



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOTECNOLOGÍAS
CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**INTERFEROMETRÍA DE IMÁGENES RADAR DE APERTURA SINTÉTICA
(DINSAR) APLICADA AL ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO DEL
TERRENO PRODUCIDO TRAS UN TERREMOTO**

Autor: Rubén Gómez Vales
Tutor: Benjamín Arias Pérez
Julio 2020

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad de Salamanca por facilitar el acceso a una titulación oficial en el ámbito de las ciencias de la tierra en modo no presencial, mucho antes de que se mostrara como algo inevitable en estos tiempos que vivimos.

Gracias por facilitar el acceso a tiempo parcial para la gente que nos resistimos a dejar de estudiar, a pesar de la edad, el trabajo y otras obligaciones o placeres.

Gracias a mi tutor por animarme a profundizar en un tema como el que he abordado en este proyecto.

Y por encima de todo, gracias a mi familia, por el tiempo robado.

RESUMEN

El uso de imágenes radar en aplicaciones geomáticas está ampliamente extendido, pero no siempre se consiguen resultados óptimos debido a la complejidad de las imágenes y de la metodología que se debe utilizar para su análisis. Una de las aplicaciones en el ámbito de la geomática es el uso de pares interferométricos para la detección y medida de subsidencias rápidas. El caso más típico es el desplazamiento relativo entre bloques geológicos producidos durante los terremotos.

A lo largo de este trabajo se han utilizado técnicas de interferometría diferencial (DInSar) sobre pares de imágenes Sentinel-1 tomadas antes y después de un terremoto sobre diversas zonas del mundo. El objetivo era caracterizar los factores a tener en cuenta para la aplicación de estas tecnologías y establecer cuáles son sus limitaciones.

Se ha comprobado que las imágenes deben cumplir una serie de condiciones de toma y que la técnica no es efectiva en cualquier escenario. Las zonas con mucha vegetación o humedad introducen ruido y falta de coherencia entre las imágenes. Además, aunque teóricamente se podrían detectar desplazamientos del orden de varios milímetros, la influencia de los factores atmosféricos reduce considerablemente la precisión de la medida.

Por último, se ha observado que, si bien es necesario un modelo digital de elevación de calidad, su influencia en el caso de Sentinel-1 no es tan importante debido las características orbitales del sistema.

ABSTRACT

The use of radar imagery in geomatic science is widely spread, but optimal results are not always achieved due to the complexity of images and methodologies. One of the applications in the field of geomatics is the use of interferometric pairs for the detection and measurement of rapid subsidence. The most typical case is the relative displacement between geological blocks produced during earthquakes.

During this study, differential interferometry technics (DInSAR) have been used with pairs of Sentinel-1 images taken before and after an earthquake over different areas in the world. The objective was to characterize the factors to be considered in the use of these technologies and to establish their limitations.

It has been proved that the pair of images must accomplish certain requirements and the technic can't be use in every scene. Areas with a lot of vegetation or humidity introduce noise and lack of coherence between the images. Furthermore, although movements of the order of several millimetres could theoretically be detected, the influence of atmospheric factors considerably reduces considerably the precision of the measurement.

Finally, it has been observed that, although a good quality digital elevation model is necessary, its influence in the case of Sentinel-1 is not so important due to the orbital characteristics of the system.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.	Breve historia del desarrollo de los sistemas radar.....	9
1.2.	Situación actual y aplicaciones de los sistemas radar.....	11
1.3.	Sistemas radar en el análisis de daños causados por un terremoto. ...	12
1.4.	Objetivos perseguidos con el desarrollo del trabajo.....	14
2.	MARCO TEÓRICO.....	16
2.1.	Sensores radar en los sistemas de observación de La Tierra.....	16
2.2.	Radar de apertura sintética (SAR).	19
2.3.	La imagen radar.....	20
2.3.1.	Geometría de la toma de imagen.	20
2.3.2.	Procesamiento de la imagen cruda.	21
2.3.3.	Resolución de las imágenes.....	22
2.3.4.	Efectos geométricos en las imágenes SAR.....	23
2.3.5.	Retrodispersión (<i>Backscattering</i>).....	25
2.3.6.	Efecto sal y pimienta (<i>Speckle</i>).....	26
2.4.	Interferometría.....	28
2.5.	Factores que influyen en la formación del interferograma.....	30
2.6.	Interferometría diferencial.	32
2.7.	El programa Copernicus y las Misiones Sentinel.	32
2.8.	Misión Sentinel 1A/1B	33
3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	38
3.1.	Áreas de estudio.	38
3.2.	Hardware y software utilizado.	39
3.3.	Flujo de trabajo.	40
3.3.1.	Localización y descarga de las imágenes.	40
3.3.2.	Importación en SNAP.	40
3.3.3.	Aplicación de datos orbitales precisos.....	41
3.3.4.	Análisis de línea base y altura de ambigüedad.	41
3.3.5.	Corregistro de imágenes.	42
3.3.6.	Generación del interferograma y eliminación de las componentes de tierra plana y topográfica.....	43
3.3.7.	Eliminación de las zonas de solape (<i>deburst</i>)	44
3.3.8.	Mosaicado de imágenes de distintas bandas.....	44
3.3.9.	Filtrado del interferograma.....	44

3.3.10.	Análisis de la coherencia.....	45
3.3.11.	Desenrollado de fase (<i>Phase Unwrapping</i>).....	46
3.3.12.	Conversión de fase a desplazamiento.....	47
3.3.13.	Refinamiento.	48
3.3.14.	Corrección geométrica.	48
3.3.15.	Exportación.	49
3.3.16.	Generación de perfiles	49
4.	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	50
4.1.	Desplazamiento del terreno tras un terremoto. (Xinjiang, China).....	50
4.2.	Influencia de la coherencia en la generación del interferograma. Terremoto de Loreto (Perú) 2019.	64
4.3.	Utilización en terremotos de baja intensidad y caracterización de los factores atmosféricos. Terremoto de Alicante 2018.....	65
4.4.	Influencia de la calidad del modelo digital del terreno. Terremoto de Alicante 2018.	71
4.5.	Aplicación de la técnica DInSAR en grandes terremotos. (California, Estados Unidos, 2019).	73
5.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS ADICIONALES DE ESTUDIO.....	77
5.1.	Conclusiones.....	77
5.2.	Líneas de estudio adicionales.	79
6.	REFERENCIAS.....	80
	ANEXO A	81
	ANEXO B	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Figura 1.1. Ilustración del diseño de la primera patente para la detección de obstáculos utilizando ondas electromagnéticas, del inventor alemán Christian Hulsmeyer, año 1904. Fuente: https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/	9
Figura 1.2. Cartografía de Brasil generada a partir de imágenes radar. Año 1976.	10
Fuente: https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/	10
Figura 1.3. Portada de la revista Nature del 8 de julio de 1993.	13
Fuente: https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/	13
Figura 1.4. Frecuencia de terremotos en el mundo por magnitud. (Fuente: https://www.ign.es)	13
Figura 2.1. Espectro electromagnético y uso de las diferentes bandas.	16
Fuente: ARSET (Applied Remote Sensing Training) https://arset.gsfc.nasa.gov/	16
Figura 2.2. Ilustración sobre el funcionamiento de los sensores pasivos y activos. (López, 2010)	17
Figura 2.3. Penetración de la señal radar en distintos escenarios según su longitud de onda. Fuente: Radar Course 2. https://earth.esa.int/	18
Figura 2.4. Clasificación de las señales radar según su longitud de onda. Fuente: http://www.ign.es/	18
Figura 2.5. imagen ilustrando la apertura sintética: Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar (http://www.ign.es/)	20
Figura 2.6. Geometría de la toma en sensores SAR (Yalvaç, 2020).	21
Figura 2.7. Resolución en alcance en las imágenes SAR. Fuente: 3rd ESA Advance Training on Ocean Remote Sensing. (https://earth.esa.int/)	23
Figura 2.8. Efectos geométricos en una imagen SAR. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (http://www.ign.es/)	24
Figura 2.9. Imagen TerraSAR-X del Gran Cañon del Colorado donde se muestran los efectos de escorzo, plegado y sombra.	25
Figura 2.10. Mecanismos de retrodispersión. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (http://www.ign.es/)	26
Figura 2.11. Ilustración de cómo se produce el efecto sal y pimienta por la respuesta de todos los dispersores de un pixel. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (http://www.ign.es/).	27
Figura 2.12. Efecto sal y pimienta (speckle) y su atenuación utilizado y filtro Lee Sigma.....	27
Figura 2.13. Fase recibida por el sensor en función de la distancia. Fuente: TM-19, 2007.	28
Figura 2.14. Configuración geométrica para interferometría. Fuente TM-19, 2007	29
Figura 2.15. Modos de toma de la Misión Sentinel-1. Fuente: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes	35
Figura 2.16. Modo de toma IW mediante la técnica TOPSAR. Fuente: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath	36
Figura 2.17. Aspecto de una imagen Sentinel-1 tomada en modo IW mediante técnica TOPSAR. Fuente: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath	36
Figura 3.1. Búsqueda en el repositorio de imágenes Sentinel del Copernicus Access Hub.	40

Figura 3.2. Visualización de dos imágenes corregistradas en los canales RGB. Aunque se aprecian puntos en rojo o azul, el aspecto general es el de una imagen en escala de grises... 43	43
Figura 3.3. De izquierda a derecha: interferograma crudo, interferograma una vez eliminada la componente de tierra plana e interferograma sin contribución de tierra plana ni topográfica. 43	43
Figura 3.4. Interferograma sin filtrar y después de aplicar el filtro de Goldstein..... 45	45
Figura 3.5. Desenrollado de fase. Izquierda: fase absoluta. Derecha: Fase enrollada módulo 2π . Fuente: TM-19, 2007. 46	46
Figura 4.1. Interferograma filtrado del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020. 50	50
Figura 4.2. Perfil perpendicular a la línea de fractura sobre la imagen de fase enrollada a la línea de fractura donde se observa el ruido introducido por la falta de coherencia. 51	51
Figura 4.3. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020 52	52
Figura 4.4. Superior: Desplazamientos en geometría del plano de toma en el par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020. Inferior: Perfil arbitrario sobre la imagen atravesando la línea de ruptura. 52	52
Figura 4.5. Mapa de desplazamientos del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020. 53	53
Figura 4.6. Perfiles 6 y 7 sobre el mapa de desplazamientos del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020. 54	54
Figura 4.6. Interferograma filtrado del par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020. 54	54
Figura 4.7. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020. 55	55
Figura 4.8. Desplazamientos en geometría del plano de toma y perfil arbitrario en el par Xinjiang Ascendente 10/01/2020 - 22/01/2020. 55	55
Figura 4.9. Estadísticas del mapa de desplazamientos en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020. 56	56
Figura 4.10. Estadísticas del mapa de desplazamientos en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020, una vez corregido el error de cero. 56	56
Figura 4.11. Mapa de desplazamientos del par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020. 57	57
Figura 4.12. Líneas de desplazamiento cero según los pares ascendente y descendente en el escenario de Xinjiang. 57	57
Figura 4.13. Comparación entre los perfiles de desplazamiento de los pares ascendente y descendente en el escenario de Xinjiang. 58	58
Figura 4.14. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020. 59	59
Figura 4.15. Interferograma filtrado del par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020. 60	60
Figura 4.16. Histograma del interferograma desenrollado del par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020. 60	60
Figura 4.17. Histograma del interferograma desenrollado del par Xinjiang Descendente 29/12/2019 - 10/01/2020. 61	61
Figura 4.18. Comparación entre la imagen de desplazamientos y el modelo digital de elevaciones en el par Xinjiang Descendente 29/12/2019 - 10/01/2020..... 61	61
Figura 4.19. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019. 62	62
Figura 4.20. Interferograma desenrollado filtrado con valores de coherencia mayores que 0.6 en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019. 62	62

Figura 4.21 Estadísticas del interferograma desenrollado en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019.	63
Figura 4.21 Interferograma enrollado en el par Loreto Descendente 18/05/2019 – 30/05/2019.	64
Figura 4.22. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Loreto Descendente 18/05/2019 – 30/05/2019.....	65
Figura 4.22. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.	66
Figura 4.23. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018, enmascarando la zona correspondiente al mar Mediterráneo.	66
Figura 4.24. Imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 y sus estadísticas en el par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.	67
Figura 4.25. Imagen de coherencia filtrada para mostrar solo los valores mayores que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.	68
Figura 4.26. Estadísticas de coherencia con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.	68
Figura 4.27. Imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.	69
Figura 4.28. Estadísticas de la imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.	69
Figura 4.29. Estadísticas de la imagen de desplazamiento una vez corregido el error de cero en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.	69
Figura 4.30. Mapa de desplazamientos en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.....	70
Figura 4.31. Modelo digital de elevaciones en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.....	70
Figura 4.32. Estadísticas de la diferencia de desplazamientos calculados usando el SRTM de 1 y 3 segundos en el par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.....	72
Figura 4.33. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par California Descendente 04/06/2019 – 16/06/2019.	73
Figura 4.34. Interferograma filtrado en el par California Descendente 04/06/2019 – 16/06/2019.	74
Figura 4.35. Terremotos registrados en Ridgecrest, California hasta mediados del mes de junio de 2019. Fuente: Contribución en Wikipedia del usuario Phoenix777. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Map_of_2019_Ridgecrest_earthquakes.svg	74
Figura 4.36. Mapa de desplazamientos y perfil transversal en el par California Descendente 04/07/2019 – 16/07/2019.	75

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Breve historia del desarrollo de los sistemas radar.

Radar es el acrónimo de *Radio Detection And Ranging*. El término se utiliza para nombrar los sistemas para la detección a distancia mediante el envío y recepción de una señal en una banda determinada del espectro electromagnético. El descubrimiento y desarrollo de la tecnología radar está ligado al del electromagnetismo.

En 1865 James Maxwell recogió los resultados de los experimentos realizados desde principios del siglo XIX sobre la luz, la electricidad y el magnetismo y postuló, en su teoría general del electromagnetismo, que todos esos fenómenos podían describirse mediante el mismo conjunto de fórmulas.

Pasaron años hasta que la comunidad científica asimiló sus planteamientos, hasta que en 1888 Hertz realizó una serie de experimentos que demostraban que las teorías de Maxwell eran correctas.

A principios del siglo XX, se empieza a trabajar en la idea de aplicar el conocimiento sobre electromagnetismo al concepto de ecolocalización, ya conocido y utilizado en aquella época. Así, en 1904, el inventor alemán Christian Hulsmeyer, registra la primera patente sobre un sistema realizable para la detección de obstáculos mediante ondas electromagnéticas (Figura 1.1).

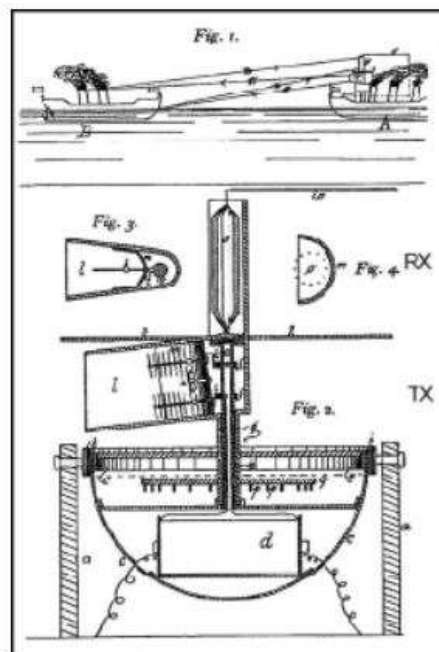


Figura 1.1. Ilustración del diseño de la primera patente para la detección de obstáculos utilizando ondas electromagnéticas, del inventor alemán Christian Hulsmeyer, año 1904.

Fuente: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>

El siguiente hito en el desarrollo de los sistemas radar se produce en el año 1922, cuando Marconi presenta ante el *American Institute of Electrical Engineers*, el actual IEEE, una descripción completa de un sistema capaz de detectar inmediatamente la presencia de un barco y su rumbo, en condiciones de niebla espesa (Raboy, 2016). El interés para aplicaciones militares de esta nueva tecnología hizo que la mayor parte de los experimentos de aquella época se llevaran a cabo en instalaciones militares y lejos del conocimiento público.

Si bien se siguieron realizando experimentos en el ámbito de la meteorología, desde entonces el desarrollo del radar estuvo ligado a las aplicaciones militares y fue durante la Segunda Guerra Mundial que recibió el mayor impulso.

En 1940 se consigue reducir el tamaño de los sistemas radar hasta el punto de poder utilizarlos en aviones para localizar objetivos el terreno durante los bombardeos nocturnos o condiciones de nubosidad (Goodhouse, 2019), y en 1941 la marina de los Estados Unidos acuña por primera vez el término 'radar'.

Finalizada la segunda guerra mundial uno de los mayores avances en el desarrollo del radar fue el aprovechamiento del efecto Doppler, cuando emisor o receptor están en movimiento, para aumentar la resolución de los sistemas, base de lo que se conoce hoy en día como radares de apertura sintética (SAR)

A lo largo de los años 50, 60 y 70 se empiezan a generalizar las aplicaciones civiles y se consigue realizar cartografía gracias a sistemas radar de zonas de selváticas de difícil acceso y habitualmente cubiertas de nubes, como Panamá, Venezuela o la selva del Amazonas (Figura 2).



Figura 1.2. Cartografía de Brasil generada a partir de imágenes radar. Año 1976.
Fuente: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>

En los años 70 se desarrollan los sistemas satelitales y en 1978 se lanza el Seasat, el primer satélite civil capaz de tomar imágenes radar de La Tierra que, aunque originariamente estaba pensado para la observación de los océanos, se aprovechó también durante sus cuatro meses de vida para aplicaciones sobre la superficie terrestre.

En el año 1993 se realizan los primeros trabajos sobre interferometría de imágenes radar, precisamente relacionados con los desplazamientos producidos tras un terremoto (Didier Massonnet, 1993)

Desde entonces uno de los mayores logros en la teledetección mediante imágenes radar han sido la generación de modelos digitales de cobertura global por parte de las misiones SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y TerraSAR-X TanDEM-X (Schmullius, 2019).

1.2. Situación actual y aplicaciones de los sistemas radar

El uso de ondas electromagnéticas en la banda radar está muy extendido en diferentes ámbitos de la ciencia. Para el público no especializado, sus aplicaciones más conocidas son su utilización en la meteorología para detectar precipitaciones o en los aeropuertos para la gestión del tráfico aéreo.

Las aplicaciones en el ámbito de la geomática son menos conocidas y han ido desarrollándose en los últimos 40 años con el lanzamiento de plataformas satélites con sensores radar de cada vez mejores prestaciones.

En concreto, relacionadas con la ciencia Geomática se han desarrollado las siguientes aplicaciones:

- Cartografía de zonas de difícil acceso y con gran cobertura nubosa.
- Aplicaciones en clasificación automática del suelo haciendo uso de la polarización.
- Detección automática de cambios con el uso de imágenes de coherencia.
- Generación de modelos digitales de elevación mediante técnicas de radargrametría.
- Generación de modelos digitales de elevación mediante técnicas de interferometría.

- Detección de subsidencias rápidas del terreno mediante interferometría diferencial.
- Detección de subsidencias lentas mediante interferometría en series de imágenes.
- Otras aplicaciones como la detección de objetivos en movimiento o medida de la velocidad de vehículos o embarcaciones.

Las bases teóricas de las técnicas que desarrollan estas aplicaciones están muy asentadas y son muchas las empresas de software especializado en imágenes que las han incorporado a sus productos, en la mayoría de los casos, especializándose en algún grupo de aplicaciones. Así se puede hablar de ERDAS, ENVI Sarscape, PCI Geomatics o SARproZ como algunas empresas que ofrecen capacidades de análisis radar en sus productos.

Uno de los mayores problemas en el análisis de este tipo de imágenes es la dificultad para interpretarlas, ya que son muy distintas a los que estamos acostumbrados a percibir con el sentido de la vista. Además, también se puede hablar de complejidad en el sentido matemático puesto que un elemento de información de la imagen o píxel, es un número complejo que almacena la información de intensidad y fase de la señal de retorno.

Las metodologías de trabajo sobre imágenes radar también encierran cierta dificultad, cada aplicación requiere que las imágenes cumplan unas condiciones específicas y son muchos los parámetros que modelan el proceso y que pueden influir en los resultados. En la mayoría de las ocasiones, existen unos parámetros óptimos para las imágenes de una plataforma en concreto, cuando se dan unas condiciones estándar, sin embargo, hay ocasiones en las que es necesario conocer profundamente la naturaleza de las imágenes radar y cada uno de los factores que influyen en el producto final para encontrar los parámetros adecuados en cada tipo de análisis.

1.3. Sistemas radar en el análisis de daños causados por un terremoto.

En 1993 se publica en la revista Nature el primer trabajo sobre los efectos de un terremoto sucedido en California, demostrando que es posible utilizar técnicas de interferometría en imágenes radar obtenidas por satélite. Se puede ver cómo la primera vez que se utiliza la técnica se aplica en el contexto de la medida de desplazamientos tras un seísmo (Didier Massonnet, 1993).



Figura 1.3. Portada de la revista Nature del 8 de julio de 1993.
Fuente: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>

Se estima que se producen al año alrededor de 145 000 terremotos de magnitud mayor que 3,0 en el mundo.

Frecuencia de terremotos en el mundo	
Magnitud	Promedio anual
> 8,0	1
7,0 – 7,9	17
6,0 – 6,9	134
5,0 – 5,9	1319
4,0 – 4,9	13.000
3,0 – 3,9	130.000
2,0 – 2,9	1.300.000

Figura 1.4. Frecuencia de terremotos en el mundo por magnitud. (Fuente: <https://www.ign.es>)

La gran capacidad destructiva de los terremotos ha hecho que sea un fenómeno muy estudiado en el ámbito de la ciencia. Se conoce bien cuáles son sus causas, dónde y por qué se producen, y que fenómenos tienen lugar durante el evento. Sin embargo, no es posible predecir cuándo va a tener lugar el siguiente terremoto.

En el mundo hay zonas con una gran sismicidad. Si esas zonas están desarrolladas, tienen alta densidad de población y el daño potencial es grande, suelen disponer de sistemas de monitorización y el riesgo sísmico es considerado en todos los ámbitos, desde el de la ingeniería civil, al ámbito sanitario o social.

Los terremotos no se pueden predecir y en la mayoría de los casos a lo largo del mundo, no se pueden realizar medidas previas por métodos topográficos convencionales y no se puede, por tanto, medir cuánto ha sido el desplazamiento entre las placas producido tras el terremoto, ya que no existe una referencia.

En ese sentido, hay plataformas satelitales que ofrecen una cobertura global de imágenes sobre el planeta cada cierto tiempo, lo que permite disponer referencias anteriores al evento y medir así sus posibles efectos. Este es el caso de la plataforma Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA), que cada 6 días obtiene una imagen de cualquier zona sobre La Tierra con las mismas condiciones de toma. Las imágenes son públicas y están disponibles en Internet, en el repositorio Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>).

El software necesario para el tratamiento de las imágenes también es público, lo que supone que, sin coste alguno, se pueden monitorizar el desplazamiento entre placas tectónicas en cualquier lugar del mundo, con las limitaciones de la metodología y con una precisión que puede llegar a ser subcentimétrica

1.4. Objetivos perseguidos con el desarrollo del trabajo.

El objetivo perseguido con este trabajo es doble:

1. Utilizar la técnica en un terremoto en particular que tuvo lugar el 19 de enero de 2020 en la provincia de Xinjiang en China. Se ha elegido este terremoto porque es relativamente reciente, su magnitud 6.0 se puede considerar como media-alta y se espera que la liberación de energía producida durante el evento haya causado efectos detectables en el estudio. Además, la zona presenta unas características ambientales que a priori la hacen favorable al uso de la metodología DInSAR.
2. El segundo objetivo es aprovechar el trabajo anterior para caracterizar los factores que influyen en la metodología y determinar en qué condiciones es aplicable. La utilización de varios pares interferométricos en el estudio del terremoto de China, permite analizar las diferencias e interpretarlas estableciendo una serie de teorías que deben ser contrastadas. Para ello, se ha aplicado la misma técnica en terremotos que han tenido lugar en otros lugares del mundo en diferentes condiciones y se han comparado los resultados.

En la introducción ya se dijo que la metodología es conocida y ha sido utilizada con éxito en múltiples ocasiones. Esto significa que ya se conoce que la coherencia, los factores atmosféricos o el modelo digital de elevaciones son determinantes en la obtención de resultados, y en ese sentido este trabajo no aporta nuevos datos.

