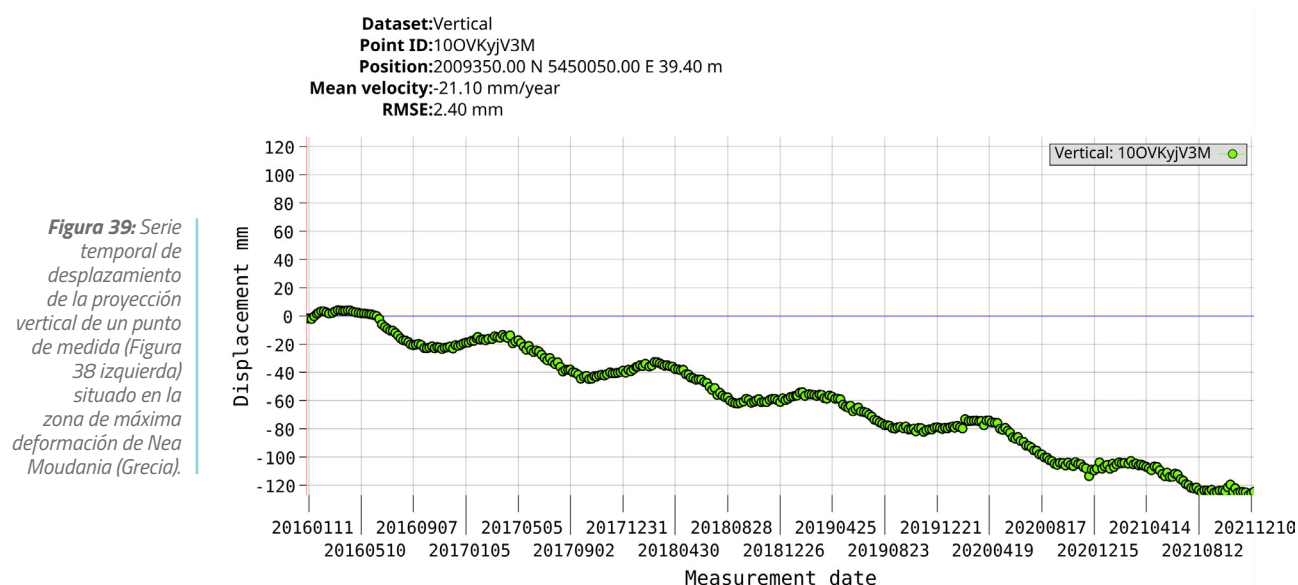


Figura 38: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO del EGMS en Nea Moudania (Grecia). Nótese que la escala de la leyenda es diferente entre ambos mapas. El círculo blanco del mapa vertical indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 39. Localización: WGS84 23.257 E, 40.283 N.



4.1.2 Movimientos de ladera

Los movimientos o inestabilidades de ladera son movimientos gravitacionales de masas de suelo y/o roca a favor de la pendiente de una ladera natural. Estos fenómenos son un peligro natural distribuido por todo el mundo, y pueden producirse bajo cualquier condición climática, en diferentes tipos de terreno y en relieves topográficos desde moderados a escarpados. Según el material movilizado se pueden distinguir dos tipos de movimientos: en suelo y en roca (Cruden and Varnes, 1996). Un suelo es un agregado de partículas sólidas, generalmente de minerales y rocas, que fueron formadas por meteorización de la roca original y/o transportadas desde su lugar de origen, mientras que una roca es una masa dura o firme poco alterada o intacta, ubicada en su lugar de origen antes del inicio del movimiento. Existen además muchos tipos de inestabilidades según el mecanismo de rotura y propagación del movimiento, tales como los deslizamientos rotacionales y traslacionales (Corominas, 1989; Cruden and Varnes, 1996; Hungr et al., 2014). Las inestabilidades de ladera también se pueden clasificar según su velocidad, abarcando desde movimientos extremadamente lentos (del orden de milímetros al año) hasta extremadamente rápidos (varios metros por segundo) (Cruden and Varnes, 1996). En cuanto a la velocidad, las técnicas InSAR únicamente permiten monitorizar inestabilidades de ladera caracterizadas por movimientos de tipo extremadamente lento a muy lento (Colesanti and Wasowski, 2004), debido a las limitaciones intrínsecas de la técnica (ver subapartado 2.8). A pesar de presentar desplazamientos de pequeña magnitud, los movimientos de ladera de tipo extremadamente lento a muy lento pueden producir daños estructurales severos en construcciones y actuar como precursores de movimientos más rápidos y catastróficos.

El estudio de inestabilidad de laderas mediante InSAR presenta una serie de particularidades debido a tres factores: las órbitas cuasi-polares de los satélites (ascendente y descendente), el **ángulo de observación** lateral de los sensores y la naturaleza más o menos abrupta de la topografía en las zonas afectadas por este fenómeno. En primer lugar, la inestabilidad producida a favor de la máxima pendiente en laderas orientadas en dirección norte-sur, no podrán ser medidas debido a que el SAR apenas tiene sensibilidad a los movimientos con la misma dirección del vuelo del satélite (dirección en **acimut**). En segundo lugar, en las imágenes SAR se producen **distorsiones geométricas** debido a la interacción entre el **ángulo de observación** y la topografía, que producen efectos de *foreshortening*, *layover* y *shadow* (subapartado 2.1.2.2.3). Esto limita la detección de puntos de medida en escarpes verticalizados y en laderas con una orientación desfavorable con respecto a la geometría de adquisición. Por ello, para interpretar correctamente el movimiento en el caso de las inestabilidades de ladera, es conveniente analizar los datos de desplazamiento LOS adquiridos tanto en órbita ascendente como descendente, así como datos de desplazamiento vertical y horizontal (E-O). Por último, conviene señalar que el estudio de movimientos de ladera en zonas vegetadas o cubiertas por nieve también está sujeto a importantes limitaciones, pues estas zonas favorecen la ocurrencia de fenómenos de pérdida de coherencia que limitan la obtención de puntos de medida.

4.1.2.1 Caso 3. Movimiento de ladera en suelos y rocas: Valle de Tena (Huesca, España)

El Valle de Tena está ubicado en la parte superior de la cuenca del río Gállego en los Pirineos Centrales (España). El valle se extiende sobre un área de unos 50 km², con altitudes que oscilan entre los 1200 y los 2000 m, y constituye una zona estructuralmente compleja desde el punto de vista geológico y tectónico. De acuerdo con los estudios previos realizados en la zona, el valle presenta más de 110 movimientos de ladera (Notti et al., 2010), abarcando distintas tipologías de movimiento y afectando a distintos materiales (desprendimientos rocosos, flujos de tierra, deslizamientos rotacionales, etc.). En relación con la aplicación de técnicas InSAR en la zona, existen varios estudios, realizados tanto a escala regional (García-Davalillo et al., 2014; Herrera et al., 2013) como local (Bru et al., 2018). De acuerdo con estos trabajos, los movimientos de ladera del Valle del Tena se relacionan con distintos factores desencadenantes, tanto naturales (erosión fluvial, precipitaciones, deshielo, etc.) como antrópicos (excavación del pie de taludes, sobrecarga por peso de edificaciones, etc.).

Los datos del EGMS muestran varios movimientos de ladera activos en el Valle del Tena, aunque la vegetación en esta zona limita la densidad de puntos de medida. Las Figuras 40 y 41 ilustran respectivamente los productos CALIBRATED (ascendente y descendente) y ORTHO (vertical y horizontal este-oeste) de la zona norte del valle. Comparando ambas Figuras se aprecia la diferente resolución de ambos productos (subapartado 3.3.1). Analizando la Figura 40, puede observarse que la relación entre la órbita de adquisición del satélite SAR (ascendente o descendente) y la orientación local de las laderas influye en los resultados InSAR. Las áreas que registran valores positivos (indicando acercamiento al satélite) en la órbita ascendente tienen valores negativos (indicando alejamiento del satélite) en la órbita descendente, y viceversa. En la órbita ascendente, el satélite observa que el terreno inestable se aleja en las laderas orientadas hacia el este, ya que el movimiento de ladera se produce a favor de la pendiente. Por otro lado, en la órbita descendente, el satélite detecta que el terreno inestable en las laderas orientadas hacia el este se acerca, también debido al movimiento a favor de la pendiente. Lo contrario ocurre en movimientos de ladera orientados hacia el oeste. Para una mayor comprensión de la interacción entre la orientación de las laderas y de la órbita de adquisición del satélite (ascendente o descendente) consultar la Figura 42. Si ahora observamos los resultados del producto ORTHO de la Figura 41 comprobamos que los movimientos detectados tienen componente vertical (con velocidades máximas de -20 mm/año), pero domina la componente horizontal este-oeste (con velocidades máximas de entre ± 40 y 50 mm/año).

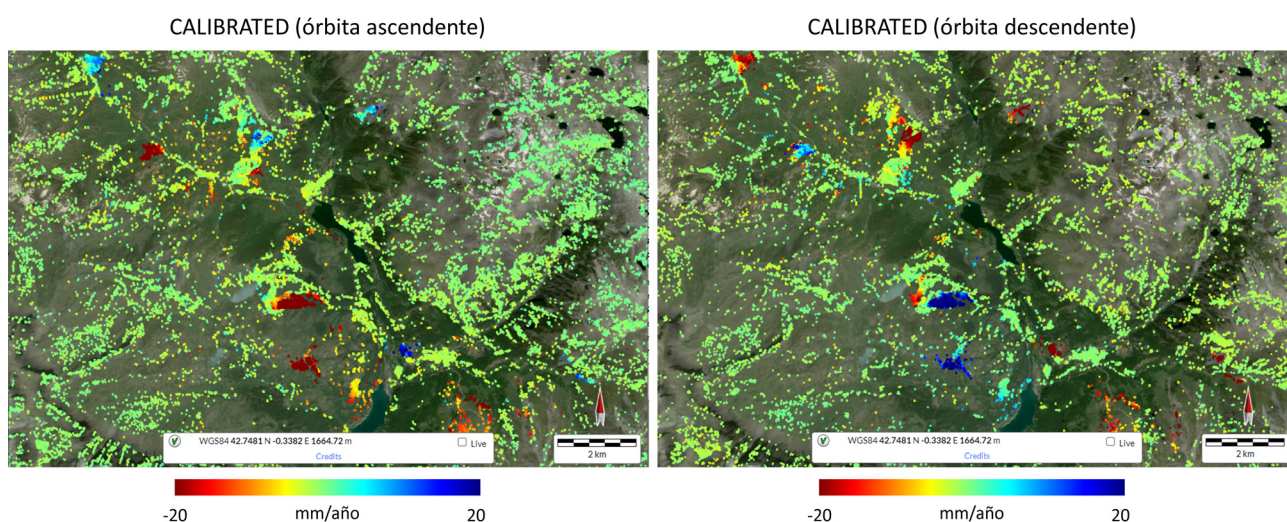


Figura 40: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED de la zona norte del Valle del Tena (España). Las áreas que registran valores positivos (indicando acercamiento al satélite) en la órbita ascendente tienen valores negativos (indicando alejamiento del satélite) en la órbita descendente, y viceversa. Localización: WGS84 -0.407 E, 42.774 N.

La Figura 43 muestra la serie temporal de desplazamiento horizontal este-oeste promedio obtenida para los puntos de medida ubicados dentro del polígono blanco mostrado en la Figura 41. Nótese que dicha zona se ubica sobre un deslizamiento orientado hacia el este. La serie temporal del EGMS refleja un comportamiento lineal sin fluctuaciones estacionales. A partir de 2021, no obstante, se aprecia una desaceleración del movimiento. En todo caso, para llevar a cabo un estudio detallado de los factores condicionantes y desencadenantes del movimiento en cuestión, sería necesario disponer de información geológico-geotécnica y piezométrica.

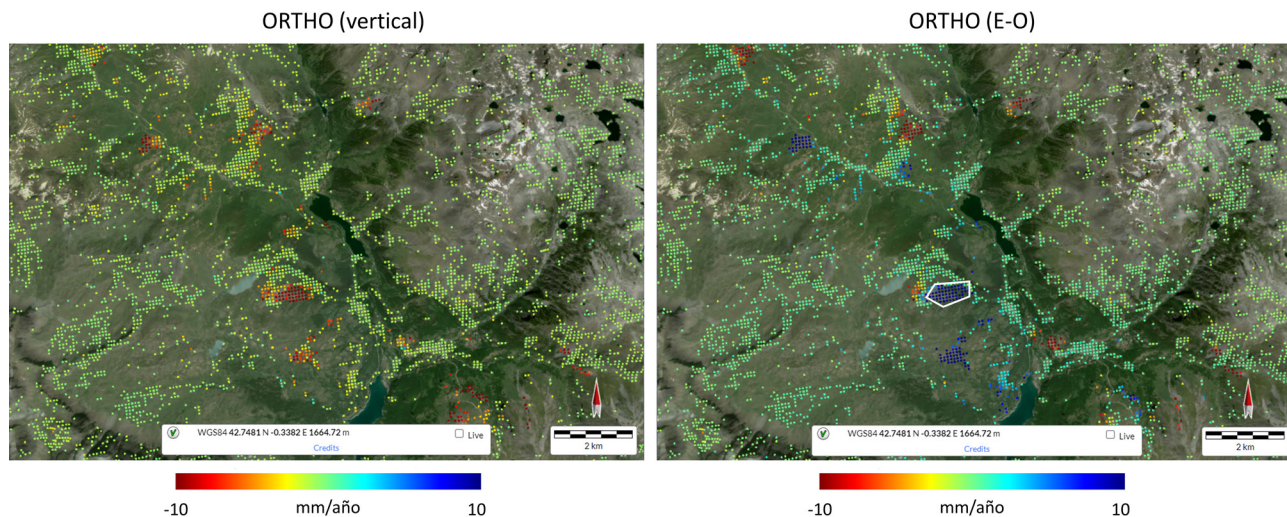


Figura 41: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en la zona del Valle del Tena (España). Nótese que la escala de la leyenda es diferente a la de los mapas CALIBRATED. El polígono blanco del mapa horizontal indica la situación de los puntos de medida promediados para la serie temporal de la Figura 43. Localización: WGS84 -0.407 E, 42.774 N.

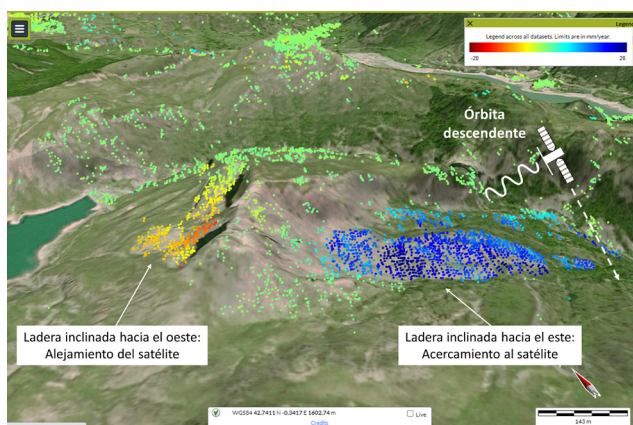
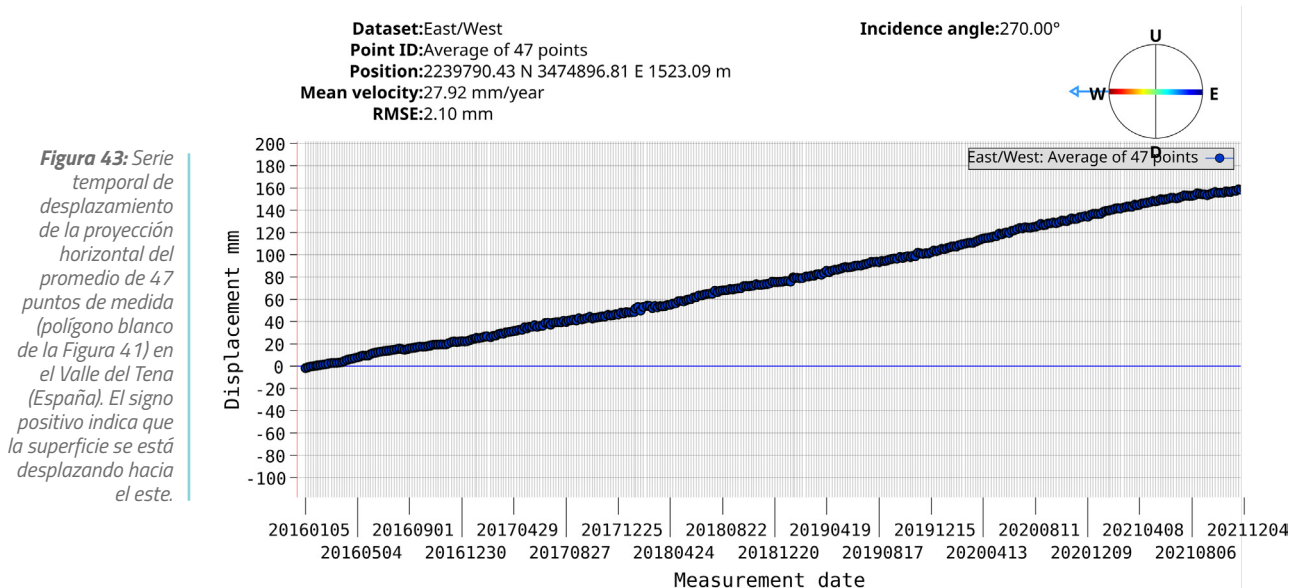


Figura 42: Vista de inestabilidades en laderas opuestas en 3D observadas por el satélite en órbita descendente en el Valle del Tena (España).



4.1.2.2 Caso 4. Movimiento de ladera en suelo: Arcos de la Frontera (Cádiz, España)

Arcos de la Frontera es una ciudad ubicada en la Sierra de Cádiz (Andalucía, España). La geomorfología del lugar está estrechamente controlada por la acción erosiva del río Guadalete, que fluye al pie de la ciudad formando un pronunciado meandro. La ciudad se comenzó a expandir a principios de los años 1960 hacia el oeste, donde el relieve topográfico es suave y los materiales geológicos corresponden a la formación Margas Azules del Guadalquivir, que es muy problemática desde el punto de vista geotécnico. Evidencia de ello son los numerosos movimientos del terreno (deslizamientos, hundimientos, colapsos, y fenómenos fluencia del suelo y de expansión/retracción) ligados a su presencia en distintas zonas de la cuenca del Guadalquivir (Oteo, 2000; Tsige et al., 1995).

El movimiento de la ladera oeste de Arcos de la Frontera ha causado daños de diferente envergadura desde la década de 1970. Entre 2011 y 2021, de manera intermitente, se implementaron medidas de remediación para estabilizar la ladera. El movimiento ha sido estudiado mediante InSAR en varios trabajos, utilizando tanto datos adquiridos con el satélite ENVISAT durante el año 2011 (Bru et al., 2017), como datos adquiridos con la constelación Sentinel-1 durante el año 2016 (Béjar-Pizarro et al., 2017). Ambos estudios muestran un patrón de movimiento similar entre ellos, que también se ve reflejado en los resultados proporcionados por el EGMS. La Figura 44 muestra los resultados de velocidad de las órbitas ascendente y descendente del producto CALIBRATED del EGMS, en los cuales se aprecia claramente el movimiento de la parte alta del deslizamiento (cabecera). Como se observa en esta figura, en la parte media y baja de ladera hacia el río, el EGMS no proporciona puntos de medida, debido principalmente a la presencia de vegetación. La componente principal del movimiento a favor de la pendiente tiene dirección sureste, por ese motivo la órbita ascendente detecta que el terreno se aleja, mientras que la descendente detecta acercamiento (Figura 44). La serie temporal (Figura 45) muestra que a partir de mediados 2018 el movimiento se desacelera, momento que coincide con una de las últimas fases de los trabajos de estabilización (Bru et al., 2024).

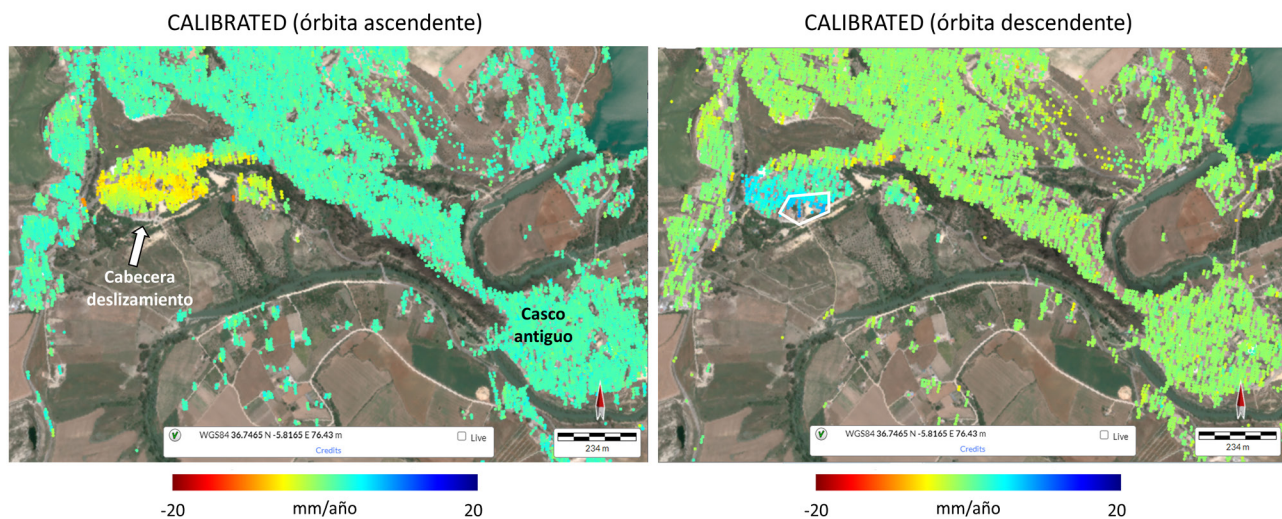
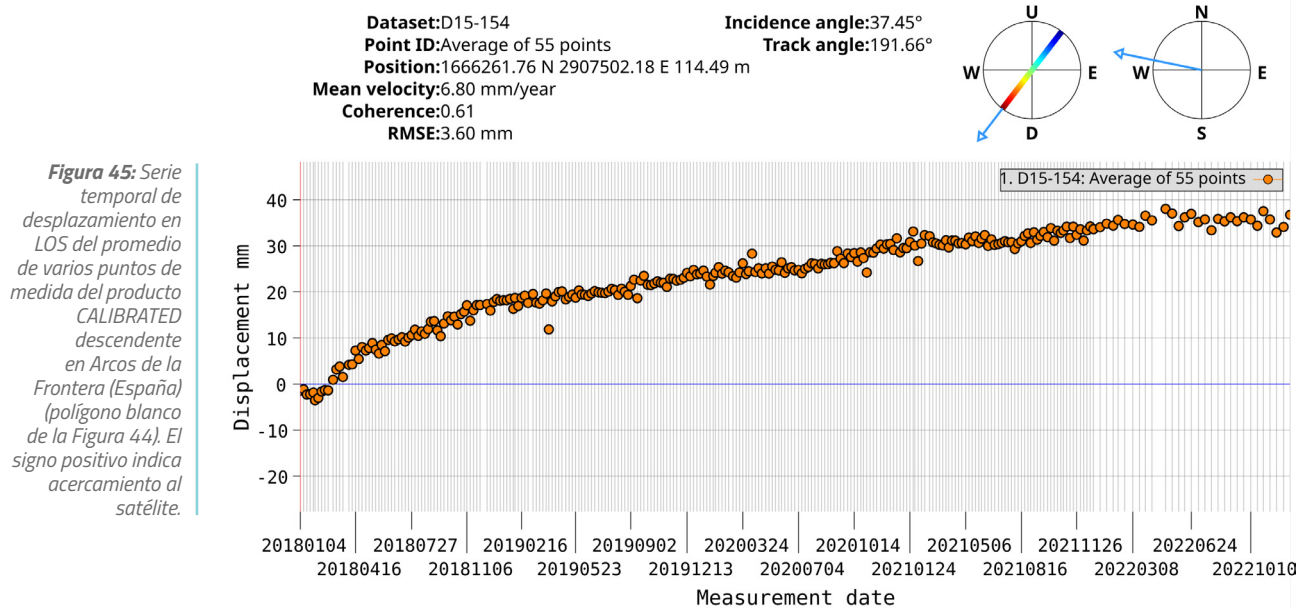


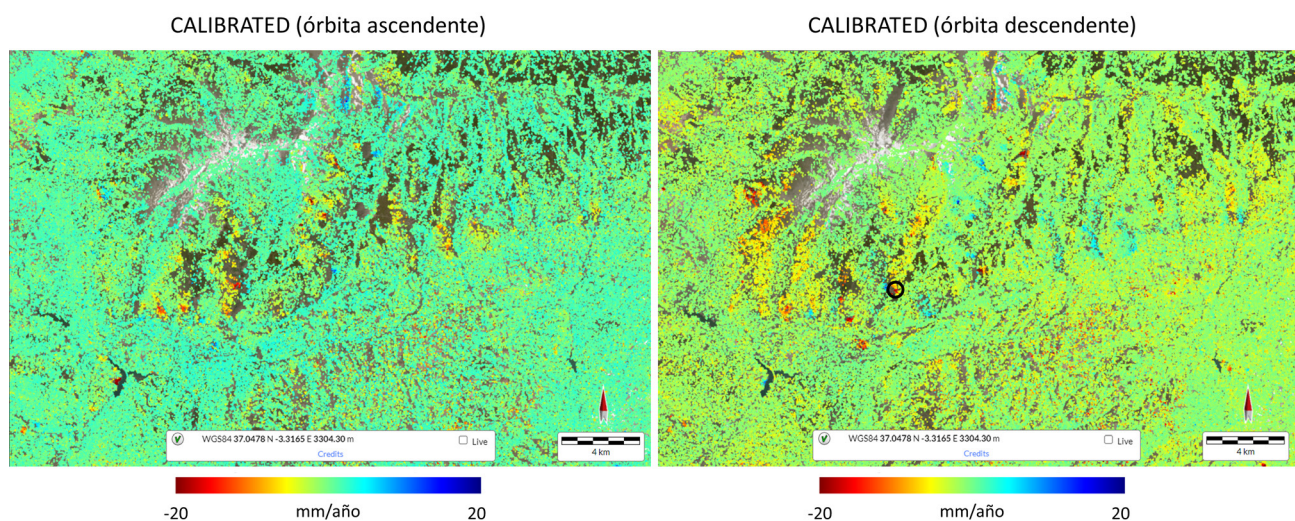
Figura 44: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en Arcos de la Frontera (España). El polígono blanco del mapa horizontal indica la situación de los puntos de medida elegidos para mostrar la serie temporal de la Figura 45. Localización: WGS84 -5.81027876 E,36.7461302 N.



4.1.2.3 Caso 5. Movimiento de ladera en roca: Sierra Nevada (Granada, España)

Sierra Nevada es una cadena montañosa situada en el sur de España, entre las provincias de Granada y Almería. Los altos gradientes topográficos de Sierra Nevada han desencadenado la formación de grandes deformaciones gravitacionales profundas de ladera o DGSDs (*Deep-seated Gravitational Slope Deformations*), que han sido recientemente identificadas (Reyes-Carmona et al., 2023). Este tipo de deformaciones afectan a laderas rocosas de barrancos y valles en toda su extensión (de cresta a fondo de valle), y generan un movimiento lento (del orden de milímetros al año) y profundo (decenas de metros) de grandes volúmenes de roca. Estos movimientos de ladera son activos, algunos en su totalidad y otros solo en sectores localizados, con velocidades LOS de en torno a -30 mm/año, detectadas mediante InSAR con imágenes de Sentinel-1 (Reyes-Carmona et al., 2023).

Los datos del EGMS (Figuras 46 y 47) muestran diferentes áreas de Sierra Nevada con movimientos activos que son consistentes con la actividad registrada previamente, tanto en términos de magnitud como en términos de distribución espacial. Los valles presentan una densidad de puntos variable, siendo alta en construcciones (pueblos) y en zonas de roca desnuda, donde se mantiene la coherencia temporal. Por el contrario, la coherencia temporal es menor y la densidad de puntos es nula en laderas muy pronunciadas, en zonas de vegetación densa, así como en las altas cumbres con nieve estacional. Las series temporales indican un movimiento lineal constante (Figura 48).



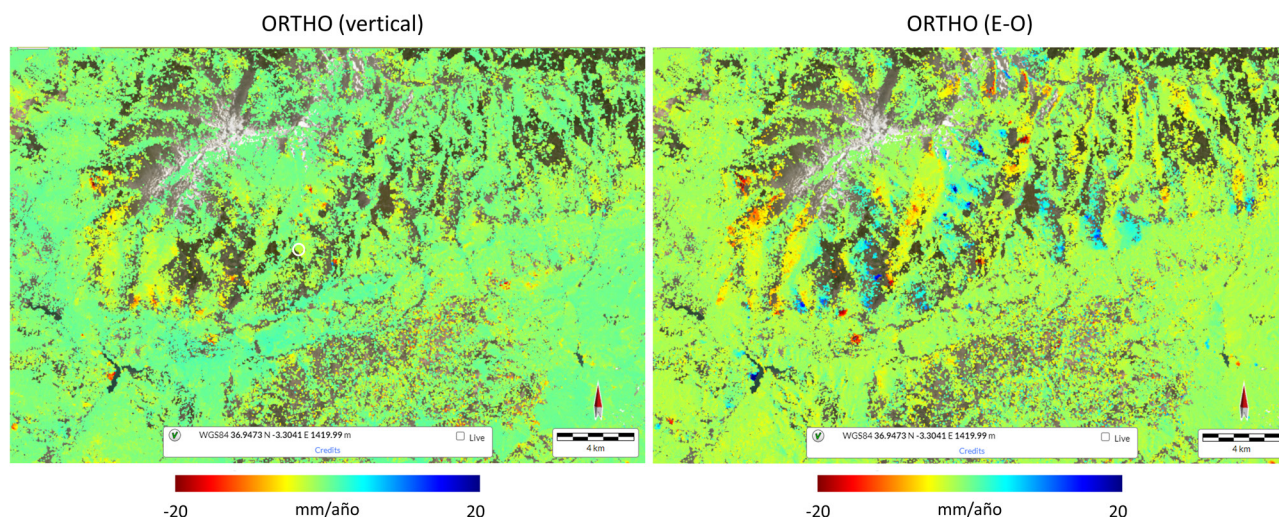
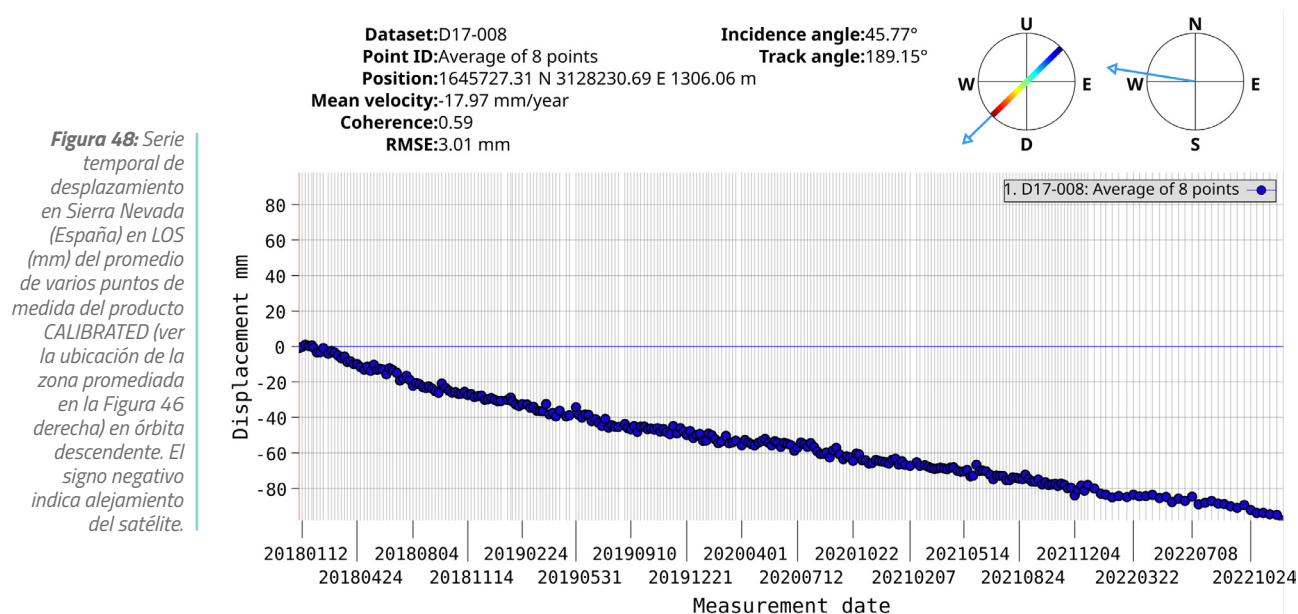


Figura 47: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Sierra Nevada (España). Localización: WGS84 -3.253 E, 37.059 N.



4.1.2.4 Caso 6. Movimiento de ladera en roca: Albuñuelas (Granada, España)

Albuñuelas es una pequeña localidad situada en el sector occidental de la provincia de Granada. Al noroeste de este pueblo, se encuentra una expansión lateral en roca (*rock spreading*), identificada por Galve et al. (2017). Este tipo de movimiento de ladera involucra a una roca cohesiva (calcarenitas en este caso) que se desliza y deforma sobre un material menos coherente (limos y arcillas). Durante la deformación plástica del material más débil, se produce la una elongación lateral y rotura progresiva de la roca en bloques, cuya fracturación y disgregación es mayor hacia el pie de la ladera. La expansión lateral de Albuñuelas es activa, con una velocidad LOS máxima documentada de 8 mm/año (Galve et al., 2017). Esta circunstancia concuerda con la información proporcionada por el EGMS, la cual indica que el movimiento presenta velocidades absolutas LOS entre los 5 y los 10 mm/año en ambas órbitas (Figura 49). Por otro lado, según el producto ORTHO del EGMS, la componente vertical del movimiento es prácticamente nula, mientras que en la dirección horizontal este-oeste, el movimiento muestra una velocidad promedio de más de 6 mm/año, lo cual es coherente con el desplazamiento lateral hacia el este de la ladera (Figura 50). La serie temporal del producto ORTHO este-oeste (Figura 51) registra un desplazamiento acumulado de más de 30 mm en el periodo de medida (2018-2022).

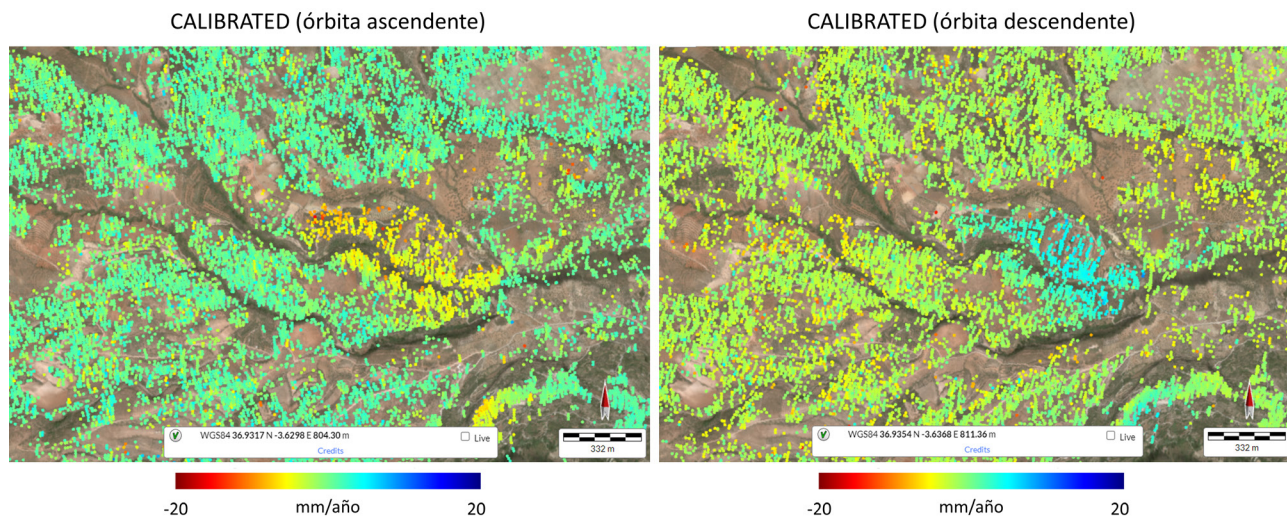


Figura 49: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en Albuñuelas (España). Localización: WGS84 -3.639 E, 36.933 N.

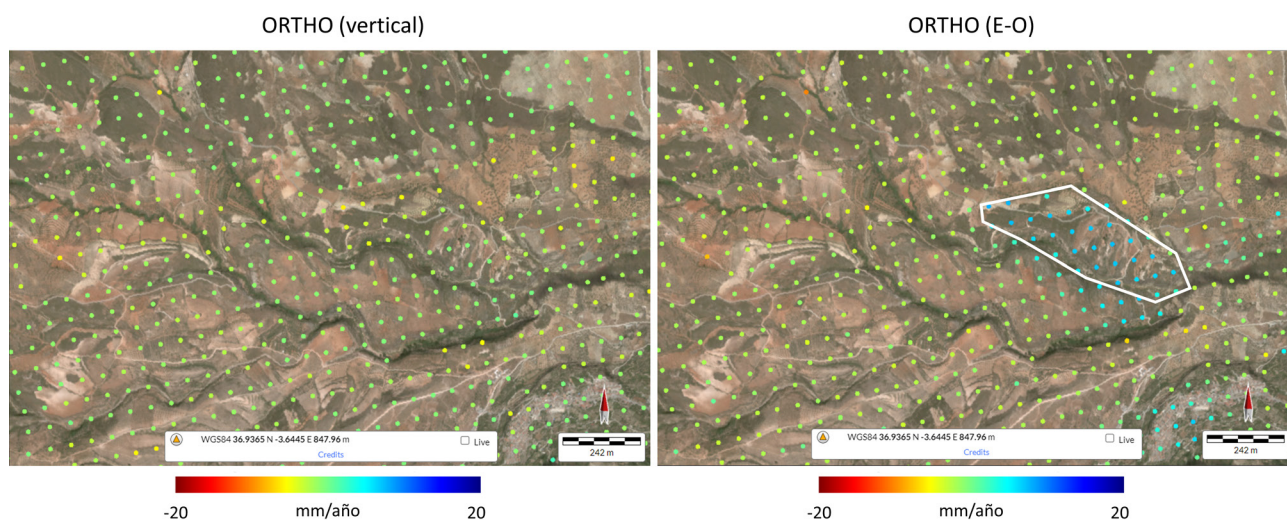
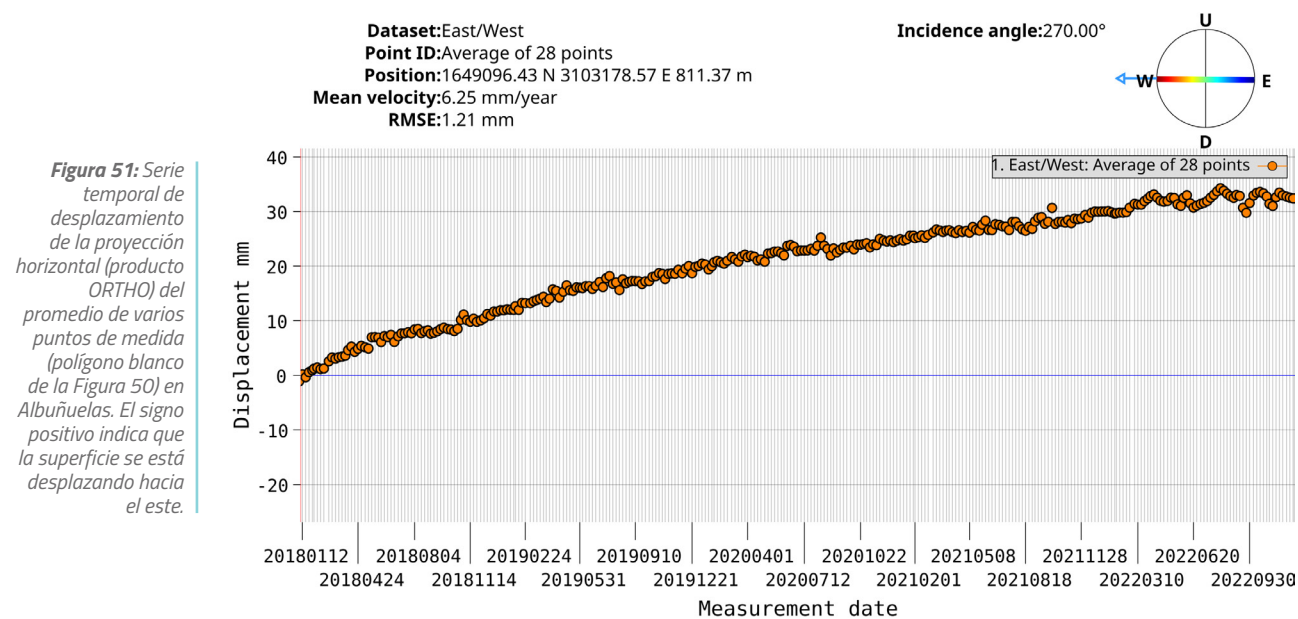


Figura 50: Mapa de velocidad vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Albuñuelas (España). El polígono blanco indica la zona seleccionada para mostrar la serie temporal de la Figura 51. Localización: WGS84 -3.639 E, 36.933 N.



4.1.3 Tectónica – Terremotos

La corteza terrestre en torno a las fallas activas se deforma a lo largo de su ciclo sísmico (Scholz, 1998). Este ciclo incluye extensos períodos de carga (fase intersísmica) seguidos por períodos rápidos de liberación de energía o de descarga en forma de terremotos (ver Figura 52).

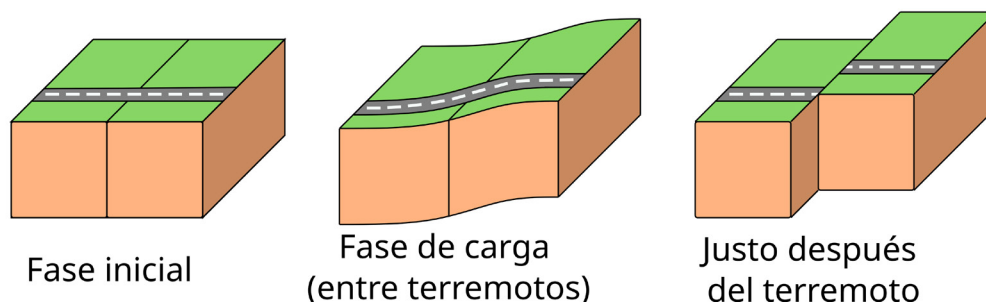


Figura 52: Representación esquemática de la deformación del terreno en torno a una falla de desgarre antes y después de un terremoto.

Las técnicas InSAR permiten medir la deformación de la superficie terrestre en los periodos de descarga (Elliott et al., 2016) provocados por diferentes [tipos de fallas](#). Esta deformación es normalmente medible mediante InSAR cuando se trata de terremotos de magnitud moderada a alta (> 5) y ocurren a profundidades someras. Las deformaciones asociadas a otras fases del ciclo sísmico (por ejemplo, periodo intersísmico, postsísmico) son más difíciles de medir mediante InSAR y requieren adaptar la estrategia de procesamiento y/o post-procesado a cada caso, por lo que los servicios como el EGMS no son los más adecuados para estudiar este tipo de deformaciones.

