

E4.1.2: Tutorial para la correcta interpretación de los mapas generados con el SAR satelital

Entregable incluido en GT4: Herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa

Fecha prevista: 30/06/2020
Fecha de entrega: 30/09/2020

Responsable: CTTC

Autores y colaboradores

Autores: Oriol Monserrat, Anna Barra

Colaboradores: Michele Crosetto



Indice

1	INTRODUCCIÓN	3
2	CARACTERÍSTICAS INTRINSECAS DE LA TÉCNICA Y PARÁMETROS DE UN CONJUNTO DE DATOS.....	4
2.1	Características intrínsecas de la técnica InSAR.....	4
2.2	Características del conjunto de datos de un procesado InSAR.....	11
3	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	13
4	RESUMEN FINAL.....	17
	BIBLIOGRAFÍA	18

1 INTRODUCCIÓN

La Interferometría diferencial SAR (DInSAR) es una potente herramienta para la detección y el monitoreo de movimientos del terreno asociados a diferentes fenómenos geológicos [Crosetto et al. 2016]. Pese a ser una técnica relativamente joven, su consolidación llegó a principios de este siglo [Ferretti et al. 2001, Crosetto et al. 2005], es una técnica versátil, confiable y económica para el mapeo y monitoreo de subsidencias, deslizamientos del terreno, control de infraestructuras y zonas urbanas [Crosetto et al. 2016]. Entre sus principales características destacan:

- *Vista al pasado*: la existencia de archivos de imágenes cubriendo el periodo 1992-2020 ofrece la capacidad exclusiva de analizar hacia el pasado. Esto permite (i) estudiar la evolución de fenómenos activos hasta la fecha y por tanto contribuir a su comprensión y (ii) evaluar la estabilidad de una zona en la fase previa a su utilización.
- *Detección e inventariado de fenómenos activos*: el disponer de imágenes que cubren grandes áreas de terreno permite la aplicación de la técnica a nivel regional para la detección y mapeo sistemático de fenómenos activos. En la actualidad se ha convertido en una potente herramienta para la actualización de inventarios de fenómenos diversos como deslizamientos del terreno [Barra et al. 2017] o glaciares de roca [Villarroel et al. 2017].
- *Actividades de monitorización*: la llegada de la constelación de los satélites Sentinel-1, con planes de adquisición continua a nivel mundial han supuesto un cambio radical en el ámbito de utilización de las técnicas interferométricas satelitales. En un corto periodo de tiempo han pasado de ser técnicas bastante restringidas al uso científico a potentes herramientas para el seguimiento de la evolución de riesgos geológicos como deslizamientos o subsidencias [Del Soldato et al. 2020, Solari et al. 2020]. El actual contexto se verá reforzado con la aparición de las nuevas constelaciones de satélites SAR de alta resolución (Capella Space o Ice EYE). Estas constelaciones proporcionaran imágenes con resolución sub-métrica y con una frecuencia de adquisición de pocas horas y con una revisita interferométrica de aproximadamente 2 días.
- *Potencial herramienta para el soporte a la predicción*: la gran cantidad de datos proporcionados por las técnicas de interferometría satelital unido a la capacidad de actualizarlos de forma periódica suponen una fuente de información importante de cara a la calibración y validación de modelos de predicción [Anantrasirichai et al. 2019] así como en la evaluación del riesgo de estos [Solari et al. 2020].

Sin embargo, pese a sus prestaciones como técnica geodésica, la interferometría satelital presenta una serie de dificultades que en muchas ocasiones se traducen en un hándicap

para su uso. Por una parte, la dificultad de interpretación de los resultados y su naturaleza oportunista condicionan la llegada de nuevos usuarios más familiarizados con técnicas clásicas. Por otra, las limitaciones intrínsecas de la técnica, a veces difíciles de comprender por los usuarios también suponen una importante fuente de desconfianza hacia esta y por tanto a su aplicación en masa.

En este documento, se repasan las principales limitaciones y dificultades de la técnica y se dan toda una serie de recomendaciones de cara a comprender cuando puede ser una herramienta potente y cuando no, como interpretar sus resultados, como detectar posibles errores y como evaluar posibles mejoras en el procesado.

2 CARACTERÍSTICAS INTRINSECAS DE LA TÉCNICA Y PARÁMETROS DE UN CONJUNTO DE DATOS

Los resultados proporcionados por la interferometría SAR suelen consistir en grandes volúmenes de datos. Cuando el análisis es muy acotado a una zona concreta, con buena respuesta al radar y en la que la naturaleza del fenómeno estudiado es conocida, el análisis puede ser fácil, rápido y concluyente. Sin embargo, en zonas relativamente grandes, en las que el fenómeno de estudio no es el único, o donde la respuesta al radar es variable, la interpretación de los resultados puede ser tediosa y no siempre fácil. En este contexto, el conocer bien los principios de la técnica y los datos que se han utilizado para generar los resultados puede ser clave para una correcta interpretación. En esta sección se listan las características y los parámetros más importantes a tener en cuenta cuando se analizan datos DInSAR y se dan una serie de consejos para comprender su influencia durante el análisis de los resultados.

2.1 Características intrínsecas de la técnica InSAR

- *Naturaleza del SAR*: los sistemas SAR están basados en sensores radar. El radar, como sensor, tiene un principio de funcionamiento muy parecido al de un distanciómetro. Envía la señal con una inclinación con respecto a la superficie, esta interactúa con la superficie iluminada que envía parte de la señal recibida de vuelta al radar (eco). El radar envía señales con una cierta frecuencia, y va muestreando los ecos recibidos con un cierto paso obteniendo así un muestreo de la zona iluminada a una resolución dada (figura 1). Esta forma de muestrear el terreno tiene implicaciones geométricas importantes en la medida de movimientos. Por una parte, se producen distorsiones geométricas generando en ocasiones un muestreo no-regular del terreno. Por otra parte, el desplazamiento medido es la proyección en la línea que une el sensor con el objeto medido (línea de vista) del movimiento real. Además, para evitar ambigüedades en la