Lo que se pretende es mostrar ejemplos de la influencia de esos factores y demostrar claramente cuáles son las limitaciones de la técnica, ya que tanto dentro como fuera del ámbito académico es frecuente encontrar casos en los que no se han obtenido resultados o los resultados obtenidos no son los esperados por no haber tenido en cuenta esos factores.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Sensores radar en los sistemas de observación de La Tierra.

Los sistemas de observación de la tierra se basan en la medición desde la distancia de la energía electromagnética procedente de La Tierra. El ser humano clasifica esa energía en función de su longitud de onda estableciendo lo que se conoce como espectro electromagnético (figura 2.1).

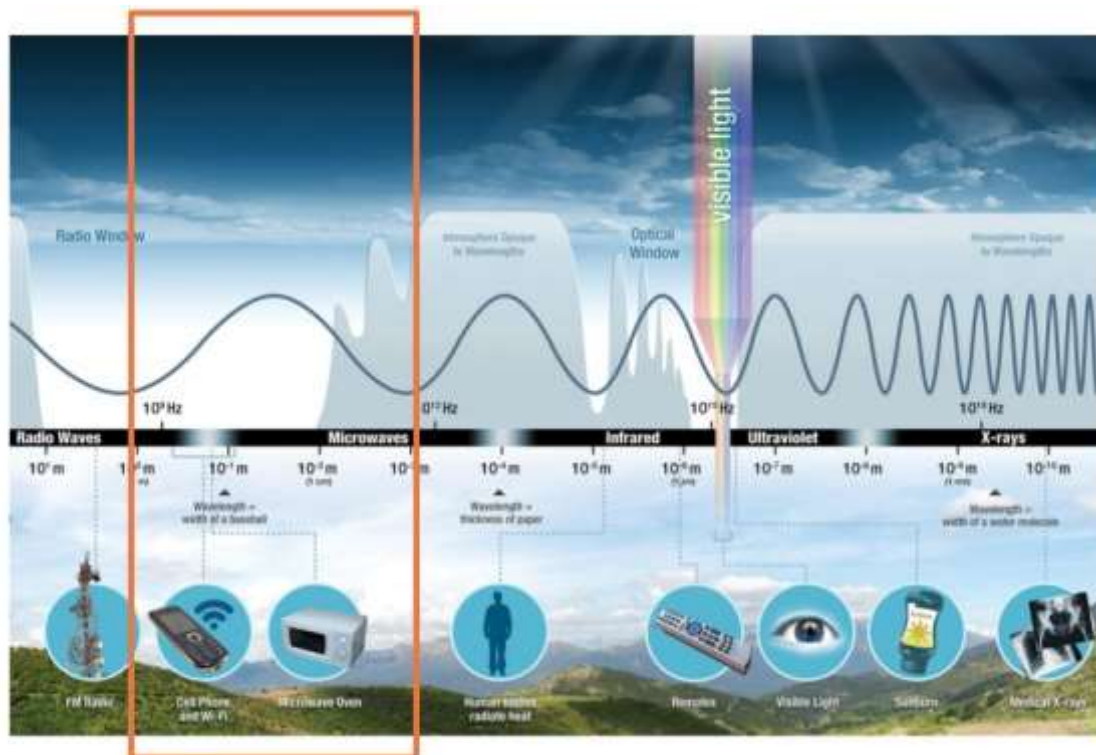


Figura 2.1. Espectro electromagnético y uso de las diferentes bandas.
Fuente: ARSET (Applied Remote Sensing Training) <https://arset.gsfc.nasa.gov/>

Una de las clasificaciones que se suelen hacer de los sistemas de observación de La Tierra es según su interacción con la escena observada. Así, se distingue entre sistemas pasivos y sistemas activos.

Los sistemas pasivos se limitan a medir la energía procedente de la escena de forma natural. No hay interacción y los sensores captan la energía que los cuerpos emiten o reflejan de otras fuentes naturales como el sol, especializándose en una banda o franja del espectro electromagnético.

Los sensores radar son sensores activos. Esto quiere decir que envían una señal a la escena y miden la energía recibida. En el caso del radar se utiliza la banda de las microondas que comprende longitudes de onda desde 1 metro a 0,1 centímetros. La energía emitida es una señal coherente, de la que se conocen

sus propiedades físicas como la longitud de onda, fase y polarización. Como también se conoce el momento en el que se emite la señal, es posible medir el tiempo que tarda en retornar, la intensidad, la fase y la polarización con la que vuelve.

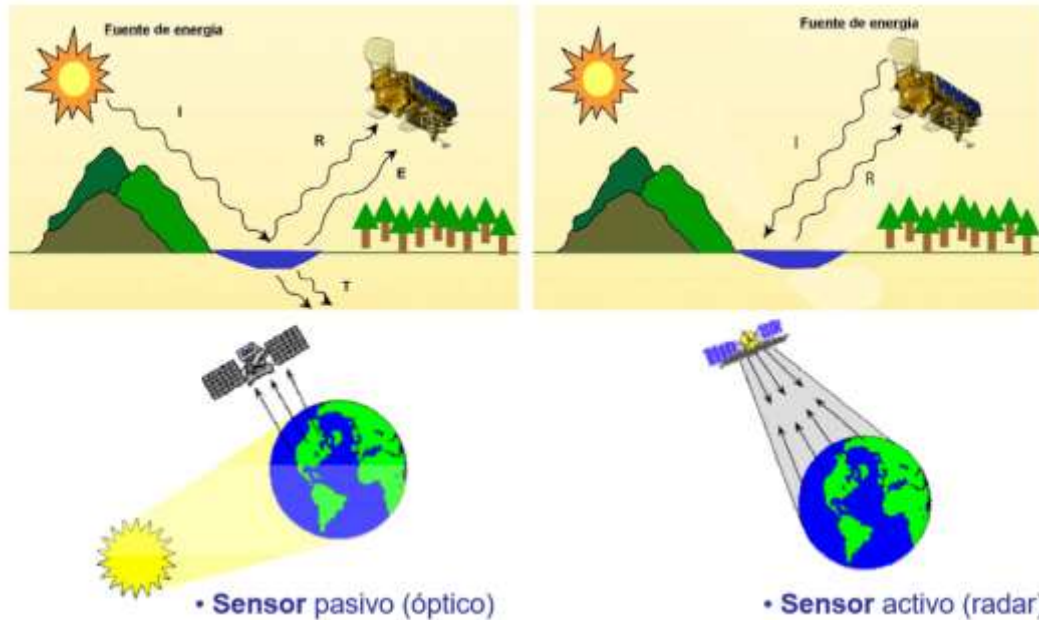


Figura 2.2. Ilustración sobre el funcionamiento de los sensores pasivos y activos. (López, 2010)

Como sistema activo que es, no depende de una fuente de iluminación externa como el sol, lo cual da lugar a una de las ventajas que se le atribuyen tradicionalmente a los sensores radar: su capacidad para tomar imágenes tanto de día como de noche.

La otra ventaja que se suele resaltar es su capacidad para tomar imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas ya que la señal es capaz de atravesar las nubes. Esta es una característica que se cita tradicionalmente, producto de las primeras aplicaciones para las que se utilizó pero que hay que matizar.

El poder de penetración de la señal radar depende de su longitud de onda. A mayor longitud de onda mayor poder de penetración. En general, la señal puede atravesar partículas o elementos que tengan un tamaño significativamente menor que la longitud de onda. Esto significa que longitudes de onda de varios centímetros pueden incluso atravesar la cobertura vegetal en ciertas zonas de bosque mientras que longitudes de onda del orden del centímetro se pueden ver afectadas en condiciones de lluvia intensa.

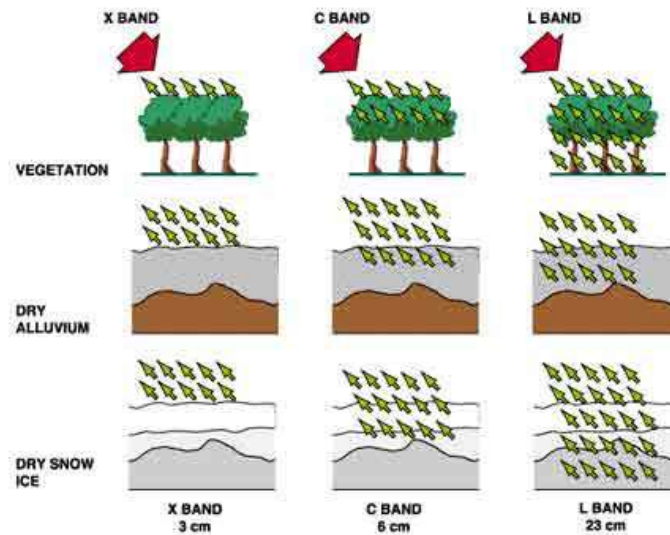


Figura 2.3. Penetración de la señal radar en distintos escenarios según su longitud de onda.
Fuente: Radar Course 2. <https://earth.esa.int/>

Además, hay que señalar que lo anterior es cierto en lo que se refiere a la intensidad de la señal, pero, como se verá a lo largo de este trabajo, las condiciones de humedad en la atmósfera y, por supuesto, la presencia de nubes, alteran la fase de la señal hasta hacer que no sea posible alcanzar la precisión esperada en algunas técnicas de análisis.

Tal y como se ha visto, una de las características fundamentales de un sistema de observación radar es la longitud de onda en la que opera, ya que determina factores como la resolución de las imágenes y el poder de penetración y, por tanto, las posibles aplicaciones del sistema. Los sistemas radar se clasifican en función de la banda en la que operan según la siguiente figura:

Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (GHz)
Ka	0.75 – 1.2	40 – 25
K	1.2 – 1.67	25 – 18
Ku	1.7 – 2.5	17.6 – 12
X	2.5 – 4	12 – 7.5
C	4 – 8	7.5 – 3.75
S	8 - 15	3.75 – 2
L	15 – 30	2 – 1
P	60 - 120	0.5 – 0.25

Figura 2.4. Clasificación de las señales radar según su longitud de onda. Fuente: <http://www.ign.es/>

La plataforma Sentinel-1 opera en la banda C y se eligió esa banda por su compromiso entre la resolución espacial y la capacidad de penetración, ya que

el programa Copernicus está orientado a la gestión de emergencias y vigilancia medioambiental, y esa banda es adecuada para aplicaciones en monitorización de océanos como evolución de los icebergs, vertidos de petróleo ilegales o vientos marinos, y también para aplicaciones en monitorización de la superficie terrestre como agricultura, biomasa forestal o subsidencias en zonas urbanas (ESA Bulletin 131, 2007).

2.2. Radar de apertura sintética (SAR).

Uno de los problemas derivados de la utilización de los sensores radar en plataformas satelitales es la baja resolución en la dirección de recorrido del satélite que tendría un sistema de apertura circular. En este tipo de sistemas la resolución en esa dirección viene dada por:

$$R = \frac{\lambda h}{\phi}$$

Siendo h la altura del satélite, λ la longitud de onda y ϕ el diámetro de apertura del sensor.

La banda del espectro electromagnético considerada como radar comprende longitudes de onda entre 0,1 cm y 1 metro. Considerando las especificaciones técnicas de la plataforma Sentinel-1, que orbita a una altura de 693 km y trabaja en una longitud de onda de 5,547 cm, para alcanzar una resolución de 5 m sería necesaria una antena de 7,5 km. (*Especificaciones técnicas de Sentinel-1*: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1>)

Para solventar ese problema los sensores radar utilizan la técnica de apertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que consiste en mantener el sensor abierto durante un periodo de tiempo de manera que se puede observar un elemento de la imagen desde varios puntos. La técnica se basa en el efecto Doppler, según el cual la longitud de onda varía cuando emisor o receptor se encuentran en movimiento, para generar una imagen enfocada de resolución equivalente a la que tendría una antena del tamaño recorrido por el satélite en el periodo de tiempo que permanece abierto el sensor. (Chuvienco, 1995, págs. 111-112)

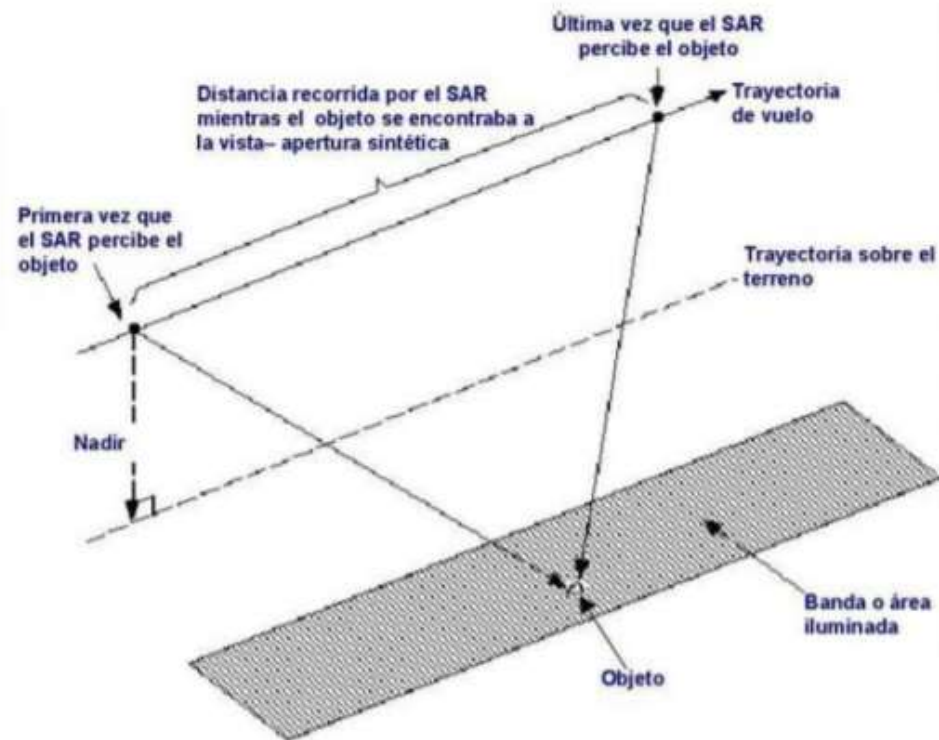


Figura 2.5. imagen ilustrando la apertura sintética: Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar (<http://www.ign.es/>)

2.3. La imagen radar.

Una vez vistos los elementos que definen los sistemas de observación radar el siguiente paso es conocer cómo se forma la imagen y cuáles son sus características.

2.3.1. Geometría de la toma de imagen.

En el momento de toma de la imagen radar se pueden definir una serie de elementos que influyen en la formación de la imagen.

A la dirección en la que se desplaza el satélite se la llama azimut mientras que la dirección perpendicular, en la que se emite el pulso se la conoce como dirección de alcance, aunque se suele utilizar el término inglés *range*.

El ángulo de apertura en la dirección de alcance define una banda sobre el terreno que se conoce con el termino inglés *swath*.

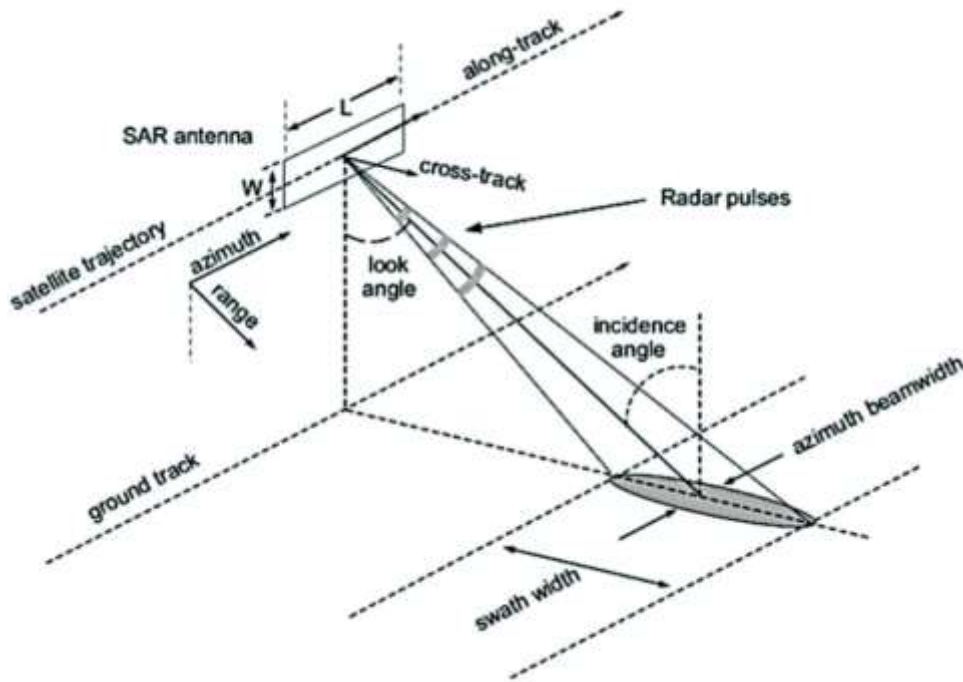


Figura 2.6. Geometría de la toma en sensores SAR (Yalvaç, 2020).

El ángulo que forma la vertical del satélite con la señal radar que se emite se conoce como ángulo de incidencia θ , ya que considerando tierra plana sería el mismo que formaría la señal con la vertical del terreno. Sin embargo, el ángulo con el que la señal incide en el terreno varía con la orografía de la zona y con la distancia al sensor, de tal manera que se puede hablar de ángulo de incidencia local. Ese ángulo es fundamental en la geometría de toma ya que es el elemento que más incide en la cantidad de energía que retorna al satélite, influye en la resolución en la dirección de alcance, y el que provoca los efectos geométricos típicos de las imágenes radar.

2.3.2. Procesamiento de la imagen cruda.

Ya se ha visto, al describir los fundamentos del SAR, que la señal radar no es un pulso del tamaño de un píxel de resolución que va barriendo la escena, si no que el pulso emitido genera una huella en el terreno que se va desplazando en la dirección acimut de manera que un elemento se ve iluminado desde diferentes puntos de vista mientras dura la toma. El resultado es que en la imagen cruda la información de ese elemento se encuentra repartida en varios píxeles, como si estuviera desenfocada y es necesario un procesamiento, basado en el efecto Doppler, para generar la imagen enfocada.

Una vez procesada la imagen cruda, se obtiene una imagen enfocada en la geometría del plano de toma. La posición de cada pixel o elemento de información está determinada por el barrido que hace el satélite durante su recorrido (fila), y por el tiempo que tarda el pulso en rebotar sobre la superficie y regresar al sensor (columna), que es en realidad una medida de la distancia al sensor. Por eso las imágenes radar pueden considerarse como imágenes de distancia.

El producto radar enfocado, en geometría del plano de toma (*slant range*), se dice que está en formato SLC (*Single Look Complex*). En este producto cada pixel contiene un número complejo con una parte imaginaria i y una parte real q , que contienen la información de amplitud y fase de la siguiente manera:

$$i = A \cos \varphi$$

$$q = A \sin \varphi$$

A partir del número complejo se puede obtener la imagen de intensidad, I , y la de fase, φ , operando con la parte imaginaria y la real del número complejo:

$$A = \sqrt{i^2 + q^2}$$

$$I = A^2 = i^2 + q^2$$

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{q}{i}\right)$$

2.3.3. Resolución de las imágenes.

La resolución a lo largo de la dirección acimut, se ha visto que depende del tiempo que está abierto el sensor, el tamaño de la antena y la capacidad para procesar la imagen desenfocada que se produce, pero la resolución en la dirección de alcance depende de la capacidad del sistema para diferenciar el retorno producido por dos elementos próximos en esa dirección y del ángulo de incidencia. La señal radar que se emite no es una señal continua, sino que se trata de pulsos de una duración determinada y es la frecuencia con la que se emiten esos pulsos (*PRF Pulse Repetition Frequency*) la que determina la resolución en la dirección de la toma de vista δ_r , según se observa en la figura 2.7.

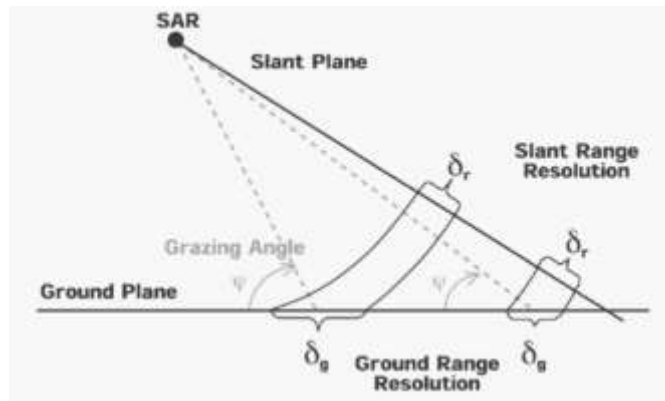


Figura 2.7. Resolución en alcance en las imágenes SAR. Fuente: 3rd ESA Advance Training on Ocean Remote Sensing. (<https://earth.esa.int/>)

Además, la proyección sobre el terreno δ_g de la resolución en la dirección de la toma de vista δ_r depende del ángulo de incidencia θ según:

$$\delta_g = \frac{\delta_r}{\text{sen } \theta}$$

Así, la resolución en la zona más cercana al satélite, con un ángulo de incidencia menor la resolución, es menor que en la zona más alejada.

Considerando la imagen en la geometría del plano de toma la resolución no es igual en las dos direcciones principales y los píxeles no son cuadrados, pero si además se considera la imagen en la geometría del terreno, la resolución tampoco es la misma a lo largo de la dirección de alcance.

2.3.4. Efectos geométricos en las imágenes SAR.

La geometría de la toma de imágenes y el distinto ángulo local de incidencia genera en la imagen los tres efectos geométricos que se describen a continuación:

- Escorzo (*Foreshortening*), es la deformación que se produce al quedar comprimidas o estiradas en la imagen zonas del terreno según su orientación mire hacia el sensor o no. Si la superficie está próxima a formar un ángulo recto con la señal, la parte más baja y la más elevada de la zona reflejan la señal casi al mismo tiempo, lo que implica que en la imagen formada las dos partes se encuentran muy próximas. Toda la información entre la parte baja y la parte alta queda comprimida en la imagen y la resolución es muy baja porque unos pocos píxeles representan una mayor distancia en alcance. Por el contrario, cuanto más

crece el ángulo de incidencia local, la zona aparece más estirada y la resolución será mejor (figura 2.8).

- Plegado (*Layover*), cuando la pendiente de la toma alcanza un valor de tal manera que supera la perpendicularidad con la señal, se da que los puntos más elevados, retornan la señal antes que los más bajos, por lo que aparecen en la imagen antes, a menor distancia, y el efecto visual es que aparecen plegados o tumbados en la dirección del alcance (figura 2.8).
- Sombra (*Shadow*). Por último, se puede producir también el efecto de sombra, cuando una superficie, por su orientación no recibe señal. Esto sucede en la ladera opuesta de una montaña o en elementos verticales en los que una parte no es iluminada por el radar y produce una zona oscura en la imagen en la que solo se aprecia algo de ruido (figura 2.8).

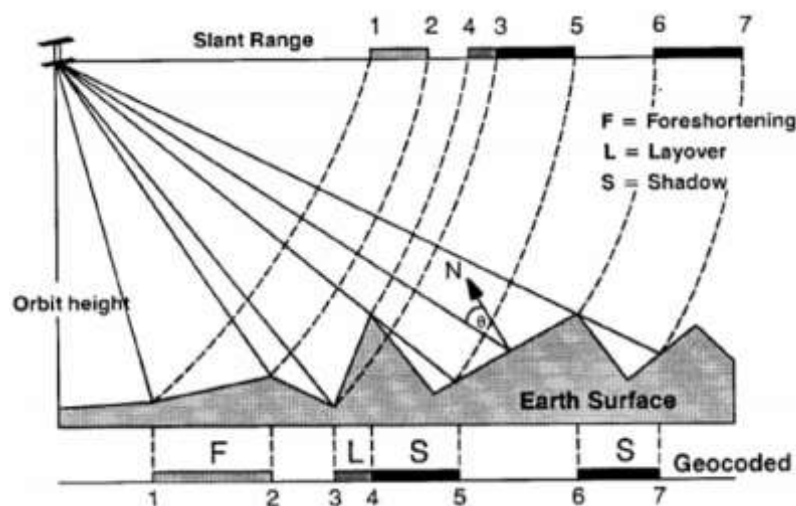


Figura 2.8. Efectos geométricos en una imagen SAR. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (<http://www.ign.es/>).

Los tres tipos de efectos geométricos que se dan en las imágenes radar hacen que su aspecto esté alejado de lo que se suele ver en imágenes ópticas. No solo se cambia el punto de vista al que está acostumbrado el ojo humano sino también la forma de los elementos y esto hace que las imágenes radar sean más difíciles de interpretar.