Respecto a las deformaciones causadas por los terremotos, es importante considerar que los algoritmos de procesamiento utilizados para generar el producto EGMS se basan en un enfoque lineal de [desenrollado de fase](#), como se detalla en el subapartado 3.3.2. Esto implica que las deformaciones o desplazamientos del terreno que sean grandes, bruscos y no lineales, generando saltos en las series temporales, como los producidos por algunos terremotos, pueden no detectarse adecuadamente. A continuación, se presentan dos ejemplos de deformaciones asociadas a terremotos en los cuales el EGMS ha ajustado localmente los parámetros de [desenrollado](#) de manera no lineal, permitiendo así su identificación.

4.1.3.1 Caso 7. Terremoto de Norcia (Centro de Italia), octubre de 2016

La actividad tectónica en Italia es notable debido a su ubicación en el límite de las placas euroasiática y africana. Esta interacción de placas genera una alta sismicidad y actividad volcánica en la región, con terremotos frecuentes y presencia de volcanes activos. El 30 de octubre de 2016, se produjo un terremoto de magnitud (M_w) 6.5 en el centro de Italia. Fue el terremoto más grande de una secuencia que se inició dos meses antes y duró hasta enero de 2017. Estos terremotos causaron más de 300 muertos y destruyeron un gran número de edificios en las poblaciones afectadas. El terremoto ocurrió a 10 km de profundidad en una falla normal, la falla de Mount Vettore (Cheloni et al., 2017).

En la Figura 53 (izquierda) se observa la deformación vertical asociada a este terremoto de acuerdo con los datos del EGMS del periodo 2016-2021, que muestra una zona roja (al este) con hundimientos del terreno y una zona al oeste con levantamientos del terreno. La deformación horizontal (Figura 53 derecha) muestra un patrón similar, con una zona al este (azul) que se desplaza hacia el este y una zona al oeste (roja) que se desplaza hacia el oeste. Las flechas del bloque diagrama de la Figura 54 muestran las direcciones que representan cada signo y color. En las series temporales del desplazamiento vertical (Figura 55) y horizontal (Figura 56) se observa un salto escalonado, debido a los diferentes terremotos que tuvieron lugar en la secuencia.

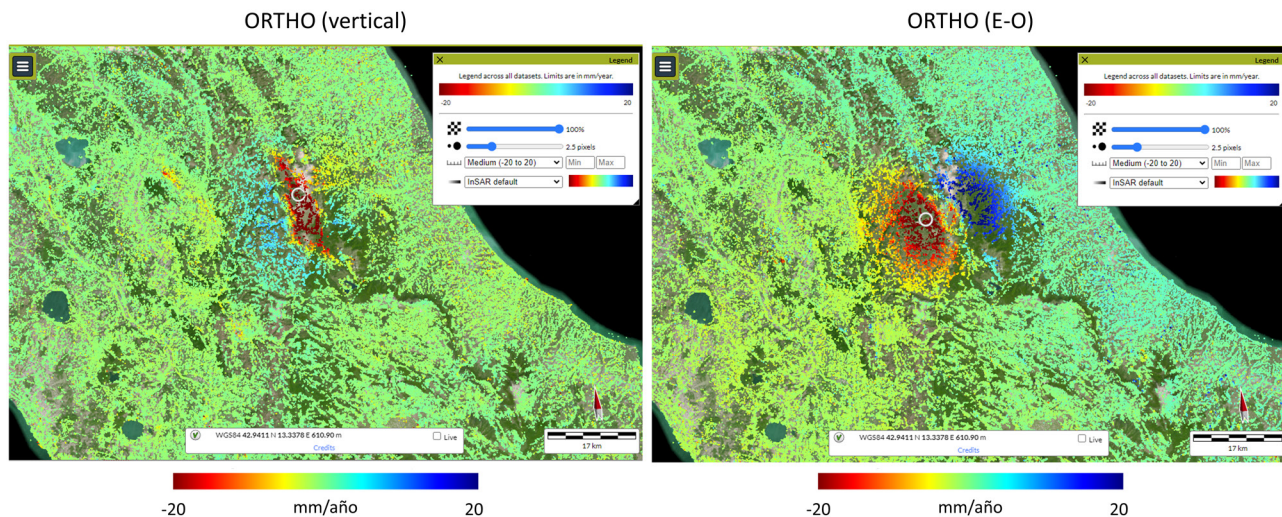


Figura 53: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Norcia (Italia). Cada círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar las series temporales correspondientes de las Figuras 55 y 56. Localización: WGS84 13.250 N, 42.800 E.

Figura 54: Esquema simplificado de una falla normal donde se muestran las direcciones que representan cada signo y color de la leyenda empleada en el EGMS. En la vertical, el signo positivo indica levantamiento y el negativo hundimiento. En la horizontal el signo negativo indica movimiento hacia el oeste y el positivo hacia el este.

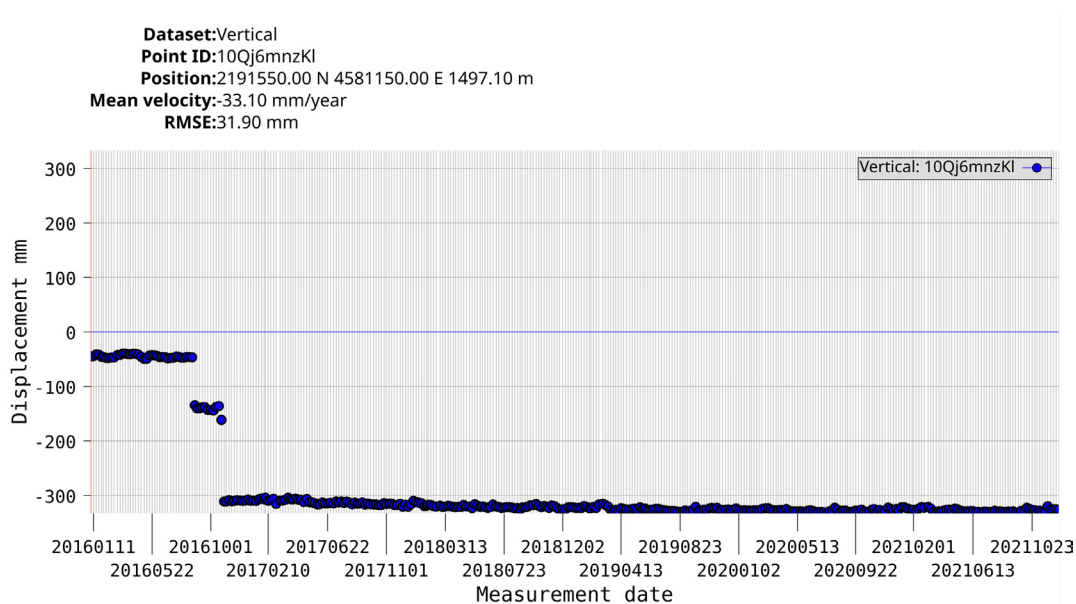
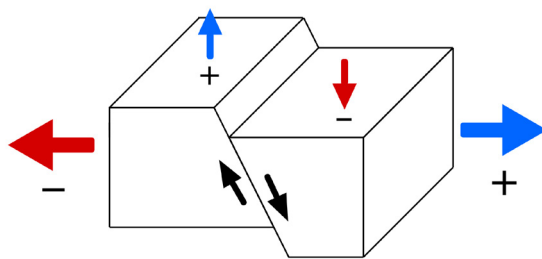
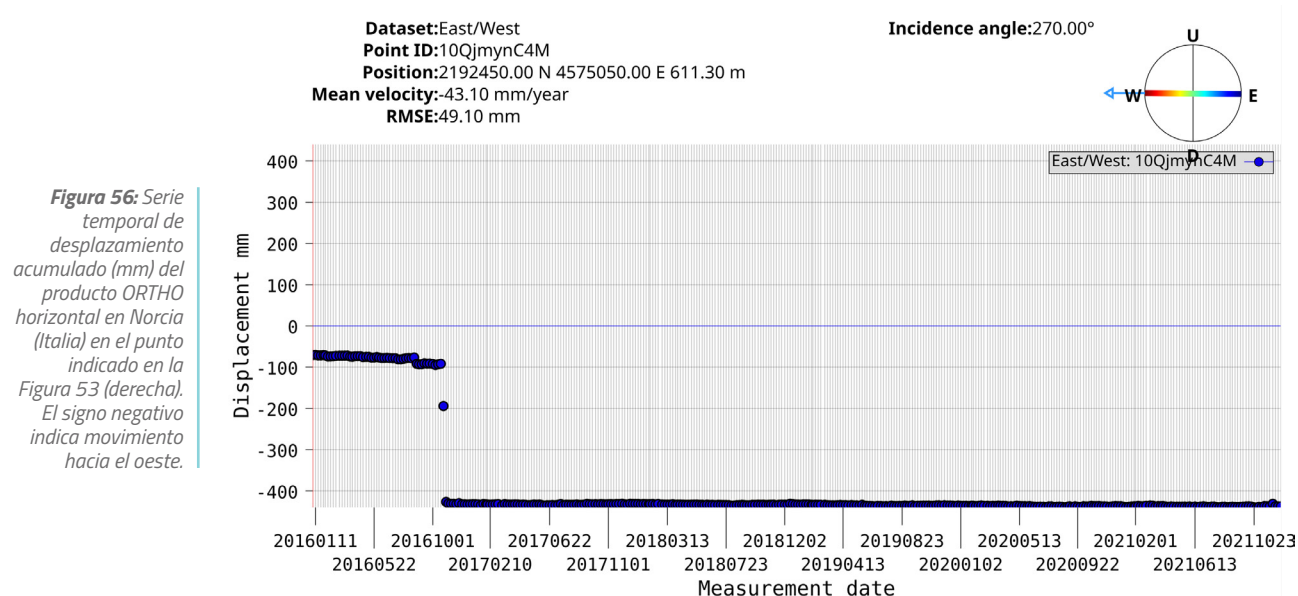


Figura 55: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) del producto ORTHO vertical en Norcia (Italia) en el punto indicado en la Figura 53 (izquierda).



4.1.3.2 Caso 8. Terremoto de Petrinja (Croacia), diciembre de 2020

Croacia se ubica en una región tectónicamente activa, donde la placa euroasiática se separa de la placa africana, lo que provoca una cierta actividad sísmica y la ocurrencia ocasional de terremotos en el país. El 28 de diciembre de 2020 se produjo el mayor terremoto registrado en Croacia en la historia reciente, con una magnitud (M_w) 6.2 y un epicentro localizado a unos 5 km al oeste-suroeste de la ciudad de Petrinja y a unos 50 km de la capital Zagreb. El terremoto tuvo lugar a menos de 7 km de profundidad, en una falla dextral con una ligera componente inversa (Henriquet et al., 2022). Este evento causó la pérdida de siete vidas, decenas de personas heridas y daños extensos en edificios (Atalić et al., 2023).

En la Figura 57 (izquierda) se observa la deformación vertical asociada a este terremoto de acuerdo con los datos del EGMS, que muestra una zona roja que indica hundimiento y una zona azul que indica levantamiento. La deformación horizontal (Figura 57 derecha) muestra un patrón similar, con una zona azul que indica desplazamiento hacia el este y una zona roja que se desplaza hacia el oeste. Las flechas del bloque diagrama de la Figura 58 muestran las direcciones que representan cada signo y color. En las series temporales de desplazamiento se observa un salto de unos -80 mm en la vertical (Figura 59) y más de 300 mm en la horizontal (Figura 60) en la fecha del terremoto.

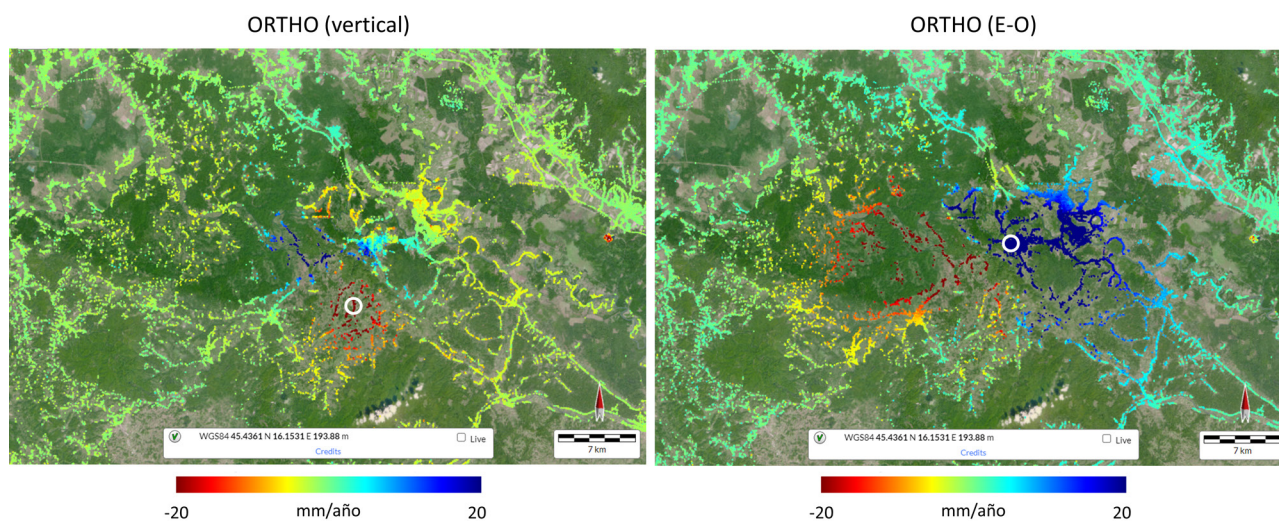


Figura 57: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Petrinja (Croacia). Cada círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar las series temporales correspondientes de las Figuras 59 y 60. Localización: WGS84 16.227 E, 45.457 N.

Figura 58: Esquema simplificado de una falla dextral con una ligera componente inversa donde se muestran las direcciones que representa cada signo y color de la leyenda empleada en el EGMS. En la horizontal el signo negativo indica movimiento hacia el oeste y el positivo hacia el este. En la vertical, el signo positivo indica levantamiento y el negativo hundimiento.

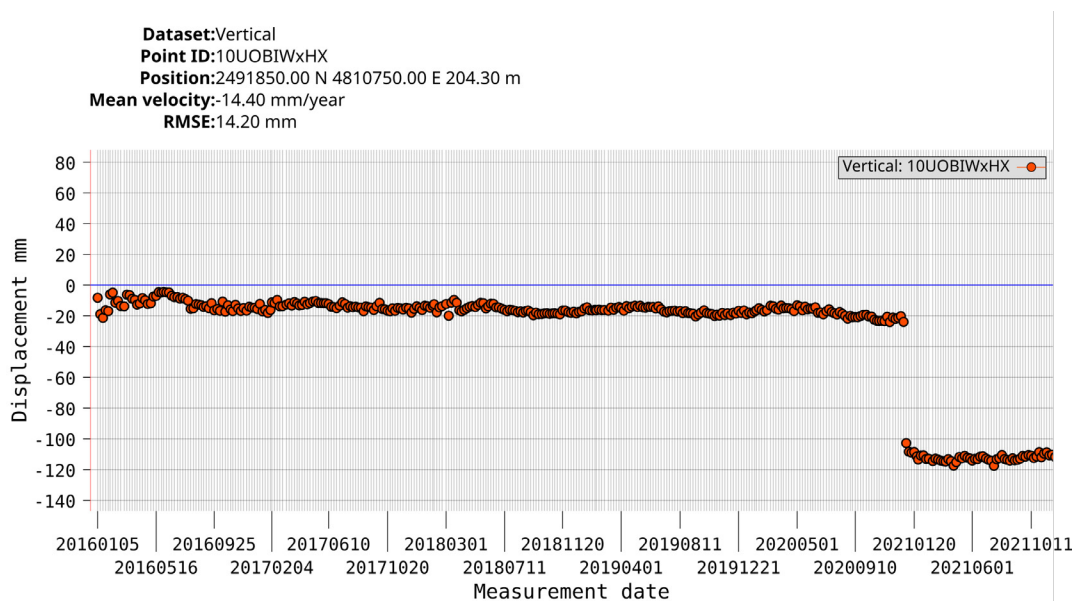
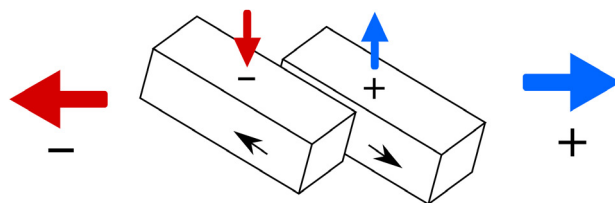


Figura 59: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) del producto ORTHO vertical en Petrinja (Croacia) en el punto mostrado en la Figura 57 (izquierda).

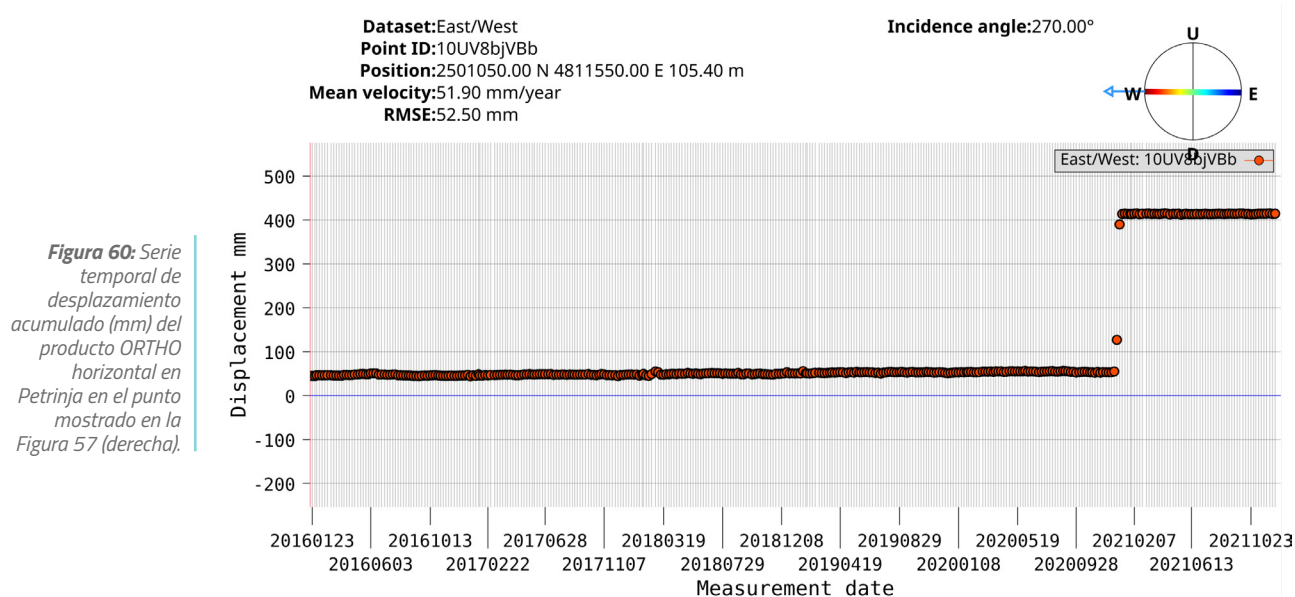


Figura 60: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) del producto ORTHO horizontal en Petrinja en el punto mostrado en la Figura 57 (derecha).

4.1.4 Procesos volcánicos

Un volcán es una acumulación de materiales expulsados de forma explosiva o efusiva a través de uno o varios conductos o fisuras en la superficie de la Tierra. Son sistemas geológicamente complejos que engloban diferentes tipos de actividad eruptiva y que pueden producir estructuras volcánicas de distinta morfología y tamaño, dependiendo de varios factores como la composición del magma o el contenido en gases. El modelo clásico del ciclo de deformación volcánica (Biggs and Pritchard, 2017) establece que en periodos entre erupciones se produce levantamiento del terreno y durante las erupciones se produce subsidencia (Figura 61). Este modelo simplificado es válido para analizar la deformación en volcanes, pero se debe tener en cuenta que no todos se comportan de esta manera. Además, pueden producirse intrusiones que generen deformación sin que los fluidos magmáticos alcancen la superficie, como ocurrió en la isla de São Jorge (Azores, Portugal) en marzo de 2022.

Es importante considerar de nuevo que los algoritmos de procesamiento utilizados para generar los productos del EGMS se basan en un enfoque lineal de **desenrollado de fase**, como se detalla en el subapartado 3.3.2 Por esta razón, en eventos como intrusiones magmáticas rápidas, como la ocurrida durante la erupción en la isla de La Palma en septiembre de 2021, el EGMS puede no reflejar el salto de desplazamiento en las series temporales que corresponde (Ezquerro et al., 2023), a no ser que se ajusten localmente los parámetros del procesado para esas zonas.

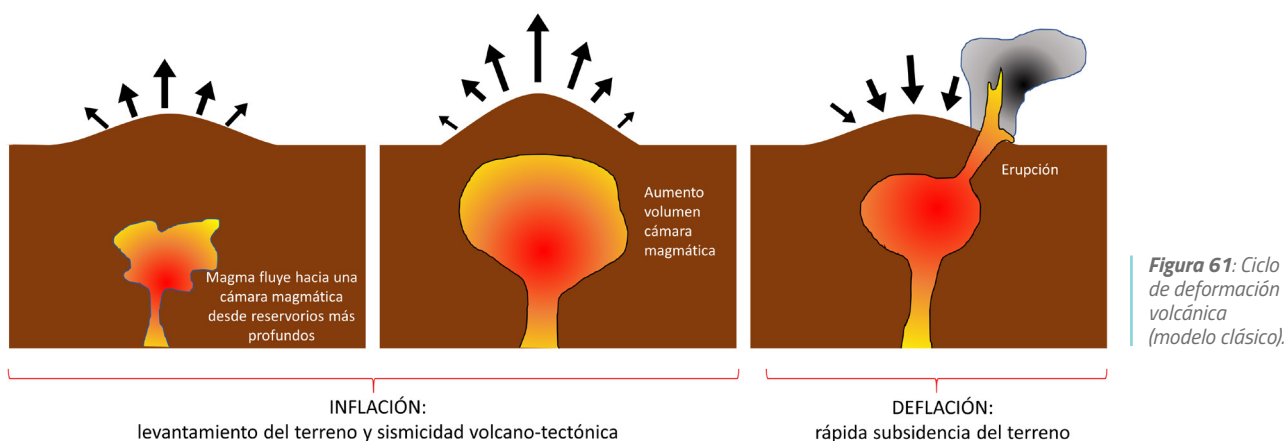


Figura 61: Ciclo de deformación volcánica (modelo clásico).

4.1.4.1 Caso 9. Campi Felgrei (Italia)

La caldera de Campi Felgrei, situada en el Golfo de Pozzuoli al oeste de Nápoles (Italia), se considera uno de los sistemas volcánicos en reposo con más riesgo del mundo debido a que se encuentra en una zona muy densamente poblada. La caldera experimenta repetidas fases de levantamiento y de hundimiento, aunque la última erupción data de 1538. Desde 1950, se han registrado cuatro episodios de levantamiento y sismicidad que elevaron la ciudad costera de Pozzuoli hasta 4 m y provocaron la evacuación repetida de unas 40,000 personas (Charlton et al., 2020; Tramelli et al., 2022). La fase actual de levantamiento comenzó en 2005. Las hipótesis de las causas de los episodios de levantamiento son la sobrepresión del sistema hidrotermal superficial, el movimiento de magma a través de la corteza, o ambos fenómenos.

La Figura 62 contiene los mapas de velocidad del producto ORTHO que muestran un abombamiento de la superficie del terreno con un patrón esférico que en parte se ve enmascarado por la presencia del mar, donde las técnicas InSAR no permiten obtener puntos de medida. La velocidad vertical máxima se observa en el centro de la caldera y va decreciendo hacia los bordes. Por otro lado, en el producto horizontal, se observan las componentes este-oeste del movimiento. La realidad es que el hinchamiento en la caldera también produce movimientos en las componentes norte-sur. En caso de disponer de mediciones de una red **GNSS**, se podrían determinar todas las componentes del movimiento, y los resultados mostrarían un patrón circular concéntrico en la horizontal. La serie temporal del desplazamiento muestra el proceso de levantamiento actual (periodo 2018-2022) con una tasa que supera los 100 mm/año en la vertical (Figura 63).

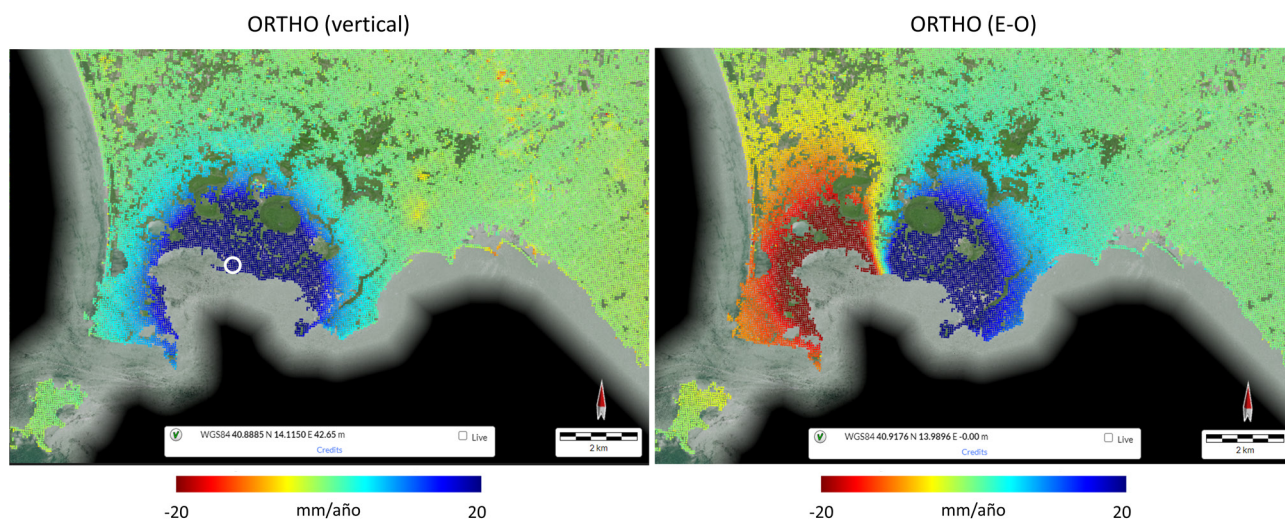


Figura 62: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Campi Felgri (Italia). El círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 63. Localización: WGS84 14.182 E, 40.832 N.

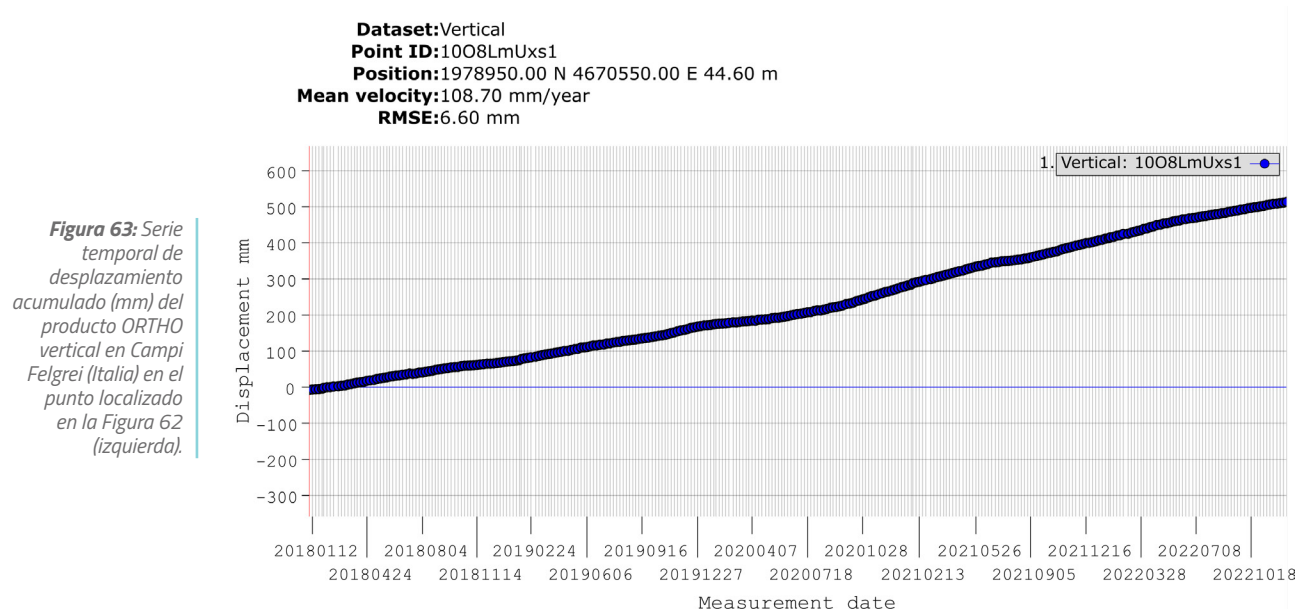


Figura 63: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) del producto ORTHO vertical en Campi Felgri (Italia) en el punto localizado en la Figura 62 (izquierda).

4.1.4.2 Caso 10. Santorini (Grecia)

La caldera de Santorini es una extensa caldera volcánica, gran parte de la cual se encuentra sumergida, ubicada en el sur del mar Egeo. Sobre la superficie del mar se encuentra un grupo circular de islas conocido como Santorini, que está compuesto por la isla principal, Santorini, junto con las islas Therasia y Aspronisi en los bordes de la caldera, y las dos islas Kameni en el centro del grupo. La última gran erupción data de hace 3,600 años. Sin embargo, la erupción más reciente de 1950 estuvo relacionada con la formación de las islas intra-caldera de Palea Kameni y Nea Kameni. La última reactivación del volcán fue en 2011, pero no culminó en una erupción. Dicho episodio produjo, no obstante, un aumento de la actividad microsísmica y un significativo levantamiento del suelo, alcanzando los 140 mm desde marzo de 2011 hasta marzo de 2012 en Cabo Skaros, y los 90 mm en Nea Kameni. Actualmente (periodo 2018-2022) el centro de la caldera está en un proceso de subsidencia constante de entre -5 y -8 mm/año, en línea con la fase de deflación previa a 2011 (Papageorgiou et al., 2019), tal y como muestran las Figuras 64 y 65. Únicamente mostramos el producto ORTHO vertical, ya que los productos CALIBRATED y ORTHO este-oeste muestran la velocidad de movimiento tectónico regional de Grecia hacia el oeste, enmascarando los movimientos locales (ver explicación en subapartado 3.3.1 y 5.4.1). El producto BASIC, al tener una referencia local, también sería adecuado para analizar este caso.

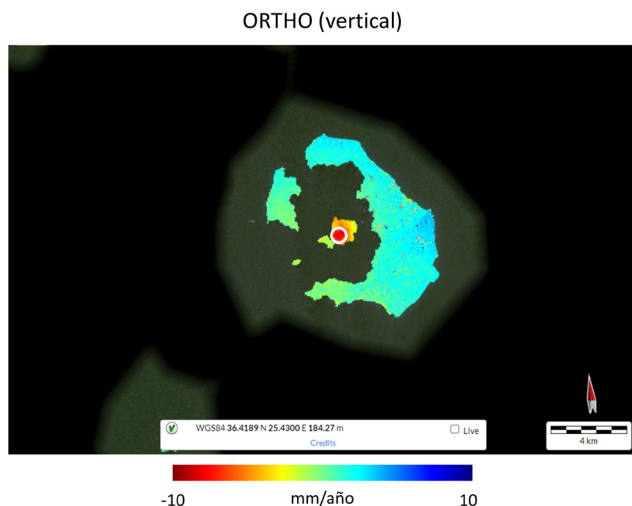
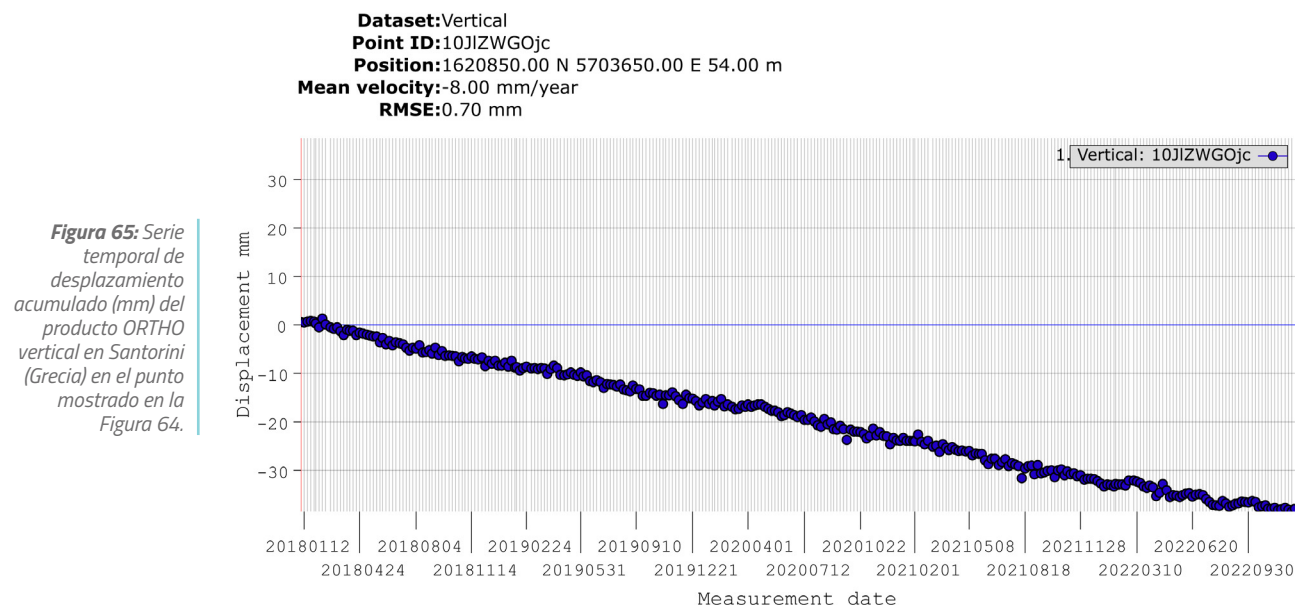


Figura 64: Mapa de velocidad vertical en mm/año del producto ORTHO en Santorini (Grecia). El círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 65. Localización: WGS84 25.321 E, 36.402 N.



4.1.5 Karstificación y dolinas

Las dolinas son depresiones del terreno cerradas que presentan los terrenos kársticos (Figura 66), aquellos en los que los procesos de disolución de las rocas juegan un papel determinante en la configuración del relieve (Gutiérrez et al., 2005). Las dolinas están relacionadas con disolución de rocas carbonatadas (calizas y dolomías) o evaporíticas (yesos y sales). Según su génesis, las dolinas pueden ser de disolución superficial, cuando son debidas a karstificación superficial de las rocas, o de hundimiento, cuando la karstificación de las rocas es subsuperficial y provoca la

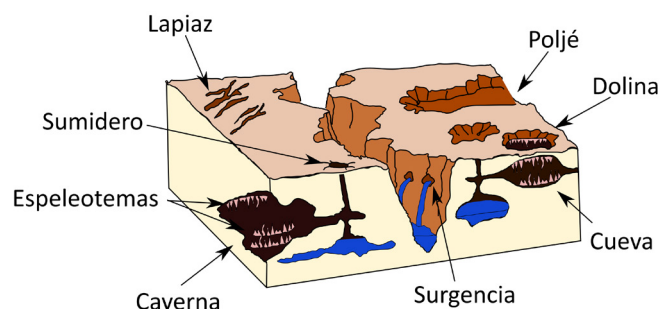


Figura 66: Esquema simplificado de un relieve kárstico.

deformación gravitacional de éstas y la subsidencia gradual o brusca de la superficie del terreno. En el caso de las dolinas de hundimiento o subsidencia, pueden ser consecuencia de la actuación individual o integrada de tres mecanismos: (1) colapso del techo de cavidades subterráneas, (2) migración de partículas superficiales a través de conductos kársticos y acomodación progresiva de la superficie o (3) flexión gravitacional por karstificación diferencial (Galve et al., 2009). Las dolinas pueden tener un impacto y riesgo asociado importante, con repercusiones económicas y sociales. La deformación progresiva del terreno de las dolinas de subsidencia puede provocar daños graves en infraestructuras (edificios, obras lineales, presas, centrales energéticas) e incluso poner en peligro la vida de las personas cuando las dolinas se generan de forma catastrófica (colapsos). Generalmente, los procesos de disolución y subsidencia son más rápidos en rocas evaporíticas que en carbonatadas, debido a la mayor solubilidad y menor resistencia mecánica de las evaporitas (Gutiérrez et al., 2008). En España, existen zonas en las que las dolinas por disolución de carbonatos han causado daños, aunque este tipo de problemas están relacionados principalmente con dolinas por disolución de evaporitas (Gutiérrez et al., 2005).

4.1.5.1 Caso 11. Valle del Ebro (Zaragoza, España)

El valle del río Ebro es una amplia depresión topográfica del noreste de España. Las dolinas del sector central de este valle en el entorno de la ciudad de Zaragoza han sido ampliamente estudiadas desde el punto de vista geológico y geomorfológico, y monitorizadas durante las últimas décadas (Carbonel et al., 2015; Castañeda et al., 2009; Galve et al., 2015; Galve et al., 2009; Guerrero et al., 2021; Gutiérrez et al., 2011). El desarrollo de estas dolinas está relacionado con la disolución preferencial de rocas evaporíticas (yesos) situadas bajo aluviones cuaternarios. La subsidencia activa asociada a estas dolinas ha generado daños en zonas urbanas, industriales y en vías de tren de alta velocidad en los alrededores de Zaragoza. Dicha subsidencia ha sido monitorizada mediante diversas técnicas de teledetección, como el InSAR, la nivelación diferencial o el LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Con respecto a la monitorización InSAR, los trabajos previos, realizados utilizando datos de las constelaciones ERS, ENVISAT, ALOS-PALSAR y Sentinel-1, indican tasas de desplazamiento LOS de entre -4 y -17.3 mm/año (Galve et al., 2015; Guerrero et al., 2021). Estos resultados son coherentes con los datos del EGMS, que reflejan velocidades LOS máximas de hasta 20 mm/año en órbita ascendente para el periodo 2018-2022 (Figura 67). La velocidad vertical se encuentra en el rango de -5 a -10 mm/año, pero la pérdida de resolución del producto ORTHO impide la visualización de las áreas circulares de depresión del terreno (Figura 68). La velocidad horizontal es despreciable, lo que es coherente con el fenómeno de subsidencia y su cinemática, donde la componente principal del movimiento es la vertical. Por último, la serie temporal en órbita ascendente (Figura 69) refleja un desplazamiento LOS acumulado de hasta 140 mm en el periodo de medida 2015-2021, evidenciando un patrón de movimiento lineal.

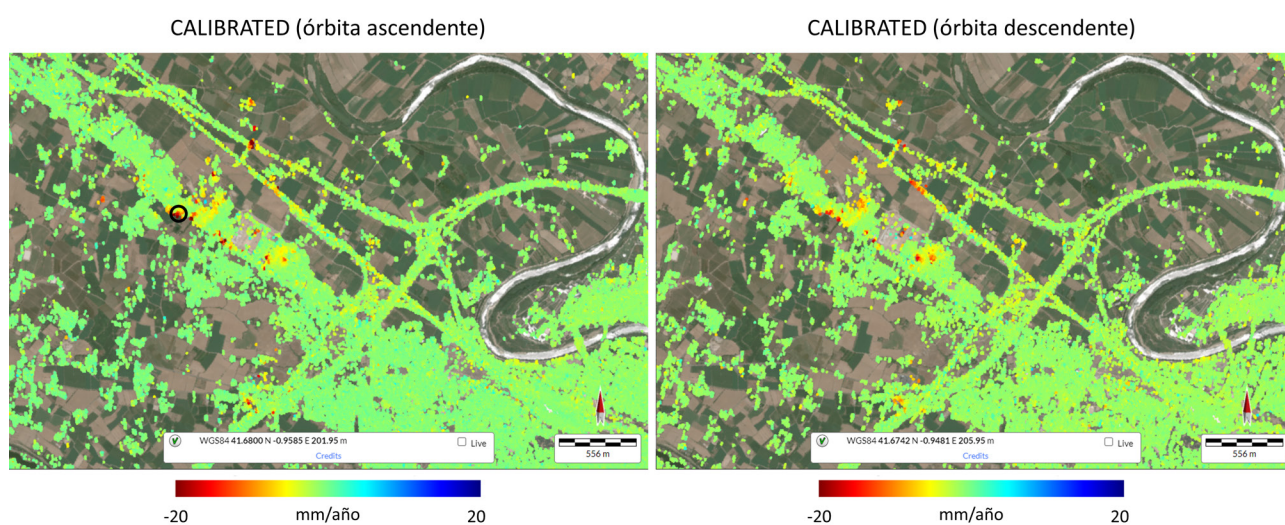


Figura 67: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en el tramo medio del valle del río Ebro al noroeste de la ciudad de Zaragoza (España). El círculo negro indica la zona con los puntos seleccionados para mostrar la serie temporal de la Figura 69. Localización: WGS84 -0.942 E, 41.675 N.

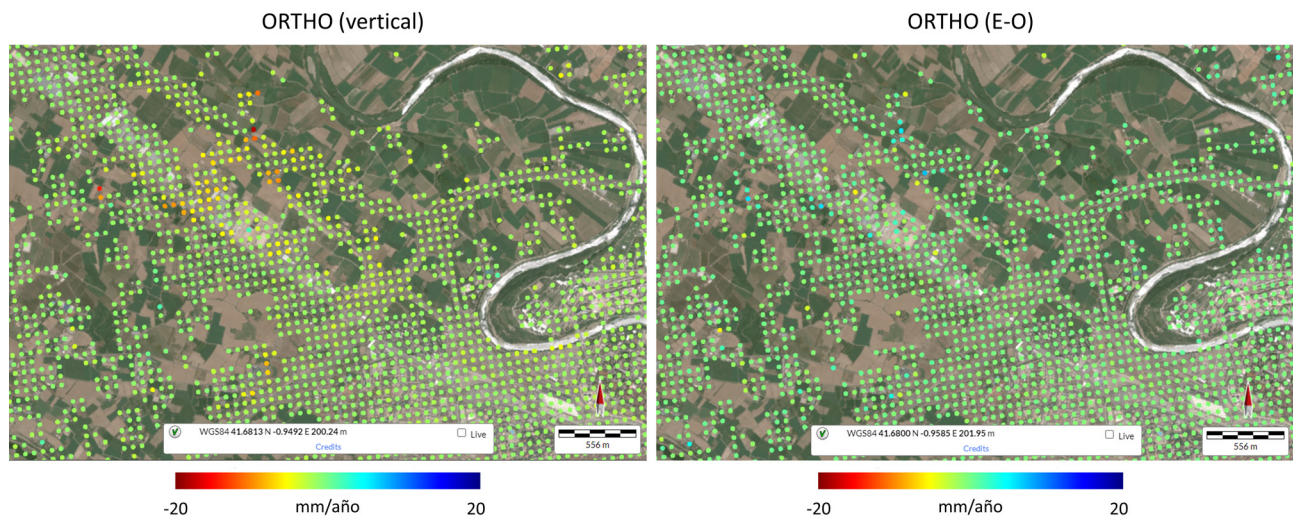
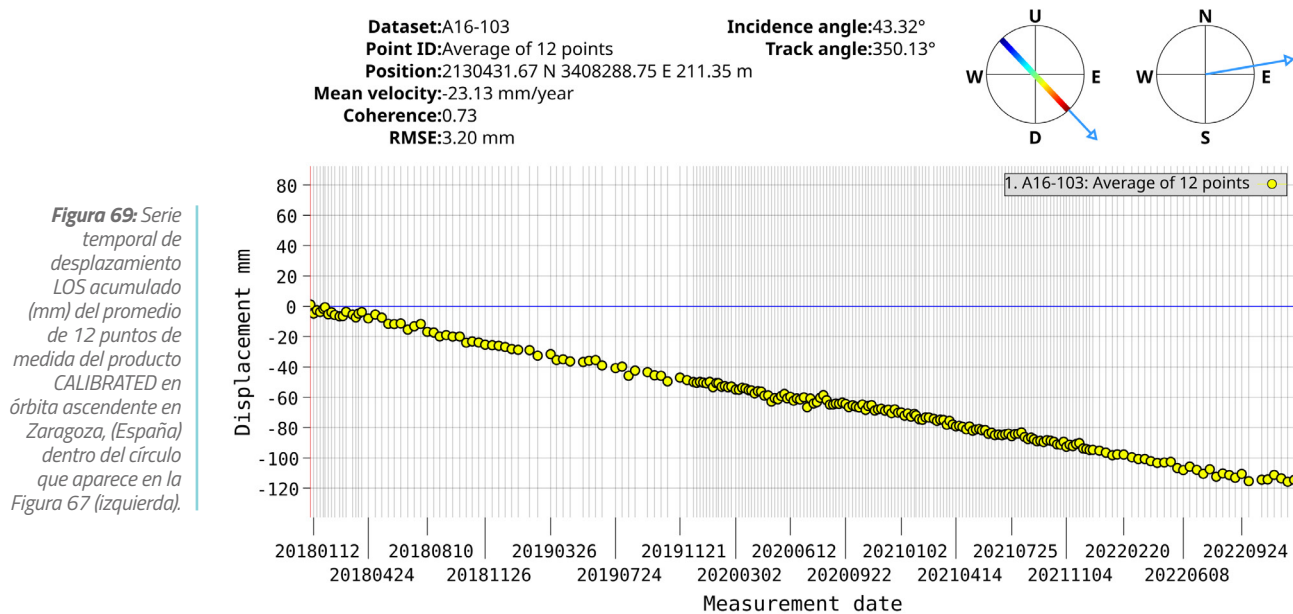


Figura 68: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Zaragoza (España). Localización: WGS84 -0.942 E, 41.675 N.