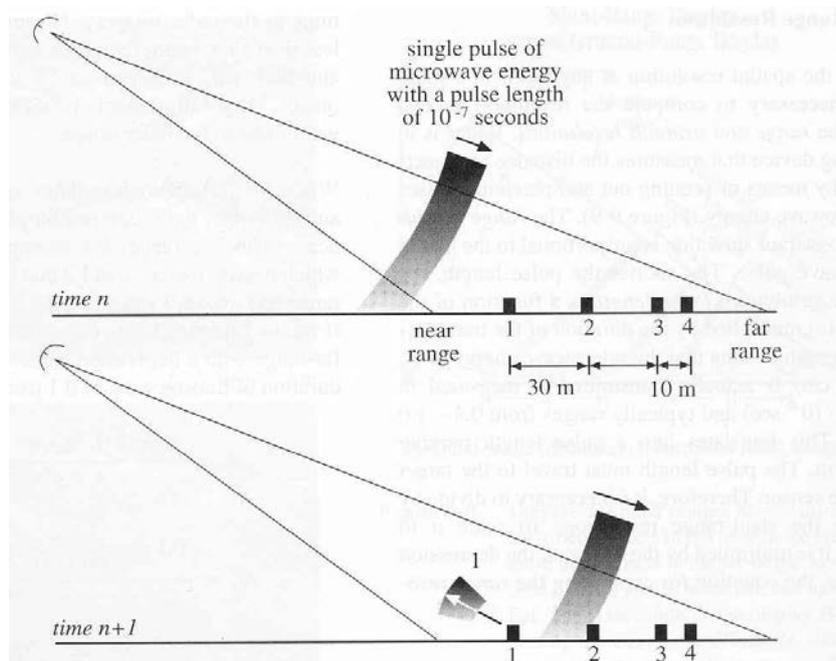


Figura 1: Muestreo del terreno de un radar (fuente Jensen (2000): Rem. sens. of the environment).

respuesta, los sistemas SAR miden con un ángulo de inclinación con respecto a la vertical (ángulo de vista). El proceso de medición se repite a medida que el satélite viaja por su órbita. Todas las adquisiciones hechas a lo largo de la órbita iluminando una misma zona son tratadas mediante un proceso llamado focalización para proporcionar un muestreo regular 2D del terreno. Un sistema SAR nos proporciona una imagen 2D de la zona iluminada con resoluciones distintas en la dirección perpendicular a la órbita (dirección range o línea de vista) y en la dirección paralela a la órbita (azimuth).

- *Distorsiones geométricas:* la figura 2 muestra las distorsiones geométricas que podemos encontrar en una imagen SAR. Conocer estas distorsiones es importante para evaluar la capacidad de éxito que vamos a tener en una zona determinada. Los efectos más importantes son 3: foreshortening, layover y shadow.
 - o *Foreshortening:* Este efecto consiste en una compresión o reducción drástica de la resolución espacial en la línea de vista de la zona iluminada. Este efecto es debido a que gran parte de la zona iluminada responde casi al mismo tiempo y por tanto el radar no es capaz de discriminar. Este efecto ocurre en zonas con pendiente orientada hacia la línea de vista (véase figura 2). El efecto provoca que una

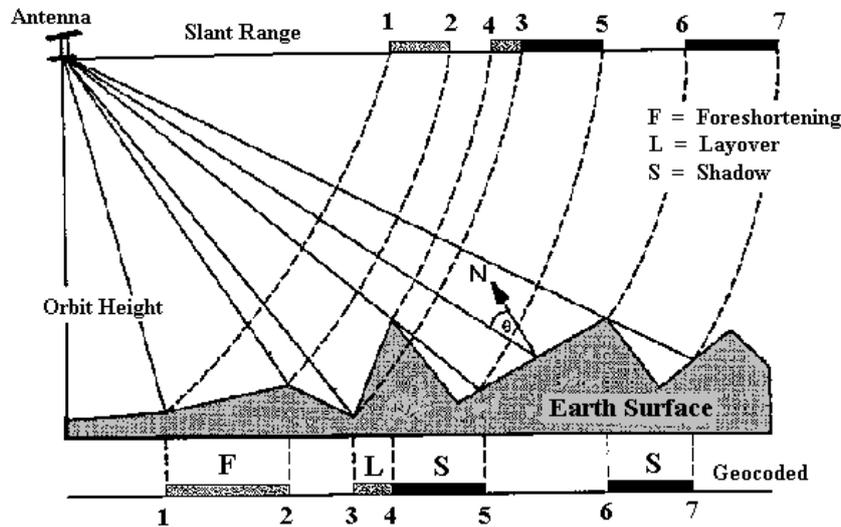


Figura 2: Efectos geométricos: la geometría acimut/distancia del SAR.

superficie bastante grande de terreno es muestreada en pocos píxeles por nuestro sistema. En las zonas de foreshortening fuerte es difícil obtener información. En laderas orientadas hacia la misma dirección de la línea de vista se produce un efecto contrario al foreshortening. El muestreo mejor obteniendo una mejor resolución. En resumen, cuando trabajamos en terrenos con pendientes, si hay la opción, es mejor trabajar con imágenes en las que la línea de vista sea paralela o en una dirección similar a la pendiente.

La figura 3 muestra un ejemplo de foreshortening. La zona mostrada es el volcán Etna (círculo negro), situado en Sicilia (en el sur de Italia). A la izquierda se muestra una imagen tomada por el satélite ERS en su trayectoria ascendente, es decir, viajando de sur a norte y midiendo hacia la derecha (“mirada” hacia el este). Se observa que la cara oeste del volcán queda toda concentrada en la línea blanca mientras que la cara Este está como alargada. Si miramos la imagen de la derecha, vemos el efecto contrario. El motivo es porque esta fue tomada en trayectoria descendente, es decir que viaja de norte a sur y midiendo hacia la derecha (con mirada hacia el oeste). Por tanto, en el caso descendente la cara Este quedaba expuesta a la línea de vista y a los efectos del foreshortening.