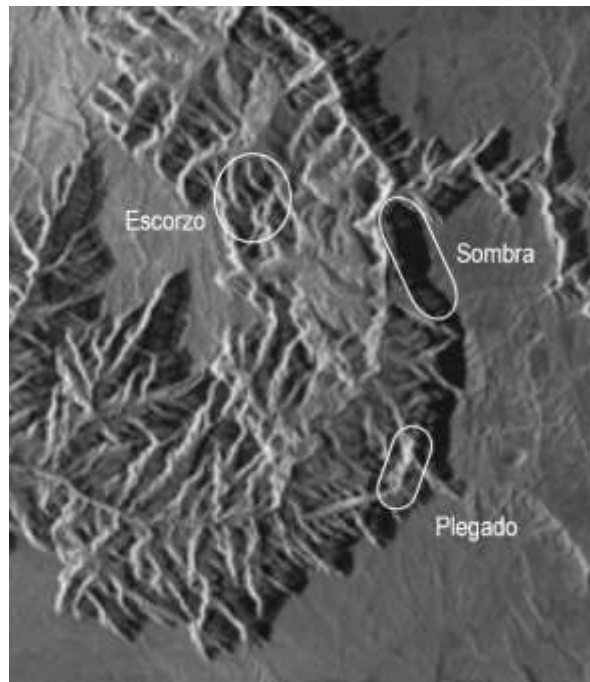


Figura 2.9. Imagen TerraSAR-X del Gran Cañón del Colorado donde se muestran los efectos de escorzo, plegado y sombra.

2.3.5. Retrodispersión (*Backscattering*)

La cantidad de energía que vuelve al sensor depende de la señal, del terreno y de cómo interactúan. Así, en función de la longitud de onda de la señal o de su polarización, la interacción con el terreno podrá ser distinta. Del mismo modo, la cantidad de humedad o la constante dieléctrica de los elementos sobre los que incide la señal, determinarán cuánta energía vuelve al sensor.

Al fenómeno que tiene lugar cuando la señal incide en el terreno se le conoce como dispersión y los factores más determinantes en la cantidad de energía que retorna tienen que ver con la geometría de los elementos y su disposición frente a la señal, principalmente el ángulo de incidencia local.

En general, cuanto menor es el ángulo de incidencia, mayor es la intensidad de la señal que retorna, y eso da lugar a que las imágenes sean más brillantes en la zona más próxima al satélite (*near range*) y menos brillantes en las más alejadas (*far range*).

Se suele hablar de mecanismos de dispersión para describir las interacciones que se dan entre la señal y el terreno, y típicamente son los siguientes:

- Dispersión en superficie. Cuando la señal incide sobre una superficie, la cantidad de energía retornada depende de la rugosidad del terreno. Una

superficie lisa genera una reflexión especular de la señal por lo que, salvo que la superficie esté enfrentada al sensor, la energía se refleja y se pierde en una dirección distinta. Esto genera, zonas oscuras en la imagen. Si el terreno es rugoso, parte de la energía se dispersará en otras direcciones, pero otra parte volverá y será recogida por el sensor. La rugosidad de una superficie es un concepto relativo a la longitud de onda, una superficie es rugosa si sus irregularidades son del orden del tamaño de la longitud de onda.

- **Dispersión volumétrica.** Se habla de dispersión volumétrica cuando la señal penetra en un cuerpo volumétrico, con elementos rugosos orientados en todas las direcciones. Es el caso típico de la cobertura vegetal en un bosque, aunque también se puede dar en suelos arenosos o en nieve seca. Cuando se produce dispersión volumétrica la señal se dispersa por igual en todas las direcciones y, además, se producen cambios de polarización.
- **Reflexión en diedro o en esquina,** Otro fenómeno que se puede dar es cuando la señal incide sobre dos o tres superficies planas enfrentadas al sensor formando ángulos rectos. En ese caso cualquier onda que incida sobre una de las superficies se refleja en las otras y vuelve al sensor como si se tratara de un espejo enfrentado al mismo. Esto genera zonas muy brillantes en la imagen y se da típicamente en zonas urbanas.

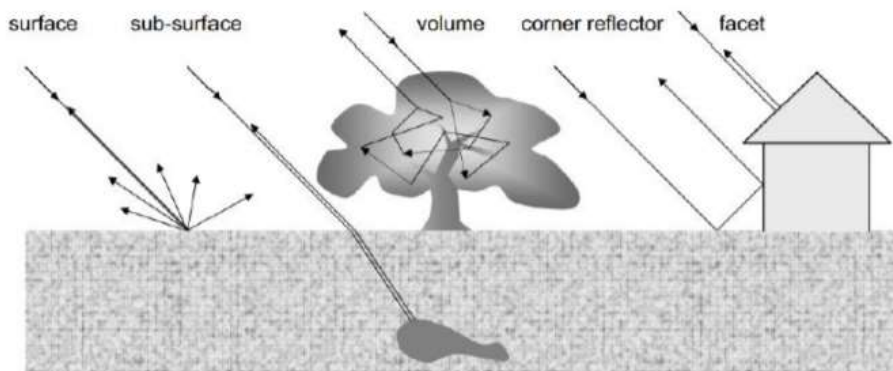


Figura 2.10. Mecanismos de retrodispersión. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (<http://www.ign.es/>).

2.3.6. Efecto sal y pimienta (*Speckle*).

Una característica típica de las imágenes radar es el efecto de granularidad en zonas homogéneas que deberían tener la misma textura. Este efecto se conoce

como 'sal y pimienta' o con el termino inglés (*speckle*) y es considerado como ruido de la imagen.

Este fenómeno se produce porque la respuesta asociada a una celda de resolución es la suma de las respuestas a la señal de todos los elementos de esa celda. Debido a que se trata de una señal coherente, se producen interferencias que pueden ser positivas generando una respuesta de mayor intensidad, o negativas, cuando la suma se anula y se generan pixeles oscuros.

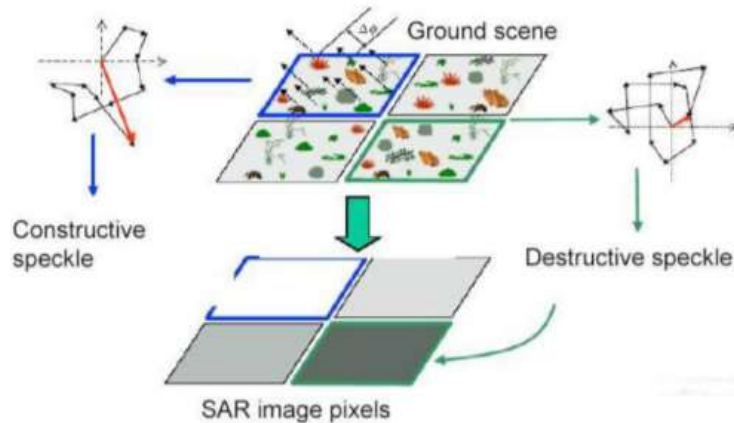


Figura 2.11. Ilustración de cómo se produce el efecto sal y pimienta por la respuesta de todos los dispersores de un pixel. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (<http://www.ign.es/>).

El ruido *speckle* se puede reducir utilizando distintos tipos de filtros y de esa manera la imagen resultante muestra un aspecto más natural, o al menos, más parecido al que tendría una imagen iluminada por luz no coherente, pero hay que tener en cuenta de qué manera modifican los filtros el valor del pixel y si eso puede afectar al procesamiento de la señal en aplicaciones que requieran técnicas interferométricas.

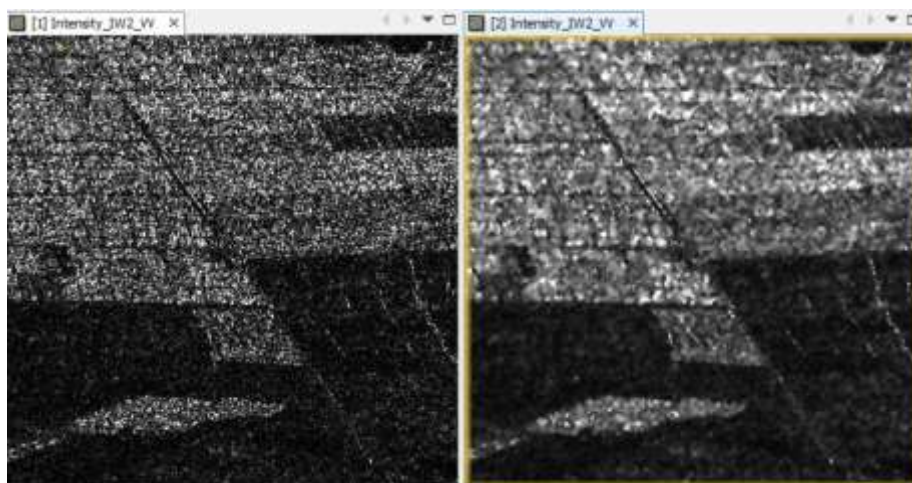


Figura 2.12. Efecto sal y pimienta (*speckle*) y su atenuación utilizando el filtro Lee Sigma.

2.4. Interferometría.

La señal radar recibida por el sensor respecto a la señal emitida contiene información de polarización, intensidad y fase. Las aplicaciones del análisis de la polarización no son objeto de este estudio y en los apartados anteriores ya se ha visto qué factores influyen en la cantidad de energía recibida tras los fenómenos de dispersión en la superficie.

El objetivo de este apartado y el siguiente, es tratar cómo se analiza la información de fase contenida en la señal y de qué manera se puede utilizar en distintas aplicaciones.

Se puede considerar la señal radar como una onda electromagnética emitida con fase cero. Si la onda se propagara en el vacío, la fase con que se recibiría la señal sería función únicamente de la distancia recorrida y la longitud de onda según la relación que se muestra en la figura:

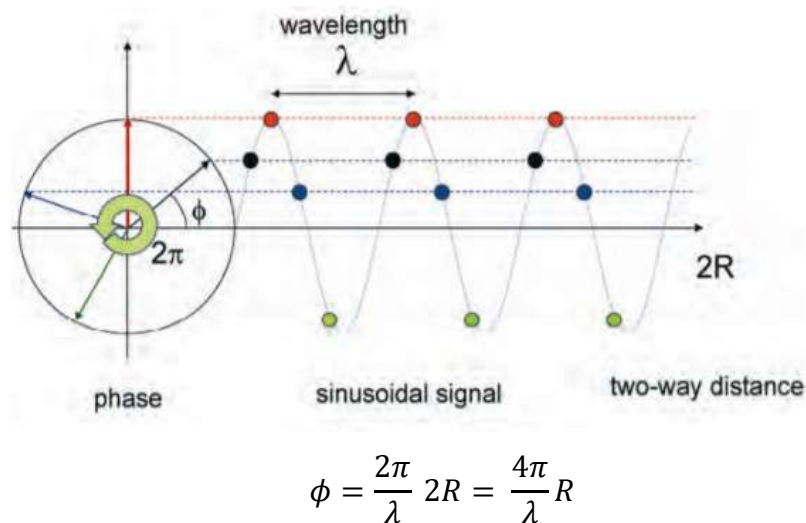


Figura 2.13. Fase recibida por el sensor en función de la distancia. Fuente: TM-19, 2007.

La gran diferencia entre el tamaño de pixel y la longitud de onda de la señal hace que, en la práctica, la fase recibida sea la suma de las respuestas de todos los dispersores dentro de una celda de información y la imagen de fase parece contener valores aleatorios y no tiene utilidad práctica por sí sola.

Sin embargo, si se dispone de dos imágenes tomadas desde puntos próximos, simultáneamente o en un paso distinto del satélite, se puede considerar que la contribución de los dispersores no varía y la diferencia de fases sería producto

únicamente de la distancia la recorrida por la señal, según las relaciones que se muestran en la figura 2.14.

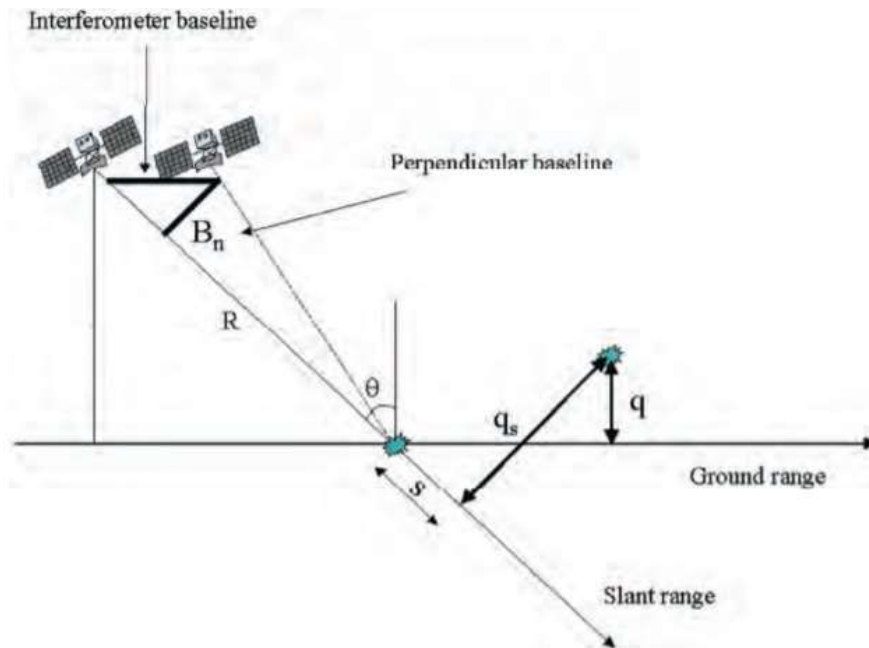


Figura 2.14. Configuración geométrica para interferometría. Fuente TM-19, 2007

donde:

- R representa la distancia del satélite al objetivo
- B_n es la línea base perpendicular, y es la distancia entre los satélites proyectada perpendicularmente sobre la línea de toma de uno de ellos.
- s la distancia entre dos elementos de información contiguos, proyectada sobre la línea de vista de uno de ellos.
- q es la diferencia de altitud entre dos elementos de información
- q_s es la distancia entre dos elementos de información contiguos proyectada sobre la perpendicular a la línea de vista.

La diferencia en el recorrido y, por tanto, la diferencia de fase entre dos elementos de información contiguos se debe a la contribución de dos factores, la diferencia de altitud entre los dos elementos y la distancia entre ellos proyectada sobre la línea de vista. Considerando la geometría de la toma y que las líneas base son pequeñas respecto a la distancia al objetivo, se puede calcular la contribución de cada factor a la diferencia de fase:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin\theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan\theta}$$

La línea base perpendicular se conoce de las efemérides precisas del satélite y el segundo término se ha visto que depende de la distancia entre elementos de información contiguos, que es el tamaño de celda, por lo que puede calcularse y eliminarse de la ecuación. La contribución del segundo término se conoce como componente de tierra plana y el proceso por el que se calcula y se elimina se llama aplanamiento del interferograma (*interferogram flattening*).

Por último, si las imágenes no han sido tomadas simultáneamente, puede suceder que entre ellas haya habido algún pequeño desplazamiento, como el producido por un deslizamiento de tierra o un terreno, en cuyo caso, la distancia al dispersor varía en $d = \Delta R$, y se introduce un nuevo componente de diferencia de fase en el interferograma de valor:

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

Hay que señalar que la diferencia de fase se calcula multiplicando una señal compleja por el conjugado de la señal de la segunda imagen, lo que genera una imagen de diferencias de fase de las que se conoce el módulo 2π .

2.5. Factores que influyen en la formación del interferograma.

En el apartado anterior se ha visto que la diferencia de fase presente en el interferograma tiene contribución de tres elementos, la fase interferométrica (tierra plana), la fase topográfica y la fase por desplazamiento, pero existen otros factores que pueden introducir cambios de fase de menor magnitud y que también hay que tener en cuenta.

Hasta ahora se ha considerado que lo que produce el cambio de fase es la diferencia de distancia y que la señal viaja a la velocidad de la luz en línea recta, pero eso solo es verdad en el vacío. Cuando la señal cambia de medio y atraviesa la atmósfera se generan diferencias de fase que afectan al interferograma. La contribución atmosférica a la fase del suelo suele estar confinada en un rango entre $+\pi$ y $-\pi$ y se produce de forma gradual a lo largo escena (TM-19, 2007), sin embargo, cuando la presencia de vapor de agua es muy alta o hay nubes se pueden superar esos valores.

El resto de componentes en la fase del interferograma tienen una menor contribución y no es posible modelarlos por lo que se pueden considerar ruido. Algunos de esos factores son (Hansen, 2001, pág. 98):

- Decorrelación temporal: Cuando las imágenes no se toman simultáneamente sino en pasadas distintas, puede que no todos los dispersores estén exactamente en la misma disposición.
- Ruido térmico: producido por factores del sistema como la ganancia o la configuración de la antena
- Dispersión volumétrica: ruido generado por la existencia de dispersores volumétricos.
- Geometría de la línea base: Cuando mayor es la línea base más cambia el ángulo de incidencia local sobre los dispersores y por encima de un valor, conocido como línea base crítica, la imagen de fase solo contiene ruido.
- Error en la determinación de las efemérides precisas: El error cometido en la determinación de las efemérides, también se considera una fuente de ruido.

Estas fuentes de ruido generan una falta de correlación entre las fases de las dos imágenes, también conocida como coherencia. En algunas zonas de la imagen, la falta de coherencia hace que las fases no sean comparables y puede llegar a imposibilitar el análisis.

Considerando todos los factores que contribuyen a la diferencia de fase:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_t + \Delta\phi_d + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise}$$

siendo:

$\Delta\phi_f$: Componente de tierra plana.

$\Delta\phi_t$: Componente topográfica.

$\Delta\phi_d$: Componente por desplazamiento.

$\Delta\phi_{atm}$: Componente atmosférica.

$\Delta\phi_{noise}$: Componente por ruido

Se ha visto que la componente de tierra plana se puede calcular y eliminar conociendo las efemérides precisas del satélite y que el aporte de la componente

de ruido es significativamente menor que los demás en las zonas coherentes. Considerando las otras tres componentes se puede extraer información del interferograma y utilizarlo en diversas aplicaciones. Así, si no se han producido desplazamientos entre las dos tomas, es posible caracterizar la topografía de la zona y si se conoce la topografía de la zona sería posible determinar si se han producido, o no, desplazamientos. En ambos casos habría que tener en cuenta la componente atmosférica, bien aceptándola como fuente de error, o bien intentando caracterizarla de alguna manera.

2.6. Interferometría diferencial.

Cuando lo que se quiere determinar es si se ha producido un desplazamiento, a lo largo de la línea de vista, entre los dispersores, es necesario modelizar la componente topográfica de la fase. Se conoce como interferometría diferencial de imágenes SAR (DInSAR) al conjunto de técnicas en las que se utiliza un modelo digital de elevaciones para caracterizar la componente de fase debida a la topografía.

Una vez conocida la contribución de la topografía, eliminada la componente de tierra plana y considerando que se puede despreciar la componente de ruido, la fase presente en el interferograma será la debida a factores atmosféricos y a desplazamientos del terreno sobre la línea de vista.

$$\Delta\phi = \cancel{\Delta\phi_f} + \cancel{\Delta\phi_\epsilon} + \Delta\phi_d + \Delta\phi_{atm} + \cancel{\Delta\phi_{noise}} = \Delta\phi_d + \Delta\phi_{atm}$$

El desplazamiento de los dispersores es típico durante un terremoto, por deslizamientos del terreno, o por subsidencias producidas por excavaciones o fenómenos naturales, si bien en este último caso los desplazamientos son mucho más lentos y sería necesario un mayor número de imágenes.

Por último, no se debe olvidar que aún existe una contribución atmosférica en el interferograma que, si bien suele ser menor que la generada por los desplazamientos, si no se caracteriza adecuadamente limita de forma sensible la precisión de las técnicas DInSAR (Hansen, 2001).

2.7. El programa Copernicus y las Misiones Sentinel.

Copernicus es el programa de observación de la tierra promovido por la Comisión Europea y desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Sus objetivos

fundamentales son la vigilancia medioambiental y seguridad, de hecho, el nombre original del programa era *Global Monitoring for Environmental and Security* (GMES).

Para cumplir esos objetivos la ESA ha desarrollado un conjunto de satélites que operan en distintas franjas del espectro electromagnético con una misión específica para cada grupo:

- Misión Sentinel-1: Está compuesta de dos satélites con tecnología radar, en la banda C de las microondas, que permiten observación día y noche, casi independientemente de las condiciones atmosféricas.
- Misión Sentinel-2: Se ocupa de la parte visible del espectro y consta también de dos satélites. Está orientado a la monitorización de la vegetación, el suelo y las zonas costeras.
- Misión Sentinel-3: Su objetivo es la monitorización de los océanos, el nivel altimétrico, la temperatura y el color. Consta de tres satélites con una carga de pago que incluye numerosos sistemas de medida, entre los que se encuentran también sensores ópticos y radar.
- Misiones Sentinel-4 y Sentinel-5: Su objetivo será la monitorización de la calidad del aire y los fenómenos atmosféricos.
- Misión Sentinel 5P: Se trata de un satélite precursor de la Misión Sentinel-5, lanzado para cubrir las necesidades de información sobre la atmosfera entre la retirada de la Misión Aura de la Nasa y el satélite Envisat de la propia ESA, y la disponibilidad operativa de la Misión Sentinel-5.

Una de las características principales del programa Copernicus, es que sus imágenes son gratuitas bajo unas condiciones y términos de uso que deben aceptarse en el proceso de registro.

2.8. Misión Sentienel 1A/1B

La misión Sentinel-1 consta de dos satélites, el Sentinel-1A lanzado el 3 de abril de 2014 y el Sentinel-1B en órbita desde el 25 de abril de 2016, y son los sucesores de los satélites ERS-1, ERS-2 y Envisat de la ESA. Los dos satélites comparten una órbita casi polar, heliosíncrona, con un ciclo de repetición de 12 días y 175 órbitas por ciclo. Tienen un desfase orbital de 180° por lo que el tiempo de revista de la constelación se reduce a 6 días.

La altura media de la órbita es de 693 km y se mantienen en un tubo orbital de 100 metros de diámetro (RMS), lo cual tiene implicaciones directas en el uso de técnicas de interferometría, ya que ese será el valor máximo de la línea base de un par interferométrico.

El rango en el que operan los satélites es el de la banda C de las microondas, con una frecuencia central de 5,405 GHz ($\lambda = 5,547$ cm). Esto representa un compromiso entre la resolución y la capacidad de penetrabilidad, y es un factor determinante en el cálculo de la altura de ambigüedad y en la capacidad para detectar los desplazamientos del terreno. Además, los satélites pueden operar con polarización simple (HH, VV) o dual (HH+HV, VV+VH).

Los satélites pueden adquirir imágenes en cuatro modos de toma, con distintas resoluciones y superficies de cobertura:

- Strip Map (SM): Es el modo de mayor resolución espacial con un tamaño de pixel de 5 por 5 metros sobre un ancho de escena de 80 kilómetros.
- Interferometric Wide Swath (IW): Es el modo principal de adquisición y está pensado para la dar una cobertura global de la tierra con imágenes adecuadas para técnicas de interferometría. El ancho de la escena es de 250 kilómetros y la resolución espacial es de 5 por 20 metros.
- Extra Wide Swath (EW): Emplea una técnica de adquisición similar a la del modo IW pero consigue un ancho de escena de 410 kilómetros con una resolución espacial de 20 por 40 metros. Está pensado para la monitorización de las zonas polares y vigilancia de amplias zonas marítimas.
- Wave Mode (WV): Se trata de un modo de toma específico para el análisis de la altura y dirección de las olas en el océano, similar a los modos de toma del ERS y Envisat, pero con una mejor resolución. A lo largo del recorrido del satélite, se van tomando imágenes de 20 por 20 kilómetros con una resolución de 5 por 5 metros, alternativamente con dos ángulos distintos de toma.