4.2 INGENIERÍA CIVIL E INFRAESTRUCTURAS

4.2.1 Fenómenos térmicos en estructuras

El efecto de las variaciones de temperatura puede verse reflejado en la aparición de desplazamientos en las estructuras de obra civil. Estos movimientos son detectados y monitorizados usando principalmente imágenes de alta resolución de banda X, aunque la mayor **resolución espacial** y temporal de los sensores de banda C actuales, como Sentinel-1, también permite su seguimiento (Martín et al., 2022; Monserrat et al., 2011). Estos desplazamientos están fuertemente correlacionados temporalmente con la temperatura de la zona, por lo que generalmente se evalúa su evolución mediante un parámetro de correlación entre los desplazamientos y la temperatura (mm/°C). Conviene resaltar que los fenómenos térmicos son muy susceptibles a verse difuminados o amplificados en los datos InSAR, dependiendo del periodo procesado y las técnicas empleadas (Monserrat et al., 2011).

4.2.1.1 Caso 12. Viaductos de Blackfriar y Hammersmith (Londres, Reino Unido)

Los puentes y viaductos son algunas de las estructuras más afectadas por los efectos de dilatación y contracción térmica. En el caso de estructuras de gran envergadura, o que hayan experimentado problemas en el pasado, suelen instalarse elementos de monitorización in-situ. Sin embargo, la monitorización remota puede mejorar el seguimiento de estas estructuras, ofreciendo una amplia resolución temporal y sin verse afectada por problemas comunes de los instrumentos in-situ, como la necesidad de alimentación, la exposición a vandalismo o la dificultad de acceso.

Los viaductos de Blackfriars (sobre el río Támesis) y Hammersmith, situados en el centro y el oeste de la ciudad de Londres (Figura 70), han sido estudiados recientemente mediante InSAR utilizando datos adquiridos con la constelación Sentinel-1 (Martin et al., 2022; Sivasakthy et al., 2022). Según estos trabajos, ambos viaductos presentan desplazamientos cíclicos de orden milimétrico (7-10 mm) muy correlacionados con los cambios de temperatura. Estos hallazgos coinciden con los datos proporcionados por el EGMS, que también indican desplazamientos del mismo orden de magnitud y muestran una tendencia cíclica (Figuras 71 y 72).

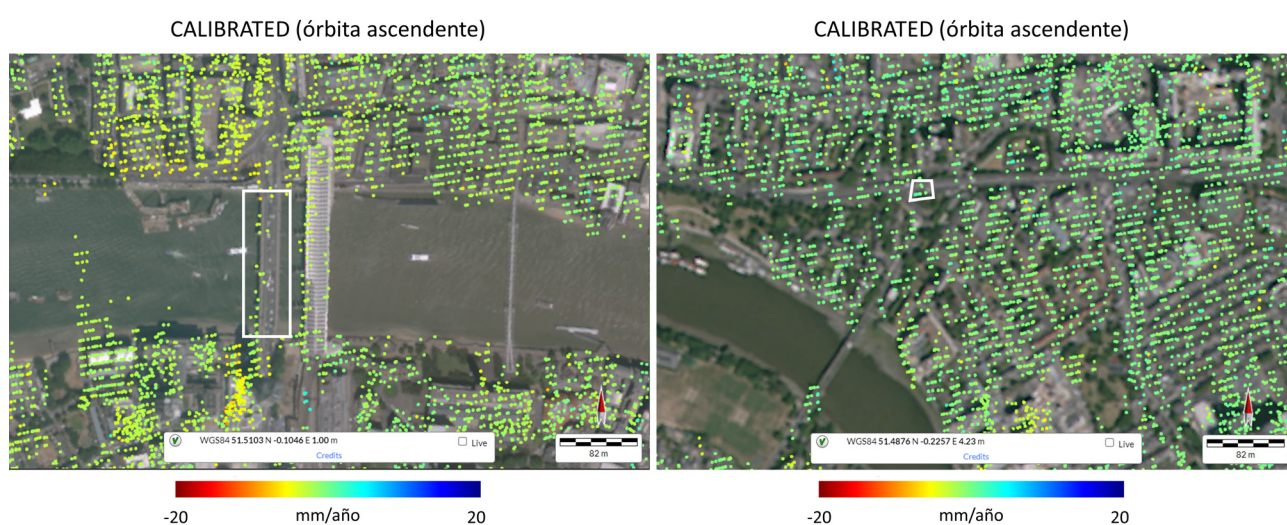
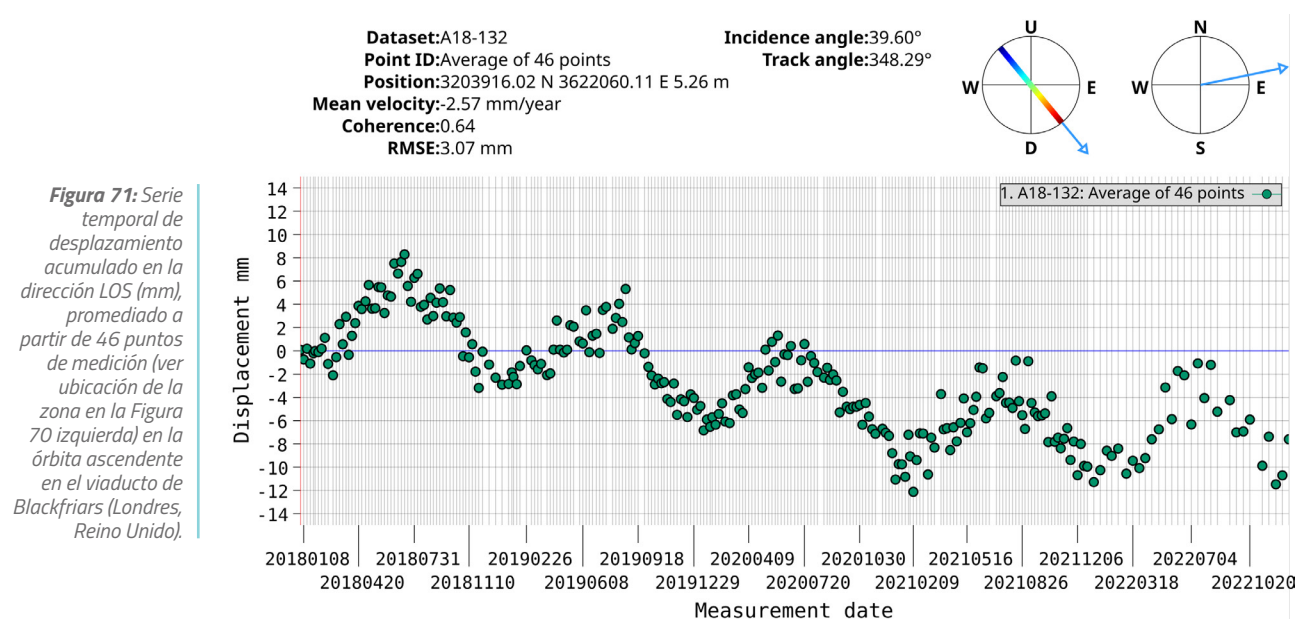
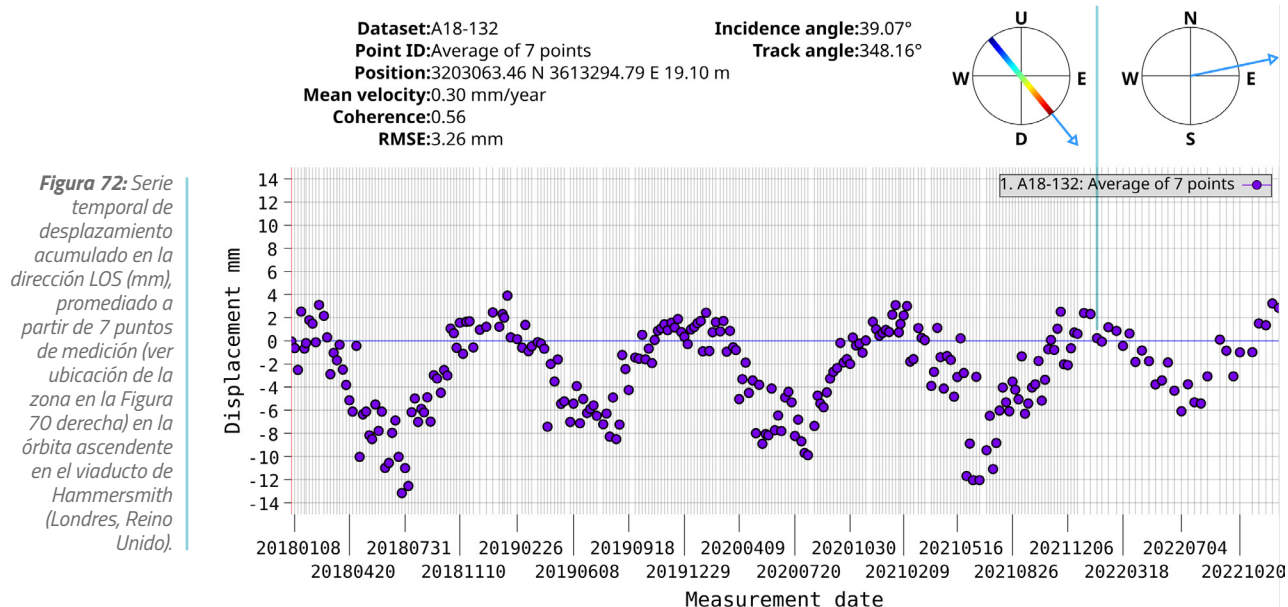


Figura 70: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente de los viaductos de Blackfriars (izquierda) y Hammersmith (derecha), en Londres (Reino Unido). Cada polígono blanco indica los puntos seleccionados para mostrar las series temporales promediadas correspondientes a las Figuras 71 y 72. Localización: WGS84 -0.101 E, 51.510 N.





4.2.2 Presas

La monitorización de las grandes presas es un factor fundamental, tanto para su gestión como para su seguridad. Dada su importancia, el Comité Técnico de Vigilancia de Presas de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) se centra en recoger los avances en esta materia desde 1982. Debido a las propias características de los materiales que las componen, las presas de materiales sueltos son más proclives a sufrir fenómenos de consolidación, tanto durante la construcción como durante los primeros ciclos de llenado y vaciado. Asimismo, la vigilancia de estos movimientos durante las primeras fases y durante la vida útil de la estructura, son fundamentales para detectar posibles deterioros en el dique. La monitorización InSAR permite obtener datos de desplazamiento sobre toda la extensión del cuerpo de una presa con una buena resolución temporal, lo que representa información muy valiosa, complementaria a la obtenida mediante monitorización in-situ (piezómetros, inclinómetros o extensómetros).

Es importante destacar que, como regla general, se recomienda llevar a cabo la monitorización de presas mediante InSAR utilizando datos adquiridos tanto en órbita ascendente como descendente siempre que sea posible. Esto se debe a que muchas presas tienen una orientación e inclinación desfavorable con respecto a una de las dos órbitas de adquisición.

4.2.2.1 Caso 13. La Pedrera (Alicante, España)

La presa de La Pedrera es una presa de materiales sueltos ubicada en la cuenca del río Segura que sirve como embalse de regulación de avenidas y para almacenar agua proveniente del trasvase Tajo-Segura. La presa, construida en 1978, tuvo unos asientos iniciales de hasta 1 m en algunas secciones de la galería de fondo en el periodo 1975-1980, añadiendo otros 47 cm en el periodo 1980-2011 (Tomás et al., 2013). Durante este último periodo también se obtuvieron medidas del desplazamiento de la superficie de la presa mediante técnicas InSAR, alcanzando el asentamiento los 13 cm en el periodo 1995-2010 (ERS y ENVISAT), y los 2 cm en el periodo 2008-2010 (Terrasar-X). Tomás et al. (2013) propone como hipótesis probable de los diferentes desplazamientos la superposición de la consolidación a largo plazo de la cimentación a la consolidación del propio cuerpo de la presa. Los resultados del EGMS (Figura 73) muestran desplazamientos en la coronación de la presa de más de -5 mm/año (Figura 74).

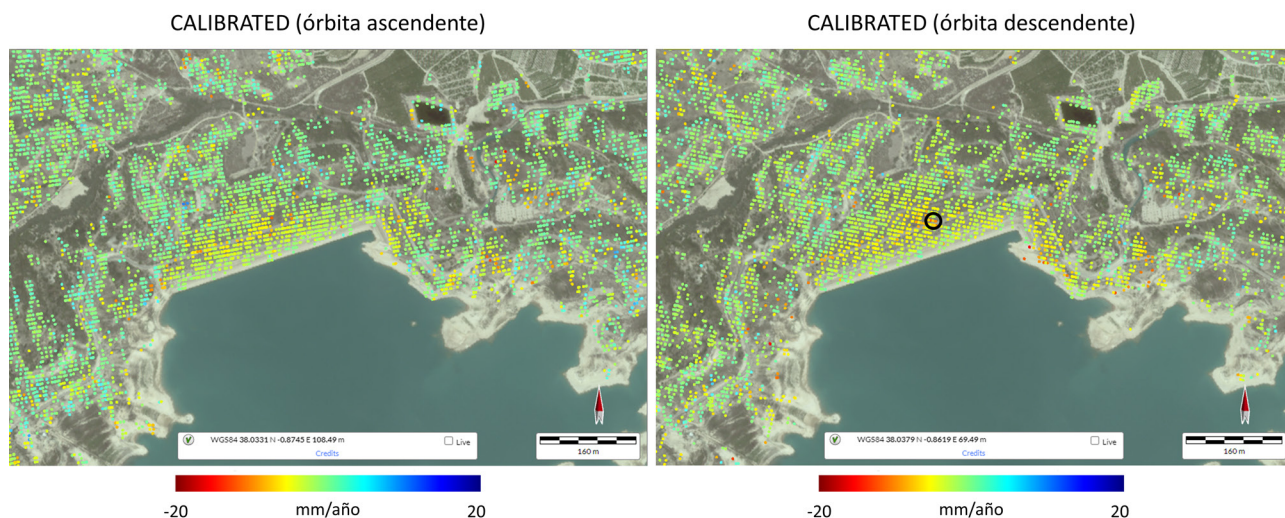
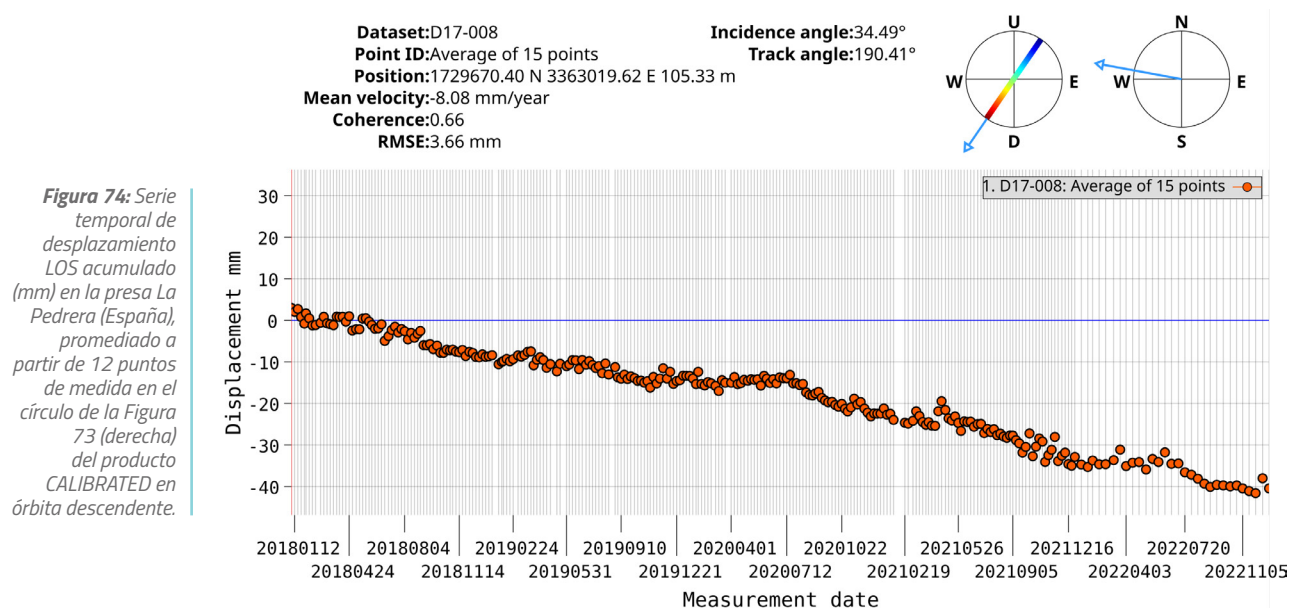


Figura 73: Mapas de velocidad LOS en mm/año del producto CALIBRATED en la presa La Pedrera (España). El círculo negro indica la zona con los puntos seleccionados para mostrar la serie temporal de la Figura 74. Localización: WGS84 -0.871 E, 38.031 N.



4.2.2.2 Caso 14. La Viñuela (Málaga, España)

La presa La Viñuela está ubicada en la provincia de Málaga, en el ámbito hidrográfico de la Cuenca Mediterránea Andaluza. Esta presa, construida con materiales sueltos y finalizada en 1989, ha experimentado pequeños desplazamientos en su parte superior, especialmente en la zona este, que se han observado desde 1992. En el periodo monitorizado mediante ERS (1992-2000) se midieron desplazamientos LOS de aproximadamente -6 mm/año (Ruiz-Armenteros et al., 2018). Teniendo en cuenta la órbita de la estructura, con orientación este-oeste, y suponiendo como dirección de movimiento más plausible la vertical o la dirección perpendicular al paramento, las técnicas InSAR únicamente permitirían analizar el movimiento vertical (recuérdese que las técnicas InSAR ofrecen una casi nula sensibilidad en la dirección norte-sur). Los resultados del EGMS (Figuras 75 y 76) revelan velocidades similares a las estimadas en el estudio de Ruiz -Armenteros et al. (2018).

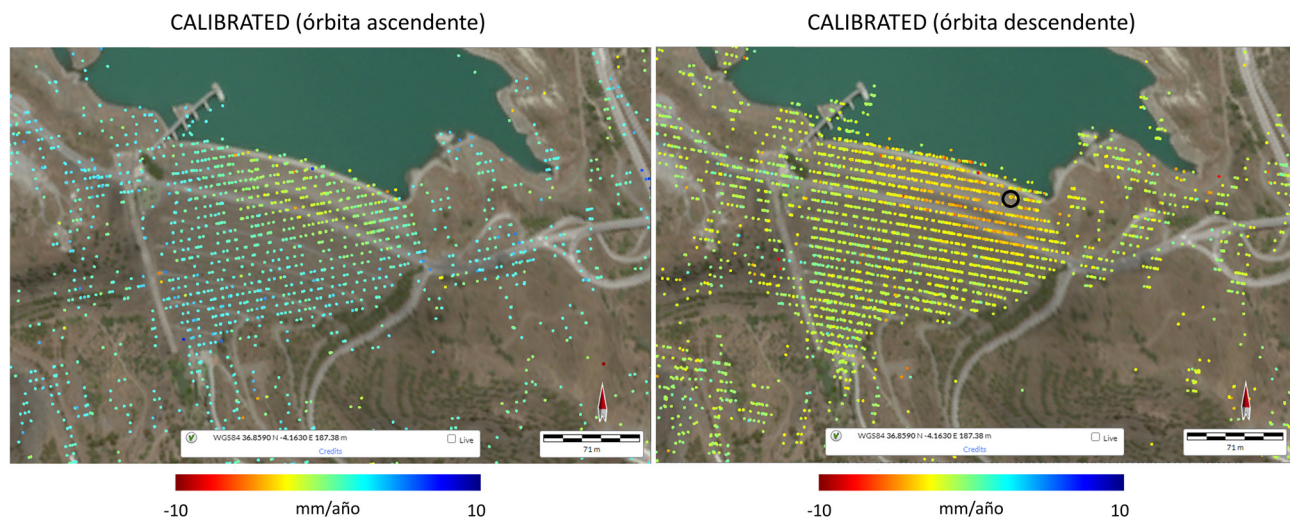
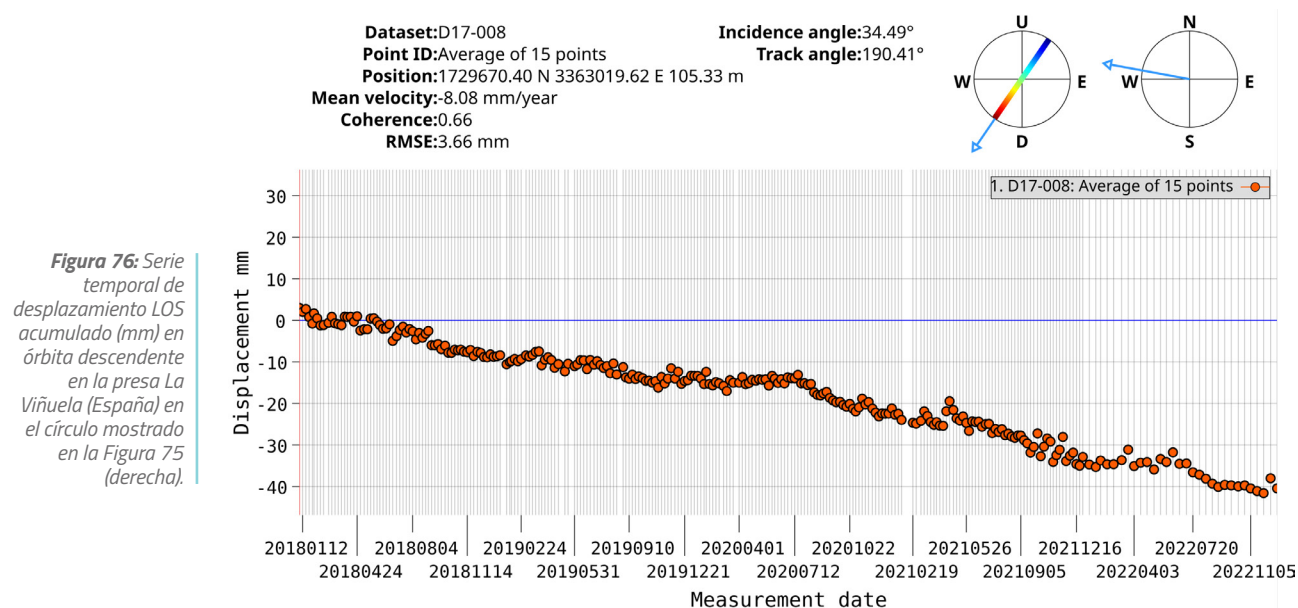


Figura 75: Mapa de velocidad LOS en mm/año del producto CALIBRATED en la presa La Viñuela (España). El círculo negro indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 76. Localización: WGS84 -4.162 E, 36.859 N.



4.2.3 Subsistencia constructiva y de infraestructuras

Este subapartado se enfoca principalmente en la subsistencia del terreno ocasionada por la compactación de rellenos antrópicos o la consolidación de sedimentos poco consolidados (depósitos aluviales y fluviales) debido al peso ejercido por construcciones (como edificios) e infraestructuras (como carreteras y diques). Con el tiempo, la subsistencia puede provocar daños en estos elementos, cuya gravedad dependerá de varios factores, tales como la presencia de asentamientos diferenciales (cuando el desplazamiento vertical no es uniforme, lo que resulta en distorsiones angulares en las construcciones), las características constructivas y el tipo de cimentación utilizado.

4.2.3.1 Caso 15. Vila Franca de Xira (Lisboa, Portugal)

Vila Franca de Xira es un municipio situado a 25 km al noreste de la ciudad de Lisboa, dentro de su área metropolitana. En las inmediaciones de la pequeña localidad de Castanheira do Ribatejo (dentro del municipio de Vila Franca de Xira) se encuentra una zona industrial construida sobre sedimentos aluviales recientes, que incluyen arcillas y arenas, provenientes del río Tajo. Estudios previos han detectado un fenómeno de subsidencia del terreno en esta área (Cuervas-Mons et al., 2022). Según este estudio la subsidencia se relaciona con la compactación de los sedimentos aluviales, que tienen espesores de 5 a 20 m, así como con la compresión de los materiales antrópicos más superficiales y con las carreteras recientemente construidas, aunque no descarta la influencia de la sobreexplotación de agua subterránea en el proceso. Además, este trabajo establece que para el periodo 2018-2021 estudiado con imágenes Sentinel-1, la velocidad LOS promedio de la zona industrial es de -25.5 mm/año y -25.2 mm/año (en órbita ascendente y descendente respectivamente), mientras que estima la velocidad vertical máxima en -32.4 mm/año. Estos resultados concuerdan con los del EGMS, tanto en la distribución espacial de los puntos como en las velocidades registradas, siendo la máxima velocidad LOS superior a -25 mm/año en ambas órbitas (Figura 77) y la velocidad vertical máxima superior a -30 mm/año (Figura 78). La velocidad promedio de la zona industrial en el periodo 2018-2022 supera los -18 mm/año y tiene una tendencia lineal (Figura 79). No se registra velocidad horizontal, lo cual concuerda con la predominancia de la componente vertical del fenómeno de subsidencia. Las series temporales de desplazamiento acumulado muestran también un patrón lineal.

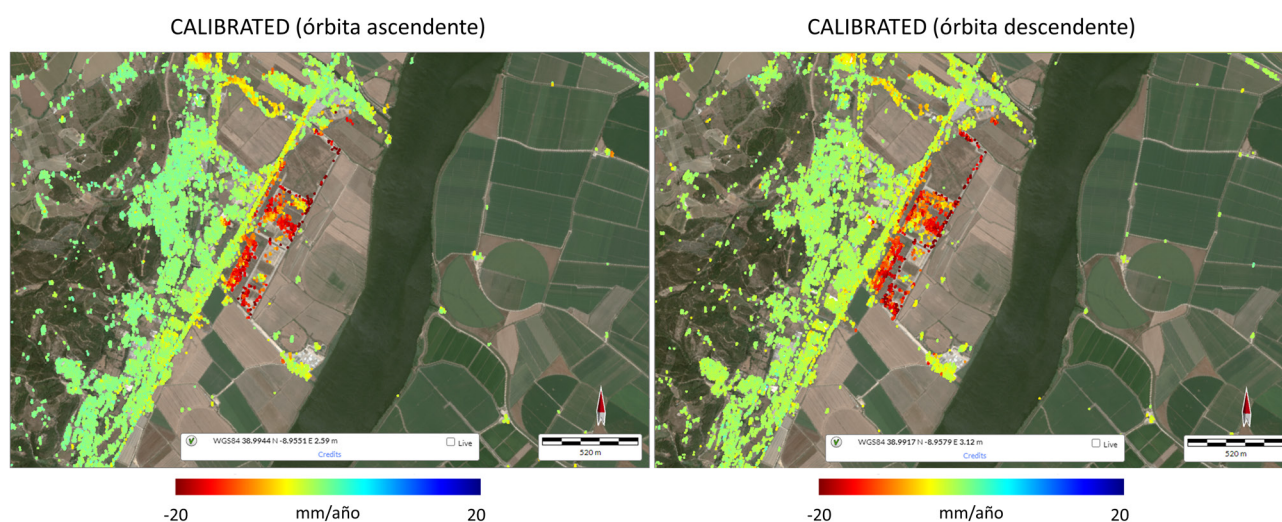


Figura 77: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) en Vila Franca de Xira (Portugal). Localización: WGS84 -8.954 E, 38.995 N.

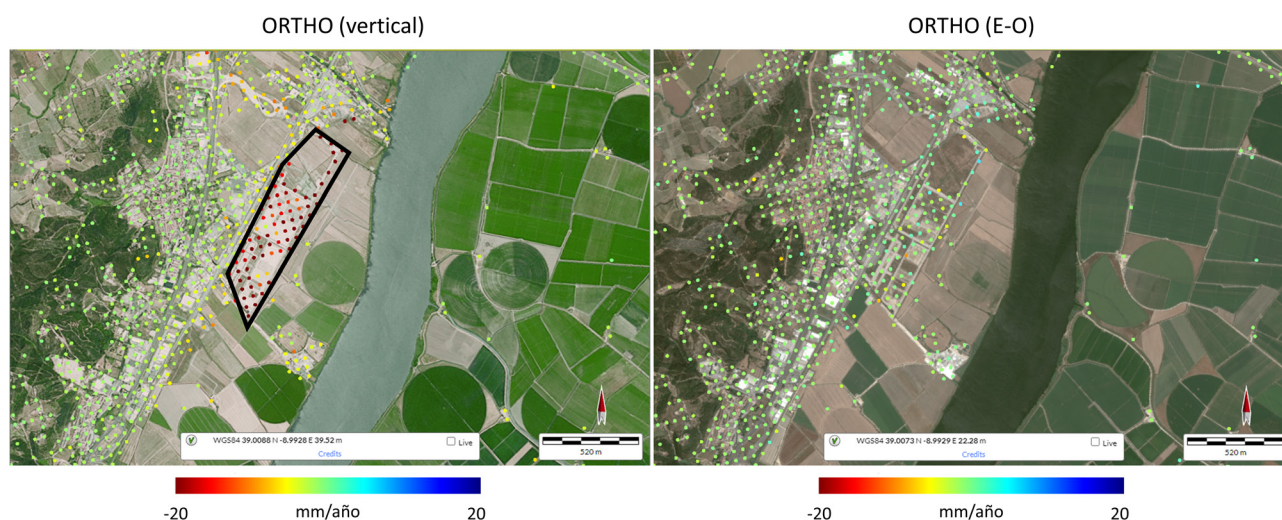


Figura 78: Mapa de velocidad vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en Vila Franca de Xira (Portugal) en mm/año. El polígono negro indica la zona de los puntos seleccionados para mostrar la serie temporal de la Figura 79. Localización: WGS84 -8.954 E, 38.995 N.

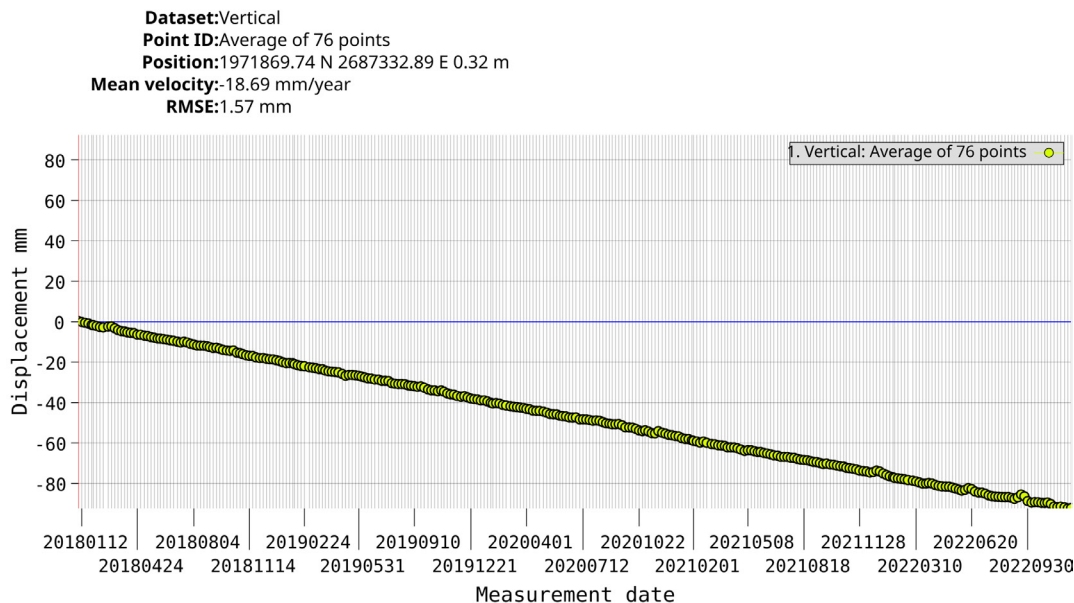


Figura 79: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) en el producto ORTHO vertical en Vila Franca de Xira (Portugal), promediado en los puntos dentro del polígono que aparece en la Figura 78 (izquierda).

4.2.3.2 Caso 16. Puerto de Barcelona (Cataluña, España)

El puerto de Barcelona está situado al noreste de España junto a la desembocadura del río Llobregat, en el mar Mediterráneo. Los diques del puerto están contruidos sobre suelos que forman parte del delta del Llobregat. Estos suelos están compuestos principalmente por capas de materiales finos e impermeables, lo que resulta en un drenaje lento bajo la carga constante del dique. Como resultado, la compactación del suelo causa movimientos de subsidencia en los diques, que pueden extenderse durante varios años. Según estudios previos del asentamiento de los diques del puerto de Barcelona utilizando InSAR, y empleando imágenes SAR adquiridas por el satélite Sentinel-1 (Krishnakumar et al., 2021; Qiu et al., 2021), se ha observado que en el período de 2017-2019, el desplazamiento acumulado en la dirección de la línea de visión (LOS) sigue un patrón lineal que supera los -100 mm. Estos datos concuerdan con los del EGMS, los cuales muestran que la velocidad vertical máxima alcanza los -35 mm/año (Figura 80 izquierda) y que el desplazamiento lineal acumulado supera los -150 mm en el periodo 2016-2021 (Figura 81). No existe un patrón claro de velocidad horizontal (Figura 80 derecha), lo cual está en conformidad con el hecho de que este tipo de asentamientos estructurales ocurren fundamentalmente en la componente vertical.

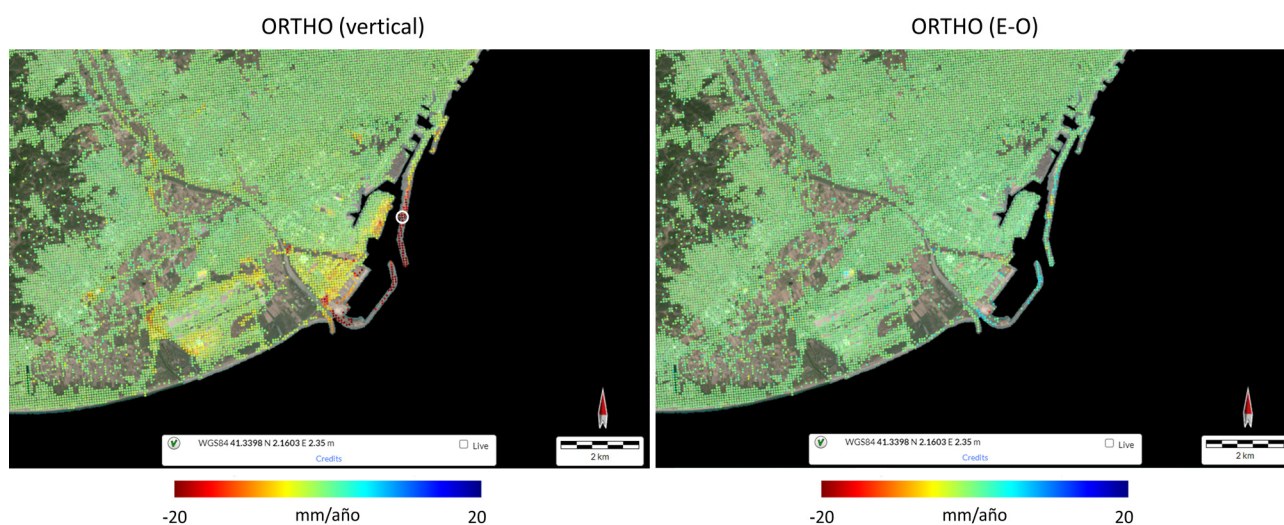


Figura 80: Mapa de velocidad vertical (izquierda) y horizontal (derecha) del producto ORTHO en mm/año en el puerto de Barcelona (España). El círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal de la Figura 81. Localización: WGS84 2.151 E, 41.331 N.

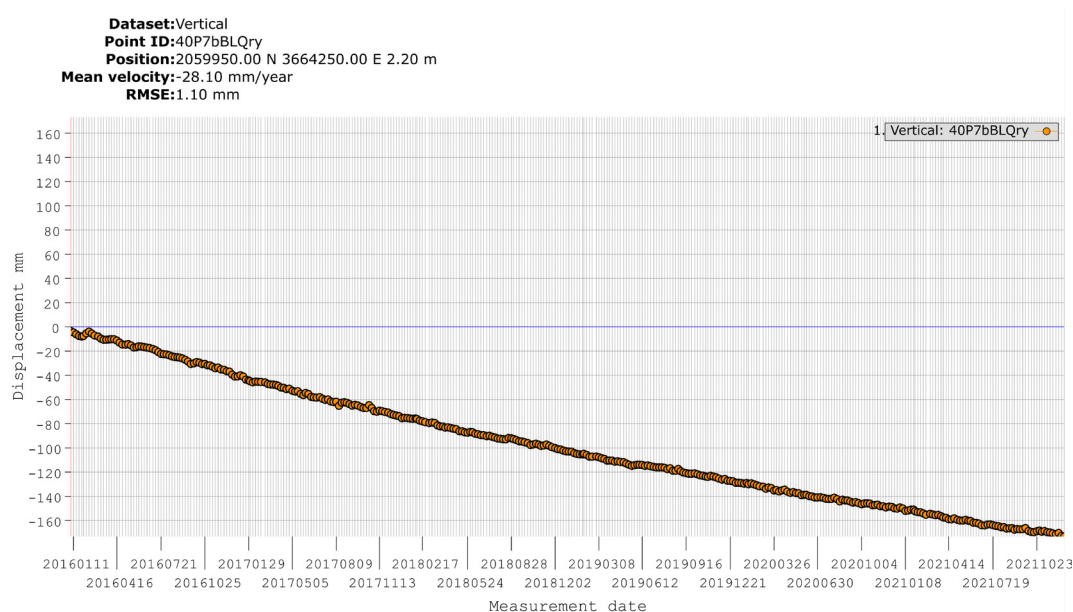


Figura 81: Serie temporal de desplazamiento acumulado (mm) vertical en el puerto de Barcelona (España) en el punto mostrado en la Figura 80 (izquierda).

4.3 RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS

4.3.1 Extracción e inyección de hidrocarburos

La extracción de hidrocarburos como el petróleo y el gas natural implica la perforación y extracción de yacimientos subterráneos. Por otro lado, la inyección de gases puede ser utilizada en técnicas de recuperación mejorada de petróleo en campos semi- agotados o en reservorios subterráneos con fines de almacenamiento. Estas actividades son capaces de producir diferentes deformaciones del terreno cuantificables con las técnicas InSAR (Tamburini-Beliveau et al., 2022; Wang et al., 2022; Yang et al., 2019). La respuesta del terreno puede manifestarse con tendencias de deformación lineal en el caso de extracción continuada, o no lineal en el caso de ciclos de extracción/inyección.

4.3.1.1 Caso 17. Extracción de gas en Groningen (Países Bajos)

El campo de gas de Groningen está situado en la parte noreste de los Países Bajos y es el mayor campo de gas natural en Europa. Desde el inicio de las actividades de extracción en 1963, la superficie terrestre que se encuentra sobre él ha experimentado subsidencia. Entre 1970 y 2015 se midieron desplazamientos verticales absolutos del orden entre 7-8 mm/año (Zhang et al., 2022). Con el aumento del nivel del mar, la subsidencia se convierte en un desafío crítico para países de baja altitud, como en el caso de los Países Bajos. Además, la explotación produjo micro-terremotos inducidos, que empezaron a detectarse en 1991, y aumentaron su frecuencia en las décadas siguientes. La mayoría de los temblores en ese periodo tenían una magnitud menor a 2.0 y no eran perceptibles. Sin embargo, las magnitudes máximas observadas continuaron aumentando a lo largo de los años hasta que, en 2014, se registró el evento más significativo con una magnitud local de 3.6, lo que finalmente llevó a la decisión de reducir la producción a partir de ese momento (Richter et al., 2020). El mapa de velocidades verticales del EGMS (Figura 82 izquierda) muestra la gran extensión de la subsidencia, con velocidades del mismo orden de magnitud que en periodos anteriores al 2015. En la parte central inferior de la Figura 82 se pueden observar dos zonas con velocidades muy superiores, marcadas con dos flechas blancas en la figura de la izquierda. Éstas se corresponden con las ciudades de Veendam y Winschoten, donde existen concesiones de extracción de sal causantes de los desplazamientos (Gee et al., 2019).