- *Layover*: este efecto ocurre cuando se encuentra un objeto vertical (edificio, precipicio) y la parte de arriba responde primero que la de abajo (véase figura 2). Aprovechar las zonas con layover dependerá mucho del entorno y no es tan crítico como el foreshortening.
- *Shadow*: el efecto sombra es cuando el radar no recibe respuesta de una zona. En este caso, a diferencia del óptico, sombra es equivalente a no-data. Normalmente se

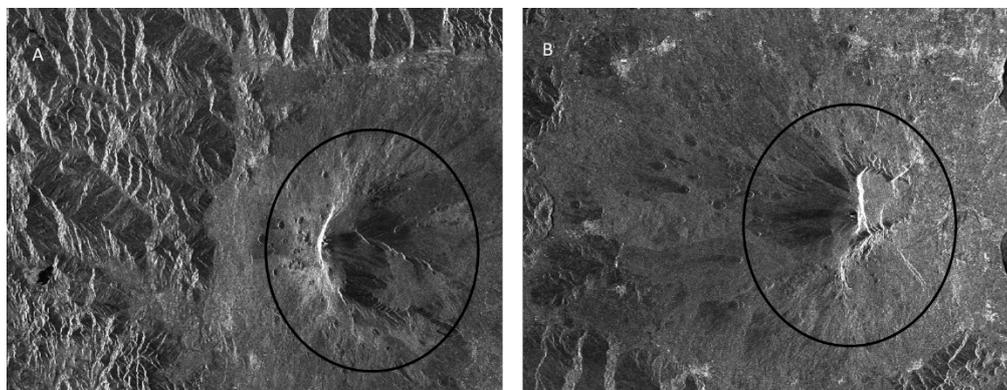


Figura 3: Ejemplo foreshortening sobre el monte Etna (Fuente: R. Lanari – Módulo SAR del Masterdel IG en “Airborne SAR Remote Sensing”).

produce en las zonas de máxima distancias con respecto al radar. Las zonas de shadow no se pueden utilizar para ningún tipo de análisis.

- *Línea de vista:* la interferometría SAR es un sistema que mide los cambios en la distancia entre medidas tomadas en tiempos diferentes de un objeto con respecto al sensor. Esto implica que para cualquier movimiento que sufra el objeto iluminado solo se observará la proyección de este en la línea que va del objeto al sensor. Esto tiene implicaciones importantes de cara a la correcta interpretación de los resultados. La primera es que pese a tener un sistema capaz de proporcionar imágenes 2 dimensionales de la tierra, solo podemos medir movimientos en una dirección (Figura 4). La segunda es que la capacidad de detectar el movimiento depende de su dirección real: cuanto más se acerca la dirección del movimiento a la línea de vista, mayor es la

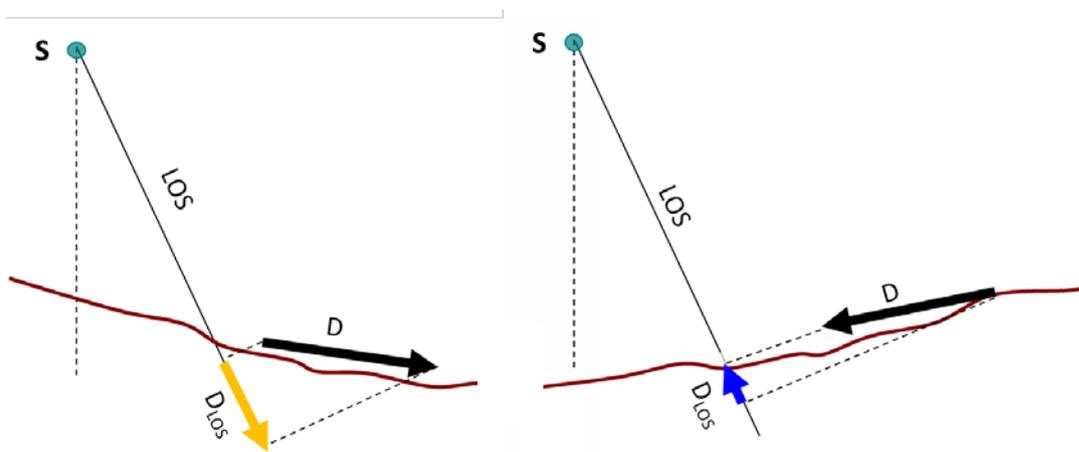


Figura 4: Efecto línea de vista (LOS). Dos ejemplos de movimiento real (flecha negra con una D) y movimiento medido por el SAR (D_{LOS}).

capacidad de la técnica para medirlo. El peor caso es un movimiento totalmente perpendicular a la línea de vista ya que la sensibilidad a los cambios en esta dirección es nula.

Por último, una implicación no menor, es que, en la mayor parte de los casos, el movimiento medido será subestimado. Por tanto, cuanto mayor sea el conocimiento del fenómeno mejor será la interpretación de los resultados.

