

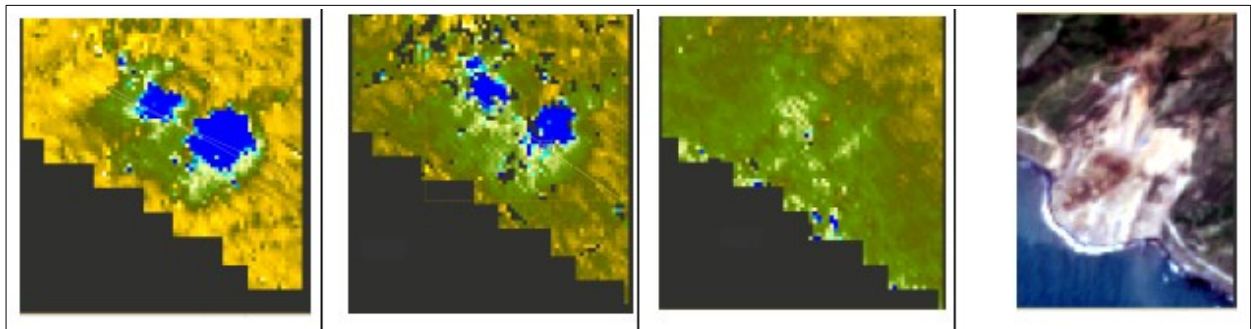
VNiVERSiDAD D SALAMANCA

Escuela **Politécnica Superior**  
**de Ávila**

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

**TRABAJO FIN DE MÁSTER:**

***ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR***



**Autor: Rafael Manuel Criado Portero**

**Dirigido por: Benjamín Arias Pérez**

**Fecha: Septiembre de 2021**

## Sumario

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS PERSEGUIDOS.....	10
2	MARCO TEÓRICO.....	12
2.1	Fundamentos teóricos del Radar.....	12
2.2	Uso del Radar para la observación de la tierra.....	15
2.3	Radar de Apertura Sintética.....	19
2.4	El programa Copernicus y las imágenes radar obtenidas por Sentinel 1.....	20
2.5	Interferometría diferencial.....	26
2.6	Concepto de Coherencia del análisis y factores que afectan a la misma.....	29
2.7	Deslizamientos del Terreno.....	30
3	METODOLOGÍA.....	32
3.1	Área de Estudio: El Deslizamiento de Mud Creek.....	32
3.2	Procedimiento de Análisis de pares interferométricos:.....	34
3.2.1	Localización y descarga de los datos.....	34
3.2.2	Corregistro de imágenes.....	35
3.2.3	Generación de un interferograma bruto.....	36
3.2.4	Eliminación de ráfagas (Debursting).....	37
3.2.5	Eliminación de la fase topográfica y la componente de tierra plana.....	38
3.2.6	Filtrado y Multilooking.....	39
3.2.7	Subset.....	40
3.2.8	Desenrollado de fase.....	41
3.2.9	Conversión de fase a desplazamiento.....	43
3.2.10	Corrección por terreno.....	44
3.2.11	Enmascarado del mar.....	45
3.3	Planificación de los análisis realizados en el Deslizamiento de Mud Creek.....	46
4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	54
4.1	Análisis inicial.....	54
4.2	Análisis de resultados en pares interferométricos espaciados 2 meses entre sí... 58	58
4.2.1	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 26/03/2017 - 13/05/2017.....	58
4.2.2	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 25/01/2017 - 26/03/2017.....	61
4.2.3	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 14/11/2016 – 25/01/2017.....	63
4.2.4	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 27/09/2016 – 14/11/2016.....	66
4.3	Análisis de resultados en pares interferométricos con intervalos cortos.....	70
4.3.1	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 01/05/2017 – 13/05/2017.....	70
4.3.2	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 19/04/2017 – 01/05/2017.....	73
4.3.3	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 02/03/2017 – 26/03/2017.....	74
4.3.4	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 25/01/2017 – 06/02/2017.....	77
4.3.5	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 08/12/2016 – 20/12/2016.....	78
4.3.6	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 27/09/2016 – 09/10/2016.....	81

4.3.7	Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 11/06/2016 – 05/07/2016.....	84
4.4	Interpretación de los Resultados Obtenidos.....	87
4.5	Observaciones sobre la vegetación de la zona y su posible influencia en la coherencia de los resultados.....	95
4.6	Observación de cambios en la superficie en la zona del deslizamiento antes de producirse el fallo catastrófico.....	98
5	CONCLUSIONES Y APLICABILIDAD.....	102
5.1	Conclusiones.....	102
5.2	Aplicabilidad.....	104
6	REFERENCIAS.....	106

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Figura 2.1-1: Posicionamiento del Rango cercano y Rango lejano. Fuente: Beatriz Alacid et al. (2015).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.1-2: Frecuencia a la que operan los sistemas radar. Fuente: Introducción a Radar. NASA ARSET (2016).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.1-3: Polarización Vertical y Horizontal. Fuente: Introducción a Radar. NASA ARSET (2016).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.2-1: Comparativa entre observación vertical y lateral. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2-2: Efectos geométricos en una imagen SAR. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.2-3: Mecanismos de retrodispersión. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2-4: Tipos de reflexión de un pulso radar en el terreno. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2-5: 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. (www.ign.es).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.2-6: Penetración de diferentes longitudes onda radar en cubiertas. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (www.ign.es).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.3-1: Fundamentos de los sensores radar de apertura sintética o SAR. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. (www.ign.es).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.4-1: Aspecto de una imagen Sentinel-1 tomada en modo IW mediante técnica TOPSAR. Fuente: ESA.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.4-2: Modos de operación Sistema de satélites Sentinel 1. Fuente: ESA.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.5-1: Medición de punto en dos imágenes. Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.7-1: Ejemplo de mapa de coherencia e histograma. Fuente: Análisis interferométrico de Mud Creek mediante software SNAP.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.6-1: Ejemplo de Deslizamiento Profundo (rotacional). Fuente: Skinner and Porter, 1992.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.1-1: Ubicación y características del deslizamiento de Mud Creek, incluyendo su situación previa y posterior al fallo catastrófico. Fuente: Jonathan A. Warrick et al. (2019).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.2.1-1: Buscador de la Alaska Satellite Facility. Fuente: ASF.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.2.2-1: Opciones del Corregistro de imágenes radar mediante SNAP.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.2.3-1: Visualización de interferograma bruto con SNAP. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.2.4-1: Imagen resultante tras el debursting. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.2.5-1: Imagen resultante tras la eliminación de la fase topográfica. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.2.6-1: Imagen procesada mediante filtrado y multilooking. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.2.7-1: Subset realizado, basado en el tutorial de referencia. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.2.8-1: Ilustración del desenvolvimiento de fase. Fuente: ESA.....</i>	<i>41</i>

Figura 3.2.8-2: Imagen de fase desenrollada. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 3.2.9-1: Imagen de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 3.2.10-1: Imágenes de partida de SNAP “slant range” o “ground range”. Fuente: Lillesand et al. (2008).....	44
Figura 3.2.10-2: Mapa de desplazamientos tras la corrección del terreno. Representación del perfil de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 3.2.11-1: Imagen de los desplazamientos tras el enmascaramiento del mar. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 3.3-1: Subset analizado para obtención de valores de velocidades de deslizamiento.....	47
Figura 3.3-2: Representación de velocidades de deslizamiento obtenidas y precipitaciones acumuladas en los años hidrológicos 2015, 2016 y 2017 (hasta el fallo catastrófico). Fuente: Handwerger et al. (2019) <a href="https://www.nature.com/articles/s41598-018-38300-0">https://www.nature.com/articles/s41598-018-38300-0</a> .....	47
Figura 3.3-3.: Ubicación localizada y Estaciones climatológicas disponibles en la zona obtenidas en el buscador del NOAA.....	51
Figura 3.3-4.: Cubierta vegetal obtenida mediante “Sentinel 2 MSI Vegetation Anlysis”.....	52
Figura 3.3-5.: Vista de Mud Creek. Fuente: Google Street View.....	53
Figura 4.1-1.: Mapa de desplazamientos (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	54
Figura 4.1-2.: Desplazamientos en Subset que contiene la zona de deslizamiento (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	55
Figura 4.1-3.: Deformaciones en Mud Creek y direcciones de observación (incluyendo Track 42). Fuente: Handwerger et al. (2019).....	56
Figura 4.1-4.: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	56
Figura 4.1-5.: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	57
Figura 4.1-6: Mapa de coherencia (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	57
Figura 4.1-7: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016).....	58
Figura 4.2.1-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017).....	59
Figura 4.2.1-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017).....	59
Figura 4.2.1-3: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017).....	60
Figura 4.2.1-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017).....	60
Figura 4.2.2-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017).....	61
Figura 4.2.2-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017).....	61
Figura 4.2.2-3: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017).....	62

Figura 4.2.2-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017).....	62
Figura 4.2.3-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	63
Figura 4.2.3-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	63
Figura 4.2.3-3: Mapa de desplazamientos en Subset General (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	64
Figura 4.2.3-4: Mapa de desplazamientos en Subset del deslizamiento (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	64
Figura 4.2.3-5: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	65
Figura: 4.2.3-6: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017).....	66
Figura 4.2.4-1: Mapa de desplazamientos en Subset General (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	66
Figura 4.2.4-2: Mapa de desplazamientos en Subset del deslizamiento (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	67
Figura 4.2.4-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	68
Figura: 4.2.4-4: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	68
Figura 4.2.4-5: Mapa de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	69
Figura 4.2.4-6: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016).....	69
Figura 4.3.1-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017).....	70
Figura 4.3.1-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017).....	71
Figura 4.3.1-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017).....	72
Figura 4.3.1-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017).....	72
Figura 4.3.2-1: mapa de coherencia (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017).....	73
Figura 4.3.2-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017).....	74
Figura 4.3.2-3: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017).....	74
Figura 4.3.3-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017).....	75
Figura 4.3.3-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017).....	75
Figura 4.3.3-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017).....	76

Figura 4.3.3-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017).....	76
Figura 4.3.4-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017).....	77
Figura 4.3.4-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017).....	77
Figura 4.3.4-3: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017).....	78
Figura 4.3.5-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016).....	79
Figura 4.3.5-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016).....	79
Figura 4.3.5-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016).....	80
Figura 4.3.5-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016).....	80
Figura 4.3.6-1: Fase tras filtrado de Goldstein y Multilooking (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016).....	81
Figura 4.3.6-2: Mapa de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016).....	82
Figura 4.3.6-3: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016).....	82
Figura 4.3.6-4: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016).....	83
Figura 4.3.6-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016).....	83
Figura 4.3.7-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016).....	84
Figura 4.3.7-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016).....	85
Figura 4.3.7-3: Mapa de desplazamientos en subset general (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016).....	85
Figura 4.3.7-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016).....	86
Figura 4.4-1: Comparativa entre el mapa de desplazamientos del análisis del 27/09/2016 – 14/11/2016 y la imagen de la zona afectada por el deslizamiento.....	87
Figura 4.4-2: Comparativa entre diferentes mapas de desplazamientos y la imagen de la zona afectada por el deslizamiento.....	88
Figura 4.4-3: Comparativa de Velocidades máximas de deslizamiento de los análisis con períodos de 2 meses, períodos cortos y con estudio de Handwerger et al.....	89
Figura 4.4-4: Resumen de mapas de coherencia y coherencia media obtenidos en los análisis.....	91
Figura 4.4-5: Mapa de coherencia (par interferométrico 04/10/2017 – 16/10/2017).....	93
Figura 4.4-6: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 04/10/2017 – 16/10/2017).....	93
Figura 4.4-7: Representación de la coherencia obtenida en los diferentes tipos de análisis.....	94

---

<i>Figura 4.5-1: Comparación de mapa de coherencias con imagen en espectro visible correspondiente.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.5-2: Imágenes de la vegetación en la zona del deslizamiento en mayo de 2016. Fuente: Google Street View.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.5-3: Comparación de “Sentinel 2 MSI Vegetation Anlysis” en diferentes fechas previas al fallo catastrófico del deslizamiento.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.5-4: Comparación de “Sentinel 2 MSI Vegetation Anlysis” en zona noroeste del subset analizado.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.6-1: Representación de mapas de coherencia del análisis con imágenes 01/05/2017 y 13/05/2017, poniendo de manifiesto la bajada de coherencia en la zona del deslizamiento.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.6-2: Representación de diferentes imágenes Sentinel 2 de la zona de deslizamiento en torno al fallo catastrófico.....</i>	<i>100</i>



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1-1: Principales bandas de frecuencia radar y aplicaciones. Fuente: DLR.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.4-1: especificaciones del sistema Sentinel 1 y su comparación con Sentinel 2 y 3. Fuente: ESA.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2.4-2: parámetros principales asociados a la banda C del satélite Sentinel 1. Fuente: ESA.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.4-3: resumen de las características principales de los modos de operación de los satélites Sentinel 1. Fuente: ESA.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3.3-1.: Pares interferométricos en intervalos de 2 meses analizados.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3.3-2.: Pares interferométricos en intervalos cortos (12 o 24 días) analizados.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.4-1: Resumen de las velocidades de deslizamiento obtenidas en los análisis.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 4.4-2: Resumen de valores de coherencia media obtenidos en los análisis.....</i>	<i>94</i>

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS PERSEGUIDOS

Tras la finalización de los estudios del Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura llevados a cabo en la Escuela Politécnica Superior de Ávila (Universidad de Salamanca), se aborda la realización de este Trabajo Fin de Máster sobre el Análisis de Deslizamientos mediante Interferometría Radar.

El empleo de la denominada técnica de interferometría diferencial de imágenes de radares de apertura sintética (DInSAR) se ha convertido en una herramienta fundamental en el campo de la geomática para el análisis cualitativo y cuantitativo de movimientos en el terreno, fundamentándose en la detección de pequeños desplazamientos a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre una misma área de estudio.

Los resultados que se obtienen en estos análisis pueden tener una precisión muy adecuada para el estudio de la evolución de los deslizamientos del terreno, llegando a ser del orden de milímetros. Sin embargo, la coherencia en estos resultados se puede ver total o parcialmente alterada por diversos factores entre los que se encuentran las precipitaciones en los días de toma de imágenes, los cambios en la vegetación de las zonas estudiadas o los cambios en la superficie del terreno debidos a la decorrelación temporal. En este trabajo, aparte de llevar a cabo el cálculo de desplazamientos en el terreno, se prestará especial atención a cómo afectan estos factores a la coherencia de los resultados obtenidos.

Mediante el empleo de la técnica DInSAR se llevará a cabo el análisis del deslizamiento de Mud Creek (California, EEUU), que sufrió un fallo catastrófico el 20 de mayo de 2017, provocando el sepultamiento de la carretera CA-01 que discurre por su alrededor. Para ello se utilizará la información suministrada por los satélites Sentinel 1 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Los resultados obtenidos en desplazamientos en este trabajo serán contrastados con aquellos que se obtuvieron en un estudio previo de este deslizamiento efectuado por Handwerger et al. en [1]. A diferencia de este estudio, el presente trabajo realiza una comparativa entre los resultados obtenidos utilizando diferentes tamaños de intervalos, y también muestra la relación de la coherencia de los análisis con factores como el tiempo transcurrido entre tomas de imágenes, la precipitación y la cubierta vegetal, estudiada esta última con la ayuda de imágenes descargadas de Sentinel 2 y procesadas con el software SNAP de la ESA.

Los objetivos que se han alcanzado en este trabajo se pueden resumir en los siguientes apartados:

- Profundizar en el conocimiento teórico y práctico del uso del Radar y de la técnica DInSAR mediante pares de imágenes obtenidas de los satélites Sentinel 1 de la ESA.
- Adquirir destreza en el manejo del software SNAP de la ESA.

- Analizar el comportamiento de un deslizamiento del terreno de suficiente relevancia.

- Adquirir conocimientos de los factores que influyen en la coherencia de los análisis de movimientos del terreno mediante la técnica DInSAR, así como estudiar cómo afecta cada uno de ellos a los análisis realizados.

- Utilizar diferentes herramientas del programa Sentinel, como las imágenes disponibles en los programas Sentinel 1 y Sentinel 2.

## 2 MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Fundamentos teóricos del Radar.

El Radar (del inglés Radio Detection And Ranging) es un sistema electromagnético cuyo objetivo es la detección y localización de objetos lejanos. Es por tanto un sistema de teledetección, del tipo activo, debido a que el propio Sistema genera la señal que luego recoge y procesa.

Las ventajas que presenta este Sistema de teledetección activo son las siguientes:

- Aunque exista nubosidad o condiciones meteorológicas de baja visibilidad, puede utilizarse.

- Al no depender de la iluminación solar, puede funcionar continuamente de día y de noche.

- Observando la dispersión de las ondas que se reciben, puede averiguarse cuáles son las características físicas del terreno, permitiendo distinguir el hielo, las olas en la superficie del mar, humedad del suelo o la cantidad de vegetación existente.

Los 2 sistemas aéreos sobre los que se monta el radar para la teledetección son fundamentalmente aeronaves o satélites. Sobre estos sistemas suele realizarse una medición lateral. De esta manera podemos distinguir la medición más cercana como Rango Cercano y la más alejada como Rango Lejano.

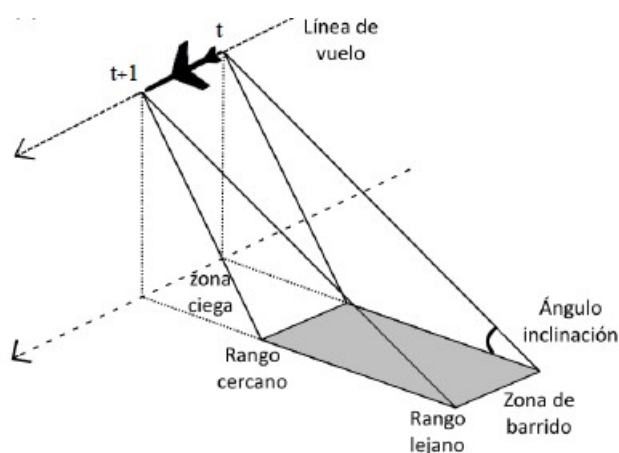


Figura 2.1-1: Posicionamiento del Rango cercano y Rango lejano. Fuente: Beatriz Alacid et al. (2015)

La medición en la dirección del vuelo es conocida como dirección azimut.

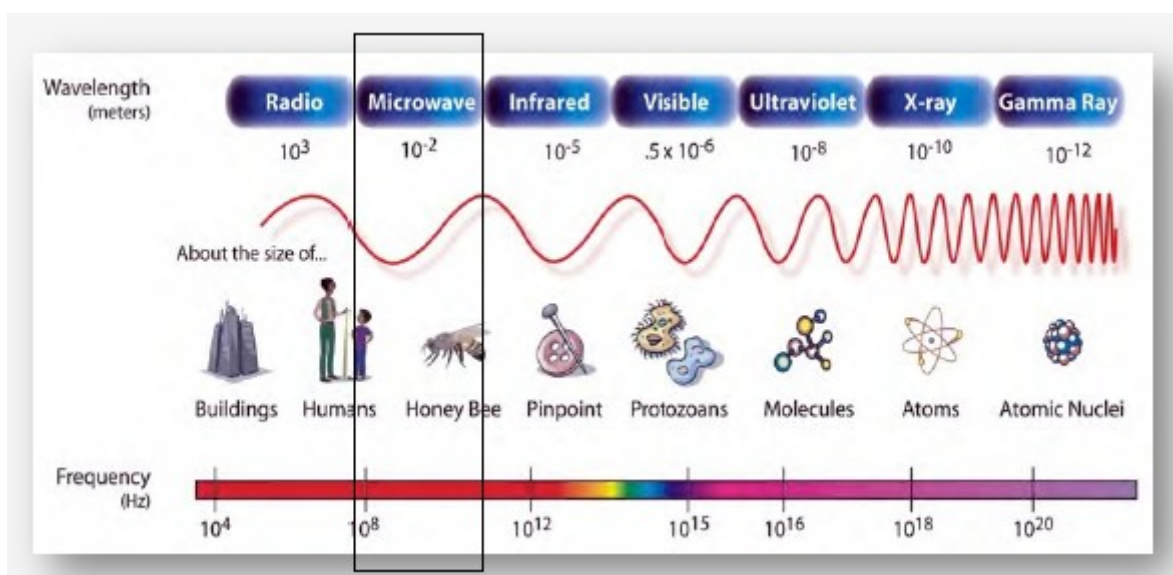
La señal que emite el radar se dispersa cuando choca con la superficie a la que se dirige, siendo la parte reflejada la que es captada por la antena. Con esta información, así

como las diferencias entre la señal emitida y la captada por la antena, se configura la información de la zona observada.

Entre las desventajas que presenta la tecnología radar podemos destacar las siguientes como las más relevantes:

- Aparición en las imágenes de ruido y distorsiones difíciles de eliminar.
- Dificultad para la interpretación de las imágenes respecto a las imágenes ópticas. Exige mayor aprendizaje y destreza.

En cuanto a las frecuencias a las que emiten los sistemas radar dentro del espectro electromagnético se corresponden con el rango de las microondas.



**Figura 2.1-2: Frecuencia a la que operan los sistemas radar. Fuente: Introducción a Radar. NASA ARSET (2016)**

Las frecuencias más comúnmente analizadas y sus principales utilidades se resumen en la siguiente tabla:

Banda	Frecuencia	Ejemplo de Aplicaciones
• VHF	300 KHz - 300 MHz	Penetración del follaje o suelo, biomasa
• P-Band	300 MHz - 1 GHz	Biomasa, humedad del suelo
• L-Band	1 GHz - 2 GHz	Agricultura, vegetación, humedad del suelo
• C-Band	4 GHz - 8 GHz	Océanos, agricultura
• X-Band	8 GHz - 12 GHz	Agricultura, océanos
• Ku-Band	14 GHz - 18 GHz	Glaciología, estudios de nieve
• Ka-Band	27 GHz - 47 GHz	Radares de alta resolución

Tabla2.1-1: Principales bandas de frecuencia radar y aplicaciones. Fuente: DLR

Las bandas con la longitud de onda más largas (menor frecuencia) tienen mayor penetración en la vegetación y en el suelo, y suelen elegirse para este tipo de estudios.

Los radares pueden controlar el tipo de orientación tanto en la onda que se emite como en la que es recibida. De esta manera nos encontramos diferentes configuraciones HH, VV, HV, VH, dependiendo de cómo son emitidas y cómo son recibidas.

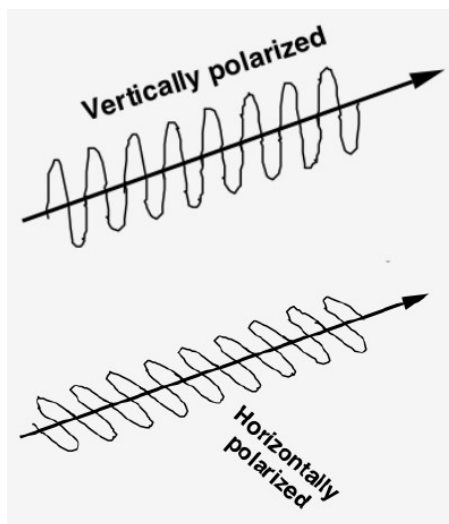


Figura 2.1-3: Polarización Vertical y Horizontal. Fuente: Introducción a Radar. NASA ARSET (2016)

Es posible que una onda de radar cambie su polarización al interactuar con la superficie estudiada. De esta forma permite determinar las características de la superficie. Asimismo, esta característica permite configurar la polarización que mejor convenga en función del tipo de superficie que se desee estudiar.

## 2.2 Uso del Radar para la observación de la tierra.

Los sistemas radar para la observación de la tierra capturan las imágenes de forma lateral. Viendo la siguiente figura puede apreciarse geoméricamente la necesidad de observar lateralmente el terreno, ya que una observación vertical generaría ambigüedades, no sabiéndose qué objeto se observa en realidad, tal y como se apunta en [3].

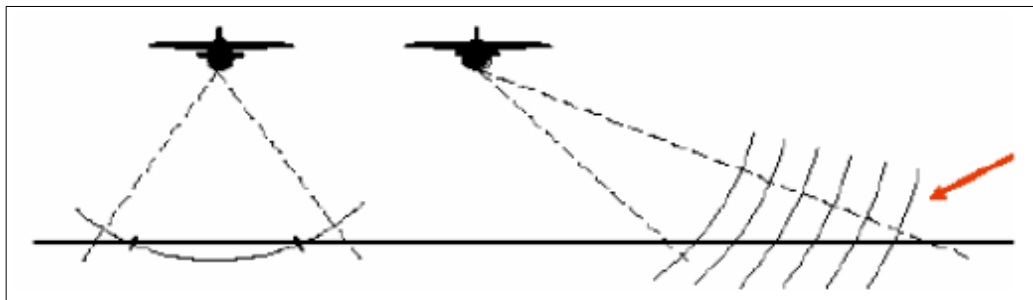


Figura 2.2-1: Comparativa entre observación vertical y lateral. Fuente: Fundamentos de teledetección radar ([www.ign.es](http://www.ign.es))

La imagen que se forma mediante el radar de iluminación lateral es de alta resolución. El radar en su movimiento va iluminando franjas continuas y paralelas entre sí de la zona que se observa, acumulando toda la información de las ondas microondas que van reflejándose. Esta señal grabada se procesará adecuadamente para poder obtener una imagen digital. La resolución que se obtiene tiene 2 dimensiones: la de la dirección perpendicular al vuelo (la de observación), que se denomina alcance, mientras que la de la dirección del vuelo se conoce como acimut.

Existen unos efectos geométricos inherentes al uso del radar que se producen debido a la geometría de la adquisición de imágenes. Estos efectos son desplazamientos por el relieve y se muestran en la siguiente imagen:

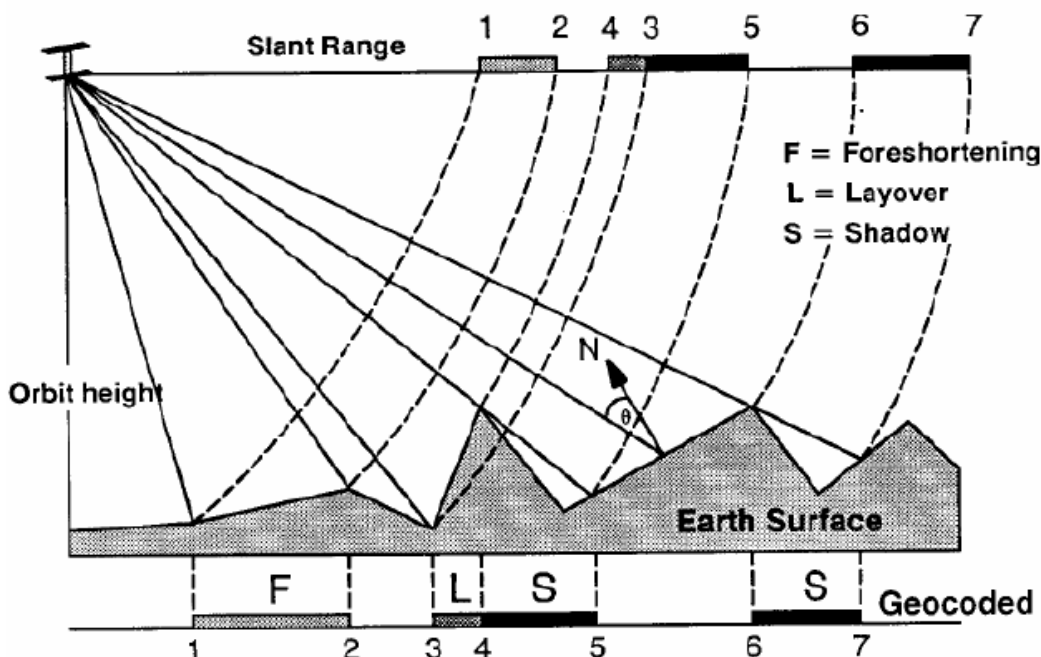


Figura 2.2-2: Efectos geométricos en una imagen SAR. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es)

A continuación se describe brevemente en qué consiste cada uno de estos efectos geométricos:

a) Escorzo (foreshortening): Se trata de la compresión aparente que se produce en las zonas inclinadas hacia el radar. Las zonas afectadas por escorzo se ven más brillantes en las imágenes del radar.

b) Inversión por relieve (layover): Es un efecto que hace que el reflejo de la energía de zonas que están más arriba se recibe antes que el de las zonas inferiores. Produce que en la imagen se vea la parte de arriba desplazada y superpuesta a la inferior.

c) Sombras (shadow): En este caso no se produce iluminación de estas zonas, no apareciendo valores registrados de las mismas.

En teledetección óptica la práctica totalidad de la energía que llega a la superficie terrestre es reflejada, ya que sus longitudes de onda son muy cortas. Sin embargo, las señales emitidas para la teledetección radar tienen unas longitudes de onda con un superior tamaño que no permite penetrar en cierto tipo de superficies, provocando una dispersión que será la combinación de la producida por la superficie, el interior y las capas de material que están a mayor profundidad.



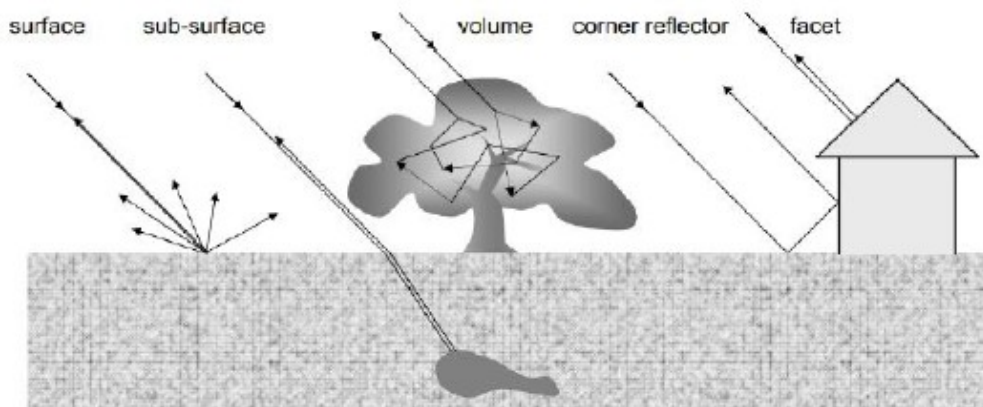


Figura 2.2-3: Mecanismos de retrodispersión. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es)

Las condiciones que provocan la variación de la dispersión de una señal con una determinada longitud de onda serán tales como el tamaño físico de los dispersores, sus propiedades eléctricas o la humedad. La propia longitud de onda de los pulsos SAR y la polarización de estos, también afectarán a la dispersión de la señal.

Tal y como se apunta en [3], una dispersión por superficie es producida cuando la radiación incide sobre una superficie con forma determinada. En función de las características de esta superficie (textura, rugosidad, constante dieléctrica) resulta lo siguiente:

Cuanto mayor sea la rugosidad mayor será la retro-dispersión y por tanto más brillante se observará en la imagen radar. En cambio, las superficies lisas reflejan escasa o ninguna de la energía emitida de vuelta al sensor radar, saliendo oscuras en la imagen. La rugosidad de la vegetación es moderada en comparación con la escala de las longitudes de onda radar, apareciendo en grises o grises claros en una imagen radar.

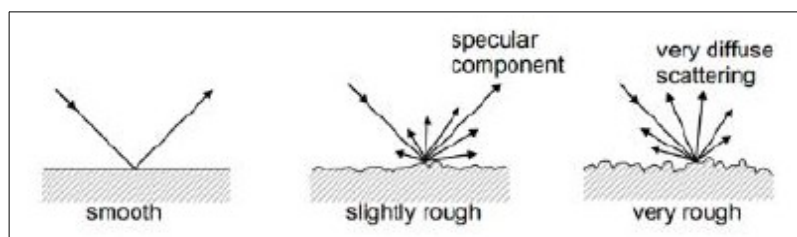


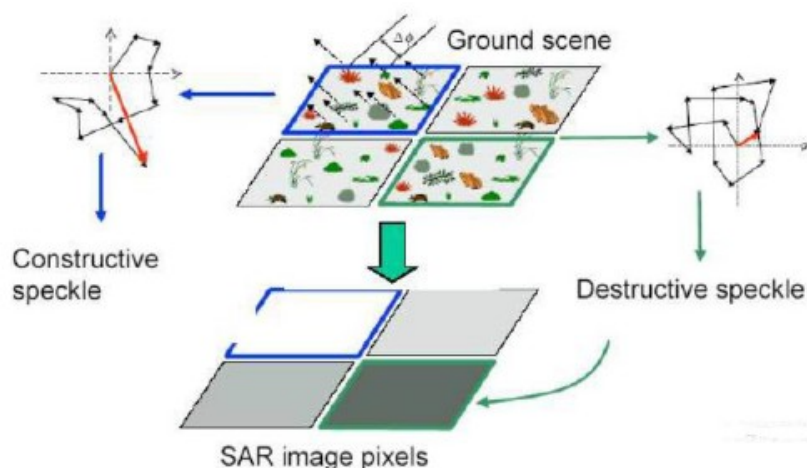
Figura 2.2-4: Tipos de reflexión de un pulso radar en el terreno. Fuente: Fundamentos de teledetección radar (www.ign.es)

Por su parte, cuanto mayor sea la constante dieléctrica de una superficie o material, mayor será la retro-dispersión y más brillante se observará un pixel en la imagen radar. El metal y el agua poseen una constante dieléctrica alta (80) mientras que el resto de materiales la tienen más baja. Cuando el terreno está seco, la constante también es baja (3-8), implicando que la humedad en suelos o en cubiertas vegetales puede producir un

aumento significativo de reflectividad de la señal radar (25-30). Por lo tanto, este tipo de teledetección puede usarse para obtener el contenido en humedad de los suelos.

Los fenómenos de dispersión por volumen también aparecerán, estando principalmente en cubiertas vegetales.

Hay que tener en cuenta que en la superficie representada por un pixel en la imagen existe una multitud de dispersores y por tanto el pixel obtenido será la suma de las interacciones que la señal tenga con los diferentes objetos y superficies.



**Figura 2.2-5: 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. (www.ign.es).**

Según se indica en [3], la interferencia completamente aleatoria positiva y negativa de estas contribuciones de los dispersores individuales van a causar que varíe el brillo en la imagen incluso para superficies con constante dieléctrica uniforme y además, provocará una apariencia granular incluso para superficies homogéneas. El resultado de este fenómeno es una imagen con el denominado efecto de “sal y pimienta”, con una textura de imagen que se asemeja precisamente a este fenómeno. Es un fenómeno que ocurre únicamente con sensores coherentes como el SAR, en los que se producen interferencias de la señal en dimensiones inferiores a la longitud de onda.

Es por esta razón que en segmentación y clasificación de imágenes SAR se incluyen criterios de textura además de la intensidad de las señales.

Para reducir los efectos de speckle en una imagen se usan diferentes criterios:

- Multi-looking: divide la señal en frecuencias mínimamente solapadas, se procesan estas frecuencias a una resolución imagen reducida y se añaden finalmente para obtener una imagen final.

- Filtros espaciales: detecta la resolución total de la imagen, efectúa medias locales sobre los píxeles y finalmente realiza un remuestreo para crear resoluciones más pequeñas pero con el efecto speckle reducido.

Por otra parte, dependiendo de la frecuencia y de la polarización de la señal, las ondas pueden penetrar en la vegetación y en los suelos en condiciones secas y hasta ciertos límites (por ejemplo en nieve seca o arena). Normalmente, cuanto mayor es la longitud de onda la penetración del pulso es mayor en la superficie. Con respecto a la polarización, las polarizaciones cruzadas (VH/HV) tienen una penetración menor o más débil que las polarizadas en la misma dirección (HH/VV).

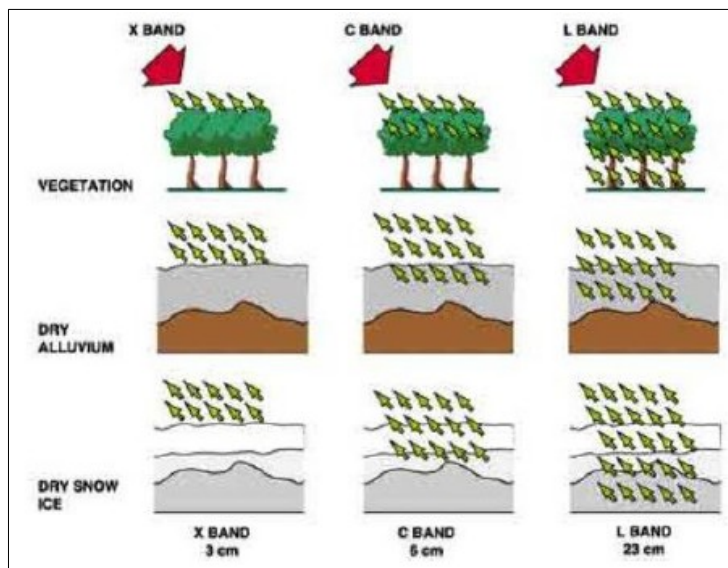


Figura 2.2-6: Penetración de diferentes longitudes onda radar en cubiertas. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. ([www.ign.es](http://www.ign.es)).

## 2.3 Radar de Apertura Sintética.

Si utilizásemos un radar de apertura circular en un satélite, la resolución en la dirección de recorrido del satélite (azimut) sería muy baja. Sin duda, este es uno de los problemas que conllevaría el uso de sensores radares en plataformas satélites, que queda resuelto por el empleo de la técnica de apertura sintética.

Como ejemplo de ello podemos considerar 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. En este caso, para alcanzar una resolución de 5 m sería necesaria una antena de 7,5 km, ya que la resolución viene dada por:

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

donde  $h$  es la altura del satélite,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\Phi$  el diámetro de apertura del sensor.

La técnica de apertura sintética de un radar (SAR: Synthetic Aperture Radar) consiste en mantener el sensor abierto durante un tiempo mientras que se va grabando y

procesando todas las señales recibidas de cada punto en la zona de observación, ya que los puntos permanecen reflejando la señal desde que entran en el haz que envía el radar hasta que salen. Realizando una medición adecuada de estas señales, junto con un procesado adecuado se consigue elevar la resolución de las imágenes, consiguiéndose 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.