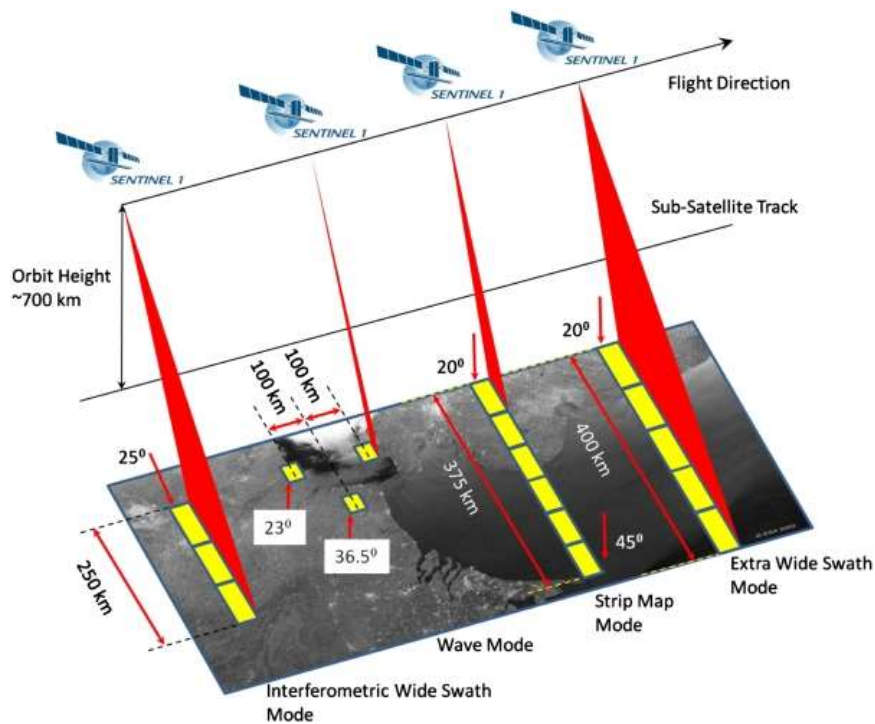


Figura 2.15. Modos de toma de la Misión Sentinel-1. Fuente: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>

El programa de observación está previamente establecido para evitar conflictos y ofrecer una cobertura global que permite cumplir con los objetivos de la misión. Esto significa que no es posible para los usuarios solicitar imágenes con unas condiciones específicas o un modo de toma concreto de una zona, pero la cobertura casi global de la tierra con imágenes en modo IW cubre la mayoría de las necesidades de observación.

El modo IW, utilizado en aplicaciones interferométricas, presenta algunas peculiaridades que conviene señalar ya que influyen en la cadena de procesamiento de las imágenes. Para conseguir el ancho de la escena y la resolución de 5x20 metros se utiliza la técnica TOPSAR (*Terrain Observation with Progressive Scans SAR*). Con esta técnica, el ángulo va variando en azimut y en alcance para registrar tres bandas (*swath*) con 9 subimágenes (*burst*) cada una, de manera que exista cierto solapamiento entre ellas para recomponer una imagen global y continua de la zona.

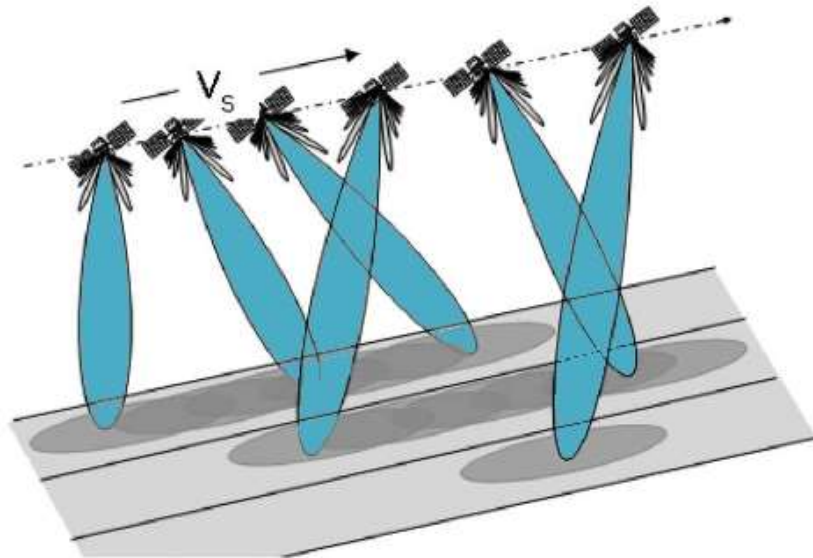


Figura 2.16. Modo de toma IW mediante la técnica TOPSAR. Fuente: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

Con esta técnica, el ángulo de toma varía en cada banda y en las imágenes que la componen, el procesamiento es más complejo y son necesarios algoritmos específicos.

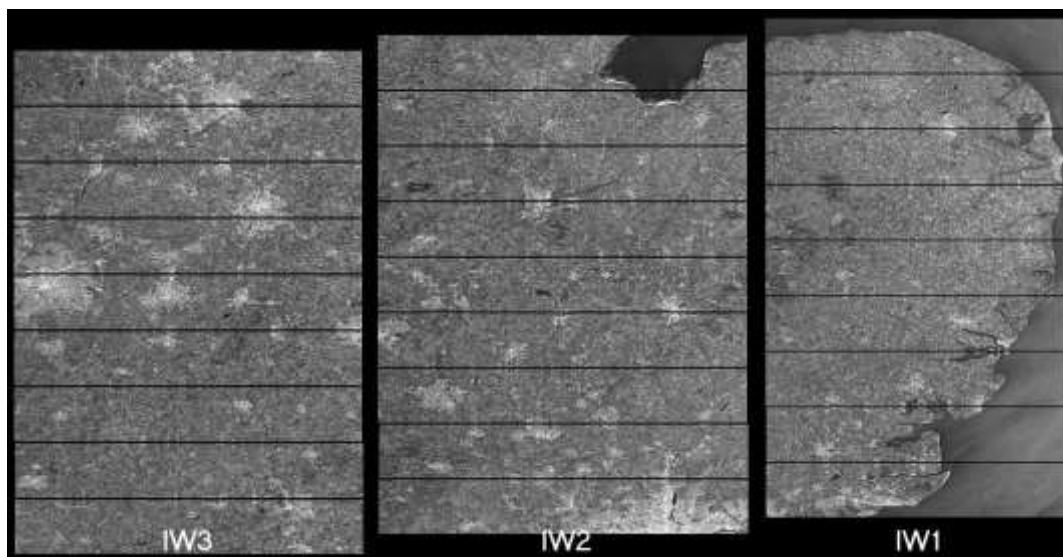


Figura 2.17. Aspecto de una imagen Sentinel-1 tomada en modo IW mediante técnica TOPSAR. Fuente: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

En el modo de toma IW se pueden obtener las imágenes en dos niveles de procesamiento:

- SLC (*Simple Look Complex*). Imagen SAR enfocada con geometría en el plano de toma e información de intensidad y fase.

- GRD (*Ground Range Detected*). Imagen SAR enfocada, proyectada y georreferenciada sobre el terreno usando un modelo elipsoidal de la Tierra. La imagen ha sido remuestreada (*multilooking*) para conseguir un píxel aproximadamente cuadrado, pero no contiene información de fase por lo que no es útil para aplicaciones de interferometría.

Hay que tener en cuenta que, a menudo, la zona de estudio no es tan extensa y es posible hacer una extracción previa de las subimágenes de alguna de las bandas reduciendo así la carga de procesamiento, ya que una imagen Sentinel-1 descomprimida, en modo IW, ocupa unos 7,5 GB.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Una vez planteados los objetivos del trabajo se debe planificar cuidadosamente la metodología para alcanzarlos. Se deben elegir las zonas de estudio, de tal manera que se cumplan una serie de condiciones, y se debe definir el software y el hardware que se utilizará para el análisis.

Existen varias aplicaciones comerciales y científicas que implementan la técnica de interferometría diferencial para el análisis de desplazamientos rápidos y, si bien la técnica es única y está bien definida, el flujo de trabajo puede variar sensiblemente de una aplicación a otra.

3.1. Áreas de estudio.

Para cumplir los objetivos del estudio se ha localizado un terremoto reciente que no hubiera sido objeto de análisis mediante este tipo de técnicas, con una magnitud media-alta que haya generado un desplazamiento del terreno lo suficientemente grande y en una zona del planeta predominantemente árida y con escasa vegetación.

Para localizar los terremotos que cumplieran las condiciones establecidas se utilizó el buscador del GFZ *German Research Center for Geosciences* en su página web GEOFON: <https://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/form.php?lang=en>

Se eligió un terremoto de magnitud 6.0 que tuvo lugar en China, en la provincia de Xinjiang, el 19 de enero de 2020 a las 13:27:58 UTC, y se descargaron las imágenes necesarias del repositorio del programa Copernicus (*Copernicus Open Acces Hub*): <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Para un análisis completo del evento se ha utilizado un par interferométrico en sentido ascendente y otro en sentido descendente formados por imágenes previas y posteriores al terremoto. Para contrastar los resultados, se utilizaron dos imágenes más del ciclo orbital anterior, una en cada fase orbital, y de esta manera, se pudieron componer dos pares interferométricos más previos al evento. Asimismo, se analizó otro par tomado seis meses antes en un periodo sin terremotos en la zona. El objetivo era identificar las diferencias debidas al cambio de las condiciones atmosféricas o del terreno en una época distinta del año.

Como resultado del análisis anterior se consideró la posibilidad de analizar la influencia de la coherencia del par interferométrico en el proceso y se buscó un terremoto en una zona con abundante vegetación. El terremoto elegido fue el que tuvo lugar en el Departamento de Loreto en Perú el 26/05/2019 a las 07:41:14 UTC. Este terremoto tuvo una magnitud de 8.0 y se calcula que liberó una energía equivalente a más de 10 millones de toneladas de TNT (Fuente: <https://www.usgs.gov/>).

Para analizar la influencia del modelo digital de elevaciones utilizado y la comprobar si la técnica es utilizable en terremotos de menor magnitud, se analizaron dos pares interferométricos más, de un terremoto de magnitud 4.2 (Mw) que tuvo lugar en Alicante el 13/08/2018 a las 16:40:05 UTC, uno en el sentido ascendente de la fase orbital y otro en sentido descendente.

Por último, se ha utilizado la metodología DInSAR sobre un par de imágenes de antes y después de dos terremotos de magnitud 6.4 y 7.0 (Mw) que tuvieron lugar el 4 y el 6 de julio de 2019 en Ridgecrest, California, en los Estados Unidos.

3.2. Hardware y software utilizado.

La interferometría diferencial de imágenes SAR se basa en procesos computacionalmente muy costosos, especialmente el paso de desenrollado de fase (*phase unwrapping*). Además, se ha visto que las imágenes pueden ocupar una gran cantidad de espacio en disco, por lo que es necesario disponer de una máquina de altas prestaciones, suficiente memoria RAM, múltiples núcleos que permitan el procesamiento en paralelo y discos de estado sólido para el almacenamiento persistente.

Para este estudio se ha utilizado un ordenador Intel® NUC con las siguientes prestaciones:

- Procesador: Intel® Core™ i-5-8259U @ 2,30GHz
- Núm de núcleos: 4
- Memoria RAM: 16 GB
- Disco duro Solido de 240 Gb.

El software utilizado ha sido SNAP, elaborado por la propia ESA para el tratamiento de imágenes de las misiones Sentinel. Para la integración con otros

productos geomáticos y la presentación de resultados, se utilizó la aplicación QGIS.

3.3. Flujo de trabajo.

El análisis de cada uno de los pares interferométricos se ha llevado a cabo mediante el flujo de trabajo que se describe brevemente a continuación. Algunos pasos del flujo dependen de la aplicación SNAP y no tienen que ser exactamente iguales en otras aplicaciones.

3.3.1. Localización y descarga de las imágenes.

El primer paso es la localización de las imágenes en el repositorio del proyecto Copernicus: *Copernicus Open Access Hub*. El repositorio cuenta con una interfaz gráfica en la que se puede indicar la zona de interés sobre un mapa y filtrar los resultados según satélite, fecha de toma, modo o polarización. Para la descarga de imágenes es necesario estar registrado y aceptar las condiciones de uso.



Figura 3.1. Búsqueda en el repositorio de imágenes Sentinel del Copernicus Access Hub.

3.3.2. Importación en SNAP.

Las imágenes descargadas del repositorio de Copernicus son directamente utilizables en la aplicación SNAP, pero dado su tamaño y lo costoso del procesamiento, es conveniente identificar la zona de interés e importar únicamente las subimágenes (*burst*) de una o varias bandas (*swath*) que cubran esa zona. En caso de que sea necesario tratar varias bandas, el resto del flujo, hasta la eliminación de las franjas de solape, se deberá hacer por separado para

cada banda. Una vez eliminada las franjas de solape, se pueden mosaicar los dos productos y continuar el flujo con una única imagen.

3.3.3. Aplicación de datos orbitales precisos.

Los datos orbitales disponibles en las imágenes descargadas son efemérides predichas, esto es, se refieren a la posición que debería tener el satélite calculada antes del momento de la toma. Es posible conocer de una forma más precisa la posición real del satélite mediante las mediciones que se realizan desde el segmento terreno. De esta manera se generan lo que se conoce como efemérides precisas, disponibles aproximadamente 20 días después de la toma.

Las efemérides precisas son fundamentales en la interferometría diferencial, ya que el modelo de interferograma generado por la componente topográfica a partir de la posición de los satélites será más preciso cuanto mejor se conozca esta.

La descarga y aplicación de efemérides precisas es un proceso automatizado en SNAP pero se ha incluido este apartado en el flujo de procesamiento dada su importancia en la generación del interferograma.

3.3.4. Análisis de línea base y altura de ambigüedad.

SNAP dispone de una herramienta, originalmente pensada para técnicas de análisis de subsidencias basadas en pilas de imágenes, que permite calcular la línea base y la altura de ambigüedad seleccionando una imagen de referencia (*master*).

La altura de ambigüedad es un factor a tener en cuenta en el proceso de interferometría y representa la componente topográfica que corresponde a una diferencia de fase de 2π . Sustituyendo en la ecuación de la componente topográfica se obtiene el valor de la altura de ambigüedad:

$$h_{amb} = \frac{\lambda R \text{sen} \theta}{2B_n}$$

que particularizando para las características de los satélites Sentinel-1, con una distancia R de 693 km y una longitud de onda $\lambda = 5,547$ cm sería:

$$h_{ambSent1} = \frac{19220 \text{ sen} \theta}{B_n}$$

Cuanto más pequeña sea la línea base perpendicular (B_n en la expresión anterior), mayor será la altura de ambigüedad y esto significa que la componente topográfica en la fase del interferograma será menor. Esa componente se resta en interferometría diferencial, pero los posibles errores en el modelo digital de elevaciones utilizado pueden generar diferencias de fase que se interpreten erróneamente como subsidencias del terreno.

El diámetro del tubo orbital de la misión Sentinel-1, alrededor de 100 metros, hace que los valores de línea base sean pequeños, en ocasiones próximos a cero, lo que supone alturas de ambigüedad a menudo superiores a los 500 metros.

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se ha comprobado que, en el caso de Sentinel-1, es suficiente el modelo de elevaciones del STRM a 1 segundo para evitar esos posibles errores.

Por otro lado, el hecho de que la altura de ambigüedad sea tan grande en la plataforma Sentinel-1 la hace poco adecuada para la generación de modelos digitales del terreno por interferometría.

3.3.5. Corregistro de imágenes.

Un interferograma es una imagen con las diferencias de fase. Para que esas diferencias tengan sentido físico las dos fases que se restan deben corresponder a la misma superficie del terreno y eso implica que las dos imágenes radar deben estar corregistradas con una precisión de píxel.

Dada la naturaleza de la señal radar y las imágenes que se generan, no son válidos los métodos de corregistro que se utilizan para las imágenes ópticas. Además, las peculiaridades del modo de toma IW de Sentinel-1 hace que SNAP disponga de unas herramientas específicas para este tipo de imágenes que realiza el registro dos fases, *S-1 Back Geocoding* y *Enhanced Spectral Diversity (ESD)*, y solo es necesario el modelo digital de elevaciones y las imágenes a corregistrar.

El resultado de este proceso es un fichero en el que se encuentran las dos imágenes corregistradas con precisión de píxel. La calidad del corregistro se puede comprobar visualizando en RGB la intensidad de las dos imágenes. Si no

se ha realizado correctamente predominará el color de una de las dos bandas sobre la escala de grises.

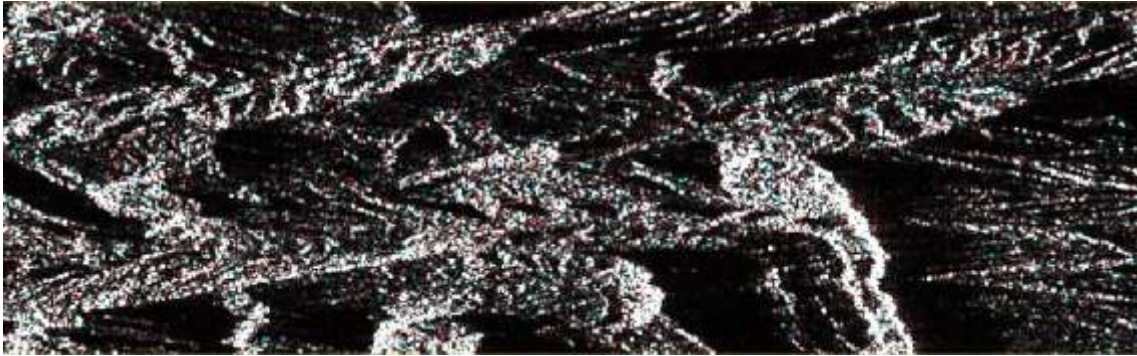


Figura 3.2. Visualización de dos imágenes corregistradas en los canales RGB. Aunque se aprecian puntos en rojo o azul, el aspecto general es el de una imagen en escala de grises.

3.3.6. Generación del interferograma y eliminación de las componentes de tierra plana y topográfica.

Una vez corregistradas las dos imágenes ya se puede generar el interferograma, eliminar las componentes de tierra plana y topográfica. La aplicación SNAP permite hacer todo el proceso en un único paso o, si se tiene interés en disponer de los productos intermedios, ir generándolos de uno en uno.

Para la eliminación de la componente topográfica es necesario disponer de un modelo digital de elevaciones, pero ofrece la opción de descargar el SRTM de un arco de segundo directamente durante el proceso. SNAP compone una simulación a partir de las efemérides y del modelo digital del terreno y resta el interferograma simulado del interferograma una vez eliminada la componente de tierra plana.

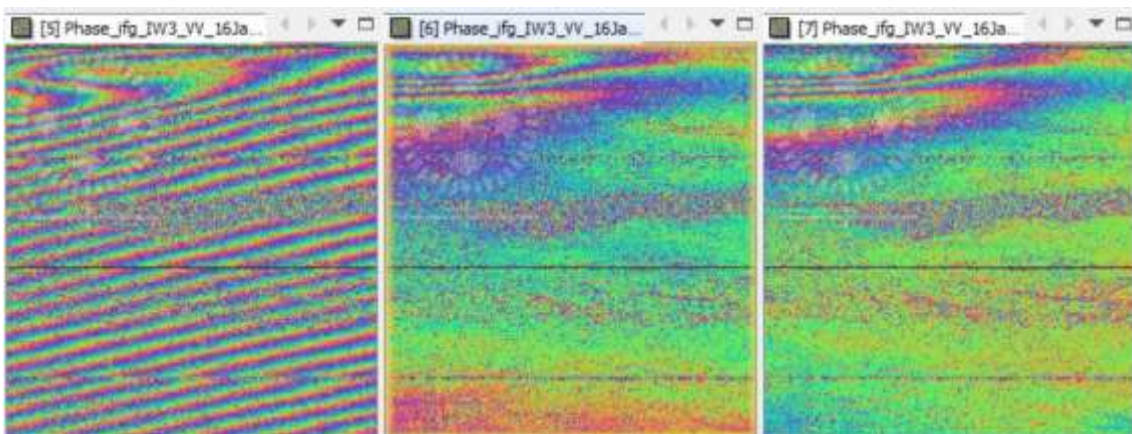


Figura 3.3. De izquierda a derecha: interferograma crudo, interferograma una vez eliminada la componente de tierra plana e interferograma sin contribución de tierra plana ni topográfica.

3.3.7. Eliminación de las zonas de solape (*deburst*)

Las imágenes Sentinel-1 en modo IW se registran mediante la técnica TOPSAR, almacenando tres bandas (*swath*) con 9 imágenes (*burst*) cada una. Hasta este momento del procesamiento la mayoría de los algoritmos utilizados son específicos para este modo de toma, pero el resto del procesamiento, especialmente el desenrollado de fase, requiere de una imagen continua, sin franjas negras ni solapamiento entre subimágenes.

Se trata de un paso automático que no requiere ningún parámetro y para el que SNAP dispone de toda la información en los metadatos de la imagen.

3.3.8. Mosaicado de imágenes de distintas bandas.

Según dónde esté situada la zona de interés respecto de las tres bandas de la toma, es posible que el tratamiento hasta este punto haya que realizarlo por separado para cada una de las bandas, y antes de continuar con el resto del procesamiento es necesario generar un mosaico con todo el producto.

3.3.9. Filtrado del interferograma.

La geometría de la línea base, el ruido térmico, o factores relacionados con la retrodispersión de la señal, introducen ruido en la fase que afecta al interferograma generado. El proceso de desenrollado de fase es muy sensible al ruido por lo que conviene filtrar la imagen antes de continuar con el procesamiento.

- *Filtro de Goldstein*. Uno de los filtros más utilizados para la reducción de ruido en las imágenes de fase es el filtro desarrollado por Goldstein, Goldstein y Werner en 1998, en su trabajo *Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications* (Werner, 1998). Se trata de un filtro adaptativo no lineal que actúa en el espacio de frecuencias utilizando la transformada de Fourier sobre una ventana local. Este filtro reduce considerablemente el ruido sin afectar a la coherencia y facilita el desenrollado de fase.

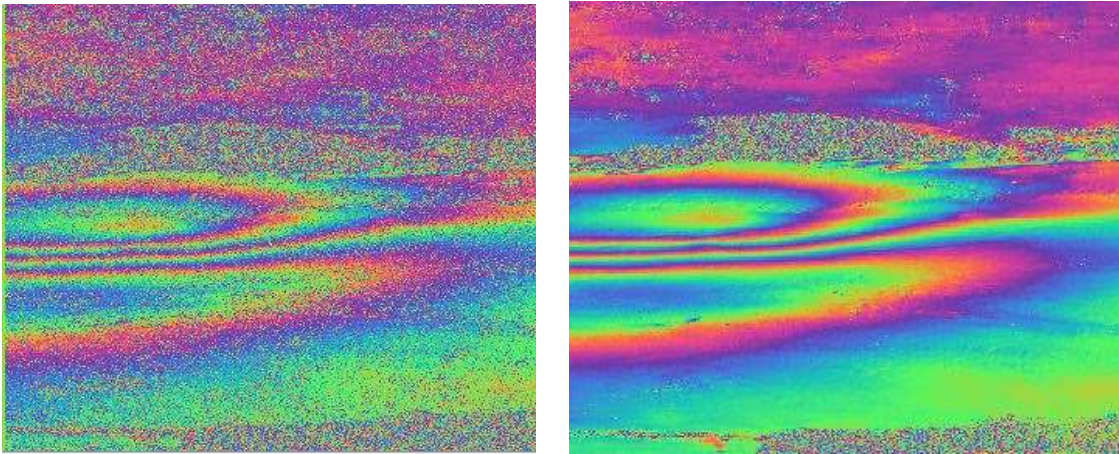


Figura 3.4. Interferograma sin filtrar y después de aplicar el filtro de Goldstein.

- **Multilooking.** La resolución en la dirección de desplazamiento del satélite (*azimut*) y en la de la toma de vista (*range*) depende de factores distintos y, en general, no es coincidente. Para el modo de toma IW de Sentinel-1 la distinta resolución se traduce en un tamaño de pixel de 2,3x14,1 metros, variable según el ángulo de inclinación. Otra forma de eliminación del ruido es realizar un remuestreo de la imagen de manera que obtenga un pixel cuadrado de aproximadamente 15x15 o 30x30 metros. El interferograma así generado suele ser más fácil de desenrollar pero el coste es la pérdida de resolución.

El filtro de Goldstein suele ser suficientemente efectivo en la eliminación de ruido y el filtro *multilooking* no suele ser necesario. En este trabajo solo se ha utilizado para el último caso, el terremoto de California, en el que el desplazamiento generado era de gran magnitud y se encontraron dificultades en la fase de desenrollado.

3.3.10. Análisis de la coherencia.

Durante el proceso de generación del interferograma se calcula también, a partir de este, una imagen con el valor de la coherencia en cada punto. Tal y como se mostró en el capítulo dedicado al fundamento teórico, la coherencia en un pixel es una medida de correlación entre la fase de las dos imágenes en una ventana centrada en ese pixel. Representa lo homogéneo que es el cambio de fase en una zona de la imagen y se puede considerar como una medida de la precisión de la fase interferométrica (Hansen, 2001, pág. 96).