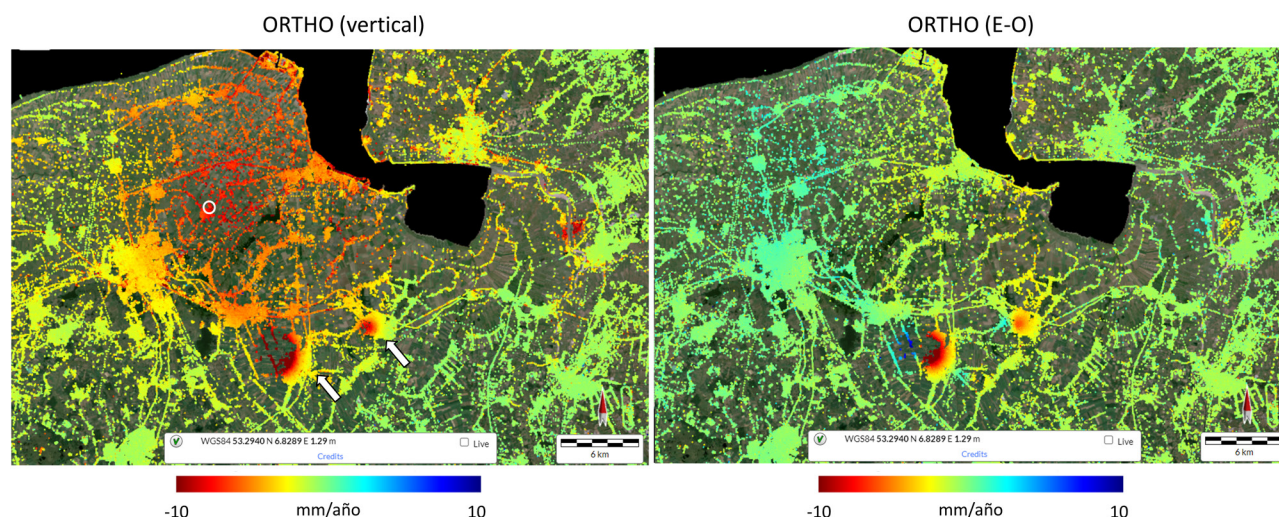
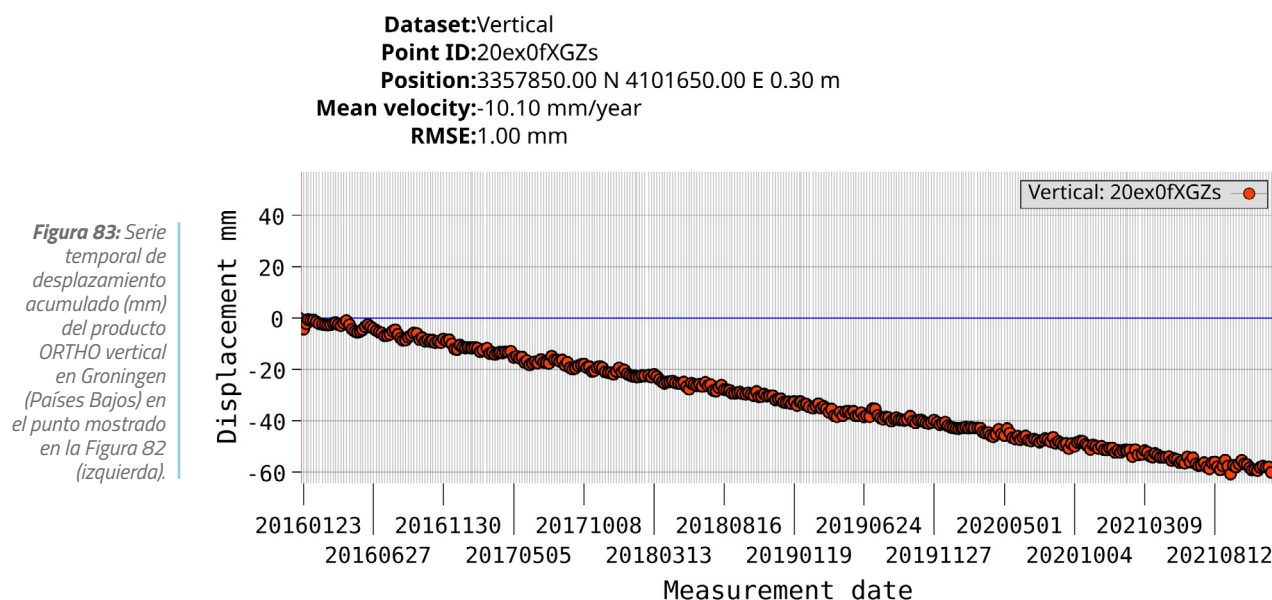


Figura 82: Mapa de velocidad vertical (izquierda) y horizontal (derecha) del producto ORTHO en mm/año en Groningen (Países Bajos). El círculo blanco indica el punto seleccionado para la mostrar serie temporal de la Figura 83. Las flechas blancas indican las zonas donde existen concesiones de extracción de sal. Localización: WGS84 6.843 E, 53.188 N.



4.3.2 Inestabilidades de talud en entornos mineros

La caracterización espacio-temporal de inestabilidades de talud inducidas por la actividad minera desempeña un papel crítico en la planificación minera sostenible. Uno de los principales retos desde el punto de vista geotécnico es garantizar en todo momento la integridad y la estabilidad de todos los tajos y excavaciones, manteniendo al mismo tiempo los costes bajos. Por este último motivo, los taludes mineros se diseñan con el principal objetivo de reducir la cantidad de estéril a extraer, lo que a menudo favorece la aparición de inestabilidades de talud de índole diversa (con tasas de desplazamiento que pueden alcanzar desde 1 cm/año hasta más de 1 m/año). Una de las estrategias más comúnmente adoptadas para reducir el riesgo y el coste asociado a la posible ocurrencia de roturas de talud, se basa en la implementación temprana de programas específicos de monitorización de taludes. Las roturas de talud en minería pueden producir impactos ambientales, daños a la propiedad, perjuicios a la salud y seguridad tanto de los empleados como de los residentes cercanos, así como consecuencias económicas que pueden provocar el cierre prematuro de la mina o comprometer la restauración y el cierre de la explotación.

4.3.2.1 Caso 18. Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia, España)

La Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia), una antigua zona minera abandonada de gran importancia histórica dedicada a la explotación de sulfuros, presenta una extensión aproximada de 50 km². Está en un apreciable estado de abandono, con numerosos taludes en una situación de equilibrio inestable. Las inestabilidades de los taludes de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia) han sido estudiadas en trabajos centrados en la cartografía de movimientos del terreno a partir de datos InSAR adquiridos con la constelación ERS/ENVI (Herrera et al., 2010) y con la constelación Sentinel-1 (Hu et al., 2023; López-Vinielles et al., 2021; López Vinielles, 2022). De acuerdo con estos trabajos, la zona presenta unas tasas de desplazamiento LOS medias que superan los -1 cm/año en los sectores más inestables. Estos resultados son coherentes con los resultados de velocidad LOS media proporcionados por el EGMS, como se observa en la Figura 84. En esta figura los puntos de medida representados en rojo indican velocidades LOS de alejamiento del terreno con respecto al satélite de más de -1 cm/año. La serie temporal en órbita ascendente (Figura 85) refleja que la zona más activa presenta un desplazamiento absoluto LOS acumulado de más de 20 cm durante el período comprendido entre los años 2018 y 2022.

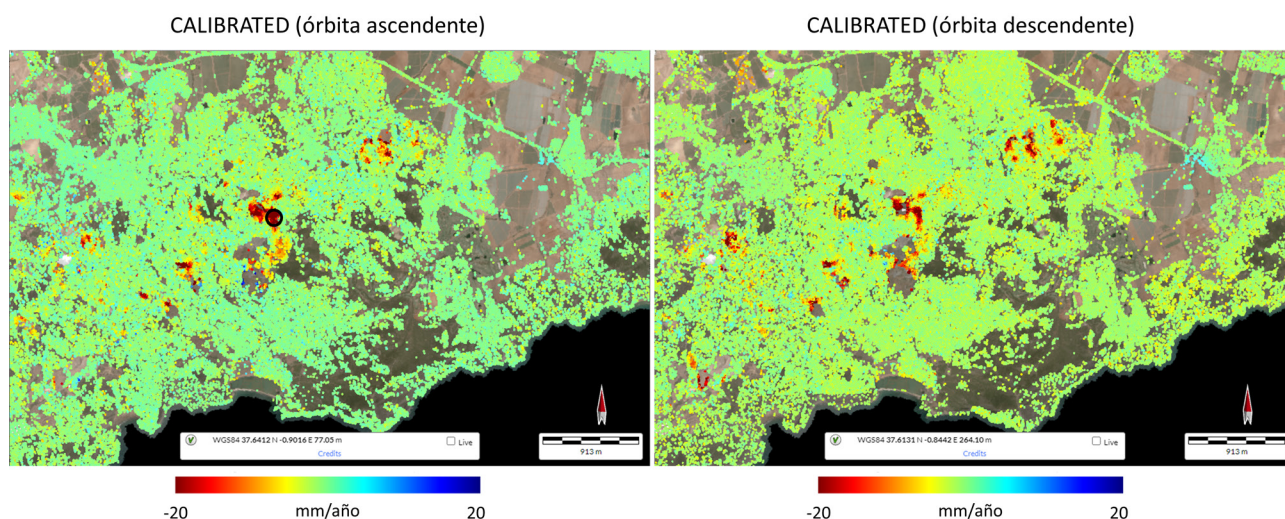


Figura 84: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia, España). El círculo negro indica la zona con los puntos seleccionados para mostrar la serie temporal de la Figura 85. Localización: WGS84 -0.833 E, 37.608 N.

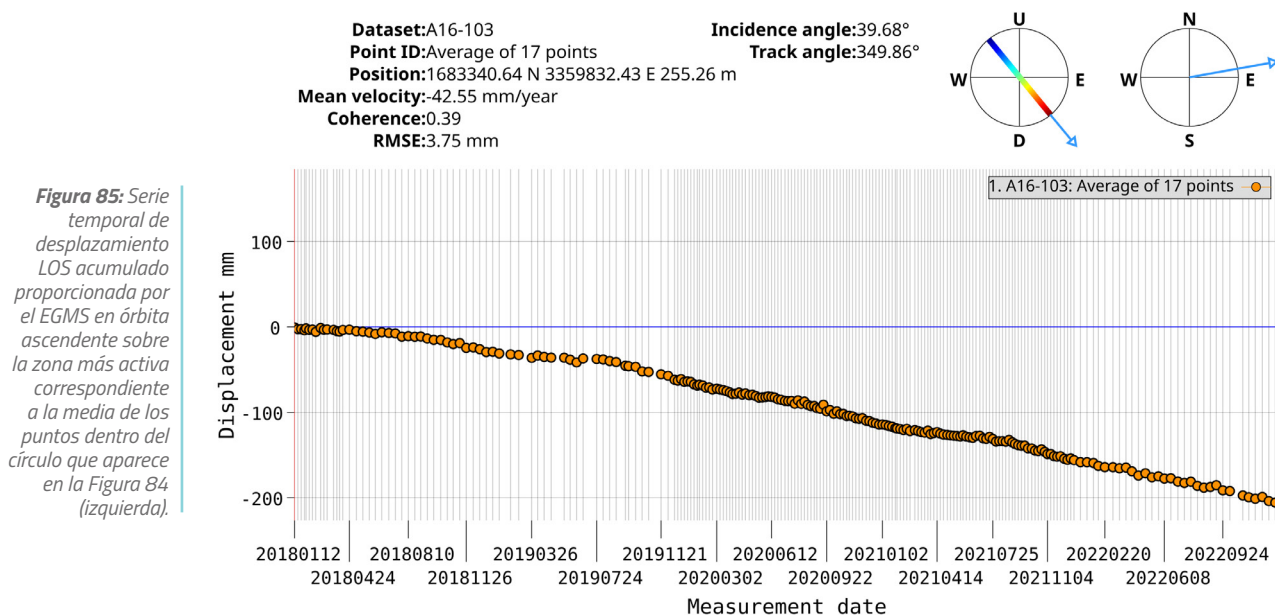


Figura 85: Serie temporal de desplazamiento LOS acumulado proporcionada por el EGMS en órbita ascendente sobre la zona más activa correspondiente a la media de los puntos dentro del círculo que aparece en la Figura 84 (izquierda).

4.3.3 Subsistencia en entornos mineros

Los fenómenos de subsistencia producidos por la actividad minera subterránea representan uno de los peligros más importantes en minería. La minería subterránea induce frecuentemente desplazamientos en superficie (de componente fundamentalmente vertical), los cuales pueden corresponderse con hundimientos o levantamientos. En el caso de los fenómenos de subsistencia, el hundimiento de la superficie del terreno puede deberse tanto al desarrollo de la propia excavación, como al colapso de antiguas galerías (de explotación, de transporte, etc.). En el caso particular de los fenómenos de subsistencia inducidos por la minería de carbón de tajo largo, la aparición de hundimientos en superficie está estrechamente ligada al avance del frente de la explotación, siendo además inmediata. Independientemente de sus causas, la subsistencia por actividad minera puede producir graves daños en las estructuras e infraestructuras (urbanas, industriales, etc.) situadas dentro de la zona de afección. El impacto de la subsistencia minera depende de múltiples factores, siendo los más importantes el tipo y el tamaño de la mina, el tipo y el tamaño de la estructura, así como la propia tasa de subsistencia.

4.3.3.1 Caso 19. Súria (Cataluña, España) y alrededores

La localidad de Súria (Cataluña) y alrededores es una zona de minería subterránea activa, que en la actualidad está dedicada a la explotación de potasas. Presenta una extensión aproximada de 250 km² e importantes alteraciones en superficie, incluyendo daños estructurales en edificios en diferentes lugares del pueblo y alrededores. Las distintas zonas afectadas por fenómenos de subsistencia minera han sido estudiadas previamente mediante la aplicación de técnicas InSAR (Béjar-Pizarro et al., 2021; Yerro et al., 2014). El trabajo de Yerro et al. (2014) se centra en la detección de la zona de deformación y en el análisis de sus tasas de subsistencia a partir de datos InSAR adquiridos con la constelación ERS/ENVISAT. Béjar-Pizarro et al. (2021) detecta la zona de deformación mediante datos Sentinel-1.

De acuerdo con estas publicaciones, la zona presenta unas tasas de desplazamiento vertical que superan los -2 cm/año en los sectores más afectados. Estos resultados son coherentes con los resultados de velocidad media (LOS, este-oeste y vertical) proporcionados por el EGMS, como se observa en las Figuras 86 y 87. En estas figuras los puntos de medida representados en rojo indican velocidades LOS medias de más de -1 cm/año. La serie temporal en la proyección vertical (Figura 88) refleja que la zona más activa presenta un desplazamiento vertical acumulado de más de -50 cm durante el período comprendido entre los años 2015 y 2021.

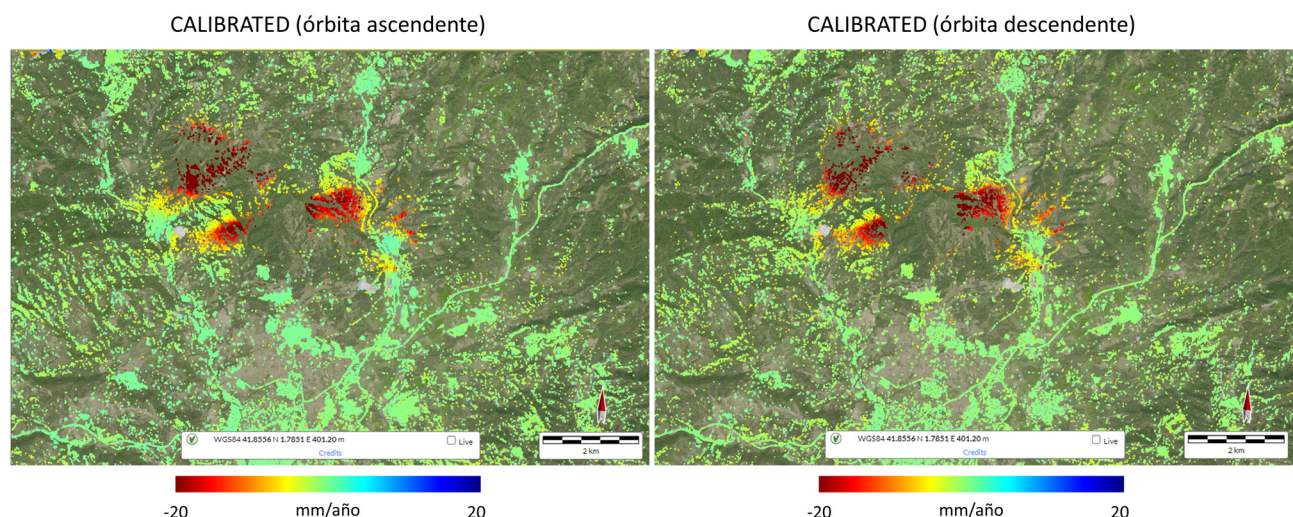


Figura 86: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en Súria (España). Localización WGS84 1.851 E, 41.850 N.

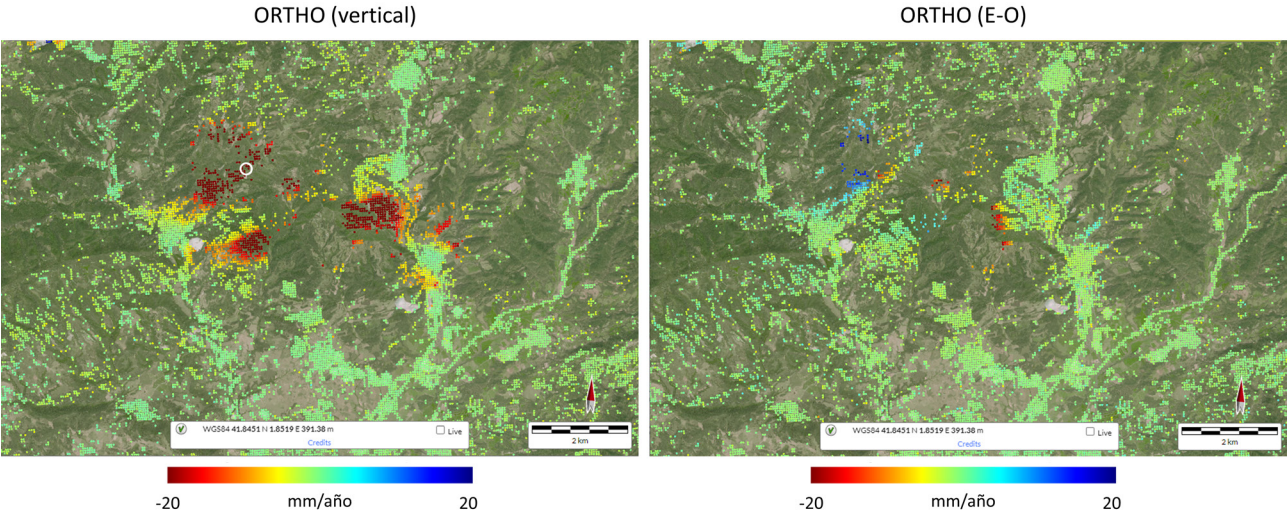
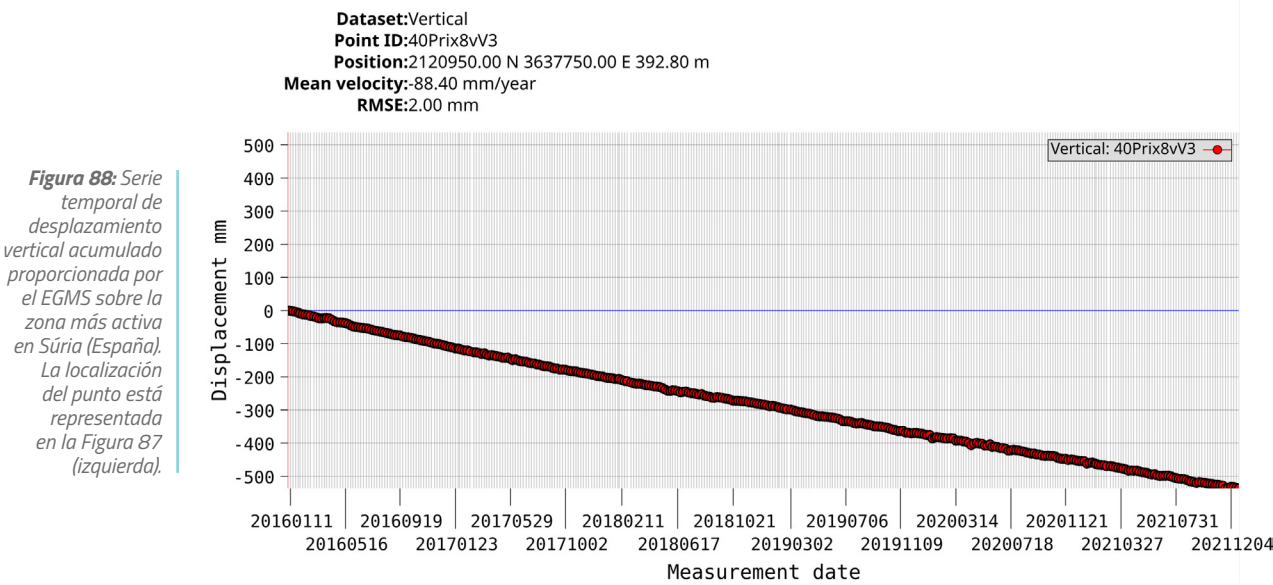


Figura 87: Mapa de velocidad vertical y horizontal en mm/año del producto ORTHO en Siria (España). Localización WGS84 1.851 E, 4 1.850 N. El círculo blanco indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal del producto ORTHO vertical de la Figura 88.



05

Consideraciones de la
técnica InSAR. Casos
tomados del EGMS

Consideraciones de la técnica InSAR. Ejemplos tomados del EGMS

5.1 IMPORTANCIA DE LA ESCALA DE VISUALIZACIÓN

Como se ha comentado en el apartado 2.8, para la correcta interpretación de los datos InSAR es recomendable estimar el umbral de ruido de la zona a estudiar. Este umbral es fundamental para diferenciar aquellos desplazamientos que pueden ser debidos a un peligro geológico o un factor antrópico, de aquellos podrían ser efecto del procesado y caen dentro del rango de ruido. La utilización de escalas de color continuas para representar los desplazamientos en productos como el EGMS es razonable al tener que adaptarse a una amplísima casuística y ámbito geográfico. Por el contrario, cuando el objetivo es estudiar zonas específicas de interés, este tipo de visualización genera una variación suave de tonos que no permite detectar los desplazamientos de baja intensidad, ni estimar la continuidad espacial de los mismos (Figura 89). En estos casos, existe la opción de utilizar una escala graduada en la que el valor del umbral de estabilidad sea el tamaño de los diferentes rangos (Figura 90). Esto permite detectar de manera rápida las zonas con desplazamientos significativos y su magnitud aproximada, facilitando el análisis visual de las mismas. El inconveniente de este tipo de visualización radica en el propio valor de corte, que define el rango de terreno estable, y que puede enmascarar los desplazamientos que estén próximos o dentro de ese rango. Este valor de corte se suele establecer en base a la desviación estándar de los datos, tal y como se ha indicado en el apartado 2.8.

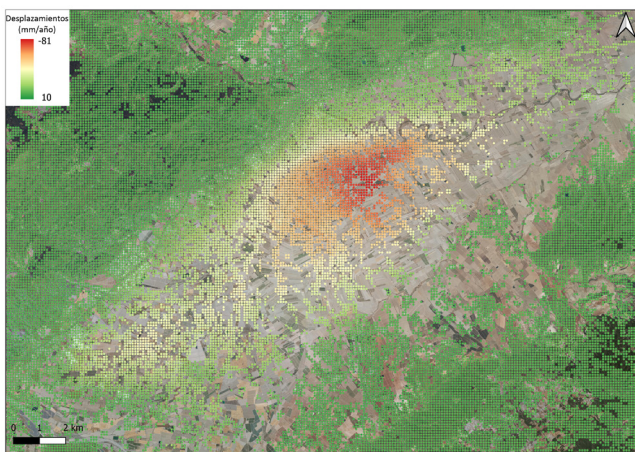


Figura 89: Escala continua en un fenómeno de subsidencia del terreno por sobreexplotación de acuíferos (Alto Guadalentín, Murcia, España).

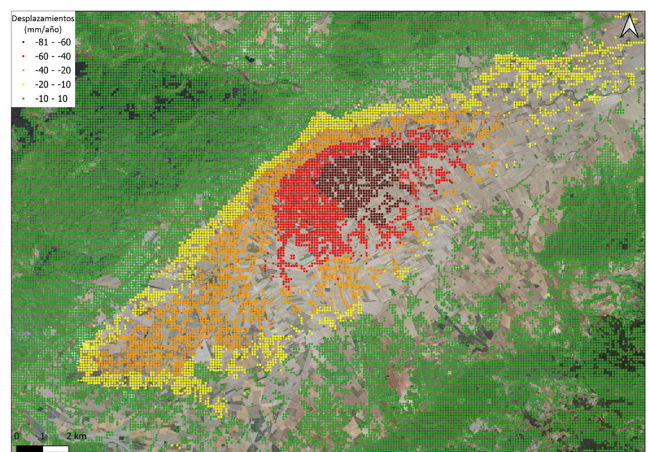


Figura 90: Escala graduada o clasificada en un fenómeno de subsidencia del terreno por sobreexplotación de acuíferos (Alto Guadalentín, Murcia, España). En este caso, el rango estable se establece de -10 a 10 mm/año.

5.2 DECORRELACIÓN TEMPORAL

Los datos SAR de la constelación Sentinel-1 empleados para generar el producto EGMS se han obtenido con banda C. La señal de esta [longitud de onda](#) no es capaz de penetrar la cobertura vegetal debido a la [retrodispersión](#) volumétrica difusa (subapartado 2.1.3.1). Por este motivo, generalmente, la presencia de vegetación densa produce decorrelación temporal (apartado 2.6) en los datos obtenidos a partir del Sentinel-1, lo que dificulta la obtención de puntos de medida en esas zonas. Esta es una de las principales causas de que la cobertura espacial de los productos del EGMS sea discontinua. Existen muchas otras causas que producen decorrelación temporal relacionadas con cualquier modificación del terreno que cambie las propiedades de retrodispersión de la superficie durante el periodo de revisita del satélite, como por ejemplo diversos estadios de cultivos agrícolas, crecimiento de la vegetación, presencia de nieve estacional y cambios antropogénicos (como actividades agrícolas, mineras y constructivas) (Hanssen, 2001).

5.2.1 Caso 20. La mina de El Feixolín (León, España)

La mina de El Feixolín (León) es una antigua explotación de carbón (a cielo abierto y subterránea) restaurada en 2015, que presenta una extensión aproximada de unos 5 km² y cuyas escombreras muestran importantes signos de inestabilidad gravitacional en la actualidad. Su escombrera principal, ubicada en la ladera de la explotación (situada en la parte derecha de las imágenes de la Figura 91), está afectada por un deslizamiento lento de grandes dimensiones. Existen estudios que analizan la huella de deformación detectada sobre la escombrera principal utilizando datos InSAR adquiridos con la constelación Sentinel-1 (López-Vinielles et al., 2023; López-Vinielles et al., 2022; López Vinielles, 2022). La mitad suroeste (SW) de la ladera, situada a menor cota, representa una zona de bosque densamente vegetada, lo que provoca importantes pérdidas de coherencia debido a la decorrelación temporal que dificultan la obtención de puntos de medida en esta zona. Esto es claramente apreciable en los resultados del EGMS (Figura 91), donde también se observa que el número de puntos de medida obtenidos sobre la mitad noreste (NE) de la ladera es limitado. Esto último posiblemente se relacione con la ocurrencia de fenómenos de decorrelación temporal ligados al desarrollo de las tareas de restauración de la escombrera (movimiento de tierras, hidrosiembra, etc.) llevadas a cabo durante el período de monitorización cubierto por los datos del EGMS (2015-2022). Si bien la decorrelación temporal ligada a la restauración de la escombrera puede minimizarse seleccionando períodos de monitorización más cortos (López-Vinielles et al., 2023; López-Vinielles et al., 2022; López Vinielles, 2022), generalmente no es posible mitigar la decorrelación temporal ligada a la presencia de vegetación empleando la misma estrategia.

La poca densidad de puntos del EGMS hace que no sea posible llevar a cabo una comparación entre estos datos y los resultados InSAR obtenidos en estudios previos. En este ejemplo se muestra la serie temporal de un punto de medida representado con un círculo negro en la Figura 91 (derecha), localizado sobre la escombrera principal, que presenta un desplazamiento LOS acumulado durante el período comprendido entre los años 2018 y 2022 de unos -8 cm (Figura 92). Sin embargo, hay que ser cautelosos a la hora de interpretar esta medida, ya que se trata de un punto relativamente aislado (ver apartado 2.8).

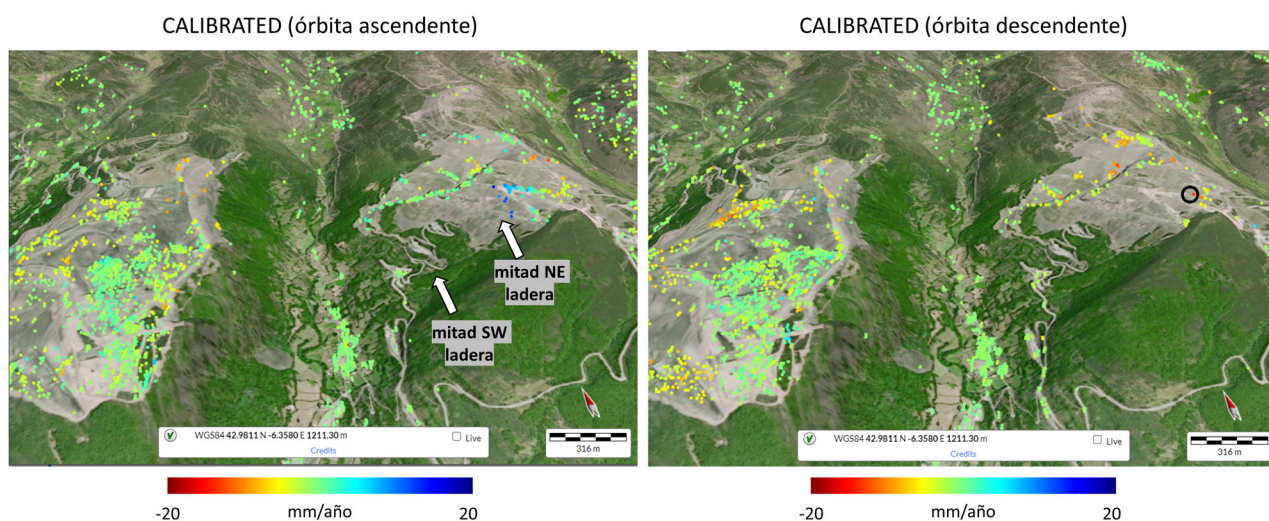
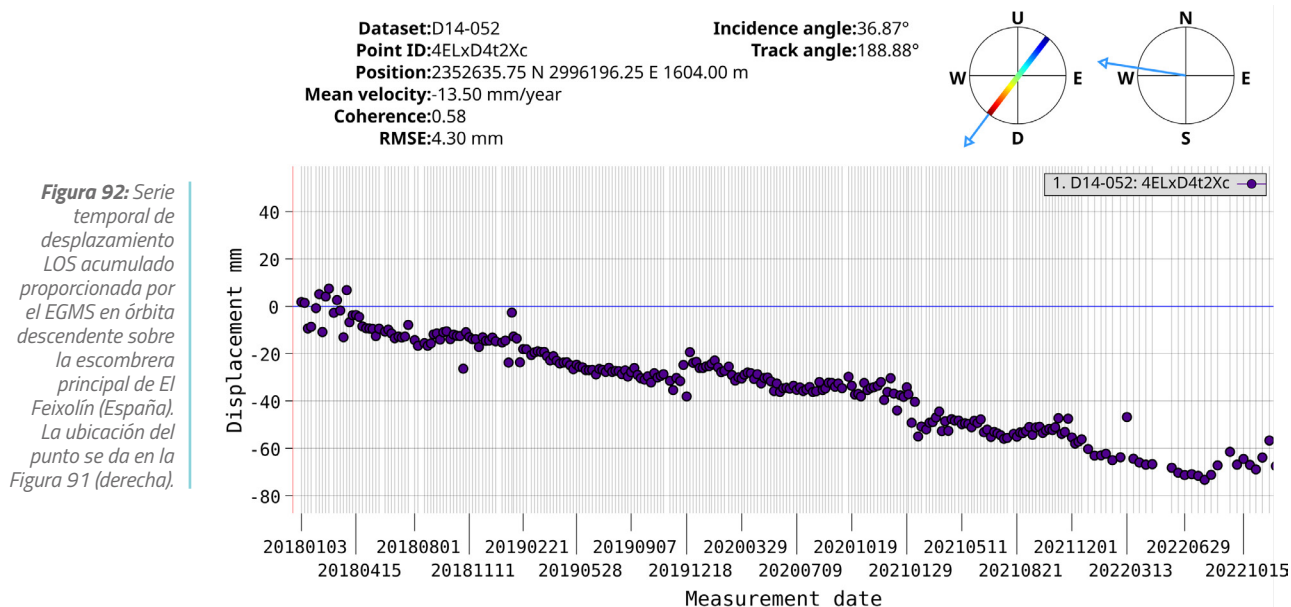


Figura 91: Mapa en 3D de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha) del producto CALIBRATED en El Feixolín (España). El círculo negro indica el punto seleccionado para mostrar la serie temporal del producto CALIBRATED descendente de la Figura 92. Localización WGS84 -6.336 E, 42.972 N.



5.2.2 Caso 21. La mina de Las Cruces (Sevilla, España)

La mina de Las Cruces (Sevilla) es una explotación de cobre (a cielo abierto y subterránea) activa en la actualidad, que presenta una extensión aproximada de 12 km² y cuenta con una corta minera de 1500 m de largo, 900 m de ancho y 200 m de profundidad. Ha sido estudiada con datos InSAR adquiridos con la constelación Sentinel-1 en algunos trabajos que se centran en el análisis retrospectivo de la rotura masiva que sufrió el talud noroeste indicado en la Figura 93 a principios de 2019 (López-Vinielles et al., 2020; López-Vinielles et al., 2022). Los resultados de estos trabajos permitieron determinar los desplazamientos y velocidades LOS del talud noroeste durante el año 2018 (año previo a la rotura) en órbita ascendente y descendente, revelando movimientos acumulados promediados de alejamiento del satélite superiores a los 4.6 cm en esa área. En contraste, los resultados proporcionados por el EGMS (Figura 93) no proporcionan ningún punto de medida en la zona del talud noroeste. Esto es debido a que durante el período de monitorización cubierto por los datos del EGMS, se producen diversos trabajos de movimiento de tierra (excavaciones, vertidos, etc.) sobre la zona ocupada por la explotación, así como el cambio brusco de topografía por la rotura del talud, lo que produce la pérdida total de coherencia y, por tanto, de puntos de medida InSAR (Figura 94). En los resultados de velocidad LOS media proporcionados por el EGMS tampoco hay ningún punto de medida en las zonas agrícolas, lo que posiblemente se relaciona con fenómenos de decorrelación temporal ligados a los diversos estadios de los cultivos. Como el EGMS presenta una muy baja cobertura espacial y únicamente hay puntos de medida en la cabecera del talud suroeste de la corta (Figuras 93 y 94) no es posible llevar a cabo una comparación entre estos datos y los resultados InSAR obtenidos en estudios previos. Conviene resaltar que la pérdida de puntos de medida por decorrelación temporal debida al movimiento de tierras puede minimizarse seleccionando períodos de monitorización más cortos (López-Vinielles et al., 2020; López-Vinielles et al., 2022). Tanto este ejemplo como el anterior ilustran las limitaciones del EGMS para extraer información relevante en determinados casos, donde es necesario realizar un procesado adaptado a las características del fenómeno y del terreno.

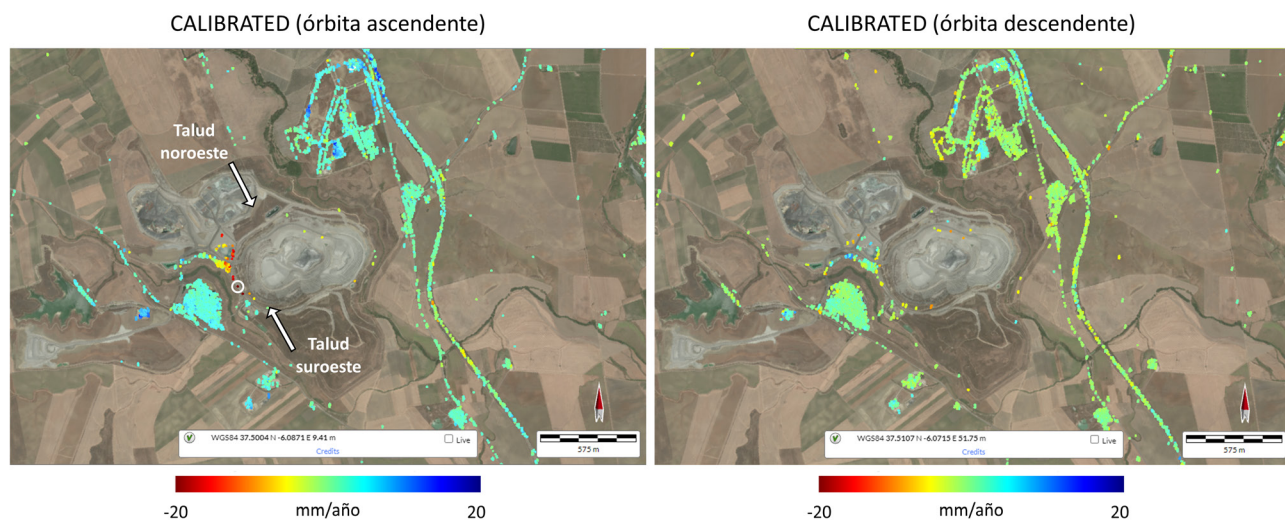


Figura 93: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente y descendente del producto CALIBRATED en la mina Las Cruces (España). El círculo blanco indica el punto seleccionado en el talud suroeste para mostrar la serie temporal del producto CALIBRATED ascendente de la Figura 95. Localización: WGS84 -6.066 E, 37.492 N.



Figura 94: Movimientos de tierras y cambios topográficos bruscos ocurridos en la mina de Las Cruces (España) entre 2015 y 2022. Maps data: Google, ©2023 Maxar Technologies.

Dataset:A14-074
Point ID:4KMX5GAef
Position:1752864.63 N 2898248.00 E 31.40 m
Mean velocity:-23.60 mm/year
Coherence:0.51
RMSE:4.30 mm

Incidence angle:33.27°
Track angle:349.89°

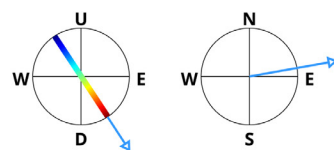
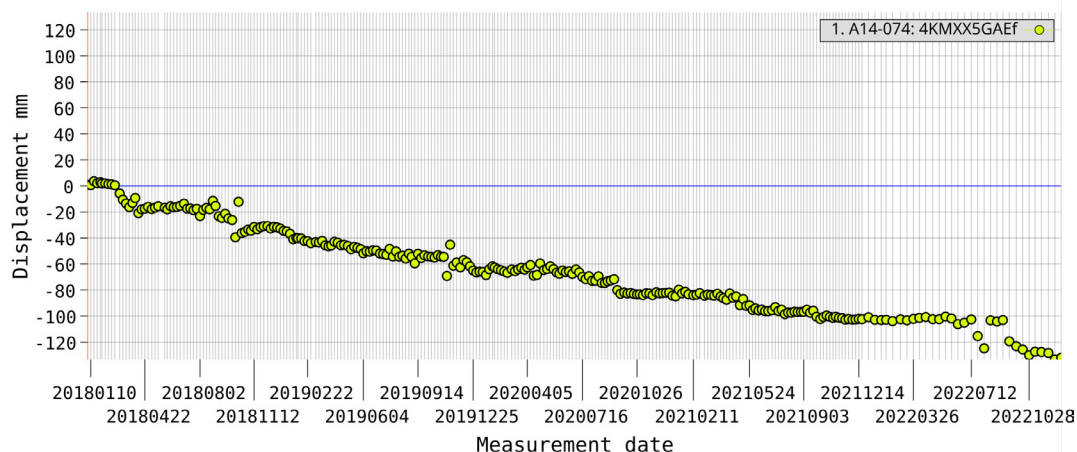


Figura 95: Serie temporal de desplazamiento LOS acumulado proporcionada por el EGMS en la mina Las Cruces (España) para la órbita ascendente en un punto sobre el talud suroeste mostrado en la Figura 93 (izquierda).



5.3 MOVIMIENTO RÁPIDO

La velocidad máxima (v_{\max}) que se puede medir con las técnicas InSAR está limitada, lo que significa que no se pueden detectar movimientos muy rápidos. Esta limitación se debe a una restricción física relacionada con las diferencias de fase (ver apartado 2.8), y depende de la frecuencia temporal de adquisición, de la longitud de onda del sensor SAR (Tabla 4) y del tamaño del píxel (Massonnet and Feigl, 1998). El umbral teórico de detección de desplazamiento entre dos píxeles vecinos es $\lambda/4\Delta t$, donde λ es la longitud de onda emitida por el sensor SAR y Δt el tiempo transcurrido entre dos adquisiciones SAR (Wasowski and Bovenga, 2014). Tomando como ejemplo el caso de la constelación Sentinel-1, y considerando un tiempo de revisitado de 6 días y una longitud de onda de 5.6 cm, la máxima tasa de desplazamiento medible entre dos píxeles adyacentes sería de unos 0.85 m/año. Por este motivo, cuando el gradiente de desplazamiento entre píxeles contiguos supera ese umbral teórico, y se excede el límite de una franja por píxel, se produce una pérdida de coherencia (Massonnet and Feigl, 1998). Además, puede ocurrir que las propiedades de retrodispersión de la superficie movilizada cambien bruscamente entre adquisiciones (por ejemplo, en un deslizamiento de ladera rápido), provocando la pérdida total de coherencia por decorrelación temporal y, por tanto, importantes pérdidas de puntos de medida (ver apartado 2.6). Otro posible efecto cuando suceden desplazamientos rápidos o aceleraciones en corto plazo y la coherencia se mantiene, es que se produzcan saltos de fase y errores de desenrollado, subestimando los movimientos reales (Manconi, 2021; Wasowski and Bovenga, 2014).

5.3.1 Caso 22. La cuenca minera de la Alta Silesia (Polonia y República Checa)

La cuenca minera de la Alta Silesia (Polonia y República Checa) es una importante zona de minería subterránea activa en la actualidad, dedicada a la explotación de carbón, que presenta una extensión aproximada de 5000 km² y numerosas cubetas de subsidencia producidas por la actividad minera. La zona presenta importantes alteraciones en superficie, incluyendo graves daños estructurales en edificios en la localidad polaca de Bytom y alrededores. Estos fenómenos han sido estudiados centrándose en la delimitación precisa de las zonas de subsidencia minera y en el análisis de sus tasas de subsidencia utilizando datos InSAR adquiridos con la constelación TerraSAR-X (Przyłucka et al., 2015). Este trabajo permitió identificar 31 cubetas de subsidencia en la cuenca combinando técnicas InSAR convencionales (basadas en el análisis de interferogramas individuales) y avanzadas (basadas en el análisis de múltiples interferogramas). En el caso de la cuenca minera de la Alta Silesia, los resultados obtenidos mediante técnicas InSAR avanzadas únicamente proporcionan puntos de medida en los límites de las cubetas de subsidencia, debido a que el movimiento es demasiado rápido para ser detectado, es decir, el gradiente de desplazamiento supera el umbral de detección teórico del sensor TerraSAR-X (Przyłucka et al., 2015). Esta ausencia de puntos de medida también se aprecia en los resultados de velocidad LOS media del satélite Sentinel-1 proporcionados por el EGMS (Figura 96). Por otra parte, de acuerdo con los resultados de velocidad LOS media obtenidos en el estudio de Przyłucka et al., (2015), las zonas afectadas por fenómenos de subsidencia minera residual presentan unas tasas de desplazamiento LOS medias de más de -0.5 cm/año. Estos resultados también son coherentes con los resultados de velocidad LOS media proporcionados por el EGMS en las zonas que sí se registran datos, como se observa en la Figura 96. Nótese que los puntos de medida representados en amarillo y azul claro indican velocidades LOS medias de alrededor de -0.5 cm/año. El punto de medida representado con un círculo negro en el mapa de velocidad LOS proporcionado por el EGMS en órbita descendente en la Figura 96 superior derecha (localizado sobre la zona del Río Klodnica ubicada a la altura de la localidad polaca de Przyszowice), presenta un desplazamiento LOS acumulado de más de -20 cm durante el período comprendido entre los años 2018 y 2022, (Figura 97). Estos resultados son coherentes con los resultados de desplazamiento LOS acumulado obtenidos en el estudio mencionado (salvando las diferencias debidas a los distintos períodos de monitorización considerados), de acuerdo con los cuales el desplazamiento LOS acumulado sobre esa misma zona durante el período comprendido entre los años 2011 y 2012, alcanzó los 8 cm.