- *Definición del píxel SAR:* generalmente, un resultado DInSAR consiste en un conjunto de puntos representados en un mapa. Para cada píxel disponemos de sus coordenadas en un sistema de coordenadas concreto, algunos parámetros estadísticos relacionados con la calidad de este, la velocidad de desplazamiento y la evolución temporal de este. Ahora bien, una pregunta muy natural sería ¿y que representa ese punto? La respuesta a esta pregunta no es trivial. En primer lugar, cuando hablamos de resolución pensamos en la distancia mínima sobre la que podemos discernir dos objetos. Por ejemplo, en el caso de Sentinel-1 la resolución en ese sentido sería de aproximadamente 4 m x 14 m. Sin embargo, en realidad, la naturaleza del eco recibido en cada una de esa parcela puede ser muy diferente, y por tanto la interpretación de lo que miramos también. Un píxel o punto recoge la suma de los ecos que todos los reflectores de esa parcela. En ese contexto, podemos tener un solo reflector muy fuerte que domina sobre todos (Persistent scatterer), varios reflectores con las mismas características (distributed scatterers) o simplemente ningún reflector. Para evitar el entrar a evaluar estos mecanismos de reflexión, una regla que en general puede funcionar es descartar todos aquellos puntos o pares de puntos aislados y ubicados en zonas de las cuales no disponemos información previa.
- *Explotación de la fase:* Como se ha dicho antes en este documento, la técnica DInSAR mide cambios en la distancia entre el objeto medido y el satélite entre adquisiciones tomadas a diferentes tiempos. Sin embargo, estos cambios se miden sin conocer la distancia absoluta entre sensor y objeto (véase figura 5). Para conseguir esto la técnica explota la fase de la señal utilizada por el sensor radar. A modo ilustrativo (Figura 6), uno puede imaginar que, para cada adquisición del satélite, el sistema almacena la posición sobre la onda en la que el eco de un objeto (píxel) es recibido por el sensor. Por tanto, cuando calculamos la diferencia de fase entre dos imágenes (interferograma), estamos midiendo los cambios de posición a lo largo de la onda del eco recibido que está directamente relacionado con el desplazamiento del objeto medido. La Figura 6 representa el concepto. Tenemos una señal que viaja en el espacio y dos medidas adquiridas en el tiempo (A_1, φ_1) y (A_2, φ_2): estos valores representan la fase y la amplitud recibidas por el satélite (eco) de un punto en los tiempos 1 y 2. La

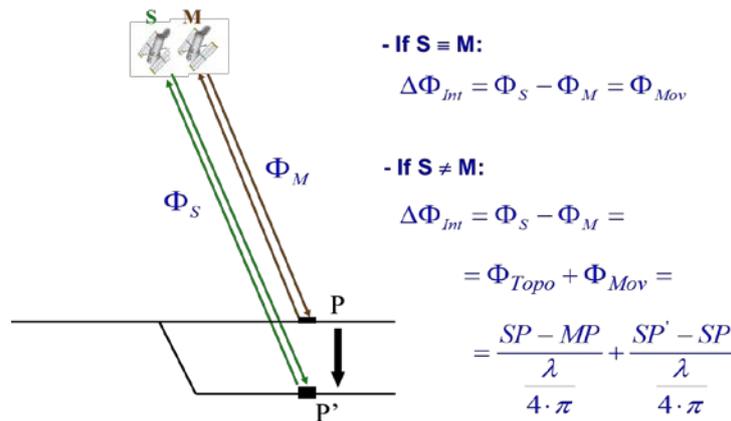


Figura 5: Principio de funcionamiento de la interferometría. Φ_{topo} es la componente debido a las diferentes posiciones del satélite en las dos adquisiciones. Φ_{Mov} representa la componente debida al movimiento.

figura muestra, que tanto si el punto en el tiempo 2 se recibiese en la posición (a) de la onda (dentro de la misma longitud de onda con respecto al tiempo 1) o en la posición (b), que sería una longitud de onda más tarde, la fase registrada en el tiempo 2 (y de consecuencia la diferencia de fase en el interferograma) sería exactamente la misma. Entonces la misma diferencia de fase puede representar la posición (a) cuanto todas las posiciones (a) ± n veces la longitud de onda (con n, numero entero, que va de 0 a infinito). Este aspecto viene generalmente descrito como “ambigüedad de fase” y tiene toda una serie de implicaciones importantes de cara a la comprensión de la técnica y de los resultados:

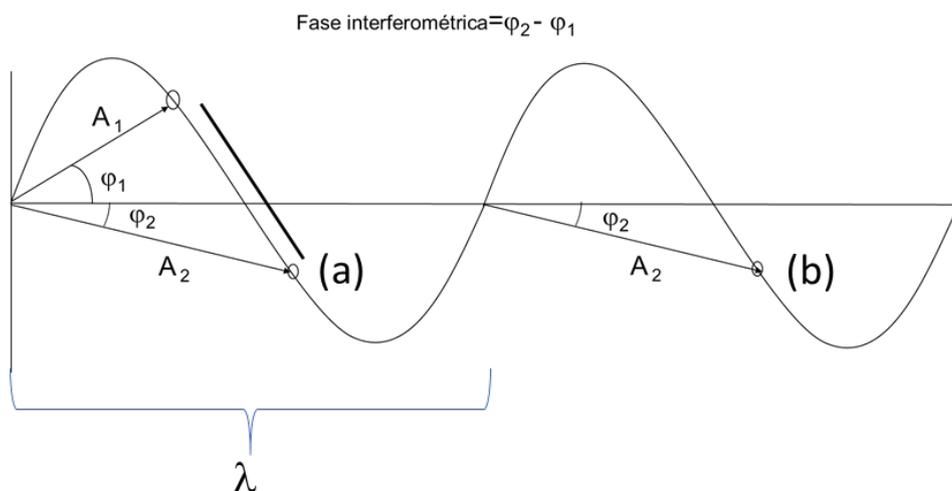


Figura 6: Representación del concepto de ambigüedad de fase. Consideramos (A_1, φ_1) la medida 1 y (A_2, φ_2) la medida 2. Como se observa, la fase interferométrica de un eco con respuesta en el mismo ciclo (a) o un ciclo más tarde (b) tendrían la misma fase interferométrica con respecto a la medida A1.