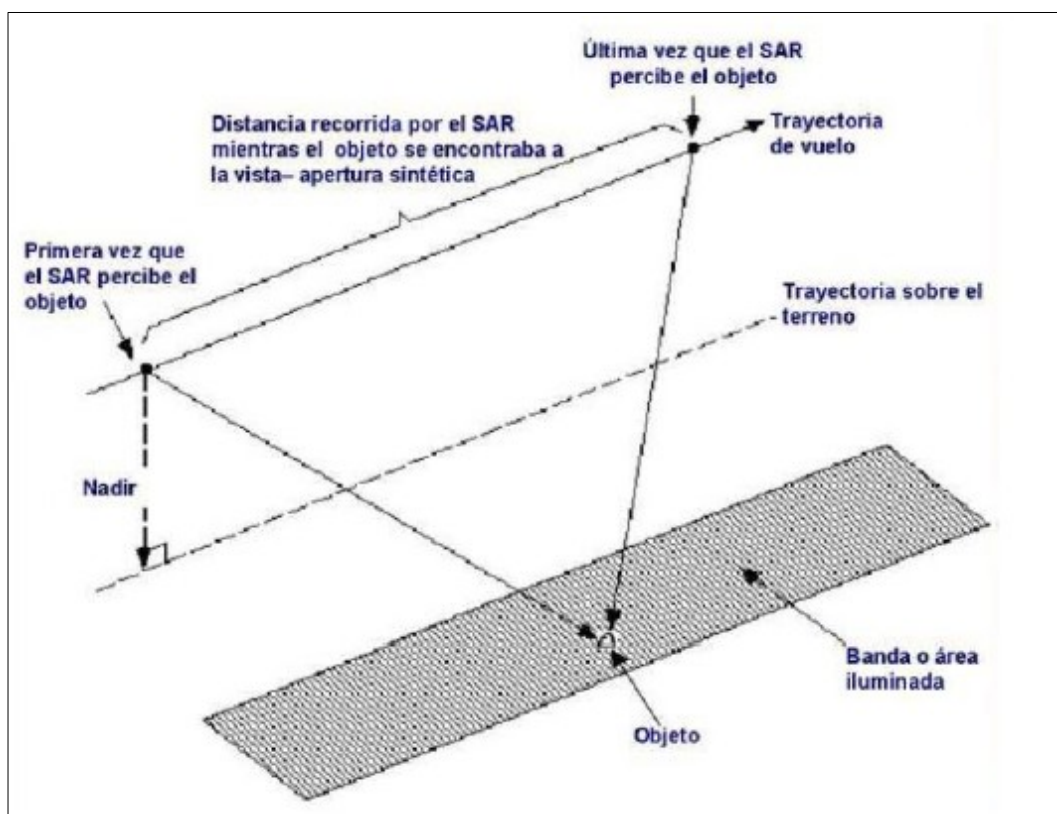


Figura 2.3-1: Fundamentos de los sensores radar de apertura sintética o SAR. Fuente: Fundamentos de Teledetección Radar. ([www.ign.es](http://www.ign.es)).

## 2.4 El programa Copernicus y las imágenes radar obtenidas por Sentinel 1.

El programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como misión la observación de la tierra, con el objetivo de aportar información precisa, actualizada y de fácil acceso para la mejora de la gestión del medio ambiente, y poder comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

Copernicus tiene un Componente Espacial y un Componente en Tierra. El Componente Espacial se encuentra en parte en fase operativa y posee varios satélites en funcionamiento, que se encargan de distribuir a los usuarios los datos recogidos por los

satélites nacionales, europeos e internacionales que forman parte del conjunto de las Misiones Colaboradoras de Copernicus. Asimismo, el componente espacial lleva a cabo la contribución europea al Sistema Global de Sistemas de Observación de la Tierra (GEOSS).

El Componente en Tierra se encarga de distribuir los datos recogidos por los satélites Sentinel y por las Misiones Colaboradoras a la comunidad de usuarios. Este componente está gestionado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), European Environment Agency, y trabajará con los datos recogidos por un gran número de sensores en tierra, en mar o aerotransportados facilitados por distintas organizaciones europeas e internacionales.

La información se engloba en seis grandes categorías: gestión del suelo, el medio marino, la atmósfera, respuesta en situaciones de emergencia, seguridad y cambio climático.

El componente espacial de Copernicus está compuesto por los siguientes Satélites:

- Sentinel-1: aporta servicios terrestres y oceánicos. Toma imágenes SAR de la superficie de la Tierra. Sentinel-1A fue lanzado en 2014, mientras que Sentinel-1B lo hizo en 2016.

- Sentinel-2: tiene como misión la vigilancia terrestre, tomando imágenes ópticas de alta resolución. Sentinel-2A fue lanzado en 2015, mientras que Sentinel-2B lo hizo en 2017.

- Sentinel-3: topografía de los océanos, temperatura y color del mar y de la tierra. Sentinel-3A fue lanzado el 16 de febrero de 2016. Sentinel-3B se unió a su gemelo el 25 de abril de 2018.

- Sentinel-4: monitorizará la atmósfera desde una órbita geoestacionaria.

- Sentinel-5: medirá la composición de la atmósfera desde la órbita polar.

- Sentinel-6: estudios oceanográficos (como la altura global de la superficie del mar) y de estudios climáticos. El primer satélite se puso en órbita el 21 de noviembre de 2020.

Debido a la relación con este trabajo, en los siguientes párrafos presentamos especial atención a los Satélites SAR Sentinel 1.

Como se ha indicado, el sistema satelital Sentinel 1 actualmente tiene en órbita dos satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B, cuyas fechas de lanzamiento han sido abril de 2014 para el Satélite Sentinel 1A y abril de 2016 para el Sentinel 1B, estando sus imágenes disponibles unos meses más tarde de esas fechas, tras la realización de las pertinentes pruebas de funcionamiento.

Ambos satélites están equipados con un sensor SAR en banda C, con polarización doble (HH, HV, VV, VH), y dan continuidad a los datos procedentes de los satélites ERS 1

Y 2 (ERS-1 dejó de estar operativo en el año 2000 y el ERS-2 en el año 2005), RADARSAT 1 y 2, ENVISAT.

La órbita de Sentinel 1 A y B es heliosincrónica a 693 km de altitud, y con una diferencia de fase entre los dos satélites de 180°. El ciclo de repetición es de 12 días.

En la siguiente tabla, obtenida de ESA, se muestran las especificaciones del sistema Sentinel 1 y su comparación con Sentinel 2 y 3.

Parameter	Sentinel-1	Sentinel-2	Sentinel-3
First launch	2014	2014	2015
Orbit type	SSO (Sun-synchronous Orbit) 12 day repeat cycle LTAN = 18:00 hours	SSO 10 day repeat cycle LTDN = 10:30 hours	SSO 27 day repeat cycle LTDN = 10:00 hours
Orbital altitude	693 km	786 km	800 km
Sensor complement	C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar)	MSI (Multi Spectral Instrument)	SRAL (Sentinel-3 Radar Altimeter) MWR (MicroWave Radiometer) OLCI (Ocean and Land Color Instrument) SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)
Spacecraft mass Spacecraft size Spacecraft power	2300 kg 3.4 m x 1.3 m x 1.3 m 4.8 kW (EOL)	1100 kg 3.0 m x 1.7 m x 2.2 m 1.7 kW (EOL)	1250 kg 3.9 m x 2.2 m x 2.2 m 2.05 kW (EOL)
Downlink X-band data rate	520 Mbit/s	520 Mbit/s	520 Mbit/s
TT&C S-band	64 kbit/s uplink 128 kbit/s or 2 Mbit/s downlink	64 kbit/s uplink 128 kbit/s or 2 Mbit/s downlink	64 kbit/s uplink 128 kbit/s or 2 Mbit/s downlink
Science data storage	1.4 Tbit (EOL)	2 Tbit (EOL)	300 Gbit (EOL)
Required data quality	BER (Bit Error Rate): <math>10^{-9}</math>	FER (Frame Error Rate): <math>10^{-6}</math>	FER (Frame Error Rate): <math>10^{-7}</math>
Operational autonomy	8 days	14 days	27 days
Prime contractor	TAS-I (Thales Alenia Space-Italy)	EADS Astrium GmbH, Germany	TAS-F (Thales Alenia Space-France)
Baseline launcher	Soyuz (Kourou)	Vega (Kourou)	Vega (Kourou)

**Tabla 2.4-1: especificaciones del sistema Sentinel 1 y su comparación con Sentinel 2 y 3. Fuente: ESA**

En la siguiente tabla podemos ver los parámetros principales asociados a la banda C del satélite Sentinel 1:

Center frequency of C-band	5.405 GHz (corresponding to a wavelength of ~18 cm)
Bandwidth	0-100 MHz (programmable)
Polarization	HH-HV, VV-VH
Antenna type	Slotted waveguide radiators
Antenna size	12.3 m x 1.02 m
Antenna mass	880 kg (representing 40% of the total launch mass)
RF Peak Power (sum of all TRM, at TRM o/p) DC power consumption	- 4.368 kW - 4.075 kW (Interferometric Wide Swath Mode, two polarizations)
Pulse width	5-100 $\mu$ s (programmable)
Transmit duty cycle	12% (max)
Receiver noise figure at module input	3 dB
PRF (Pulse Repetition Frequency)	1000-3000 Hz (programmable)
Data compression (selectable)	ECBAQ (Entropy-Constrained Block Adaptive Quantization) FDBAQ (Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization)
ADC sampling frequency	260 MHz (real sampling) (Digital down-sampling after A/D conversion)
Data quantization	10 bit
Total instrument mass (including antenna)	945 kg

**Tabla 2.4-2: parámetros principales asociados a la banda C del satélite Sentinel 1. Fuente: ESA**

En cuanto a los modos de operación posibles en el Sistema de satélites Sentinel 1, a continuación se realiza una descripción de los mismos:

- StripMap Mode (SM)

Las imágenes obtenidas tienen 80 km de ancho en dirección de rango. La resolución es de 5m x 5m uniforme.

- Wave Mode (WM)

Este Sistema permite obtener una imagen de 20 x 20 km , con una resolución de 5m x 5m.

Cada imagen está formada con uno de los dos intervalos de ángulos posibles, 23° o 36.5° de ángulo medio, de manera que la separación entre imágenes es de 100 km.

Las imágenes son productos independiente con polarización simple HH o VV.

Este modo se emplea principalmente en el estudio de los vientos marinos.

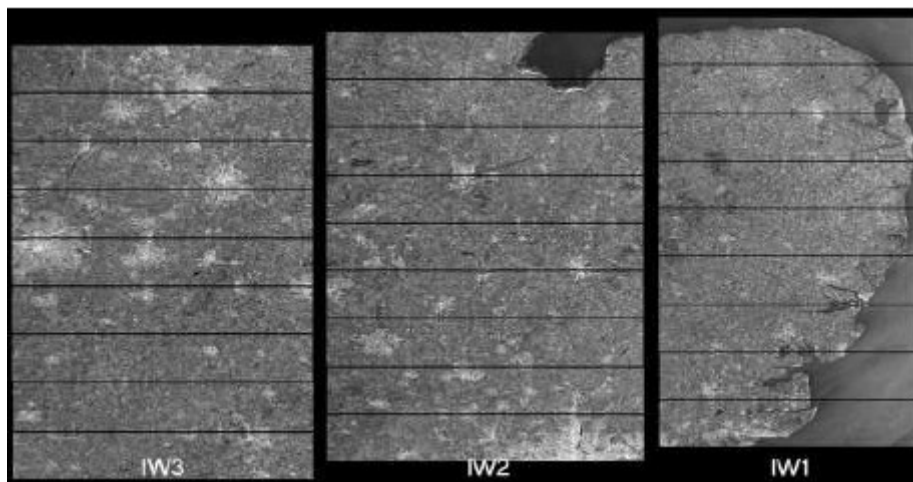
- Interferometric Wide Swath (IW)

Las imágenes obtenidas en este modo tienen 250 km de ancho en la dirección del alcance y una resolución de 20 m en alcance y 5 m en azimut.

Estas imágenes están compuestas por tres subfranjas o sub-swath (IW1, IW2, IW3)

La técnica de escaneo utilizada en este modo se denomina TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Swaths SAR). Consiste en escanear cada subfranja de la

imagen dirigiendo el haz no solo en la dirección de rango sino también del azimut y en el sentido de adelante hacia atrás. Las bandas generadas (llamadas ráfagas) están separadas con un determinado solapamiento que permitirá generar una sola imagen tras su procesamiento.



**Figura 2.4-1: Aspecto de una imagen Sentinel-1 tomada en modo IW mediante técnica TOPSAR. Fuente: ESA**

Las imágenes Sentinel 1 utilizadas en este trabajo están generadas con este modo de toma, que es de los más habituales de trabajo en Sentinel-1.

- Extra Wide Swath Mode

En este caso la imagen que se obtiene tiene un ancho de 400 km con una resolución de 40 m en la dirección azimutal y 20 m en la dirección del alcance.

También utiliza la técnica TOPSAR, al igual que el modo IW, aunque en este caso la imagen está dividida en 5 subfranjas y estas a su vez están también compuestas por ráfagas que se procesan posteriormente. Estas imágenes permiten un procesado interferométrico.

En la siguiente figura pueden verse los modos de operación de los satélites Sentinel 1:



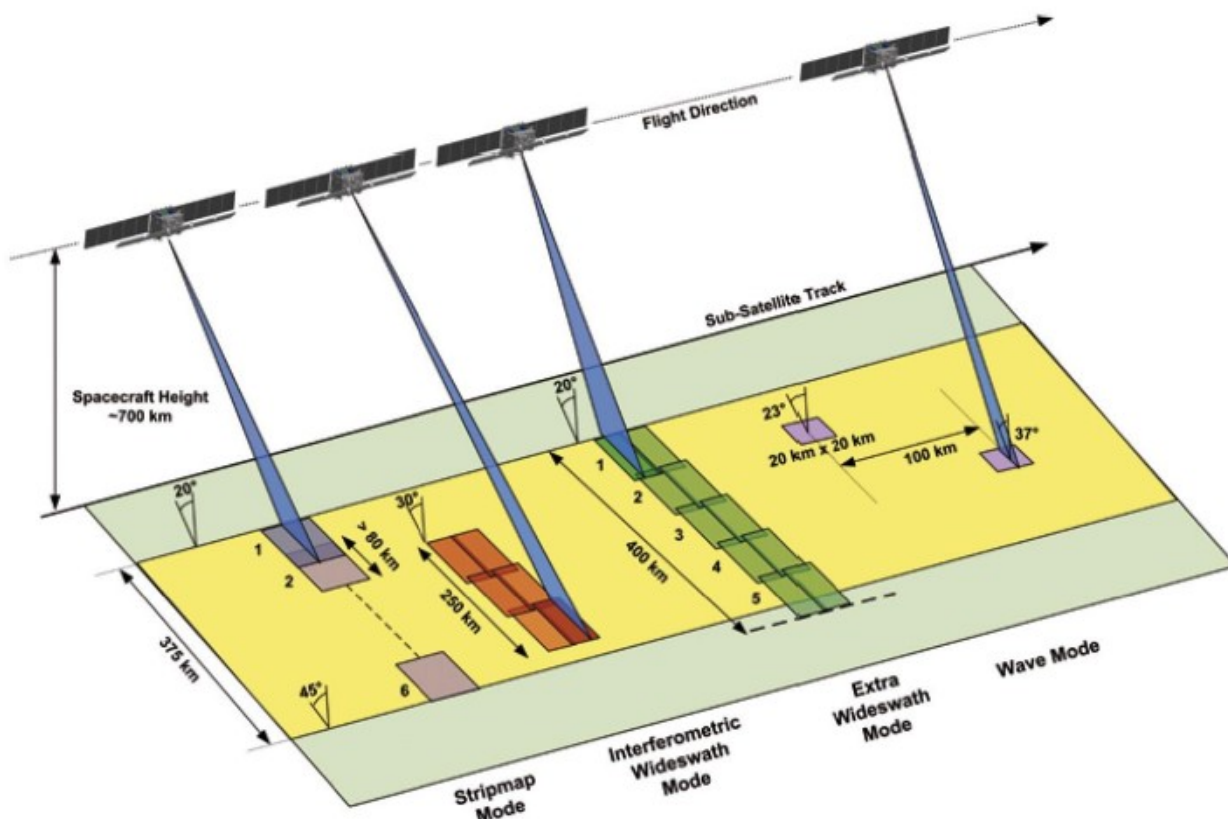


Figura 2.4-2: Modos de operación Sistema de satélites Sentinel 1. Fuente: ESA.

La siguiente tabla muestra el resumen de las características principales de estos modos:

Parameter	Interferometric Wide-swath mode (IW)	Wave mode (WV)	Strip Map mode (SM)	Extra Wide-swath mode (EW)
Polarisation	Dual (HH+HV, VV+VH)	Single (HH, VV)	Dual (HH+HV, VV+VH)	Dual (HH+HV, VV+VH)
Access (incidence angles)	31° - 46°	23° + 37° (mid-incidence angle)	20° - 47°	20° - 47°
Azimuth resolution	20 m	5 m	5 m	40 m
Ground range resolution	5 m	5 m	5 m	20 m
Azimuth and range looks	Single	Single	Single	Single
Swath	250 km	Vignette 20 × 20 km	80 km	410 km
Maximum noise-equivalent sigma zero (NESZ)	-22 dB	-22 dB	-22 dB	-22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)
Phase error	5°	5°	5°	5°

Tabla 2.4-3: resumen de las características principales de los modos de operación de los satélites Sentinel 1. Fuente: ESA

En cuanto a los formatos de imágenes suministradas por ESA, hay que tener en cuenta que los datos adquiridos por los satélites reciben un tratamiento en distintos niveles y son puestos a disposición de los usuarios.

Las imágenes de Sentinel 1 son clasificadas en distintos niveles según el procesamiento que hayan tenido, estos niveles son:

- Nivel 0: Paquetes de datos crudos (RAW), Solo tienen el tratamiento efectuado en el satélite, disponiendo de anotaciones adicionales e información auxiliar procedentes de las lecturas de los datos, para respaldar el procesamiento.

- Nivel 1: Las imágenes procesadas en nivel 1 se suministran en dos formatos:

- Imagen Compleja de Observación Única (SLC) de rango oblicuo: datos enfocados en geometría de rango oblicuo, con información de fase y amplitud en la línea de observación del RADAR.

- Imagen Proyectada en el Terreno (GRD): datos enfocados proyectados al rango de tierra, detectados y con múltiples miradas. Los datos se proyectan al rango de tierra utilizando un modelo de elipsoide de la Tierra WGS84, manteniendo la dirección original de la ruta del satélite e incluyendo información completa de referencia geográfica. Esta imagen no dispone de información de fase.

- Nivel 2: Productos oceánicos, campo de vientos oceánicos, espectros de ondas de oleaje y corrientes superficiales según los datos SAR.

## 2.5 Interferometría diferencial.

Las imágenes SAR individuales contienen en cada píxel información de la amplitud y la fase correspondiente a los elementos que representa dicho píxel. Esta amplitud depende de las características de los elementos dispersores presentes en la zona observada y la fase recibida será la suma de las respuestas de todos esos dispersores dentro de una celda de información. Por lo tanto una imagen de fase individual aparenta contener valores aleatorios y no tiene utilidad práctica por sí sola. Para obtener información relevante se emplea lo que se conoce como interferometría diferencial.

La interferometría diferencial (DInSAR) es la técnica que se emplea cuando dos satélites toman una imagen de la superficie de la Tierra o un satélite adquiere 2 imágenes de una región en particular, en un periodo de varios días. La diferencia de la fase entre las dos imágenes elimina la componente afectada por los efectos de dispersión, dado que este efecto se entiende similar en ambas imágenes (aunque esto será así siempre que exista suficiente coherencia entre ambas imágenes, como se verá más adelante). Esta diferencia de fases correctamente procesada tiene 2 utilidades principales:

1. Determinación de la Altura en una zona (modelo de elevación del terreno)

2. Determinación de la Variación en la Posición de un Punto (Desplazamiento): En el caso de tomar imágenes en diferentes instantes y conocer un modelo de elevación del terreno, la técnica DinSAR se utiliza para determinar el desplazamiento experimentado por un punto, dado que puede darse el caso de que en la variación del valor de la distancia entre ambos satélites esté contenida también una variación en la posición del punto, debido a por ejemplo un terremoto, subsidencia o deslizamiento del terreno (como se estudia en este trabajo).

En el siguiente esquema pueden verse las componentes geométricas que influyen en esta diferencia de fase:

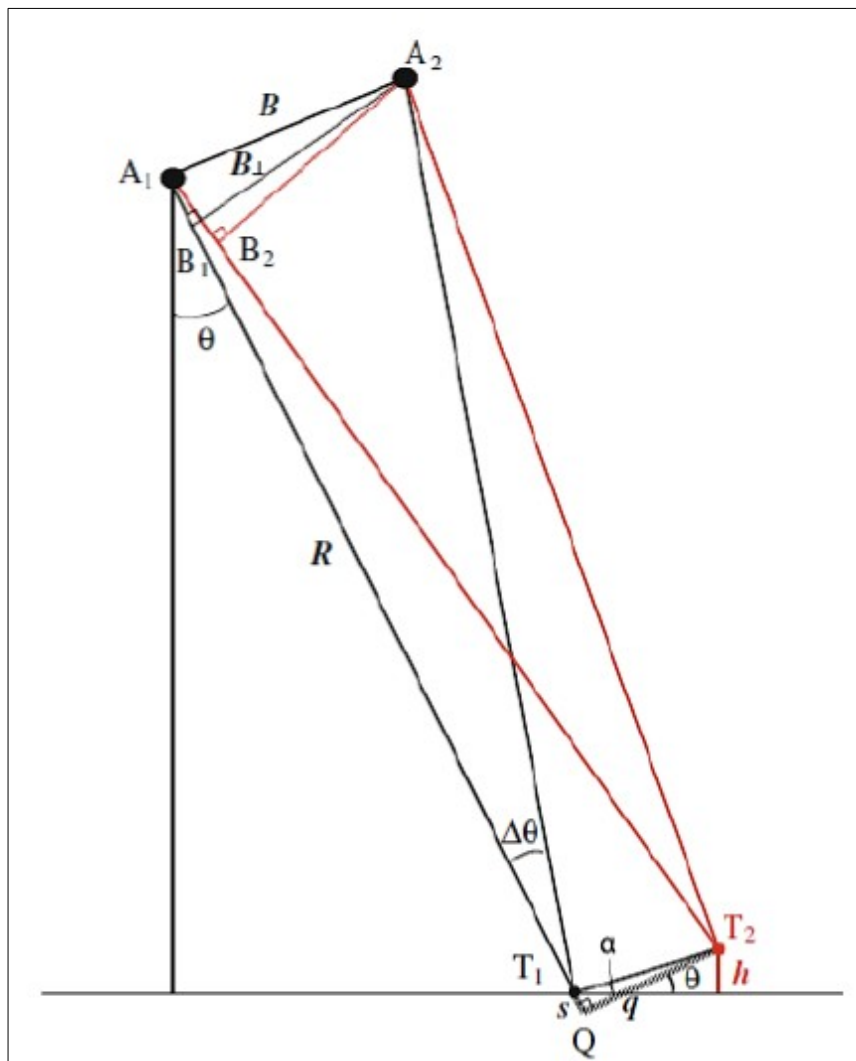


Figura 2.5-1: Medición de punto en dos imágenes. Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.

Donde:

$B_{\perp}$  (o también  $B_n$ ) es la base perpendicular entre los satélites.

$R$  distancia entre el sensor y la superficie.

$h$  diferencia de altura.

$\Theta$  ángulo de incidencia.

$d$  desplazamiento en la dirección de observación ( $\Delta R$ )

$s$  distancia entre los dos puntos, proyectada sobre la línea de vista.

$q$  distancia entre los dos puntos, proyectada sobre la línea perpendicular a la línea de vista.

Esta diferencia de fase obtenida está compuesta por los siguientes términos, que influyen en mayor o menor medida en el valor total:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi \text{ flat} + \Delta\varphi \text{ elev} + \Delta\varphi \text{ disp} + \Delta\varphi \text{ atmo} + \Delta\varphi \text{ noise}$$

Donde:

**$\Delta\varphi \text{ flat}$**  es la parte del valor del desplazamiento provocado por la curvatura de la tierra al calcular la posición de los puntos y tiene un valor de:

$$\Delta\varphi \text{ flat} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{Bns}{R \tan\theta}$$

**$\Delta\varphi \text{ elev}$**  es la contribución de la topografía al valor de la diferencia de fase, su valor puede escribirse como:

$$\Delta\varphi \text{ elev} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{Bnh}{R \sin\theta}$$

**$\Delta\varphi \text{ disp}$**  es la contribución del desplazamiento en la dirección del rango ( $d$ ) a la diferencia de fase:

$$\Delta\varphi \text{ disp} = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

**$\Delta\varphi \text{ atmo}$**  es la contribución de la diferencia en las condiciones atmosféricas entre las dos adquisiciones que provocan retraso en la señal y por tanto variación de la fase:

**$\Delta\varphi \text{ noise}$**  el valor de la diferencia de fase producido por varios factores que dependen de las características de la zona, la decorrelación temporal (cambios en los dispersores por tomar imágenes en diferentes períodos), diferentes ángulos de visión y cambios volumétricos en la zona.

Para obtener la mayor precisión, nos interesa eliminar toda la contribución al valor de la diferencia de fase que no sea la referente al desplazamiento.

## 2.6 Concepto de Coherencia del análisis y factores que afectan a la misma.

Como se vio en el apartado de interferometría, existen unas componentes en la diferencia de fase del interferograma que no es posible modelar y por tanto pueden considerarse como ruido. Algunos de los factores que le afectan son:

- Decorrelación temporal: Se debe al hecho de que las imágenes se toman en distintos instantes y por lo tanto no todos los elementos que producen dispersión pueden estar colocados exactamente en la misma posición.
- Ruido térmico: Este efecto está producido por factores del sistema como la ganancia o la configuración de la antena.
- Dispersión volumétrica: Los dispersores volumétricos son los causantes de este ruido (Ej: árboles).
- Geometría de la línea base: Este factor está relacionado con el tamaño de la línea base: A mayor tamaño de la misma, más cambia el ángulo de incidencia local sobre los dispersores. A partir de un valor, conocido como línea base crítica, la imagen de fase solo contiene ruido.
- Error en la determinación de las efemérides precisas: Este parámetro es también considerado una fuente de ruido.

La falta de correlación entre las fases de las dos imágenes que propician estas fuentes de ruido es 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.

Por lo tanto, la coherencia informa sobre 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.

La coherencia toma valores entre 0, que representa una falta total de coherencia, y 1, que sería coherencia absoluta. Las zonas con poca coherencia aparecen oscuras en la imagen y las zonas coherentes aparecerán en tonos de gris claro (cuanto más claro sea, mayor coherencia).

Un análisis complementario es el que nos permite el estudio del histograma de la imagen de coherencia. De un simple vistazo puede determinarse cual es la coherencia general que presenta la imagen. Un ejemplo de mapa de coherencia con histograma puede verse en la siguiente imagen.

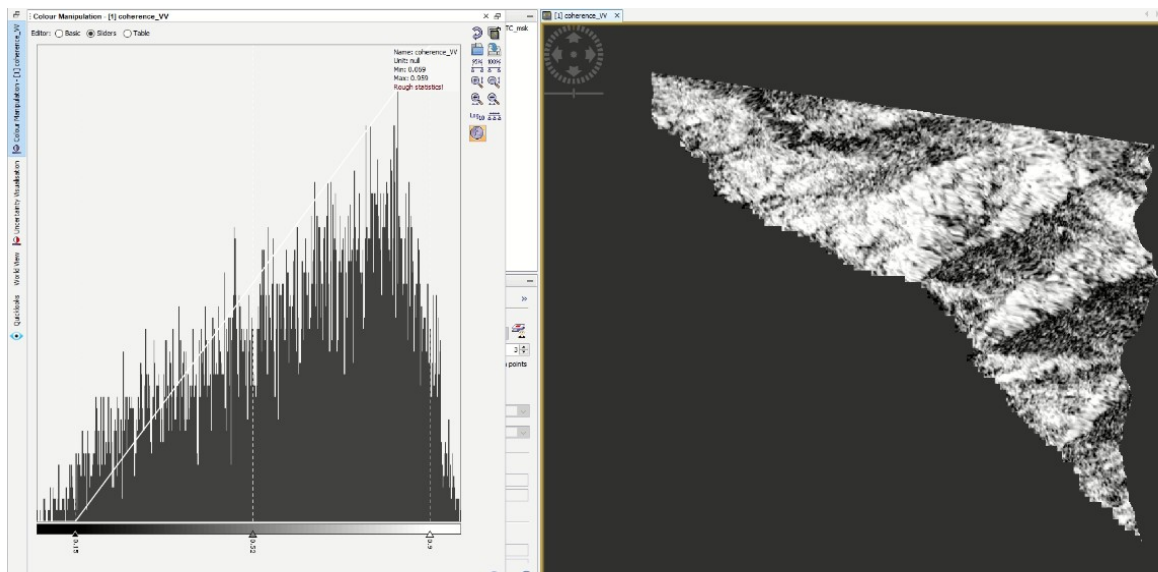


Figura 2.7-1: Ejemplo de mapa de coherencia e histograma. Fuente: Análisis interferométrico de Mud Creek mediante software SNAP.

## 2.7 Deslizamientos del Terreno.

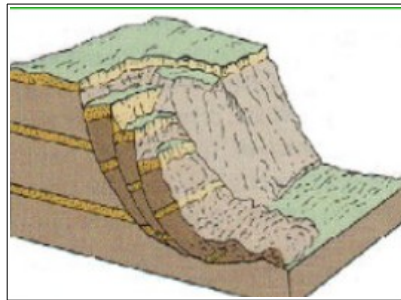
Los deslizamientos consisten en un descenso masivo y relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales, a lo largo de una pendiente. El material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez.

El deslizamiento se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, o plano de cizalla, que facilita la acción de la gravedad. Esta superficie se crea generalmente por la absorción de agua a una profundidad determinada, lo que implica un cambio de densidad de la capa subyacente que es lo que provoca la existencia de un plano de deslizamiento. Afecta tanto a tierras poco compactas como a rocas. Los deslizamientos de tierra pueden afectar a material meteorizado y poco compacto, que carece de debilidades estructurales. La superficie de deslizamiento aparece sobre un basamento arcilloso saturado de agua.

Esta superficie de deslizamiento se crea a lo largo de períodos dilatados de tiempo, el suficiente como para que una determinada capa arcillosa absorba el agua necesaria para permitir el deslizamiento del material superior. Son capas arcillosas las que, generalmente, funcionan como superficies de deslizamiento, por su capacidad para retener el agua.

Dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la superficie de deslizamiento el movimiento en masa puede ser superficial, y que afecta a poco volumen, o profundo, y que afecta a grandes volúmenes. En este caso presenta un perfil cóncavo que imprime a la masa, en el deslizamiento, un movimiento de rotación. Los deslizamientos también pueden afectar a rocas compactas, si en ellas se encuentra una discontinuidad que

funcione como superficie de deslizamiento, también se llaman deslizamientos en lámina o en capas.



**Figura 2.6-1: Ejemplo de Deslizamiento Profundo (rotacional). Fuente: Skinner and Porter, 1992.**

## 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Área de Estudio: El Deslizamiento de Mud Creek

El deslizamiento de tierra de Mud Creek cerca de Big South, California, arrojó aproximadamente 5 millones de metros cúbicos de roca y escombros a lo largo de la carretera 1 de California el 20 de mayo de 2017. Se tardó más de un año y 54 millones de dólares para repararlo.

No se documentó ningún movimiento a largo plazo en Mud Creek antes de este evento, pero los trabajadores del departamento de transporte del estado notaron pequeños aludes en las semanas previas al colapso y afortunadamente cerraron la carretera como medida de precaución.

El colapso ocurrió después de varios días de fuertes lluvias durante uno de los años más húmedos en más de un siglo en esta área. Antes de 2017, una sequía de cinco años había producido varios de los años más calurosos y secos de California. En el estudio de Handwerger et al. en [2] se aborda el análisis de este cambio del comportamiento en el deslizamiento de Mud Creek al pasar de este período de sequía a otro de fuertes lluvias. Para ello se realiza un estudio de interferometría diferencial DinSAR, utilizando pares interferométricos procedentes de Sentinel 1 y de NASA UAVSAR (Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar), utilizando datos de los 3 años hidrológicos previos al fallo catastrófico.

En este Trabajo Fin de Máster se aborda el estudio de diferentes pares interferométricos en la zona donde se produce el deslizamiento de Mud Creek y analizándose los resultados obtenidos, así como los posibles factores que influyen en los mismos.



(a) Study Area map



(b) 2017-05-19



(c) 2017-05-27



Figura 3.1-1: Ubicación y características del deslizamiento de Mud Creek, incluyendo su situación previa y posterior al fallo catastrófico. Fuente: Jonathan A. Warrick et al. (2019)

## 3.2 Procedimiento de Análisis de pares interferométricos:

### 3.2.1 Localización y descarga de los datos

La información necesaria para realizar el análisis interferométrico puede obtenerse de diferentes formas, pudiendo accederse a los datos directamente desde la plataforma del proyecto Copernicus: Copernicus Open Acces Hub de la Agencia Espacial Europea. Sin embargo, en este trabajo también se ha hecho uso de la plataforma Alaska Satellite Facility (ASF), que es operada por la NASA, siendo su repositorio de datos de radar. Esta plataforma permite acceder a los datos de una manera intuitiva, completa y rápida. La dirección de enlace es: <https://asf.alaska.edu/>

Una vez dentro de la plataforma ASF, se puede acceder al mapa buscador de imágenes seleccionando la opción Get SAR Data > ASF Vertex. Dentro de este buscador, se introducen los parámetros de búsqueda. Primeramente se selecciona el Dataset Sentinel-1 para acceder a los datos de este satélite, ya que esta plataforma permite también la obtención de imágenes de otros diversos satélites. A continuación podemos seleccionar un área de trabajo, buscando directamente en el mapa o introduciendo las coordenadas del área que se pretende estudiar. Asimismo, se selecciona un intervalo de fechas para la búsqueda de imágenes en el período que se pretenda estudiar la evolución de los movimientos del terreno.

Para cada una de las imágenes encontradas por la plataforma, podemos consultar diversa información, entre la que se encuentra el Path y el Frame, que deben ser coincidentes en cada par de imágenes seleccionadas. Asimismo, se indica la dirección de vuelo (Ascendente o Descendente) y se muestra un recuadro en el mapa que contiene el área que abarca esa imagen.

Dentro de las opciones de descarga que ofrece la plataforma, debemos seleccionar los archivos del tipo Single Look Complex (SLC).

The screenshot shows the ASF Data Search interface. At the top, there is a search bar with filters for 'Geographic' and 'Sentinel-1', and a search button. Below the search bar, there is a map view showing the study area with a red bounding box. The map includes controls for zoom, pan, and selection. Below the map, there is a list of search results for Sentinel-1 images, including file names, dates, and download options. The interface also displays map controls and a scene detail panel.

**Figura 3.2.1-1: Buscador de la Alaska Satellite Facility. Fuente: ASF**

Una vez descargados los archivos, se procederá a cargarlos en SNAP, simplemente arrastrándolos al menú “Product Explorer”, donde aparecerán y estarán preparados para la realización de las diferentes etapas que se describen en los siguientes apartados.

### 3.2.2 Corregistro de imágenes

Debido a que en interferometría se obtiene la diferencia de fase entre 2 imágenes, lo primero que hay que hacer es establecer la correspondencia pixel a pixel entre ambas imágenes. Esto se hace mediante el procedimiento de corregistro de imágenes radar.

Para llevar a cabo el corregistro de las imágenes con SNAP, se seleccionan en el menú superior las opciones siguientes:

#### **Radar > Corregistration > S1 Tops Corregistration > S1 Tops Corregistration**

Posteriormente deberá indicarse cuál es la imagen maestra y cuál es la esclava. Asimismo, en el apartado TOPSAR Split de cada imagen seleccionaremos la subfranja, y dentro de la misma las ráfagas, en las que se encuentra la zona de estudio del deslizamiento. A menor número de ráfagas seleccionadas, menor coste computacional tendrá todo el proceso, por lo tanto esta selección deberá optimizarse. El tipo de polarización analizada es VV.

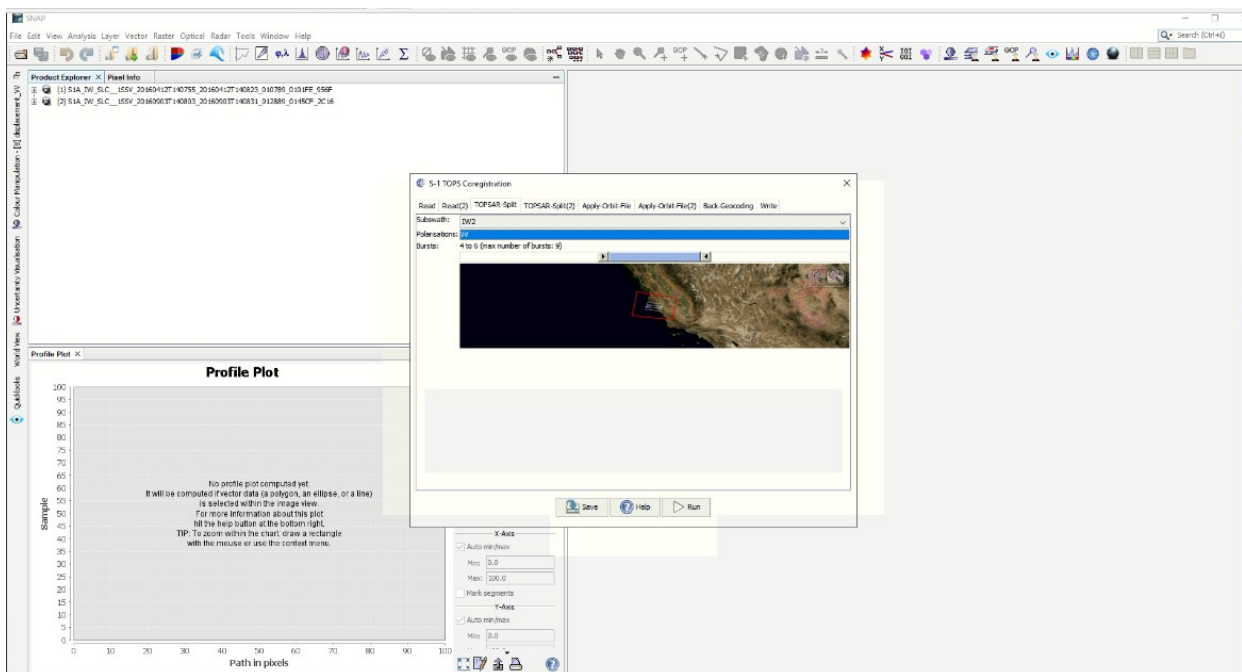


Figura 3.2.2-1: Opciones del Corregimiento de imágenes radar mediante SNAP

Los datos precisos de las órbitas de los satélites que necesita el programa, serán descargados automáticamente de Internet seleccionando la opción correspondiente en las pestañas Apply-Orbit File.