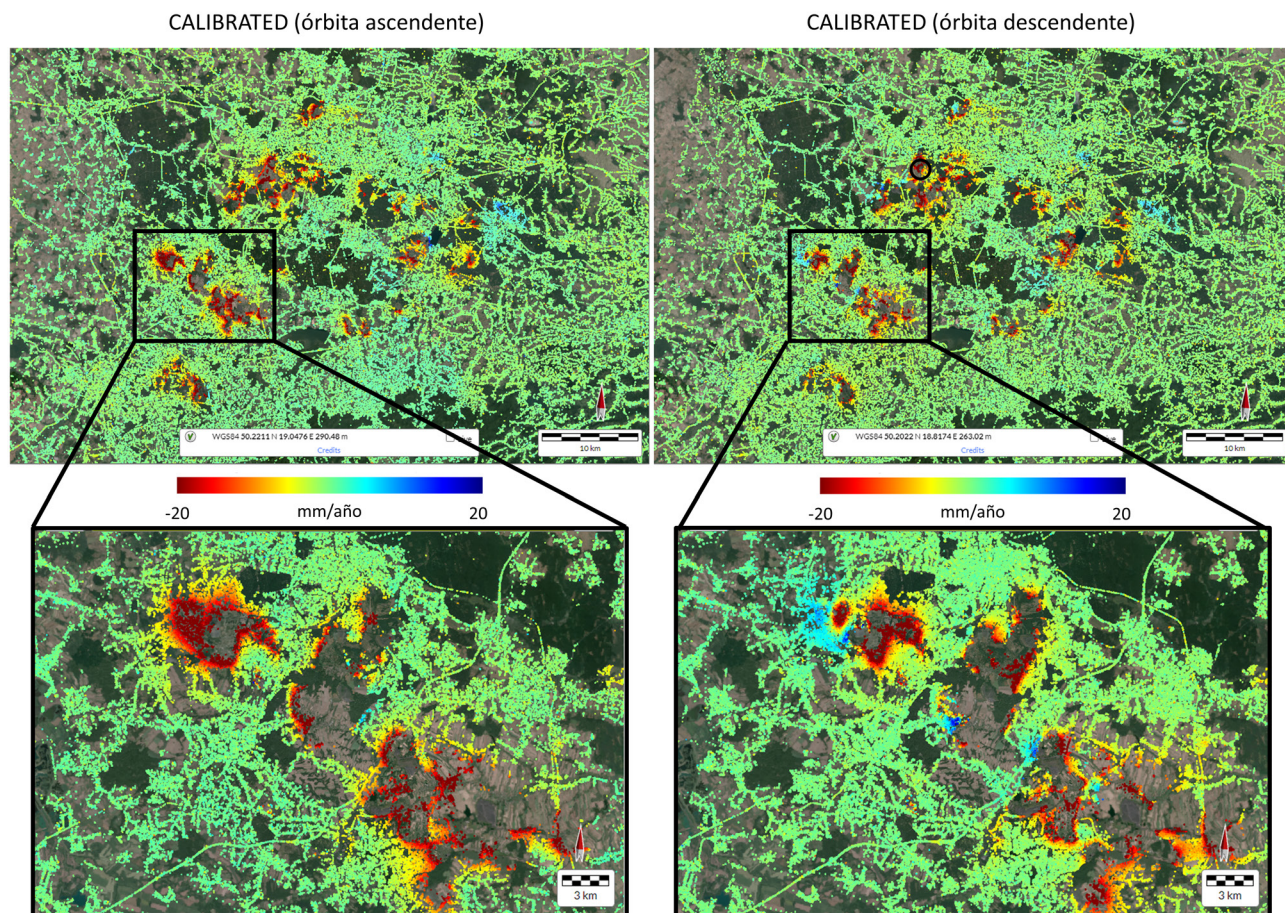


Figura 96: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente y descendente del producto CALIBRATED en Alta Silesia, en la localidad polaca de Przyszwice. En los recuadros ampliados se aprecia la ausencia de puntos de medida en el centro de las cubetas de subsidencia. El círculo negro indica el área que contiene los puntos seleccionados para mostrar la serie temporal del producto CALIBRATED descendente de la Figura 97. Localización: WGS84 19.178 E, 50.085 N.

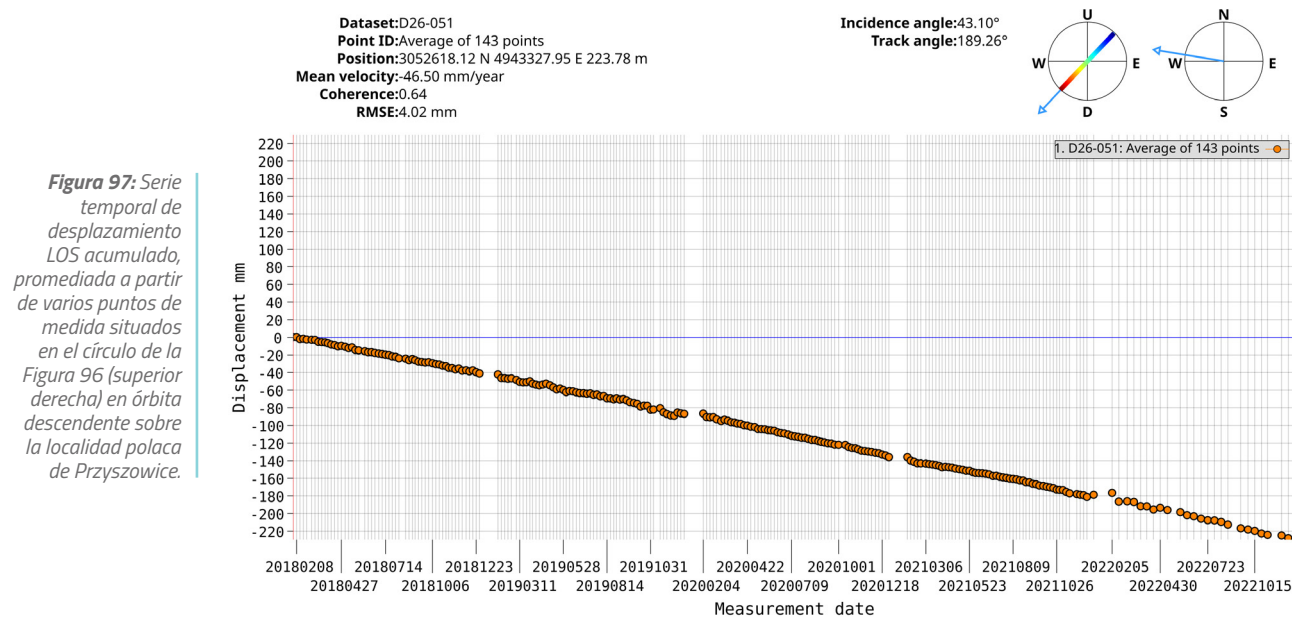


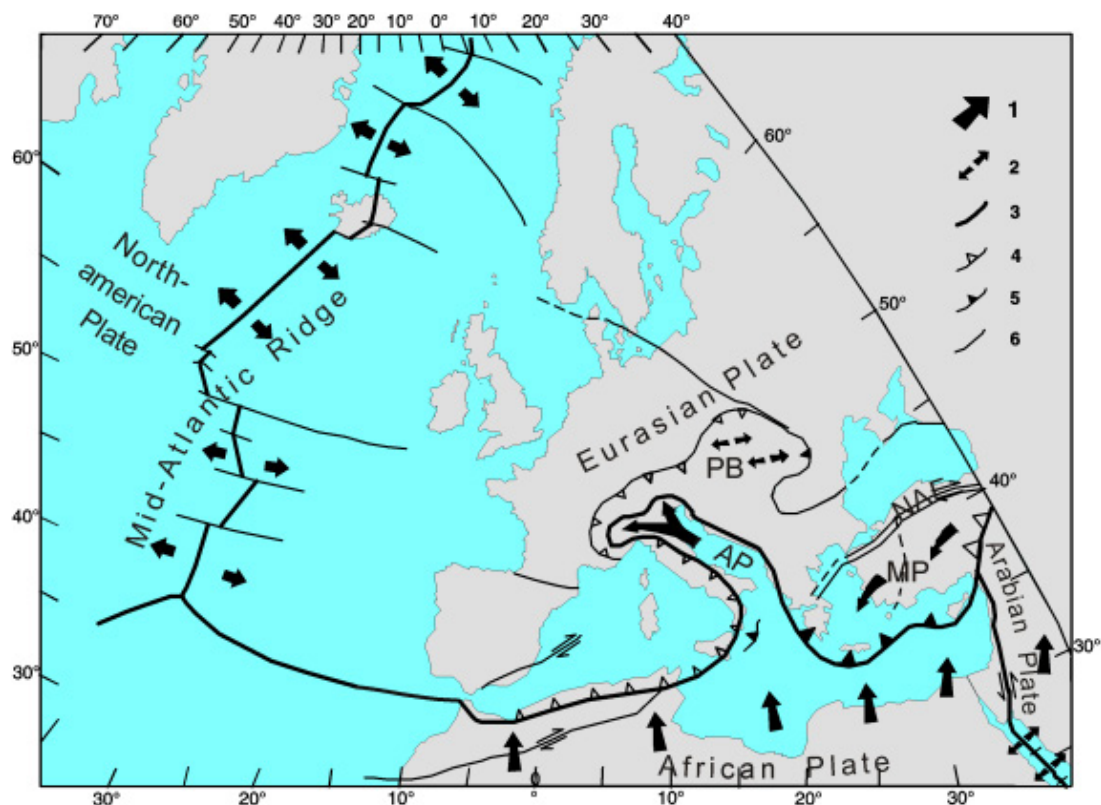
Figura 97: Serie temporal de desplazamiento LOS acumulado, promediada a partir de varios puntos de medida situados en el círculo de la Figura 96 (superior derecha) en órbita descendente sobre la localidad polaca de Przyszwice.

5.4 MEDICIONES ABSOLUTAS DE LOS PRODUCTOS ORTHO Y CALIBRATED DEL EGMS: ISOSTASIA Y TECTÓNICA REGIONAL

5.4.1 Tectónica regional

La corteza terrestre se deforma cerca de los límites de las placas tectónicas como consecuencia del movimiento relativo de éstas. En la Figura 98 se muestran los límites de placas tectónicas y direcciones de movimiento en Europa.

Figura 98: Placas tectónicas, límites y direcciones de movimiento en Europa (Grünthal & Stromeier, 1992), figura de <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/seismic-hazard-and-risk-dynamics/topics/where-in-germany-does-the-earth-quake/crustal-stress-field>.



Este tipo de deformación no está presente en el producto del EGMS BASIC (nivel 2a) porque durante el procesamiento se filtran las señales de gran **longitud de onda** (Ferretti et al., 2021). Como explican estos autores, la máxima escala a la que se puede identificar un fenómeno de deformación es la mitad de la frecuencia del modelo GNSS que se ha utilizado para la referenciar los datos del EGMS a un marco europeo (Larsen et al., 2021). Los fenómenos que tienen una escala espacial mayor, como es el caso de las deformaciones tectónicas regionales, se incorporan posteriormente usando los datos GNSS, cuando se referencia el producto Basic al marco ETRF2000. Por lo tanto, esta deformación tectónica de gran **longitud de onda** sí está incluida en los productos CALIBRATED (nivel 2b) y ORTHO (nivel 3), dado que ambos están referenciados a un modelo GNSS que contiene estas deformaciones.

A continuación, se muestran dos ejemplos de deformaciones asociadas a tectónica regional claramente identificables en el EGMS (productos CALIBRATED y ORTHO).

5.4.1.1 Caso 23. Islandia

Islandia se encuentra en el límite entre las placas de Norteamérica y Eurasia, y es atravesada por la dorsal mesoatlántica. El tipo de límite de placa es divergente y se produce la expansión de la placa, con una deformación del terreno asociada que se produce fundamentalmente en la horizontal. Además, como consecuencia del ajuste glacial isostático (o GIA, *glacial isostatic adjustment*) se produce el levantamiento de gran parte de la isla debido al adelgazamiento de los casquetes polares y el retroceso de los hielos (Sigmundsson et al., 2020). Este campo de deformación horizontal y vertical está claramente ilustrado en el modelo GNSS utilizado para referenciar los productos CALIBRATED y ORHTO (Figura 99).

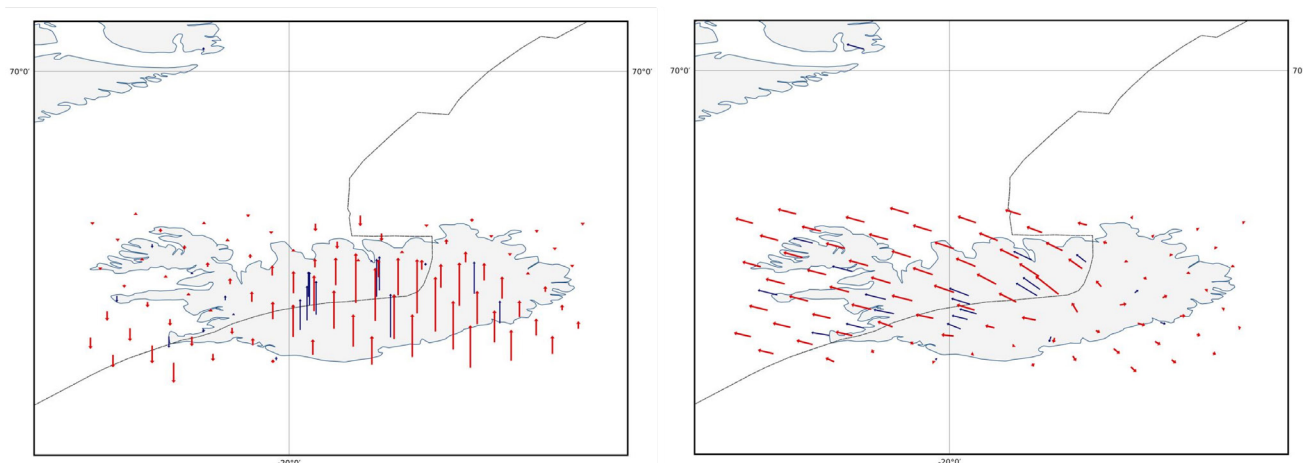


Figura 99: Velocidades verticales (izquierda) y horizontales (derecha) en Islandia según el modelo A-EPND. Figura extraída del informe de calibración del GNSS del EGMS (Larsen et al., 2021).

Los datos del producto CALIBRATED muestran esta deformación en órbita ascendente y descendente (Figura 100). La órbita ascendente muestra una velocidad de deformación del terreno en la dirección LOS, en general de acercamiento al satélite (que estaría a la izquierda de la imagen). La órbita descendente muestra una velocidad de deformación del terreno de alejamiento al satélite en la mitad noroeste de la isla (colores amarillos y rojos) y de acercamiento al satélite en la zona sureste de la isla (colores azules).

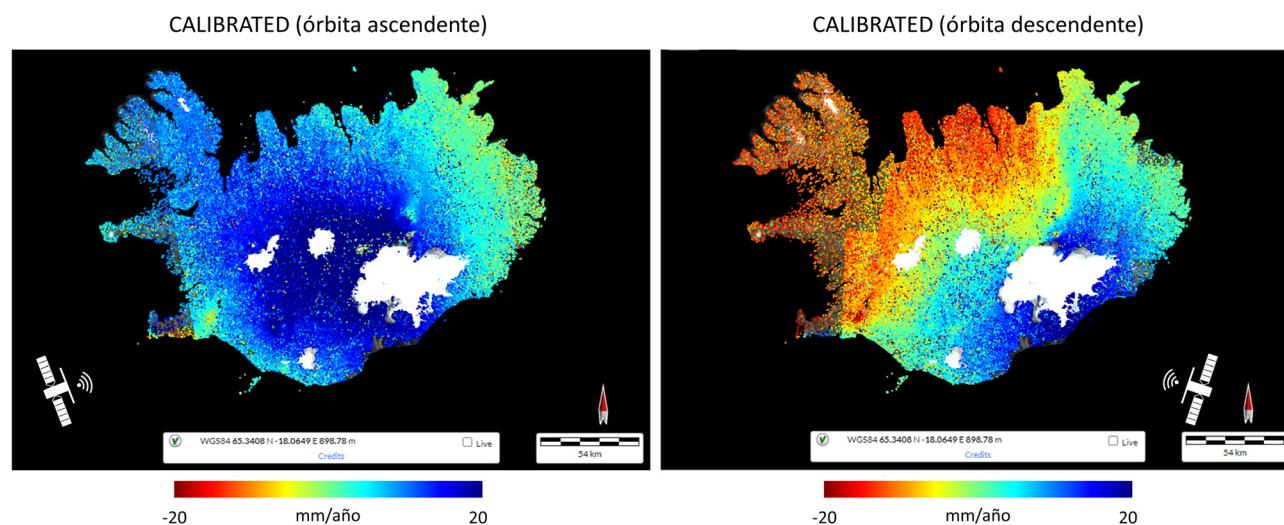


Figura 100: Mapa de velocidad LOS en mm/año en órbita ascendente y descendente del producto CALIBRATED en Islandia. Localización: WGS84 -19.340 E, 64.549 N.

Los datos del producto ORTHO muestran esta deformación en dirección horizontal este-oeste (Figura 101 derecha) y en dirección vertical (Figura 101 izquierda). El producto ORTHO este-oeste muestra una velocidad de deformación en la zona oeste de la isla hacia el oeste (colores amarillos y rojos) mientras que la zona este de la isla se mueve hacia el este, lo que está de acuerdo con la dirección de desplazamiento horizontal del modelo GNSS utilizado para referenciar estos datos (Figura 99 izquierda). El producto ORTHO vertical (Figura 101 izquierda) muestra una velocidad positiva (levantamiento) de la mayor parte de la isla, debida al ajuste glacial isostático, que también se ve claramente en el modelo GNSS utilizado para referenciar estos datos (Figura 99 derecha).

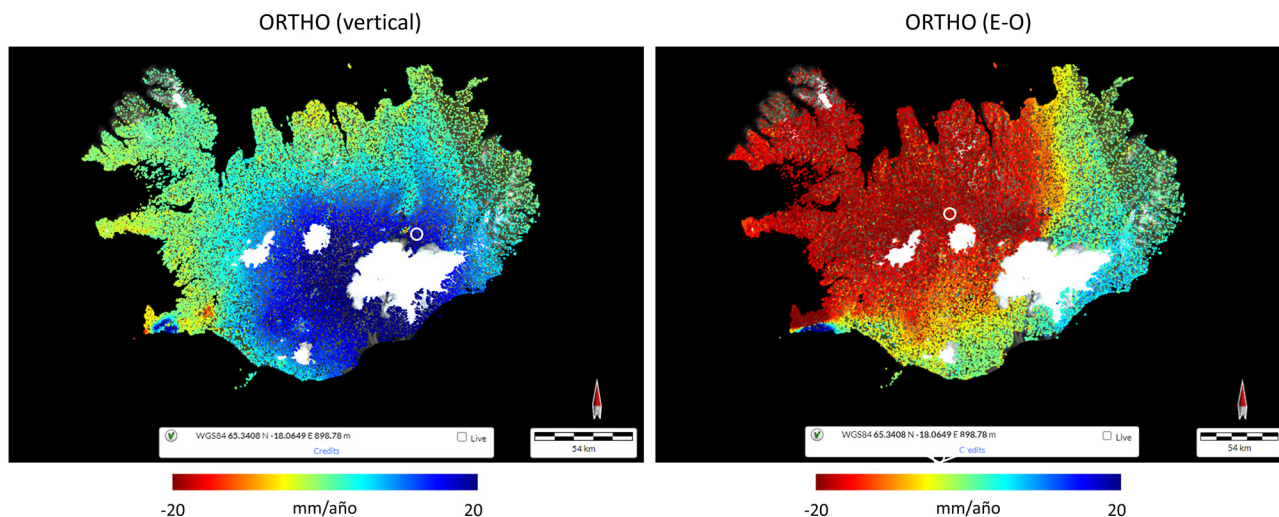


Figura 101: Mapas de velocidad en proyección vertical (izquierda) y horizontal (derecha) en mm/año del producto ORTHO en Islandia. Los círculos blancos marcan los puntos seleccionados para mostrar las series temporales de la Figura 102. Localización: WGS84 -19.340 E, 64.549 N.

En la Figura 102 se muestra un ejemplo de la evolución temporal de la deformación horizontal y vertical. Nótese que las series temporales son discontinuas. Esto es debido a que los períodos con cobertura de nieve estacional o perpetua están excluidos de las series temporales.

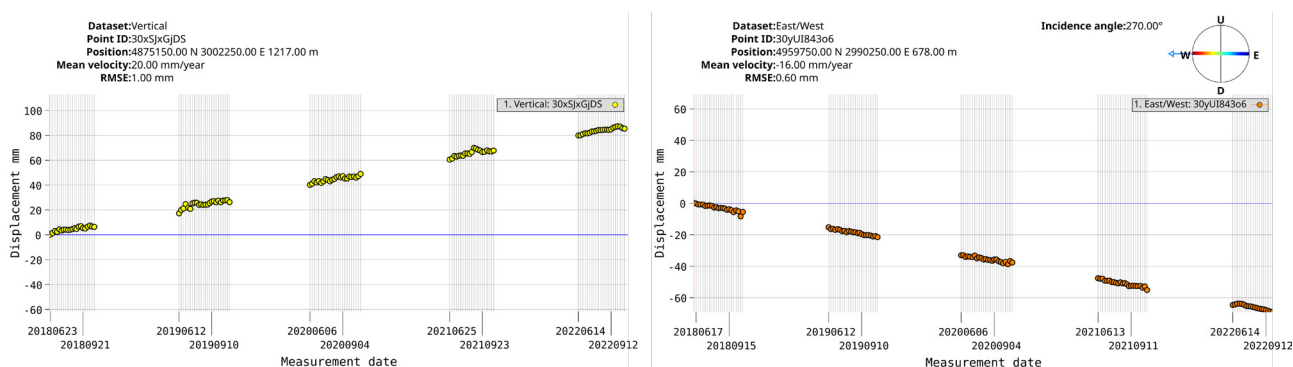
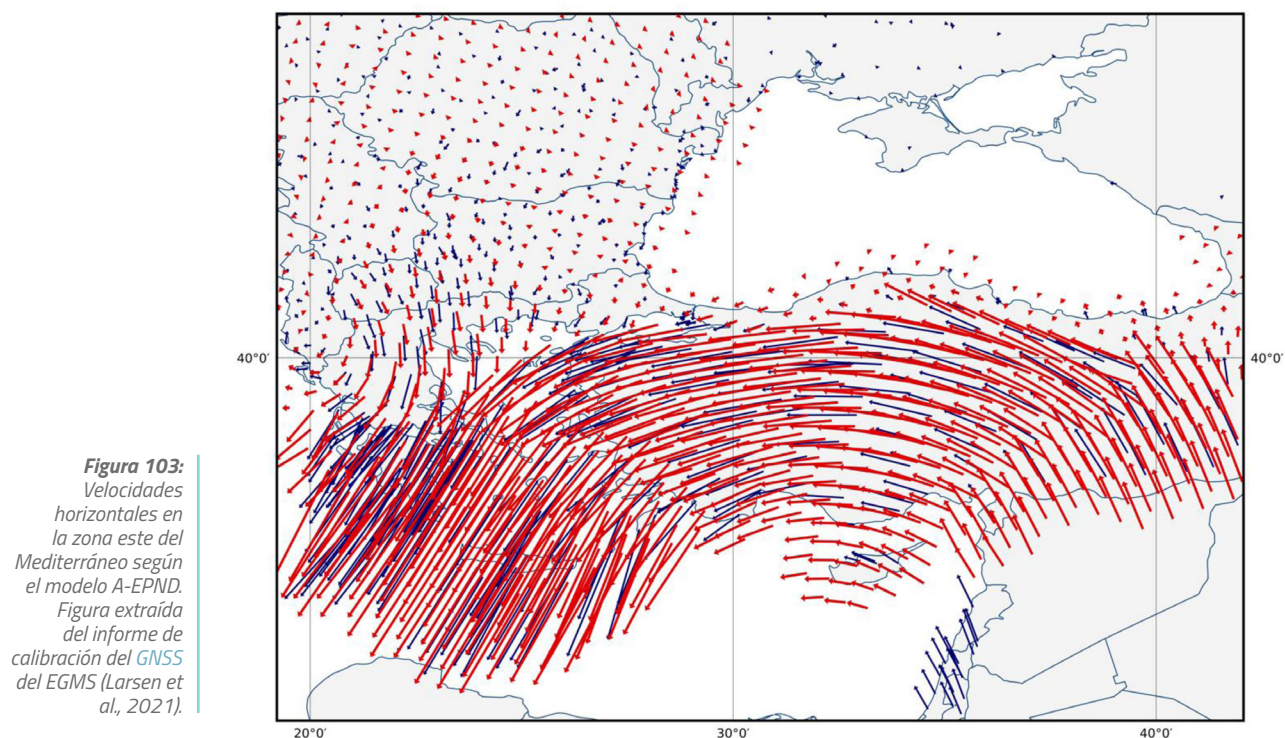


Figura 102: Evolución temporal de la deformación vertical (izquierda) y horizontal este-oeste (derecha) del producto ORTHO en Islandia. La localización de los puntos se puede observar en la Figura 101.

5.4.1.2 Caso 24. Grecia

Grecia se encuentra en una zona tectónicamente compleja en la que confluyen varias placas tectónicas. Como consecuencia de esta interacción se produce un movimiento de la zona hacia el suroeste respecto a Eurasia (Briole et al., 2021). Este campo de deformación horizontal está claramente ilustrado en el modelo GNSS utilizado para referenciar los productos CALIBRATED y ORTHO (Figura 103).



Los datos del producto CALIBRATED muestran esta deformación en órbita ascendente y descendente (Figura 104). La órbita ascendente (Figura 104 izquierda) muestra una velocidad general de deformación del terreno en la dirección LOS de acercamiento al satélite (que estaría a la izquierda de la imagen). La órbita descendente (Figura 104 derecha) muestra una velocidad general de deformación del terreno de alejamiento del satélite (que estaría a la derecha de la imagen). La figura 105 muestra una comparación de las distintas componentes del movimiento registradas por los productos CALIBRATED (ajustado al modelo GNSS, por lo que incluye el movimiento tectónico regional) y BASIC (sin ajustar al modelo GNSS) en la isla de Amorgos (Grecia).

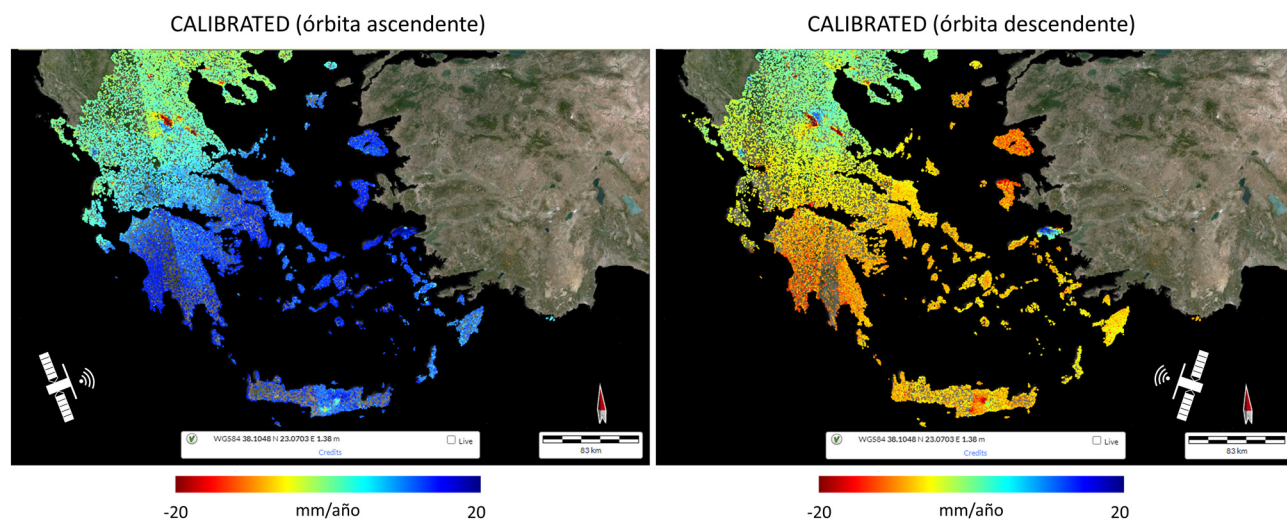


Figura 104: Deformación en Grecia (producto CALIBRATED) en órbita ascendente (izquierda) y descendente (derecha). Localización: WGS84 25.055 E, 37.369 N.

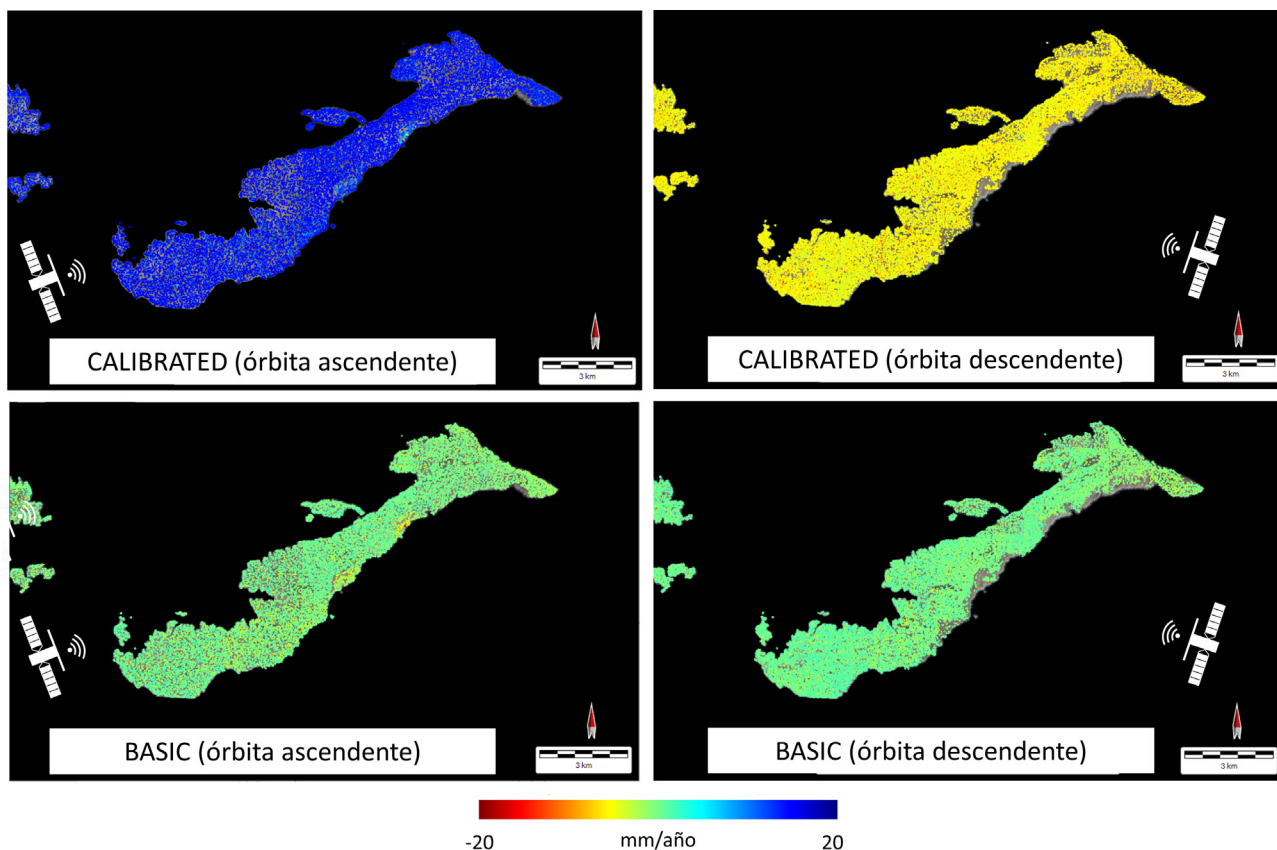


Figura 105: Comparación de los productos CALIBRATED y BASIC en la isla de Amorgos (Grecia). Localización: WGS84 25.887 E, 36.822 N.

En los datos del producto ORTHO esta deformación es claramente visible en la dirección horizontal este-oeste (Figura 106, derecha). El producto ORTHO este-oeste muestra una velocidad de deformación de toda la zona hacia el oeste (colores amarillos y rojos), lo que está de acuerdo con la dirección de desplazamiento horizontal del modelo GNSS utilizado para referenciar estos datos (Figura 103). En la Figura 107 se muestra un ejemplo de la evolución temporal de la deformación horizontal en Grecia a partir de varios puntos promediados incluidos en el círculo blanco de la Figura 106 (derecha). El producto ORTHO vertical no muestra un patrón claro de gran longitud de onda (Figura 106 izquierda).

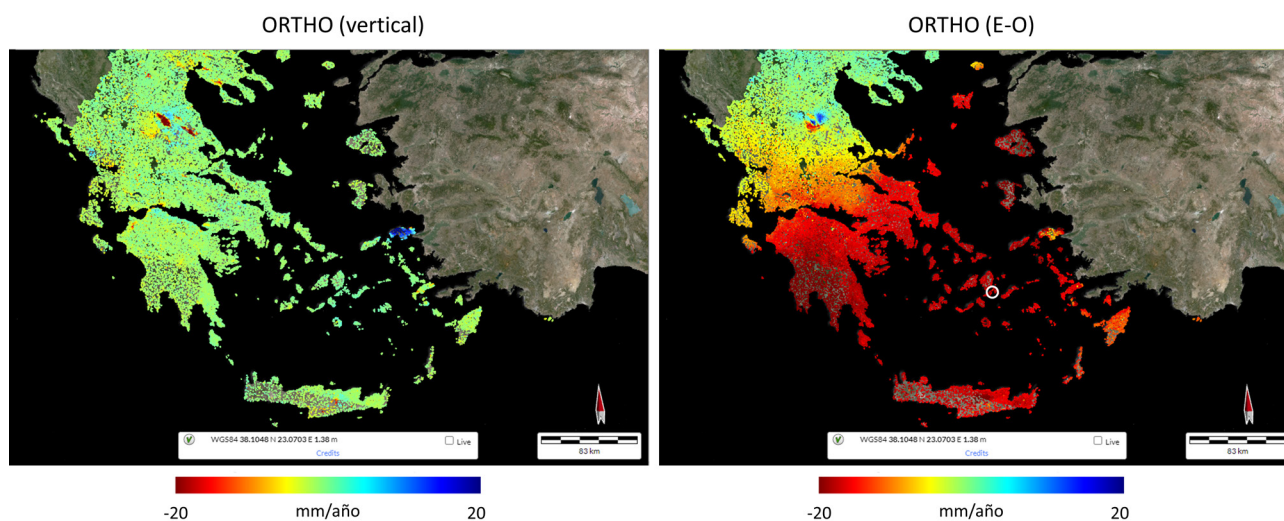
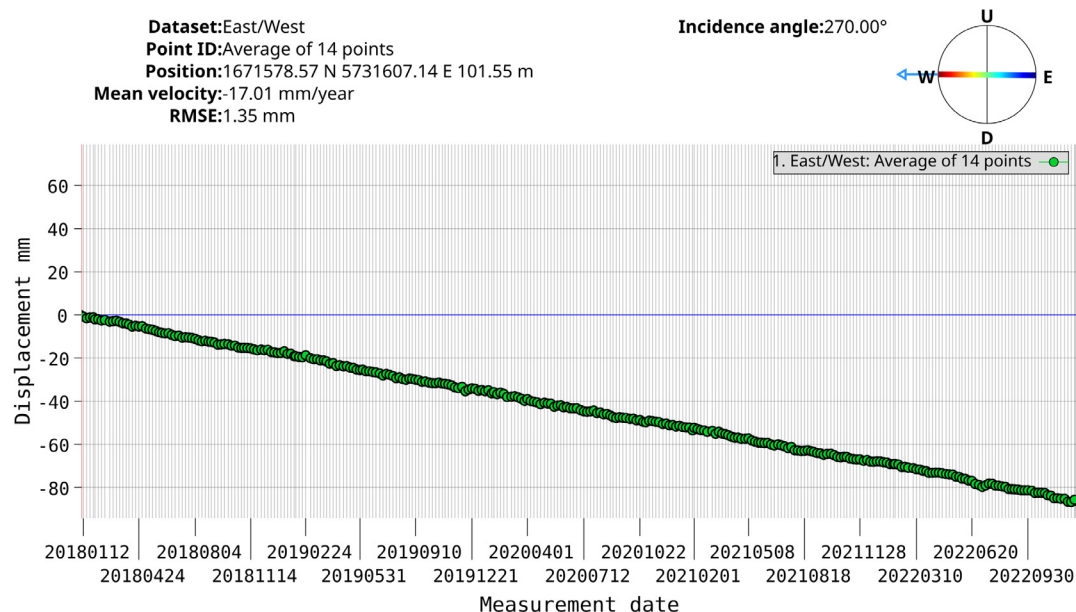


Figura 106: Deformación en Grecia (producto ORTHO) en dirección horizontal este-oeste (derecha) y en vertical (izquierda). El círculo blanco muestra la zona de los puntos elegidos para mostrar la serie temporal de la Figura 107. Localización: WGS84 25.055 E, 37.369 N.

Figura 107: Evolución temporal de la deformación horizontal este-oeste en Grecia. Se presenta el valor medio de los 14 puntos dentro del círculo blanco de la Figura 106 (derecha).



5.4.2 Isostasia

La isostasia es el proceso de elevación o hundimiento de una porción de la litosfera terrestre. Ocurre cuando se elimina o agrega peso para mantener el equilibrio entre las fuerzas de flotación, que empujan hacia arriba la litosfera, y las fuerzas de gravedad, que la atraen hacia abajo (DiPietro, 2013). Durante el último máximo glacial, grandes capas de hielo cubrieron Escandinavia, Islandia, el Mar de Barents y las Islas Británicas del Norte. Después, las capas de hielo desaparecieron y la Tierra sólida se readaptó hacia un nuevo equilibrio isostático (Steffen and Kaufmann, 2005). El rebote postglacial produce un levantamiento gradual de la superficie del terreno que es observable mediante redes geodésicas. Los modelos actuales de levantamiento vertical estiman que regiones como Escandinavia se elevan a un ritmo de hasta 9 mm/año (Vestøl et al., 2019). La contribución del ajuste isostático está incluida en los productos CALIBRATED y ORTHO (Larsen et al., 2021). Por este motivo, los datos EGMS del visor muestran levantamiento en las regiones de la península escandinava y en Islandia (Figura 108). Si el interés es la deformación local, se deberá recurrir al producto BASIC.

ORTHO (vertical)

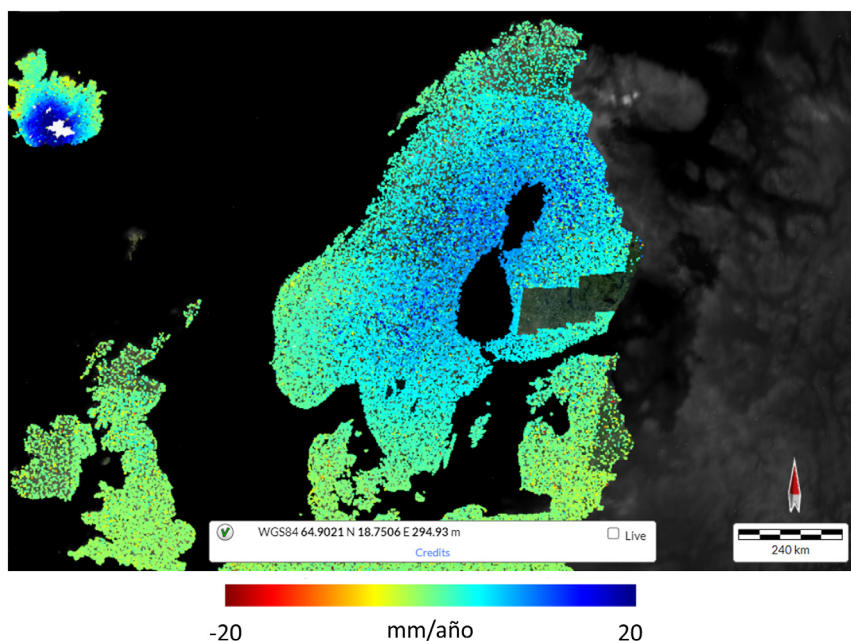


Figura 108: Deformación debida a la isostasia en el producto ORTHO vertical en la península escandinava. Localización: WGS84 18.750 E, 64.902 N.

ANEXOS

Anexo I. Glosario

Los términos que se describen en este glosario están relacionados con el contexto del SAR (Radar de Apertura Sintética). Se recomienda consultar también los glosarios disponibles en: *ASAR Product Handbook* (ESA, 2004), *Alaska Satellite Facility software tools* (Gens & Logan, 2003), *Synthetic Aperture Radar and SARscape* (SARMAP ©, 2009), la guía técnica del satélite Sentinel-1 (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/appendices/glossary>) y la aplicación interactiva en línea *intro2radar* (<https://www.geos.ed.ac.uk/ihw/hype/radar/intro2radar.html>).

Absorción de la señal

La absorción de la señal SAR (Radar de Apertura Sintética) se refiere a la pérdida de energía de la señal de radar a medida que viaja a través de la atmósfera o cuando penetra en la superficie terrestre.

Las principales causas de la absorción de la señal SAR son:

- Absorción atmosférica: La atmósfera terrestre contiene moléculas de gases como el oxígeno y el vapor de agua que pueden absorber parte de la energía de la señal de radar a medida que atraviesa la atmósfera. La cantidad absorbida depende de la frecuencia de la señal de radar y de la cantidad de gases presentes en la atmósfera.
- Absorción superficial: Al llegar a la superficie terrestre, la señal de radar también puede ser absorbida por ciertos tipos de materiales, como suelos húmedos o vegetación densa. La cantidad absorbida depende de la composición y las propiedades eléctricas de los materiales.

Acimut

La dirección de acimut es la misma que la dirección del vuelo del satélite, siendo perpendicular a la dirección en **rango**. También es la dimensión de una imagen SAR en esa dirección.

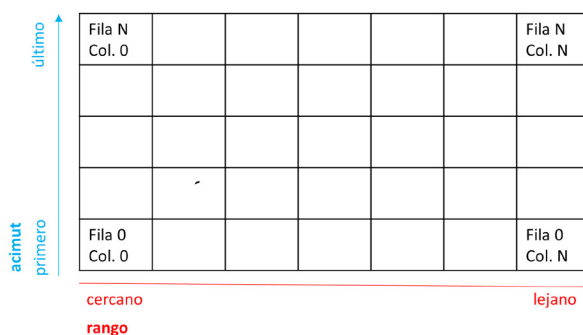
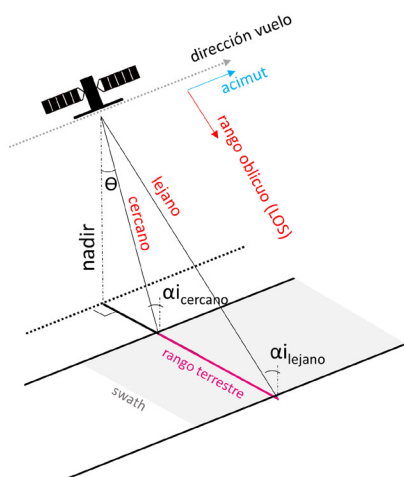


Figura A1.1: Izquierda: Dirección de acimut y rango en la geometría de adquisición. Derecha: Acimut y rango terrestre en la dimensión de una imagen SAR.