El valor de coherencia varía entre 0, que significa falta total de coherencia, y 1, que significa coherencia absoluta. Las zonas con poca coherencia aparecen oscuras en la imagen y las zonas coherentes aparecerán en tonos de gris claro.

Aparte del análisis visual, se puede hacer uno más metódico generando el histograma de la imagen. Las zonas de agua y vegetación presentan valores bajos de coherencia y en esas zonas el interferograma parece contener únicamente ruido, pero la falta de coherencia puede deberse a otros factores como la decorrelación temporal, la geometría de la línea base, o fenómenos atmosféricos sucedidos entre las dos tomas.

El valor de coherencia se suele utilizar para filtrar el resultado final tras el desenrollamiento de fase y se suelen descartar los valores por debajo de 0,6 - 0,7 de coherencia (TOPS InSAR Tutorial, ESA, 2020).

3.3.11. Desenrollado de fase (*Phase Unwrapping*).

El paso de desenrollado de fase es el más complejo y el que mayor coste computacional tiene. El interferograma es una imagen de diferencias de fase de las que se conoce únicamente su módulo 2π . Durante el proceso de desenrollado se eliminan las ambigüedades que produce la aplicación de la operación módulo y se obtiene la diferencia de fase continua, sin saltos, entre cualquiera dos puntos de la imagen.

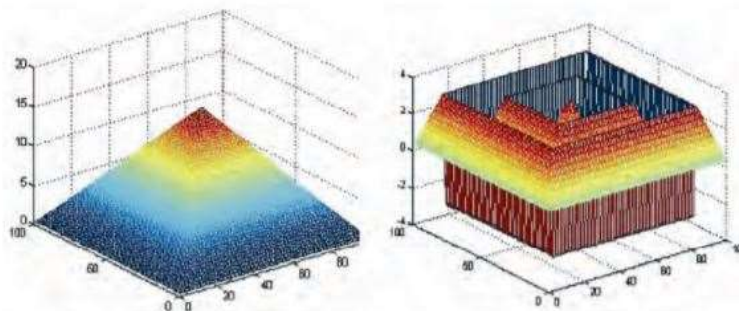


Figura 3.5. Desenrollado de fase. Izquierda: fase absoluta. Derecha: Fase enrollada módulo 2π . Fuente: TM-19, 2007.

La mayoría de las aplicaciones de tratamiento de imágenes radar utilizan para el desenrollado de fase en dos dimensiones el software libre y gratuito SNAPHU desarrollado en la universidad de Stanford. Este software basado en los trabajos de Chen and Zebker entre los años 2000 y 2002, plantea el desenrollado como un problema estadístico de coste con un algoritmo de flujo de red, es decir, ofrece

el resultado con una estimación de probabilidad máxima a posteriori (MAP). Para el cálculo del coste, se puede elegir entre tres opciones que se adaptan mejor para distintos escenarios, una opción para desenrollado de fase topográfica, otra para el desenrollado de fase por deformaciones y otra para zonas de cambios suaves.

3.3.12. Conversión de fase a desplazamiento.

Una vez eliminada las componentes de tierra plana y topográfica, y después del desenrollado de fase, el interferograma contendrá únicamente diferencias de fase producto de posibles desplazamientos y las generadas por otros factores de ruido.

El interferograma es una imagen con valores de fase medidos en radianes y se pueden convertir en desplazamiento en metros según la siguiente ecuación vista en el apartado 2.4:

$$\Delta\phi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

$$d = \frac{\Delta\phi_d \lambda}{4\pi}$$

En el caso de Sentinel-1, la longitud de onda $\lambda = 5,547$ cm, lo que implica que cada franja de 2π en el interferograma previo al desenrollado se corresponde con un desplazamiento de $\lambda/2 = 2,8$ cm.

En este proceso se ha considerado que la componente de ruido es mucho menor que la de desplazamiento y que toda la diferencia de fase se debe a los desplazamientos, pero esto no es del todo cierto ya no se han considerado los factores atmosféricos, si bien la componente de ruido atmosférico suele estar acotada en un rango $(-\pi, +\pi)$, variando de forma suave a lo largo de la escena (TM-19, 2007).

Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar la incidencia de los factores atmosféricos en el resultado final.

3.3.13. Refinamiento.

La fase convertida en desplazamiento puede tener un error de cero, ya que las diferencias de fase son relativas. En un escenario donde no se ha producido ningún desplazamiento, o este ocupa una parte menor de la superficie, la media de desplazamiento debería ser próxima a cero. Sin embargo, si el desenrollado de fase comienza en una zona afectada por nubosidad o por otras fuentes de error, ese desplazamiento se arrastra sobre el resto de la imagen.

En SNAP no hay un paso de procesamiento específico para corregir este error de cero, pero comprobando las estadísticas de desplazamiento en toda la escena y suponiendo que la media debe ser próxima a cero se puede corregir con una simple suma del desvío sobre la media cero.

El módulo SARscape de ENVI, realiza un paso de refinamiento previo a la conversión de fase en desplazamiento en el que se toman puntos de control sobre el modelo de elevaciones, de manera que se puede corregir el error de cero y reducir otros errores residuales como el de las efemérides.

3.3.14. Corrección geométrica.

Todo el análisis interferométrico hasta la conversión de fase en desplazamiento, se ha llevado a cabo en geometría radar, es decir sobre el plano de toma (*slant range*). En este plano la imagen tiene presenta una inversión sobre uno de sus ejes, dependiendo de la fase orbital en la que se toma, ya que se registra en el mismo orden en que se toma y eso puede ser por la esquina suroeste o por la noreste.

El último paso para la obtención del mapa de desplazamientos es la corrección geométrica que consiste en llevar cada pixel a sus coordenadas terreno, para lo que es necesario el modelo digital de elevaciones. Durante la corrección geométrica también se eliminan los efectos geométricos típicos de las imágenes radar, el escorzo y el plegado.

Este paso es el equivalente a la ortorrectificación de las imágenes ópticas donde se corrigen los errores en la posición del pixel por los efectos del relieve y la inclinación de la toma, y permite obtener una imagen que se pueda superponer y comparar con otros productos geomáticos.

3.3.15. Exportación.

La presentación y generación de productos derivados como los perfiles de desplazamiento, se ha realizado con la aplicación QGIS, por lo que el último paso con la aplicación SNAP es la exportación a formato *geotif* del mapa de desplazamientos.

3.3.16. Generación de perfiles

Con los mapas de desplazamientos se pueden generar, como producto derivado, perfiles sobre la zona afectada por el terremoto. Se trata de un producto muy visual que permite cuantificar rápidamente el desplazamiento generado durante el terremoto y, además, en caso de haberse utilizado más de un interferograma, es posible comparar los resultados obtenidos y analizar las diferencias. Este ha sido el método seguido para analizar las diferencias en el terremoto de China, donde se contaba con pares en las fases orbitales ascendente y descendente.

4. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

4.1. Desplazamiento del terreno tras un terremoto. (Xinjiang, China).

El terremoto analizado tuvo lugar en la provincia de Xinjiang, en China, el 19/01/2020 a las 13:27:58 UTC en coordenadas 77,11° E – 39,83° N. Se estima que se produjo a una profundidad de 6,3 km y que tuvo una magnitud aproximada de 6.0 (Mw).

Para el análisis del desplazamiento de este terremoto se han utilizado 5 pares interferométricos que se identificarán en adelante, con el topónimo, la fase orbital del satélite (Ascendente/Descendente) y las fechas de toma de las imágenes.

Tal y como se indicó en el apartado sobre la metodología para cada par de imágenes se detallan los datos más relevantes en cada caso: el análisis de línea base, las estadísticas de coherencia, estadísticas de las imágenes de fase, los interferogramas, el mapa de desplazamientos y los perfiles perpendiculares a la línea de fractura.

Xinjiang (China). Ascendente 16/01/2020 – 28/01/2020

El análisis comienza una vez está disponible el interferograma enrollado y filtrado de la zona de interés.

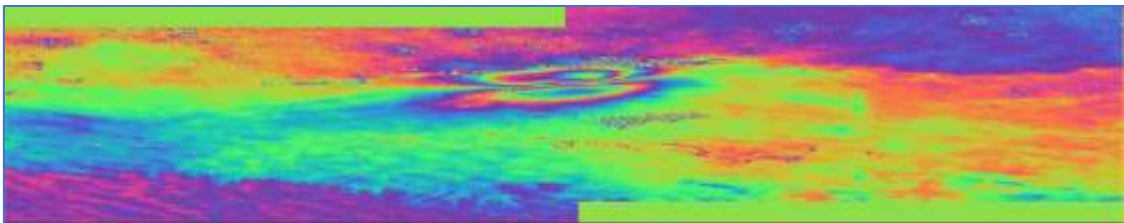


Figura 4.1. Interferograma filtrado del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020.

En el interferograma se observan las franjas producidas por la diferencia de fase. Al eliminar la componente topográfica durante la generación del interferograma, la fase aquí representada corresponde a posibles desplazamientos o factores de ruido. Sin embargo, hay que analizar la línea base, ya que en caso de que la altura de ambigüedad fuera pequeña, posibles errores en el modelo digital de elevaciones estarían siendo interpretados como fase de desplazamiento.

Según lo visto anteriormente, la altura de ambigüedad depende de la línea base perpendicular, el ángulo de incidencia, la altura del satélite y la longitud de onda:

$$h_{amb} = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n}$$

En el caso de Sentinel-1 la altura del satélite es de 693 km y la longitud de onda $\lambda = 5,547$ cm. Para este par interferométrico, el ángulo de incidencia varía en dirección de la línea de vista entre $36,5^\circ$ y $45,8^\circ$, y la línea base perpendicular es de 12 metros, lo que supone una altura de ambigüedad de entre 953 y 1148 metros. Si se toma un ángulo de incidencia medio, que coincidiría con la zona central de la escena donde se ven los efectos del terremoto, la altura de ambigüedad para este par sería de unos 1050 metros. Esto significaría que una diferencia de fase de 2π habría sido generada por un error en el modelo digital del terreno de más de 1000 m.

En este caso la línea base perpendicular es muy próxima cero (12 m), por lo que se puede afirmar que toda la diferencia de fase presente en el interferograma es debida a desplazamiento y ruido.

Sobre el interferograma sin desenrollar se puede generar un perfil arbitrario que atraviese la zona de interés, y observar cómo en algunas zonas la fase oscila bruscamente debido al ruido que genera la falta de coherencia.

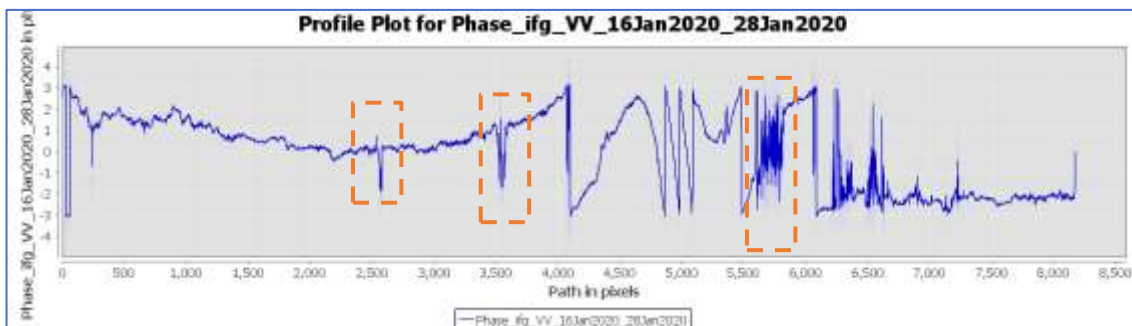


Figura 4.2. Perfil perpendicular a la línea de fractura sobre la imagen de fase enrollada a la línea de fractura donde se observa el ruido introducido por la falta de coherencia.

Una vez observado el efecto de la falta de coherencia en el perfil, el siguiente paso es el análisis general de la coherencia en par de imágenes.

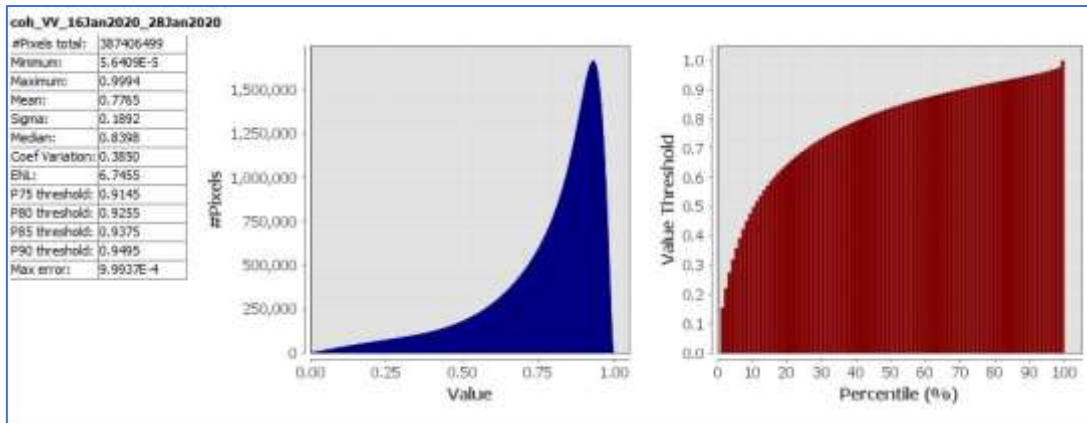


Figura 4.3. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020

Se puede observar cómo solo el 84% de los valores de coherencia están por encima de 0,6 lo que indica una alta coherencia entre las dos imágenes.

En un perfil se ha tomado de forma arbitraria (ver figura 4.4) se puede observar que la línea de ruptura y que uno de los bloques se ha elevado al menos 5 cm mientras que el otro se ha hundido al menos unos 4 cm.

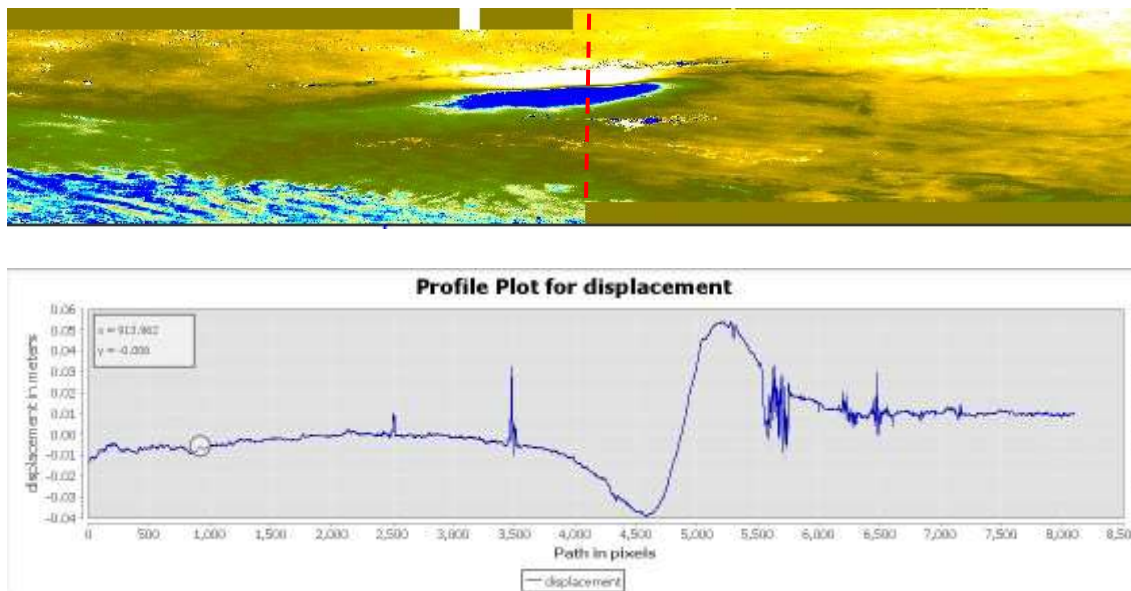


Figura 4.4. Superior: Desplazamientos en geometría del plano de toma en el par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020. Inferior: Perfil arbitrario sobre la imagen atravesando la línea de ruptura.

Para poder comparar los resultados de distintos pares e integrar el mapa de desplazamientos con otro tipo de información geográfica es necesario realizar la corrección geométrica, es decir, pasar de la geometría de toma a la geometría

terreno. Para poder utilizar la coherencia como máscara se añade la banda al mapa de elevaciones antes de la transformación. De la misma manera, durante el proceso, la aplicación SNAP permite añadir al resultado otros datos de interés como el modelo digital utilizado para la corrección o un mapa con los ángulos de incidencia locales.



Figura 4.5. Mapa de desplazamientos del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020.

El resultado se puede ver en el propio SNAP con un umbral de coherencia de 0,6. En QGIS se han definido 10 perfiles (ver figura 4.5) que atraviesan la línea de fractura de forma perpendicular y, de esta forma, comparar posteriormente cuando se tengan los resultados del par descendente.

Analizando los perfiles (figura 4.6) se puede observar cómo la mayor subsidencia ha sido de unos 4 cm mientras que la mayor elevación ha sido de 5,8 cm. Es destacable el hecho de que estos valores se observen en distintos perfiles, es decir, los valores máximos de elevación y subsidencia no se dan en dirección perpendicular a la línea desplazamiento cero.

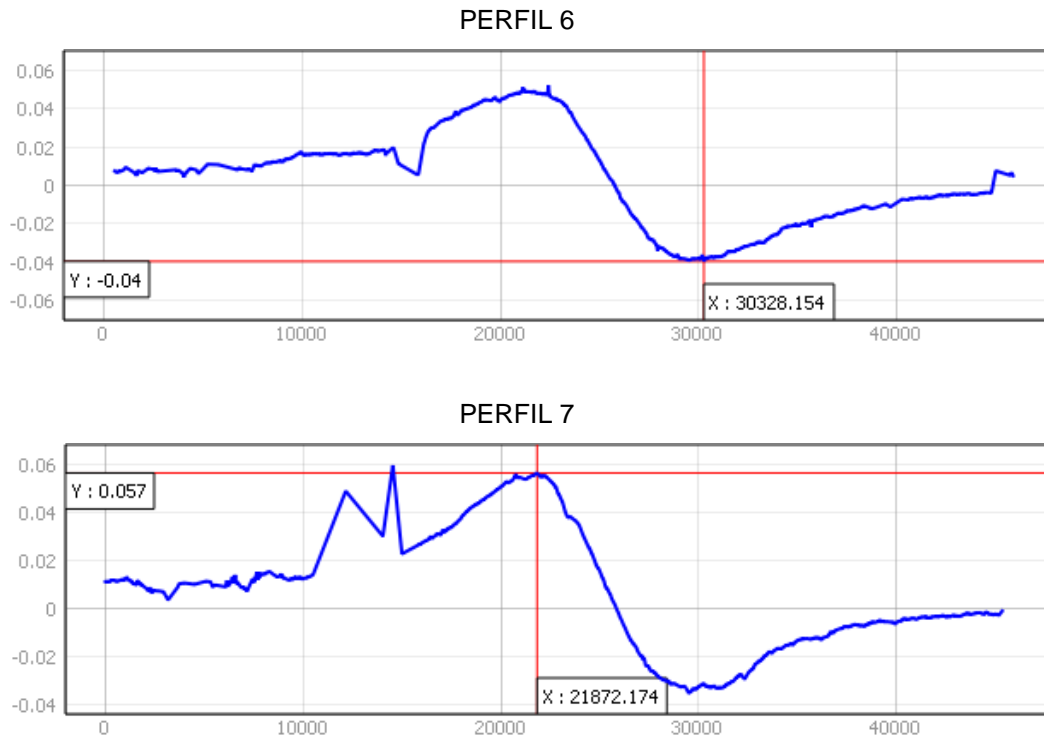


Figura 4.6. Perfiles 6 y 7 sobre el mapa de desplazamientos del par Xinjiang Ascendente 16/01/2020 - 28/01/2020.

Xinjiang (China). Descendente 10/01/2020 – 22/01/2020

Al igual que en el caso anterior, en el interferograma filtrado ya se observan las franjas producidas por desplazamientos, pero se analiza la altura de ambigüedad para descartar la presencia de fase generada por posibles errores en el modelo digital del terreno.

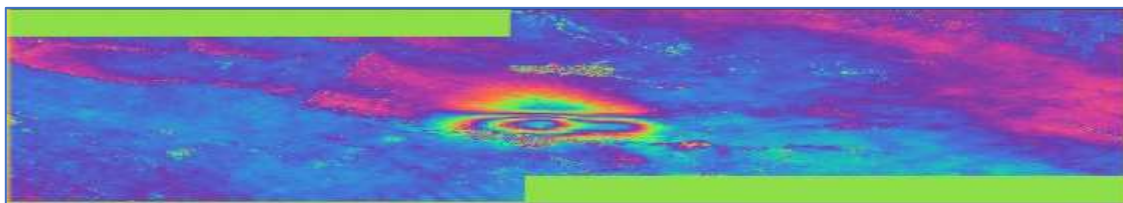


Figura 4.6. Interferograma filtrado del par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020.

En este caso, la línea base perpendicular es de -59.57 metros y el ángulo de incidencia medio es $36,5^\circ$, lo que supone una altura de ambigüedad $h_a = 191\text{m}$. Se puede observar que, si bien la altura de ambigüedad es mucho menor que en el caso anterior, sería necesario un error de 19 metros para generar una fase de $\Delta\phi = 2\pi/10$, que correspondería a 2,8 mm.

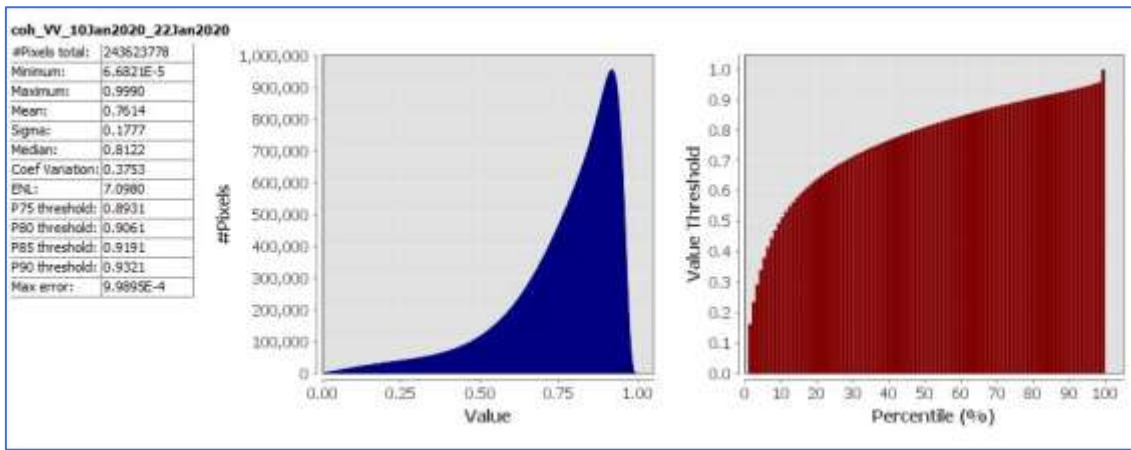


Figura 4.7. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020.

El análisis de coherencia muestra un escenario prácticamente idéntico al del caso ascendente con el mismo percentil para un valor de 0,6 de coherencia, que es el que se ha utilizado como filtro.

La imagen de fase convertida a desplazamiento muestra un comportamiento ligeramente distinto y en un perfil arbitrario atravesando la fractura se observa como las zonas más alejadas de la línea de fractura, que deberían tener un desplazamiento próximo a cero, muestran una subsidencia de alrededor de 1 cm.