- *Ambigüedad de fase 1*: el hecho de trabajar a nivel de ciclo de onda (orden cm) nos permite llegar a precisiones milimétricas independientemente de la distancia a la que vuela el satélite. Sin embargo, la contrapartida es que los movimientos superiores a un ciclo pueden no ser vistos. Este aspecto tiene muchos matices, pero como regla general es difícil ver movimientos repentinos de orden centimétrico y con un comportamiento espacial irregular. Por tanto, colapsos, deslizamientos de varios centímetros al día o fenómenos de subsidencia de varios centímetros al día suelen ser objetos difíciles de medir con DInSAR.
- *Ambigüedad de fase 2*: cuando el movimiento acumulado es mayor a una longitud de onda necesitamos reconstruir la fase con el fin de obtener la medida correcta. El proceso de reconstrucción de la fase, conocido como desenrollado de fase (pase unwrapping), es una de las principales fuentes de error. Esto es debido a que es un problema con infinitas soluciones (Figura 6). La capacidad de realizar este proceso correctamente dependerá de diversos factores que incluyen: la velocidad del desplazamiento, el muestreo temporal (base temporal de nuestros interferogramas) y el muestreo espacial (la densidad espacial final de nuestras medidas). Estos factores se comentan más adelante. Como regla general, cuanto más información se tenga del fenómeno a medir, mejor será el resultado y más fácil la interpretación.
- *Medidas relativas*: Si el satélite pasase por exactamente el mismo sitio y las condiciones atmosféricas en ambas adquisiciones fuesen exactamente las mismas, entonces podríamos esperar que salvo movimientos mayores a una longitud de onda la diferencia de fase entre las dos adquisiciones representase al movimiento real en cada punto. Sin embargo, la probabilidad de que se cumplan las condiciones anteriores es prácticamente nula y la diferencia en el camino de ida y vuelta de la señal en cada una de las adquisiciones es mayor a una longitud de onda. Esas longitudes de onda de más se traducen en un offset a nivel de todo un interferograma. Por tanto, debemos fijar un punto o un conjunto de puntos como referencia en nuestro interferograma y referenciar todos los puntos a este.

Por último, de la figura 6 es fácil deducir también la relación que hay entre diferencia de fase y la diferencia de caminos recorrida por la onda en su viaje de ida y vuelta. Esta relación viene representada por:

$$\Delta r = \Delta\varphi \frac{\lambda}{2\pi}$$

Donde r es el camino de la onda en su viaje de ida y vuelta, $\Delta\varphi$ es la fase interferométrica y λ es la longitud de onda. Ahora bien, teniendo en cuenta que Δr representa el diferencial de la distancia a un mismo punto entre ambos tiempos de adquisición en el camino en la

ida y vuelta, debemos dividir en dos este para obtener el diferencial debido al desplazamiento del punto. I.e.

$$desp = \frac{\Delta r}{2} = \Delta\phi \frac{\lambda}{4\pi}$$

Donde *desp* representa el desplazamiento del punto.

2.2 Características del conjunto de datos de un procesado InSAR

Antes de pasar a analizar un resultado obtenido a partir de la técnica InSAR es recomendable conocer las características del conjunto de datos utilizado para obtenerlo. En esta sección se describen estos parámetros y se evalúa el posible impacto en el análisis. A modo ilustrativo, se han aportado valores concretos para el caso de satélite Sentinel-1.

- *Trayectoria del satélite*: en general, los satélites SAR adquieren siempre con la antena mirando hacia la derecha y en dos trayectorias diferentes: ascendente, es decir con el satélite viajando hacia el norte y descendente, i.e. viajando hacia el sur. Los datos de ambas trayectorias no se pueden combinar para realizar interferometría. Por tanto, nuestro procesado habrá sido realizado con datos adquiridos en una de ambas trayectorias. La tabla 1 describe los ángulos importantes de cada una de las trayectorias para el caso de Sentinel-1. La trayectoria seleccionada tendrá una influencia significativa en los resultados. A continuación, se listan los aspectos a tener en cuenta.
 - o Define la *dirección de la línea de vista del satélite* y, por tanto, delimita las zonas y direcciones de máxima y mínima sensibilidad a los desplazamientos. En particular, la trayectoria tiene especial relevancia cuando el objetivo de nuestras medidas son deslizamientos. Como aproximación muy general, la trayectoria ascendente (que mira hacia el este) es óptima para deslizamientos que miran hacia el este. La sensibilidad a los desplazamientos será máxima en deslizamientos paralelos a la línea de vista (orientación aprox. 82° con respecto al norte y pendiente aprox. 55° con respecto a la horizontal). De la misma forma, la descendente (que mira al oeste) tendrá sensibilidad máxima a desplazamientos con orientación aproximada de 278° con respecto al norte y con un pendiente de aprox. 55°.

<i>Trayectoria</i>	<i>Dirección de la órbita</i>	<i>Ángulo LOS</i>	<i>Ángulo de vista con respecto a la vertical</i>
<i>Ascendente</i>	172°	82°	≅ 30° (cercano)- 36° (medio) – 42° (lejano)
<i>Descendente</i>	8°	2788°	

Tabla 1: Principales ángulos de las trayectorias ascendente y descendente. Los ángulos son respecto al norte (0°) y creciendo en el sentido de las agujas del reloj.

En zonas con pendientes superiores a esos máximos se cae en zona de sombra. En zonas con valores por debajo, sufrimos pérdida de sensibilidad y por tanto subestimamos el movimiento real. Por lo que respecta a la orientación de la ladera con respecto al norte, cuanto más nos alejemos de la orientación de máxima sensibilidad mayor índice de subestimación tendremos siendo el peor de los casos un deslizamiento paralelo a la trayectoria del satélite. En este caso, la sensibilidad a los desplazamientos será casi nula. De nuevo, como regla general, si obtenemos desplazamientos en pendientes paralelos a la trayectoria del satélite, o bien tenemos un deslizamiento con una fuerte componente vertical (independiente de la línea de vista) o bien puede tratarse de un error residual (atmosfera, error de fase, ruido).

- Define la *resolución espacial* y por tanto un mayor o menor muestreo (Figura 7). Como se ha comentado en la sección anterior, la pendiente del terreno define la huella o resolución espacial de nuestro píxel. En general, cuando el objetivo de nuestro análisis se localiza en zonas inclinadas, es mejor buscar el efecto contrario al foreshortening con el fin de tener un mejor muestreo espacial. Sin embargo, este criterio es muy orientativo, dado que en función del tipo de superficie en la que trabajamos puede ser mejor tener peor resolución (aglutinar reflectores), pero medidas menos ruidosas.

Finalmente, cabe notar que siempre que sea posible, es preferible disponer de las dos trayectorias ya que el tener los dos resultados ayuda a mitigar los efectos negativos de cada geometría y también a interpretar mejor los resultados.