Asimismo, el programa descarga un Modelo Digital de Elevación, pudiendo seleccionarse en la pestaña Back-Geocoding. En los cálculos realizados se ha seleccionado el MDE SRTM 1sec HGT (auto download), que presenta una mayor precisión respecto a otras opciones, siendo esta necesaria para el estudio de los deslizamientos del terreno.

En la pestaña Write, se selecciona la carpeta donde se quieren guardar los resultados del procesamiento.

### 3.2.3 Generación de un interferograma bruto

Para la realización del interferograma bruto (antes de la eliminación de la componente de tierra plana, la componente topográfica y el ruido) deben seleccionarse las imágenes SLC corregistradas en el menú de la barra superior, utilizando las opciones **Radar > Interferometric > Products > Interferogram Formation**.

Para un procesamiento básico, no hay necesidad de cambiar las configuraciones preprogramados en la pestaña Processing Parameters.

En el proceso de formación del Interferograma se elimina el término de tierra plana, correspondiente a la curvatura de la tierra, para ello se utilizan los metadatos que

contienen los archivos que se descargan con la imagen SAR y los datos de las órbitas de los satélites, que se descargan automáticamente de Internet.

Si vemos la imagen de la fase que se obtiene en SNAP, lo primero que se aprecia es que la fase es muy ruidosa. Esto se debe a que aún no se ha restado la parte de la fase que se debe a la topografía, así como tampoco se han realizado los filtrados del ruido.

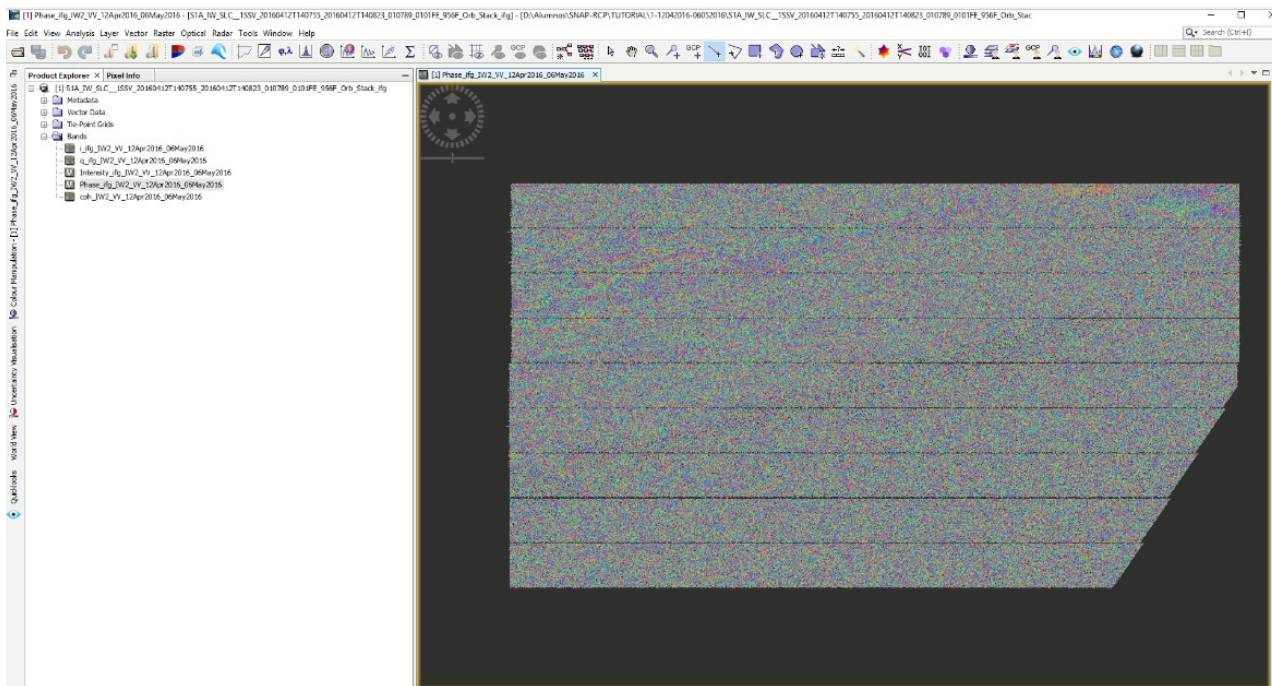


Figura 3.2.3-1: Visualización de interferograma bruto con SNAP. Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Eliminación de ráfagas (Debursting)

Consiste en la eliminación de las ráfagas que se habían generado en el interferograma, y que provenían de la forma de toma de las imágenes originales mediante la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR).

Para llevar a cabo este proceso en SNAP se realizará mediante las opciones:

**Radar > Sentinel-1 TOPS > S1 Tops Deburst**

Dado que hay un cierto solape entre las zonas que aparecen en las distintas ráfagas que había originalmente, el debursting consigue que la imagen resultante sea algo más pequeña. Un ejemplo de imagen resultante tras el debursting puede verse en la siguiente figura.

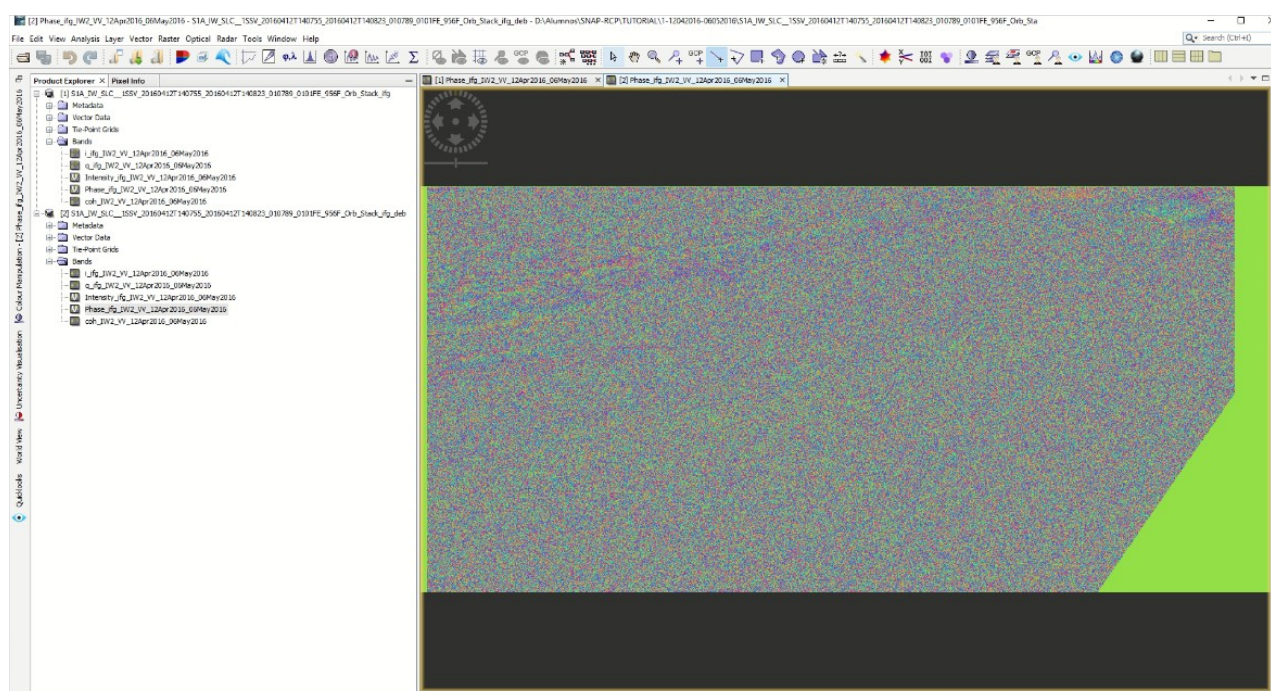


Figura 3.2.4-1: Imagen resultante tras el debursting. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.5 Eliminación de la fase topográfica y la componente de tierra plana

Se pretende eliminar en esta etapa la fase debida a la elevación así como la componente de tierra plana. Para ello en SNAP se indican las opciones **Radar > Interferometric > Products > Topographic Phase Removal**. En el apartado de opciones habrá que indicar el modelo digital del terreno adecuado para analizar deslizamientos, que es el SRTM 1Sec HGT (Auto Download), ya que su resolución es más alta y se obtienen mejores resultados que en el modelo 3 Sec, también disponible en SNAP. Asimismo, el programa resta la componente de tierra plana haciendo uso de los metadatos de la órbita.

Una vez realizado este paso se suele conseguir una imagen de la fase en la que se aprecian zonas de mayor coherencia en el terreno y zonas muy ruidosas correspondientes al océano, aunque el nivel de coherencia depende también de otros factores como la vegetación, los fenómenos atmosféricos o los cambios que se producen en la superficie del terreno.

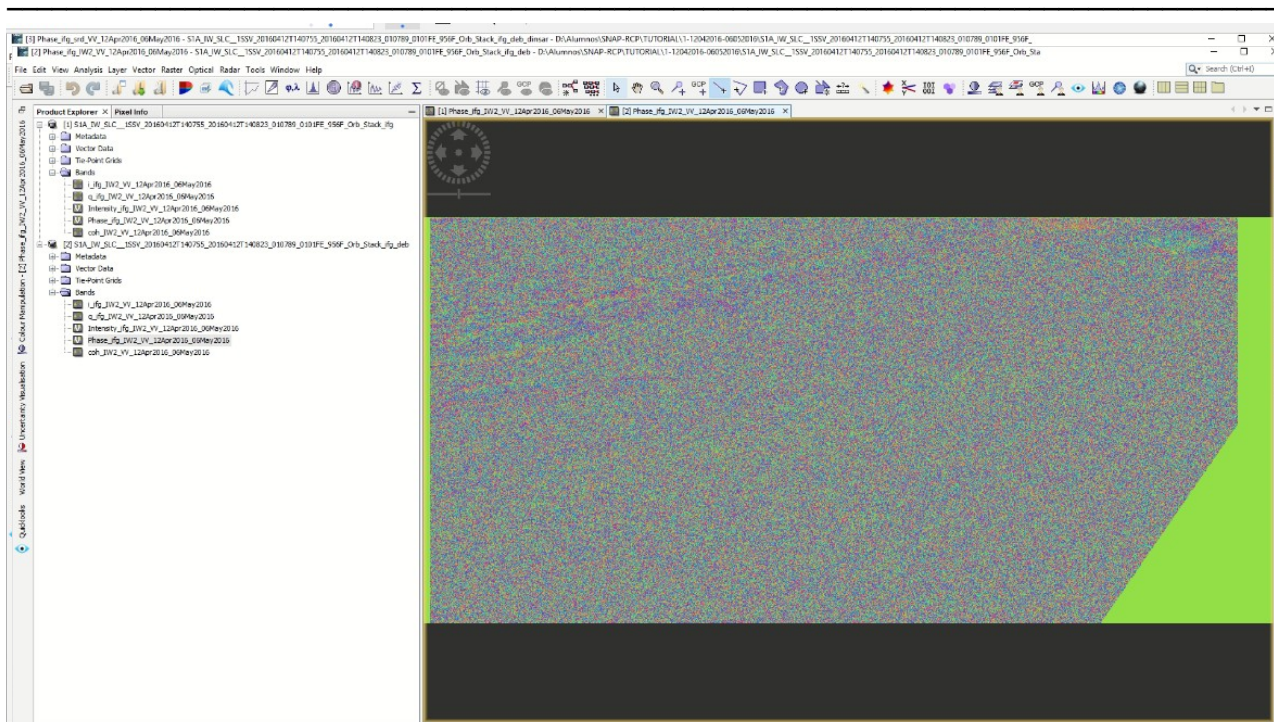


Figura 3.2.5-1: Imagen resultante tras la eliminación de la fase topográfica. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.6 Filtrado y Multilooking

La fase contiene ruido proveniente de diversos aspectos como la decorrelación entre imágenes temporal o geométrica, el ruido térmico, o factores relacionados con la retrodispersión de la señal. Debido a que el proceso de desenrollado de fase es muy sensible al ruido es necesario filtrar la imagen antes de continuar con el procesado. Para ello se van a llevar a cabo 2 procesos de filtrado:

- Filtro de Goldstein: Este filtro fue desarrollado por 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.

En SNAP, reducimos el filtro adaptativo a 0.4 porque de lo contrario se podrían perderse demasiados detalles sobre el deslizamiento de tierra. La opción a seleccionar es:

#### Radar > Interferometric > Filtering > Goldstein Phase Filtering

Tras este paso suele apreciarse una mayor diferencia entre la tierra y el océano, porque la coherencia del terreno cambia permanentemente en el agua.

- Multilooking: Se trata del promedio de múltiples píxeles en cada dirección. Habrá mayor promedio en la dirección transversal del rango porque los píxeles son de 14 m en

esta dirección, mientras que en el rango el tamaño del pixel es de 2 m, estando pues muy lejos de tener píxeles cuadrados.

En SNAP el multilooking no se puede hacer sobre la fase, sino sobre la información compleja original de las bandas. Se selecciona en este trabajo 4 looks del rango y 1 del azimut para producir píxeles cuadrados con  $\sim 14$  m de resolución. La opción a seleccionar es:

### Radar > SAR Utilities > Multilooking

Tras realizar ambos procesamientos, la imagen resultante tendrá un aspecto en el que las franjas tienen mucho menos ruido y la relación de aspecto ha cambiado de tal manera que los píxeles son casi cuadrados. Un ejemplo de imagen obtenida puede verse en la siguiente figura.

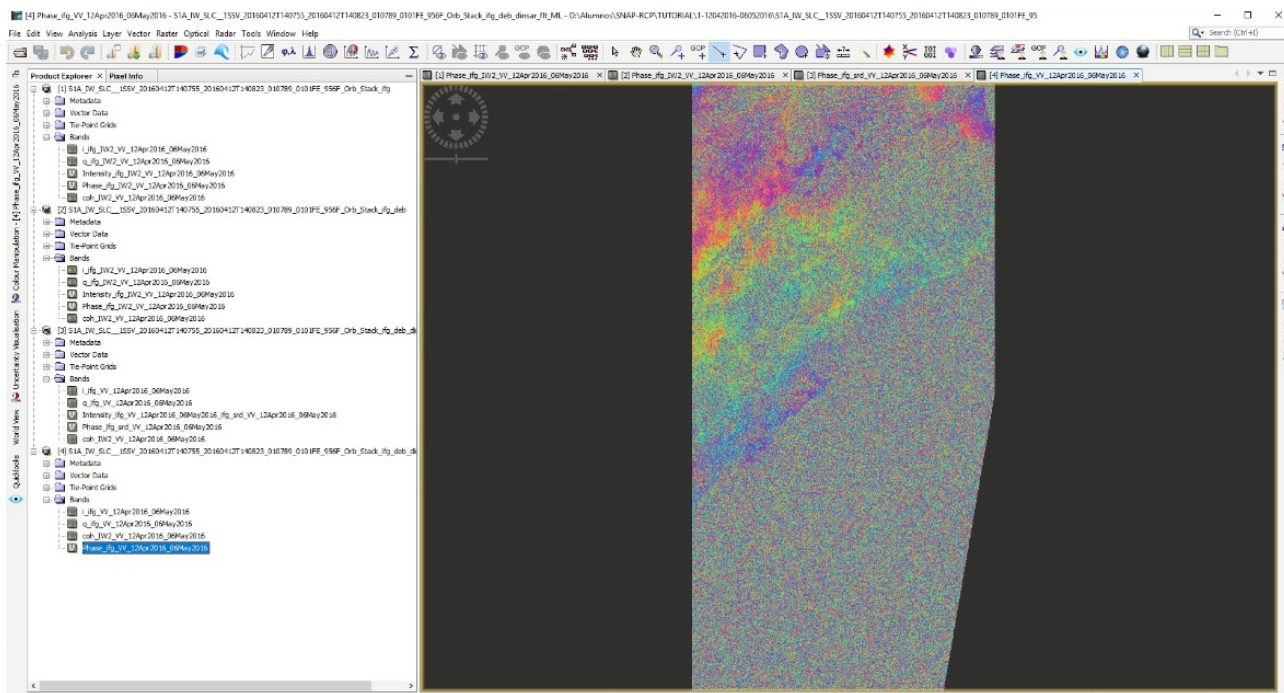


Figura 3.2.6-1: Imagen procesada mediante filtrado y multilooking. Fuente: Elaboración propia.

## 3.2.7 Subset

Mediante la opción **Raster > Subset > Geo Coordinates** podemos seleccionar una zona de estudio personalizada más reducida. Esta reducción ayuda a que el coste computacional de los análisis posteriores sea menor.

En nuestro caso de estudio, de forma similar al tutorial de referencia [1], realizamos un subset con las siguientes características (se muestra en la figura):

"North: 35.89, South: 35.82, West: -121.46, East: -121.39"



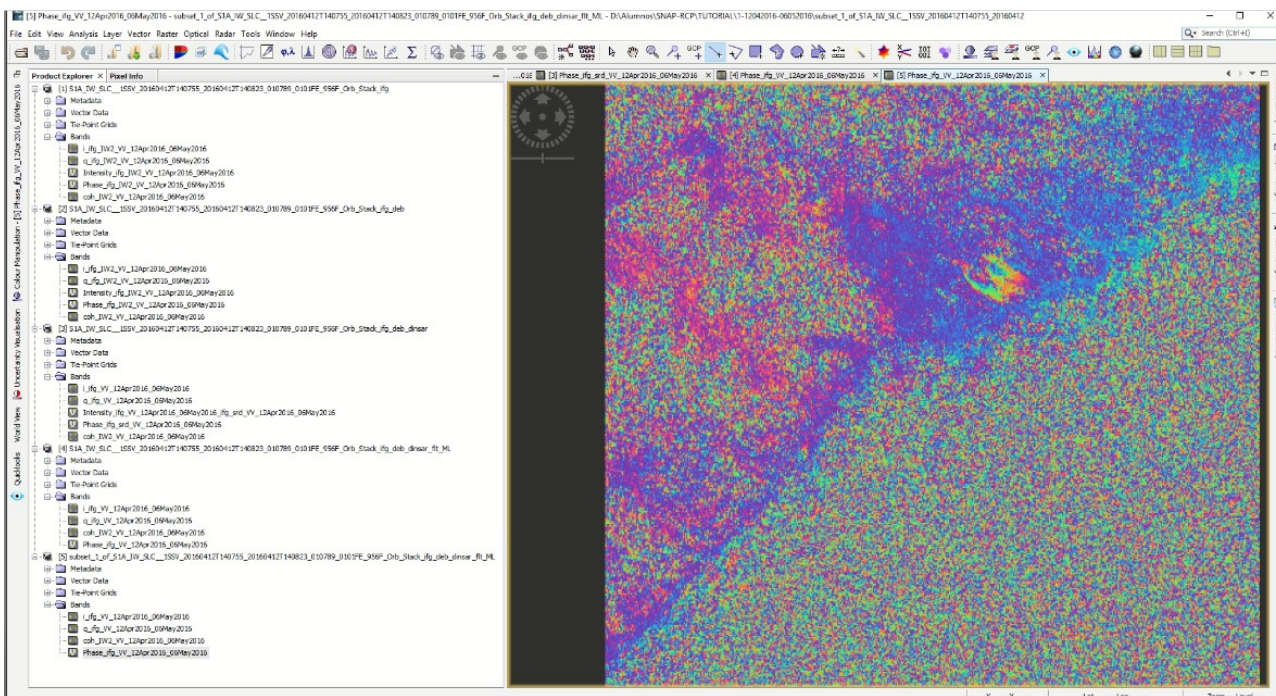


Figura 3.2.7-1: Subset realizado, basado en el tutorial de referencia. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtengamos en los siguientes pasos los desplazamientos e implementemos la corrección del terreno y la máscara que elimina las zonas de mar, también realizaremos un subset más específico de la zona donde se produjo el deslizamiento.

### 3.2.8 Desenrollado de fase

En el interferograma la fase interferométrica obtenida es ambigua y sólo toma valores en la escala  $2\pi$ . Es necesario desenvolver esta fase envuelta para poder obtener una diferencia de fase continua y desenvuelta, que nos permita posteriormente pasarla a desplazamientos. La siguiente imagen ilustra este aspecto:

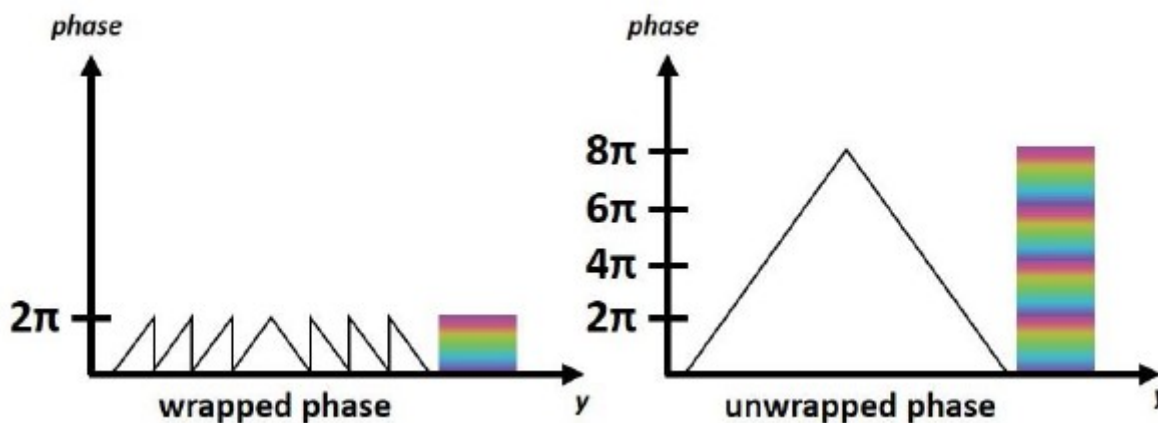


Figura 3.2.8-1: Ilustración del desenvolvimiento de fase. Fuente: ESA

El filtrado y multilooking que se han realizado en la etapa anterior son muy necesarios para poder llevar a cabo ahora un buen desenrollado de fase partiendo de esta imagen.

El desenrollado de fase se puede hacer con un programa de acceso libre denominado SNAPHU. Actualmente este programa puede ser ejecutado desde el propio SNAP mediante la instalación de un plugin. Previamente, es necesario exportar el product a desenrollado. Esto se lleva a cabo con el comando **Radar > Interferometric > Unwrapping > Snaphu Export**, Teniendo en cuenta que en la pestaña Snaphu Export hemos de cambiar el “Statistical-cost mode” a “SMOOTH” y también el “number of tile rows” y “number of tile columns” a “1” porque no necesitamos tejas múltiples después del multilooking y la creación de subconjuntos, siguiendo el mismo criterio que en [1].

Una vez exportado el product, se realiza el desenrollamiento de fase propiamente dicho, haciendo uso de los comandos **Radar > Interferometric > Unwrapping > Snaphu-unwrapping**.

Asimismo, una vez desenrollado, será necesario importarlo mediante la opción: **Radar > Interferometric > Unwrapping > Snaphu Import**. La pestaña Read-Phase se configura para el producto que se exportó. Por su parte, la pestaña Read-Unwrapped-Phase se completa con el archivo .hdr del producto desenrollado.

Se obtiene así el producto desenrollado (ver figura). La fase desenrollada sigue en radianes.

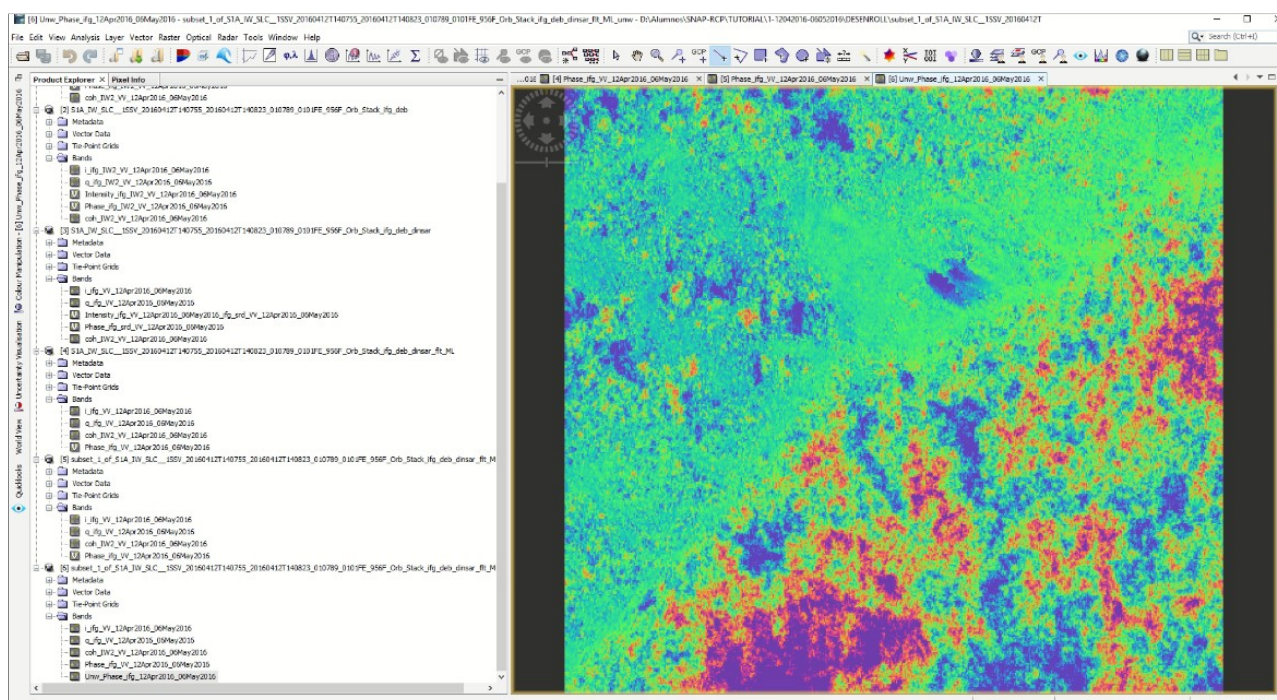


Figura 3.2.8-2: Imagen de fase desenrollada. Fuente: Elaboración propia

### 3.2.9 Conversión de fase a desplazamiento

El siguiente paso es convertir la fase desenrollada a desplazamientos en la dirección de observación, expresados en metros. Esto lo realiza SNAP teniendo en cuenta la longitud de onda de la señal. Para ello, en el menú de la barra superior, seleccionamos **Radar > Interferometric > Products > Phase to Displacement**.

La pestaña I/O Parameters debe contener el producto desenrollado que se importó.

La imagen resultante tiene el mismo aspecto que la de la fase, pero con diferencias en el mapeado de colores.

La banda de coherencia no se copia automáticamente a este nuevo producto mediante el operador Phase to Displacement. Dado que la vamos a utilizar para representarla y hacer filtrados con sus valores, debemos incorporarla haciendo uso del comando “Band Maths” clicando con el botón derecho sobre “displacement”. Para incorporarla debemos deseleccionar “Virtual” y añadir la coherencia del product anterior en el comando “Edit Expression”.

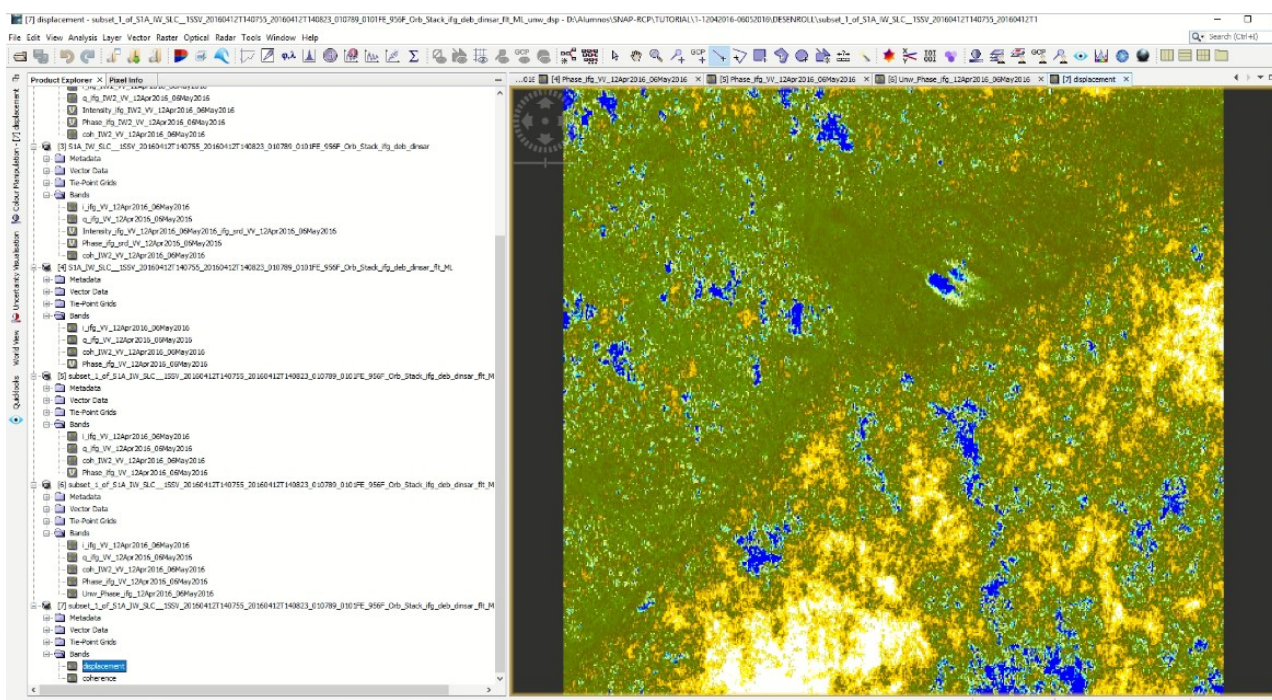


Figura 3.2.9-1: Imagen de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia

### 3.2.10 Corrección por terreno

SNAP hace la geocodificación con topografía por medio de la opción “Terrain Correction”. Permite obtener imágenes georreferenciadas partiendo de imágenes “slant range” o “ground range” propias de la captura mediante radar.

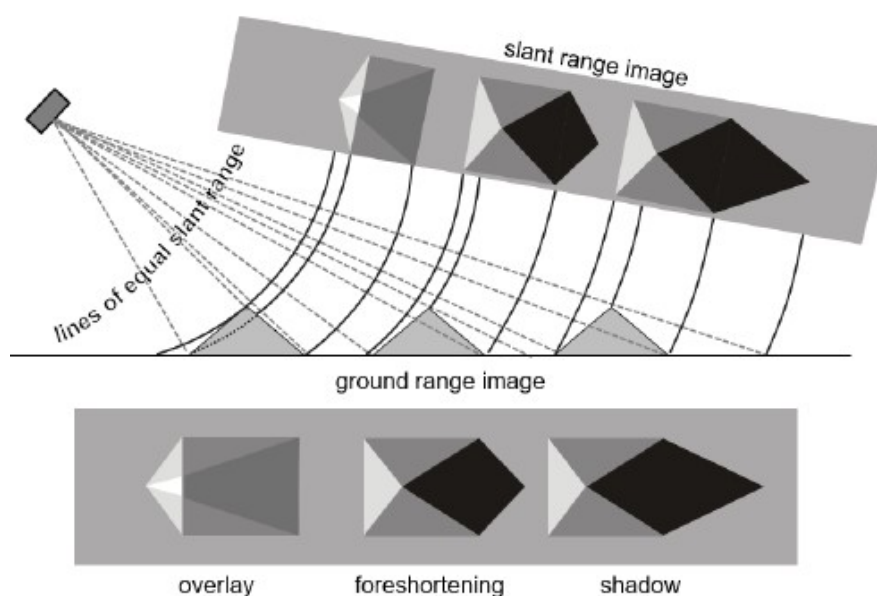


Figura 3.2.10-1: Imágenes de partida de SNAP “slant range” o “ground range”. Fuente: Lillesand et al. (2008)

Para activar la corrección del terreno, en el menú de la barra superior seleccionamos **Radar > Geometric > Terrain Correction > Range-Doppler Terrain Correction**.

En la pestaña Processing Parameters elegimos el DEM SRTM 1Sec HGT (que es en realidad 1 arcosegundo o 30 m).

En los resultados SNAP permite hacer una representación de perfiles “Profile Plot”, muy útil para ver los desplazamientos a lo largo de una línea, como puede verse en la siguiente figura.

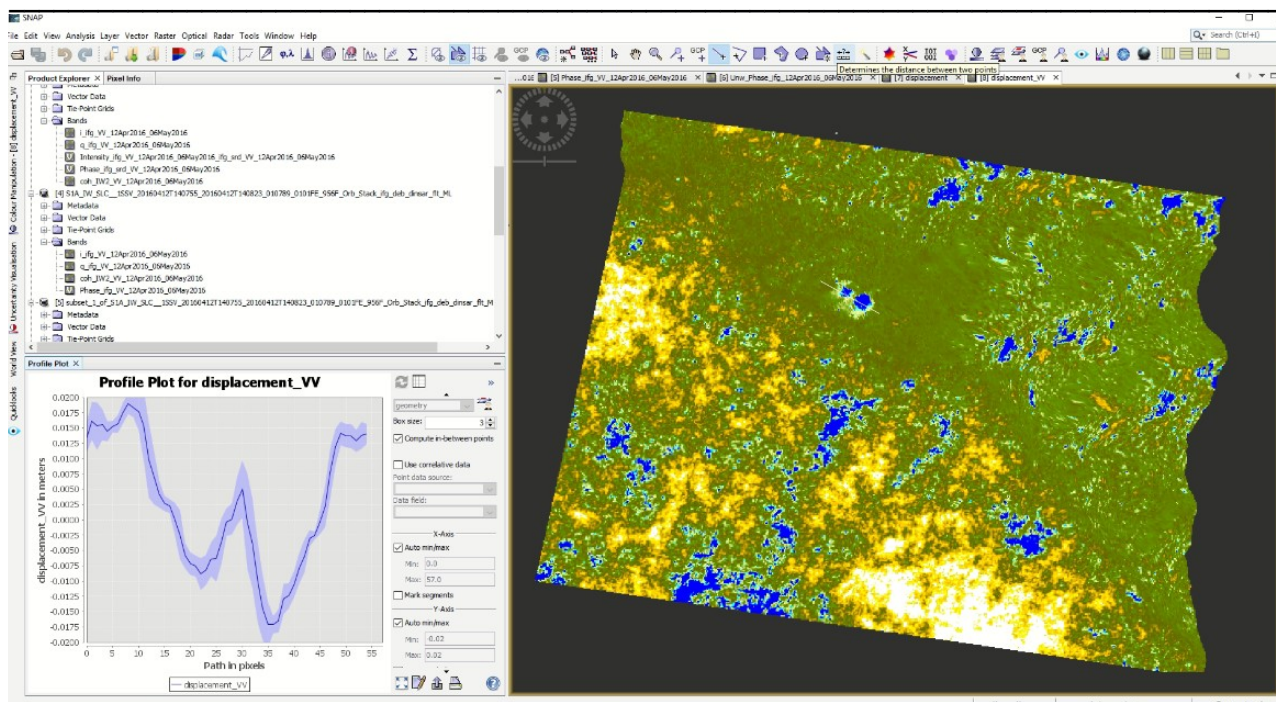


Figura 3.2.10-2: Mapa de desplazamientos tras la corrección del terreno. Representación del perfil de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.11 Enmascarado del mar

Podemos identificar las áreas donde está el mar para eliminarlas, ya que no aportan información relevante a nuestro análisis. Estas áreas sólo contienen ruido, al ser la superficie del mar permanentemente cambiante. Esto se puede hacer enmascarando la zona del mar. Para ello seleccionamos **Raster > Masks > Land/Sea Mask**.

En “Processing Parameters” seleccionamos “Mask out the Sea”, para eliminar la zona del mar, que tiene cota cero. El modelo de elevación digital SRTM disponible es sólo el de 3 arcosegundo.

De esta manera sólo se mantienen los valores de la tierra y los del mar aparecen en negro, como puede comprobarse en la siguiente figura.