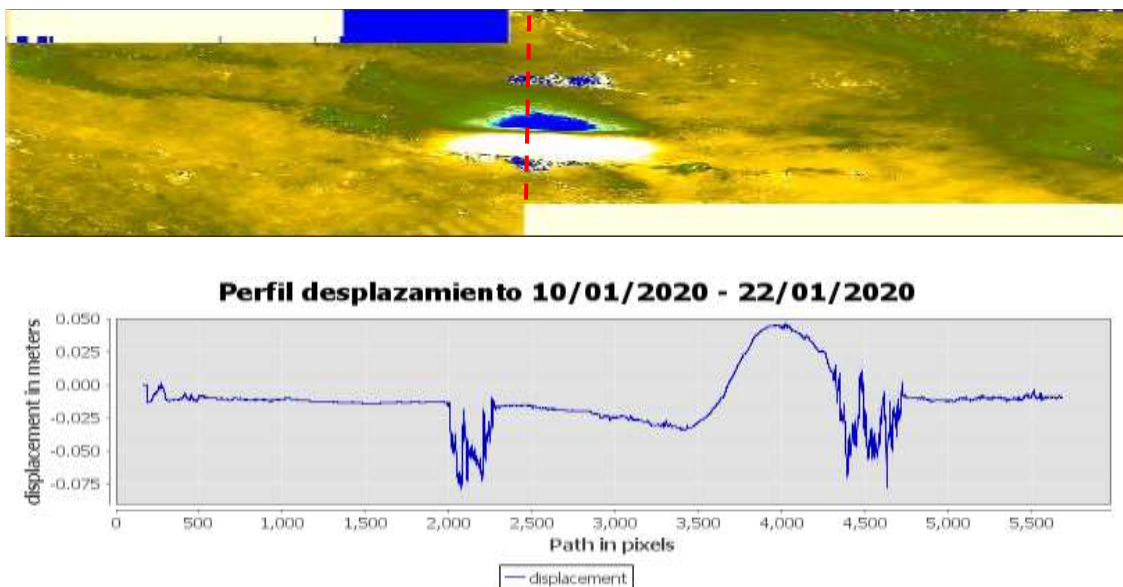


Figura 4.8. Desplazamientos en geometría del plano de toma y perfil arbitrario en el par Xinjiang Ascendente 10/01/2020 - 22/01/2020.

El proceso de desenrollado o errores residuales en las efemérides pueden producir un error de cero o un giro en el interferograma sintético generado para eliminar la componente topográfica. Algunos programas de tratamiento de

imágenes radar como Sarscape de ENVI incluyen un paso más previo al resultado final que consiste en un refinamiento tomando puntos de control en el modelo de elevaciones. Un análisis más profundo se puede hacer observando las estadísticas de la capa.

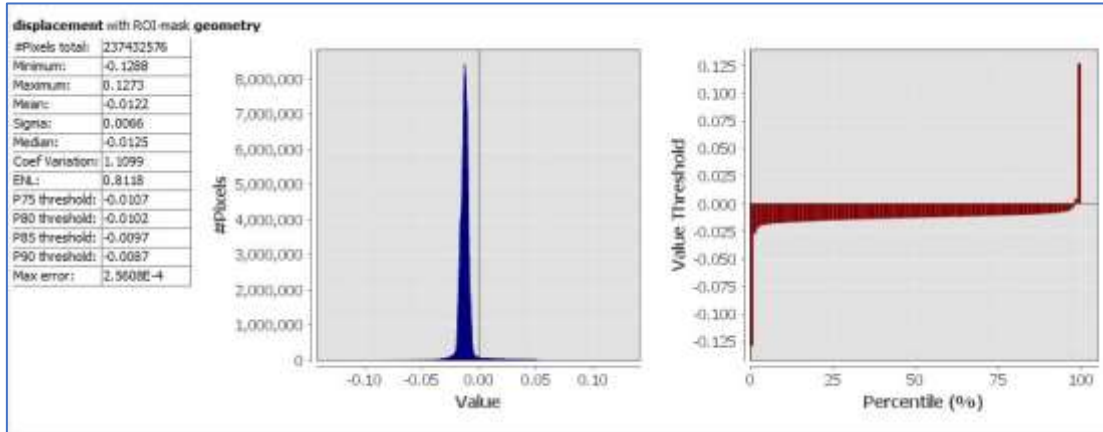


Figura 4.9. Estadísticas del mapa de desplazamientos en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020.

El histograma del mapa de desplazamientos muestra una desviación de un 1,2 cm que puede ser corregida sumándole ese valor a todos los píxeles de la imagen. Una vez realizada la corrección se puede ver en las estadísticas que queda algún componente de error, producto de las efemérides, o de factores atmosféricos.

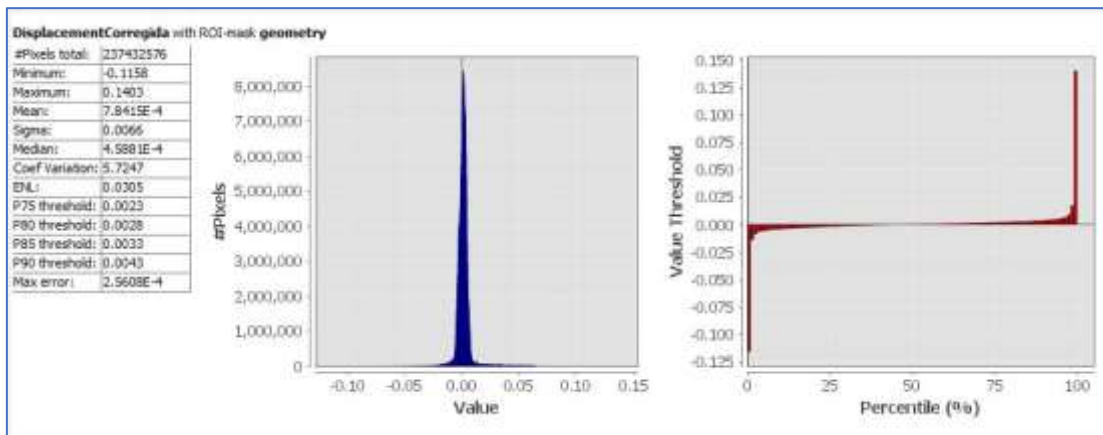


Figura 4.10. Estadísticas del mapa de desplazamientos en el par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020, una vez corregido el error de cero.

Una vez corregido el decalaje se realiza la corrección geométrica y se compara el resultado con el par ascendente.



Figura 4.11. Mapa de desplazamientos del par Xinjiang Descendente 10/01/2020 - 22/01/2020. Se puede observar cómo la línea de desplazamiento cero, que podría considerarse como la línea de fractura, varía ligeramente en los dos mapas de desplazamiento.



Figura 4.12. Líneas de desplazamiento cero según los pares ascendente y descendente en el escenario de Xinjiang.

Y de igual manera, si se analizan los perfiles se ven ligeras diferencias. En la figura 4.13 se muestra en azul el perfil sobre el par ascendente y en rojo el perfil sobre el par descendente.

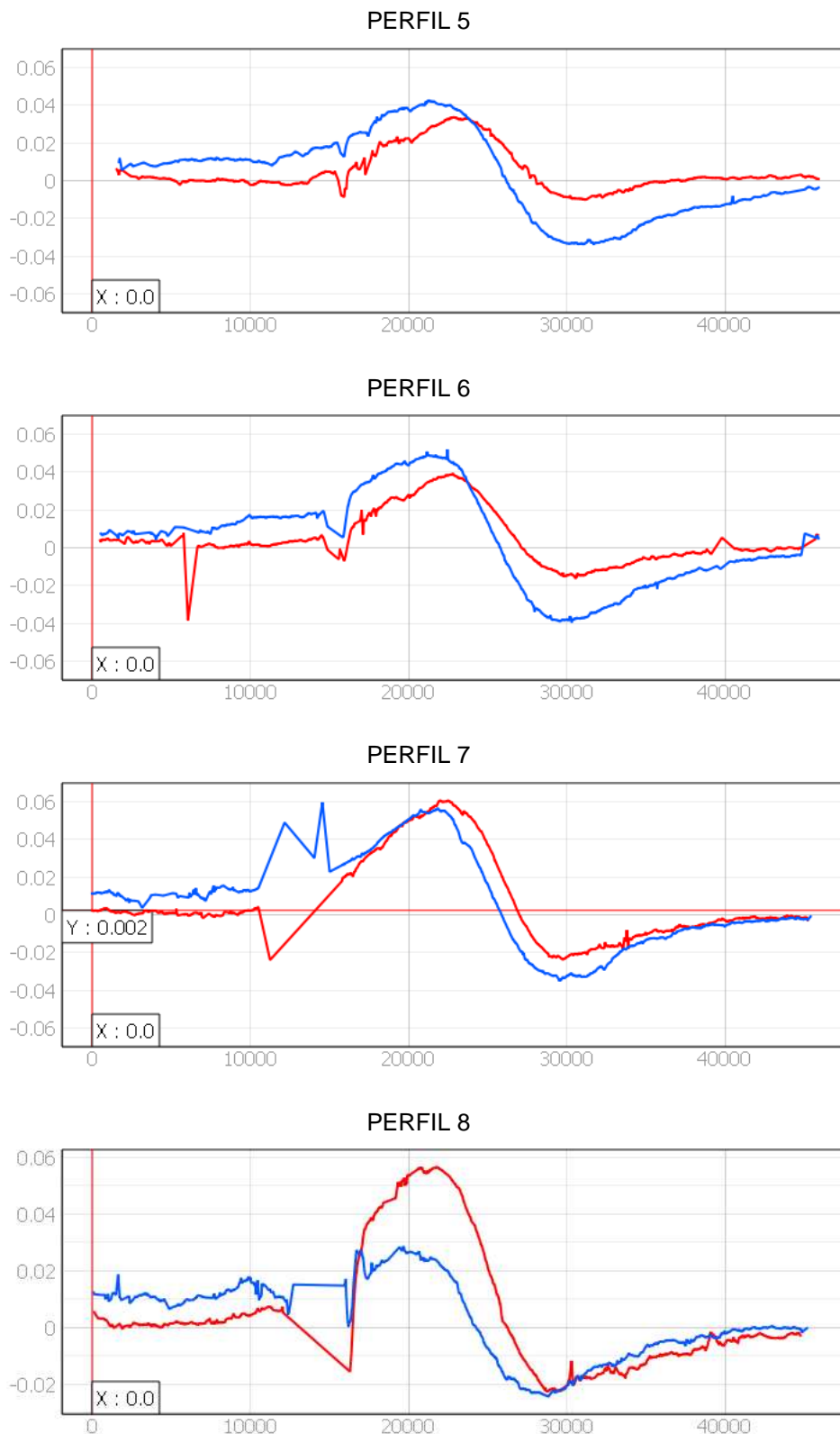


Figura 4.13. Comparación entre los perfiles de desplazamiento de los pares ascendente y descendente en el escenario de Xinjiang.

Si bien sería necesario un análisis más profundo, la causa más probable es la distinta geometría, fase orbital y ángulo de toma, y el hecho de que con esta técnica los desplazamientos que se miden son producidos a lo largo de la línea de vista.

Otro factor que puede haber influido en la diferencia entre los dos mapas de desplazamiento es la existencia de réplicas o precursoros del terremoto principal que se produjo el día 19 de enero. Según el USGS el día 25 de enero se produjo una réplica de magnitud 4,5 Mb, cuyos efectos no estarían presentes en el par 10/01/2020 – 22/01/2020, si bien, no está claro que un terreno de esa magnitud pueda generar en superficie efectos detectables mediante técnicas DInSAR.

Xinjiang (China). Ascendente 04/01/2020 – 16/01/2020

El objetivo del análisis de este par previo al terremoto es aplicar la técnica en el mismo terreno en ausencia de movimiento sísmico y analizar si los resultados son los esperados.

En este caso, el valor de la línea base perpendicular 34,1 m y el ángulo medio de $41,1^\circ$ producen una altura de ambigüedad de 317 m, demasiado grande para producir efectos en el interferograma.

Los valores de coherencia son muy similares a los de los casos anteriores y en el interferograma no se observan franjas que indiquen signos de desplazamiento.

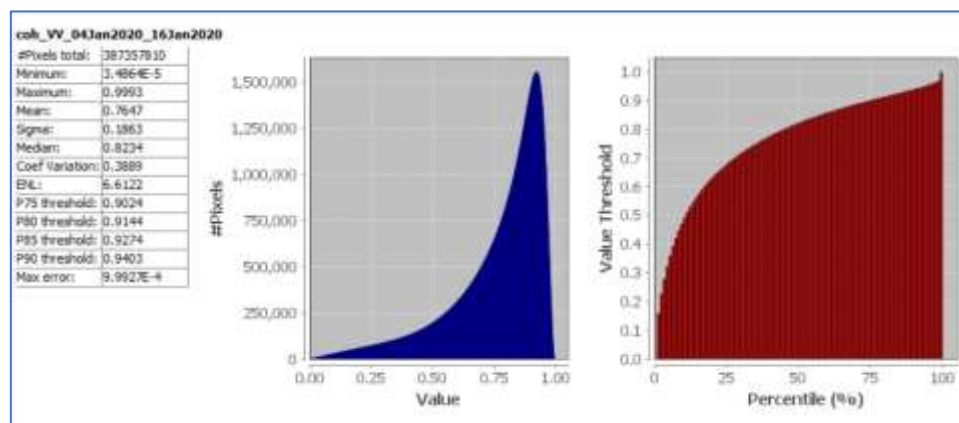


Figura 4.14. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020.

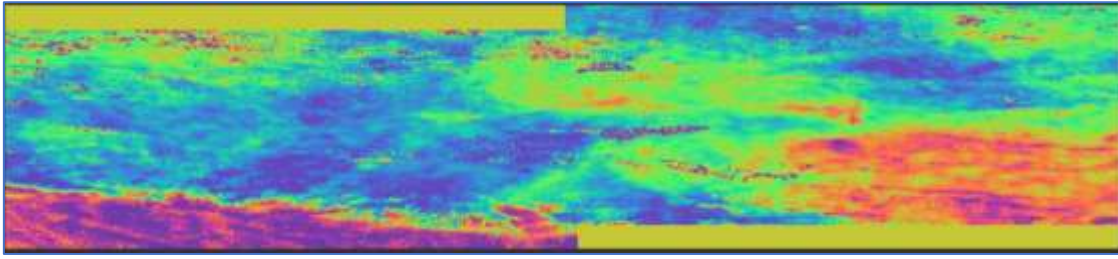


Figura 4.15. Interferograma filtrado del par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020.

Además, en el interferograma desenrollado, los valores de fase se encuentran acotados en el rango $(-\pi, +\pi)$, lo cual es compatible con la influencia de la componente atmosférica (TM-19, 2007)

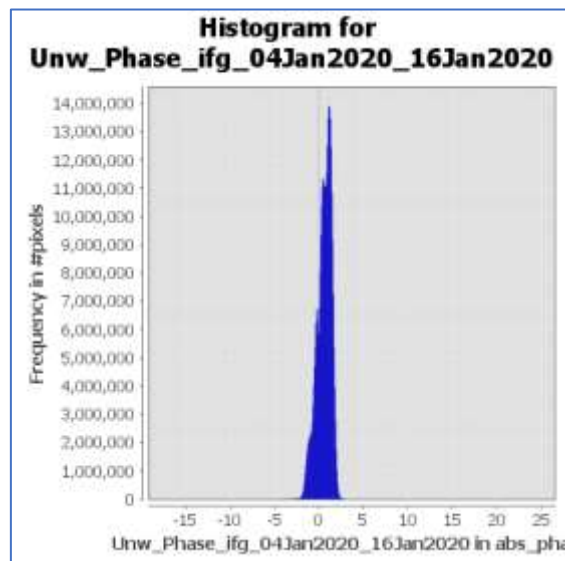


Figura 4.16. Histograma del interferograma desenrollado del par Xinjiang Ascendente 04/01/2020 - 16/01/2020.

Xinjiang (China). Descendente 29/12/2019 – 10/01/2020

El análisis del par descendente previo al terremoto, mostró unos resultados similares a los del par el ascendente en cuanto al análisis de coherencia. El interferograma desenrollado no muestra señales de desplazamientos rápidos y la mayoría de los valores están en el rango de $(-\pi, +\pi)$, si bien en este caso se observa un número significativo de diferencias de fase por debajo de $-\pi$.

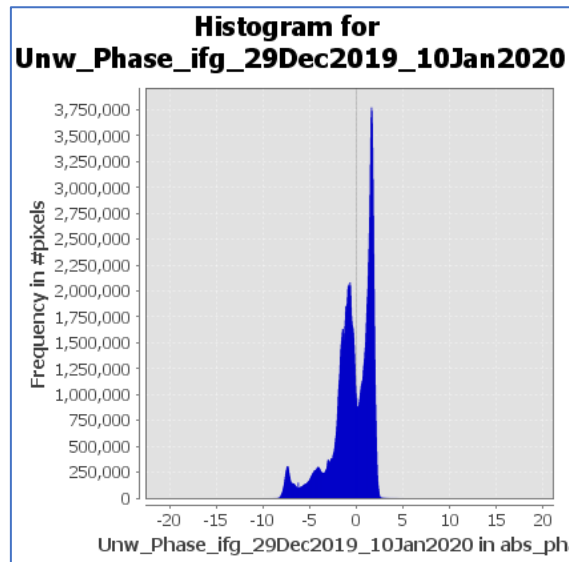


Figura 4.17. Histograma del interferograma desenrollado del par Xinjiang Descendente 29/12/20190 - 10/01/2020.

Al no haberse detectado las franjas características de los desplazamientos rápidos, la causa más probable de la existencia de esos valores fuera del rango $(-\pi, +\pi)$ sigue siendo el efecto de los fenómenos atmosféricos, ya que se habla de que se habla de un efecto suave que se manifiesta “desde varios cientos de metros a varios kilómetros” (TM-19, 2007). En este caso, la diferencia, se da a lo largo de una línea de 175 km.

Para confirmar la hipótesis de la contribución atmosférica se ha comparado la imagen de desplazamientos desenrollada con el modelo digital de elevaciones de la zona y se ha visto que están fuertemente correladas. El modelo digital de elevaciones muestra, además, diferencias de hasta 1000 metros de altitud entre los puntos con mayor diferencia de fase.

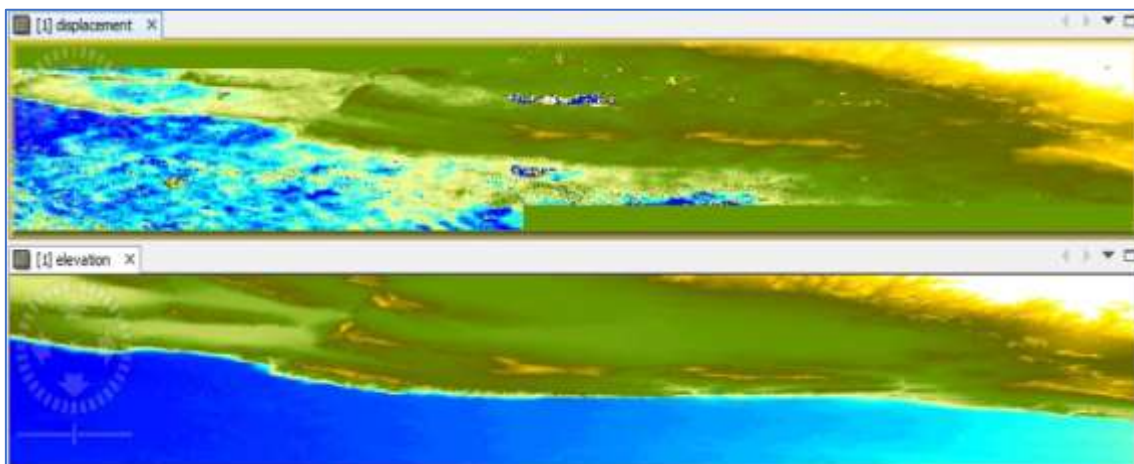


Figura 4.18. Comparación entre la imagen de desplazamientos y el modelo digital de elevaciones en el par Xinjiang Descendente 29/12/20190 - 10/01/2020.

Xinjiang (China). Ascendente 14/06/2019 – 26/06/2019

Se ha visto que los interferogramas previos al terremoto han mostrado desplazamientos compatibles con efectos atmosféricos, pero aun así, se decidió analizar un último par en una época distinta del año, en un mes en el que no se registró ningún temblor en la zona.

Con una línea base perpendicular de 79,7 m y un ángulo de incidencia medio de 41,5° la altura de ambigüedad es de 136 metros, demasiado grande como para notar los efectos de un error de modelo de elevaciones en el interferograma.

Sin embargo, el análisis de la coherencia del par muestra unos valores significativamente menores que en los cuatro pares analizados anteriormente. Se observa que el 57% de los valores están por debajo de 0,6 de coherencia frente al 16-17% de los pares anteriores. Las diferencias son evidentes con la simple observación del histograma.

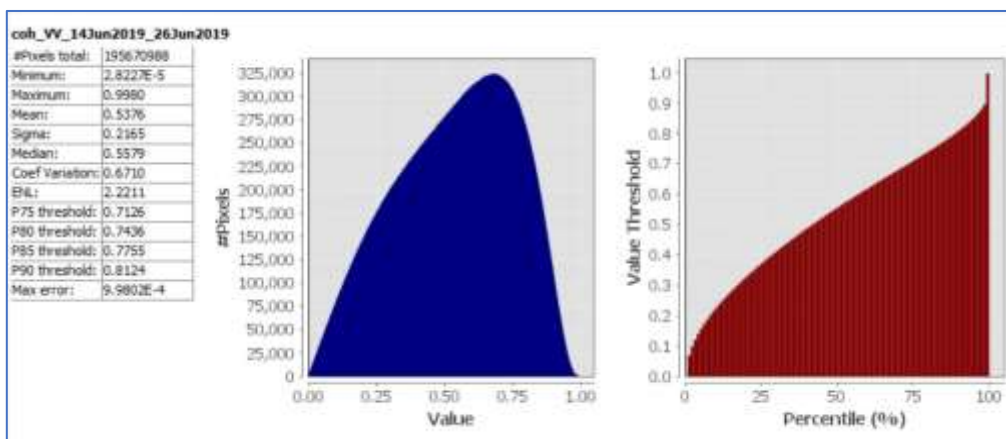


Figura 4.19. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019.

La imagen total del interferograma desenrollado muestra cómo algo más de la mitad de los píxeles son no válidos si se establece la condición de coherencia superior a 0,6.

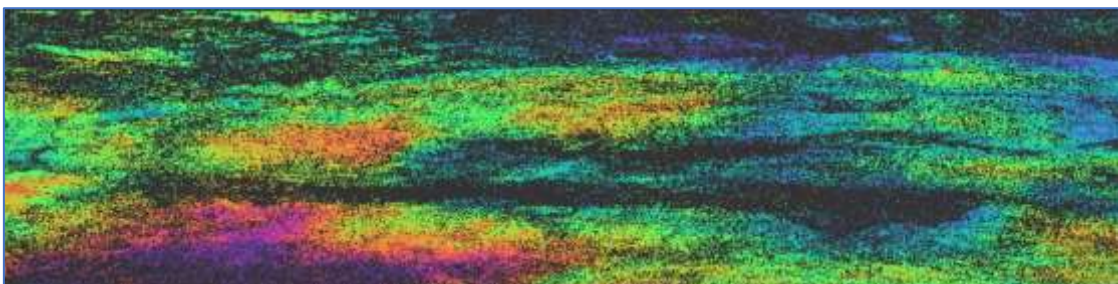


Figura 4.20. Interferograma desenrollado filtrado con valores de coherencia mayores que 0.6 en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019.

Y el análisis estadístico de la imagen muestra que los valores de pixel desenrollado no están acotados por $(-\pi, +\pi)$.

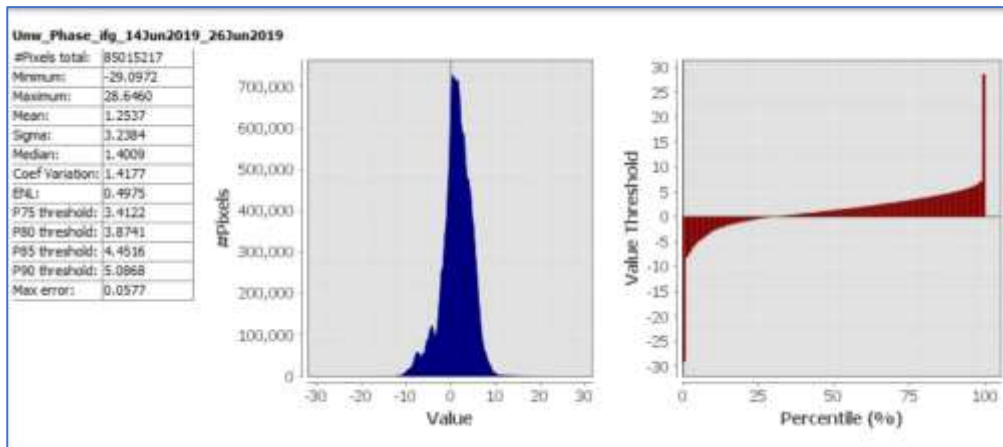


Figura 4.21 Estadísticas del interferograma desenrollado en el par Xinjiang Ascendente 14/06/2019 - 26/06/2019.

Ante estos resultados, cabe preguntarse a qué se puede deber la falta de coherencia. La hipótesis principal es la presencia de nubes en la escena. La variación de las condiciones atmosféricas, la presencia de vapor de agua, altera la fase recibida por el satélite. En ausencia de nubosidad, esa alteración suele estar acotada en el intervalo $(+\pi, -\pi)$ como se ha visto en los ejemplos anteriores, pero es posible que la fuerte nubosidad provoque una pérdida de coherencia y una fase no acotada en ese intervalo.