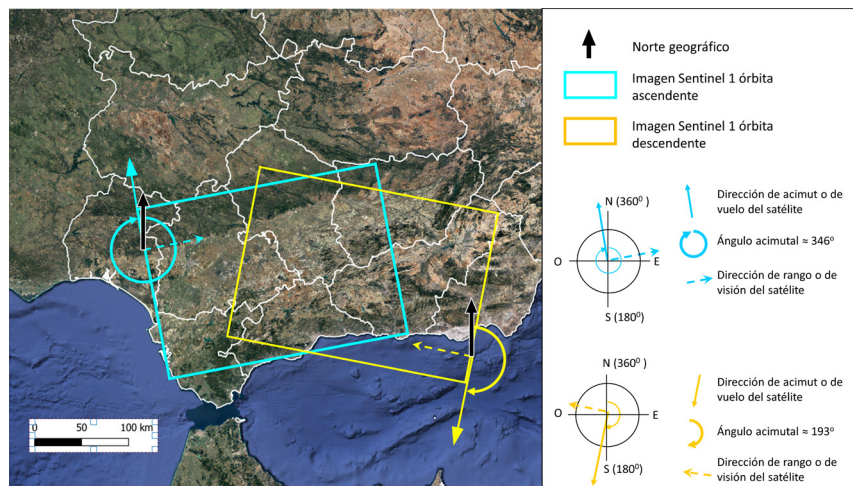
Amplitud

Medida de la fuerza de una señal y, en particular, de la altura de la onda electromagnética (su unidad de medida es el voltaje).

Ángulo acimutal

El ángulo acimutal o de cabeceo se refiere al ángulo que indica la dirección del satélite (acimut) con respecto al norte geográfico.

Figura A1.2:
Representación del
ángulo acimutal o
de cabeceo de las
órbitas del satélite
Sentinel-1.



Ángulo de incidencia

Es el ángulo definido por el haz de radar incidente y la línea normal a la curvatura de la Tierra (el **nadir**). El ángulo de incidencia (α_i) cambia a lo largo de la franja de imagen del radar; aumenta desde el rango cercano al lejano (ver Figura 3 del manual). Cuanto mayor sea el ancho (**swath**) de la imagen, más variará el ángulo de incidencia entre el rango cercano y el lejano. En el caso de una imagen Sentinel-1 de tipo IW (ver más información sobre este tipo de imágenes en la definición de **burst**), que tiene 250 km de ancho, el ángulo de incidencia varía aproximadamente entre 29° y 46° a lo largo del **swath**. Por otro lado, el ángulo de incidencia local (α_i local) se define como el ángulo entre el haz de radar incidente y una línea normal a la superficie del terreno. Cuando el terreno no es llano o tiene relieve, los ángulos de incidencia y de incidencia local serán diferentes. Nótese también que el **ángulo de observación** (θ) es diferente al ángulo de incidencia incluso en terrenos planos debido a la curvatura terrestre.

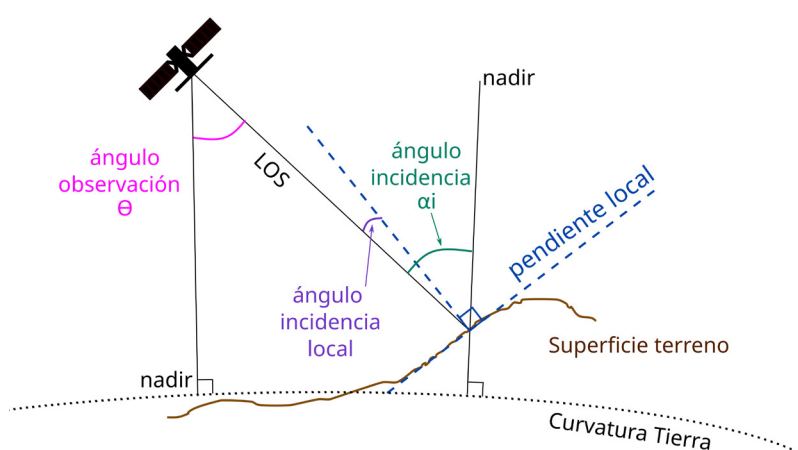


Figura A1.3:
Representación
de los ángulos
de incidencia, de
incidencia local y de
observación.

Ángulo de observación

El ángulo de observación (θ) es el formado entre el **rango** oblicuo y el **nadir** (Figura A1.3) tomado en la posición del satélite. Nótese que es diferente al **ángulo de incidencia** (α_i) incluso en terrenos planos debido a la curvatura terrestre.

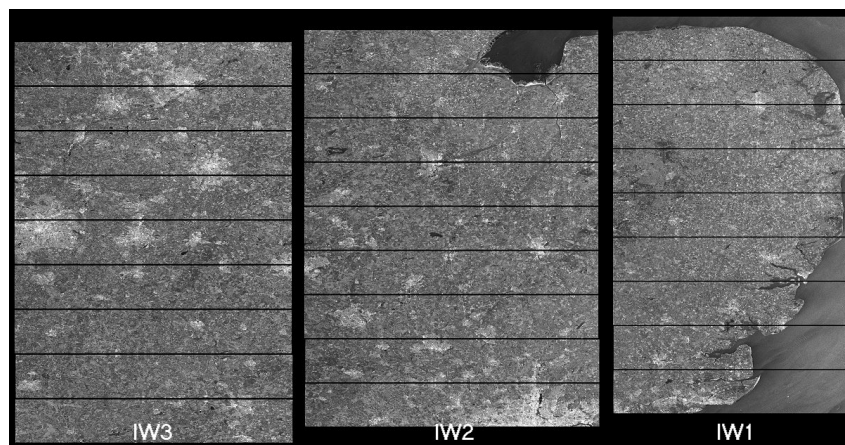
Antena

La antena en los sistemas de radar cumple dos funciones esenciales: irradiar energía electromagnética durante la transmisión y recoger dicha energía durante la recepción. La antena está diseñada con direccionalidad espacial, lo que significa que enfoca la energía en un haz tanto en la dirección vertical como en la horizontal (ver definición de **polarización**).

Burst

Las imágenes del satélite Sentinel-1 que se emplean para InSAR son de tipo **SLC** y están adquiridas mediante el **modo de adquisición** barrido interferométrico amplio (*Interferometric Wide swath*, IW). Estas imágenes tienen un ancho de 250 km en la dirección del **rango** y están divididas en tres sub-áreas más pequeñas o *sub-swaths* (IW1, IW2 y IW3). Dentro de cada sub-área, hay fragmentos separados llamados **bursts** que son los segmentos más pequeños de las imágenes Sentinel-1 IW. Estos fragmentos se pueden unir y ser procesados conjuntamente para formar interferogramas (consultar apartado 2.4 y Figura 17 del manual).

Figura A1.4:
Sub-áreas (IW1, IW2 y IW3) y burst de una imagen SAR adquirida por el satélite Sentinel-1. Figura tomada de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>.



Calibración radiométrica

La calibración radiométrica de una imagen de amplitud SAR consiste en cuantificar la retrodispersión radar de los píxeles, de manera que se puedan realizar análisis cuantitativos de los datos de una imagen o de los cambios de reflectividad entre imágenes tomadas en diferentes momentos. La retrodispersión radar (β) de un objeto se expresa como una relación entre la potencia de la señal retrodispersada (P_s) y la potencia de la señal incidente (P_i) de manera que $\beta = P_s/P_i$. Para calcular la retrodispersión de cada píxel, los cuales representan diferentes porciones del terreno, se realiza una normalización del valor en relación con el área que abarca dicho píxel. De esta forma los valores de intensidad de la señal retrodispersada se pueden convertir a diferentes coeficientes:

- Betao β_o , también conocido como brillo del radar, es la retrodispersión radar por unidad de superficie en el **rango** oblicuo. Es la calibración básica de un producto SAR. Se utiliza cuando no se dispone de información sobre el **ángulo de incidencia** de la imagen.
- Sigmao σ_o , también denominado coeficiente de retrodispersión, es la retrodispersión radar por unidad de superficie en el **rango terrestre**. Toma en cuenta el **ángulo de incidencia** de la señal. Los valores de Sigmao oscilan predominantemente entre 0 y 1, donde 0 equivale a una reflexión total de la señal (no vuelve nada a la antena) y 1 equivale a una dispersión totalmente isótropa. Los valores mayores de 1 se pueden dar en casos de dispersores de doble rebote.
- Gammao γ_o , es la retrodispersión radar por unidad de superficie en un plano perpendicular al **rango** oblicuo. Toma en cuenta el **ángulo de incidencia** de la señal.

Los coeficientes σ_o y γ_o se pueden convertir a escala logarítmica y tomar unidades de decibelio (dB) para reducir el contraste y mejorar la inspección visual de la imagen. Por este motivo, en escala logarítmica los valores pueden ser:

- ◊ Negativos: equivalentes a valores lineales de σ_o menores de 1. En este caso hay una parte de la energía que no vuelve al radar (por la existencia de dispersores de superficie o de volumen). A medida que el valor negativo se hace más grande en magnitud, disminuye la cantidad de energía que retorna al radar (región más oscura en la imagen de la derecha de la figura A1.5).

- ◊ Cero: equivalentes a valores lineales de σ_0 iguales a 1. En este caso la dispersión sería completamente isotrópica.
- ◊ Positivos: equivalentes a valores lineales de σ_0 mayores de 1. En este caso hay una concentración o enfoque de la energía retrodispersada en dirección al radar. Esto ocurre en dispersores de doble rebote, donde la señal devuelta es particularmente fuerte.

También es común emplear el ángulo de incidencia local cuando la topografía es abrupta, en vez del **ángulo de incidencia**, para lo que es necesario emplear un modelo digital del terreno. Para más detalles consultar el artículo Braun (2019) y la Tesis Doctoral de Small (2011).

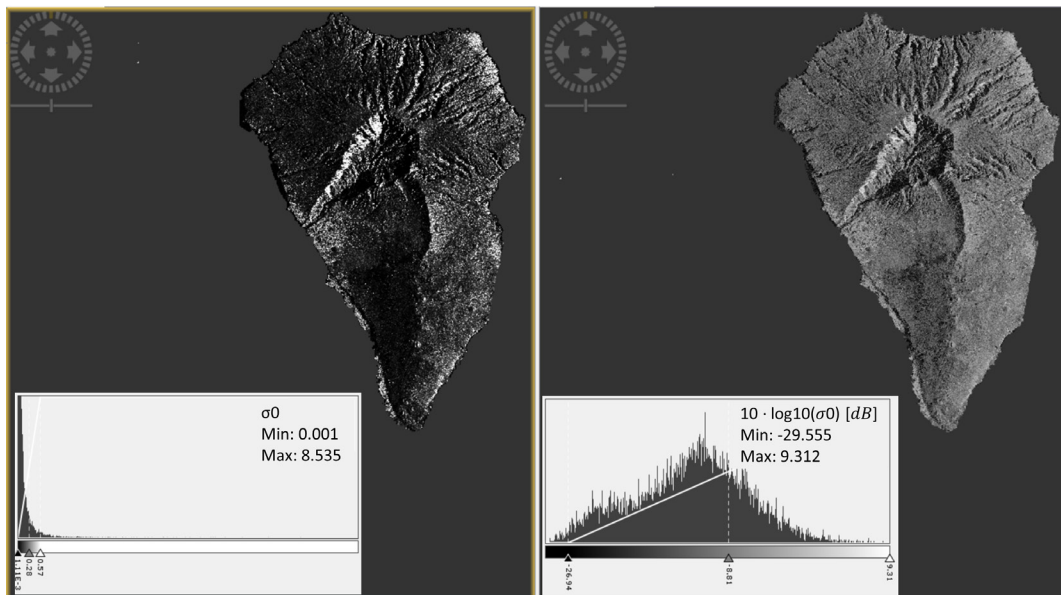


Figura A1.5: Imagen de amplitud calibrada mediante el coeficiente de retrodispersión (σ_0) en representación lineal (izquierda) y logarítmica (derecha). La paleta de color empleada es una escala de grises, donde el color negro representa el valor mínimo del coeficiente de retrodispersión y el color blanco el máximo.

Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es una propiedad de los materiales que cuantifica cuánto un material puede resistir o permitir la formación de un campo eléctrico en su interior. De forma indirecta, esta constante evalúa la interacción entre la señal de microondas (con una **longitud de onda** λ determinada) y un objeto. Las propiedades dieléctricas de un objeto dependen fundamentalmente del tipo de material que lo conforma. La constante dieléctrica determina cuánto de la radiación entrante se dispersa en la superficie, cuánta señal penetra en el medio y cuánta energía se pierde en el medio a través de la absorción. Cuando un material contiene humedad, su constante dieléctrica tiende a aumentar, lo que se traduce en un incremento de la reflectividad de la señal de radar. Basándose en este fenómeno, los sistemas SAR también se utilizan para estimar el contenido de humedad del suelo (principalmente suelos sin vegetación).

Corregistrado

Alineación precisa píxel a píxel del conjunto de las imágenes SAR utilizando un MDE externo y las órbitas precisas. El corregistrado es fundamental en el procesamiento InSAR, ya que asegura que los objetos individuales en el suelo contribuyen al mismo píxel en todas las imágenes del conjunto de datos. El procedimiento típico de corregistrado de imágenes SAR consiste en un primer corregistrado grueso para una precisión a nivel de píxel, seguido de un corregistrado fino para precisión a nivel de subpíxel (Li and Bethel, 2008).

Este proceso no debe confundirse con la **geocodificación**, que es el proceso de proyectar la localización de cada píxel de la imagen SAR a un sistema de referencia cartográfico.

Desenrollado de fase

En interferometría SAR, el desenrollado de fase es el proceso de extraer el número correcto de ciclos de **fase** de 360° o 2π para llegar a una estimación precisa del desplazamiento real del terreno en la línea de visión del satélite. El receptor del sistema SAR sólo puede medir la fase de la señal retrodispersada con una precisión de un ciclo, es decir, 360° . Mediante el desenrollado se añade a la fase enrollada medida el número apropiado de ciclos, o múltiplo de 360° (Figura A1.6). Este procedimiento es uno de los pasos más complejos de la interferometría radar (Ferretti et al., 2007a; Hanssen, 2001) y existen diversos algoritmos (Yu et al., 2019).

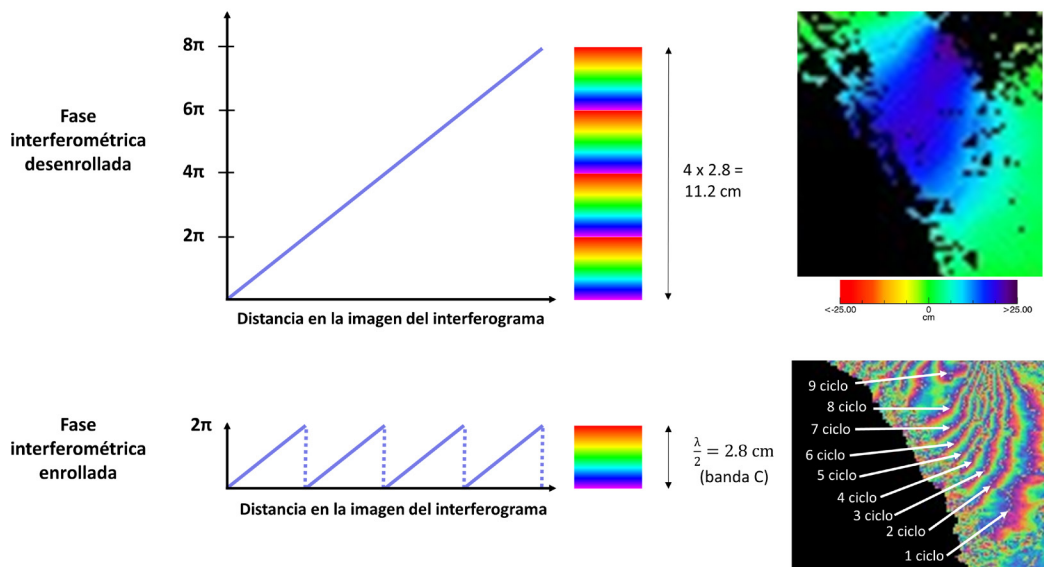


Figura A1.6: En el interferograma enrollado cada franja representa un ciclo de 0 a 2π , que equivale a un desplazamiento en LOS igual a la mitad de la longitud de onda de la banda del sensor SAR ($\lambda/2$). El proceso de desenrollado convierte estas diferencias de fase cíclicas en diferencias de fase absolutas, permitiendo una representación continua de desplazamientos más fácil de interpretar.

Distorsión geométrica

Las distorsiones geométricas son deformaciones en la apariencia espacial de las imágenes SAR que se producen cuando los sensores SAR capturan imágenes de zonas con contrastes importantes en la elevación o topografía del terreno. Estas distorsiones son el *foreshortening*, *layover* y *shadow* (ver Figura 12 del manual).

Dispersión

La dispersión es un término general que se refiere al fenómeno en el que una señal o radiación electromagnética se propaga en diferentes direcciones cuando interactúa con un objeto o medio. En el contexto de la teledetección, la dispersión puede ocurrir cuando la señal emitida por un sensor se dispersa debido a la interacción con la superficie terrestre, la atmósfera u otros elementos presentes en el camino de la señal. La dispersión puede dar lugar a cambios en la dirección y la amplitud de la señal. La **retrodispersión** es un tipo de dispersión.

Doppler, efecto

Cambio en la frecuencia observada de una onda electromagnética causado por el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. Este efecto se utiliza para simular una antena sintética más larga y mejorar la resolución en **acimut**.

Cuando una fuente de radar emite una señal electromagnética hacia un objetivo en movimiento, la frecuencia de la señal reflejada por el objetivo se modifica debido al efecto Doppler. Si el objetivo se aleja de la fuente, la frecuencia de la señal reflejada disminuye, y si el objetivo se acerca, la frecuencia aumenta. Esta alteración en la frecuencia se utiliza para calcular la velocidad relativa entre el radar y el objetivo.

Para más detalles sobre el efecto Doppler en el contexto del SAR consultar el capítulo 10 de Woodouse (2005).

Enfoque de imagen SAR

En una imagen SAR en bruto o **RAW** el “eco” o la energía que rebota en un objetivo puntual situado en la superficie terrestre (como un edificio) se dispersa en rango y en acimut. El enfoque de una imagen **RAW** es el proceso por el cual se recolecta esta energía dispersa en un solo píxel, para formar imágenes coherentes y enfocadas.

Espectro electromagnético

La radiación o energía electromagnética se propaga en forma de ondas a través del espacio a diferentes **longitudes de onda**. El espectro electromagnético abarca todas las regiones de la radiación electromagnética, desde las ondas de radio de baja **frecuencia** hasta los rayos gamma de alta energía. Cada una de estas regiones del espectro tiene propiedades y aplicaciones específicas en la física, la tecnología y la observación de la Tierra y del universo.

El ojo humano solo puede percibir una pequeña porción de este espectro, conocida como luz visible. Los sensores SAR trabajan en la región de las microondas, donde las longitudes de onda son del orden de centímetros y se organizan y agrupan en categorías o rangos específicos, a los que se les denomina "bandas". Las bandas más comúnmente utilizadas por los satélites SAR son (Lusch, 1999):

- Banda X: longitudes de onda entre 2.5 y 3.75 cm (equivalente a frecuencias entre 8 - 12 GHz).
- Banda C: longitudes de onda entre 3.75 y 7.5 cm (equivalente a frecuencias entre 4 - 8 GHz).
- Banda L: longitudes de onda entre 15 y 30 cm (equivalente a frecuencias entre 1 - 2 GHz).

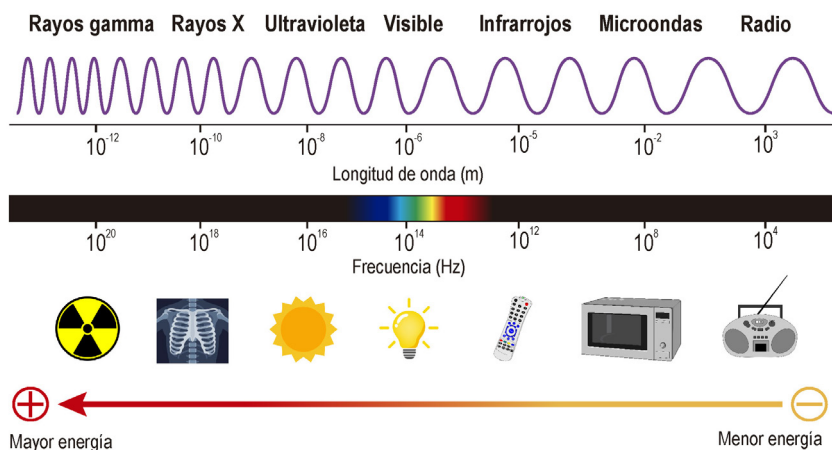


Figura A1.7:
Espectro
electromagnético.

Fase

La fase (ϕ) de una onda armónica se refiere a la posición relativa de la onda en su ciclo en un momento dado. La fase se mide en grados o radianes y representa cuánto ha avanzado o retrasado la onda desde su punto de inicio. En su forma más simple, una onda armónica con amplitud (A) y **frecuencia** (f) constantes puede expresarse en términos de un desplazamiento, $y(t)$, utilizando la notación trigonométrica (Figura A1.8):

$$y(t) = A \sen(2\pi ft + \phi_0)$$

Donde A es la amplitud, f la **frecuencia**, t el tiempo y ϕ_0 es la fase inicial (en el instante $t=0$). El término $2\pi f$ es equivalente a la frecuencia angular (ω). La fase es, por lo tanto, ambigua con respecto a los múltiplos enteros de 2π .

En el contexto de las imágenes SAR, la componente de fase es la medida de la última fracción de la onda tras su viaje de ida y vuelta (sensor-terreno-sensor). Cuando la onda se emite en la antena radar, la fase está en su punto de inicio (ϕ_0 en $t=0$), pero cuando se registra de vuelta en la antena tras interactuar con el terreno, el ángulo de fase del movimiento estará en otro punto del ciclo.

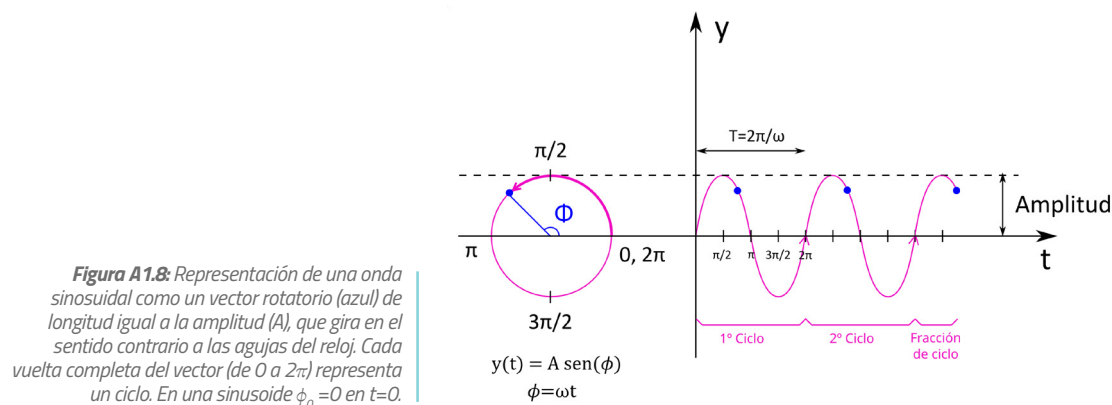


Figura A1.8: Representación de una onda sinusoidal como un vector rotatorio (azul) de longitud igual a la amplitud (A), que gira en el sentido contrario a las agujas del reloj. Cada vuelta completa del vector (de 0 a 2π) representa un ciclo. En una sinusoide $\phi_0 = 0$ en $t = 0$.

Para más detalles sobre la notación trigonométrica de las ondas armónicas consultar las secciones A.2.1 del libro de Kramer (1996) y 3.1 del libro de Woodhouse (2005).

Frecuencia

La frecuencia de una onda se refiere al número de crestas que atraviesan un punto en un segundo. Un ciclo por segundo se denomina Hertz (Hz); si dos ciclos pasan por un punto en un segundo, la frecuencia es de 2 Hz. La frecuencia y la **longitud de onda** están inversamente relacionadas por la relación

$$c = f\lambda$$

Donde:

- c es la velocidad de la luz en el medio.
- f es la frecuencia de la onda.
- λ es la longitud de onda de la onda.

Geocodificación

La geocodificación es un tipo de georreferenciación mediante la cual cada pixel de la imagen SAR se proyecta sobre una malla geográfica estandarizada (por ejemplo, proyección UTM). Las imágenes SAR están referidas al rango oblicuo y mediante la geocodificación los píxeles se proyectan en el terreno de manera que cada uno de ellos represente una distancia específica sobre el terreno. Las imágenes SAR geocodificadas se pueden introducir en un GIS y superponer a otras capas geocodificadas.

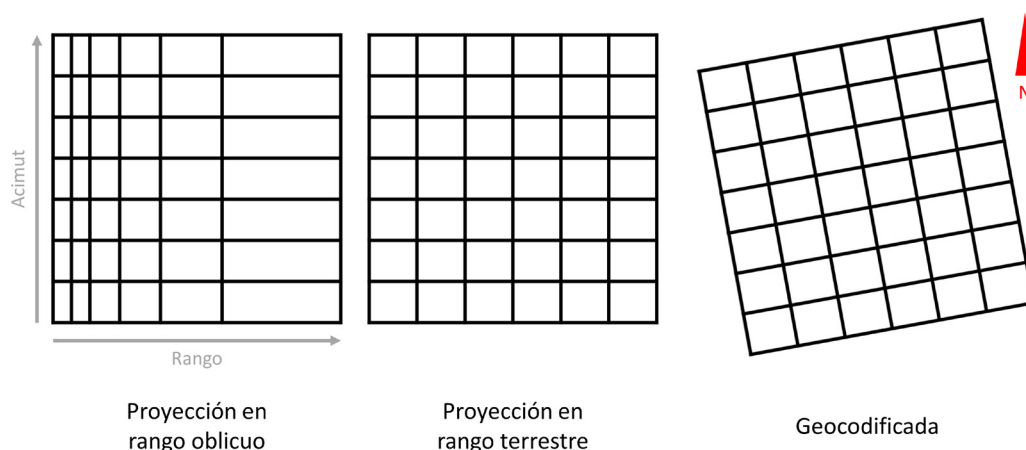


Figura A1.9:
Proceso conceptual
de geocodificación
de una imagen SAR.

Georreferenciación

Una imagen o un mapa georreferenciado contiene información sobre las coordenadas terrestres a escala real (latitud y longitud). En el contexto de las imágenes SAR, se emplea información de las órbitas precisas y de la altitud del satélite para conocer la localización geográfica de los datos adquiridos.

GNSS

GNSS son las siglas de *Global Navigation Satellite System* (Sistema Global de Navegación por Satélite), y es el término genérico para los sistemas de navegación por satélite que proporcionan posicionamiento geoespacial autónomo con cobertura mundial. La constelación de satélites GNSS emiten señales desde el espacio y transmiten datos de posicionamiento y tiempo a los receptores en tierra. Los receptores GNSS utilizan estos datos para determinar su ubicación precisa en coordenadas geográficas y altitud.

Algunos ejemplos de GNSS son el Galileo europeo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) NAVSTAR estadounidense, el *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) ruso y el Sistema de Navegación por Satélite BeiDou chino.

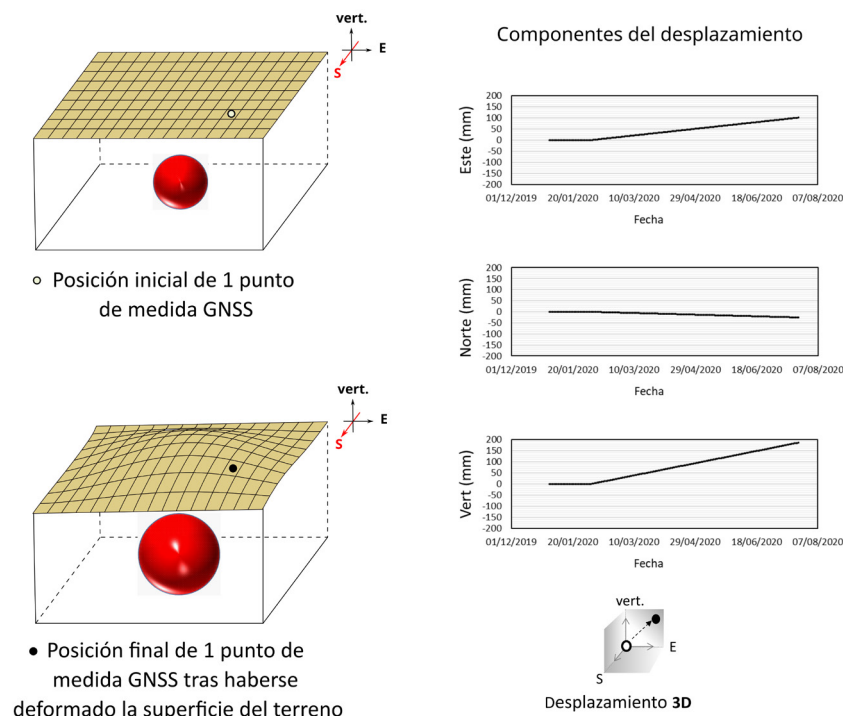


Figura A1.10: Los sistemas GNSS proveen la ubicación precisa de un punto medida (receptor) en tres dimensiones: coordenadas geográficas y altitud.

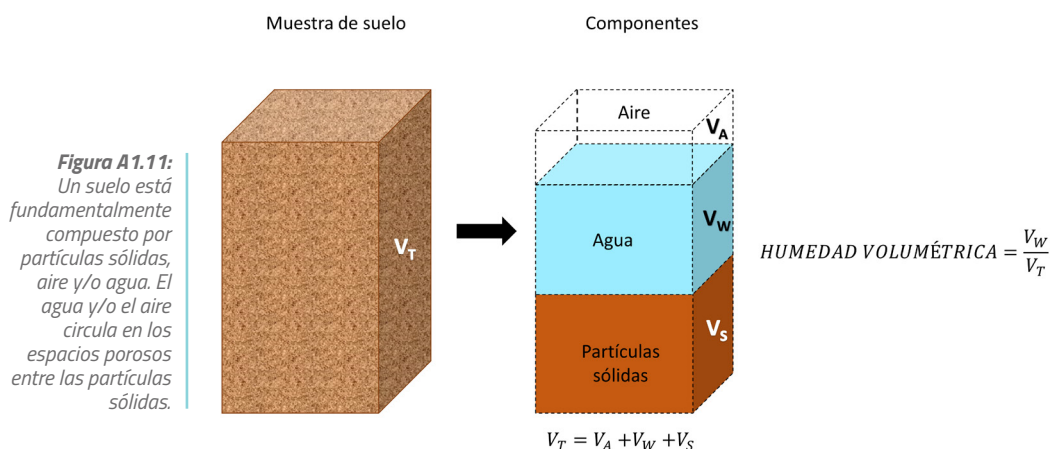
Huella del haz

El haz de energía electromagnética, emitido en un **pulso** particular por la antena de un radar en una dirección específica, se puede visualizar como un cono. La huella del haz es la intersección de ese cono con el suelo. A medida que el satélite avanza a lo largo de la dirección de vuelo o de acimut, emitiendo y recibiendo las secuencias de **pulsos**, va iluminando una franja denominada **swath** (ver Figura 3 del manual).

Para más detalles consultar el capítulo 4 de Cumming and Wong (2005) y la app de visualización introzradar (<https://www.geos.ed.ac.uk/~ihw/hype/radar/introzradar.html>).

Humedad volumétrica

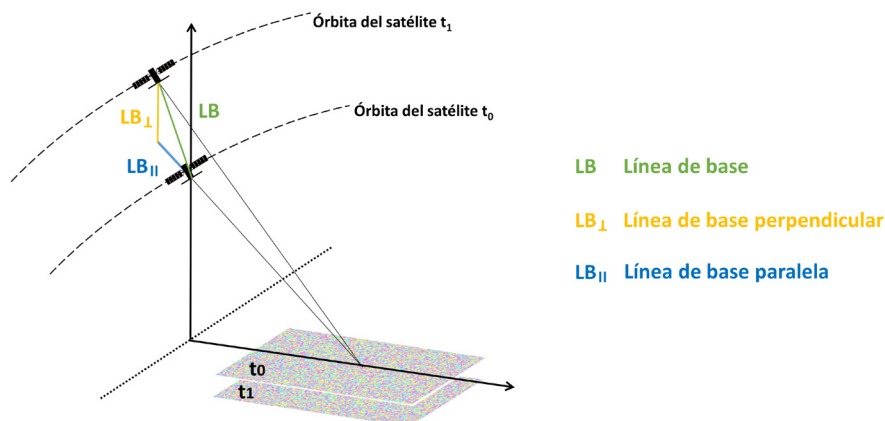
La humedad volumétrica define la relación entre el volumen de agua y el volumen total del suelo.



Línea de base espacial

Es la distancia física entre los dos puntos de vista del satélite desde los cuales se adquieren las imágenes SAR utilizadas como un par InSAR. Los satélites no orbitan exactamente por la misma línea imaginaria en cada vuelta alrededor de la Tierra, sino que su posición varía ligeramente. Por este motivo, imágenes SAR tomadas desde el mismo **track** sobre la misma zona en momentos diferentes pueden haber sido adquiridas desde posiciones ligeramente distintas. Si esta distancia es muy grande, no se podrán generar interferogramas (consultar apartado 2.4 y Figura 17 del manual) válidos para estudiar los desplazamientos del terreno. Por eso, la posición del satélite a lo largo de la órbita debe ser precisa y conocida. En los satélites Sentinel-1 se garantiza que la línea de base espacial nunca supere un umbral ± 100 m. Sin embargo, otros satélites históricos como el ERS y Envisat, carecían de un control tan estricto y las líneas de base podían superar los varios cientos de metros.

Figura A1.12:
Línea de base entre
dos pasadas de
satélite sobre la
misma zona.



Línea de base temporal

El tiempo en días que separa las dos adquisiciones SAR utilizadas para realizar un interferograma (consultar apartado 2.4 y Figura 17 del manual).

Longitud de onda

La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas (o dos valles consecutivos) de una onda (ver Figura A1.7). La **frecuencia** y la longitud de onda están inversamente relacionadas; a una mayor frecuencia le corresponde una longitud de onda más corta, y a una menor frecuencia le corresponde una longitud de onda más larga.

LOS

La línea de vista del satélite o Line Of Sight (LOS) es la dirección en la que apunta la antena del sensor SAR al transmitir una señal radar y recibir el eco de retorno.

Modo de adquisición

Un radar de apertura sintética (SAR) puede operar con varios modos, adquiriendo los datos de diferentes formas. Algunos de los diferentes modos de operación incluyen:

- **Stripmap SAR:** En este modo, la dirección a la que apunta la antena se mantiene constante mientras la plataforma del radar se mueve. El haz barre el suelo a una velocidad aproximadamente uniforme, y se forma una imagen continua.
- **ScanSAR:** Este modo es una variación del *Stripmap*. La antena escanea en la dirección del rango varias veces desde una misma posición del vuelo. De esta manera, se obtiene una franja más ancha.
- **Spotlight SAR:** Este modo mejora la resolución espacial concentrando la energía del radar en un área específica de interés en el suelo. Esto se logra dirigiendo gradualmente el haz de radar hacia delante y hacia atrás para iluminar la misma área mientras el satélite radar se desplaza. Sin embargo, a medida que la antena se vuelve a dirigir hacia adelante, se omite una parte del terreno, lo que resulta en una cobertura no continua.

Para más detalles sobre los distintos modos de adquisición de cada satélite SAR consultar sus guías de usuario disponibles online (Tabla 4 del manual).

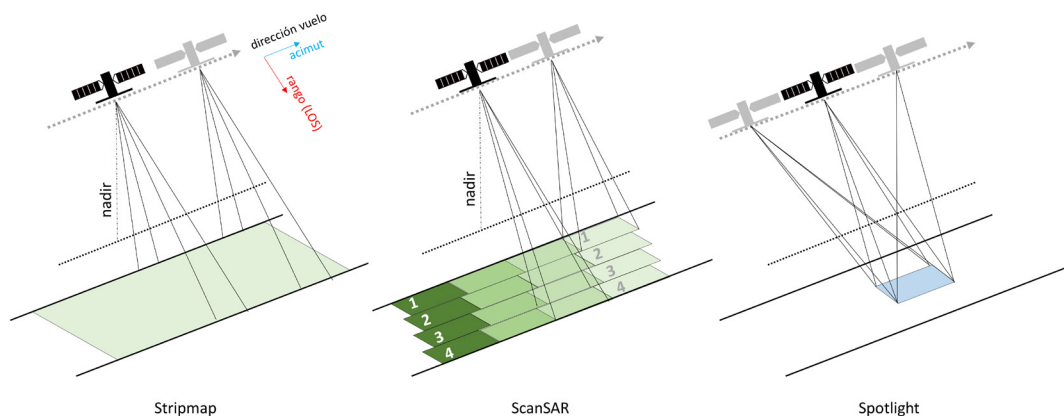


Figura A1.13:
Modos de adquisición SAR más comunes.

Nadir

En el contexto de la teledetección, se refiere al punto situado directamente debajo del satélite/aeronave. Para ser más precisos, puede definirse como la dirección vertical local que apunta hacia la fuerza de la gravedad en un lugar concreto. La dirección opuesta al nadir es el cenit.

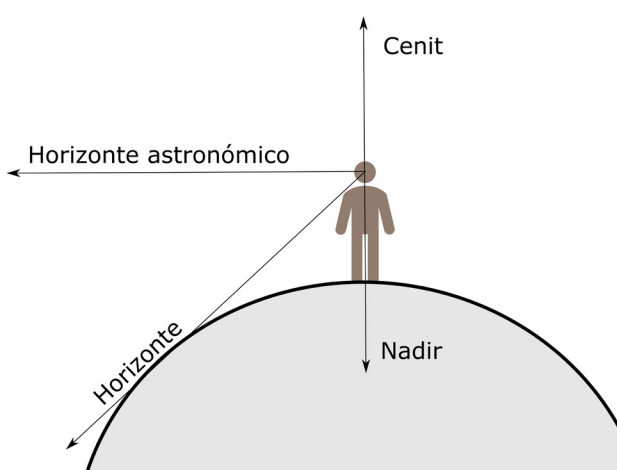


Figura A1.14:
Representación del nadir.

Número complejo

Los números complejos son una herramienta matemática que sirve para representar la función de una onda. Cualquier número complejo puede representarse como la suma de una parte real (Re) y una parte imaginaria (Im) mediante la siguiente expresión:

$$z = Re + iIm$$

Esta forma de representación es la empleada para almacenar la información de amplitud y fase de la señal en las imágenes SAR. La señal retrodispersada recibida en la antena radar contiene información de fase y de amplitud, que se convierte y almacena como un número complejo. Por tanto, cada píxel de la imagen SAR tiene asociado un número complejo formado por dos bandas de datos que se pueden visualizar por separado, una banda correspondiente a la componente real (I) y otra correspondiente a la componente imaginaria (Q). Si representamos el número complejo como un vector en coordenadas polares, podemos obtener los valores de la amplitud (calculando el módulo del vector) y de la fase (calculando su argumento) en cada píxel de la imagen SAR (Figura A1.15).

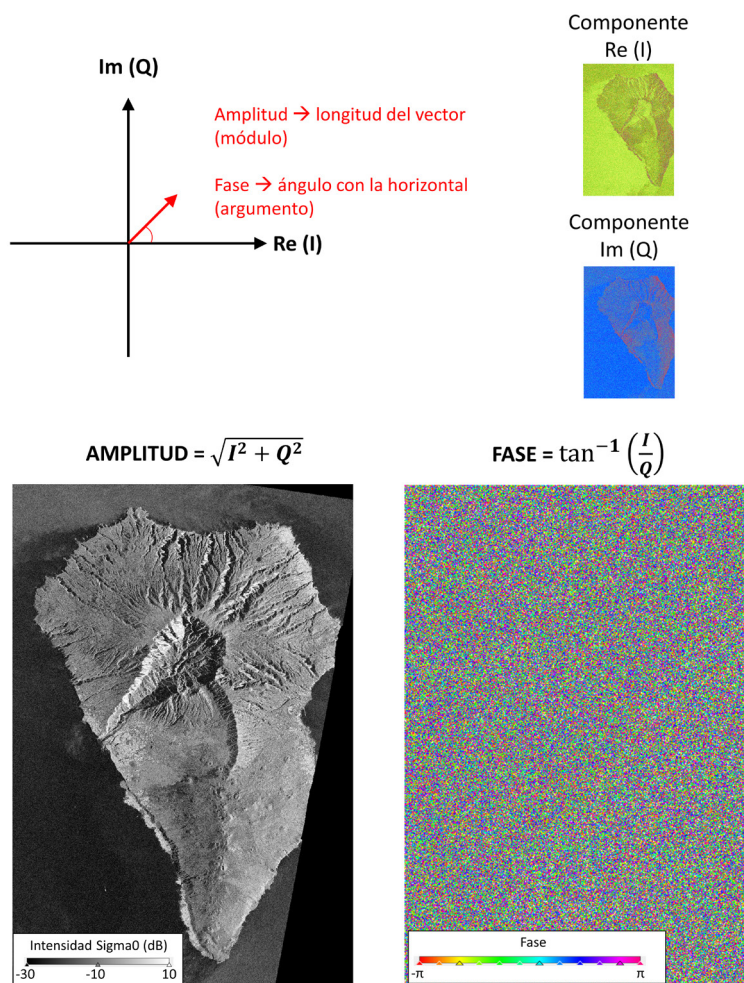


Figura A1.15: Representación del número complejo (vector rojo) en coordenadas polares. La imagen SAR contiene dos bandas de datos que se pueden visualizar por separado (I, Q). Operando con estas componentes podemos extraer la información de amplitud y de fase de cada pixel de la imagen SAR. La imagen de amplitud que se muestra está calibrada con coeficiente Sigma0, geodificada, ortorrectificada y con reducción de speckle. Esta imagen SAR fue adquirida por el satélite PAZ en su órbita descendente de la isla de La Palma (Islas Canarias, España). Imagen del satélite PAZ © Hisdesat Servicios Estratégicos S.A. 2021.

Para más detalles sobre la representación de ondas mediante números complejos en el contexto del SAR consultar la sección 3.1 del libro Woodouse (2005), las páginas 385-387 del ASAR Product Handbook (ESA, 2004) y la sección 2.6 del libro de Hanssen (2001).

Ortorrectificación

Proceso por el cual se corrigen las **distorsiones geométricas** (topográficas) de una imagen mediante el empleo de un modelo digital del terreno.

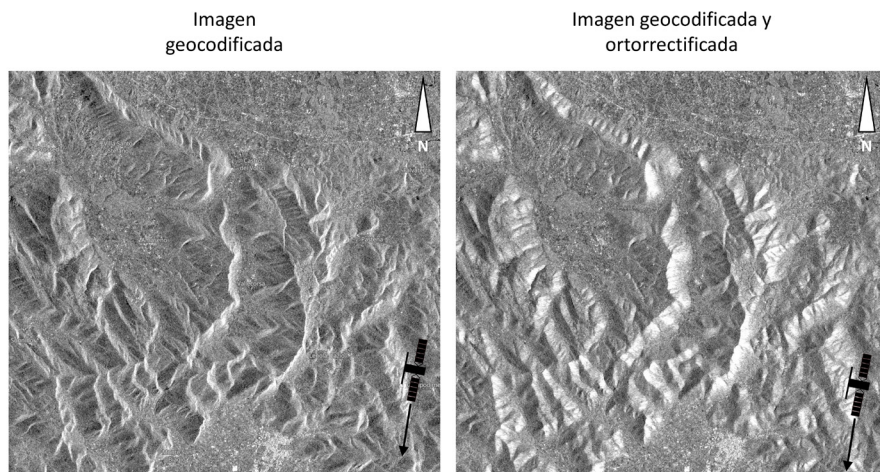


Figura A1.16: La imagen SAR (Sentinel-1 órbita descendente) geocodificada muestra la topografía sin corregir. Se pueden apreciar claramente los efectos de foreshortening en las pendientes orientadas hacia el sensor (en esta ejemplo las orientadas hacia el este geográfico) que aparecen "comprimadas" e inclinadas. En la imagen ortorrectificada las montañas aparecen simétricas.