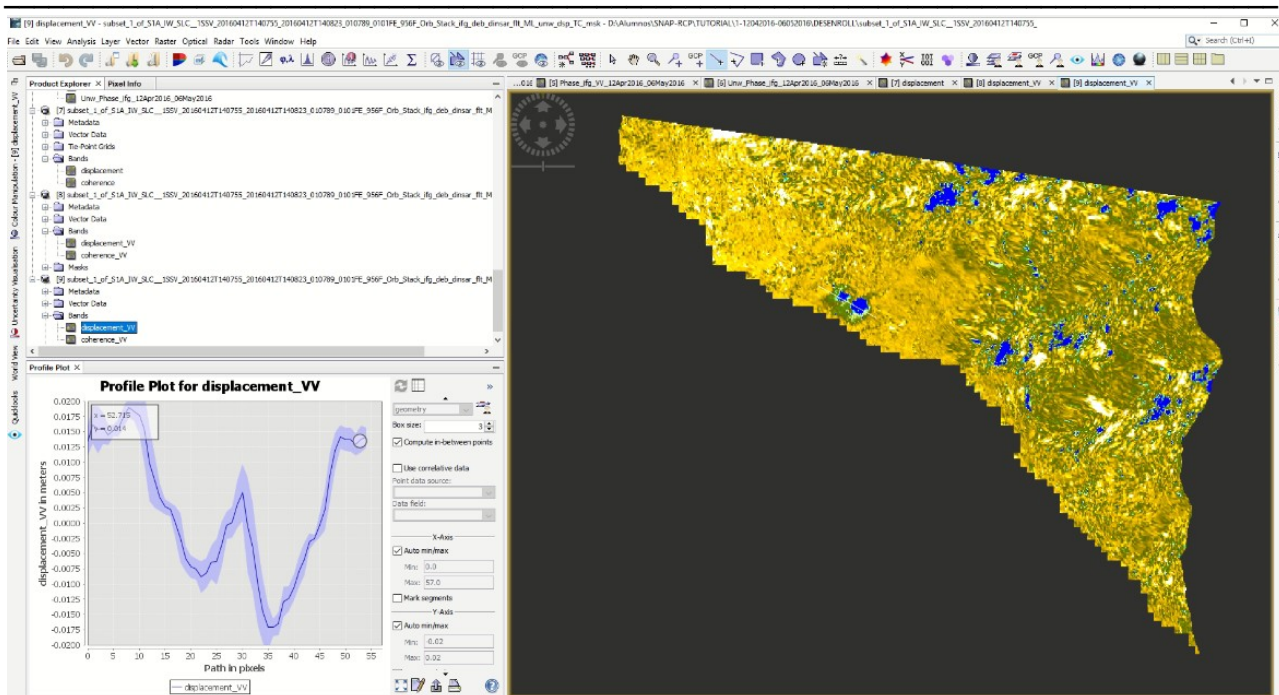


Figura 3.2.11-1: Imagen de los desplazamientos tras el enmascaramiento del mar. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Planificación de los análisis realizados en el Deslizamiento de Mud Creek

Se ha realizado el análisis del deslizamiento de Mud Creek utilizando el procedimiento de análisis de pares interferométricos indicado en el apartado anterior, que está basado en el análisis de esta zona mostrado en el tutorial de la NASA en [1]. Para ello se analizan diferentes pares interferométricos partiendo desde la fecha en la que se produjo el fallo catastrófico, que tuvo lugar el 20/05/2017, y realizando varios análisis hacia atrás en el tiempo durante el año anterior a este evento.

Además de en el subset analizado en el tutorial de la NASA en [1], se ha realizado un análisis más de detalle en una zona que engloba de forma más localizada el deslizamiento, para así obtener los valores de los desplazamientos en esa zona y asociarlos a las velocidades de deslizamiento. El subset de deslizamiento analizado tiene las siguientes coordenadas y puede verse en la imagen siguiente:

- Limitación Norte: 35.87083
- Limitación Oeste: -121.42083
- Limitación Sur: 35.86028
- Limitación Este: -121.42417

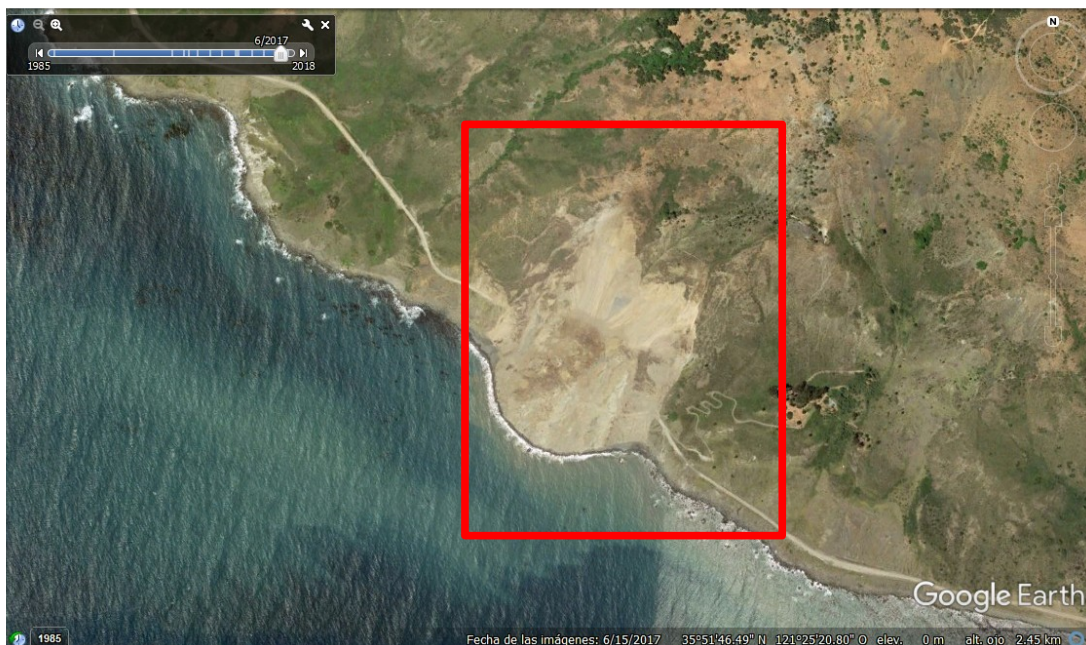


Figura 3.3-1: Subset analizado para obtención de valores de velocidades de deslizamiento

Existe un estudio previo a este trabajo de este deslizamiento, llevado a cabo por Handwerger et al. en [2] mediante la técnica DInSAR. Este estudio contiene una gráfica que muestra la evolución de la velocidad de deslizamiento obtenida en los distintos pares interferométricos analizados por el autor. Asimismo, en esta gráfica se muestran las precipitaciones acumuladas durante los 3 años hidrológicos anteriores al fallo catastrófico de Mud Creek (años 2017, 2016 y 2015), pudiendo observarse una relación directa entre el aumento de precipitaciones y la velocidad de deslizamiento.

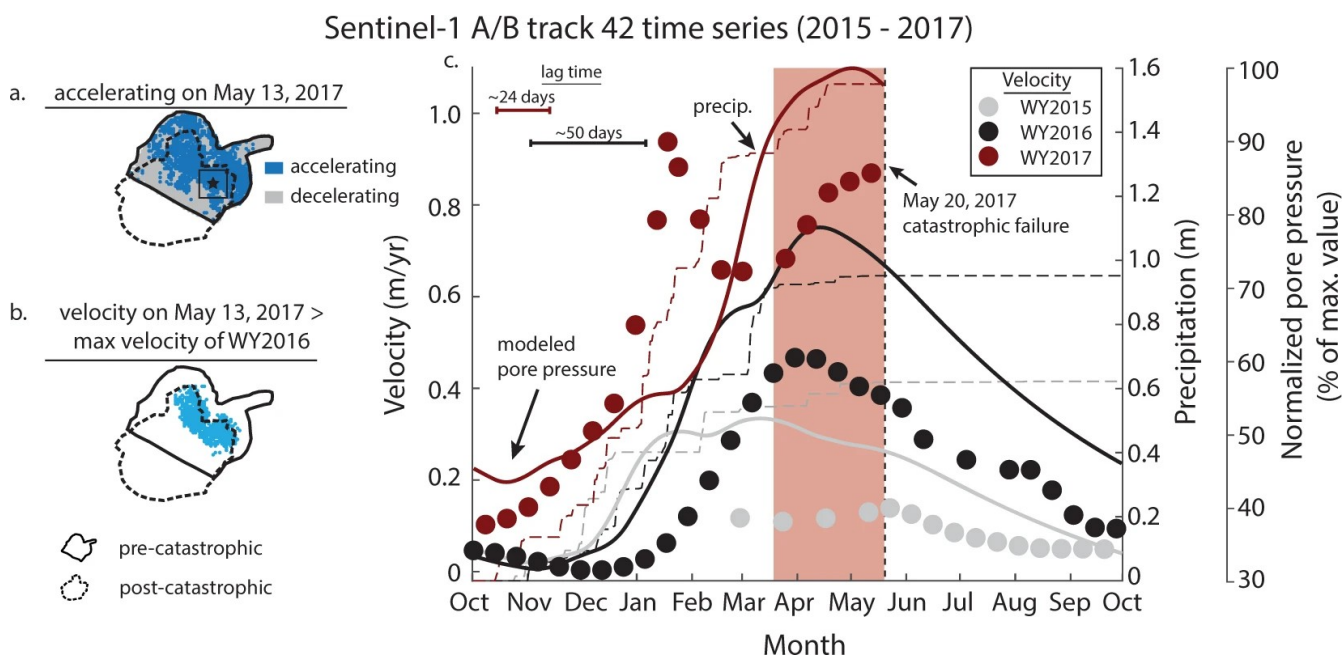


Figura 3.3-2: Representación de velocidades de deslizamiento obtenidas y precipitaciones acumuladas en los años hidrológicos 2015, 2016 y 2017 (hasta el fallo catastrófico). Fuente: Handwerger et al. (2019) <https://www.nature.com/articles/s41598-018-38300-0>

Los resultados de velocidades de deslizamiento que se han obtenido en el presente trabajo se han comparado con los del estudio existente de Handwerger et al. en [2]. Sin embargo, como novedad y a diferencia de este estudio, en este trabajo se ha podido llevar a cabo de forma adicional un análisis profundo acerca de las variaciones de coherencia entre los análisis y de los factores que influyen en estas variaciones, como son el intervalo de tiempo entre tomas, la vegetación de la zona y las precipitaciones. También se detectan en este trabajo relaciones entre la falta de coherencia de una zona y su posible vinculación a un futuro fallo catastrófico. Estos análisis sobre la coherencia incluidos en este trabajo se añaden al objetivo originario perseguido de realizar un aprendizaje de la técnica de análisis de pares interferométricos junto con la mejora del manejo de la herramienta SNAP y la interpretación de los resultados obtenidos.

Todas las imágenes radar empleadas en este trabajo para analizar pares interferométricos se han obtenido a través de la web de la Alaska Satellite Facility (ASF), operada por la NASA.

En primer lugar se ha reproducido el análisis del par interferométrico mostrado en el tutorial de la NASA en [1], que discurre entre las fechas 12/04/2016 y 06/05/2016 con imágenes con path 42 y frame 472, para tener una familiarización con el método, dado que la técnica empleada en este tutorial es la que sirve de base para el cálculo del resto de pares interferométricos.

Posteriormente se ha llevado a cabo el análisis de diferentes pares interferométricos disponibles en la web del ASF, separados un intervalo aproximado de unos 2 meses entre sí. El motivo de elegir estos intervalos de 2 meses, que son sensiblemente mayores a los de 12 días empleados en el estudio de Handwerger et al. en [2], es poder observar si los resultados de desplazamientos y coherencia que se obtuvieran eran suficientemente precisos para permitir hacer aconsejable utilizar estos intervalos mayores para realizar este tipo de estudios (intervalos que al ser mayores ahorran tiempo computacional en el análisis, ya sea para estudiar algo acontecido o para hacer predicciones de deslizamientos futuros), o si por el contrario es aconsejable acudir a los análisis con períodos entre imágenes menores. Los pares interferométricos de 2 meses analizados se muestran en la siguiente tabla resumen:



Fecha Imagen 1	Fecha Imagen 2	Path	Frame	Trayectoria
26/03/2017	13/05/2017	42	474	Descendente
25/01/2017	26/03/2017	42	474	Descendente
14/11/2016	25/01/2017	42	474	Descendente
27/09/2016	14/11/2016	42	474	Descendente

Tabla 3.3-1.: Pares interferométricos en intervalos de 2 meses analizados

Una vez analizados los resultados de estos análisis con intervalos de 2 meses, cuyo detalle se describirá en el siguiente apartado, se observó que en algunos de ellos se obtuvieron valores de coherencia bajos. Esto podría deberse a diversos factores, como puede ser la climatología (ej: precipitaciones en las fechas de las imágenes elegidas), épocas en que la vegetación es de un tamaño que interactúa y modifica la forma en que se recibe la señal entre 2 tomas, variaciones superficiales producidas en el intervalo de tiempo analizado, etc. Por ello, a diferencia del estudio en [2], en este trabajo se determinó la necesidad de llevar a cabo un estudio de los diferentes factores que pueden intervenir en la obtención de unos valores de coherencia bajos en algunos de los análisis.

En primer lugar se ha analizado la dependencia de la coherencia con el tamaño del período analizado. Para ello se han realizado varios análisis en pares de imágenes con los intervalos entre ellas lo más cortos que fuera posible en Sentintel 1 (Esto reduce los intervalos a 12 días, o en algunos casos a 24 días), todo ello con el objetivo de contrastar los valores de coherencia obtenidos con los anteriormente analizados, esperando obtener una mayor coherencia en estos intervalos cortos, ya que al transcurrir menos tiempo se espera que se produzca menor decorrelación temporal. Los análisis cortos que se han llevado a cabo se resumen en la siguiente tabla:

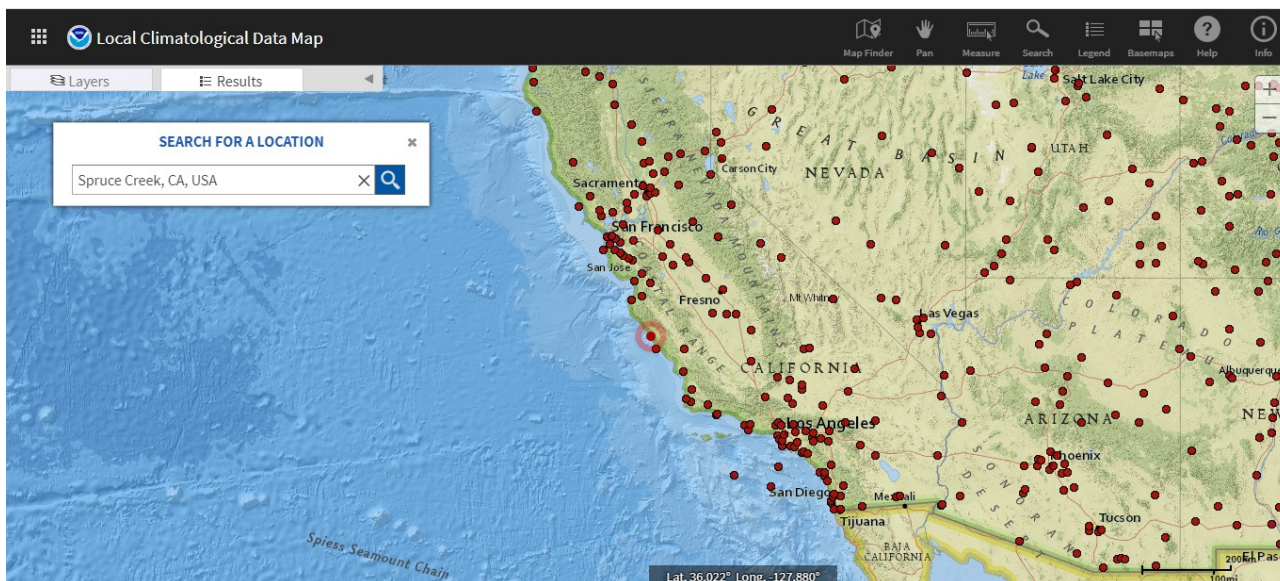
Fecha Imagen 1	Fecha Imagen 2	Path	Frame	Trayectoria
01/05/2017	13/05/2017	42	474	Descendente
19/04/2017	01/05/2017	42	474	Descendente
02/03/2017	26/03/2017	42	474	Descendente
25/01/2017	06/02/2017	42	474	Descendente
08/12/2016	20/12/2016	42	474	Descendente
27/09/2016	09/10/2016	42	474	Descendente
11/06/2016	05/07/2016	42	474	Descendente

Tabla 3.3-2.: Pares interferométricos en intervalos cortos (12 o 24 días) analizados

Tras el análisis de los resultados obtenidos en estos intervalos cortos, lo siguiente que ha sido realizado en este trabajo es analizar otros factores que pudieran influir en la coherencia de los análisis realizados, diferentes del tamaño del intervalo de tiempo transcurrido entre imágenes, tales como la climatología (precipitaciones), la vegetación existente en el terreno, y la modificación del terreno provocada por el deslizamiento que puede causar decorrelación temporal. A continuación se resumen los parámetros que se tuvieron en cuenta en estos análisis:

### 1. Climatología:

Se analizan los datos de precipitaciones en las estaciones meteorológicas del Aeropuerto de Monterey y del Aeropuerto de Paso Robles, ya que estas son las estaciones meteorológicas más próximas a la zona de Mud Creek con disponibilidad de datos en el período analizado. Los datos de estas estaciones meteorológicas están disponibles en la página web del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) del gobierno de los Estados Unidos, a través del buscador con mapa denominado "Local Climatological Data Map". Esta web permite visualizar en un mapa las estaciones climatológicas más próximas a una zona que puede indicarse en el propio mapa, así como obtener los datos climatológicos mensuales de estas estaciones y descargarlos.



**Figura 3.3-3.: Ubicación localizada y Estaciones climatológicas disponibles en la zona obtenidas en el buscador del NOAA**

## 2. Vegetación Existente en el terreno:

Para tener en cuenta este factor se analiza el aspecto que presenta la zona de deslizamiento en imágenes obtenidas de Sentinel 2, en la plataforma de descarga Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea.

La flota de Sentinel 2 está formada por dos satélites que orbitan con un desfase de  $180^\circ$  entre sí para situarlos en extremos opuestos del globo terrestre y disponer de imágenes con una recurrencia temporal mayor. La adquisición de imágenes, o resolución temporal, es de 10 días por satélite o 5 días en conjunto. Por tanto, se puede disponer de una nueva imagen satélite actualizada para la misma zona de trabajo en periodos temporales no superiores a los cinco días.

Las imágenes Sentinel 2 están formadas por 13 bandas que operan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Estas imágenes permiten, por ejemplo, la composición de una imagen en el espectro visible, así como imágenes en las que se destaca la cobertura vegetal.

En primer lugar hay que buscar en Copernicus Open Access Hub las imágenes en la zona que de interés, para un intervalo de fechas conveniente. Posteriormente debe procederse a su descarga, teniendo en cuenta que la disponibilidad de las imágenes es variable, es decir, no están disponibles en cualquier momento, lo que permite un ahorro de capacidad en los servidores de Copernicus Open Access Hub.

Una vez descargadas las imágenes, estas pueden verse en SNAP, arrastrándolas al menú principal. Para mostrar la imagen en el espectro visible bastará con clicar en el producto con el botón derecho del ratón y seleccionar "Open RGB Image Window".

Únicamente se permite realizar composiciones de color en imágenes que tienen la misma resolución. Para conseguir que todas las imágenes de las bandas tengan la misma resolución, por ejemplo de 10 metros, habrá que realizar un “resampling” de ellas. Se trata de un aumento de resolución artificial, ya que las imágenes con resolución inferior seguirán conteniendo la misma información en los píxeles divididos. Para ello en SNAP seleccionamos **Raster > Geometric > Resampling** y obtenemos un producto con las bandas de imágenes a igual resolución. En el apartado “Resampling Parameters” se indica la banda de referencia, a la que se quiere que se igualen las resoluciones (por ejemplo la Banda 2 que tiene una resolución de 10 metros, la mejor posible). El método de resampleo elegido es el bicúbico.

Tras hacer el “resampleado”, aparece un producto sobre el que se puede seleccionar con el botón derecho del ratón “Open RGB Image Window”, apareciendo ahora muchas más opciones que anteriormente al resampling, entre las que se encuentra “Sentinel 2 MSI Vegetation Analysis”, que asigna al rojo la banda 11, al verde la banda 8 y al azul la banda 4, permitiéndonos visualizar la vegetación con un color verde brillante, que nos permitirá evaluar las condiciones en que se encuentra en cada período analizado mediante interferometría diferencial, para así tratar de analizar su influencia en la coherencia de los análisis.

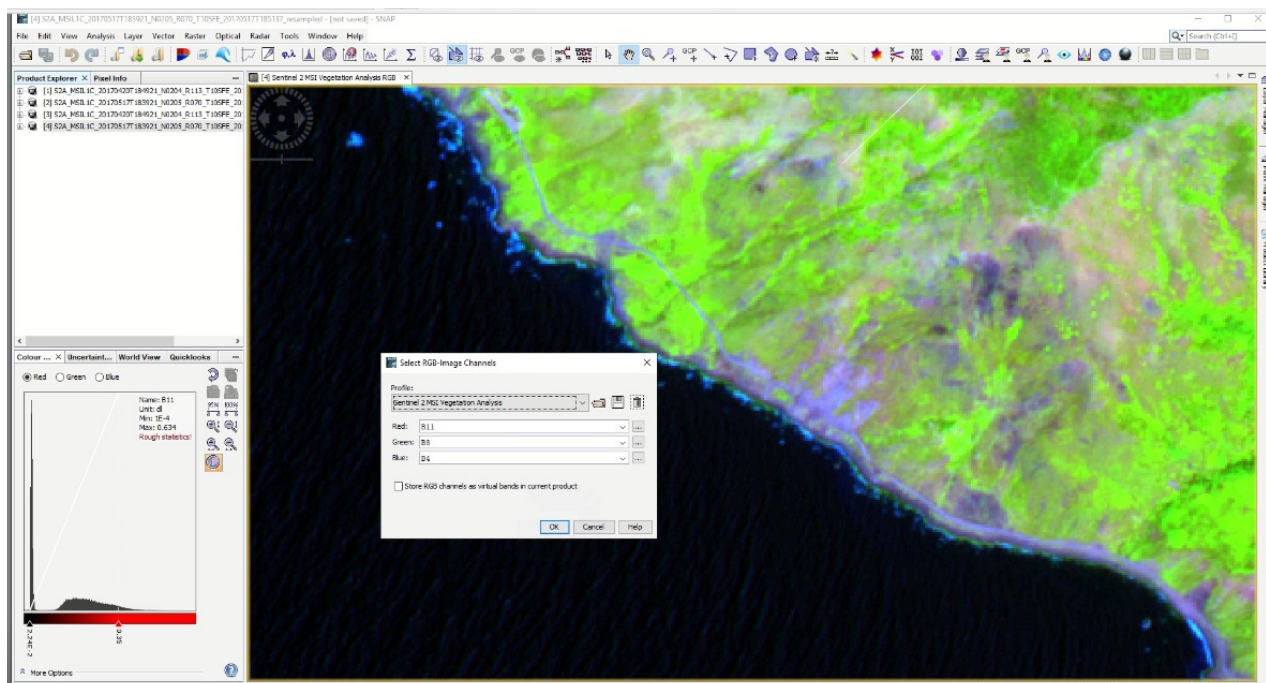


Figura 3.3-4.: Cubierta vegetal obtenida mediante “Sentinel 2 MSI Vegetation Analysis”

Adicionalmente, puede obtenerse información visual del estado de la vegetación en las fechas próximas a cuando se realiza el análisis del tutorial de la NASA en [1] visualizando Street View de Google, ya que muestra la imagen de la zona desde la carretera en fecha mayo de 2016.



Figura 3.3-5.: Vista de Mud Creek. Fuente: Google Street View

### 3. Decorrelación temporal (Modificaciones en la superficie del terreno en la zona del deslizamiento):

Adicionalmente a los análisis anteriores, se han tratado de observar cambios significativos en la superficie que sean apreciables a simple vista en las imágenes de Sentinel 2, realizando una composición en el espectro visible, cuya obtención se realiza en SNAP, tal y como se ha indicado previamente, clicando en el producto con el botón derecho del ratón y seleccionando "Open RGB Image Window".

Esta comprobación sirve también para evaluar si la observación visual de estas imágenes puede resultar una técnica útil para la predicción de deslizamientos.

## 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

### 4.1 Análisis inicial

En primer lugar, se han replicado los análisis realizados en el tutorial de la NASA en [1], con el objetivo de adquirir destreza en el análisis interferométrico. Este análisis tiene fechas de adquisición de las imágenes radar 12/04/2016 – 06/05/2016. Los parámetros de toma de imágenes de este par son: (path:42, frame 472, descendente)

La representación del desplazamiento que se ha obtenido en la en el subset general mostrado en el tutorial, una vez realizadas todas las etapas del procesamiento interferométrico (incluida la corrección del terreno y la máscara que elimina la zona de mar), es la que se muestra en la siguiente imagen, pudiendo comprobarse que se obtienen los mismos resultados :

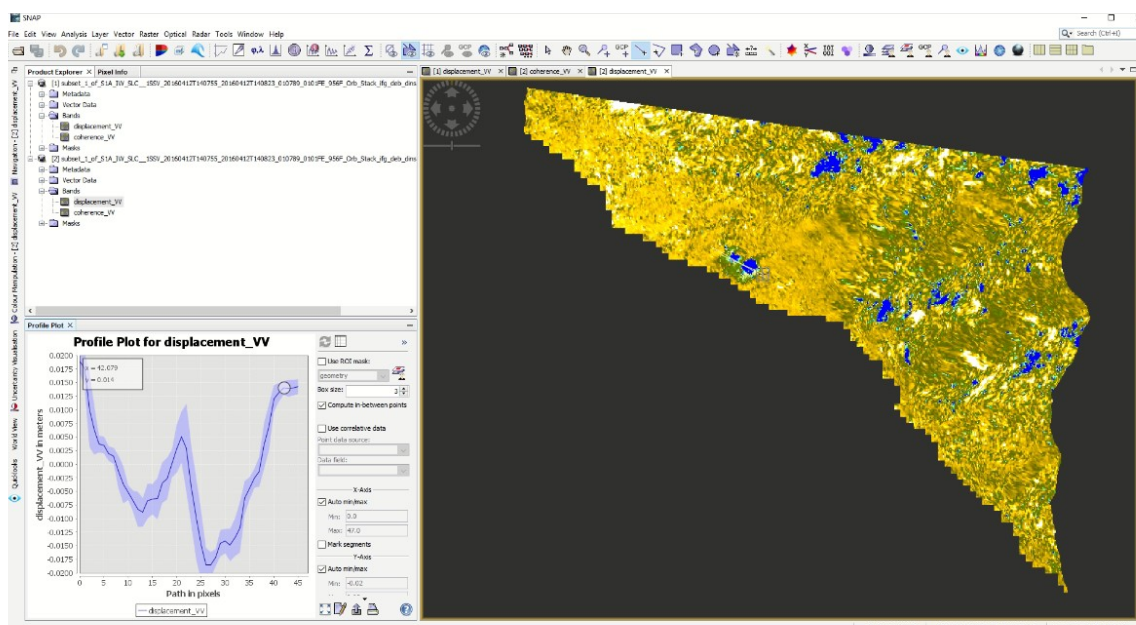
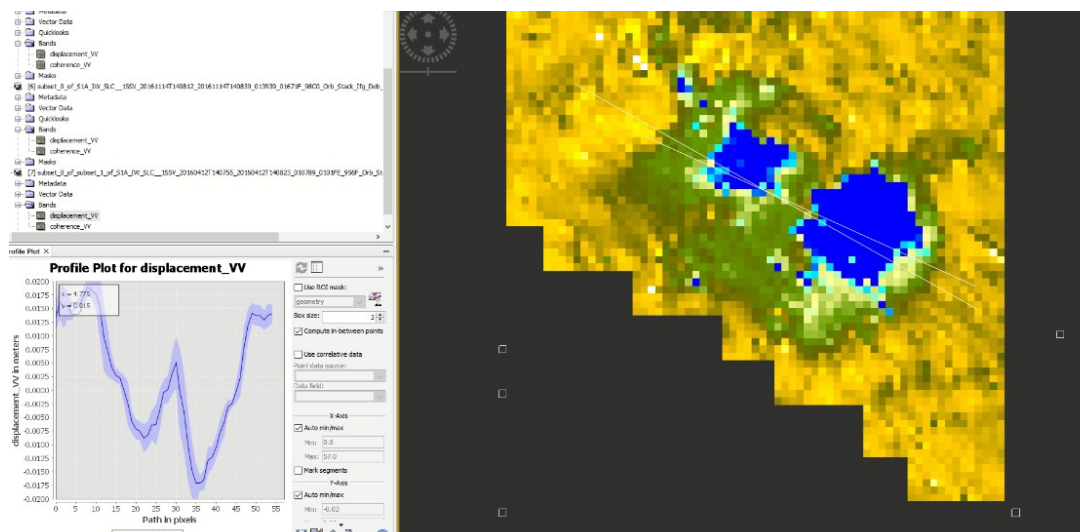


Figura 4.1-1.: Mapa de desplazamientos (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)

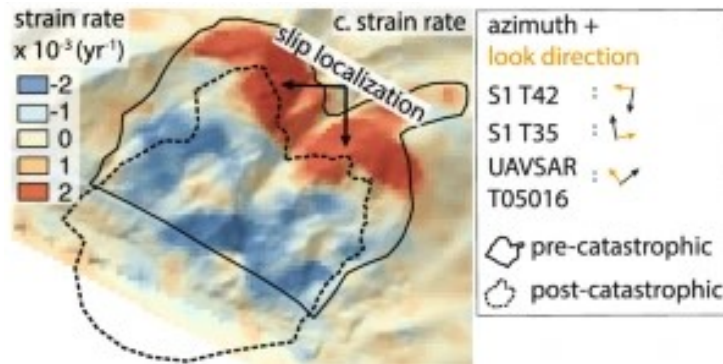
Representando los desplazamientos en un subset más acotado y próximo al deslizamiento que el utilizado por el tutorial (cuyas coordenadas fueron mostradas en el apartado 3) se obtiene la siguiente imagen:



**Figura 4.1-2.: Desplazamientos en Subset que contiene la zona de deslizamiento (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)**

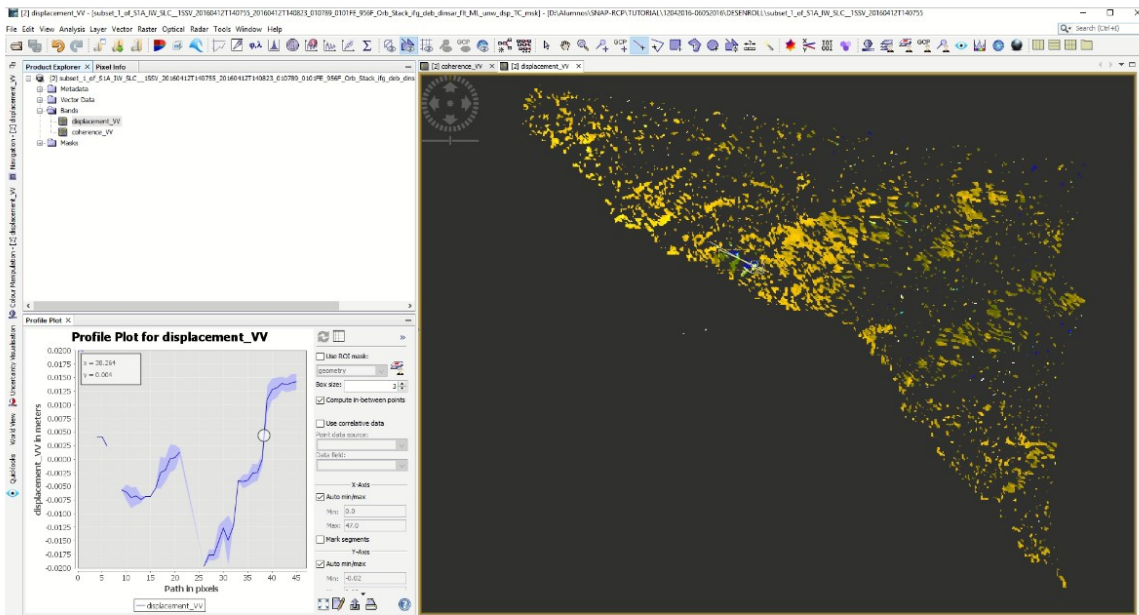
En las imágenes anteriores puede observarse una zona singular, de color azul, en torno a donde se producirá el deslizamiento, lo cuál es indicativo de que ya estaba sucediendo algo en la zona del deslizamiento en esas fechas. Según la gráfica de desplazamientos obtenida, se observa que estos están en torno a  $-0.02$  m en la zona de mayor movimiento (lo que equivaldría a una velocidad de unos  $0.30$  m/año aproximadamente). Estos valores están en la línea de los mostrados en la gráfica del estudio realizado por Handwerger et al. en [2]. Sin embargo hay que puntualizar que los valores obtenidos no pueden ser comparados directamente, ya que las direcciones del desplazamiento son diferentes. En [2] la dirección del desplazamiento es la del deslizamiento (obtenida mediante una composición con valores obtenidos de diferentes trayectorias y captadores de imágenes, incluyendo un UAV-SAR de la NASA) y en nuestro análisis la dirección del desplazamiento es la del rango del satélite (que lleva el track 42). Aunque no sean valores comparables directamente, sí puede realizarse una comparación de su tendencia en las diferentes épocas estudiadas.

En la siguiente imagen, tomada del estudio de Handwerger et al. [2], puede observarse la dirección tomada en nuestro análisis respecto al deslizamiento (Sentinel 1 T42, correspondiente al Track 42). Dentro de esta dirección se han obtenido desplazamientos negativos (irían en sentido hacia el oeste y hacia abajo). Este sentido obtenido de los desplazamientos es consistente con las leyes de la física, ya que la pendiente de la superficie del deslizamiento tiene componentes oeste y sur.



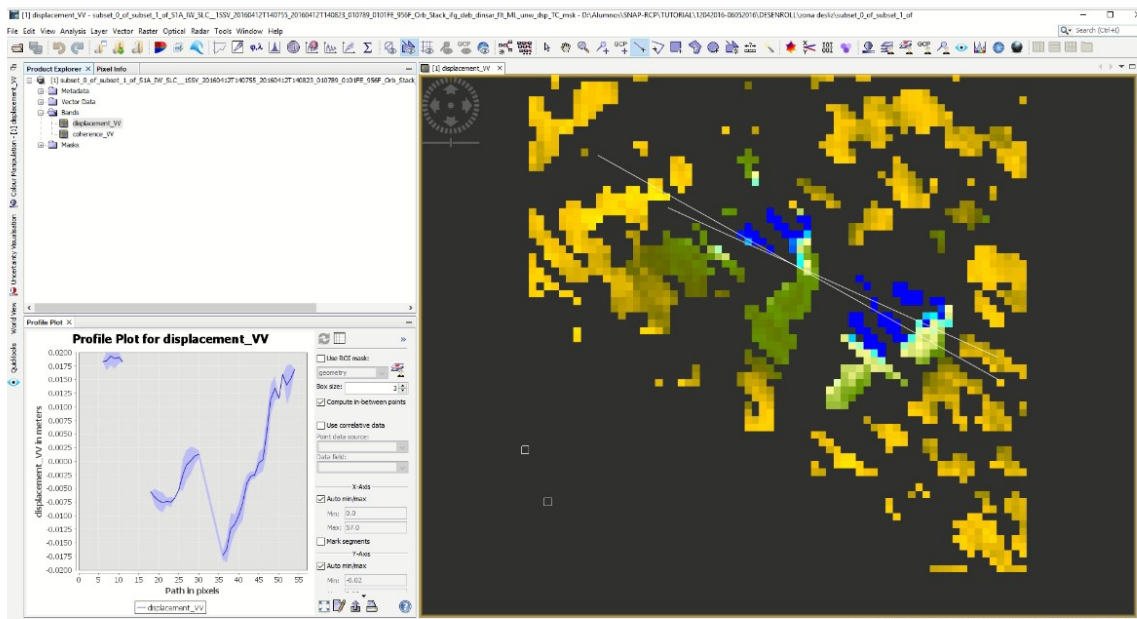
**Figura 4.1-3.: Deformaciones en Mud Creek y direcciones de observación (incluyendo Track 42). Fuente: Handwerger et al. (2019)**

En el mapa de desplazamientos que hemos obtenido en nuestro análisis puede observarse que también aparecen zonas azules en otros lugares distintos a la zona del deslizamiento. Sin embargo, estas zonas azules presentan una baja coherencia. Como muestra de ello, puede verse como desaparecen al aplicar el filtro de coherencia  $>0.5$ , mientras que la zona azul permanece en la zona del deslizamiento.



**Figura 4.1-4.: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia  $> 0.5$  (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)**

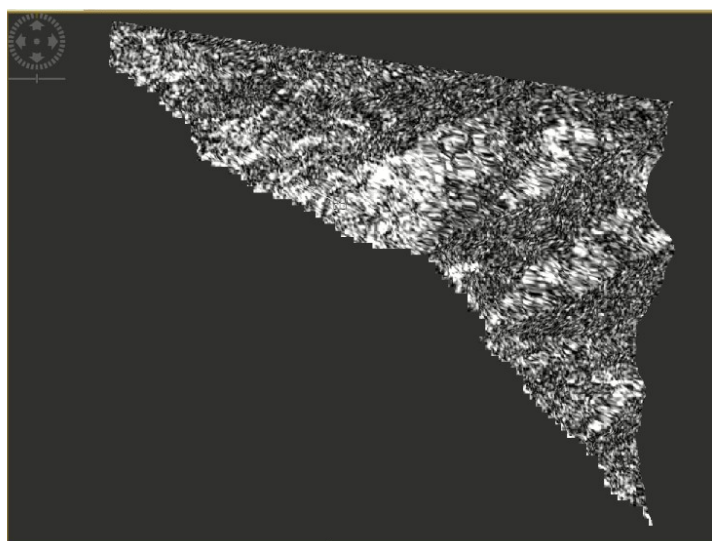




**Figura 4.1-5.: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)**

El hecho de que algunas zonas del área de deslizamiento tengan una coherencia menor que 0.5 y aparezcan oscuras, pudiera deberse, entre otros factores al hecho de que el desplazamiento producido provoque cambios más significativos en la superficie en esta zona y esto genere una zona de baja coherencia, aunque esto sería una hipótesis a contrastar en los siguientes apartados. Lo que sí es evidente es que los resultados muestran una zona singular en el área del deslizamiento (azul, frente al resto de colores del mapa), con una coherencia suficiente para tener en cuenta sus resultados.

El mapa completo que muestra la coherencia de este análisis es el siguiente (mostrándose en blanco las zonas de mayor coherencia).