Otra hipótesis para explicar la falta de coherencia es la decorrelación temporal, es decir, que en el intervalo de tiempo entre tomas se hubiera producido algún fenómeno que hubiera modificado la superficie del terreno lo suficiente para generar esa falta de coherencia. Esto depende del tipo de terreno y de la longitud de onda de la señal. En una zona de dunas activas, el simple movimiento de la duna generado por el viento, puede provocar la falta de coherencia, y una fuerte tormenta puede tener los mismos efectos en otro tipo de terrenos. En cualquier caso, sería necesario un análisis más profundo en distintos tipos de terreno, con distintas longitudes de onda y cruzando los resultados con datos meteorológicos.

4.2. Influencia de la coherencia en la generación del interferograma.

Terremoto de Loreto (Perú) 2019.

Al comienzo del trabajo se planteó el análisis del desplazamiento provocado por un terremoto de gran intensidad en una zona con baja coherencia, a priori.

Si bien el análisis del último par de imágenes de Xinjiang, de junio de 2019, ya ha puesto de manifiesto la importancia de la coherencia para la aplicación de las técnicas DInSAR, se ha analizado también un par interferométrico del terremoto que tuvo lugar en el departamento de Loreto, en Perú, el pasado día 26/05/2019 a las 07:41:14 UTC. Este terremoto tuvo una magnitud de 8.0 (Mw), a una profundidad de 103 km y se calcula que liberó una energía equivalente a más de 10 millones de toneladas de TNT (Fuente: USGS).

El epicentro ($75,13^{\circ}$ N - $5,78^{\circ}$ S) está localizado en una zona de selva tropical, y teóricamente, la dispersión volumétrica es uno de los factores generadores de falta de coherencia.

Loreto (Perú). Descendente 18/05/2019 – 30/05/2019

La línea base perpendicular para este par interferométrico es de 28,7 m, valor suficientemente próximo a cero como para no influir en el análisis de desplazamiento, como se ha visto en los ejemplos anteriores.

El interferograma enrollado que se genera con este par de imágenes solo contiene ruido.

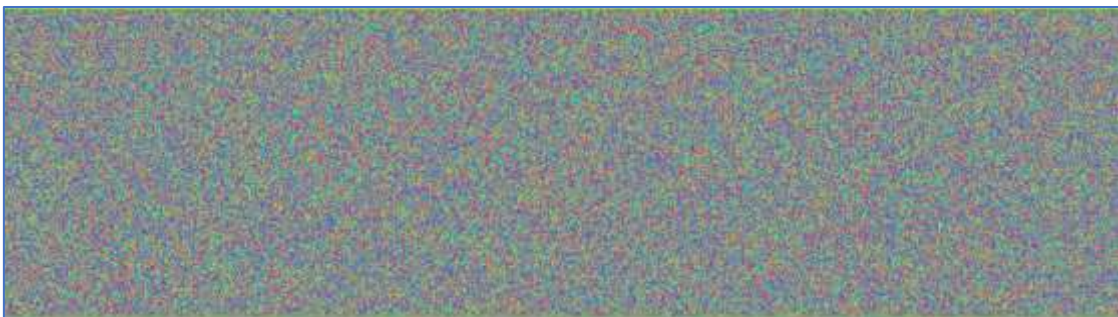


Figura 4.21 Interferograma enrollado en el par Loreto Descendente 18/05/2019 – 30/05/2019.

Lo interesante de este par es el análisis la estadística de la imagen de coherencia. Un 95% de los valores está por debajo de 0,6 y la media se sitúa en 0,33. Esto significa que incluso en una escena en la que la que el interferograma generado es sólo ruido, el valor medio de la coherencia, parámetro estadístico

que representa la correlación entre las fases, puede llegar a alcanzar valores de 0,3.

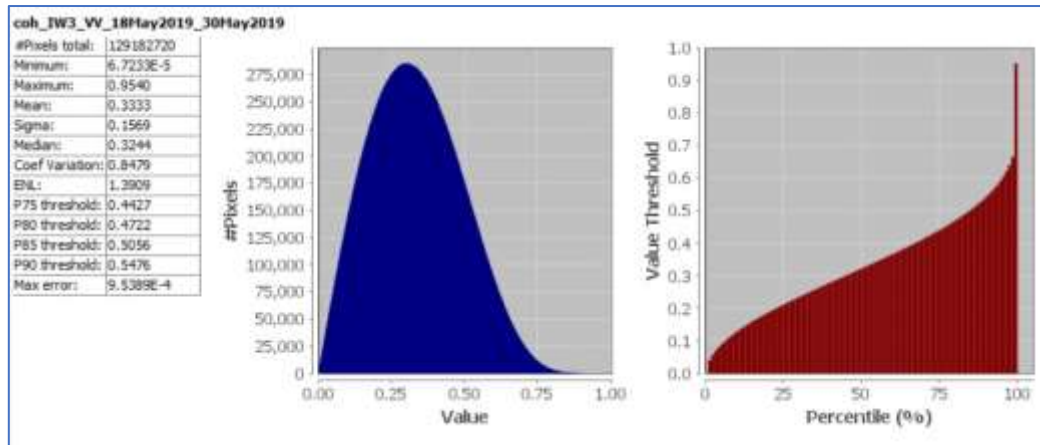


Figura 4.22. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Loreto Descendente 18/05/2019 – 30/05/2019.

4.3. Utilización en terremotos de baja intensidad y caracterización de los factores atmosféricos. Terremoto de Alicante 2018.

Uno de los objetivos de este trabajo era determinar si se pueden aplicar las técnicas DInSAR en terremotos de menor intensidad. Para comprobar este punto se buscó un terremoto en territorio español con intensidad por encima de 4 (Mw) que hubiera tenido lugar durante los dos últimos años. La búsqueda se realizó en la página web del Instituto Geográfico Nacional que dispone de un buscador de terremotos en el que se puede filtrar por magnitud y fecha: <https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>.

El terremoto elegido fue el que tuvo lugar en Alicante (38,2491° N – 0,9523° O) el 13/08/2018 a las 14:40:05 UTC, con una magnitud de 4,2 (Mw) y a una profundidad de 11 km.

Para el análisis, se descargaron del repositorio de Copernicus dos pares de la zona con imágenes anteriores y posteriores, una en fase orbital ascendente y otra en fase descendente.

Alicante (España). Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018

La línea base perpendicular de este par interferométrico es de -155.5 m y el ángulo medio 39,3°. El valor de línea base perpendicular es alto para las especificaciones del satélite ya que teóricamente, el diámetro del tubo no debería

ser superior a 100 m. La altura de ambigüedad calculada es de 78 m, lo que supone que un error de 16 m (precisión nominal del SRTM) supondría una variación de $\Delta\phi = \lambda/5$, que corresponde a unos 6 mm. Este dato es un valor a tener en cuenta en el análisis del interferograma y en las conclusiones finales del trabajo.

El análisis de la coherencia de la imagen indica que solo el 50% de los valores están por encima de 0,6 muy lejos de los valores que se daban en los pares de Xinjiang.

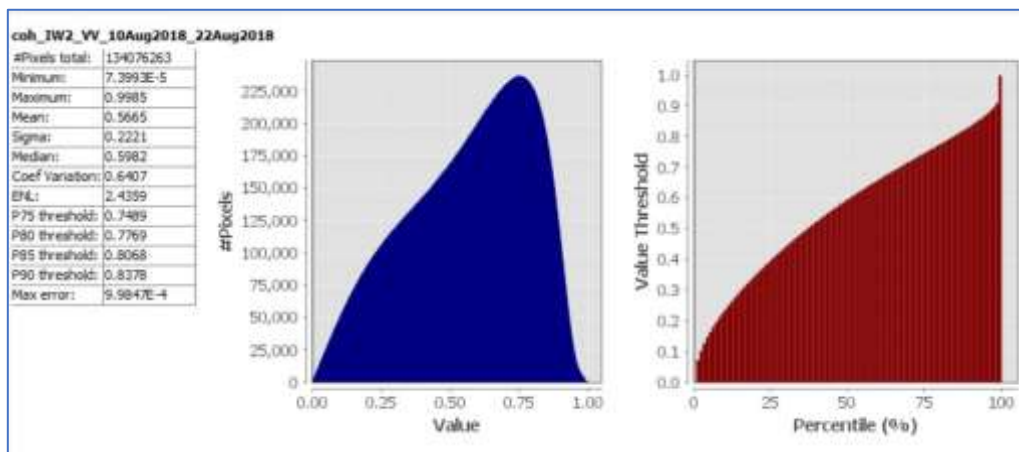


Figura 4.22. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.

La imagen cubre una parte del mar Mediterráneo y el agua es incoherente por su naturaleza no estática por lo que para un análisis más preciso de la zona de interés ser enmascara esa zona y se vuelve a calcular el histograma.

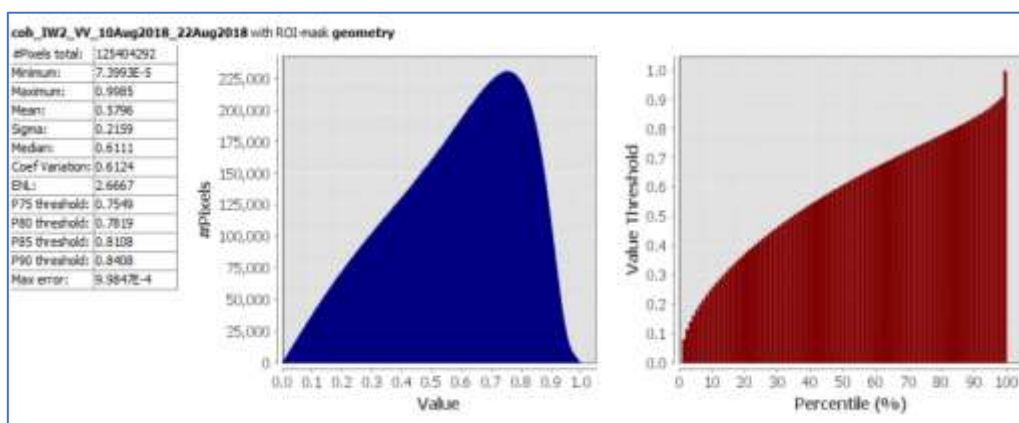


Figura 4.23. Estadísticas de la imagen de coherencia en par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018, enmascarando la zona correspondiente al mar Mediterráneo.

La mejora es apenas de un 2%. Los factores que pueden provocar la baja coherencia son la mayor longitud de la línea base, las diferencias en el tipo de terreno o la presencia de fenómenos atmosféricos en alguna de las imágenes.

Se continúa con el análisis observando la imagen de fase desenrollada y sus estadísticas.

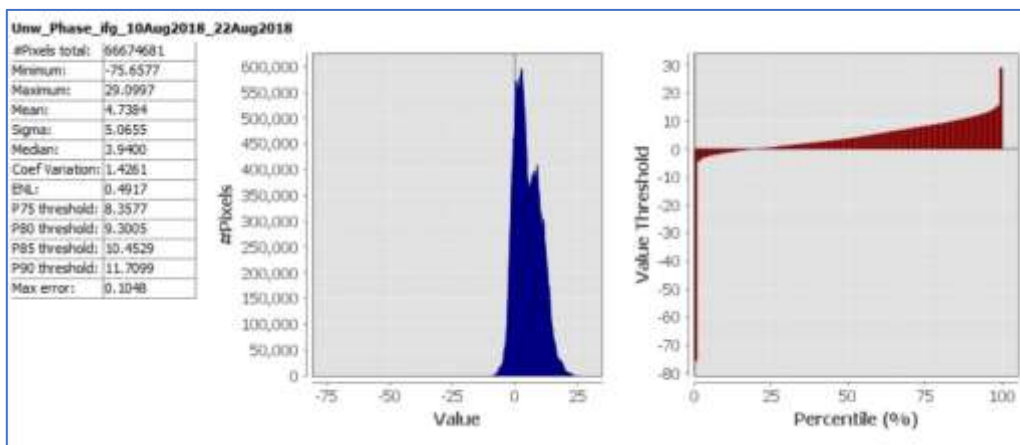
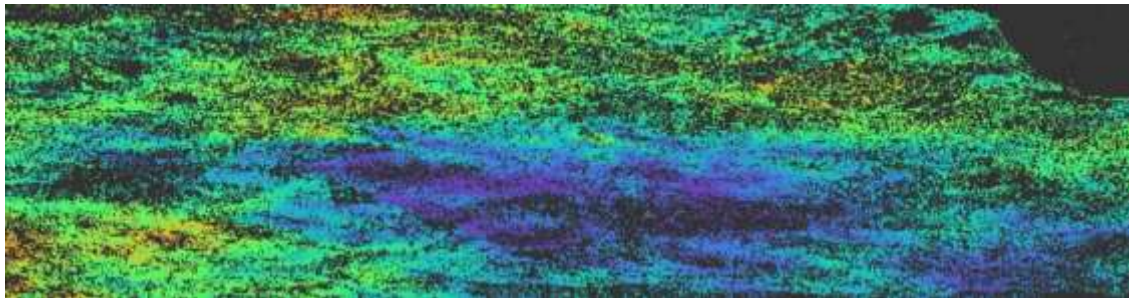


Figura 4.24. Imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 y sus estadísticas en el par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.

Las estadísticas muestran un desplazamiento de la media de 4,7 radianes, pero aun corrigiendo ese desplazamiento se observan valores claramente no acotados entre $(-\pi, +\pi)$. Sin embargo, no se observan desplazamientos localizados en torno al epicentro que pudieran haber sido producidos por el terremoto. La explicación más probable de lo que se ve en la imagen de fase desenrollada es la presencia de nubosidad, hipótesis que se intentará contrastar en el análisis del siguiente par de la zona.

Alicante (España). Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018

La línea base perpendicular de este par interferométrico es de 23,4 m y el ángulo medio de $33,9^\circ$. Tal y como se ha visto en los casos anteriores una línea base próxima a cero implica una altura de ambigüedad demasiado grande como para tenerla en consideración en el análisis de desplazamientos.

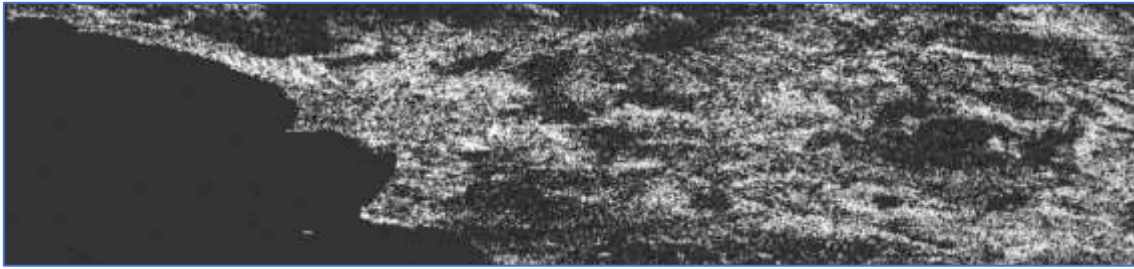


Figura 4.25. Imagen de coherencia filtrada para mostrar solo los valores mayores que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

La imagen de coherencia filtrada para valores de coherencia mayores de 0,6 muestra claramente el perfil de la costa y las estadísticas de la imagen de coherencia, enmascarando esa zona, indican que el 63% de los valores se encuentran por encima de 0,6. Se sigue tratando de un valor muy bajo comparado con los de las imágenes de China.

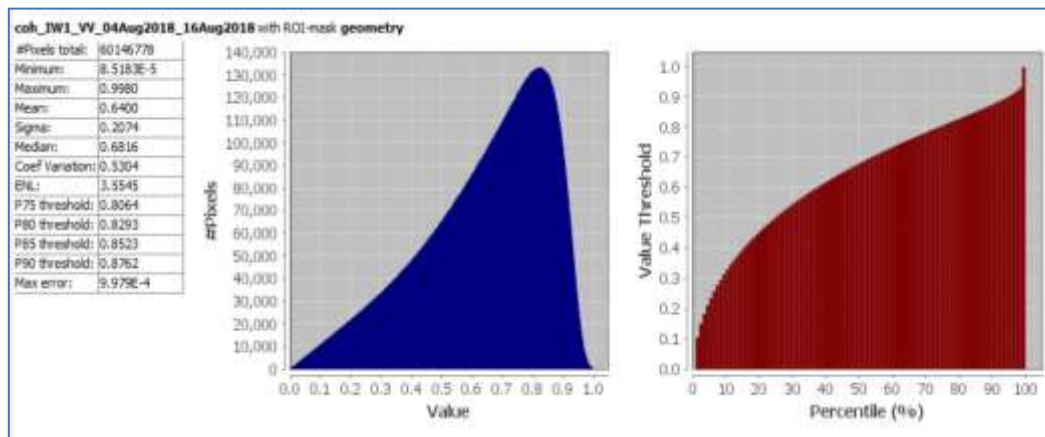


Figura 4.26. Estadísticas de coherencia con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

La imagen de fase desenrollada muestra pocas variaciones en la zona de interior, pero si se analiza su histograma se puede ver que hay un gran desplazamiento de la media cero provocado probablemente por errores en el desenrollado de la zona de mar.



Figura 4.27. Imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

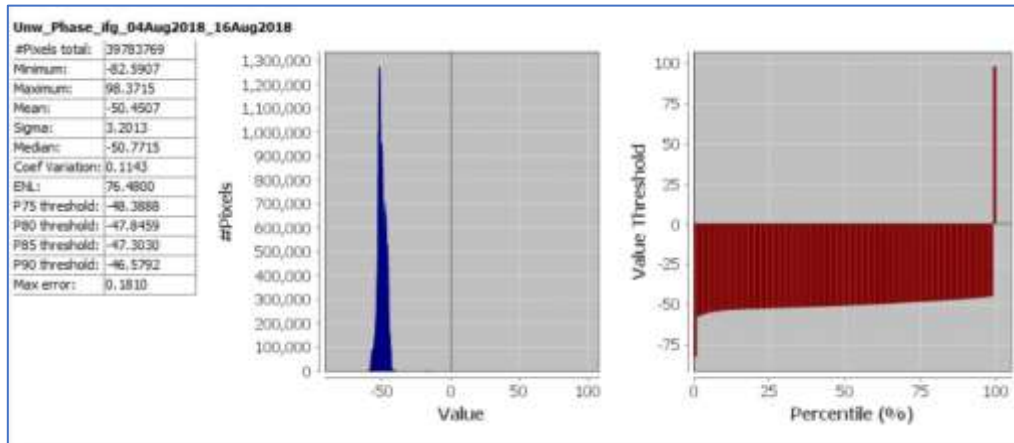


Figura 4.28. Estadísticas de la imagen de fase desenrollada con máscara de coherencia mayor que 0,6 en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

Una vez corregido el error de cero, se puede observar que la mayoría de los valores están dentro del rango $(-\pi, +\pi)$ y la distribución es homogénea.

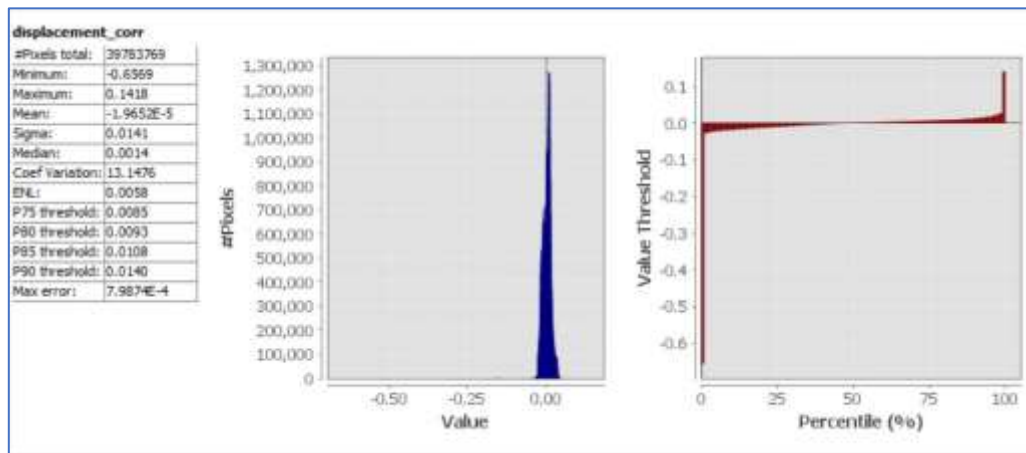


Figura 4.29. Estadísticas de la imagen de desplazamiento una vez corregido el error de cero en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

Para analizar los valores en torno al epicentro del terremoto y comprobar si existe correlación entre los valores de desplazamiento y la orografía de la zona, se aplica la corrección geométrica y se muestra el mapa de desplazamientos junto al modelo digital de elevaciones.

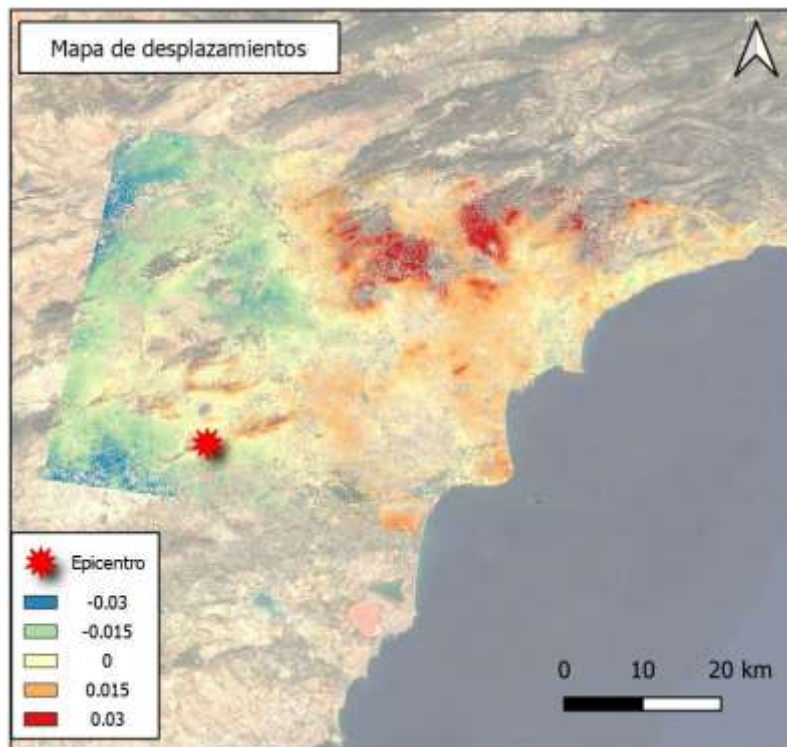


Figura 4.30. Mapa de desplazamientos en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

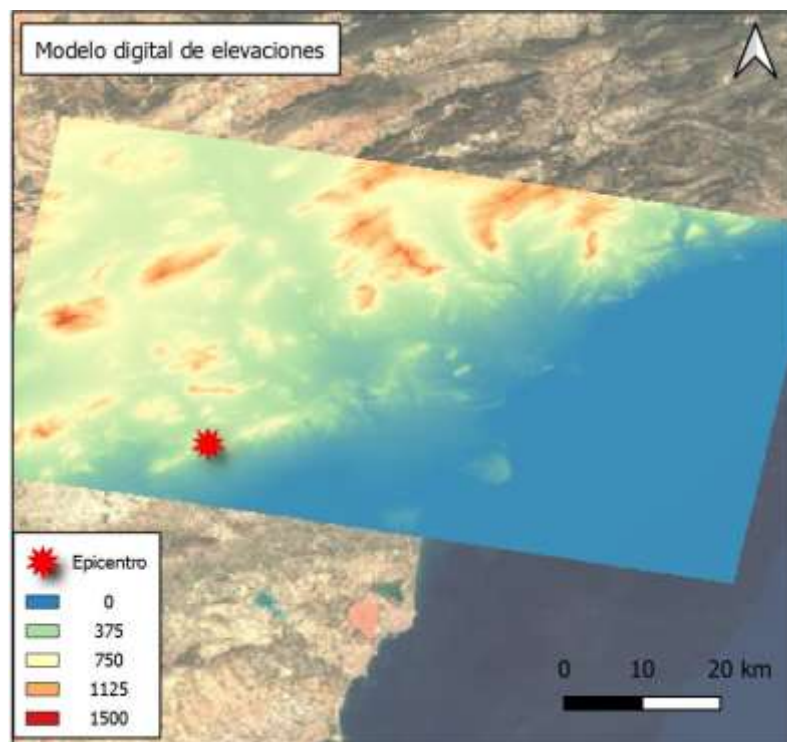


Figura 4.31. Modelo digital de elevaciones en el par Alicante Descendente 04/08/2018 – 16/08/2018.