Pixel

El pixel es la unidad más pequeña que compone una imagen y que representa un área determinada de la misma. Su forma es normalmente cuadrada o rectangular. Otro término más general que puede emplearse como sinónimo es celda. El tamaño de pixel no debe confundirse con la **resolución espacial**.

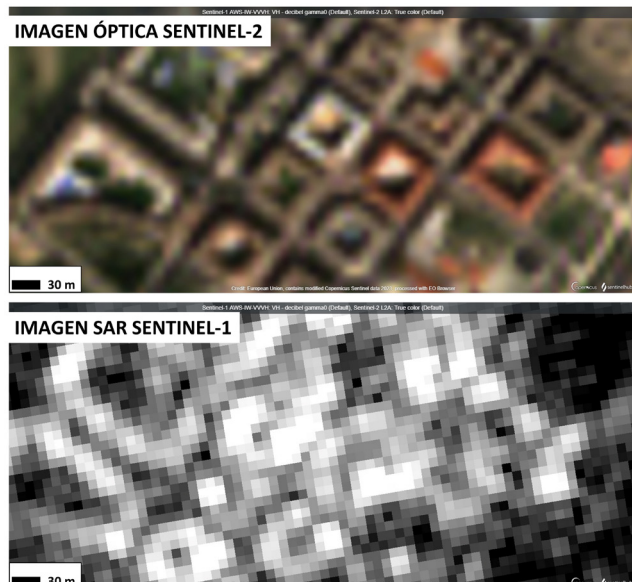


Figura A1.17: El tamaño del pixel de la imagen SAR del satélite Sentinel-1 (de tipo Nivel-1 Ground Range Detected, GRD) es de 10x10 m. Sin embargo, la **resolución espacial** en el rango terrestre es de 20x22 m.

Polarización de la señal

La polarización se refiere a la dirección de propagación de una onda electromagnética. Una onda vertical oscila en un plano perpendicular a la superficie que se está observando, mientras que una onda horizontal se transmite de manera que oscila en un plano paralelo a la superficie que se está observando.

La mayoría de los sistemas SAR modernos pueden transmitir señales con polarización tanto horizontal como vertical, y además, pueden filtrar la señal recibida tanto en componente horizontal como el vertical. Esto da lugar a 4 tipos diferentes de configuraciones: HH, HV, VV y VH, donde la primera letra indica el método de transmisión y la segunda el método de recepción.

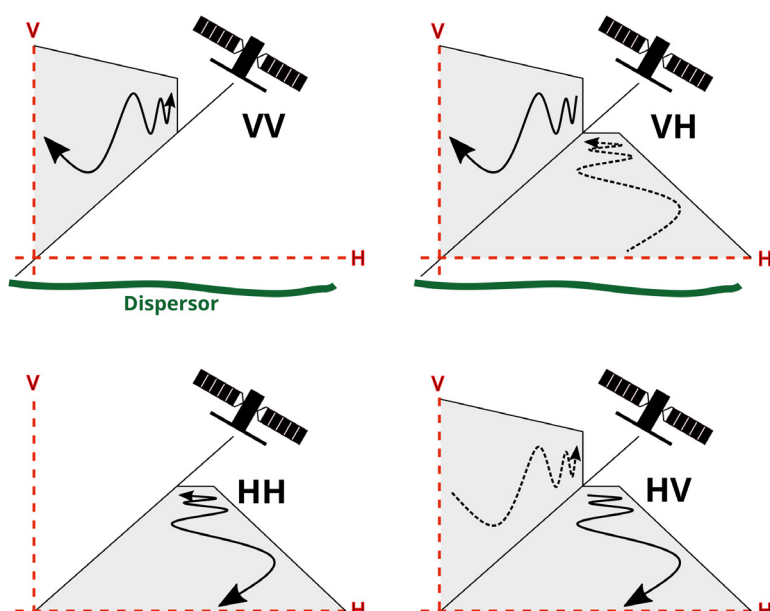
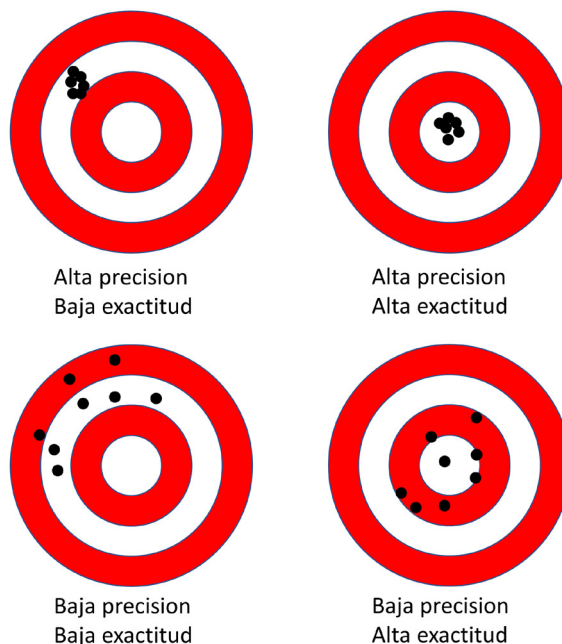


Figura A1.18: Polarización de una señal.

Precisión

La precisión y la exactitud son dos medidas del error de observación. La exactitud es la aproximación de un conjunto determinado de mediciones (observaciones o lecturas) a su valor real, mientras que la precisión es la aproximación de las mediciones entre sí. En otras palabras, la precisión es una descripción de los errores aleatorios, una medida de la variabilidad estadística.

Figura A1.19: Precisión y exactitud. Las mediciones precisas están muy agrupadas dentro de la diana. Las mediciones exactas se acercan al valor real (centro de la diana).



Pulso

Un pulso de microondas consiste en ráfagas de ondas de microondas que se envían y reciben en intervalos muy cortos. Es decir, un conjunto de ondas que están concentradas en un breve lapso temporal. No se debe confundir la longitud del pulso L (la distancia que recorre el pulso en el tiempo durante el cual la antena emite su ráfaga de energía) con la longitud de onda de la señal microondas λ .

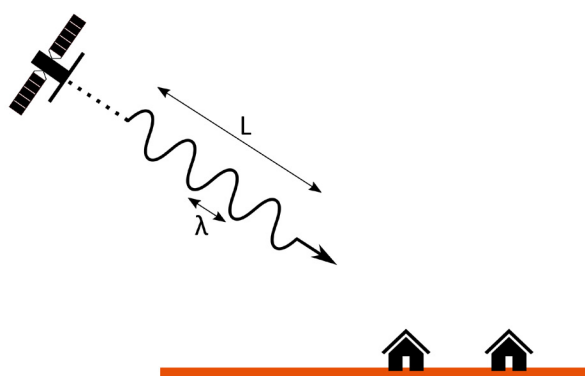


Figura A1.20: Distancia recorrida por un pulso de microondas

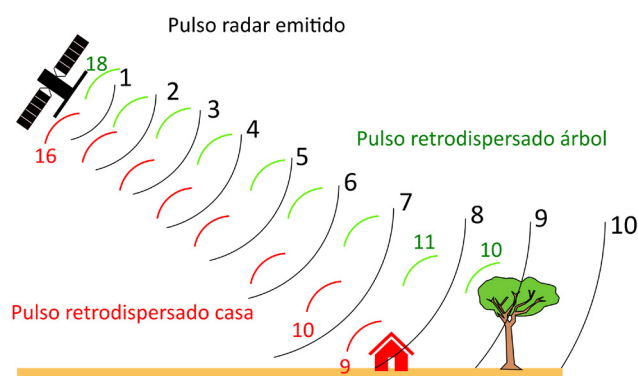


Figura A1.21: Propagación de un pulso de microondas indicando los frentes de onda en intervalos de tiempo de 1 a 18.

En la práctica de la adquisición de imágenes SAR, se emplean técnicas de compresión de la duración del **pulso** o pulso **chirp** con el objetivo de preservar la energía transmitida y mejorar la resolución en **rango**.

Para más detalles de este procedimiento consultar el capítulo 3 de Cumming and Wong (2005).

Rango

Es la dimensión de una imagen en la dirección perpendicular a la línea de vuelo del satélite (**acimut**). El rango oblicuo (*slant range*) es la distancia que hay desde la antena radar hasta cada objeto del terreno (R). Esta distancia se calcula midiendo el tiempo de ida y de regreso (t/2) del pulso microondas transmitido por la velocidad de la luz (c).

$$R = \frac{1}{2}ct$$

Si la señal emitida choca contra dos objetos y se registran dos ecos separados entre sí, el sensor puede calcular la distancia entre ellos en la dirección del rango (D_{rango}). El rango terrestre (*ground range*) es la misma distancia, proyectada mediante una transformación geométrica sobre una superficie de referencia ($D_{\text{terrestre}}$).

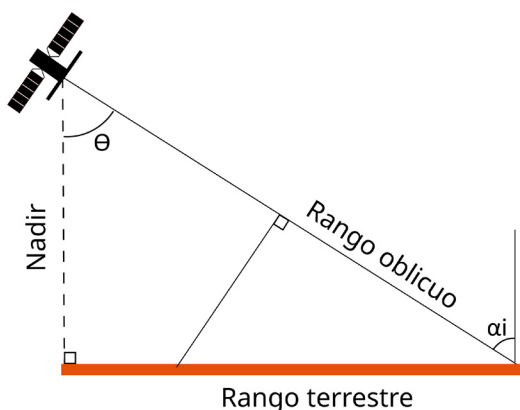


Figura A1.22: Geometría del rango oblicuo y terrestre.

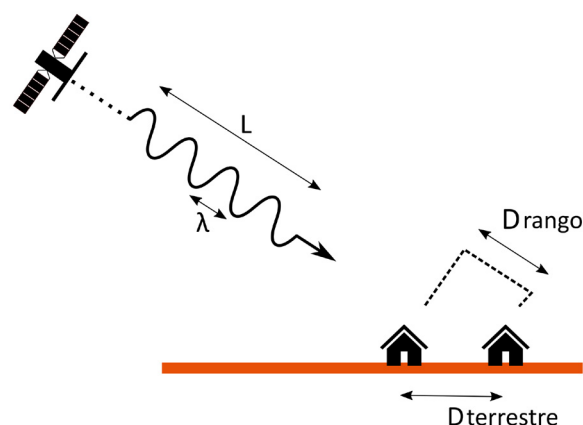


Figura A1.23: Distancia entre objetos en el rango oblicuo y el rango terrestre.

RAR

El radar de apertura real (Real Aperture Radar, RAR) a menudo se denomina radar aéreo de observación lateral (*Side Looking Aperture Radar*, SLAR). Tanto los sensores RAR como los **SAR** son sistemas de observación lateral con una dirección de iluminación perpendicular a la línea de vuelo de la plataforma que los transporta. La diferencia radica en la resolución en la dirección de **acimut**, que es menor en los sistemas RAR. La resolución en acimut de los sistemas RAR está determinada por el ancho del haz de la antena.

RAW

Una imagen RAW es una imagen SAR en bruto, comprimida y sin enfocar. Este tipo de imágenes se las clasifica como de Nivel-0. Las imágenes RAW se pueden transformar en otros productos útiles (imágenes SAR Nivel-1) mediante la aplicación de algoritmos de procesamiento.

Para más detalles sobre los distintos niveles de las imágenes SAR adquiridas por el satélite Sentinel-1 visitar <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels>.

Resolución espacial

La resolución espacial del sensor SAR se refiere a la capacidad del sensor para distinguir y capturar detalles de objetos cercanos entre sí en la superficie del terreno. Una resolución espacial fina o alta (mejor) significa que el sensor puede discernir detalles más pequeños en la imagen, mientras que una resolución espacial gruesa o baja (peor) puede limitar la capacidad de distinguir objetos pequeños o características detalladas en la imagen capturada. No debe confundirse con el tamaño de píxel, que representa el área sobre la superficie del terreno que cubre cada píxel. Si, por ejemplo, el tamaño de píxel de una imagen SAR es de 2x14 m y su resolución espacial es de 5x20 m, significa que cada píxel representa una porción del terreno de unos 28 m², pero sólo podrá discernir objetos que tengan un tamaño superior a los 100 m². También puede darse el caso de que la resolución espacial y el tamaño de píxel coincidan.

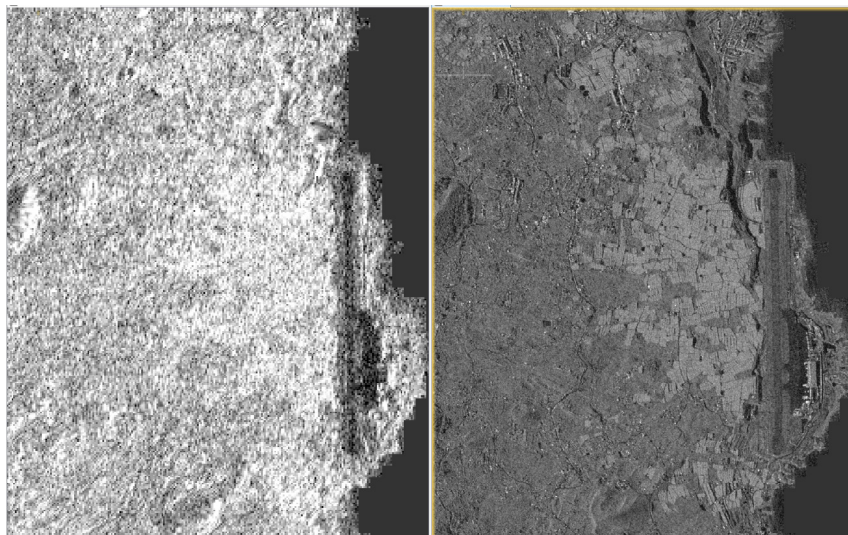


Figura A1.24: La figura muestra dos imágenes de amplitud SAR del aeropuerto de La Palma (Islas Canarias, España) con distintas resoluciones. La de la izquierda fue adquirida por el satélite Sentinel-1 (banda C) y tiene una resolución media de 5x20 m (rango x acimut), mientras que la de la derecha fue adquirida por el satélite PAZ y tiene una resolución alta de 3x3 m (rango x acimut). En la imagen de media resolución se distingue la silueta de la pista de aterrizaje y el edificio del aeropuerto, mientras que en la de alta resolución el detalle de los elementos aumenta drásticamente. Imagen del satélite PAZ © Hisdesat Servicios Estratégicos S.A. 2021.

Resolución en acimut

La **resolución espacial** en la dirección de **acimut** (dirección de vuelo del satélite) está estrechamente relacionada con las dimensiones de la antena radar. En un sistema RAR la resolución en acimut (δ_a) es equivalente al ancho de la huella del haz sobre el terreno (X_a) (ver Figura 3 del manual):

$$\delta_a = \frac{\lambda}{L_a} R$$

Donde λ es la longitud de onda de la señal emitida, R la distancia sensor-objeto y L_a la longitud de la antena.

En un sistema SAR la resolución en acimut se incrementa (es decir, es capaz de discernir objetos más pequeños) mediante la sintetización de una antena más grande utilizando el efecto Doppler y el movimiento del satélite con respecto al terreno. A medida que el satélite se desplaza a lo largo de su trayectoria, la antena emite pulsos de radar y recibe las señales reflejadas por el objeto P desde el momento t_1 hasta el momento t_3 (ver Figura 4 del manual). En el momento t_1 , el eco del objeto P llegará con frecuencias más altas a la antena, mientras que en el momento t_3 el eco del objeto P llegará con frecuencias más bajas. En el momento t_2 (el objeto P está centrado en la visión de la antena) el eco retornará sin variaciones de frecuencia. Todos estos ecos se registran y se discriminan mediante la detección de las variaciones de la frecuencia Doppler, logrando un ancho de haz efectivo (X_a) muy estrecho, sin necesidad de que la longitud antena (L_a) sea muy larga ni que la longitud de onda (λ) sea muy corta. De esta forma la resolución teórica en acimut de un sistema SAR (δ'_a) es:

$$\delta'_a = \frac{L_a}{2}$$

Resolución en rango

La **resolución espacial** en la dirección de rango (la dirección hacia la que se orienta la antena del satélite) está estrechamente relacionada con la duración del **pulso** electromagnético (τ) o la longitud que recorre el pulso en el tiempo durante el cual la antena emite su ráfaga de energía (L). Si el pulso choca contra dos objetos y se registran dos ecos separados entre sí, el sensor puede calcular la distancia entre ellos en la dirección del rango (D_{rango}). "Como la onda recorre el viaje de ida y vuelta a la velocidad de la luz (c), la resolución en la dirección del **rango** oblicuo (δ_r) es aproximadamente:

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} = \frac{L}{2}$$

En el contexto de observación de la Tierra, estamos especialmente interesados en la resolución proyectada en el terreno, es decir, la capacidad para distinguir objetos que se encuentran en la superficie terrestre real. La resolución proyectada en el terreno se determina a través del **ángulo local de incidencia**. Aplicando trigonometría de manera sencilla, podemos obtener la resolución proyectada en el terreno, o rango terrestre (δ_t), de la siguiente manera:

$$\delta_t = \frac{\delta_r}{\text{seno}(\alpha_{i_local})}$$

Obsérvese que la ecuación implica que la resolución del rango terrestre no es uniforme y depende de dos factores: la distancia al nadir en terrenos planos, y la orientación y pendiente de las laderas en terrenos con topografía. Si consideramos un terreno plano, el **ángulo de incidencia** (α_i) va aumentando desde el rango cercano al rango lejano (ver Figura 3 del manual) y por tanto el valor de δ_t será más pequeño en el rango lejano. Esto implica que en el rango lejano la resolución será más fina (se podrán discernir objetos más pequeños) que en el rango cercano. Por tanto, la resolución proyectada en el terreno (δ_t) mejora progresivamente a medida que nos alejamos del **nadir**. Por otro lado, si el terreno no es plano, el **ángulo de incidencia** local dependerá de la inclinación y orientación de las pendientes topográficas. En las pendientes orientadas hacia el radar la resolución del rango terrestre será más gruesa, mientras que en las pendientes alejadas del radar la resolución del rango terrestre será más fina.

En la práctica de la adquisición de imágenes SAR, es importante contar con la mayor cantidad de energía posible en cada pulso para mejorar la relación señal/ruido. Esto se puede lograr aumentando la potencia de pico transmitida o utilizando un pulso más largo. Sin embargo, la potencia de pico suele estar muy limitada por las fuentes de energía disponibles, especialmente en el caso de los sensores espaciales. Por otro lado, una mayor longitud de pulso (L) conlleva una peor resolución (δ_r). Este dilema suele resolverse mediante el uso de pulsos modulados o comprimidos, a través de los que se genera una longitud de pulso (L) efectiva más corta, mejorando la resolución sin comprometer la cantidad de energía en cada pulso. Para más detalles de este procedimiento consultar la sección 2.1 de Van Zyl and Kim (2011) y el capítulo 3 de Cumming and Wong (2005).

Retrodispersión

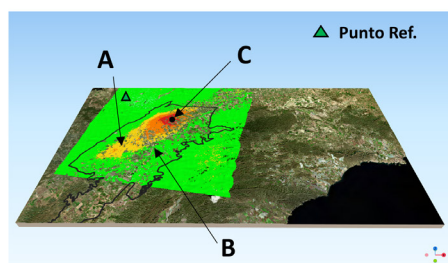
La retrodispersión se refiere específicamente a la **dispersión** de una señal de radar o microondas que es reflejada hacia atrás en la dirección del radar o sensor que la emitió. En otras palabras, la retrodispersión es la parte de la señal que regresa al sensor después de interactuar con un objetivo o superficie. Es un aspecto importante en la teledetección radar, ya que proporciona información sobre las propiedades de la superficie o los objetos iluminados por el haz de pulsos microondas emitidos por el sensor.

Serie temporal

Una serie temporal consiste en una secuencia de puntos de datos organizados cronológicamente. En el contexto de InSAR, una serie temporal se refiere al seguimiento del desplazamiento de un punto de medida a lo largo del tiempo. Cada punto de la serie temporal InSAR tiene un valor de desplazamiento asociado para cada fecha de adquisición de las imágenes SAR, en relación con un punto de referencia espaciotemporal (los datos InSAR son relativos). La referencia espacial puede representarse mediante un punto de medida seleccionado en el conjunto de datos que se asume que permanece inmóvil.

La velocidad media de cada punto de medida se puede obtener fácilmente a partir de la serie temporal de desplazamiento. Estos datos de series temporales resultan útiles para identificar desviaciones de la velocidad media, como aceleraciones, y contribuyen a comprender las tendencias y la evolución del movimiento a lo largo del tiempo.

**Mapas de puntos de medida InSAR:
velocidad y desplazamiento**



**Series temporales de
desplazamiento para cada punto**

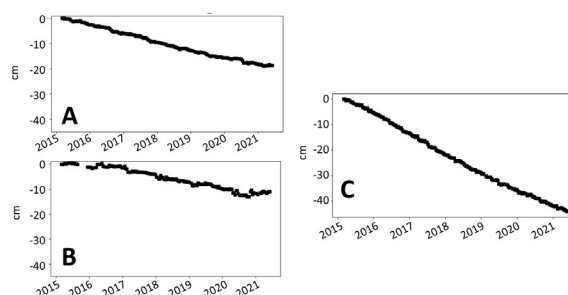


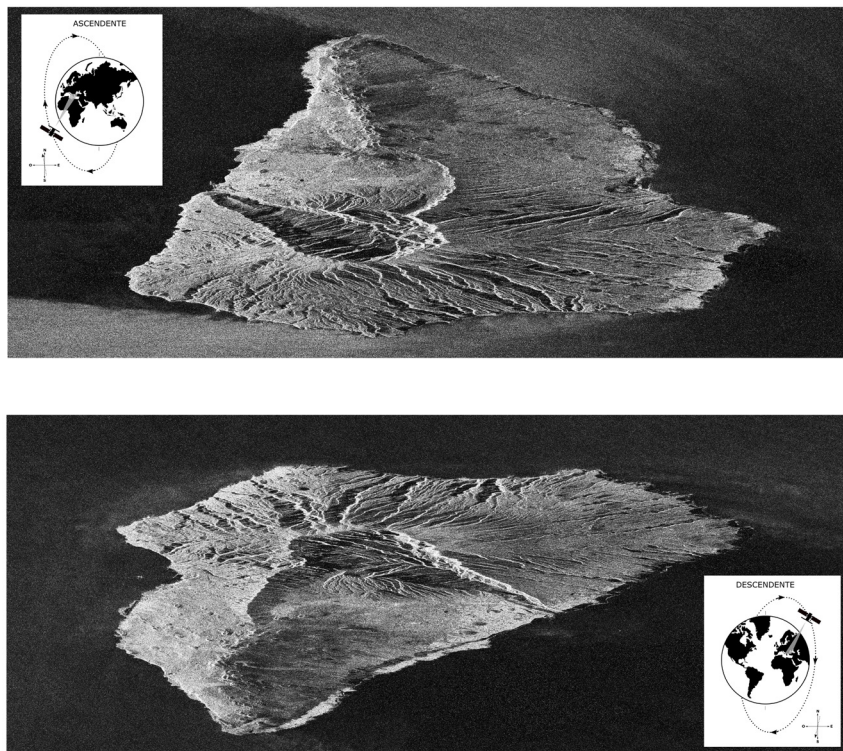
Figura A1.25: Mapa de puntos de medida InSAR en el que se muestra la velocidad media del periodo estudiado. En la parte de la derecha se muestran las series temporales de desplazamiento asociadas a tres puntos del mapa (A, B y C).

SLC

Las imágenes SAR *Single Look Complex* (**SLC**) tienen un cierto nivel de procesamiento con respecto a las imágenes **RAW**, por lo que se categorizan como Nivel-1. Es el formato comúnmente empleado para aplicaciones InSAR. El término *Single Look* hace referencia a que están enfocadas a máxima resolución. El término *Complex* hace referencia a que cada píxel de la imagen está representado por un **número complejo**, por lo que contiene información tanto de amplitud como de fase de la señal retrodispersada.

Las imágenes **SLC** están georreferenciadas utilizando datos de órbita y altitud del satélite. Sin embargo, las imágenes no están proyectadas en el **rango** terrestre, sino que están referidas al rango oblicuo. Por esta razón, si visualizamos una imagen **SLC** sin **geocodificar**, tendrá un aspecto distorsionado y volteado.

Figura A1.26: La imagen de la órbita ascendente está volteada en la dirección N-S porque el satélite viaja desde el sur hacia el norte, registrando primero la punta sur de isla de La Palma (España). La imagen de la órbita descendente está volteada en la dirección E-O porque el satélite está mirando la isla desde el este a medida que orbita de norte a sur; en su rango cercano se encuentra la costa este de la isla y en su rango lejano la costa oeste de la isla.



Speckle

Efecto por el cual las imágenes SAR tienen una textura ruidosa o de “sal y pimienta” (variaciones de nivel de grises), incluso para un mismo tipo de superficie. En cada celda de resolución de una imagen SAR hay un gran número de dispersores con una distribución aleatoria. La intensidad de la señal retrodispersada será la suma de las interacciones que la señal tenga con los diferentes objetos y superficies (ver Figura 8 del manual). El *speckle* se puede reducir empleando filtros que mejoran la calidad de la imagen, pero a costa de perder resolución.

Los filtros más comúnmente empleados y referencias se pueden consultar en la Tabla 2.1 de Flores-Anderson et al. (2019).

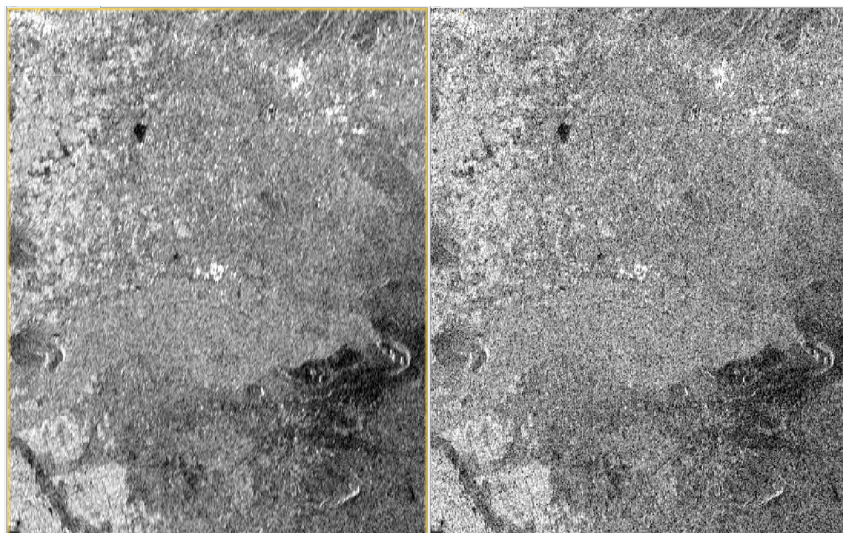


Figura A1.27: La imagen de la izquierda muestra una imagen SAR **calibrada** y **ortorrectificada** del satélite Sentinel-1 y la de la derecha la misma imagen con un filtro para reducir el **speckle**.

Swath

El *swath* es la anchura de una imagen SAR o, dicho de otro modo, la anchura de la franja iluminada por el haz emitido por el satélite, medida en la dirección del rango (ver Figura 3 del manual). El tamaño del *swath* varía dependiendo del satélite y de su **modo de adquisición**. Por ejemplo, el tamaño del *swath* del modo *Extra Wide Swath* del satélite Sentinel-1 es de 400 km, mientras que el del modo *Spotlight* del satélite COSMO-SkyMed es de 10km.

Para más información, consultar las guías de usuario de cada satélite disponibles online (Tabla 4 del manual).

Tipos de fallas

Existen varios tipos de fallas tectónicas, que se clasifican principalmente según la naturaleza del movimiento relativo entre los bloques de la corteza terrestre a lo largo de la falla. Las principales categorías de fallas se listan a continuación. Sin embargo, la complejidad geológico-estructural puede dar lugar a sistemas de fallas mucho más complicados que, al romper en superficie, generan patrones interferométricos intrincados y difíciles de interpretar.

- Fallas de deslizamiento inverso (*Reverse/Thrust Faults*): El bloque encima de la falla se desplaza hacia arriba respecto al bloque debajo del plano de falla debido a fuerza compresivas.
- Fallas de deslizamiento normal (*Normal Faults*): El bloque encima de la falla se desplaza hacia abajo respecto al bloque debajo del plano de falla debido a fuerzas extensivas.
- Fallas de desgarre (*Strike-Slip Faults*): Los bloques de la corteza se desplazan horizontalmente uno respecto al otro sin que haya un movimiento vertical significativo.
- Fallas de deslizamiento oblicuo (*Oblique-Slip Faults*): Combina componentes de deslizamiento lateral y deslizamiento normal o inverso.

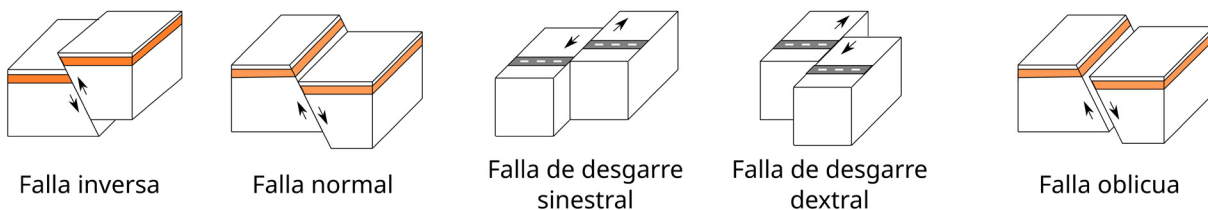


Figura A1.28: Tipos básicos de fallas según su movimiento relativo.

Anexo II. Recursos de aprendizaje online

Cursos

EO College

- Financiados por la ESA.
- Introducción al uso de datos SAR y sus aplicaciones.
- Gratis (necesita registro).
- Enlaces:
 - » Curso “Principios básicos de la Retrodispersión Radar” (en inglés y en castellano) <https://eo-college.org/courses/principios-basicos-de-la-retrodispersion-radar/>
 - » Curso “Echoes in space” (en inglés) <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>

Curso “Synthetic Aperture Radar: Hazards” (EdX learning platform)

- Curso avanzado y detallado sobre el uso de datos SAR y sus aplicaciones para el análisis de peligros naturales.
- Incluye contenidos formativos relacionados con la creación y ejecución de secuencias de comandos en Python.
- Acceso gratuito durante 1 mes.
- Opción de pago para el acceso ilimitado y la obtención de un certificado de realización del curso.
- Enlace: <https://learning.edx.org/course/course-v1:AlaskaX+SAR-401+3T2020/home>

ARSET

- Financiados por la NASA.
- Opción online.
- Posibilidad de acceder a las presentaciones y videos de cursos anteriores disponibles en YouTube.
- Opción de pago para la realización de cursos, talleres y formaciones a medida en formato presencial.
- Enlace: <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>

UNAVCO

- Comunidad de científicos, educadores y profesionales centrada en el estudio de procesos y peligros naturales mediante geodesia.
- Cursos anuales formato híbrido online-presencial.
- Posibilidad de acceder a todos los materiales de los cursos pasados (videos, presentaciones, scripts de Python, ejercicios...) disponibles en la web.
- Enlace: <https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/course-materials/insar/insar.html>

Alaska Satellite Facility (ASF)

- Biblioteca de recetas de datos.
- Proporciona guías para crear, paso a paso, una amplia variedad de productos utilizando datos SAR.
- Enlace: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-basics/data-recipe-tutorials-2/>

European Ground Motion Service (EGMS):

Artículos:

- Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Bateson, L., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., Mróz, M. (2021). *Deformation monitoring at european scale: the copernicus ground motion service*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2021, XLIII-B3-2021, 141–146 DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-141-2021
- M. Costantini et al., (2021). *European Ground Motion Service (EGMS)*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2021, pp. 3293-3296 DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553562
- Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D.A., Bateson, L., Guerrieri, L., Comerci, V., Andersen, H.S. (2020). *The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion Service*. Remote Sens., 12, 2043 DOI: 10.3390/rs12122043.

Documentación técnica:

Descarga de documentación en el desplegable “See product documentation here” de la web <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service> o por búsqueda exacta de términos en <https://land.copernicus.eu/en/technical-library>:

- *Algorithm theoretical basis document – European Ground Motion Service* (Ferretti et al., 2023)
- *End user requirements – European Ground Motion Service* (Proietti and Cerri, 2021)
- *End user Interface manual – European Ground Motion Service* (Larsen et al., 2022)
- *GNSS calibration data – European Ground Motion Service* (Larsen et al., 2021)
- *Patch note - European Ground Motion Service 2021 data update* (Passera, 2023)
- *Product specifications – European Ground Motion Service* (Capes and Passera, 2023)
- *Product user manual – European Ground Motion Service* (Kotzerke et al., 2022b)
- *Quality assurance and control report – European Ground Motion Service* (Kotzerke et al., 2022a)
- *Validation Report – European Ground Motion Service* (Calero et al., 2023)

Seminarios web y presentaciones en pdf:

- 5 seminarios (webinars) de acceso libre organizados por el equipo de Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) para presentar el EGMS y mostrar ejemplos de aplicación a diferentes temáticas. Enlace: <https://land.copernicus.eu/user-corner/events/european-ground-motion-service-webinar-series-2023>
- *Workshop: European Ground Motion Service with Copernicus* <https://www.copernicus.eu/en/events/events/online-european-ground-motion-service-copernicus>

Tutoriales, libros y webinars de teoría SAR, InSAR y aplicaciones:

- Crosetto, M., & Solari, L. (2023). *Satellite Interferometry Data Interpretation and Exploitation: Case Studies from the European Ground Motion Service (EGMS)*. Elsevier.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonet, D. (2007). *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation* (Vol. 19). https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., Cherrington, E. (2019). *The SAR handbook: comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation*. No. MSFC-E-DAA-TN67454 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002563/downloads/20190002563.pdf>
- González, P.J., (2019). Webinar en español “Interferometría radar por satélite: Una introducción” organizado por *The Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics* (COMET) <https://www.youtube.com/watch?v=goPA2YvpRqs>
- González, P.J. (2023) *Chapter 2.2. Radar interferometry*. In: Estelle Chaussard, Cathleen Jones, Jingyi Ann Chen, Andrea Donnellan. *Remote Sensing for Characterization of Geohazards and Natural Resources. Springer Remote Sensing/Photogrammetry book series* <https://www.springer.com/series/10182> (in press)
- GSI, *Geospatial Information Authority of Japan*. Web que contiene explicaciones sencillas e ilustradas sobre InSAR, preguntas frecuentes sobre la técnica e interferogramas ejemplo de diversos procesos de deformaciones del terreno (terremotos, volcanes y subsidencia) <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/index-e.html>
- Hannsén, R.F., (2001) *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 pp. ISBN: 0-7923-6945-9
- Instituto Geográfico Nacional , IGN (2018). “Fundamentos de teledetección radar” https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/5_Fundamentos_de_teledeteccion_radar.pdf
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K. P. (2013). *A tutorial on synthetic aperture radar*. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1), 6-43 <https://elib.dlr.de/82313/1/SAR-Tutorial-March-2013.pdf>
- Schubert, Adrian (2014). Vídeo divulgativo “*Synthetic Aperture Radar: Of Bats and Flying Pianos*” <https://www.youtube.com/watch?v=g-YICKbcC-A&t=617s>
- Tutorial del *Canada Centre for Mapping and Earth Observation* <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Woodhouse, I.H. (2006). *Introduction to Microwave Remote Sensing*, Boca Raton, FL, CRC Press, Taylor & Francis Group

Otros recursos en red:

- *EO Browser* es un visualizador de datos de numerosos satélites y colecciones, con funcionalidades para realizar análisis <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- *Earth Explorer* (EE) ofrece funciones de búsqueda en línea, visualización, exportación de metadatos y descarga de datos relacionados con las ciencias de la Tierra desde los archivos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Anexo III. Software para el procesamiento SAR

Existen varias soluciones para procesar imágenes SAR con el fin de obtener información del desplazamiento del terreno, ya sea software de procesamiento InSAR o software de análisis de series temporales InSAR. En todos los casos, existen tanto soluciones software comerciales como libres. Los programas de código abierto SAR suelen contar con amplias comunidades de usuarios que ofrecen recursos didácticos online (foros, tutoriales, etc.), lo que facilita la resolución de dudas y problemas técnicos. En contraste, las empresas proveedoras de software comerciales, que ofrecen soporte técnico oficial directo, suelen tener mayor estabilidad y, en algunos casos, ofrecen una mayor cantidad de funcionalidades y herramientas especializadas para usos específicos. La principal desventaja del software comercial es su elevado coste. Tanto los softwares comerciales como los libres requieren amplios conocimientos técnicos por parte del usuario, por lo que algunas empresas brindan servicios especializados que ofrecen resultados y productos finales InSAR para aplicaciones específicas. En este anexo se describen algunas de las opciones de código abierto más utilizadas en la comunidad de InSAR, así como la opción comercial en la nube para usuarios no expertos que ofrece la plataforma GEP.

A. Software libre para el procesamiento de datos SAR en una estación de trabajo local

En esta sección se listan algunos de los softwares de libre descarga más utilizados para obtener datos de desplazamientos del terreno a partir de imágenes SAR. Es conveniente destacar el gran tamaño de los datos SAR (una sola imagen Sentinel-1 comprimida ocupa aproximadamente 4Gb) y que el software de procesamiento de imágenes necesita una cantidad significativa de recursos del sistema para funcionar correctamente. Por ello es recomendable instalar el software en una estación de trabajo con suficiente memoria RAM, un procesador y tarjeta gráfica potentes y disponer de un almacenamiento rápido y amplio.

1. **Sentinel Application Platform (SNAP):** Conjunto de herramientas desarrolladas por la ESA para procesar diferentes tipos de datos satélite (no sólo datos SAR) adquiridos tanto por las misiones incluidas en el programa Copernicus de la UE, como por varios satélites operados por otras organizaciones (como TerraSAR-X, RADARSAT...). Disponible para sistemas operativos Windows y Unix/Linux. La interfaz es sencilla, existe mucha documentación y posee un amplio número de usuarios. Permite realizar análisis de la amplitud de los datos SAR (para otras aplicaciones diferentes al cálculo de los desplazamientos del terreno), así como la generación de interferogramas. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
2. **Generic Mapping Tools Synthetic Aperture Radar (GMTSAR):** Herramienta de procesamiento interferométrico añadida al software de análisis y visualización geoespacial Generic Mapping Tools (GMT). Disponible para sistemas operativos Unix/Linux. GMTSAR integra dos paquetes de procesamiento principales: (i) un paquete de procesamiento para enfocar y alinear las imágenes SAR, mapear la topografía a partir de la **fase**, realizar el **desenrollado de fase** y formar los interferogramas, y (ii) un paquete de post procesamiento para filtrar el interferograma y crear productos de coherencia, de gradiente de **fase** y de desplazamiento LOS. Está desarrollado por *ConocoPhillips, National Science Foundation Geoinformatics Program, Scripps Institution of Oceanography*, y *San Diego State University*. <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/>; <https://github.com/gmtsar/gmtsar>; <https://github.com/AlexeyPechnikov/gmtsar>
3. **InSAR Scientific Computing Environment (ISCE):** Cadena de procesamiento interferométrico empaquetado como módulos Python. Disponible para sistemas operativos Unix/Linux. Permite generar interferogramas y mapas de coherencia a partir de imágenes **RAW** o **SLC**. Permite llevar a cabo, entre otras operaciones, la **geocodificación** de los resultados, el **desenrollado de fase** y el filtrado de **fase**. Desarrollado por *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA y la *Stanford University*. <https://github.com/isce-framework/isce2>

4. **Delft object-oriented radar interferometric software (DORIS)**: Cadena de procesamiento interferométrico que permite generar interferogramas y mapas de coherencia a partir de imágenes SLC. Permite la geocodificación de los resultados, pero no permite realizar el desenrollado de fase. Disponible para sistemas operativos Windows y Unix/Linux. Desarrollado por *Delft Institute of Earth Observation and Space Systems of Delft University of Technology*. <http://doris.tudelft.nl/>
5. **Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping (SNAPHU)**: Paquete software en C que permite realizar el desenrollado de fase para obtener medidas de desplazamiento. Funciona en la mayoría de plataformas Unix/Linux. La aplicación del algoritmo SNAPHU puede llevarse a cabo desde otros programas de procesamiento SAR, tales como ISCE o SNAP. Desarrollado por *Stanford Radar Interferometry Research Group*. <http://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>
6. **Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)**: Paquete para el análisis de series temporales InSAR desarrollado en Matlab para Linux. Incluye los métodos PS, SBAS y una opción para combinar ambos. Es compatible con el software TRAIN (<https://github.com/dbekaert/TRAIN>), lo que permite incorporar varios métodos de corrección troposférica. Desarrollado por la *Stanford University*, la *University of Iceland*, la *Delft University of Technology* y la *University of Leeds*. <https://github.com/dbekaert/StaMPS>
7. **Miami INsar Time-series software in PYthon (MintPy)**: Paquete para el análisis de series temporales InSAR. Permite introducir el *stack* de interferogramas (corregistrados y desenrollados) en formato ISCE, ARIA, FRInGE, HyP3, GMTSAR, SNAP, GAMMA o ROI_PAC. Además, calcula desplazamientos LOS de la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Disponible para sistemas operativos Windows y Unix/Linux. Desarrollado por *Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science* y la *University of Miami*. <https://github.com/insarlab/MintPy>
8. **Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HYP3)**: Plataforma basada en la nube para el procesamiento de datos SAR de Sentinel-1. Ofrece la posibilidad de generar interferogramas enrollados y desenrollados en línea sin necesidad de descargar los datos SAR ni tener instalado el software, lo que ahorra recursos de almacenamiento y simplifica el procesamiento de datos. Desarrollada por *NASA's Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (ASF DAAC)*. https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/insar_product_guide/

B. Procesamiento de datos SAR en la nube: Geohazard Exploitation platform (GEP)

La Plataforma de Explotación de Riesgos Geológicos (GEP) de la Agencia Espacial Europea (ESA) es un entorno basado en la nube que proporciona un conjunto de servicios de procesamiento de imágenes SAR para monitorear la deformación del terreno. Es accesible a través de la web <https://geohazards-tep.eu/>. La plataforma integra todo el catálogo de imágenes SAR adquiridas por los satélites de la ESA a nivel global y proporciona acceso a distintos servicios de procesamiento InSAR en una interfaz sencilla y amigable. En una misma pantalla el usuario puede seleccionar las imágenes SAR que cubren su área de interés y llevar a cabo procesados InSAR de manera remota (Figura A3.1). Los diferentes servicios de procesamiento que ofrece GEP se denominan *Thematic Apps*. Estas cadenas o algoritmos se ejecutan automáticamente en el servidor sin apenas intervención del usuario, que únicamente debe especificar un número limitado de parámetros para llevar a cabo el procesamiento. El número de parámetros a introducir por el usuario varía en función del servicio de procesamiento utilizado. Los tutoriales de todos los servicios de procesamiento disponibles en GEP se pueden consultar en la plataforma (<https://docs.terradue.com/geohazards-tep/tutorials/index.html>), donde se describe la configuración y los resultados que proporciona cada uno de ellos. Esta plataforma no es gratuita. El coste asociado al uso de los distintos servicios de procesamiento disponibles en la plataforma varía en función del servicio contratado.

Entre los servicios de técnicas InSAR dedicados al procesamiento de imágenes SAR de tipo Sentinel-1 IW TOPS que ofrece GEP destacan los siguientes:

- P-SBAS: proporciona datos de velocidad LOS media y series temporales de desplazamiento LOS de la superficie del terreno.
- SNAPPING: proporciona datos de velocidad LOS media y series temporales de desplazamientos LOS de la superficie del terreno.
- FASTVEL: proporciona únicamente datos de velocidad LOS media.