**Figura 4.1-6: mapa de coherencia (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)**

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona de análisis se resumen en la siguiente tabla y gráfica:

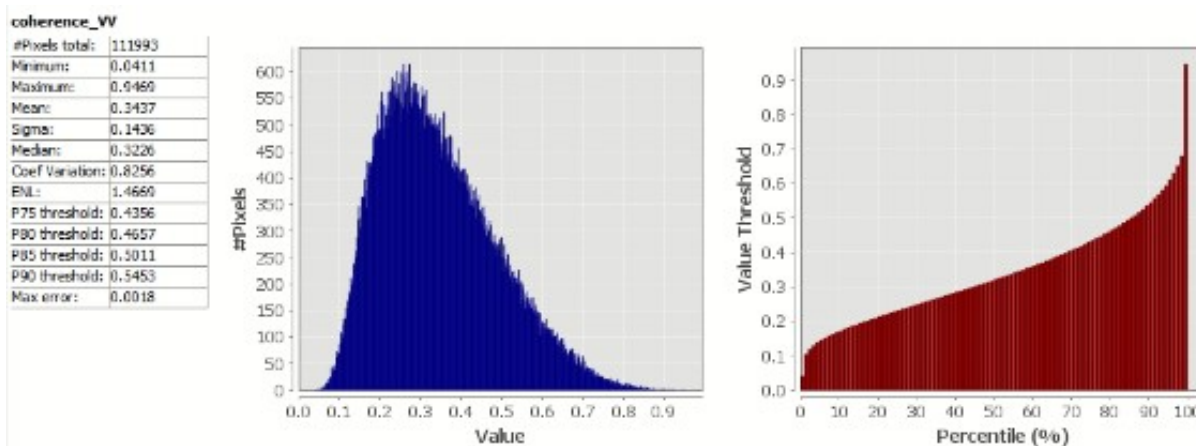


Figura 4.1-7: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 12/04/2016 – 06/05/2016)

## 4.2 Análisis de resultados en pares interferométricos espaciados 2 meses entre sí

Como ya se indicó en el apartado 3, el motivo de elegir intervalos de análisis de 2 meses, que son sensiblemente mayores a los de 12 días empleados en el estudio de Handwerger et al. en [2], ha sido para observar si los resultados de desplazamientos y coherencia que se obtienen son suficientemente precisos, presentan buena coherencia y hacen aconsejable utilizar estos intervalos mayores (que ahorran tiempo computacional en el análisis, ya sea para analizar algo acontecido o para hacer predicciones de deslizamientos futuros), o si por el contrario es aconsejable acudir a los análisis con períodos entre imágenes menores. A continuación se detallan los resultados obtenidos.

### 4.2.1 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 26/03/2017 - 13/05/2017

Este es el par analizado más próximo a la fecha del fallo catastrófico. En este caso pueden apreciarse valores de coherencia bajos prácticamente generalizados, lo que hace que la utilidad del análisis de este par interferométrico sea limitada. Los valores de coherencia se muestran en el mapa de la siguiente imagen:

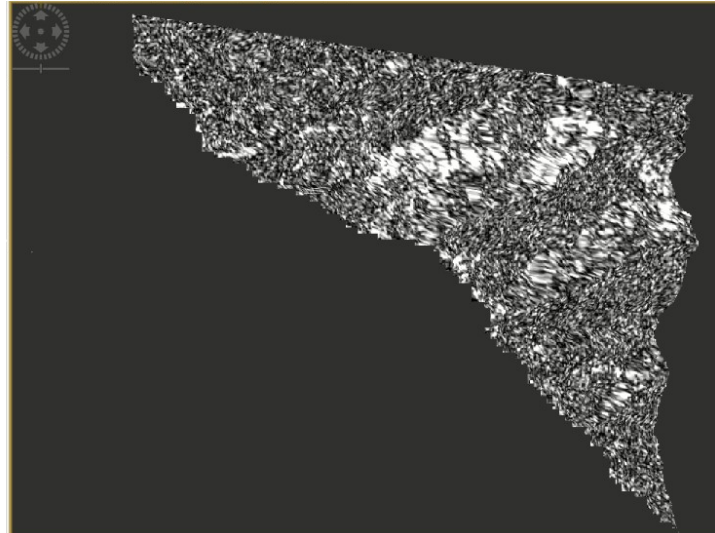


Figura 4.2.1-1: mapa de coherencia (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

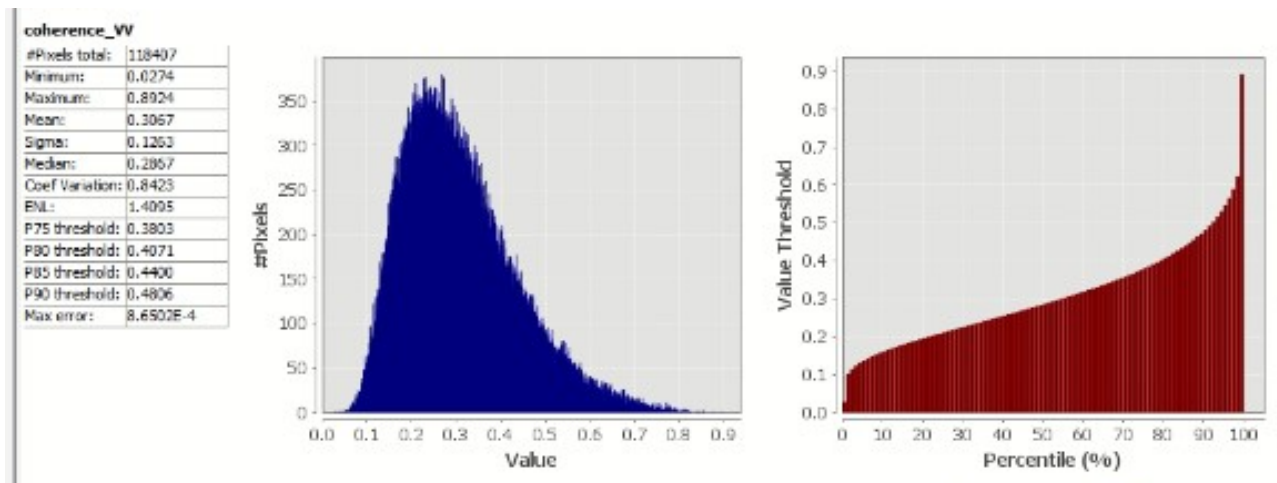
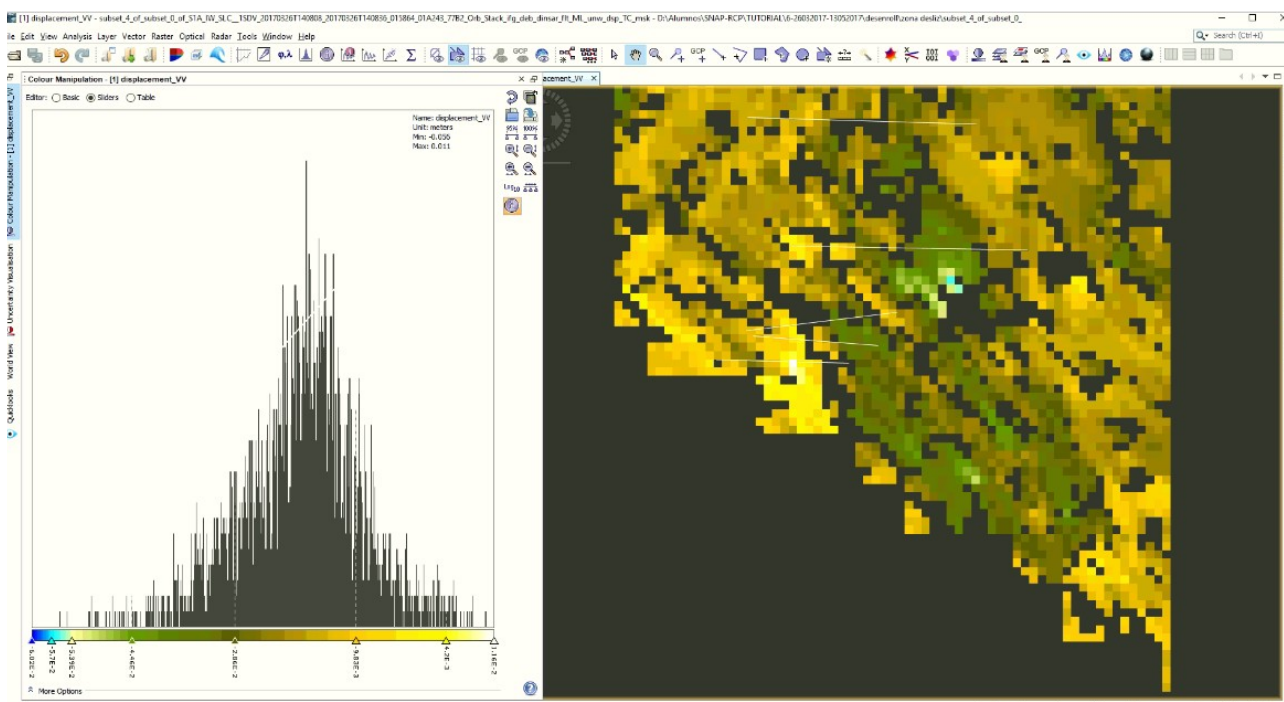


Figura 4.2.1-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 26/03/2017 - 13/05/2017)

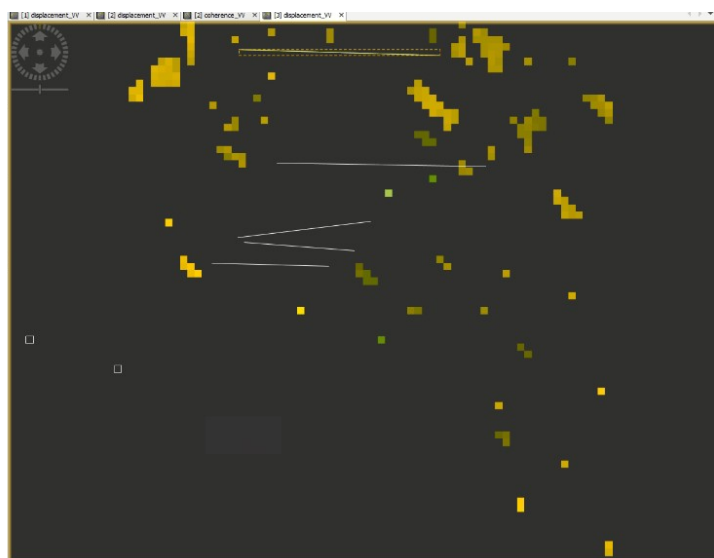
Para analizar los valores de desplazamiento obtenidos en la zona del deslizamiento y compararlos posteriormente con los obtenidos en la gráfica del estudio de Handwerger et al. en [2], se realiza un filtrado con los valores de coherencia  $>0.2$  (al igual que se hace en el estudio mencionado). Realizando esto, el mapa de desplazamientos en el subset de la zona del deslizamiento (para una coherencia  $>0.2$ ) es el siguiente:



**Figura 4.2.1-3: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017)**

Los máximos valores de desplazamiento son negativos (por lo tanto van en dirección hacia el oeste y hacia abajo), se encuentran en los píxeles azules y están en torno a 0.056 m, lo que equivale a una velocidad de deslizamiento de 0.4258 m/año

Para contrastar, haciendo un filtrado por coherencia > 0.5 en esta zona se obtendría lo siguiente:



**Figura 4.2.1-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 26/03/2017 – 13/05/2017)**

Se puede observar como quedan muy pocos píxeles, dando a entender que la coherencia del análisis es muy baja, como se veía anteriormente.

#### 4.2.2 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 25/01/2017 - 26/03/2017

En este caso también pueden apreciarse en el mapa valores de coherencia bajos prácticamente generalizados, lo que hace que la utilidad del análisis de este para interferométrico sea también limitada, al igual que el análisis anterior. Los valores de coherencia se muestran en la siguiente imagen:

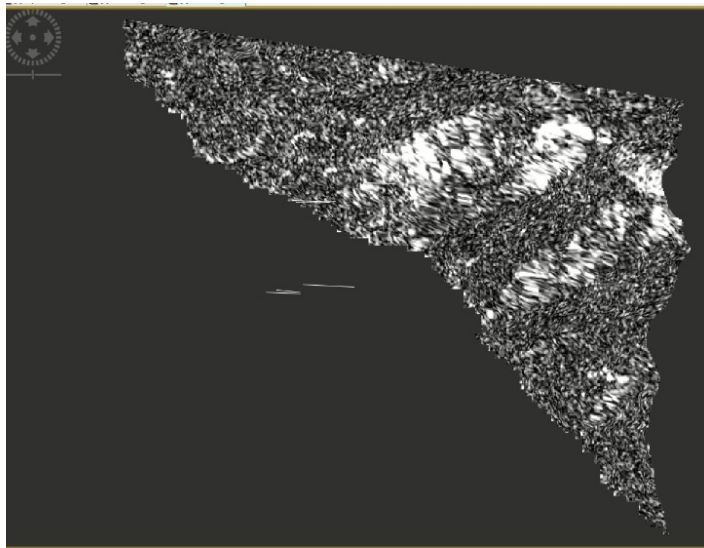


Figura 4.2.2-1: mapa de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

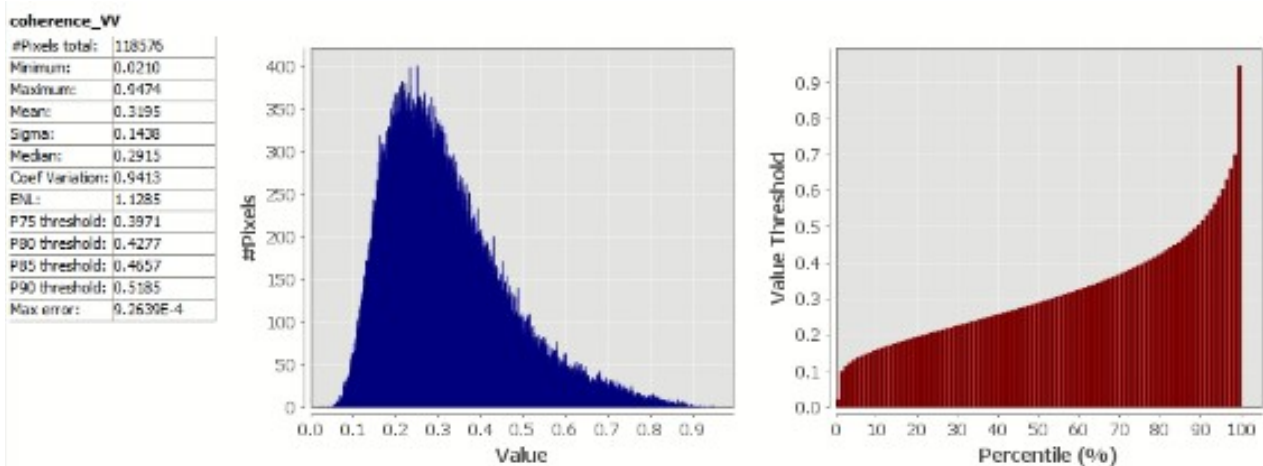
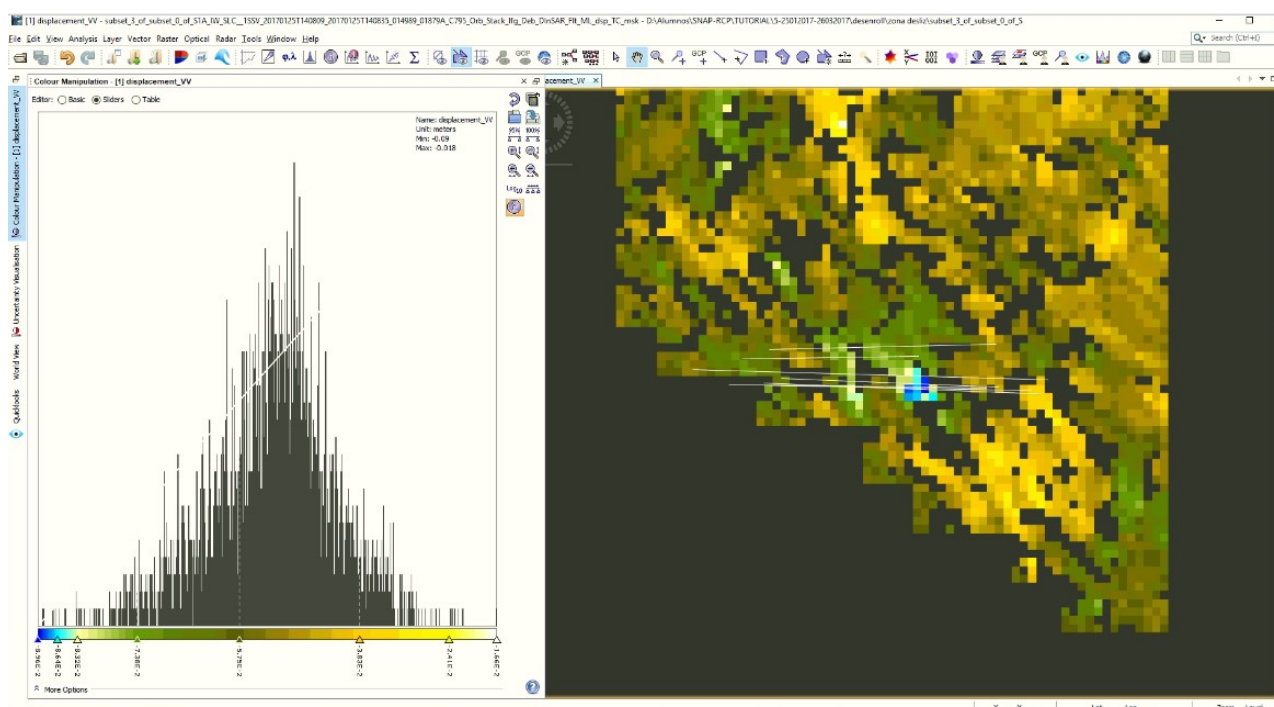


Figura 4.2.2-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 - 26/03/2017)

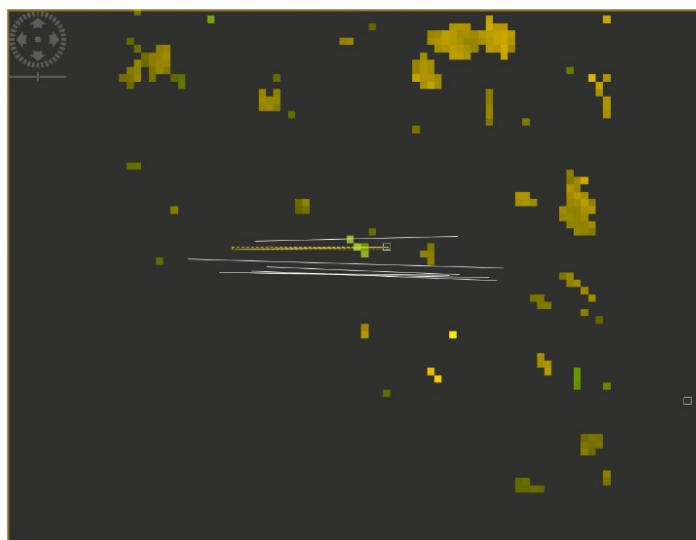
Los desplazamientos en la zona del deslizamiento (para una coherencia > 0.2) se muestran a continuación:



**Figura 4.2.2-3: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia > 0.2) (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017)**

Los máximos valores son negativos (píxeles azules) y están en torno a 0.090 m, lo que equivaldría a una velocidad de deslizamiento de 0.5475 m/año.

Haciendo un filtrado por coherencia > 0.5 en esta zona se obtiene lo siguiente:

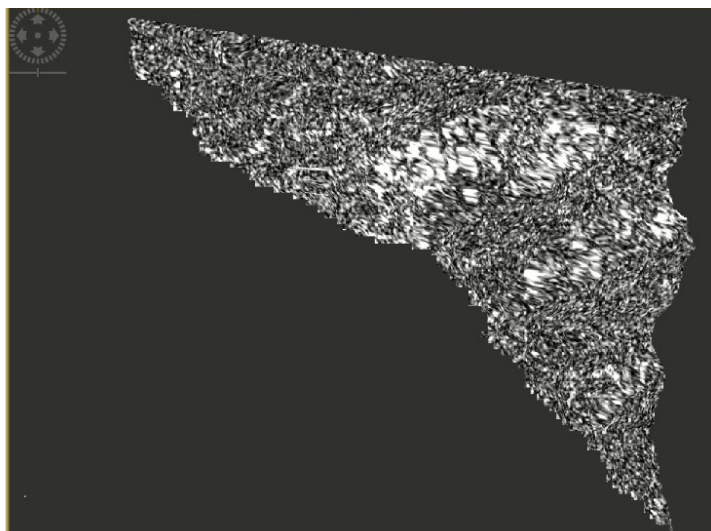


**Figura 4.2.2-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.5 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 25/01/2017 – 26/03/2017)**

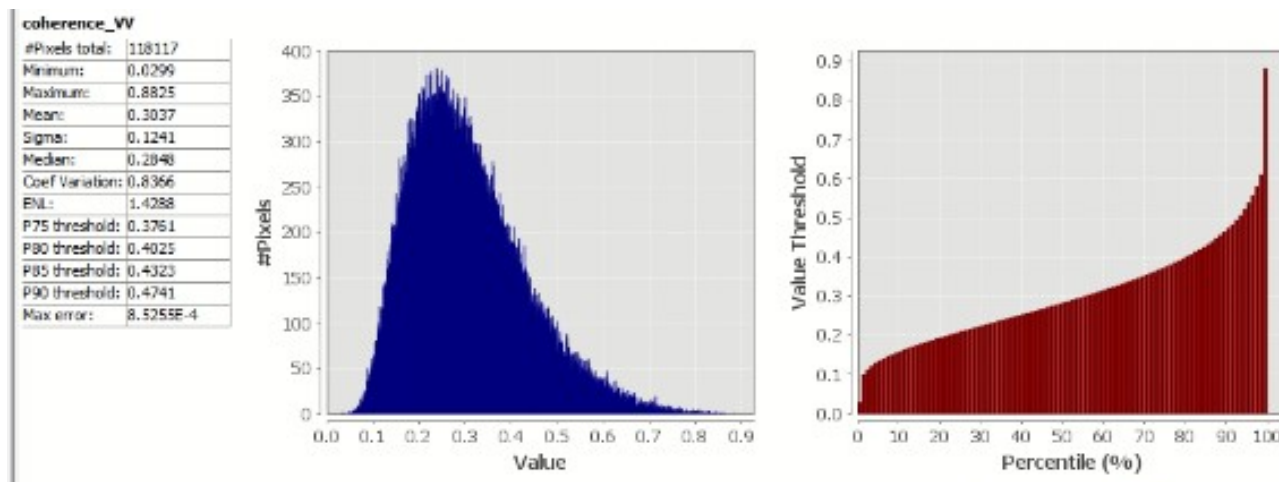
Muchos píxeles han desaparecido. Esto demuestra que hay una baja coherencia y señala la necesidad de contrastar con un análisis con menor tiempo entre tomas, que se hará en el siguiente apartado.

### 4.2.3 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 14/11/2016 – 25/01/2017

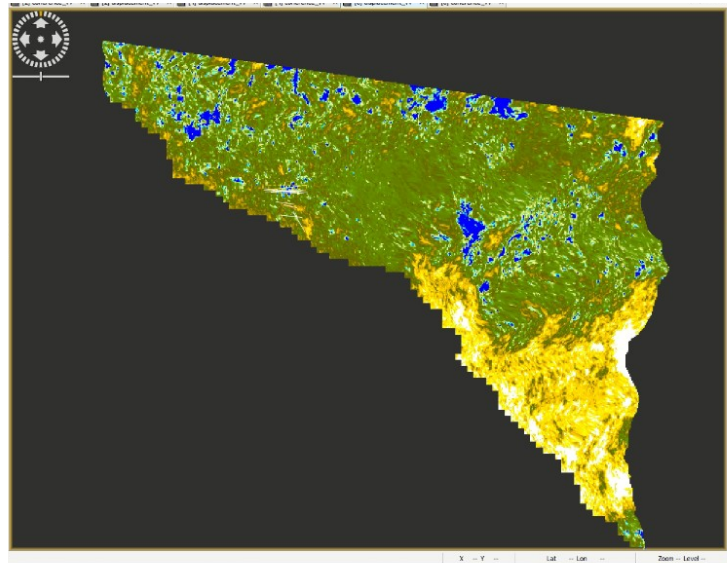
La coherencia de este análisis es también baja, como puede observarse en la siguiente imagen:



Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

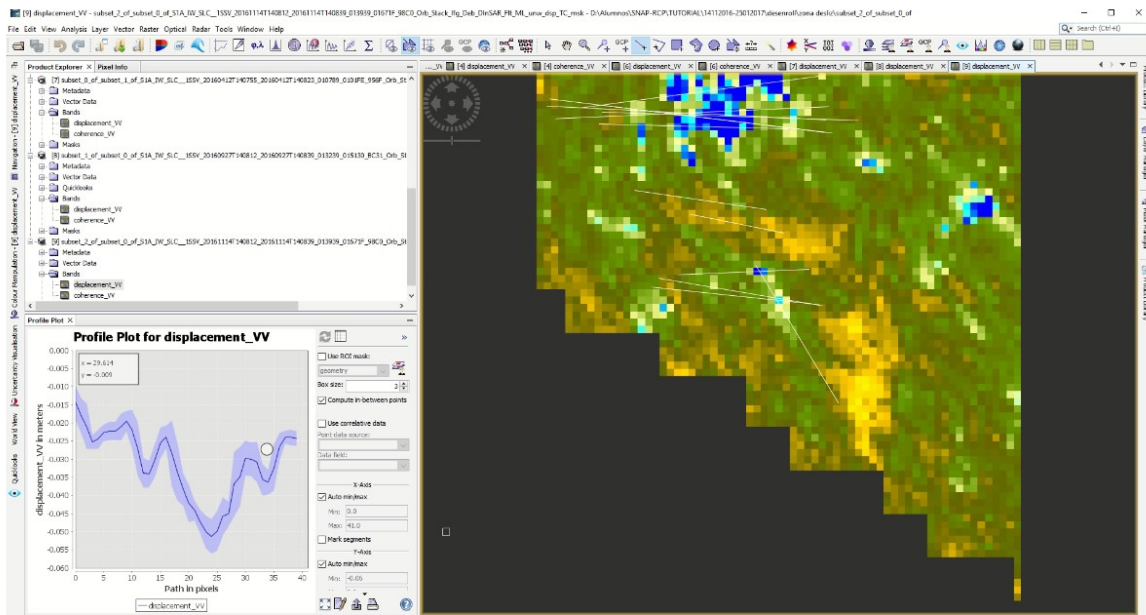


La imagen del desplazamiento obtenido, una vez realizadas todas las etapas del procesamiento interferométrico (incluida la corrección del terreno y la máscara que elimina la zona de mar) es la que se muestra en la siguiente imagen:



**Figura 4.2.3-3: Mapa de desplazamientos en Subset General (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017)**

En la zona del deslizamiento, presenta este aspecto:



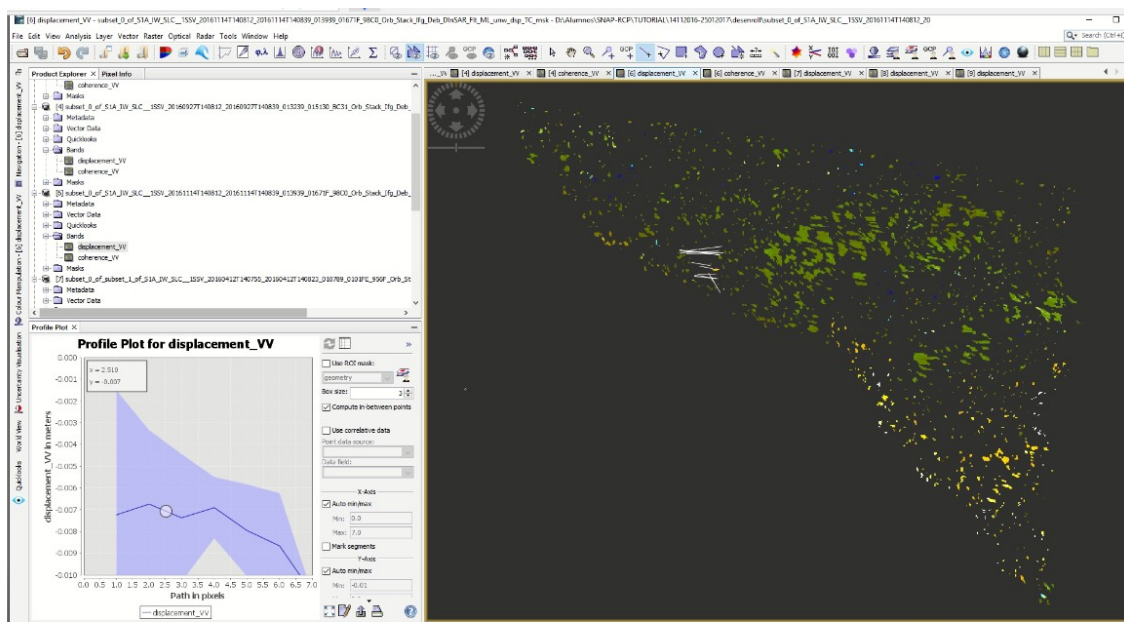
**Figura 4.2.3-4: Mapa de desplazamientos en Subset del deslizamiento (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017)**

Se observan desplazamientos singulares sobre todo en la zona noroeste del deslizamiento. Esto coincide con el estudio realizado por Handwerger et al. en [2] en el



sentido de que la zona norte parece ser la más afectada por los desplazamientos y por las deformaciones del terreno.

En cuanto al resto de zonas que aparecen destacadas (con desplazamientos azules) en el mapa, tras realizar el filtrado de coherencia (coherencia  $>0.5$ ) vemos como la mayoría desaparecen, aunque en este caso también podemos comprobar que desaparece en la zona de estudio del deslizamiento.



**Figura 4.2.3-5: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia $>0.5$ ) (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017)**

En definitiva, hay una baja coherencia, afectando también a la zona de estudio. Nuevamente, la realización de análisis con períodos más cortos que se hará más adelante parece aconsejable para intentar obtener una mayor fiabilidad de los resultados, independientemente de la influencia que también puedan tener los factores climatológicos o la vegetación presente en la zona en esta época del año.

Los valores que se obtienen de los desplazamientos en la zona afectada por el deslizamiento (para una coherencia $>0.2$ ) son como máximo de unos  $-0.059$  m (como puede apreciarse en la siguiente imagen). Esto equivaldría a una velocidad media máxima del deslizamiento en ese período de unos  $0.2991$  m/año (siendo del mismo orden de la del estudio de Handwerger et al. en [2], siempre teniendo en cuenta que aquí se representa en otra dirección, como ya fue indicado anteriormente)

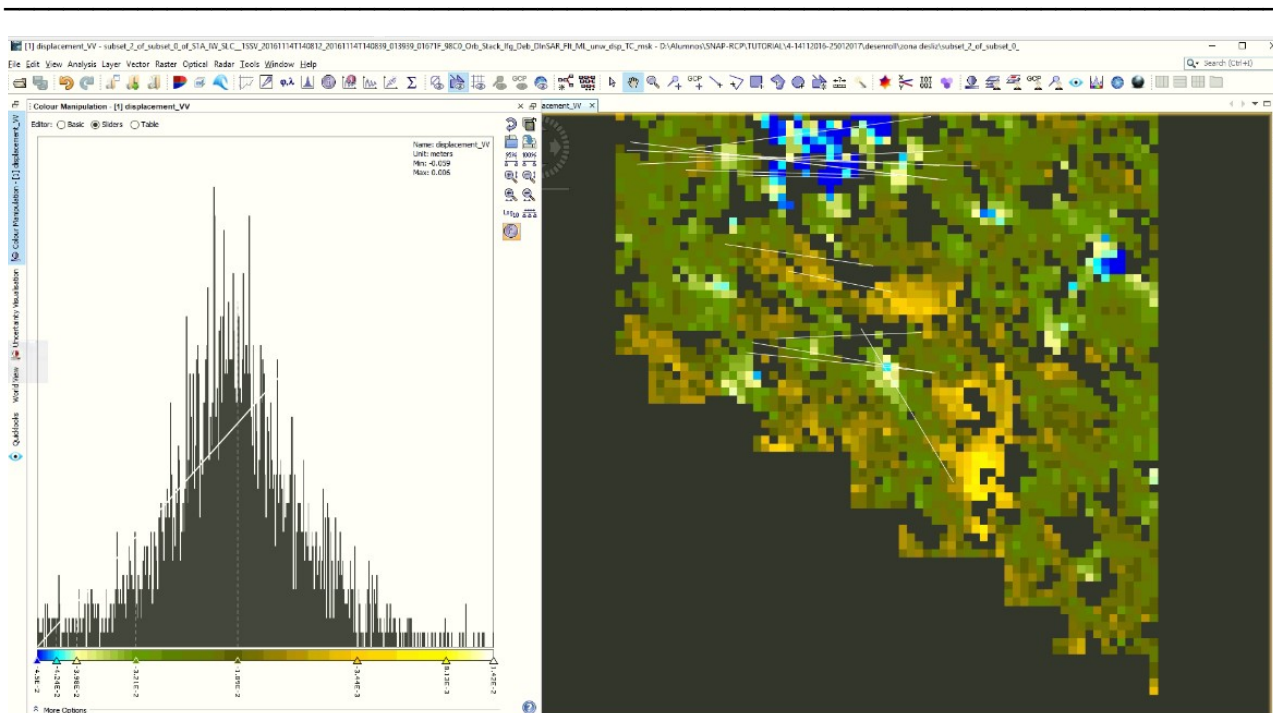


Figura: 4.2.3-6: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 14/11/2016 – 25/01/2017)

#### 4.2.4 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 27/09/2016 – 14/11/2016

La imagen del desplazamiento obtenido, una vez realizadas todas las etapas del procesamiento interferométrico (incluida la corrección del terreno y la máscara que elimina la zona de mar) es la que se muestra en la siguiente imagen:

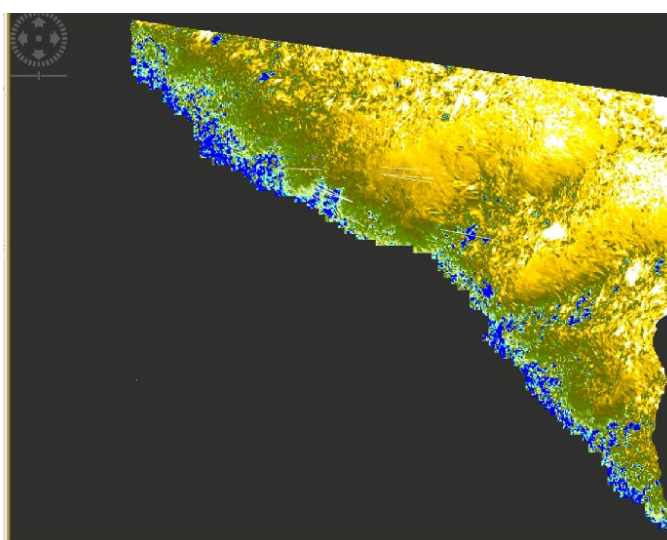
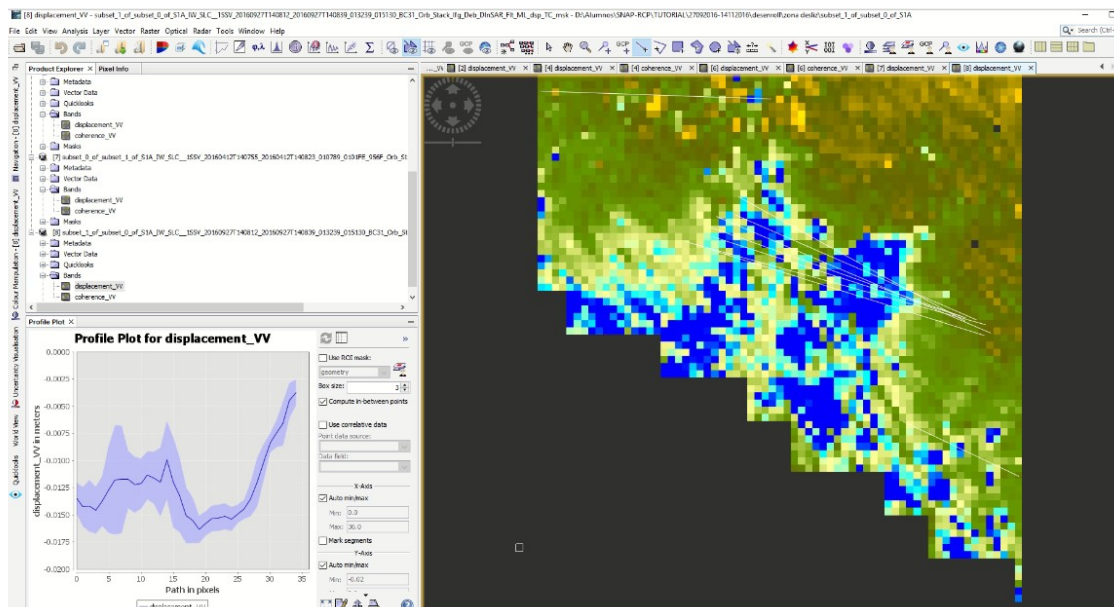


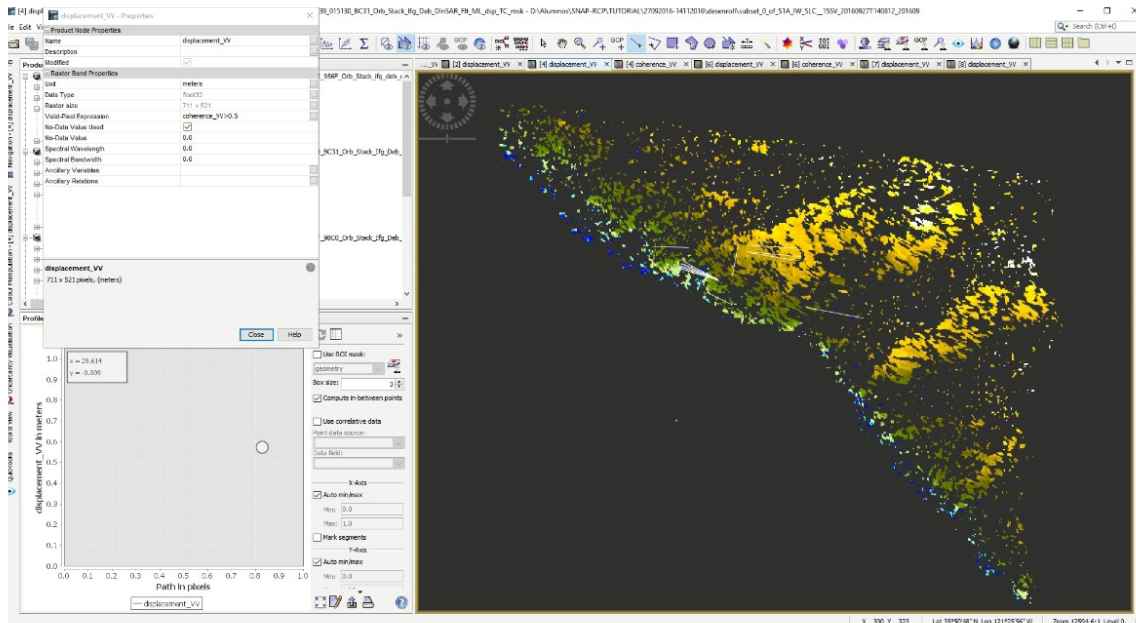
Figura 4.2.4-1: Mapa de desplazamientos en Subset General (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)

Representando los valores en la zona del deslizamiento tenemos la siguiente imagen de los mismos:



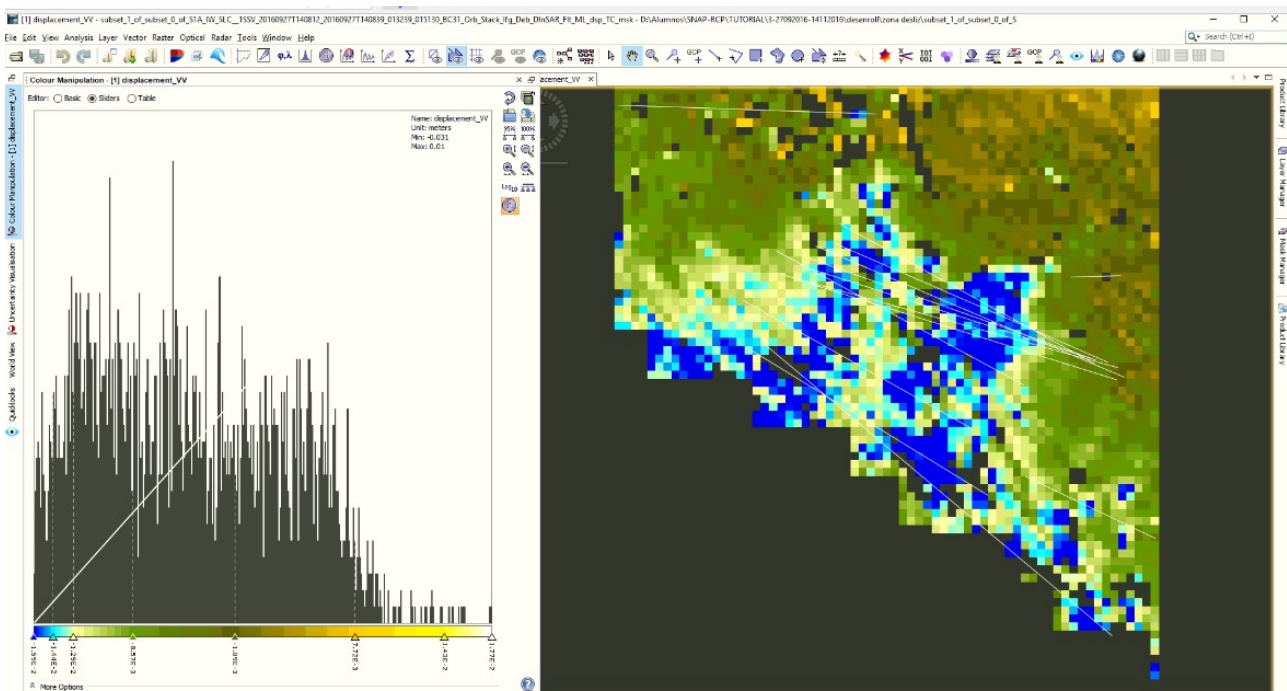
**Figura 4.2.4-2: Mapa de desplazamientos en Subset del deslizamiento (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)**

En este caso se observa que en la zona del deslizamiento aparece, al igual que en el tutorial, una zona singular azul de desplazamientos negativos mayores que las de su alrededor, aunque también pueden observarse este tipo de zonas en otras partes del mapa, especialmente cerca de la costa. Realizando un filtrado con un valor de coherencia de 0.5 obtenemos la imagen siguiente, en la que se muestra como la mayoría de las zonas azules de fuera del deslizamiento se han eliminado con el filtro, aunque en este caso también afecta a nuestra zona de análisis del deslizamiento en cierta medida, permaneciendo no obstante algunas zonas del mismo. Esto puede indicar que la coherencia se ha visto afectada al realizarse un análisis más espaciado entre tomas (con algo más de mes y medio de separación entre ambas imágenes). No obstante, el resultado presenta una coherencia suficiente, que nos permite realizar valoraciones cualitativas del mismo, como la observación clara de una singularidad en la zona del deslizamiento.