Se puede comprobar que no hay desplazamientos significativos en torno al epicentro y que los valores fuera del rango $(-\pi, +\pi)$ se pueden explicar dada la correlación entre los desplazamientos y la orografía, en un escenario con gran humedad en la zona próxima a la costa y una diferencia de altitudes entre la máxima y la mínima de unos 1000 metros.

Del análisis de este par se puede concluir que al menos en este terremoto de 4.2 (Mw) de magnitud no es posible detectar desplazamientos del terreno. Hay que tener en cuenta que la escala de magnitudes es logarítmica, lo cual significa que un terremoto como el de Xinjiang, de magnitud 6.0 (Mw) habría liberado una energía casi 100 veces superior al de Alicante, y en ese caso solo se han detectado desplazamientos de aproximadamente ± 6 cm.

Por otro lado, se ha podido confirmar que, aun en escenarios de ausencia de nubosidad, si hay grandes diferencias de altitud, la estratificación de la atmósfera puede generar diferencias de fase fuera del rango $(-\pi, +\pi)$.

4.4. Influencia de la calidad del modelo digital del terreno. Terremoto de Alicante 2018.

Otro de los objetivos de este trabajo era comprobar la importancia de disponer de un modelo de elevaciones de calidad. El modelo se utiliza en la generación de un interferograma sintético que simula la diferencia de fase generada por la componente topográfica. Esa diferencia se resta de la fase medida y, de esta manera, en el interferograma solo queda la fase debida al desplazamiento y a las fuentes de ruido.

Si el modelo digital no tiene la suficiente calidad, los errores pueden generar diferencias de fase que sean interpretados como desplazamientos.

A lo largo de los ejemplos anteriores se ha comprobado que en el caso de Sentinel-1 es suficiente el SRTM de un segundo que utiliza la aplicación SNAP. La precisión nominal de ese modelo digital es de 16 m con un paso de malla de un arco de 1 segundo, aproximadamente 30 m a lo largo del meridiano.

El principal motivo por el que el SRTM es suficiente es que el ancho del tubo orbital de los Sentinel-1 es de 100 metros con lo que la altura de ambigüedad en la mayoría de los casos es demasiado grande como para que influyan posibles errores de 16 metros.

Para comprobar si un modelo peor influiría en el resultado, se ha analizado la diferencia de desplazamiento en el par con menor altura de ambigüedad, el par ascendente de Alicante, utilizando el SRTM de 3 segundos en lugar del de 1 segundo. Se ha comprobado que la desviación estándar de la diferencia de desplazamientos producidos es de 1 milímetro para este par, si bien esa diferencia puede llegar a ser algo mayor en zonas de alta montaña.

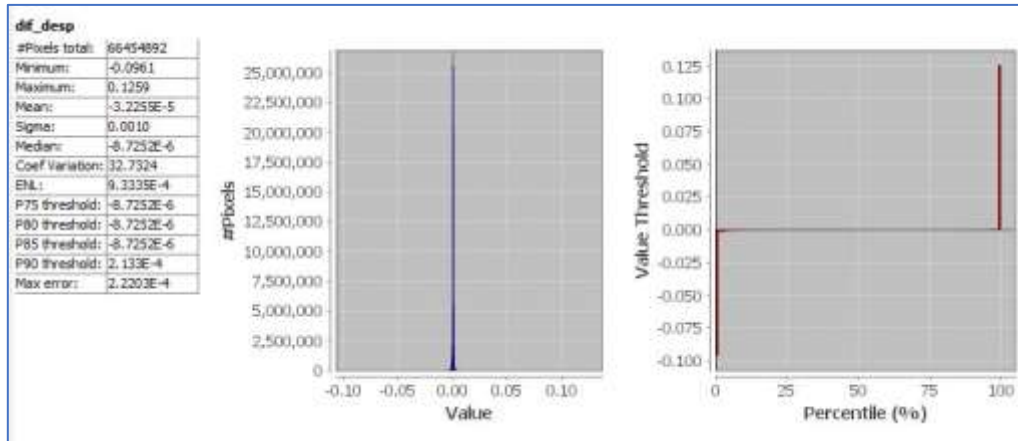


Figura 4.32. Estadísticas de la diferencia de desplazamientos calculados usando el SRTM de 1 y 3 segundos en el par Alicante Ascendente 10/08/2018 – 22/08/2018.

Como resultado de este análisis se puede llegar a la conclusión de que, si bien es necesario disponer de un modelo digital de elevaciones, en el caso específico de Sentinel-1, es suficiente incluso con el SRTM de 3 segundos o uno de calidad similar.

Sin embargo, no hay que olvidar que en el caso de otros sistemas satelitales como PAZ o TerraSAR-X la mejor resolución de las imágenes y la dimensión del tubo orbital (500 metros de diámetro) hacen que la calidad del modelo digital de elevaciones sea un factor a tener en cuenta.

Una vez más, un análisis en profundidad de la influencia del DEM en el análisis de desplazamientos usando interferometría diferencial requeriría un estudio con diferentes escenarios y plataformas satelitales.

4.5. Aplicación de la técnica DInSAR en grandes terremotos. (California, Estados Unidos, 2019).

Por último, se ha querido comprobar el funcionamiento de la metodología en terremotos de gran magnitud, para lo cual se buscó en GEOFON un terremoto de magnitud mayor que 6 que hubiera tenido lugar a lo largo del último año, en plataforma continental y en una zona con un clima que cumpliera las condiciones óptimas que se han ido viendo durante el análisis de los pares anteriores.

Se seleccionaron los terremotos magnitud 6.4 y 7.0 (Mw) de que tuvieron lugar en Ridgecrest, en California, los días 4 y 6 de julio de 2019. Para el análisis, se localizó en el repositorio de imágenes Sentinel de Copernicus un par interferométrico descendente con una imagen previa y otra posterior a los eventos.

California (Estados Unidos). Descendente 04/06/2019 – 16/06/2019

Si bien ya se comprobado que en el caso de Sentinel-1 la altura de ambigüedad no llega a tomar valores significativos para el resultado, se ha comenzado el análisis comprobando el valor de la línea base perpendicular y el ángulo de incidencia medio, en este caso 30,4 metros y 39.3°. Estos valores suponen una altura de ambigüedad de 399,9 metros.

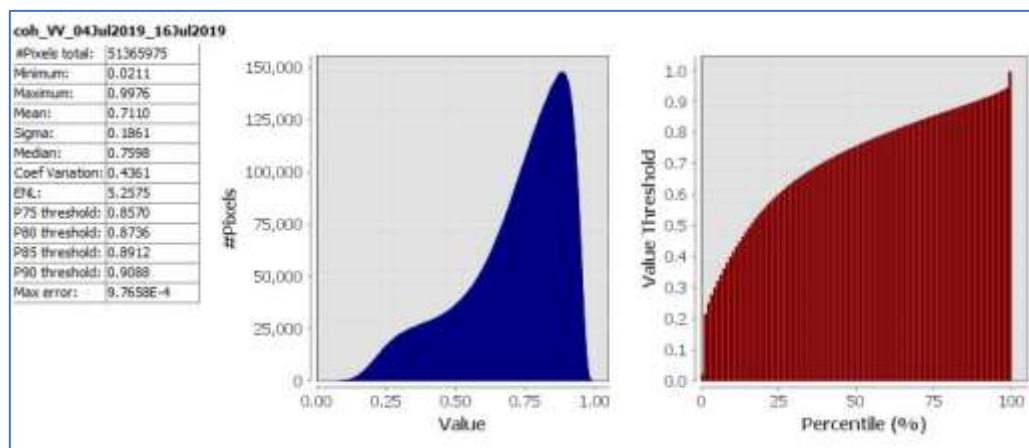


Figura 4.33. Estadísticas de la imagen de coherencia en el par California Descendente 04/06/2019 – 16/06/2019.

El histograma y las estadísticas de la imagen de coherencia muestran un 76% de valores por encima de 0,6, que según lo visto en los casos anteriores parece suficiente para continuar con el análisis con garantías.

La complejidad del interferograma enrollado y filtrado ya muestra los efectos del terremoto. En este caso se tuvieron que procesar las tres bandas de la escena, y aunque no es posible añadir una escala en este paso del procesamiento por tratarse de geometría del plano de toma, es posible hacerse una idea observando la cantidad de franjas interferométricas y considerando que el ancho de la escena es de unos 250 km.

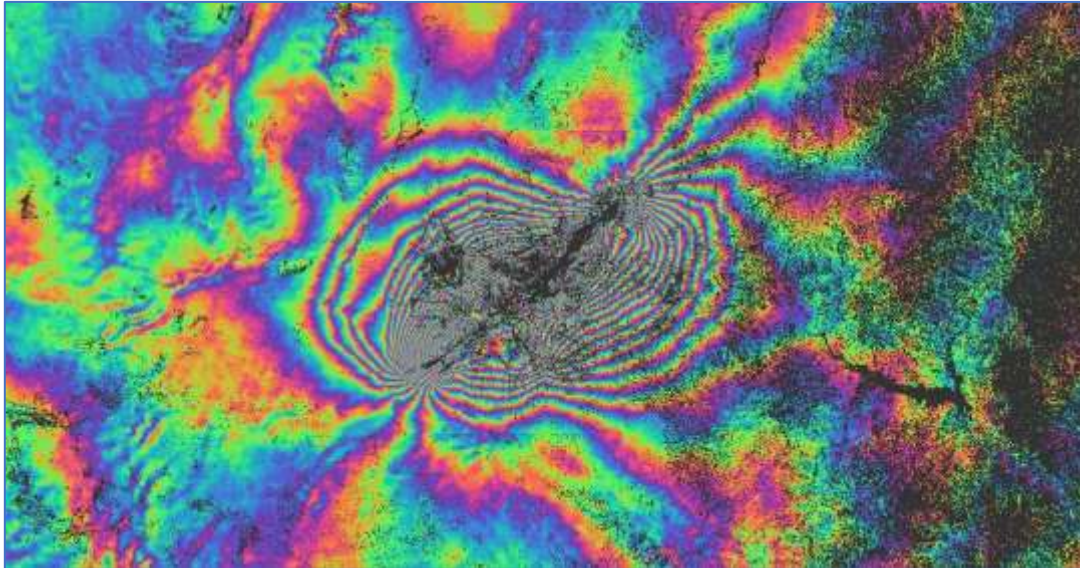


Figura 4.34. Interferograma filtrado en el par California Descendente 04/06/2019 – 16/06/2019.

Es posible hacerse una idea de la complejidad sísmica de la zona y de los fenómenos que se produjeron entre el 4 y el 6 de julio con el siguiente mapa:

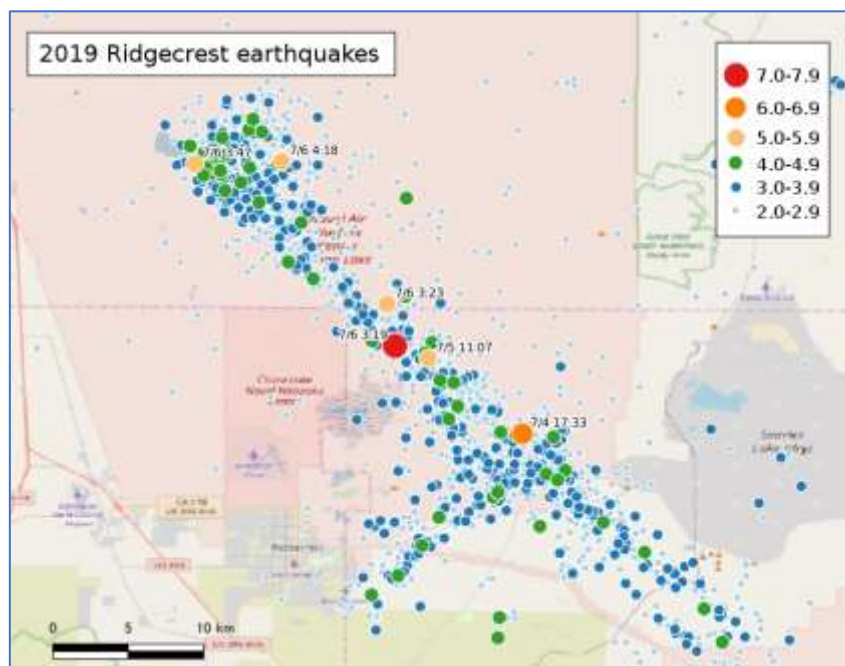


Figura 4.35. Terremotos registrados en Ridgecrest, California hasta mediados del mes de junio de 2019. Fuente: Contribución en Wikipedia del usuario Phoenix777.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/09/Map_of_2019_Ridgecrest_earthquakes.svg

Además, habitualmente se pueden identificar las líneas de fractura porque aparecen como líneas incoherentes a cuyos lados se producen cambios de tendencia en las franjas interferométricas y en esta primera aproximación, volviendo sobre la figura 4.34, se pueden observar al menos 5 líneas de fractura, una de ellas perpendicular a la falla principal.

El problema que presentan este tipo de interferogramas es la dificultad de desenrollado. Para facilitar el proceso se llevó a cabo un remuestreado *multilooking* de tal forma que se consiguió un tamaño de pixel cuadrado de unos 30 m. Aun así, han sido necesarios más de 10 intentos, cambiando los parámetros del algoritmo, para conseguir un mapa de desplazamientos que es probable que aun tenga errores de desenrollado. Una vez convertida la fase a desplazamiento se obtiene el mapa de elevaciones con el resultado que se muestra en la siguiente figura.

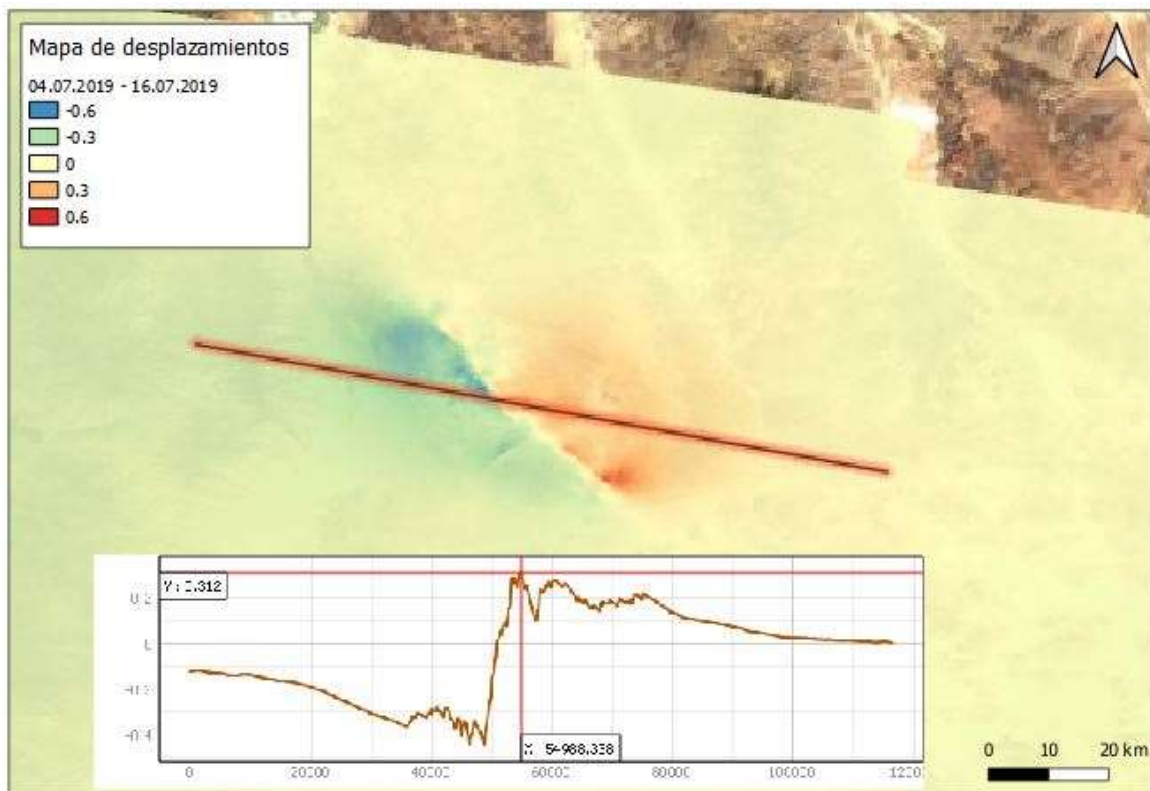


Figura 4.36. Mapa de desplazamientos y perfil transversal en el par California Descendente 04/07/2019 – 16/07/2019.

Observando el perfil a lo largo de la zona afectada se observan algunos pequeños dientes de sierra que podrían corresponder a errores de desenrollado.

Con este último ejemplo se ha podido comprobar la complejidad del proceso de desenrollado de fase, y cómo en escenarios sísmicos tan complejos como el de California, en terremotos de gran magnitud, puede llegar a ser necesario algún tipo de comprobación mediante otros métodos.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS ADICIONALES DE ESTUDIO.

5.1. Conclusiones.

La medida de los desplazamientos rápidos del terreno tras un terremoto requiere disponer de referencias previas al evento. Si bien se conoce qué zonas son más propensas a sufrir este tipo de fenómenos, no dejan de ser impredecibles en el tiempo, por lo que, en general, no es viable disponer de redes de testigos que permitan analizar sus efectos en superficie.

En ese sentido, Sentinel-1 ofrece una cobertura global de la superficie terrestre que permite el análisis mediante técnicas DInSAR de cualquier punto en periodos de 6 días considerando la constelación formada por los dos satélites. A lo largo de este trabajo se ha analizado cuáles son las condiciones óptimas para la utilización de este tipo de técnicas y cuáles sus limitaciones. Para alcanzar los objetivos que se habían planteado al comienzo del trabajo se han analizado nueve pares interferométricos en distintos escenarios, aproximadamente 70 GB de información en imágenes.

Respecto a la influencia del modelo digital de elevaciones se ha visto que es necesario disponer de un modelo de calidad suficiente ya que se utiliza en varios de los procesos del análisis, entre ellos la propia generación del interferograma. Sin embargo, con la resolución espacial que ofrecen las imágenes Sentinel-1 y la limitación de las líneas base a un máximo de 100 metros, se ha comprobado que es suficiente con SRTM de 3 segundos de arco, disponible para descarga en la aplicación SNAP. Esto puede no ser así si se emplean imágenes de mayor resolución como las de la plataforma PAZ o Terra-SAR X en las que, además, la línea base puede tomar valores mayores. Estas características de la plataforma Sentinel-1 que la hacen apropiada para el análisis interferométrico son las mismas que hacen poco adecuada para la generación de modelos digitales del terreno por interferometría.

Si bien los fenómenos atmosféricos en la banda C apenas influyen en la intensidad de la señal recibida, se ha comprobado que la presencia de vapor de agua en la atmósfera, sí altera la fase de la señal, llegando a hacer inviable el análisis interferométrico en caso de fuerte nubosidad. Se ha observado también que la propia estratificación de la atmósfera introduce diferencias de fase significativas en escenarios con grandes desniveles.

Para un análisis preciso de la influencia atmosférica se suelen utilizar otro tipo de técnicas basadas en el análisis estadístico de pilas de imágenes. Estas técnicas tienen el inconveniente de requerir un gran número de tomas, pero al caracterizar la componente de ruido atmosférico, se pueden alcanzar precisiones del orden de unos pocos milímetros en el caso de Sentinel-1. Son adecuadas para el análisis de desplazamientos lentos, pero atenúan los movimientos rápidos producidos entre dos imágenes porque tienden a considerarlos efectos atmosféricos.

Los efectos atmosféricos se manifiestan de forma suave a lo largo de la escena y, si bien pueden introducir diferencias de fase por encima de $\pm\pi$, que en Sentinel-1 equivaldría a ± 1.4 cm, el patrón de desplazamiento generado por un terremoto suele ser característico y diferenciable de los efectos atmosféricos.

En cualquier caso, parece demostrado (Hansen, 2001), que la caracterización precisa de estos efectos son lo que hacen que la técnica DInSAR pase de tener una precisión milimétrica a centimétrica.

Si bien hay que tener en cuenta que los efectos en superficie de un terremoto dependen también de la profundidad de su hipocentro, se ha analizado un terremoto de 4,2 (Mw) de magnitud y no se ha detectado desplazamiento alguno, mientras que en un terremoto de magnitud 6,0 (Mw) el desplazamiento ya es perfectamente cuantificable mediante interferometría de imágenes SAR.

Esta metodología depende principalmente en la coherencia entre las dos imágenes que integran el par interferométrico. Uno de los factores que más influye en la falta de coherencia es la dispersión volumétrica que produce la vegetación. Esto hace se obtengan mejores resultados en terrenos áridos o con poca vegetación que en zonas de bosque o selva, como se ha visto en el caso del terremoto de Perú.

Por último, al aplicar este tipo de metodologías, hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos son desplazamientos a lo largo de la línea de vista. Esto supone que habría que proyectar ese valor sobre la vertical para obtener el desplazamiento en esa dirección, teniendo en cuenta el ángulo de incidencia local. La aplicación SNAP no ofrece esa posibilidad, si bien otros programas, como el módulo SARscape de ENVI, si disponen de esa opción.

Este factor es tan importante que si se calculan las líneas de fractura con desplazamiento cero, se pueden llegar a obtener resultados sensiblemente diferentes con pares tomados en diferente fase orbital.

A pesar de las limitaciones vistas a lo largo del desarrollo de este trabajo, se ha demostrado que el análisis de pares interferométricos mediante DInSAR es una herramienta realmente útil en terremotos de media y gran magnitud.

5.2. Líneas de estudio adicionales.

A lo largo de este trabajo se ha comprobado cómo una de las limitaciones de la metodología DInSAR es la caracterización de los factores atmosféricos. Si fuera posible conocer la influencia de estos factores la precisión en la medida del desplazamiento aumentaría considerablemente.

Hasta la fecha, esa caracterización sólo es posible si se utilizan técnicas de análisis estadístico sobre pilas de imágenes, como el análisis de dispersores permanentes (*PS – Permanente Scatters*), o el SBAS (*Small Baseline Subsets*). Estas técnicas se suelen utilizar para el análisis de subsidencias lentas, ya que permiten observar tendencias a lo largo del periodo de análisis y, en general, enmascaran los desplazamientos rápidos. Una posible línea de estudio sería analizar el efecto de un desplazamiento rápido en el análisis de la serie, determinar si es detectable, de qué manera influye utilizando las dos técnicas PS y SBAS, si puede llegar a invalidar el análisis de un desplazamiento lento o si es posible aprovechar los resultados para el análisis de un par interferométrico con un desplazamiento rápido.

Por otro lado, se ha observado que los desplazamientos obtenidos son lo que se producen a lo largo de la línea de vista. Otra posible línea de estudio sería el análisis por separado de la componente horizontal y vertical del desplazamiento, ya que, conociendo el ángulo de incidencia local, sería posible proyectar el desplazamiento en las dos direcciones, y así comparar los resultados obtenidos en la fase ascendente y descendente del satélite.

6. REFERENCIAS.

- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, SA.
- Didier Massonnet, M. R. (1993). *The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry*. Revista Nature, 8 julio de 1993.
- ESA Bulletin 131. (2007). *Sentinel-1. Radar Misión for GMES Operational Land and Sea Services*. ESA.
- Fielding, E. (2017). *ARSET Applied Remote Sensing Training: Introducción a la Interferometría SAR*. NASA ARSET: <https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR>.
- Goodhouse, I. (2019). *Echoes in Space. Introduction to Radar Remote Sensing*. <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>.
- Hansen, R. F. (2001). *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- IGN. (2018). *Fundamentos de la Teledetección Radar*. Madrid: Publicaciones del IGN.
- López, R. d. (2010). *La Teledetección como Herramienta Innovadora en el Ciclo Integral del Agua*. AMBISAT.
- Raboy, M. (2016). *Marconi: The Man Who Networked the World*. New York: Oxford University Press.
- Schmullius, C. (2019). *Echoes in Space. Introduction to Radar Remote Sensing*. <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>.
- TM-19, E. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Netherlands: ESA Publications.
- Werner, R. M. (1998). *Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications*. California : Geophysical Research Letters, Vol 25, no. 21, pages 4035 - 4038. Nov 1 1998.
- Yalvaç, S. (2020). *Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium- and high-grade deformation areas*. Environmental Monitoring and Assessment 192(2) · January 2020.
- Zebker, C. W. (2001). *Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization*. Journal of the Optical Society of America A, vol. 18, pp. 338-351 (2001).