- *Longitud de onda*: La longitud de onda nos da una medida de las máximas prestaciones a las que podremos llegar con la técnica. A menor longitud de onda, mayor sensibilidad a los movimientos pequeños, pero también a los cambios. Por tanto, en zonas con reflectores fuertes y estables (en términos de reflexión) en el tiempo, cuanto menor sea la longitud de onda, mayores serán las prestaciones. Por el contrario, cuando nuestra zona de interés incluya también zonas rurales, con vegetación, probablemente cuanto mayor sea la longitud de onda mayor probabilidad de éxito tendremos. La elección de una u otra longitud de onda se toma buscando un equilibrio entre calidad, cobertura, resolución y también precio. Hoy en día, como solución general, Sentinel-1 representa un buen balance teniendo en cuenta los factores mencionados.
- *Número de imágenes y distribución temporal*: El número de imágenes a partir del cual se ha realizado el análisis es importante. Un mayor número de imágenes normalmente supone una mejor precisión en los resultados. La literatura recomienda utilizar como mínimo 15-16 imágenes para obtener resultados confiables. Sin embargo, esto no significa que no podamos obtener buenos resultados con menos imágenes. En este contexto, la distribución temporal de las imágenes juega un papel muy importante. Cuanto mayor es el periodo temporal de nuestro conjunto, mejores prestaciones

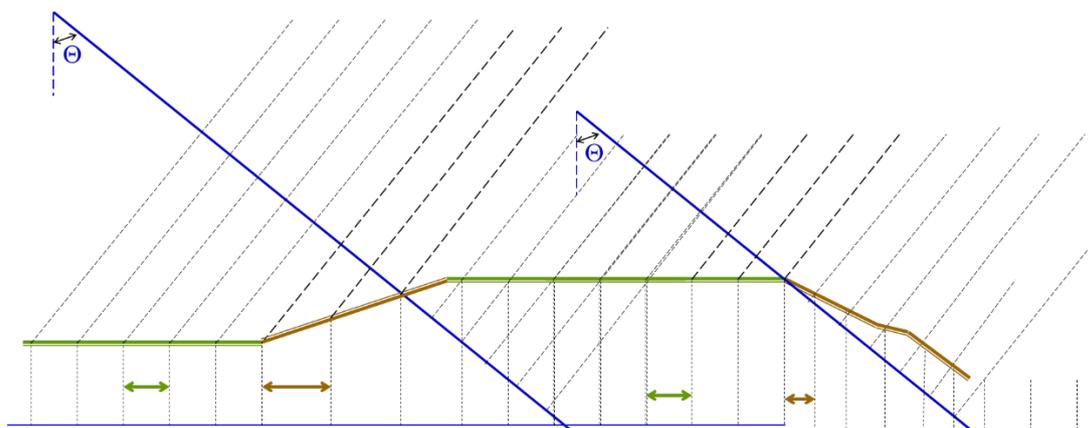


Figura 7: Muestreo en función de la pendiente del terreno.

obtendremos en el cálculo de la velocidad, pero mayor muestreo temporal necesitaremos para obtener series temporales de calidad, sobre todo en las áreas afectadas por movimientos. Al contrario, en periodos de tiempo corto (aprox. un año). Las velocidades estimadas serán más ruidosas, pero será posible obtener series temporales de calidad.

3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección contiene una serie de consejos prácticos para la correcta interpretación de los resultados DInSAR. Analizar datos DInSAR puede resultar complejo. Un consejo general es adaptar siempre el análisis a lo que necesitamos: si necesitamos estudiar una zona muy concreta, poner todo el esfuerzo en esa zona obviando el resto, si por el contrario se necesita un análisis general para detectar zonas con movimiento, entonces no intentar ir al detalle con todo lo que se analiza. El motivo de esto es que el nivel de procesado al que se puede llegar en una zona local es mucho mayor, comparado con cuando se procesan grandes áreas. A continuación, se listan los aspectos importantes a tener en cuenta. Se asume que nuestros resultados son en línea de vista.

- *Punto o área de referencia:* los resultados DInSAR nos proporcionan medidas relativas. El movimiento que medimos para cada punto siempre es respecto a alguna zona seleccionada como referencia. En este sentido al usuario debe saber cuál es la referencia utilizada en el procesado o simplemente referenciar todos los datos a una zona o punto que se sabe estable.

Cuando analizamos una zona local, como por ejemplo un deslizamiento, en un procesado más general, conviene referenciar todos los puntos del deslizamiento a una zona cercana. Esto puede ayudar a mitigar ruido o errores de desenrollado de fase.