**Figura 4.2.4-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia>0.5) (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)**

En cuanto a los valores de desplazamientos máximos obtenidos, son negativos y están en torno a  $-0.031$  m, lo que supone unos  $0.2357$  m/año (estando estos valores en la línea de los mostrados en la gráfica del estudio de Handwerger et al. [2], aunque un poco más elevados.). En la siguiente figura se muestran los desplazamientos en la zona del deslizamiento, filtrados para una coherencia  $> 0.2$ .



**Figura: 4.2.4-4: Mapa de desplazamientos en el subset del deslizamiento (coherencia>0.2) (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)**

El mapa completo que muestra la coherencia de este análisis es el siguiente (mostrándose en blanco las zonas de mayor coherencia)

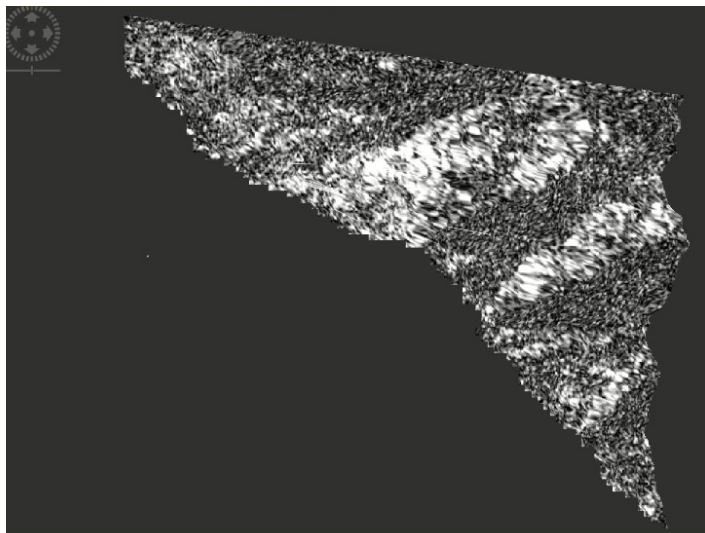


Figura 4.2.4-5: mapa de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

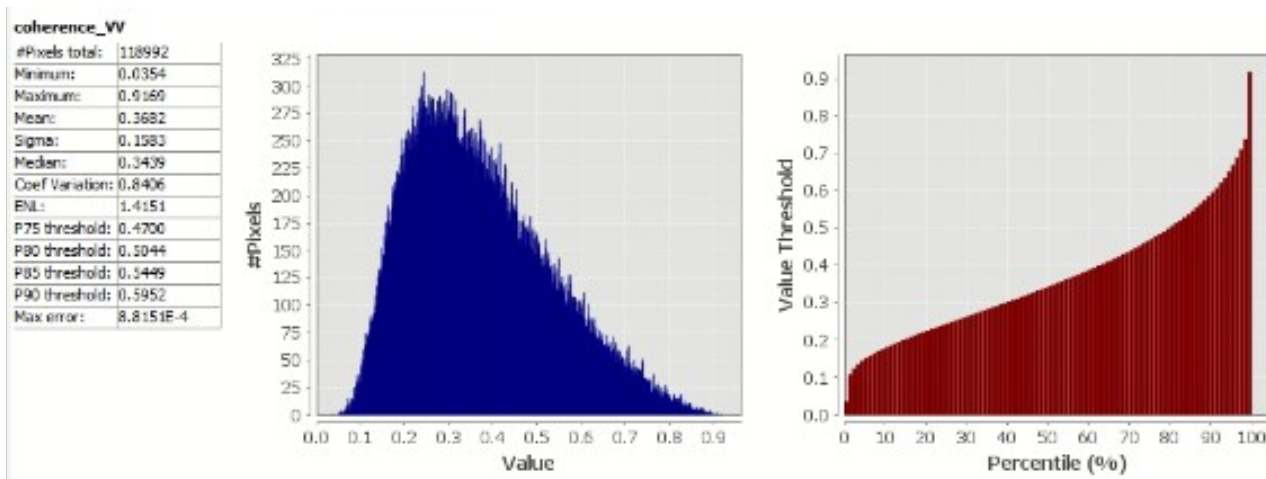


Figura 4.2.4-6: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 14/11/2016)

A pesar de haberse obtenido con tomas más espaciadas, en este caso los resultados de coherencia están en la misma línea del estudio del tutorial. Como se puede comprobar, los valores de coherencia son mayores que en el resto de estudios realizados con intervalos de tomas en torno a 2 meses. Puede pensarse que, al tener intervalos de tiempo similares, estas diferencias de coherencia podrían deberse a factores como la precipitación que hubiera habido en los momentos de toma de imágenes, o la acumulada

entre tomas. Puede verse en el gráfico del estudio en [2] de precipitaciones (figura 3.3-2) que el intervalo entre septiembre y noviembre de 2016 tuvo menos precipitaciones acumuladas que el resto de los intervalos analizados. Un análisis más detallado de las precipitaciones que afectan cada análisis será realizado en un apartado posterior, así como de otros factores que pudieran influir en las variaciones de la coherencia.

### 4.3 Análisis de resultados en pares interferométricos con intervalos cortos

#### 4.3.1 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 01/05/2017 – 13/05/2017

En este caso, aunque los valores de coherencia son en general mejores que los obtenidos en el estudio de intervalo de 2 meses equivalente (que utilizaba las imágenes entre 26/03/2017 – 13/05/2017), sin embargo puede verse que en la zona concreta del deslizamiento estos valores han permanecido bajos, apareciendo más oscura que la zona de alrededor.



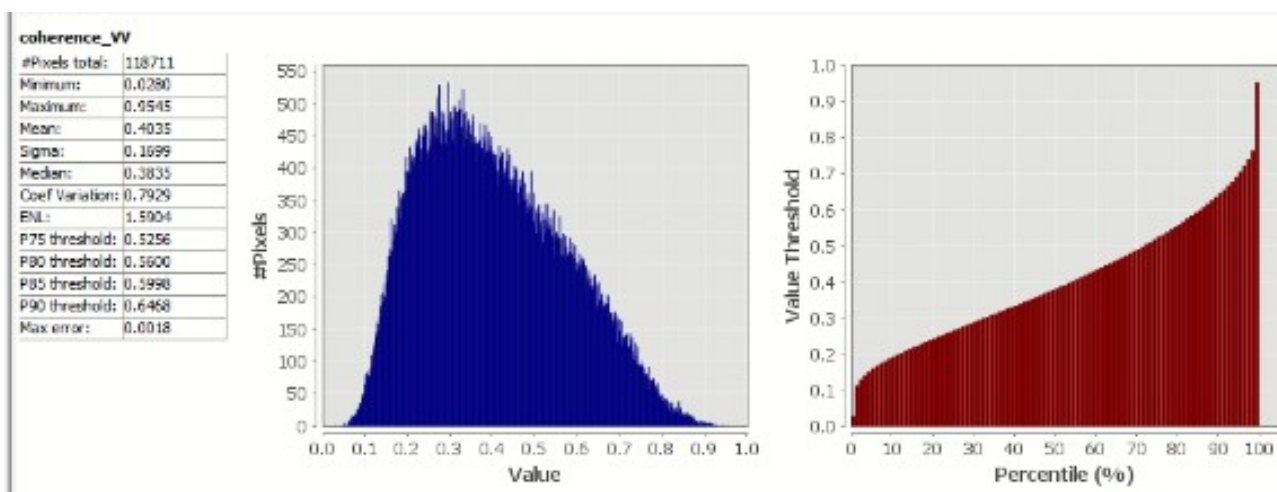
Figura 4.3.1-1: mapa de coherencia (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017)

Este efecto de baja coherencia localizada en la zona del deslizamiento puede ser señal de que en ese período se estaban produciendo mayores cambios en la superficie de esa zona que en la zona de alrededor, existiendo una decorrelación temporal localizada que estaba provocando mayor incoherencia en el estudio interferométrico. Hay que tener en cuenta que esa época estaba muy próxima al fallo catastrófico y es la de mayores velocidades de deslizamiento (según los resultados de este trabajo y los del estudio de Handwerger et al. en [2]). Este efecto de pérdida de coherencia localizada en la zona del deslizamiento también puede apreciarse en otros análisis realizados (ver apartados

siguientes), aunque es más evidente en este análisis, probablemente por ser el más próximo a la fecha del fallo catastrófico. Como estudio complementario, más adelante se analizará si los cambios superficiales que se llevaron a cabo en esa época son directamente observables visualmente haciendo uso de las imágenes de Sentinel 2.

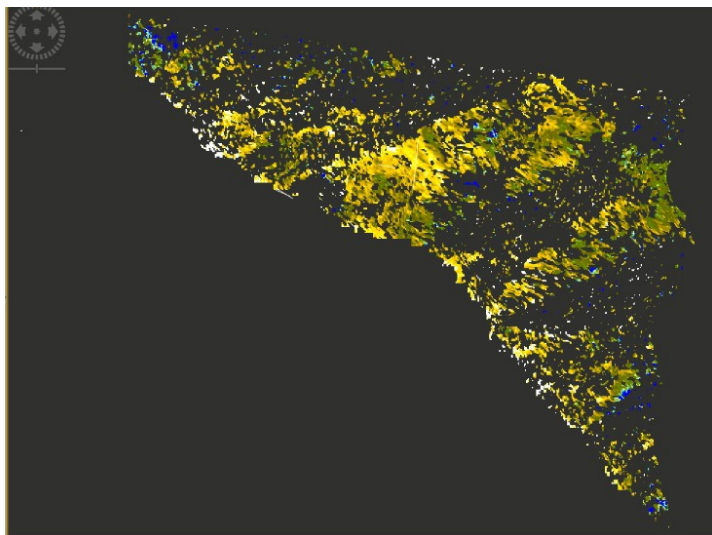
Al hilo de este hallazgo, es de indicar que el uso de técnicas basadas en el análisis de las variaciones de la coherencia de radar se vienen explorando de un tiempo a esta parte con el propósito de monitorizar y mapear deslizamientos de tierra y daños a la infraestructura (Burrows et al., 2019; Yun et al., 2015; Jacquemart et al., 2020).

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:



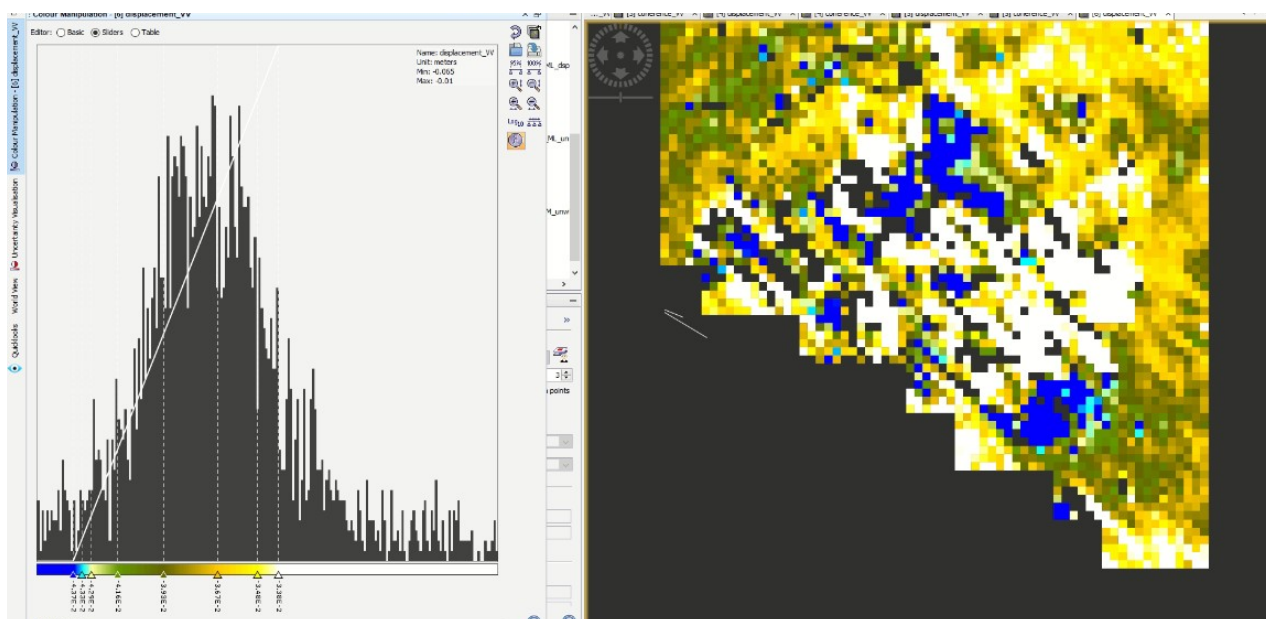
**Figura 4.3.1-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017)**

Si se realiza un filtro en los desplazamientos con coherencia  $> 0.5$ , se ve como la zona del deslizamiento prácticamente desaparece, mientras que la zona justamente de alrededor no se ve tan afectada por el filtrado:



**Figura 4.3.1-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia > 0.5) (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017)**

Como ya se indicó anteriormente, para analizar los valores de desplazamiento obtenidos en la zona del deslizamiento y compararlos posteriormente con los obtenidos en la gráfica del estudio de Handwerger et al. en [2], se realiza un filtrado con los valores de coherencia  $> 0.2$  (al igual que se hace en el estudio mencionado). El mayor desplazamiento es negativo y su valor es  $-0.065$  m, lo que equivaldría a una velocidad de deslizamiento de  $1.97$  m/año, confirmándose que es muy elevada, significativamente mayor que la obtenida en el estudio de Handwerger et al. en [2].



**Figura 4.3.1-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia  $> 0.2$  (subset del deslizamiento) (par interferométrico 01/05/2017 – 13/05/2017)**



### 4.3.2 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 19/04/2017 – 01/05/2017

El análisis del par interferométrico entre los días 19/04/2017 y 01/05/2017, mostró resultados algo más incoherentes que el análisis anterior, como puede verse en la siguiente imagen:



Figura 4.3.2-1: Mapa de coherencia (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017)

Se sigue apreciando el efecto de bajada de coherencia localizada en la zona del deslizamiento, aunque menos distinguible que en el análisis del apartado anterior, por ser un período menos próximo al fallo catastrófico y por presentar una baja coherencia generalizada que impide el contraste claro con la zona del deslizamiento.

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

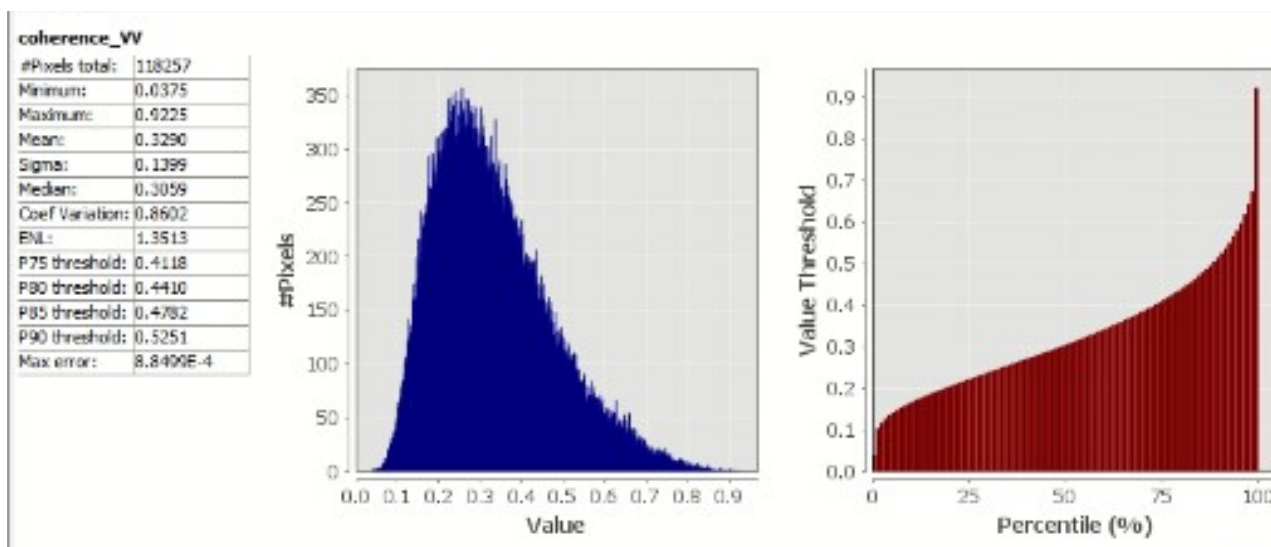


Figura 4.3.2-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017)

Los valores de desplazamiento con coherencia  $>0.2$  pueden verse en la siguiente imagen, alcanzándose en este caso un desplazamiento negativo máximo de 0.015 m, equivaliendo a una velocidad de deslizamiento de 0.46 m/año.

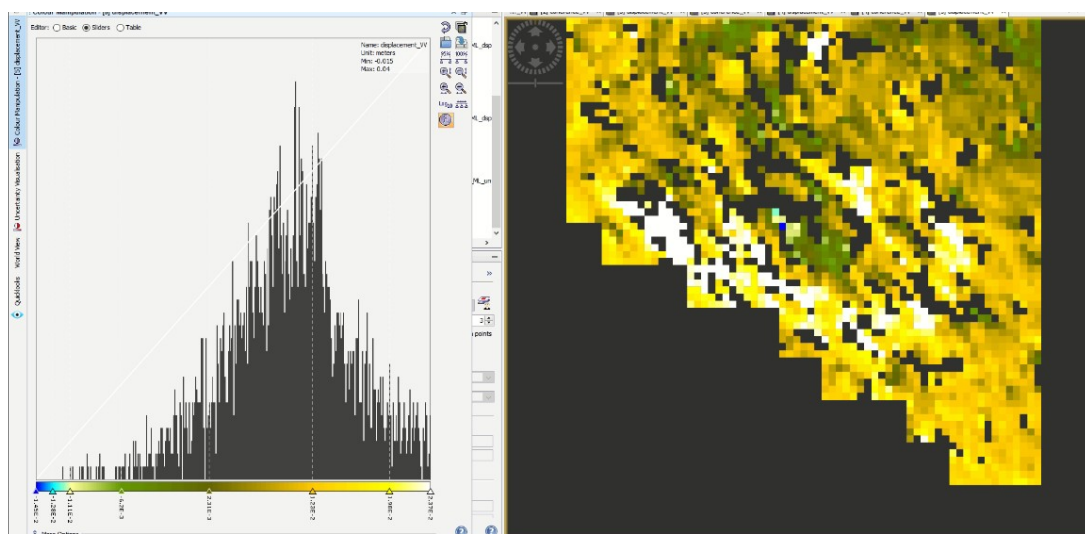


Figura 4.3.2-3: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia  $> 0.2$  (subset del deslizamiento) (par interferométrico 19/04/2017 – 01/05/2017)

### 4.3.3 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 02/03/2017 – 26/03/2017

Los niveles de coherencia están en la línea del análisis anterior, como puede apreciarse en la siguiente imagen:

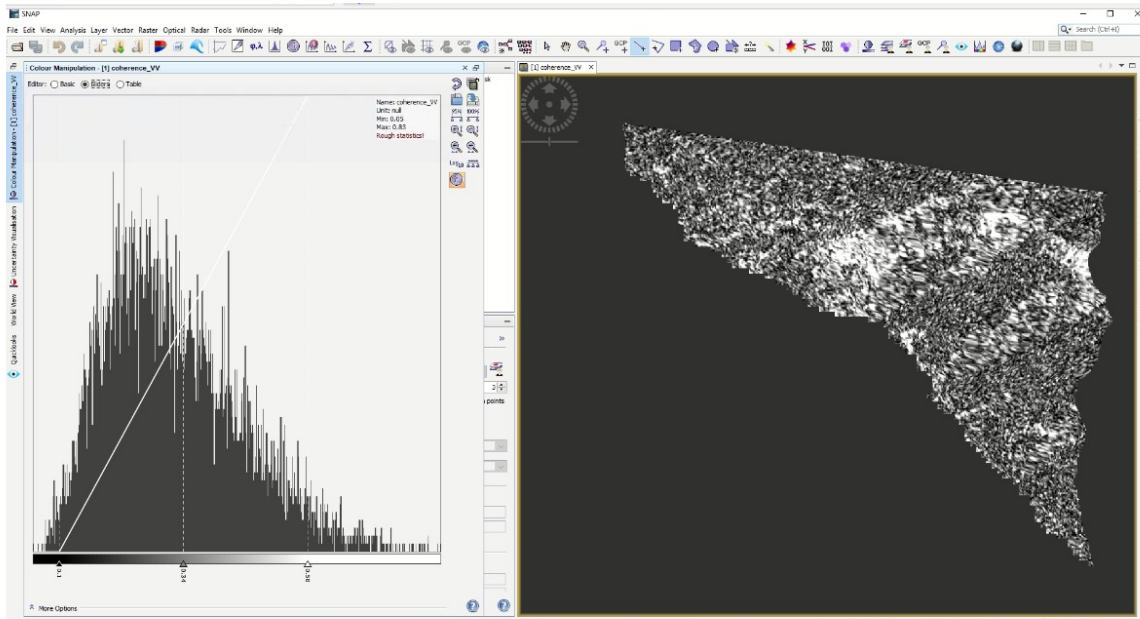


Figura 4.3.3-1: mapa de coherencia (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

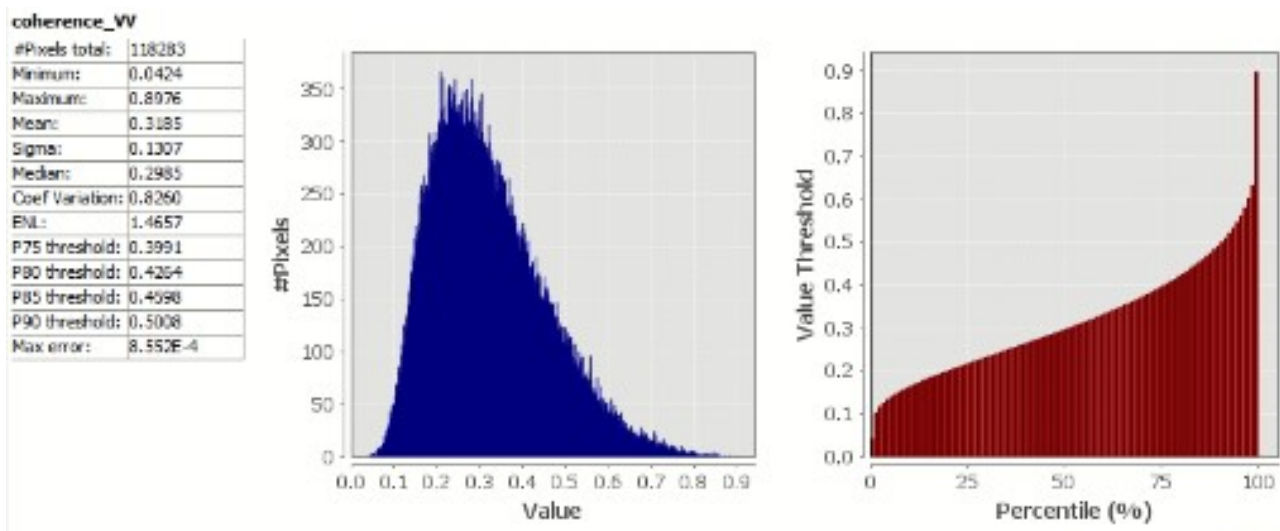
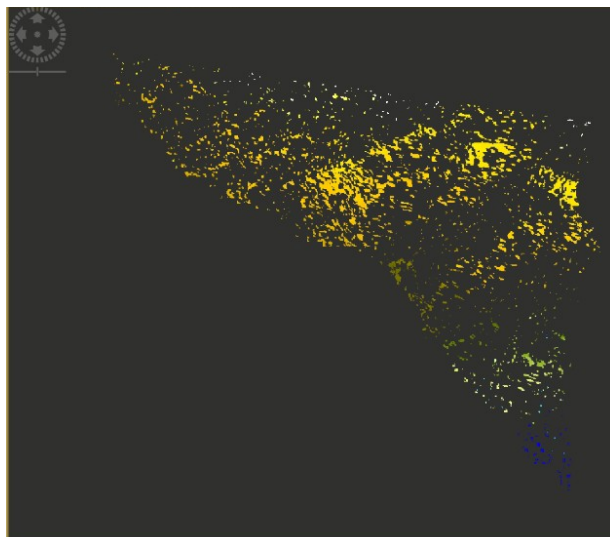


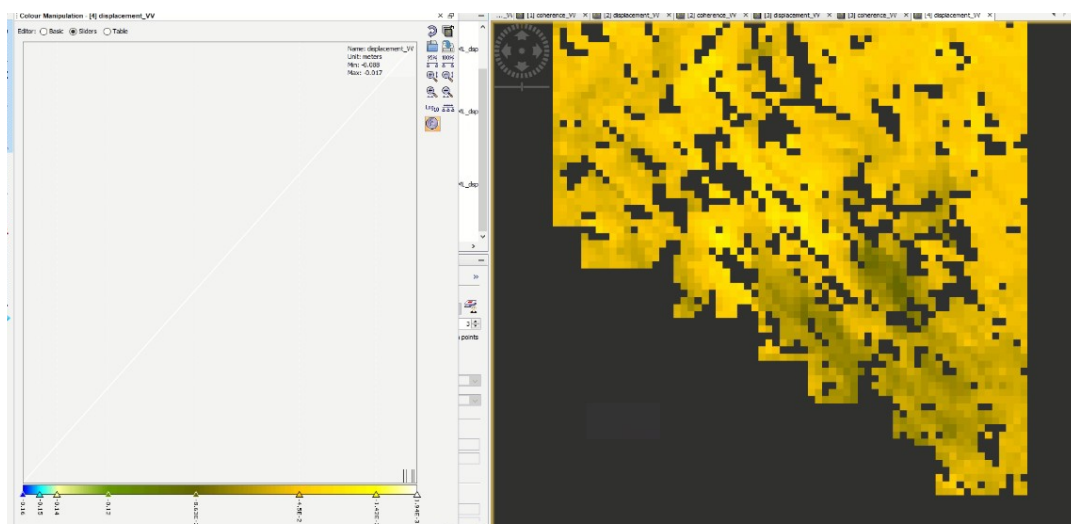
Figura 4.3.3-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017)

El desplazamiento para una coherencia > 0.5 es el siguiente:



**Figura 4.3.3-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia > 0.5) (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017)**

Para la comparación con los desplazamientos obtenidos en el estudio de Handwerger et al. en [2], obtenemos los desplazamientos en la zona de deslizamiento con valores de coherencia > 0.2



**Figura 4.3.3-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 02/03/2017 – 26/03/2017)**

El máximo desplazamiento negativo registrado es de -0.088 m, equivaliendo a una velocidad de deslizamiento de 1.34 m / año, el doble de lo estimado en el estudio de Handwerger et al. [2].

### 4.3.4 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 25/01/2017 – 06/02/2017

Nuevamente puede observarse baja coherencia generalizada, a pesar de ser el intervalo de análisis más corto posible (12 días), lo cuál está indicando que existen otros factores que disminuyen la coherencia del análisis independientes del período transcurrido entre imágenes. La coherencia general tiene el siguiente aspecto:

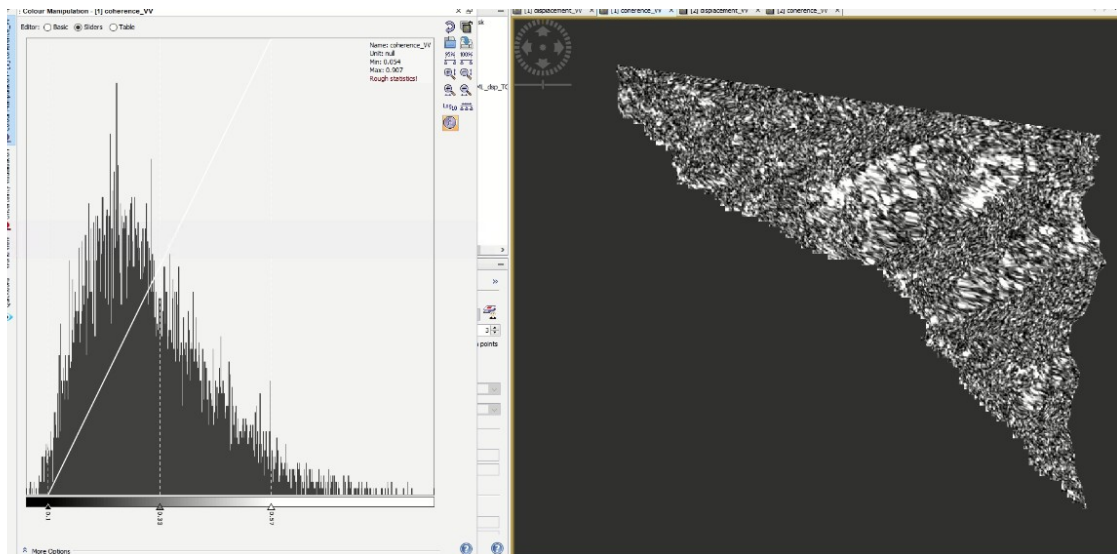


Figura 4.3.4-1: mapa de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

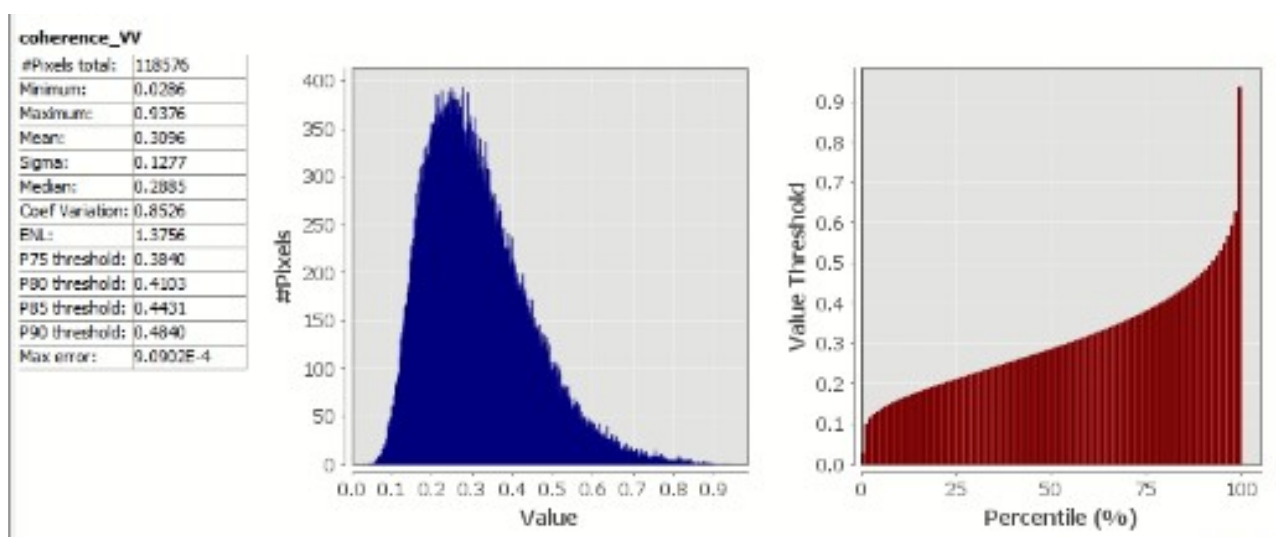
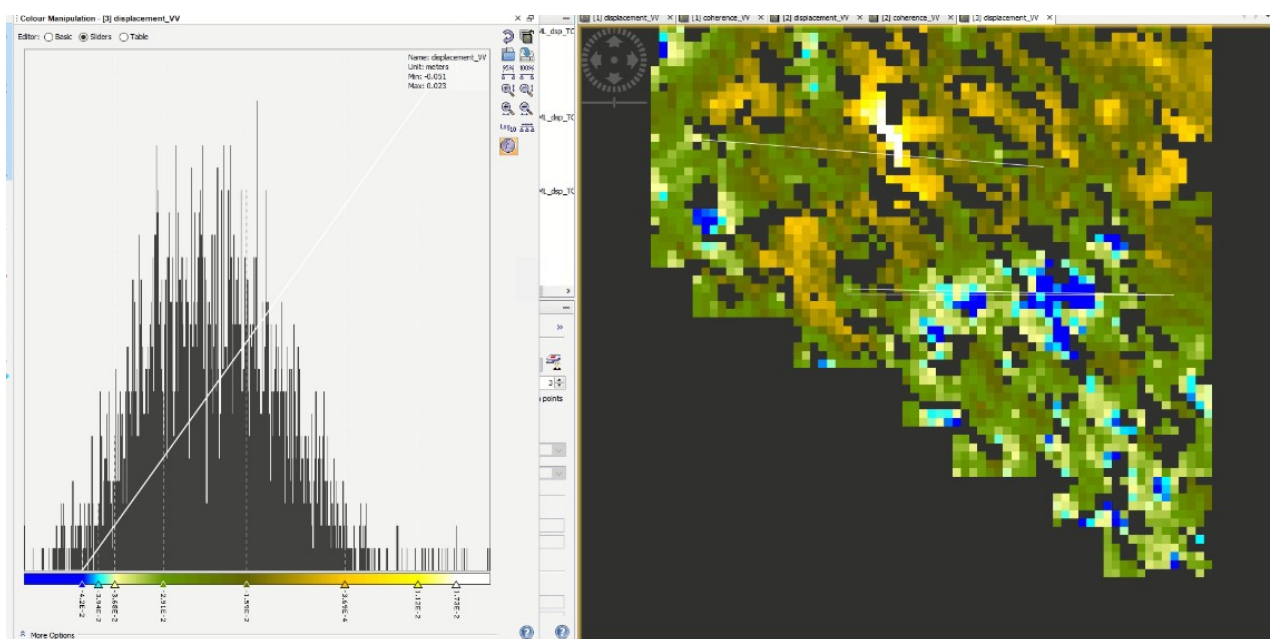


Figura 4.3.4-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017)

Los valores de la mayoría de los puntos son incoherentes, como puede observarse en el histograma. Esto podría deberse a unas condiciones de toma inadecuadas, probablemente influidas por la precipitación, ya que en las estaciones meteorológicas cercanas se muestra la existencia de precipitaciones el día 06/02/2017.