El primero de ellos, P-SBAS (Figura A3.1), se basa en la técnica Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002), que utiliza un criterio de selección de puntos de medición basado en la coherencia (ver subapartado 2.6.1.), el método de formación de interferogramas *Multi Reference* (ver subapartado 2.6.2.) y ventanas espaciales que reducen la resolución (*multilook*) para minimizar el ruido de fase. Para hacer frente a la inmensa disponibilidad de datos asociada a los archivos SAR existentes hoy en día, se desarrolló Parallel-SBAS (P-SBAS) (Casu et al., 2014; Manunta et al., 2019). P-SBAS es una solución de computación paralela, basada en la técnica SBAS, que mejora el rendimiento de esta última. El servicio P-SBAS fue integrado en GEP por el organismo italiano CNR-IREA. Los datos de entrada requeridos son el número de imágenes SAR, el área de interés a procesar, el umbral de coherencia (valor recomendado entre 0.7 y 0.85) y el punto de referencia. Sin embargo, el algoritmo ajusta automáticamente el punto de referencia y selecciona aquel con las mejores condiciones de coherencia cercano al que el usuario ha elegido inicialmente. Además, al final del proceso, el algoritmo implementa una referencia promedio en toda la escena para evitar depender de un único punto. Esto mitiga el efecto del ruido atmosférico en el punto de referencia, generando así una especie de referencia “absoluta”. De todas formas, el usuario puede seleccionar la serie temporal de un punto de interés y restarla al conjunto completo de datos, de modo que los resultados estén referidos a un punto específico. Los principales resultados que proporciona P-SBAS son la ubicación de los puntos de medición (en coordenadas geográficas), las series temporales de desplazamiento LOS en cm, la velocidad LOS media en cm/año, la coherencia temporal y las componentes unitarias del vector LOS a lo largo de las direcciones norte, este y vertical. El criterio de signos es el siguiente: los valores negativos indican movimientos de alejamiento del satélite, mientras que los positivos indican movimientos de acercamiento al satélite. El *multilook* aplicado por P-SBAS, de 5 x 20 (*acimut* x *rango*), genera mapas de desplazamiento del terreno con una resolución aproximada de 90 x 90 m. Entre las principales ventajas del servicio destacan su robustez, su simplicidad y su potencial para procesar grandes extensiones.

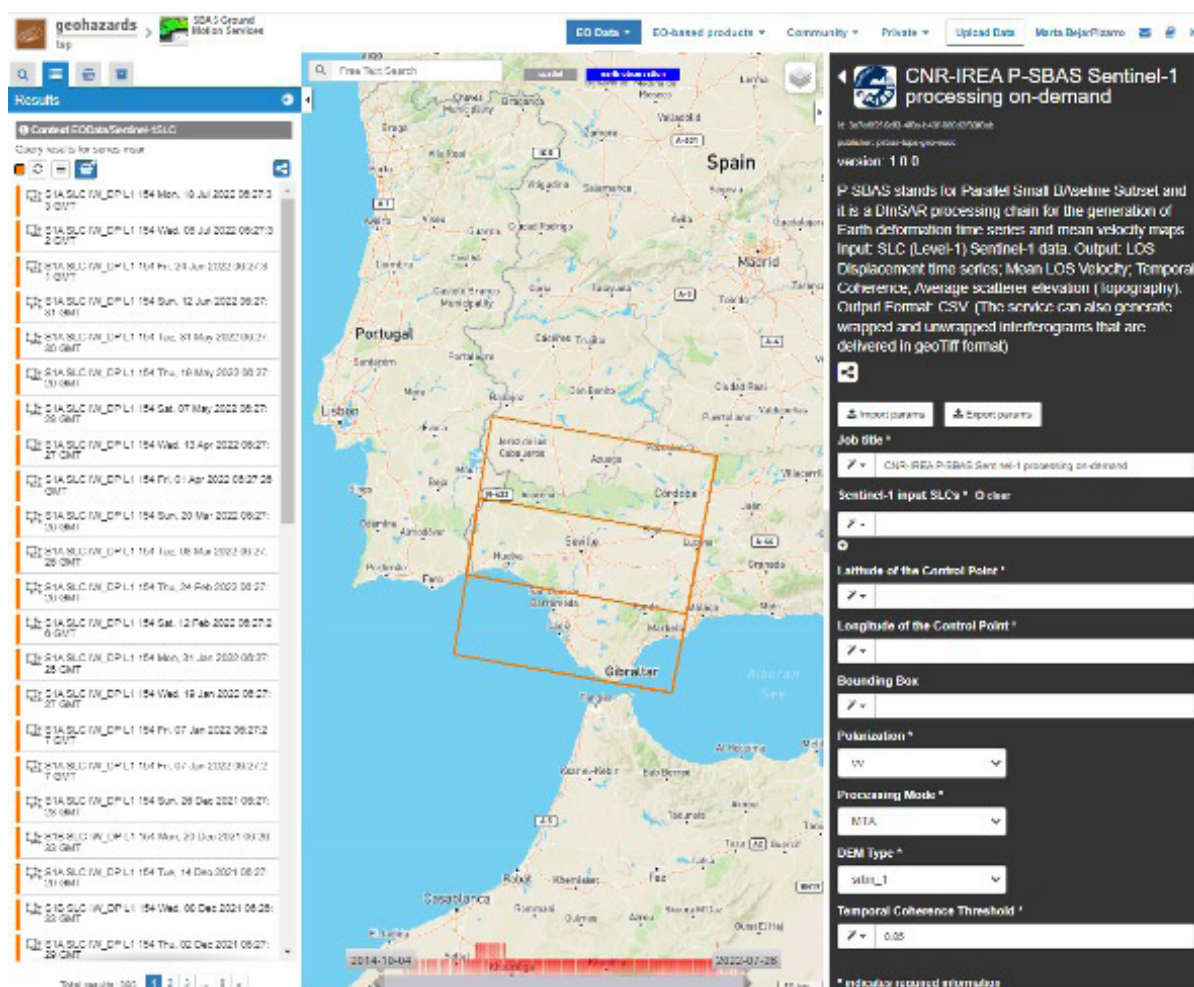


Figura A3.1: Interfaz de la Thematic App P-SBAS en GEP.

SNAPPING (Surface motion mAPPING) es un servicio desarrollado por la Universidad Aristóteles de Tesalónica y el grupo de investigación Microgeodesia de Jaén con el apoyo de la compañía Terradue para su implementación en la plataforma GEP. Este algoritmo aplicado por el servicio GEP se basa en la cadena integrada SNAP, que permite generar los interferogramas, y el software STAMPS, que permite obtener velocidades y series temporales de desplazamiento LOS. De esta forma, SNAPPING aplica un primer servicio con SNAP para generar los interferogramas empleando el método *Single Reference* (ver subapartado 2.6.2), y un segundo servicio con STAMPS para generar las velocidades y series temporales de desplazamiento LOS. En este caso el usuario puede elegir parámetros del procesado, tal y como detalla en los tutoriales de la plataforma GEP. Como principales resultados, SNAPPING proporciona la ubicación de los puntos de medición (en coordenadas geográficas), las series temporales de desplazamiento LOS en mm, la velocidad LOS media en mm/año (y su desviación estándar), la coherencia temporal y el **ángulo de incidencia**. El criterio de signos es idéntico al adoptado por P-SBAS; los valores negativos indican movimientos de alejamiento del satélite y los positivos, movimientos de acercamiento al satélite. La principal ventaja de SNAPPING se relaciona con el hecho de que ofrece la posibilidad de añadir nuevas imágenes para generar los interferogramas con la imagen SAR de referencia, tras lo cual solo es necesario ejecutar STAMPS para obtener las velocidades y series temporales de desplazamiento LOS actualizadas.

Por último, el servicio FASTVEL, desarrollado por TRE-Altamira S.L.U., permite generar mapas de velocidad de desplazamiento LOS promedio mediante interferometría de reflectores persistentes (PSI, ver el subapartado 2.6.1.) a partir de un conjunto de imágenes Sentinel-1 o ASAR. Para llevar a cabo el procesado, deben seleccionarse, al menos, 25 imágenes. Los parámetros a introducir incluyen el área de interés, las coordenadas del punto de referencia, la **línea de base temporal** máxima (el valor por defecto se corresponde con 365 días), la línea de base perpendicular máxima (por defecto, 400 m), la diferencia **Doppler** máxima (por defecto, 1000 Hz), el centroide **Doppler** máximo (por defecto, 2000 Hz), el umbral de coherencia interferométrica y la distancia de correlación de pantalla de fase atmosférica (*Atmospheric Phase Screen*, APS) (por defecto, 3000 m). Los principales resultados que proporciona FASTVEL son la ubicación de los puntos de medición en coordenadas geográficas, la velocidad LOS media en cm/año, el error de altura en metros, la coherencia temporal y las componentes unitarias del vector LOS a lo largo de las direcciones norte, este y vertical. El criterio de signos es el mismo que en los casos anteriores; los valores negativos indican movimientos de alejamiento del satélite y los positivos, movimientos de acercamiento al satélite. Los mapas de velocidad LOS generados con FASTVEL proporcionan una resolución aproximada de 40 x 40 m. En la práctica, en áreas donde se espera una alta densidad de puntos de medición, se recomienda seleccionar un tamaño área de estudio de aproximadamente 30 x 30 km, mientras que en áreas donde se espera una baja densidad de puntos de medición es recomendable seleccionar un área de interés de alrededor de 70 x 70 km. A diferencia de los dos servicios de procesado anteriores, que sólo permiten procesar imágenes del satélite Sentinel-1, FASTVEL ofrece la posibilidad de procesar imágenes de los satélites ERS y ENVISAT.



REFERENCIAS

Referencias

- Adam, N., Parizzi, A., Eineder, M., and Crosetto, M., 2009, Practical persistent scatterer processing validation in the course of the TerraFirma project: *Journal of Applied Geophysics*, v. 69, no. 1, p. 59-65.
- Argenti, F., Lapini, A., Bianchi, T., and Alparone, L., 2013, A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images: *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, v. 1, no. 3, p. 6-35.
- Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevotnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M., and Nastev, M., 2023, The December 2020 magnitude (Mw) 6.4 Petrinja earthquake, Croatia: seismological aspects, emergency response and impacts: *Bulletin of Earthquake Engineering*, p. 1-42.
- Bamler, R., and Hartl, P., 1998, Synthetic aperture radar interferometry: *Inverse problems*, v. 14, no. 4, p. R1.
- Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., and Mateos, R. M., 2017, A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images: *Remote sensing*, v. 9, no. 10, p. 1002.
- Béjar-Pizarro, M., Galve, J. P., Monserrat, O., Ezquerro, P., Vinielles, J. L., Carmona, C. R., Barra, A., Sarro, R., Mateos, R. M., and Pérez, J. V., 2021, Detección de deformaciones activas en la Península Ibérica mediante datos Sentinel-1: resultados preliminares en Andalucía, Cataluña, y Murcia: *Geotemas (Madrid)*, no. 18, p. 467.
- Béjar-Pizarro, M., Guardiola-Albert, C., García-Cárdenas, R. P., Herrera, G., Barra, A., López Molina, A., Tessitore, S., Staller, A., Ortega-Becerril, J. A., and García-García, R. P., 2016, Interpolation of GPS and geological data using InSAR deformation maps: Method and application to land subsidence in the alto guadalentín aquifer (SE Spain): *Remote Sensing*, v. 8, no. 11, p. 965.
- Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Mateos, R. M., Ezquerro, P., Centolanza, G., Herrera, G., Bru, G., Sanabria, M., Solari, L., and Duro, J., 2017, Mapping vulnerable urban areas affected by slow-moving landslides using Sentinel-1 InSAR data: *Remote Sensing*, v. 9, no. 9, p. 876.
- Bekaert, D., Walters, R., Wright, T., Hooper, A., and Parker, D., 2015, Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques: *Remote Sensing of Environment*, v. 170, p. 40-47.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E., 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 40, no. 11, p. 2375-2383.
- Biggs, J., and Pritchard, M. E., 2017, Global volcano monitoring: What does it mean when volcanoes deform?: *Elements*, v. 13, no. 1, p. 17-22.
- Bonì, R., Herrera, G., Meisina, C., Notti, D., Béjar-Pizarro, M., Zucca, F., González, P. J., Palano, M., Tomás, R., and Fernández, J., 2015, Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study: *Engineering Geology*, v. 198, p. 40-52.
- Bovenga, F., Nitti, D. O., Fornaro, G., Radicioni, F., Stoppini, A., and Brigante, R., 2013, Using C/X-band SAR interferometry and GNSS measurements for the Assisi landslide analysis: *International Journal of Remote Sensing*, v. 34, no. 11, p. 4083-4104.
- Braun, A., 2019, Radar satellite imagery for humanitarian response. Bridging the gap between technology and application. Tesis Doctoral. Universität Tübingen.
- Briole, P., Ganas, A., Elias, P., and Dimitrov, D., 2021, The GPS velocity field of the Aegean. New observations, contribution of the earthquakes, crustal blocks model: *Geophysical Journal International*, v. 226, no. 1, p. 468-492.
- Bru, G., Ezquerro, P., Azañón, J. M., Mateo, R. M., Tsige, M., Béjar-Pizarro, M., and Guardiola-Albert, C., 2024, Deceleration captured by InSAR after corrective measures in a slow-moving landslide: The case of Arcos de la Frontera (SW Spain): *Landslides (en revisión)*.
- Bru, G., Fernández-Merodo, J. A., García-Davalillo, J., Herrera, G., and Fernández, J., 2018, Site scale modeling of slow-moving landslides, a 3D viscoplastic finite element modeling approach: *Landslides*, v. 15, no. 2, p. 257-272.
- Bru, G., González, P. J., Mateos, R. M., Roldán, F. J., Herrera, G., Béjar-Pizarro, M., and Fernández, J., 2017, A-DInSAR monitoring of landslide and subsidence activity: A case of urban damage in Arcos de la Frontera, Spain: *Remote Sensing*, v. 9, no. 8, p. 787.
- Bru, G., Portela, J., Ezquerro, P., Navarro, M. I., Staller, A., Béjar-Pizarro, M., Guardiola-Albert, C., Fernández-Merodo, J., López-Vinielles, J., and Tomás, R., 2023, Imaging land subsidence in the Guadalentín River Basin (SE Spain) using Advanced Differential SAR Interferometry.
- Calero, J. S., Vöge, M., Martins, J. E., Raucoules, D., Michelle, M. d., Vradi, A., and Vecchiotti, F., 2023, EGMS Validation Report. Code: EGMS-D4-PUM-SC1-2.0-007.
- Campbell, J. B., and Wynne, R. H., 2011, Introduction to remote sensing, Guilford press.

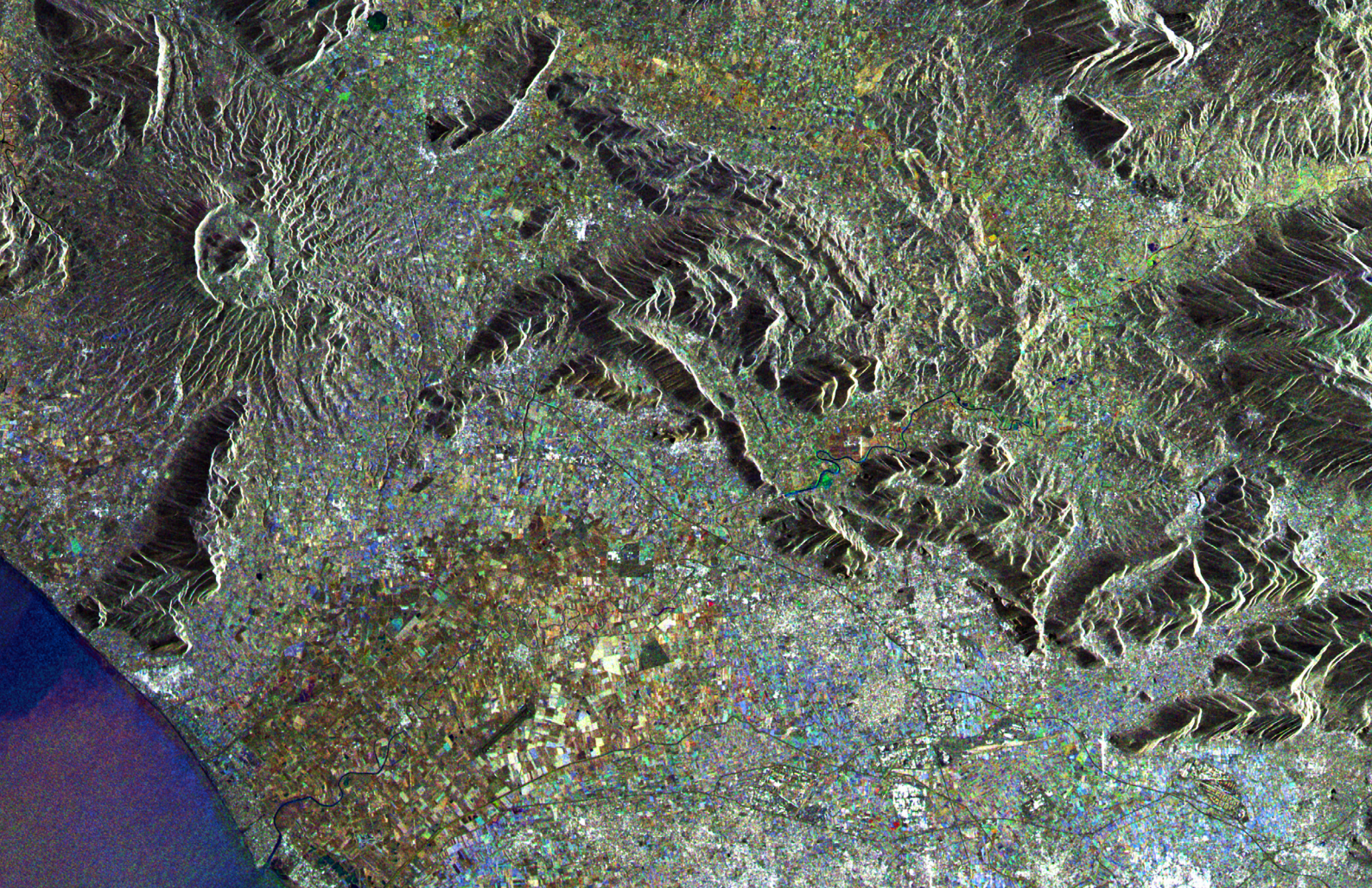
- Capes, R., and Passera, E., 2023, Product Description and Format Specification. Document Code: EGMS-D6-PDD-SC1-2.0-009.
- Carbonel, D., Rodríguez-Tribaldos, V., Gutiérrez, F., Galve, J. P., Guerrero, J., Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R., McCalpin, J. P., and Acosta, E., 2015, Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: Geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching: *Geomorphology*, v. 229, p. 3-16.
- Castañeda, C., Gutiérrez, F., Manunta, M., and Galve, J. P., 2009, DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 34, no. 11, p. 1562-1574.
- 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*, v. 7, no. 8, p. 3285-3296.
- Casu, F., Manzo, M., and Lanari, R., 2006, A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data: *Remote Sensing of Environment*, v. 102, no. 3, p. 195-210.
- 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*, v. 49, no. 6, p. 2354-2360.
- Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., and Tapete, D., 2021, Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data: *Remote Sensing*, v. 13, no. 23, p. 4800.
- Cigna, F., and Sowter, A., 2017, The relationship between intermittent coherence and precision of ISBAS InSAR ground motion velocities: ERS-1/2 case studies in the UK: *Remote sensing of environment*, v. 202, p. 177-198.
- Colesanti, C., and Wasowski, J., Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides, *in* *Proceedings Proceedings Ninth Internat. Symposium on Landslides2004*, p. 795-802.
- Colombo, A., Riccardo, B., Rossella, B., Massimo, B., Emanuela, C., Daniele, D., Alessandro, F., Roberto, L., Meisina, C., and Notti, D., 2012, Le tecniche radarinterferometriche nella pianificazione territoriale.
- Corominas, J., 1989, Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., and Crippa, B., 2016, Persistent scatterer interferometry: A review: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 115, p. 78-89.
- Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., Bateson, L., and Guerrieri, L., 2020, The evolution of wide-area DInSAR: From regional and national services to the European Ground Motion Service: *Remote Sensing*, v. 12, no. 12, p. 2043.
- Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., Bateson, L., and Guerrieri, L., 2020, The evolution of wide-area DInSAR: From regional and national services to the European Ground Motion Service: *Remote Sensing*, v. 12, no. 12, p. 2043.
- Cruden, D. M., and Varnes, D. J., 1996, Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes: *Transportation research board special report*, no. 247.
- Cuervas-Mons, J., Zêzere, J. L., Domínguez-Cuesta, M. J., Barra, A., Reyes-Carmona, C., Monserrat, O., Oliveira, S. C., and Melo, R., 2022, Assessment of Urban Subsidence in the Lisbon Metropolitan Area (Central-West of Portugal) Applying Sentinel-1 SAR Dataset and Active Deformation Areas Procedure: *Remote Sensing*, v. 14, no. 16, p. 4084.
- Cumming, I. G., and Wong, F. H., 2005, Digital processing of synthetic aperture radar data: *Artech house*, v. 1, no. 3, p. 108-110.
- Charlton, D., Kilburn, C., and Edwards, S., 2020, Volcanic unrest scenarios and impact assessment at Campi Flegrei caldera, Southern Italy: *Journal of Applied Volcanology*, v. 9, p. 1-26.
- Cheloni, D., De Novellis, V., Albano, M., Antonioli, A., Anzidei, M., Atzori, S., Avallone, A., Bignami, C., Bonano, M., and Calcaterra, S., 2017, Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data: *Geophysical Research Letters*, v. 44, no. 13, p. 6778-6787.
- CHS, 2021, Memoria Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022/2027: MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO.
- 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*, v. 7, no. 11, p. 15630-15650.
- De Luca, C., Valerio, E., Giudicepietro, F., Macedonio, G., Casu, F., and Lanari, R., 2022, Pre-and Co-eruptive analysis of the september 2021 eruption at cumbre vieja volcano (La Palma, canary islands) through DInSAR measurements and analytical modeling: *Geophysical Research Letters*, v. 49, no. 7, p. e2021GL097293.
- DiPietro, J. A., 2013, Chapter 7 - Forcing Variables: Sea Level and Isostasy, *in* DiPietro, J. A., ed., *Landscape Evolution in the United States*: Boston, Elsevier, p. 77-85.
- Elliott, J., Walters, R., and Wright, T., 2016, The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes: *Nature communications*, v. 7, no. 1, p. 13844.
- ESA, 2004, ASAR Product Handbook: Europe Space Agency-ESA (11ª).
- ESA, 2018a, 3—Synthetic Aperture Radar—ERS Radar Course 3—ESA Operational EO Missions—Earth Online—ESA: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/radar-courses/radar-course-3>.

- ESA, 2018b, Course EO College “Echoes in Space – Introduction to Radar Remote Sensing”: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>.
- ESA, 2019, Curso EO College “Principios básicos de la Retrodispersión Radar”: <https://eo-college.org/courses/principios-basicos-de-la-retrodispersion-radar/>.
- Ezquerro, P., Bru, G., Galindo, I., Monserrat, O., García-Davalillo, J., Sánchez, N., Montoya, I., Palamà, R., Mateos, R., and Pérez-López, R., 2023, Analysis of SAR-derived products to support emergency management during volcanic crisis: La Palma case study: *Remote Sensing of Environment*, v. 295, p. 113668.
- Ezquerro, P., Guardiola-Albert, C., Herrera, G., Fernández-Merodo, J. A., Béjar-Pizarro, M., and Bonì, R., 2017, Groundwater and subsidence modeling combining geological and multi-satellite SAR data over the alto guadalentín aquifer (SE Spain): *Geofluids*, v. 2017.
- Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., Fernández-Merodo, J., Guardiola-Albert, C., Staller, A., Sánchez-Sobrinó, J., and Herrera, G., 2020, Improving multi-technique monitoring using Sentinel-1 and Cosmo-SkyMed data and upgrading groundwater model capabilities: *Science of The Total Environment*, v. 703, p. 134757.
- Fernández-Merodo, J., Ezquerro, P., Manzanal, D., Béjar-Pizarro, M., Mateos, R., Guardiola-Albert, C., García-Davalillo, J., López-Vinielles, J., Sarro, R., and Bru, G., 2021, Modeling historical subsidence due to groundwater withdrawal in the Alto Guadalentín aquifer-system (Spain): *Engineering Geology*, v. 283, p. 105998.
- Fernández, J., Escayo, J., Camacho, A. G., Palano, M., Prieto, J. F., Hu, Z., Samsonov, S. V., Tiampo, K. F., and Ancochea, E., 2022, Shallow magmatic intrusion evolution below La Palma before and during the 2021 eruption: *Scientific reports*, v. 12, no. 1, p. 20257.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., and Massonet, D., 2007a, InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.
- Ferretti, A., Passera, E., and Capes, R., 2021, Algorithm Theoretical Basis Document.. Documento EGMS-D3-ALG-SC1-2.0-006. .
- Ferretti, 2023, Algorithm Theoretical Basis Document EGMS-D3-ALG-SC1-2.0-006.
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., and Rocca, F., 2007b, Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45, no. 5, p. 1142-1153.
- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., and Cherrington, E., 2019, The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation.
- Galve, J. P., Castañeda, C., Gutiérrez, F., and Herrera, G., 2015, Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR: *Geomorphology*, v. 229, p. 30-44.
- Galve, J. P., Gutiérrez, F., Remondo, J., Bonachea, J., Lucha, P., and Cendrero, A., 2009, Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain): *Geomorphology*, v. 111, no. 3-4, p. 160-172.
- Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., Closson, D., Caló, F., Reyes-Carmona, C., Jabaloy, A., Ruano, P., Mateos, R. M., and Notti, D., 2017, Evaluation of the SBAS InSAR service of the European space Agency's Geohazard Exploitation Platform (GEP): *Remote Sensing*, v. 9, no. 12, p. 1291.
- Galloway, D. L., Jones, D. R., and Ingebritsen, S. E., 1999, Land subsidence in the United States, Geological Survey (USGS).
- Gambolati, G., and Teatini, P., 2023, Land Subsidence and its Mitigation, Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/land-subsidence-and-its-mitigation/>.
- García-Davalillo, J. C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., and Álvarez-Fernández, I., 2014, DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study: *Landslides*, v. 11, no. 2, p. 225-246.
- Gee, D., Sowter, A., Grebby, S., de Lange, G., Athab, A., and Marsh, S., 2019, National geohazards mapping in Europe: Interferometric analysis of the Netherlands: *Engineering geology*, v. 256, p. 1-22.
- González Méndez, P. J., 2010, Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- González, P. J., and Fernández, J., 2011, Drought-driven transient aquifer compaction imaged using multitemporal satellite radar interferometry: *Geology*, v. 39, no. 6, p. 551-554.
- González, P. J., Tiampo, K. F., Camacho, A. G., and Fernández, J., 2010, Shallow flank deformation at Cumbre Vieja volcano (Canary Islands): Implications on the stability of steep-sided volcano flanks at oceanic islands: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 297, no. 3, p. 545-557.
- Corrab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., and Mougnot, B., Multi-frequency analysis of soil moisture vertical heterogeneity effect on radar backscatter, in *Proceedings 2014 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)2014, IEEE*, p. 379-384.
- Guerrero, J., Sevil, J., Desir, G., Gutiérrez, F., Arnay, Á. G., Galve, J. P., and Reyes-Carmona, C., 2021, The Detection of Active Sinkholes by Airborne Differential LiDAR DEMs and InSAR Cloud Computing Tools: *Remote Sensing*, v. 13, no. 16, p. 3261.
- Gutiérrez, F., Galve, J. P., Lucha, P., Castañeda, C., Bonachea, J., and Guerrero, J., 2011, Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes: A review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain): *Geomorphology*, v. 134, no. 1-2, p. 144-156.
- Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., and Gracia, F., 2005, Karst, neotectonics and periglacial features in the Iberian Range, *Spanish Society of Geomorphology*.

- Cutiérrez, F., Johnson, K. S., and Cooper, A. H., 2008, Evaporite karst processes, landforms, and environmental problems: *Environmental Geology*, v. 53, p. 935-936.
- Hanssen, R. F., 2001, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, Springer Science & Business Media.
- Henriquet, M., Kordic, B., Métois, M., Lasserre, C., Baize, S., Benedetti, L., Spelić, M., and Vukovski, M., 2022, Rapid Remeasure of Dense Civilian Networks as a Game-Changer Tool for Surface Deformation Monitoring: The Case Study of the Mw 6.4 2020 Petrinja Earthquake, Croatia: *Geophysical Research Letters*, v. 49, no. 24, p. e2022GL100166.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., and Teatini, P., 2021, Mapping the global threat of land subsidence: *Science*, v. 371, no. 6524, p. 34-36.
- Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J., Fernández-Merodo, J., and Cooksley, G., 2013, Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees): *Remote Sensing of Environment*, v. 128, p. 31-43.
- Herrera, G., Tomás, R., Vicente, F., Lopez-Sanchez, J., Mallorquí, J., and Mulas, J., 2010, Mapping ground movements in open pit mining areas using differential SAR interferometry: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 47, no. 7, p. 1114-1125.
- Hu, J., Li, Z., Ding, X., Zhu, J., Zhang, L., and Sun, Q., 2014, Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review: *Earth-Science Reviews*, v. 133, p. 1-17.
- Hu, L., Tomás, R., Tang, X., López Vinielles, J., Herrera, G., Li, T., and Liu, Z., 2023, Updating Active Deformation Inventory Maps in Mining Areas by Integrating InSAR and LiDAR Datasets: *Remote Sensing*, v. 15, no. 4, p. 996.
- Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L., 2014, The Varnes classification of landslide types, an update: *Landslides*, v. 11, no. 2, p. 167.
- IGME, 1997, Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización. Redefinición del programa de actuación: Segura: Ministerio de Medio Ambiente. Instituto Geológico y Minero de España (igme).
- Kirui, P. K. e., Reinosch, E., Isya, N., Riedel, B., and Gerke, M., 2021, Mitigation of atmospheric artefacts in multi temporal InSAR: a review: *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, v. 89, p. 251-272.
- Kotzerke, P., Larsen, Y., and Minati, F., 2022a, *Quality Assurance & Control Report*. Document Code: EGMS-D10.4-QCR-SC2-3.0-042.
- Kotzerke, P., Siegmund, R., and Langenwalter, J., 2022b, *Product User Manual*. Document Code: EGMS-D4-PUM-SC1-2.0-007.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Pearson Education India.
- Krishnakumar, V., Qiu, Z., Monserrat, O., Barra, A., López-Vinielles, J., Reyes-Carmona, C., Gao, Q., Cuevas-González, M., Palamà, R., and Crippa, B., 2021, Sentinel-1 a-dinsar approaches to map and monitor ground displacements: *Remote Sensing*, v. 13, no. 6, p. 1120.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., and Pepe, A., 2007, An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis: *Pure and Applied Geophysics*, v. 164, no. 4, p. 637-661.
- Larsen, Y., Marinkovic, P., Kenyeres, A., and Tóth, S., 2021, *GNSS Calibration Report*. Document Code: EGMS-D19.2-GCR-SC1-3.0-031.
- Larsen, Y., Marinkovic, P., Larsen, Y., Dehls, J., and Stødle, D., 2022, *End User Interface Manual*. Document Code: EGMS-D5-UIIM-SC2-061.
- Lee, J.-S., Papathanassiou, K. P., Ainsworth, T. L., Grunes, M. R., and Reigber, A., 1998, A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, no. 5, p. 1456-1465.
- Lee, J.-S., and Pottier, E., 2017, *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*, CRC press.
- Li, Z., and Bethel, J., 2008, Image coregistration in SAR interferometry: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 37, p. 433-438.
- López-Vinielles, J., Ezquerro, P., Fernández-Merodo, J. A., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Barra, A., Blanco, P., García-Robles, J., Filatov, A., and García-Davalillo, J. C., 2020, Remote analysis of an open-pit slope failure: Las Cruces case study, Spain: *Landslides*, v. 17, p. 2173-2188.
- López-Vinielles, J., Fernández-Merodo, J. A., Ezquerro, P., García-Davalillo, J. C., Sarro, R., Reyes-Carmona, C., Barra, A., Navarro, J. A., Krishnakumar, V., and Alvioli, M., 2021, Combining satellite InSAR, slope units and finite element modeling for stability analysis in mining waste disposal areas: *Remote Sensing*, v. 13, no. 10, p. 2008.
- López-Vinielles, J., García-Davalillo, J. C., Sarro, R., Martínez-Corbella, M., Hernández, M., Ezquerro, P., Bru, G., Barra, A., Reyes-Carmona, C., and Mulas, J., 2023, A data fusion approach for retrieving 3D slope displacements from satellite InSAR and UAV-based orthoimagery correlation data: application to a reclaimed coal mining area: *Copernicus Meetings*.
- López-Vinielles, J., García López-Davalillo, J. C., Hernández Ruiz, M., Sarro Triguero, R., Martínez Corbella, M., Béjar Pizarro, M., Mulas de la Peña, J., Fernández Merodo, J. A., and Herrera García, G., 2022, Integration of data acquired using SfM orthoimagery correlation techniques and satellite InSAR techniques for the calculation of 3D displacements in densely vegetated unstable slopes.
- López Vinielles, J., 2022, *Aplicación de técnicas de interferometría radar satélite al análisis de estabilidad de taludes en zonas mineras: Caminos*.

- Lusch, D. P. (1999). Introduction to microwave remote sensing. Center for Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University.
- Macchiarulo, V., Milillo, P., Blenkinsopp, C., Reale, C., and Giardina, G., Multi-Temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: Recent trends and challenges, *in* Proceedings Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering2022, Thomas Telford Ltd, p. 1-26.
- Manconi, A., 2021, How phase aliasing limits systematic space-borne DInSAR monitoring and failure forecast of alpine landslides: Engineering Geology, v. 287, p. 106094.
- Manunta, M., De Luca, C., Zinno, I., Casu, F., Manzo, M., Bonano, M., Fusco, A., Pepe, A., Onorato, G., and Berardino, P., 2019, The parallel SBAS approach for Sentinel-1 interferometric wide swath deformation time-series generation: algorithm description and products quality assessment: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 57, no. 9, p. 6259-6281.
- Martin, G., Hooper, A., Wright, T. J., and Selvakumaran, S., 2022, Blind source separation for MT-InSAR analysis with structural health monitoring applications: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 15, p. 7605-7618.
- Massonnet, D., and Feigl, K. L., 1998, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface: Reviews of geophysics, v. 36, no. 4, p. 441-500.
- Meyer, F. J., 2011, Performance requirements for ionospheric correction of low-frequency SAR data: IEEE transactions on geoscience and remote sensing, v. 49, no. 10, p. 3694-3702.
- Minh, D. H. T., Hanssen, R., and Rocca, F., 2020, Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives: Remote Sensing, v. 12, no. 9, p. 1364.
- Monserrat, O., Crosetto, M., Cuevas, M., and Crippa, B., 2011, The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 8, no. 5, p. 864-868.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P., 2013, A tutorial on synthetic aperture radar: IEEE Geoscience and remote sensing magazine, v. 1, no. 1, p. 6-43.
- Notti, D., Davalillo, J., Herrera, G., and Mora, O., 2010, Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: Upper Tena Valley case study: Nat Hazards Earth Syst Sci, v. 10, p. 1865-1875.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., and Cabral-Cano, E., 2016, Time series analysis of InSAR data: Methods and trends: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 115, p. 90-102.
- Oteo, C. S., 2000, Las margas azules del Guadalquivir y la inestabilidad de taludes: Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras, no. 77, p. 17-27.
- Papageorgiou, E., Fomelis, M., Trasatti, E., Ventura, G., Raucoules, D., and Mouratidis, A., 2019, Multi-sensor SAR geodetic imaging and modelling of santorini volcano post-unrest response: Remote Sensing, v. 11, no. 3, p. 259.
- Passera, E., 2023, Change Management Report. Document Code: EGMS-D12.1-CMR-SC2-068.
- Pepe, A., and Calò, F., 2017, A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements: Applied Sciences, v. 7, no. 12, p. 1264.
- Proietti, S., and Cerri, M., 2021, End User Requirements. Document Code: EGMS-D15-URD-SC1-8.0-017.
- Przyłucka, M., Herrera, G., Graniczny, M., Colombo, D., and Béjar-Pizarro, M., 2015, Combination of conventional and advanced DInSAR to monitor very fast mining subsidence with TerraSAR-X data: Bytom City (Poland): Remote Sensing, v. 7, no. 5, p. 5300-5328.
- Qiu, Z., Monserrat, O., Crosetto, M., Krishnakumar, V., and Zhou, L., 2021, An innovative extraction methodology of active deformation areas based on sentinel-1 SAR dataset: the catalonia case study: International Journal of Remote Sensing, v. 42, no. 16, p. 6228-6244.
- Quin, G., and Loreaux, P., 2012, Submillimeter accuracy of multipass corner reflector monitoring by PS technique: IEEE transactions on geoscience and remote sensing, v. 51, no. 3, p. 1775-1783.
- Reyes-Carmona, C., Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V., Moreno-Sánchez, M., Alfonso-Jorde, D., Ballesteros, D., Torre, D., Azañón, J. M., and Mateos, R. M., 2023, Improving landslide inventories by combining satellite interferometry and landscape analysis: the case of Sierra Nevada (Southern Spain): Landslides, p. 1-21.
- Richter, G., Hainzl, S., Dahm, T., and Zöller, G., 2020, Stress-based, statistical modeling of the induced seismicity at the Groningen gas field, The Netherlands: Environmental Earth Sciences, v. 79, no. 11, p. 252.
- Rigo, A., Béjar-Pizarro, M., and Martínez-Díaz, J., 2013, Monitoring of Guadalentín valley (southern Spain) through a fast SAR Interferometry method: Journal of Applied Geophysics, v. 91, p. 39-48.
- Rosen, P. A., Hensley, S., and Chen, C., Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, *in* Proceedings 2010 IEEE radar conference2010, IEEE, p. 1459-1463.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., and Goldstein, R. M., 2000, Synthetic aperture radar interferometry: Proceedings of the IEEE, v. 88, no. 3, p. 333-382.
- Ruiz-Armenteros, A. M., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Bakoň, M., Delgado, J. M., Sousa, J. J., Lamas-Fernández, F., Marchamalo, M., Caro-Cuenca, M., and Papco, J., 2018, Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain): Procedia Computer Science, v. 138, p. 346-353.

- Samieie-Esfahany, S., Hanssen, R. F., van Thienen-Visser, K., and Muntendam-Bos, A., On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, *in* Proceedings Fringe 2009, Proceedings of the workshop Held 30 November-4 December 2009, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id. 392010, Volume 677.
- Scholz, C. H., 1998, Earthquakes and friction laws: *Nature*, v. 391, no. 6662, p. 37-42.
- Siarkos, I., and Latinopoulos, P., 2016, Modeling seawater intrusion in overexploited aquifers in the absence of sufficient data: application to the aquifer of Nea Moudania, northern Greece: *Hydrogeology Journal*, v. 24, no. 8, p. 2123.
- Sigmundsson, F., Einarsson, P., Hjartardóttir, Á. R., Drouin, V., Jónsdóttir, K., Arnadóttir, T., Geirsson, H., Hreinsdóttir, S., Li, S., and Ofeigsson, B. G., 2020, Geodynamics of Iceland and the signatures of plate spreading: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 391, p. 106436.
- Sivasakthy, S., Zahra, S., Matthew, C., Cristian, R., Tim, W., and Andrew, H., 2022, Comparison of in situ and interferometric synthetic aperture radar monitoring to assess bridge thermal expansion: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, v. 175, no. 2, p. 73-91.
- Small, D., 2011, Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 49, no. 8, p. 3081-3093.
- Steffen, H., and Kaufmann, G., 2005, Glacial isostatic adjustment of Scandinavia and northwestern Europe and the radial viscosity structure of the Earth's mantle: *Geophysical Journal International*, v. 163, no. 2, p. 801-812.
- Svigkas, N., Loupasakis, C., Papoutsis, I., Kontoes, C., Alatzas, S., Tzampoglou, P., Tolomei, C., and Spachos, T., 2020, InSAR campaign reveals ongoing displacement trends at high impact sites of Thessaloniki and Chalkidiki, Greece: *Remote Sensing*, v. 12, no. 15, p. 2396.
- Tamburini-Beliveau, G., Grosso-Heredia, J. A., Béjar-Pizarro, M., Pérez-López, R., Portela, J., Cismondi-Duarte, M., and Monserrat, O., 2022, Assessment of ground deformation and seismicity in two areas of intense hydrocarbon production in the Argentinian Patagonia: *Scientific Reports*, v. 12, no. 1, p. 19198.
- Tomás, R., Cano, M., Garcia-Barba, J., Vicente, F., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M., and Mallorquí, J., 2013, Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain: *Engineering geology*, v. 157, p. 21-32.
- Tomás, R., Romero, R., Mulas, J., Marturiá, J., Mallorquí, J. J., López-Sánchez, J., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P., Fernández, J., Duque, S., Concha, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco, D., and Blanco, P., 2014, Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain, *Environmental earth sciences*, Volume 71, p. 163-181.
- Tramelli, A., Giudicepietro, F., Ricciolino, P., and Chiodini, G., 2022, The seismicity of Campi Flegrei in the contest of an evolving long term unrest: *Scientific reports*, v. 12, no. 1, p. 2900.
- Tsigde, M., de Vallejo, L. G., Doval, M., Oteo, C., and Barba, C., 1995, Microfabric of Guadalquivir blue marls and its engineering geological significance: *Int. Assoc. of Engineering Geology*.
- Van Zyl, J., and Kim, Y., 2011, Synthetic aperture radar polarimetry, John Wiley & Sons, JPL Space Science & Technology Series.
- Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H., and Tarasov, L., 2019, NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region: *Journal of Geodesy*, v. 93, p. 1759-1779.
- Wang, Y., Feng, G., Li, Z., Xu, W., Zhu, J., He, L., Xiong, Z., and Qiao, X., 2022, Retrieving the displacements of the Hutubi (China) underground gas storage during 2003–2020 from multi-track InSAR: *Remote Sensing of Environment*, v. 268, p. 112768.
- Wasowski, J., and Bovenga, F., 2014, Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives: *Engineering Geology*, v. 174, p. 103-138.
- Woodhouse, I. H., 2017, Introduction to microwave remote sensing, CRC press.
- Yang, C., Zhang, D., Zhao, C., Han, B., Sun, R., Du, J., and Chen, L., 2019, Ground deformation revealed by Sentinel-1 MSBAS-InSAR time-series over Karamay Oilfield, China: *Remote Sensing*, v. 11, no. 17, p. 2027.
- Yerro, A., Corominas, J., Monells, D., and Mallorquí, J. J., 2014, Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique: *Engineering Geology*, v. 170, p. 52-65.
- Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., and Lee, H., 2019, Phase unwrapping in InSAR: A review: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, v. 7, no. 1, p. 40-58.
- Zebker, H. A., and Villasenor, J., 1992, Decorrelation in interferometric radar echoes: *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, v. 30, no. 5, p. 950-959.
- Zhang, B., Chang, L., and Stein, A., 2022, A model-backfeed deformation estimation method for revealing 20-year surface dynamics of the Groningen gas field using multi-platform SAR imagery: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 111, p. 102847.

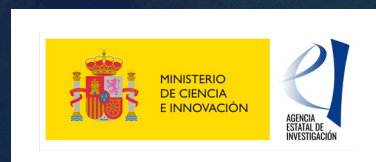


Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno

2024

ISBN: 13 978-84-09-62312-9

This work is licensed under **CC BY-NC-SA 4.0**



Proyecto SARAI, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de la Agencia Española de Investigación 10.13039/501100011033 (PID2020-116540RB-C22)

Fotografía: ©ESA