- *Estimación de la precisión:* como norma general, los resultados vienen representados en un ambiente GIS sobre el que se acaba seleccionando una escala de colores para alguno de los parámetros de movimiento. En este contexto, un aspecto a tener en cuenta es que la calidad de los resultados DInSAR puede variar de punto a punto. La densidad espacial de nuestros resultados normalmente intenta adaptarse a las necesidades que uno como usuario final requiere. Sin embargo, muchas veces, esa adaptación requiere el subir el nivel de ruido aceptable en nuestras medidas. Una forma práctica de evaluar la precisión y de elegir una escala de fácil interpretación es calcular la desviación estándar (σ) en una zona que se sabe estable y fijar $\pm\sigma$ o $\pm 2\sigma$ como valores de “estabilidad” en nuestra escala de colores. Además, en caso de que tengamos dudas acerca de la zona de referencia utilizada en el procesado, podemos utilizar la media o mediana de la zona seleccionada como valor de referencia. El fijar una escala con $\pm\sigma$ o $\pm 2\sigma$ nos permitirá identificar de forma más directa las zonas en las que es más seguro que se hayan medido deformaciones. Una vez identificadas estas zonas, se pueden probar valores por debajo de $\pm\sigma$ para intentar detectar otras zonas activas. A medida que bajamos de valor, el nivel de ruido del mapa aumenta dificultando la discriminación entre zonas de movimiento y ruido. Cuanto mayor conocimiento del territorio estudiado se tenga, más fácil será la interpretación.
- *Interpretación de las zonas estables:* una vez hemos fijado nuestra escala de colores, se debe tener cuidado con la interpretación de los puntos con movimientos dentro del rango $\pm\sigma$ o $\pm 2\sigma$. Podemos decir que para esos puntos no se ha observado movimiento en el periodo estudiado, pero debemos poner especial atención a las zonas con potencial deslizamiento donde la orientación de nuestro fenómeno de estudio es importante. El caso más extremo son los movimientos con dirección paralela a la trayectoria del satélite (dirección de la órbita en la Tabla 1). En esos casos, si los hay puntos, seguramente siempre caerán en el rango $\pm 2\sigma$ pese a ser zonas activas. Esto es particularmente importante en el caso de los deslizamientos del terreno. Como norma general, se recomienda no descartar movimientos en deslizamientos con orientación próxima a la dirección del satélite. También se recomienda que en deslizamientos conocidos se evalúe a que movimiento real equivale el valor seleccionado como umbral de estabilidad. Esto permitirá tener un orden de magnitud de los movimientos medibles sobre el deslizamiento en cuestión.
- *Interpretación del signo:* los signos tienen interpretaciones diferentes en función del fenómeno que se estima. En base a la línea de vista, la interpretación es clara: la diferencia de signo en el movimiento se interpreta como acercamiento o alejamiento con respecto al satélite. La elección del significado de cada signo cae en el procesador. Este debe indicar el criterio utilizado en los signos. A partir de ahí, cuando se interpretan los resultados, un movimiento vertical que indica alejamiento del satélite

se interpreta como una subsidencia siendo el opuesto un levantamiento. Cuando hablamos de deslizamientos del terreno, fijada una trayectoria, los deslizamientos principalmente orientados hacia el este tendrán un signo mientras que los que están hacia el oeste tendrán signo opuesto (y serían de signo opuesto con la otra trayectoria).

- *Zonas difíciles de explicar*: bajo este título se incluyen toda una serie de efectos residuales que podemos encontrar en los mapas DInSAR. Es bastante habitual encontrar zonas de deformación difíciles de explicar desde el punto de vista físico o zonas en las que esperamos movimiento y aparecen como estables. Evitar este tipo de fenómenos requiere muchas veces experiencia en el operador. Es bastante habitual encontrar este tipo de zonas en procesados sin supervisión realizados por usuarios con falta de experiencia. Sin embargo, estas zonas no tienen que implicar siempre errores en el procesado. A continuación, se listan posibles explicaciones:
 - o *Deformaciones fuera de nuestro ámbito de interés*: un aspecto a tener en cuenta es que los puntos medidos no los elegimos nosotros en base a nuestro interés si no que, dentro de la zona de interés, el procesador intenta obtener el máximo número de medidas de calidad aceptable. Por tanto, hay un cierto grado de oportunismo en lo que medimos. Esto significa que a veces podemos medir puntos que tienen un comportamiento propio que nada tiene que ver con nuestro fenómeno de interés. Como se ha dicho anteriormente, el conocer bien la zona que estamos observando puede ayudar mucho a descartar este tipo de áreas.
 - o *Deformaciones por gradiente Térmico*: Un ejemplo claro del punto anterior y que suele aparecer en infraestructuras como puentes, torres o edificios altos es el movimiento de estos debido a cambios de temperatura. Si se miden este tipo de objetos no se puede descartar la aparición de estos movimientos en nuestros mapas. Esto normalmente pasa cuando el procesado abarca periodos cortos de tiempo en los que las temperaturas tienen un gradiente más o menos constante. Un ejemplo claro lo muestra la figura 8. Una forma de comprobar si lo que vemos puede estar relacionado con cambios de temperatura es obtener las series de temperatura ambiente en las fechas y horas de adquisición del satélite y ver su correlación con las series temporales de movimiento.
 - o *Filtrado atmosférico*: uno de los pasos críticos en el procesado interferométrico es el filtrado atmosférico. Este consiste en la aplicación de una serie de filtros espacio temporales que en general se rigen por hipótesis bastante fuertes sobre la señal atmosférica como por ejemplo alta correlación espacial y baja correlación temporal. Estas hipótesis pueden no cumplirse y dar lugar a resultados erróneos como, por ejemplo:

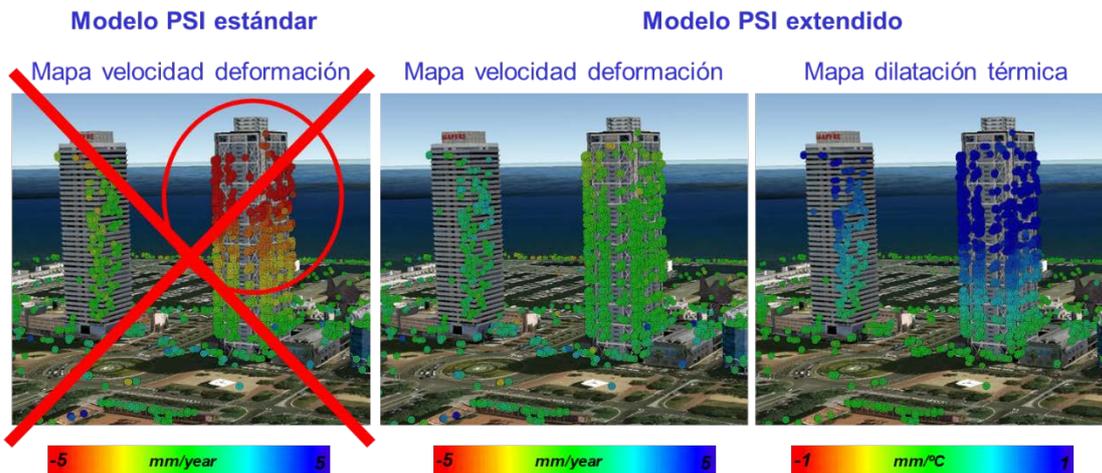


Figura 8: Ejemplo de mapa de velocidades de movimiento sobre un edificio. A la derecha el mapa es totalmente erróneo debido a que no se han considerado las dilataciones térmicas. El mapa del centro representa el mapa de velocidades de movimiento en mm/año obtenido considerando las dilataciones térmicas y a la derecha el mapa de los movimientos relacionados con la temperatura en mm/c°.