Para la comparación con los desplazamientos obtenidos en el estudio de Handwerger et al. [2], obtenemos los desplazamientos en la zona de deslizamiento con valores de coherencia  $> 0.2$



**Figura 4.3.4-3: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia  $> 0.2$  (subset del deslizamiento) (par interferométrico 25/01/2017 – 06/02/2017)**

En este caso el máximo desplazamiento negativo registrado es  $-0.051$  m, equivaliendo a una velocidad de deslizamiento de  $1.55$  m/año, mayores que en el estudio de Handwerger et al. [2], que estaban en torno a  $0.9$  m/año.

### 4.3.5 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 08/12/2016 – 20/12/2016

El 08/12/16 fue lluvioso pero el 20/12/16 no se registraron precipitaciones en las estaciones meteorológicas más cercanas, como se verá más adelante.

La coherencia que se obtuvo en el análisis de 2 meses que contiene este intervalo, es decir, el de imágenes 14/11/16 y 25/01/17, fue muy baja de forma generalizada. En este caso se obtiene también una coherencia muy baja de forma generalizada, como

puede verse en la siguiente imagen. Incluso parece menor que la obtenida en el análisis del período de 2 meses. En este caso la baja coherencia puede asociarse probablemente a que se registraron precipitaciones en la fecha de toma de imágenes, a falta de completar el estudio de otros factores en apartados posteriores.

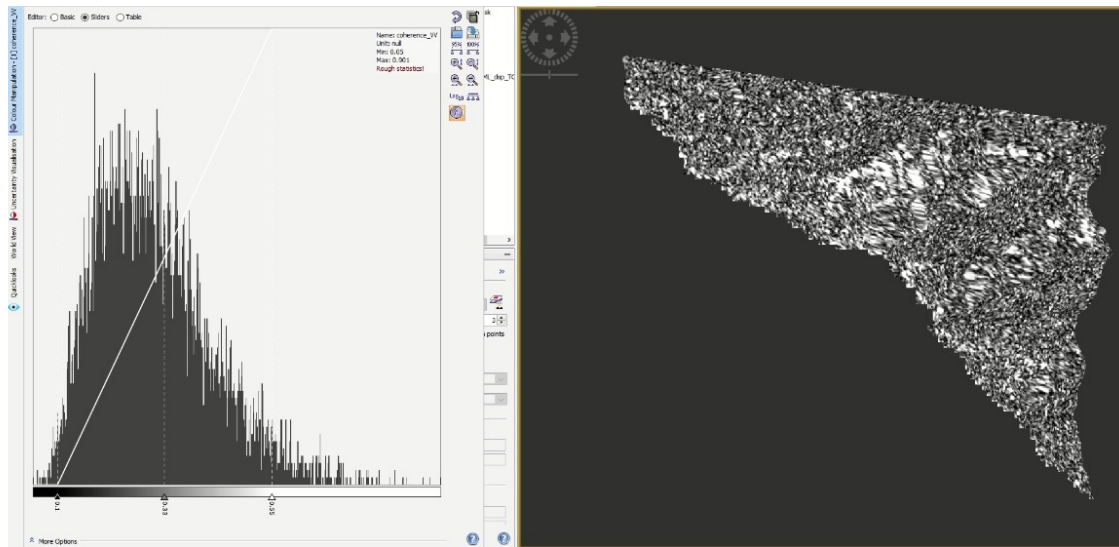


Figura 4.3.5-1: mapa de coherencia (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

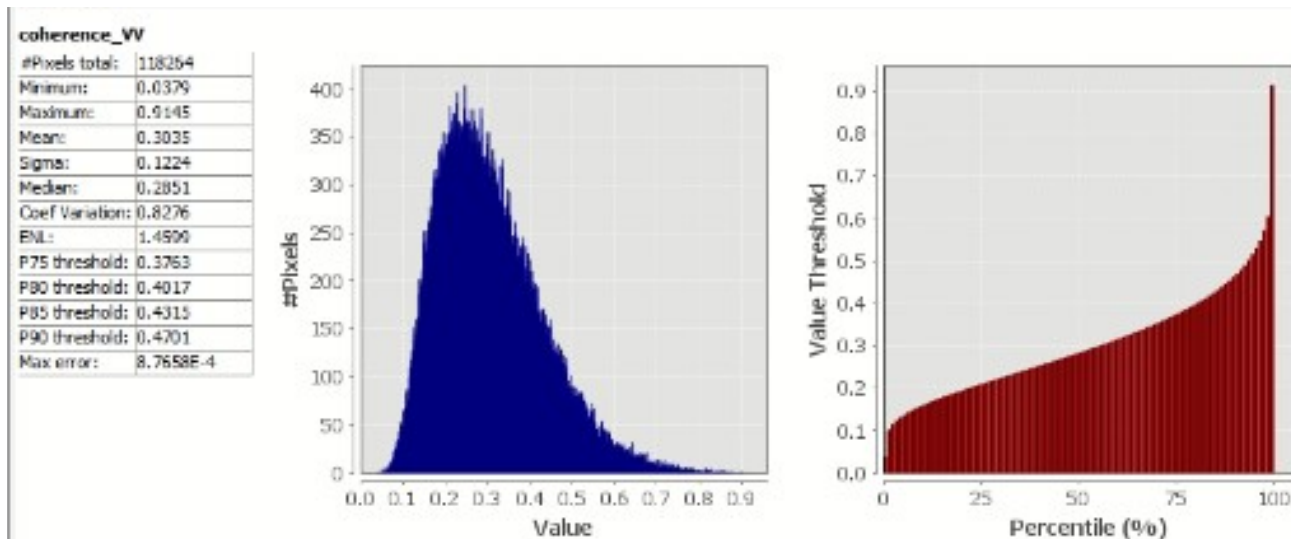
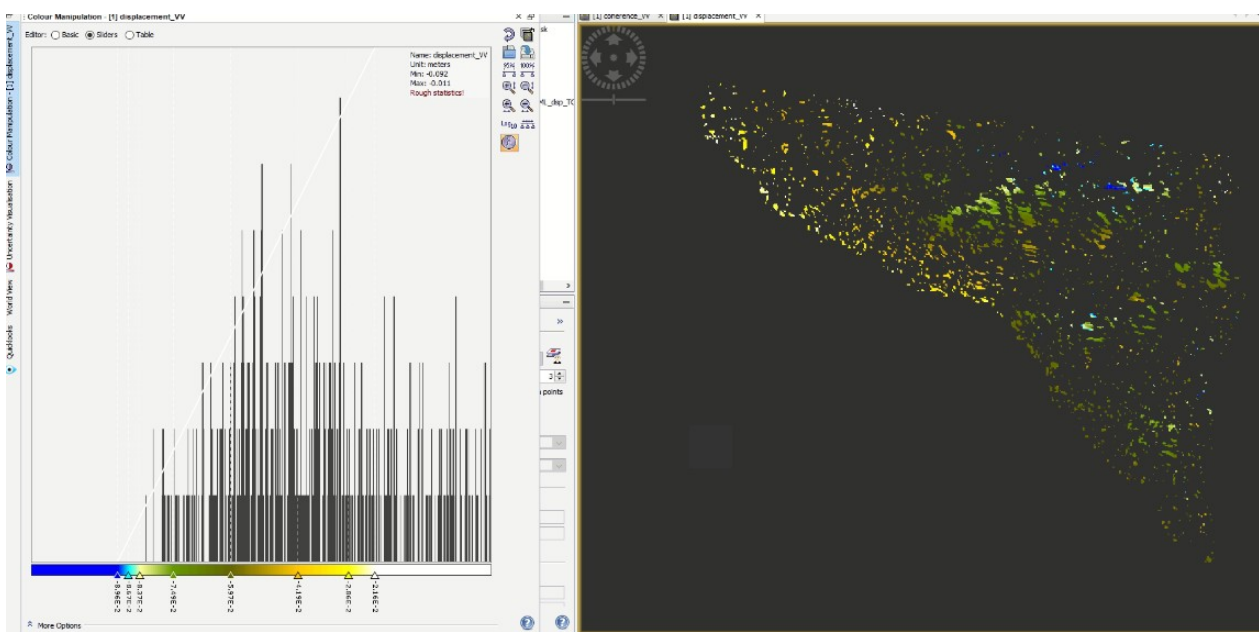


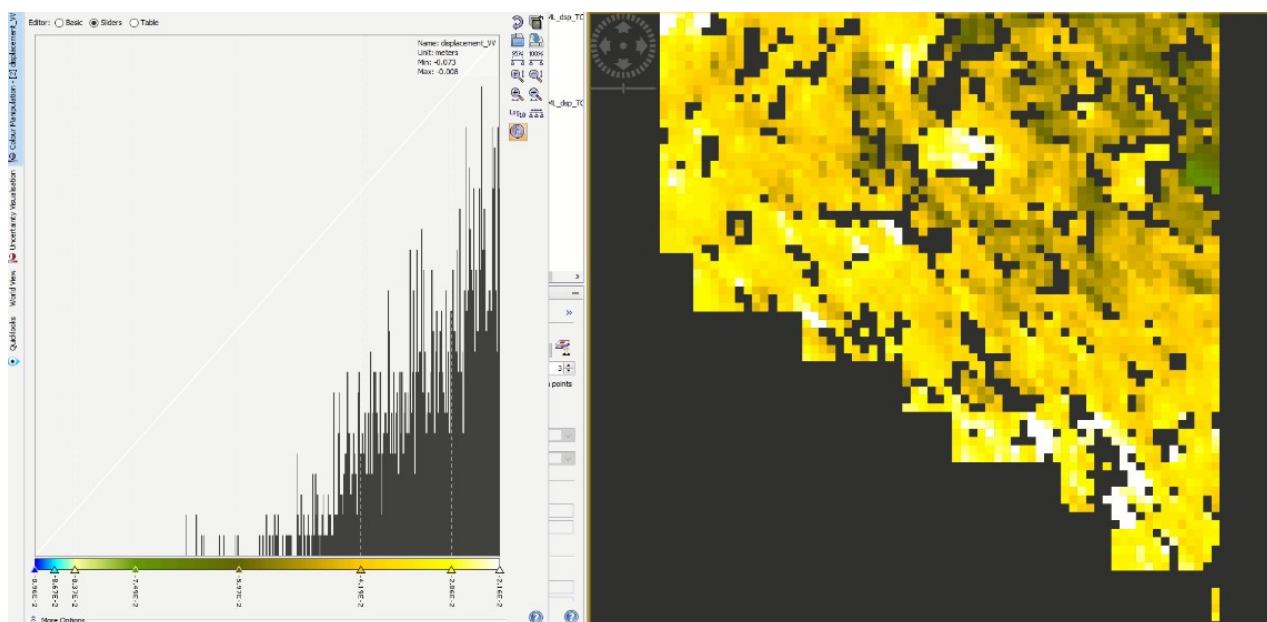
Figura 4.3.5-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016)

En cuanto a los desplazamientos con coherencia  $> 0.5$  presentan el siguiente aspecto (puede apreciarse que muchas zonas están oscurecidas, debido a la baja coherencia):



**Figura 4.3.5-3: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia > 0.5) (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016)**

Para la comparación con los desplazamientos obtenidos en el estudio de Handwerger et al. en [2], obtenemos los desplazamientos en la zona de deslizamiento con valores de coherencia > 0.2



**Figura 4.3.5-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 08/12/2016 – 20/12/2016)**

En este caso, el máximo desplazamiento negativo es de -0.073 m (píxeles marrones de la esquina superior derecha de la imagen), lo que equivaldría a 2.22 m/año, siendo un



valor elevadísimo, considerablemente superior al del estudio de Handwerger et al. [2] que estaba en torno a los 0.3 m/año.

#### 4.3.6 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 27/09/2016 – 09/10/2016

Este intervalo corto se encuentra contenido en el intervalo mayor que fue analizado, que utilizaba imágenes entre el 27/09/2016 y el 14/11/2016, siendo este el que mayores valores de coherencia obtuvo en los análisis de intervalos de en torno a 2 meses.

Los resultados obtenidos tienen una coherencia muy alta (en comparación con los análisis efectuados hasta ahora). Esto puede percibirse directamente en el gráfico de la fase tras la realización de los filtrados de Goldstein y Multilooking (antes por lo tanto del desenrollado) que presenta una forma en la que se percibe mucho menos ruido en la zona del terreno, contrastando mucho con la zona de mar, que es incoherente por naturaleza, como puede verse en la siguiente imagen:

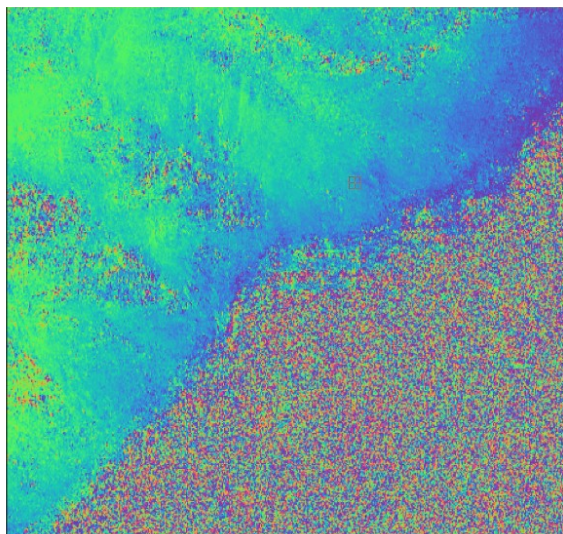


Figura 4.3.6-1: Fase tras filtrado de Goldstein y Multilooking (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016)

La representación de la coherencia presenta la aparición de muchas zonas blancas, afectando (positivamente) también a la zona donde se encuentra el deslizamiento, como puede observarse en la imagen siguiente. Esto se refleja también en el histograma, donde puede verse que gran parte de los puntos presentan coherencia elevada:

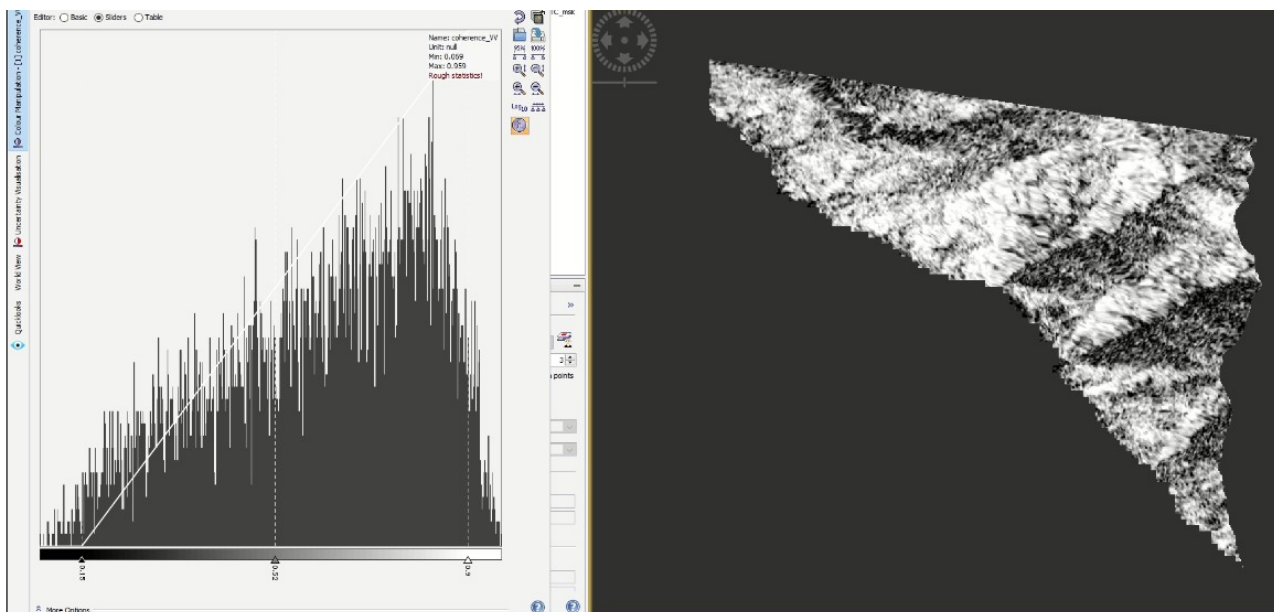


Figura 4.3.6-2: mapa de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016)

No se aprecian las disminuciones localizadas en la zona del deslizamiento, ya que nos encontramos en un período suficientemente alejado del fallo catastrófico, con menor decorrelación temporal.

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

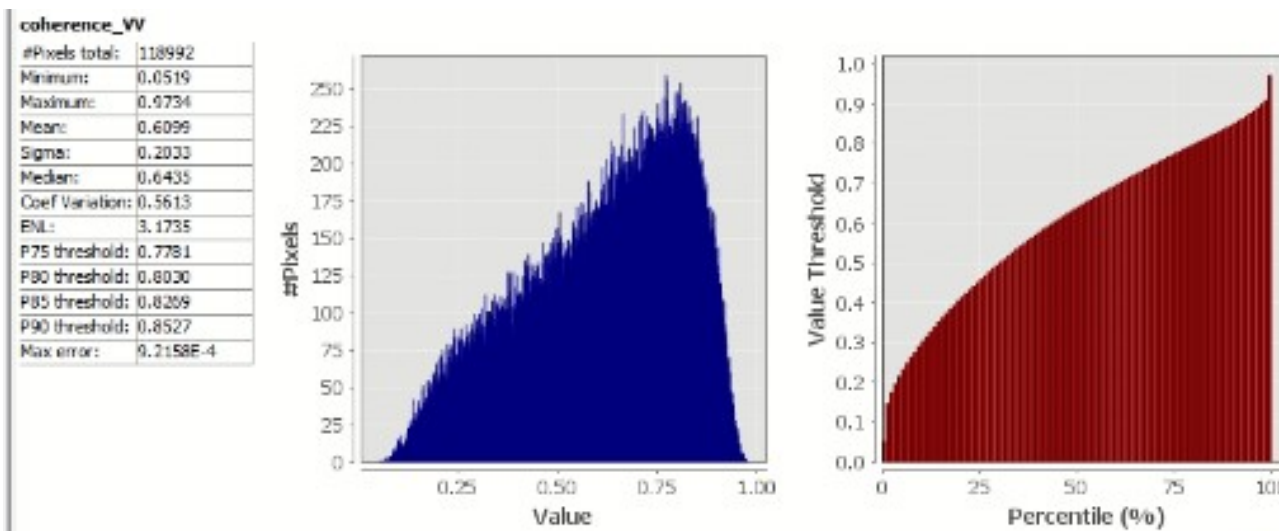
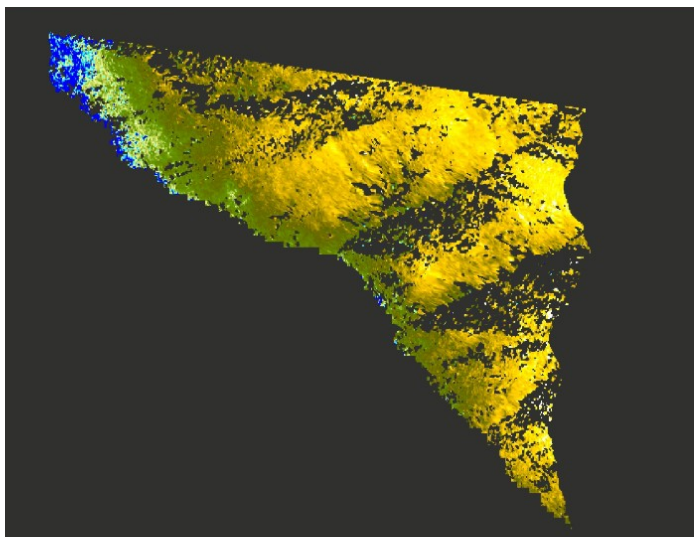


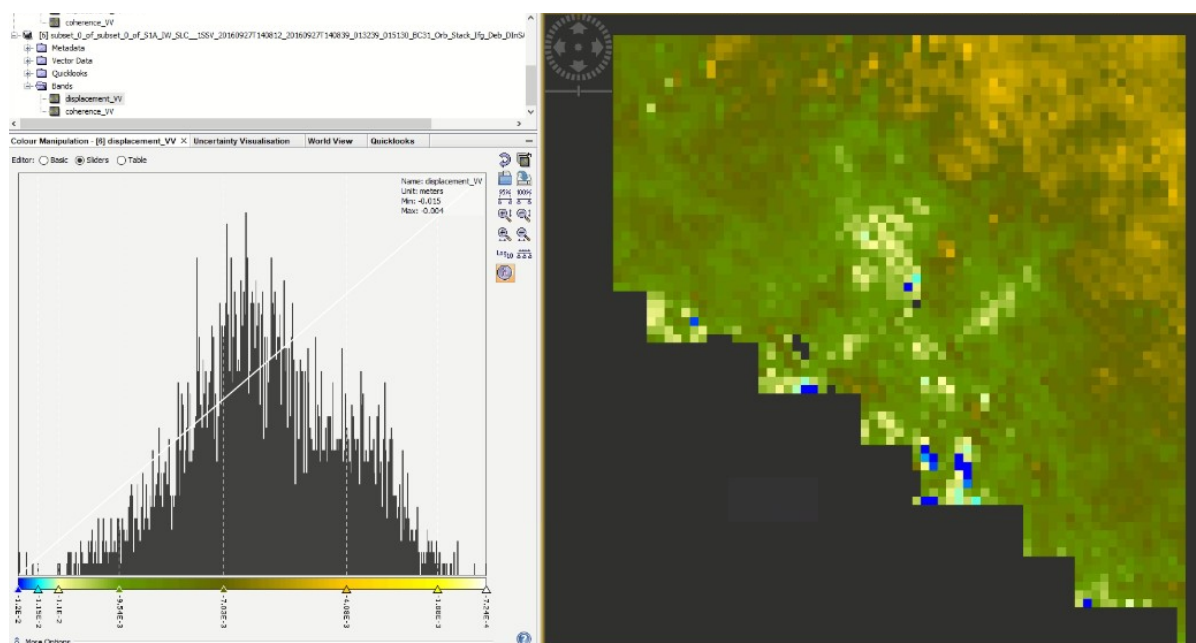
Figura 4.3.6-3: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016)

En cuanto a los desplazamientos obtenidos y la coherencia, puede verse en la siguiente imagen en la que se filtra a una coherencia > 0.5 como los resultados presentan valores significativamente más fiables que en los análisis anteriores salvo en algunas zonas concretas (en las que suele encontrarse baja coherencia en todos los análisis realizados), distintas a la zona donde se produce el deslizamiento.:



**Figura 4.3.6-4: Mapa de desplazamientos en Subset general (coherencia > 0.5) (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016)**

Analizando los desplazamientos máximos (negativos) en la zona del deslizamiento, eliminando los valores con coherencia < 0.2, obtenemos que el mayor desplazamiento es de -0.015 m, lo que equivaldría a una velocidad de deslizamiento de 0.45 m/año, superior a la del estudio de Handwerger et al. [2], que era de en torno a 0.2 m/año.



**Figura 4.3.6-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 27/09/2016 – 09/10/2016)**

Estos altos valores de coherencia obtenidos en este intervalo de tiempo, contrastando con los peores obtenidos en el resto de intervalos cortos analizados, hacen

pensar que existen condiciones más favorables en ese análisis, lo cuál vuelve a sugerir la investigación acerca de si estas condiciones pueden asociarse a la ausencia de precipitaciones o a otras posibles causas. Todo esto será analizado en apartados posteriores.

### 4.3.7 Análisis de resultados en par interferométrico con fechas de adquisición de las imágenes 11/06/2016 – 05/07/2016

Finalmente se analiza este par que se aleja casi un año de la fecha en la que sucedió el fallo catastrófico. En este caso las imágenes se toman en período de verano, con bajas precipitaciones y quizás baja vegetación, que afecte menos a la coherencia. Los resultados obtenidos presentan una coherencia bastante buena en la zona del deslizamiento, aunque no tan buena como en el análisis efectuado entre el 27/09/2016 y 09/10/2016.

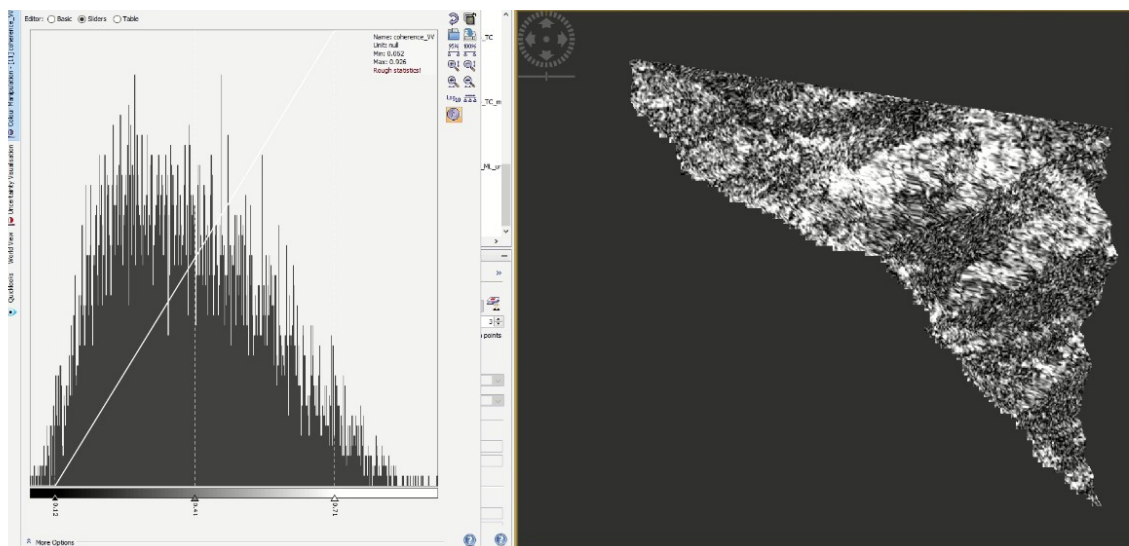


Figura 4.3.7-1: mapa de coherencia (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016)

Los valores estadísticos de la coherencia en esta zona se resumen en la siguiente tabla y gráficas:

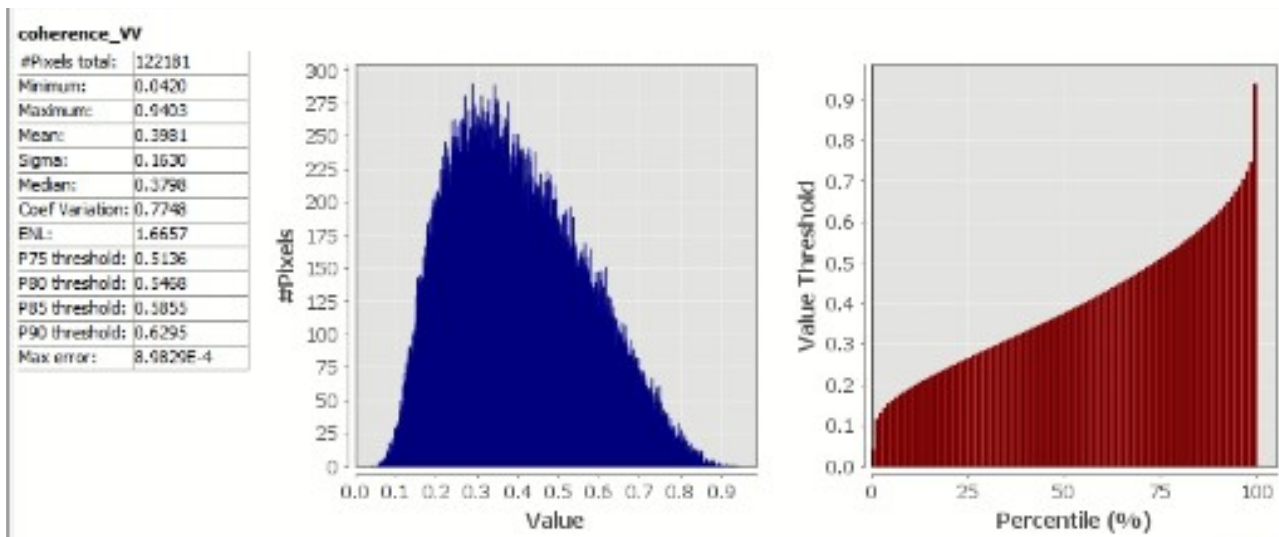


Figura 4.3.7-2: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016)

Si se observa el mapa de desplazamientos obtenido en la siguiente imagen, se aprecia con claridad una zona singular de desplazamientos en torno al deslizamiento.

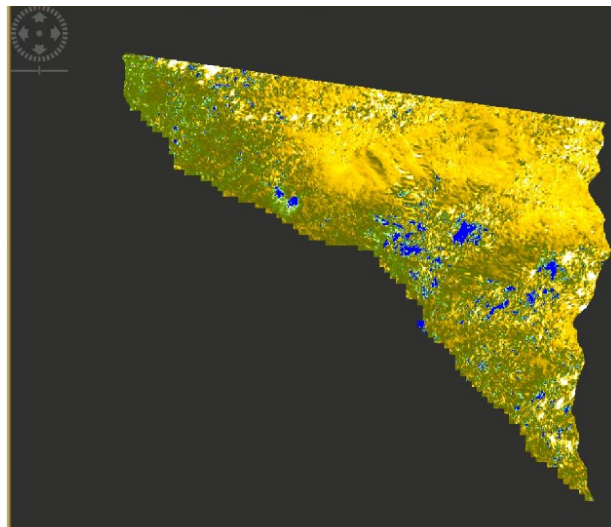


Figura 4.3.7-3: Mapa de desplazamientos en subset general (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016)

Representando los desplazamientos con coherencia  $>0.2$  obtenemos que el desplazamiento máximo en la zona del deslizamiento es de  $-0.045$  m, lo que equivaldría a una velocidad de deslizamiento de  $0.68$  m/año, nuevamente mayor a la de la gráfica del estudio de Handwerger et al. [2] que se sitúa en torno a  $0.4$  m/año.

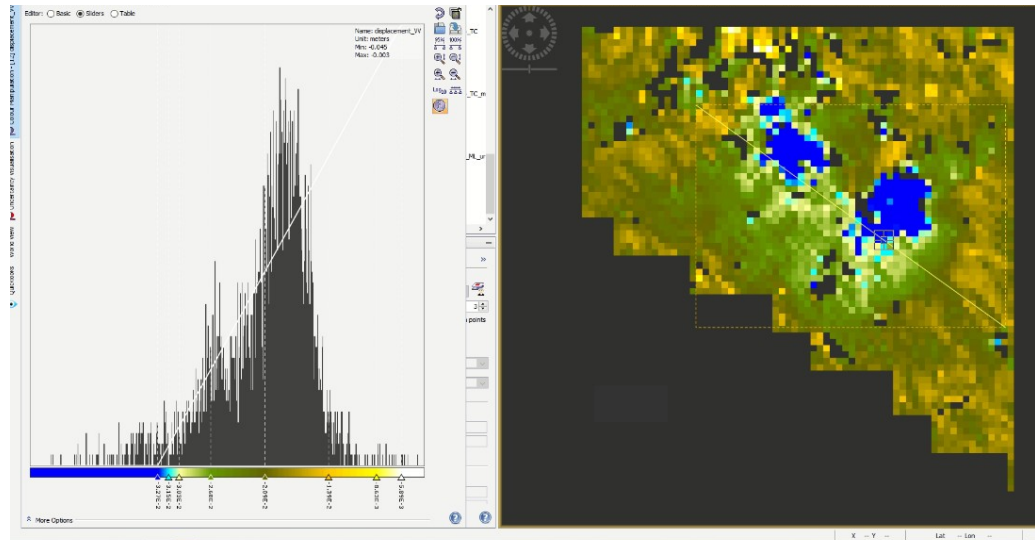
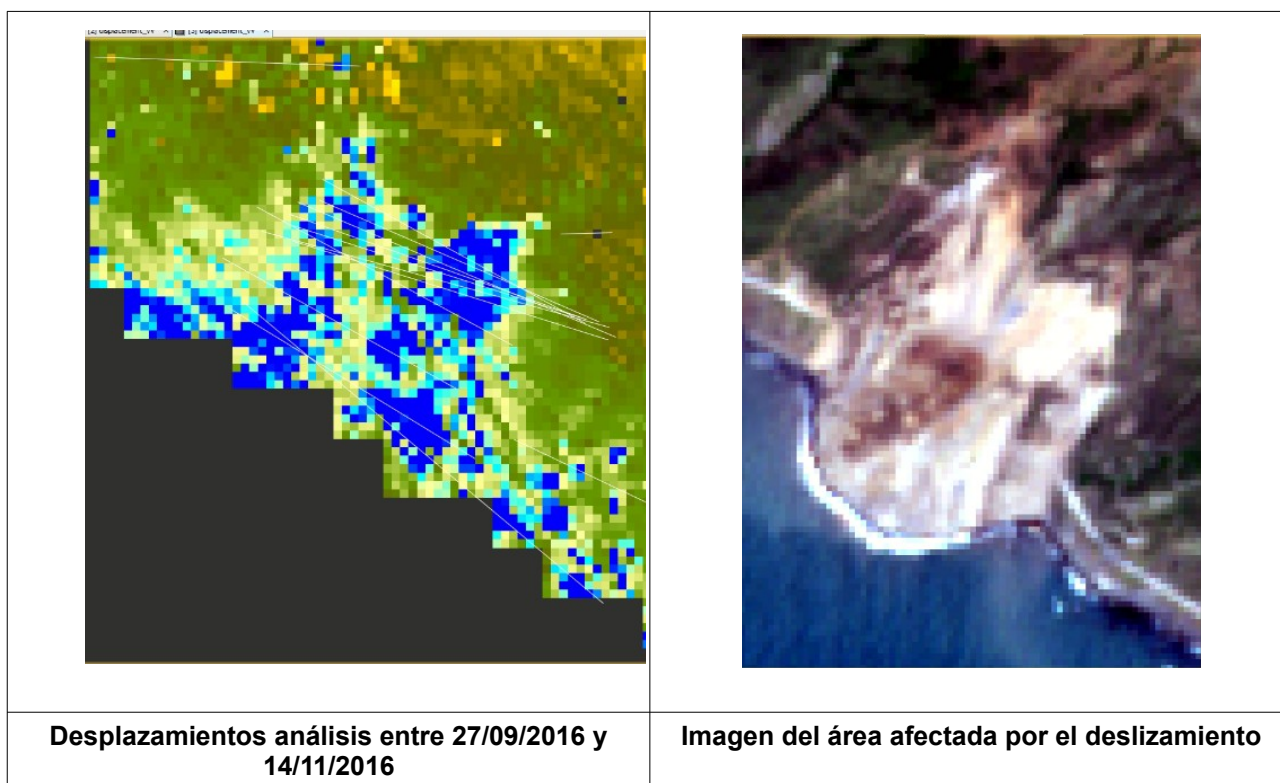


Figura 4.3.7-4: Mapa de desplazamientos filtrado con coherencia > 0.2 (subset del deslizamiento) (par interferométrico 11/06/2016 – 05/07/2016)

## 4.4 Interpretación de los Resultados Obtenidos

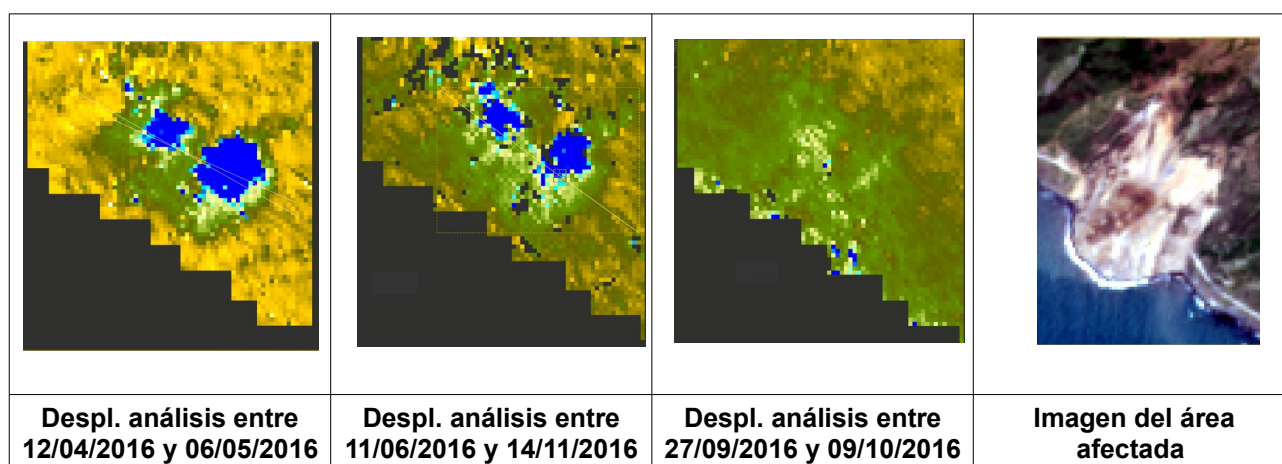
Los mapas de desplazamiento obtenidos muestran diversas morfologías, dependiendo de cada análisis. En general parece ponerse de manifiesto lo siguiente:

- En el análisis de intervalos de 2 meses que se obtienen mejores valores de coherencia en la zona del deslizamiento (al menos una coherencia  $> 0.5$ ), la morfología del área que presenta mayores desplazamientos se asemeja a la zona afectada por el fallo catastrófico. En la siguiente figura se muestra una comparativa entre el mapa de desplazamientos del análisis del 27/09/2016 – 14/11/2016 y la zona afectada por el deslizamiento.