- Señales de deformación debidas a fenómenos atmosféricos muy locales no filtrados.
- Perdida de zonas de deformación filtradas como por ejemplo fenómenos de deformación cubriendo zonas grandes y con series temporales con poca correlación.
- Perdida de parte de la deformación: muchas veces la deformación medida puede estar subestimada debido a que parte de esta ha sido filtrada como atmósfera.
- *Efectos de “desvanecimiento” (fading effects):* estos efectos son característico solo de Sentinel-1 y aparecen cuando se explotan solo los interferogramas con base temporal corta e imágenes consecutivas. Normalmente aparecen en zonas en las que la coherencia se devalúa rápidamente en el tiempo. Estos efectos suelen desaparecer cuando en el procesado se utilizan varios interferogramas por imagen y máxima resolución
- *Error de desenrollado:* finalmente uno de los errores más comunes del DInSAR es el de desenrollado de fase. Este suele hacerse evidente en las series temporales y puede llevar a interpretaciones completamente erróneas. Los efectos de estos errores pueden ser evidentes como por ejemplo extraños saltos en las series temporales o totalmente invisibles como por ejemplo subestimación significativa o total de la deformación. Tener ambas trayectorias puede suponer una ayuda en este sentido permitiendo en muchos casos comprender mejor el fenómeno estudiado. Por último, cuando nos enfrentamos a zonas que sufren movimientos

bastante rápidos, es bueno tener los interferogramas enrollados para comprender mejor las magnitudes del movimiento y descartar posibles errores de desenrollado. La Figura 9 muestra un claro error de desenrollado debido a un movimiento muy rápido. La Figura muestra la serie temporal obtenida con DInSAR (rojo) y con GPS horizontal y vertical (verde). En este particular caso, se observa que hay dos periodos de movimiento uno más rápido y no “seguido” por el DInSAR debido al desenrollado de fase y otro, más lento y perfectamente seguido por el DInSAR. Este gráfico muestra un claro ejemplo de cuando puede ser útil y cuando no el DInSAR: (i) para ver cambios de tendencia y evaluar la instalación de sensores in-situ; (ii) para hacer un seguimiento post-trabajos y acortar el tiempo de medidas in-situ.

4 RESUMEN FINAL

En este documento se han presentado una serie de consejos prácticos para la correcta interpretación de mapas de movimientos del terreno obtenidos a partir de técnicas DinSAR. El objetivo del documento es facilitar el acceso a este tipo de datos por parte de usuarios no expertos.

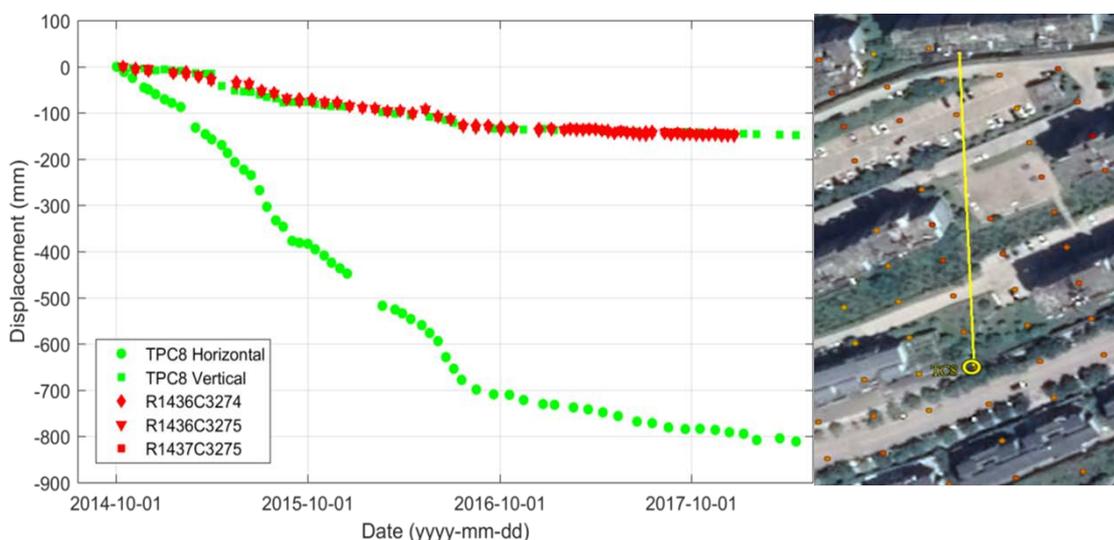


Figura 9: Ejemplo de error de desenrollado de fase.

BIBLIOGRAFÍA

Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., & Bull, D. (2019). The Application of Convolutional Neural Networks to Detect Slow, Sustained Deformation in InSAR Time Series. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 11850-11858.

Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., ... & Ligüerzana, S. (2017). A methodology to detect and update active deformation areas based on sentinel-1 SAR images. *Remote sensing*, 9(10), 1002.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.

Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O., Agudo, M., & Fernández, P. (2005). Land deformation measurement using SAR interferometry: state-of-the-art. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2005(6), 497.

Del Soldato, M., Solari, L., Raspini, F., Bianchini, S., Ciampalini, A., Montalti, R., & Casagli, N. (2020, May). How to manage a monitoring service based on satellite interferometry: a practical approach from the Tuscany region (central Italy). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 1952).

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.

Solari, L., Bianchini, S., Franceschini, R., Barra, A., Monserrat, O., Thuegaz, P., ... & Catani, F. (2020). Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 87, 102028.

Villarroel, C. D., Tamburini Beliveau, G., Forte, A. P., Monserrat, O., & Morvillo, M. (2018). DInSAR for a Regional inventory of active rock glaciers in the dry andes mountains of argentina and chile with sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 10(10), 1588.