**Figura 4.4-1: comparativa entre el mapa de desplazamientos del análisis del 27/09/2016 – 14/11/2016 y la imagen de la zona afectada por el deslizamiento.**

- En los análisis de períodos cortos, la morfología del deslizamiento (que tiene 2 lóbulos de desplazamiento) puede apreciarse en los mapas de desplazamiento de la reproducción del tutorial [1] (pares interferométricos entre el 12/4/2016 y 06/05/2016) y en el de los análisis con pares interferométricos entre el 11/06/2016 y el 05/07/2016; y entre el 27/09/2016 y el 09/10/2016 (aunque en este último con menor claridad). Estos análisis también son los de mayor coherencia en la zona del deslizamiento para los pares interferométricos cortos.



**Figura 4.4-2: comparativa entre diferentes mapas de desplazamientos y la imagen de la zona afectada por el deslizamiento.**

- En el resto de análisis no se aprecia con claridad esta morfología de los desplazamientos en el subset del deslizamiento. Esto podría obedecer al hecho de que estos análisis presentan menores valores de coherencia en esa zona, aunque no habría que descartar el hecho de que el deslizamiento en esa dirección se comportara de manera diferente en los otros períodos analizados.

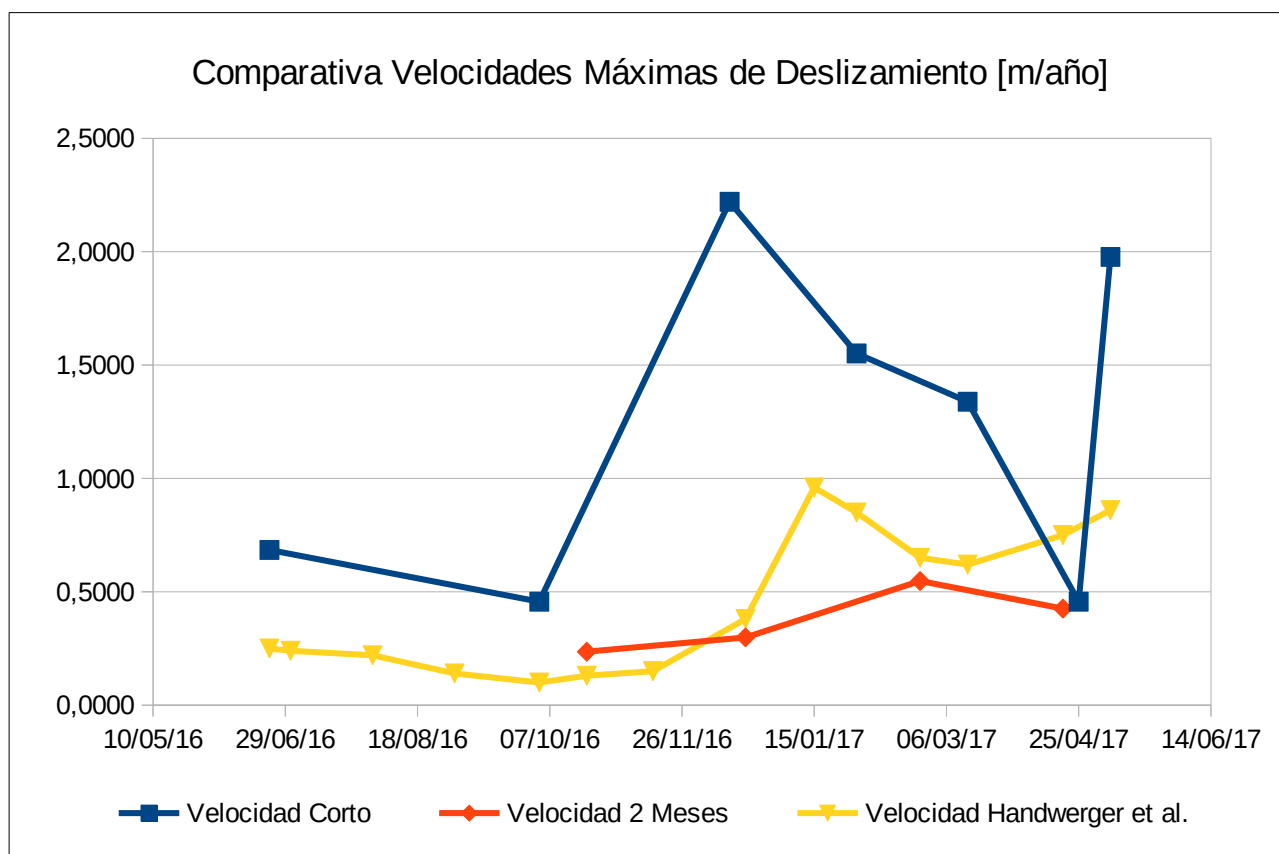
Los resultados de velocidad máxima de desplazamiento del terreno obtenidos en todos los análisis de la zona del deslizamiento son negativos. Por lo tanto muestran un desplazamiento del terreno en sentido hacia el oeste y hacia abajo, según la dirección de observación. Esto es un hecho consistente, ya que la pendiente de la superficie del deslizamiento se encuentra hacia el oeste y hacia el sur. En la siguiente tabla se resumen los valores absolutos de velocidad de desplazamiento máxima obtenidos para el subset del deslizamiento (en puntos con coherencia > 0.2), tanto en los análisis con intervalos de 2 meses como en los que tienen intervalos más cortos (12 o 24 días):

Imagen 1	Imagen 2	Fecha promedio	Velocidad Deslizamiento Máxima [m/año]	Tipo de Analisis
11/06/16	05/07/16	23/06/16	0,6844	Corto (24 días)
27/09/16	09/10/16	03/10/16	0,4563	Corto (12 días)
27/09/16	14/11/16	21/10/16	0,2357	2 Meses
14/11/16	25/01/17	20/12/16	0,2991	2 Meses
08/12/16	20/12/16	14/12/16	2,2204	Corto (12 días)
25/01/17	06/02/17	31/01/17	1,5513	Corto (12 días)
25/01/17	26/03/17	24/02/17	0,5475	2 Meses
02/03/17	26/03/17	14/03/17	1,3383	Corto (24 días)
26/03/17	13/05/17	19/04/17	0,4258	2 Meses
19/04/17	01/05/17	25/04/17	0,4563	Corto (12 días)
01/05/17	13/05/17	07/05/17	1,9771	Corto (12 días)

**Tabla 4.4-1: Resumen de las velocidades de deslizamiento obtenidas en los análisis**



En la siguiente gráfica se comparan estos resultados obtenidos en ambos análisis, incluyendo además su comparación con los que figuran en la gráfica del estudio de Handwerger et al. en [2] (ver figura 3.3-2). Aunque a nivel cuantitativo existen apreciables diferencias entre ellos, sin embargo puede observarse como, a nivel cualitativo, la evolución del comportamiento del deslizamiento es bastante similar (sobre todo entre el estudio de intervalos cortos y el de Handwerger et al.), observándose que el deslizamiento tiene un movimiento un año antes de su fallo que se frena levemente a finales del verano y comienzos del otoño de 2016, posteriormente se acelera alcanzando un máximo de velocidad entre finales de 2016 y principios de 2017, tras esto se frena de nuevo esa velocidad de deslizamiento para iniciar finalmente una segunda aceleración del deslizamiento entre los meses de marzo y abril de 2017 que se mantiene hasta el fallo catastrófico el 20 de mayo de 2017. Cabe recordar que tanto en el estudio de Handwerger et al. en [2] como en el presente trabajo los gráficos de velocidades de deslizamiento se refieren a puntos con coherencia > 0.2.



**Figura 4.4-3: Comparativa de Velocidades máximas de deslizamiento de los análisis con períodos de 2 meses, períodos cortos y con estudio de Handwerger et al.**

A nivel cuantitativo cabría esperar que las velocidades del estudio de Handwerger et al. fueran las mayores, ya que están medidas en la dirección del deslizamiento, mientras que las de este trabajo están medidas en la dirección de toma de imágenes, es decir, hacia el oeste y hacia abajo. Sin embargo, se puede apreciar que son del mismo orden que las de los análisis de intervalos de 2 meses e inferiores a los análisis de períodos

cortos, existiendo notables diferencias en los valores, todo ello a pesar de que ambos análisis muestran una evolución cualitativa del comportamiento del deslizamiento bastante similar, como ya se ha indicado.

Estas diferencias pueden obedecer a diversos factores. Hay que recordar que el estudio de Handwerger et al. utiliza valores compuestos de 2 análisis Sentinel con direcciones diferentes más un análisis con vehículo no tripulado NASA UAVSAR. Entre los factores que pueden influir también está la coherencia de los análisis. Por ello, en este trabajo, a diferencia de en el estudio de Handwerger et al., se ha prestado especial atención a mostrar los mapas de coherencia obtenidos en el deslizamiento y en las zonas de alrededor, así como a la determinación de los factores que influyen en las variaciones de la misma entre unos análisis y otros.

Para realizar el análisis de los valores de coherencia obtenidos, primeramente se muestra en la siguiente imagen un cuadro resumen con todos los mapas de coherencias e histogramas de coherencia de los análisis efectuados. En la columna de la izquierda figuran los análisis cortos (12 o 24 días) y en la de la derecha los análisis en períodos más largos (2 meses). También se añaden colores a las fechas de toma de imágenes, dependiendo de si se registraron precipitaciones en la fecha de toma de datos (color azul), no se registraron (color naranja) o las estaciones no disponen de datos (color morado), según los datos de las estaciones meteorológicas de Monterey y Paso Robles (las operativas más cercanas a la zona del deslizamiento).

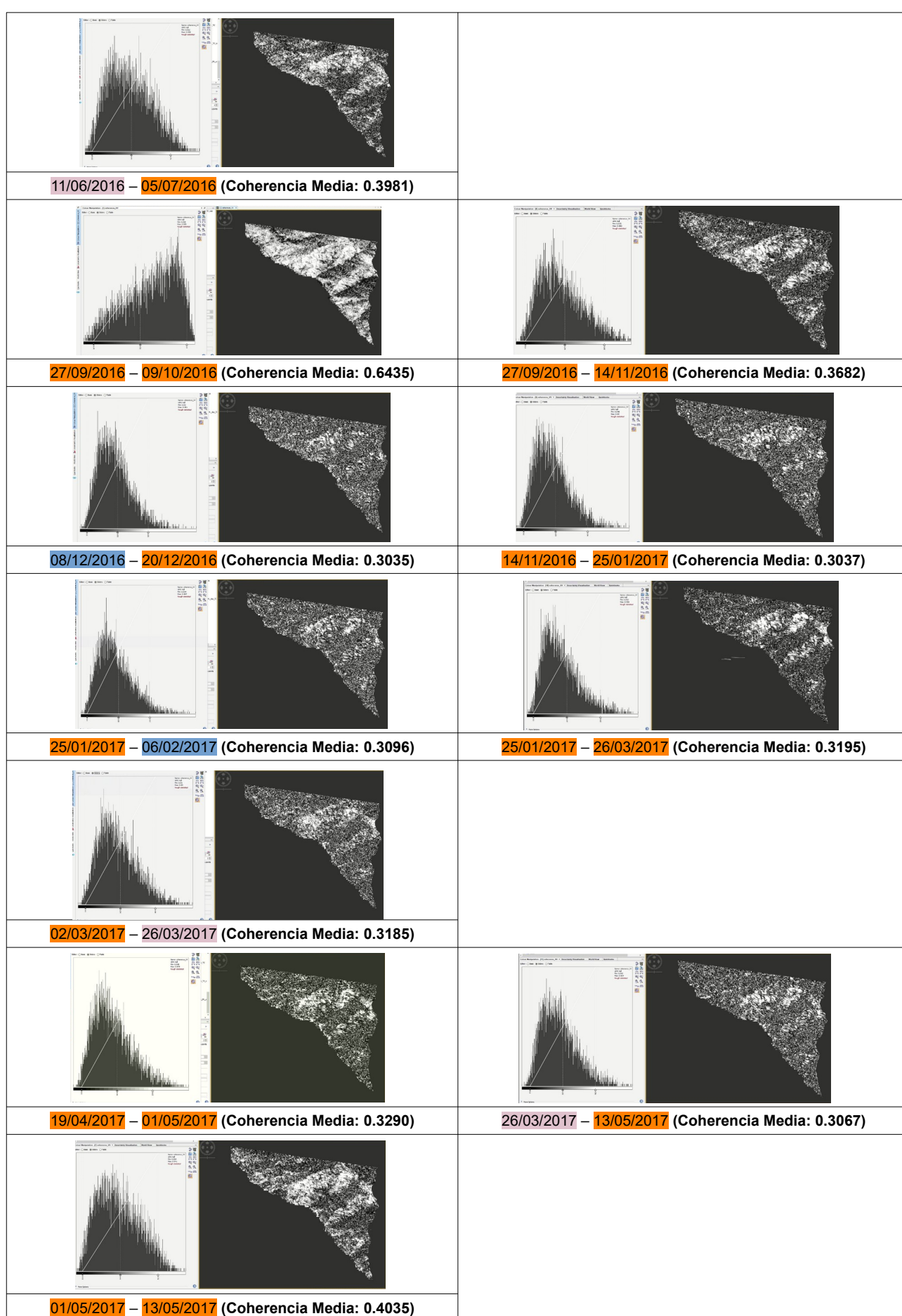


Figura 4.4-4: Resumen de mapas de coherencia y coherencia media obtenidos en los análisis

Como puede comprobarse en las gráficas anteriores, los resultados de los períodos cortos, en cuanto a coherencia, en general no han sido mucho mejores que aquellos realizados en períodos de 2 meses que los contienen, salvo en el caso del análisis llevado a cabo entre el 27/09/2016 y 09/10/2016, en el que se muestra un aumento considerable de la coherencia de forma generalizada, aunque no tanto en ciertas franjas que permanecen oscuras y que suelen tener muy baja coherencia en todos los análisis, por ser zonas que presentan un tipo de vegetación que provoca valores poco coherentes para cualquier análisis, como se verá más adelante.

Por lo tanto parece ser que en este estudio el factor “acortación del período de análisis” en general no ha sido determinante para obtener análisis con mejores valores de coherencia.

Por otra parte, se puede observar que no siempre se han obtenido mejores valores de coherencia en los análisis en los que no había precipitaciones en los días de toma de imágenes respecto a los que sí llovía. Un ejemplo de ello son los resultados de coherencia del análisis efectuado en el período que va del 19/04/2017 al 01/05/2017, días de toma en los que no se registraron precipitaciones en las estaciones meteorológicas cercanas, y que sin embargo presentan una coherencia baja, similar a la de otros análisis en los que sí hubo precipitaciones. Por lo tanto no es la precipitación la única causante de las variaciones de coherencia entre unos análisis y otros.

En este estudio parece que puede tener más influencia en la coherencia el período del año en el que se realiza cada análisis, pudiendo apreciarse que son los meses que presentan mejores resultados los de verano y mejor aún los de su finalización. Este efecto pudiera estar relacionado con la sequía del terreno en esos meses y/o con el tipo de vegetación presente en la zona, que parece ser de forraje y matorral en su mayor parte, pudiendo favorecer esta configuración la realización de la técnica más en unas épocas que en otras por encontrarse más o menos densa o con características diferentes.

Para reforzar esta hipótesis, de forma complementaria se ha llevado a cabo el estudio de la coherencia de un nuevo par interferométrico cercano a la época de finalización del verano. En concreto, se escoge el período entre el 04/10/2017 y el 16/10/2017, en el que no se produjeron precipitaciones en las fechas de toma de imágenes, para que estas no influyan en la coherencia. Aunque es un período posterior a la fecha del fallo catastrófico, este análisis complementario es válido a los efectos de analizar la dependencia de la coherencia con la época del año. Como se puede apreciar en la siguiente figura, los resultados de coherencia obtenidos están en la misma línea de los más altos obtenidos previamente (los del período entre el 27/09/2016 y el 09/10/2016, también próximo a la finalización del verano), tal y como se intuía. Por lo tanto, este análisis ratifica el hecho de que se produce una diferencia en los resultados dependiendo de la época del año, siendo el final del verano una época en la que se alcanzan buenos resultados en general.

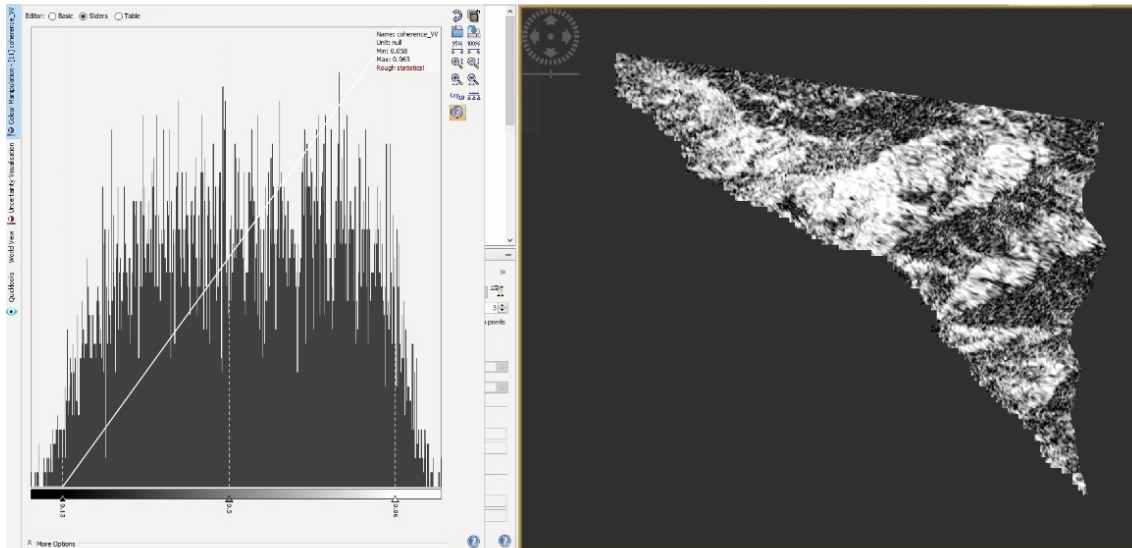


Figura 4.4-5: mapa de coherencia (par interferométrico 04/10/2017 – 16/10/2017)

Los valores estadísticos de la coherencia de este análisis son:

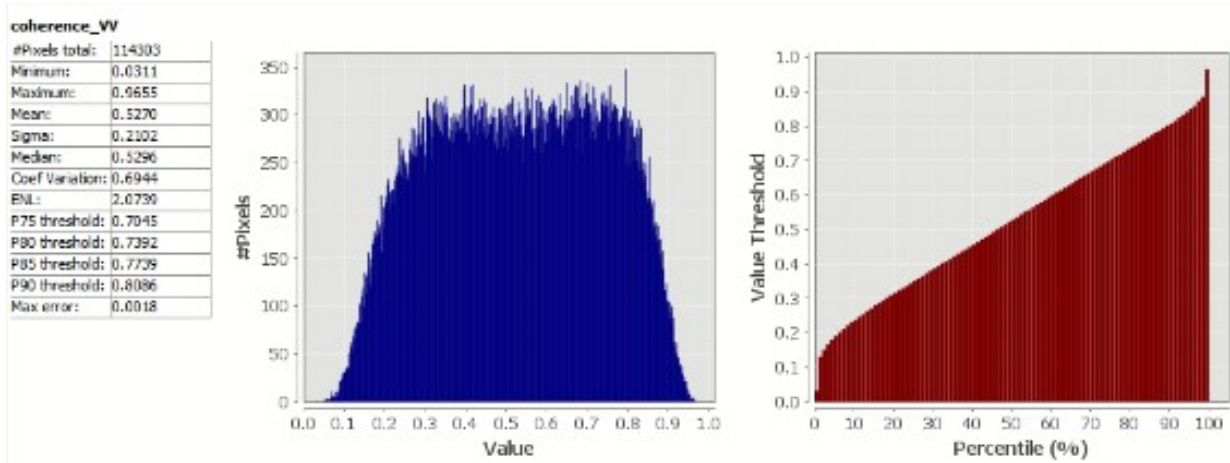


Figura 4.4-6: Resumen estadístico de valores de coherencia (par interferométrico 04/10/2017 – 16/10/2017)

Si representamos gráficamente y mediante una tabla los valores de coherencia media obtenidos en los diferentes análisis llevados a cabo (incluyendo la reproducción del análisis del tutorial de la NASA y este último análisis posterior al fallo catastrófico) podemos observar cómo los valores de coherencia varían según la época del año, alcanzándose los mayores a finales del verano (ver figura y tabla siguientes). También podemos comparar cómo la coherencia media no varía significativamente entre los análisis de períodos de 2 meses y los de períodos más cortos (12 o 24 días).

Imagen 1	Imagen 2	Fecha promedio	Coherencia Media	Tipo de Analisis
12/04/16	06/05/16	24/04/16	0,3437	Tutorial (36 días)
11/06/16	05/07/16	23/06/16	0,3981	Corto (24 días)
27/09/16	09/10/16	03/10/16	0,6435	Corto (12 días)
27/09/16	14/11/16	21/10/16	0,3682	2 Meses
14/11/16	25/01/17	20/12/16	0,3037	2 Meses
08/12/16	20/12/16	14/12/16	0,3035	Corto (12 días)
25/01/17	06/02/17	31/01/17	0,3096	Corto (12 días)
25/01/17	26/03/17	24/02/17	0,3195	2 Meses
02/03/17	26/03/17	14/03/17	0,3185	Corto (24 días)
26/03/17	13/05/17	19/04/17	0,3067	2 Meses
19/04/17	01/05/17	25/04/17	0,3290	Corto (12 días)
01/05/17	13/05/17	07/05/17	0,4035	Corto (12 días)
04/10/17	16/10/17	10/10/17	0,5270	Posterior Corto (12 días)

Tabla 4.4-2: Resumen de valores de coherencia media obtenidos en los análisis

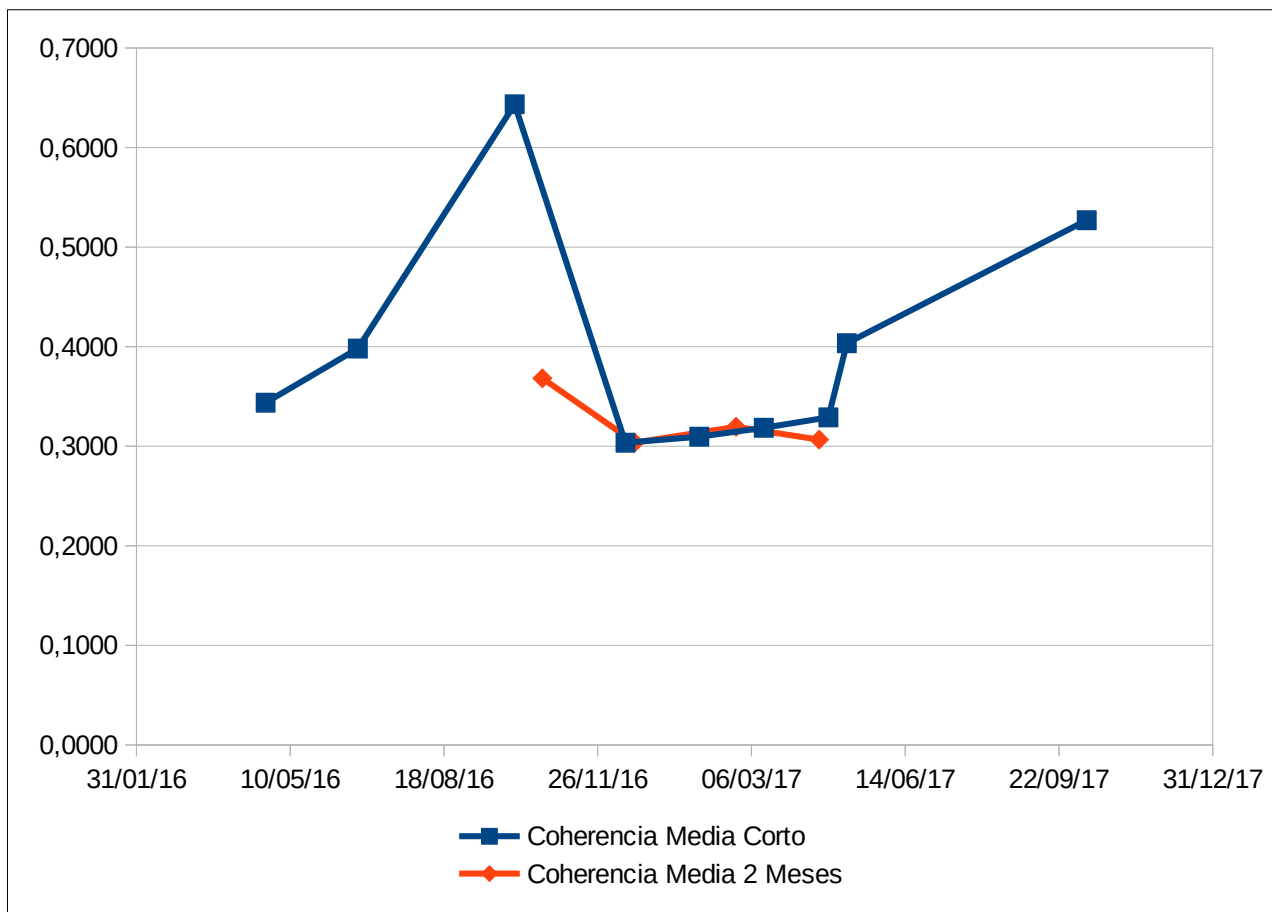


Figura 4.4-7: Representación de la coherencia obtenida en los diferentes tipos de análisis

A modo de estudio complementario, en el siguiente apartado se analizarán datos que se han observado acerca del tipo de vegetación existente en la zona del deslizamiento, tratando de establecer una posible vinculación con el comportamiento observado de los valores de coherencia.

## 4.5 Observaciones sobre la vegetación de la zona y su posible influencia en la coherencia de los resultados

En primer lugar hay que destacar que en cualquiera de los análisis existen unas zonas que siempre presentan baja coherencia. Podemos identificarlas con más claridad en el mapa de coherencia del análisis con pares interferométricos en fechas 27/09/2016 y 09/10/2016, que es el de mayor coherencia obtenida, salvo en esas zonas que aparecen oscuras. Observando una imagen en color obtenida de Sentinel 2 correspondiente a la misma zona y procesada con SNAP, puede identificarse como las zonas donde existe baja coherencia se corresponden con zonas de arboleda y vegetación más frondosa (apreciándose claramente el color verde más oscuro de la misma en la imagen de Sentinel 2).

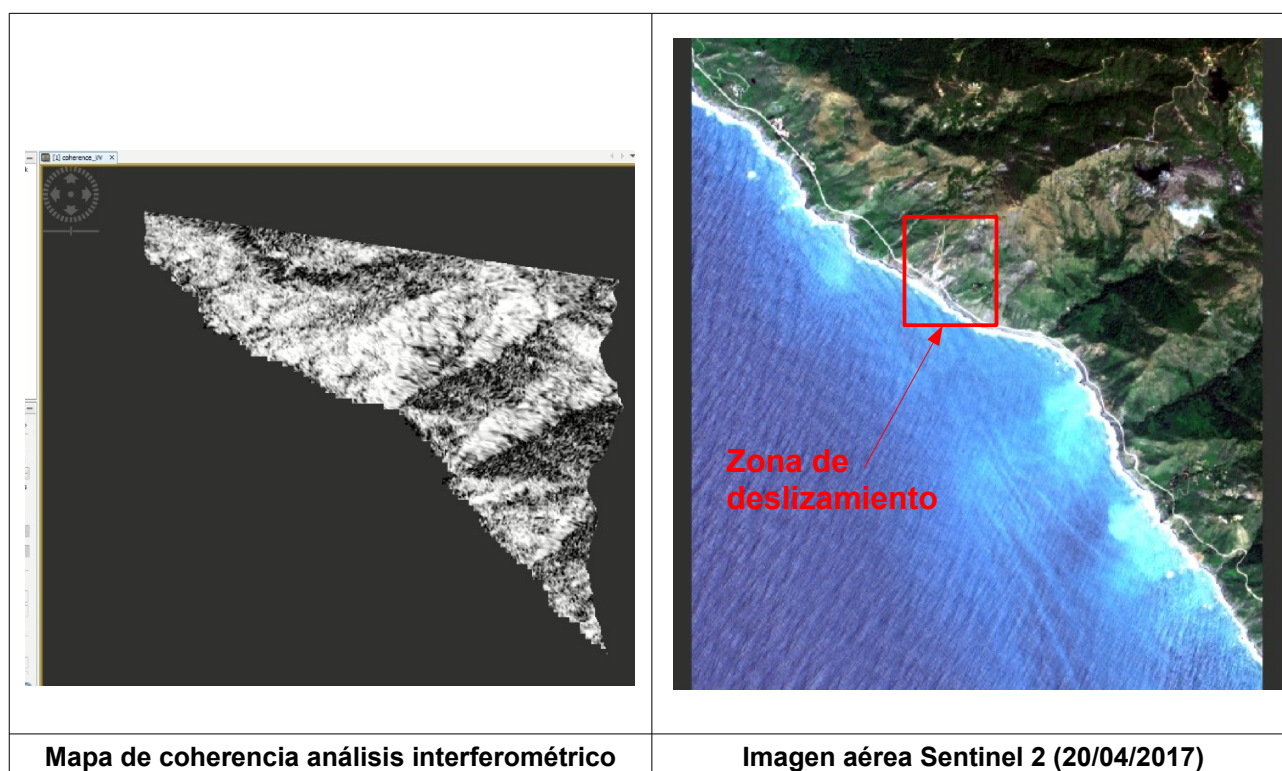


Figura 4.5-1: Comparación de mapa de coherencias con imagen en espectro visible correspondiente

La zona del deslizamiento no pertenece a estas zonas de densa vegetación y baja coherencia. En el deslizamiento, el tono verde de la vegetación que se aprecia desde la fotografía aérea es más claro, observándose la alternancia de zonas con vegetación y zonas con aparentemente escasa o ninguna vegetación, lo cuál favorecería teóricamente a la obtención de mejores resultados de coherencia. Aunque no se ha podido realizar para este trabajo la visita de la zona, observando street view en Google se comprueba desde la carretera como esta zona está formada en su mayoría por forraje y arbustos bajos, alternados con zonas sin vegetación. Esto puede observarse en las siguientes imágenes tomadas con Street View con fecha mayo-2016 desde la carretera:



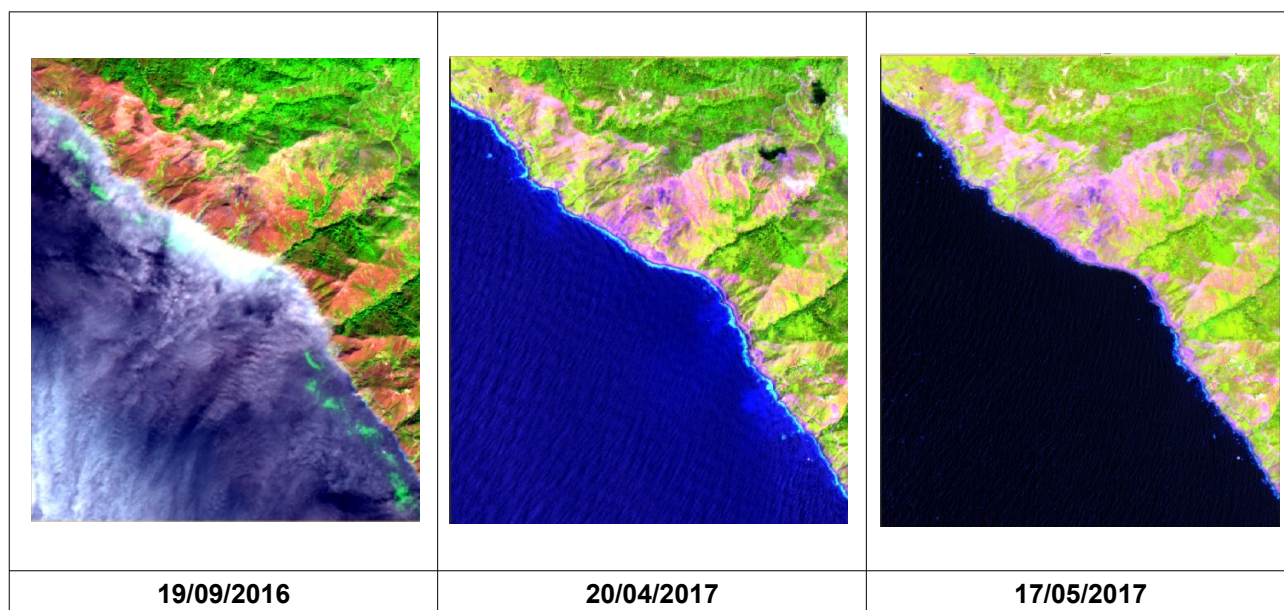
**Figura 4.5-2: Imágenes de la vegetación en la zona del deslizamiento en mayo de 2016. Fuente: Google Street View**

Se aprecia que en la época de mayo-2016, en la que corresponden las imágenes, la vegetación arbustiva y de forraje se alterna con zonas de claros en el entorno del deslizamiento.

Tal y como se ha sugerido anteriormente, la evolución anual en el crecimiento, forma y características biológicas de esta vegetación puede estar influyendo en la diferencia de coherencia mostrada en las imágenes dependiendo de la época del año.

Para completar este análisis de la vegetación de la zona se han analizado imágenes de la cubierta vegetal en SNAP que se han obtenido haciendo uso de la vista denominada "Sentinel 2 MSI Vegetation Analysis". Este análisis muestra en color verde intenso las zonas con vegetación. Se han tomado como referencia imágenes del 19/09/2016 (fecha próxima al análisis que arroja los mejores valores de coherencia), 20/04/2017 (fecha en la que se realiza un análisis, en la que no hubo precipitaciones los días de toma de imágenes pero se obtuvieron bajos valores de coherencia) y 17/05/2017 (fecha próxima al fallo catastrófico). Estas imágenes en el subconjunto de análisis general tienen el siguiente aspecto:





**Figura 4.5-3: Comparación de “Sentinel 2 MSI Vegetation Anlysis” en diferentes fechas previas al fallo catastrófico del deslizamiento.**

En las zonas de densa vegetación, que siempre tienen baja coherencia, no se aprecian diferencias significativas en la cubierta vegetal entre unas imágenes y otras. Sin embargo, si se observa con detenimiento, pueden apreciarse diferencias en el resto de zonas, observándose que en la imagen del 19/09/2016 la zona verdosa está significativamente menos extendida que en las de fechas 20/04/2017 y 17/05/2017 (siendo estas 2 últimas muy similares entre sí por su proximidad). Se ponen, pues, de manifiesto cambios en las propiedades y/o extensión de la vegetación, dependiendo de la época del año. En la siguiente imagen se muestra el detalle de la zona noroeste de la imagen, en la que se aprecian especialmente las diferencias en la vegetación.

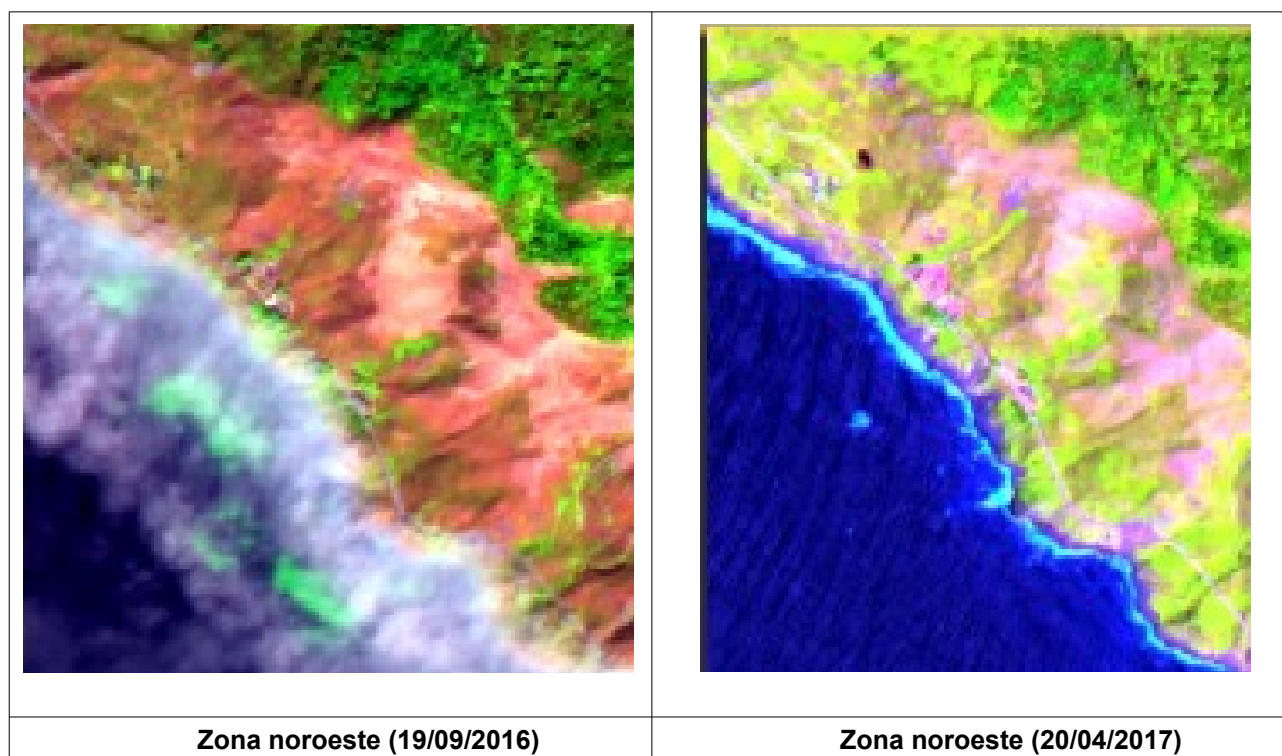


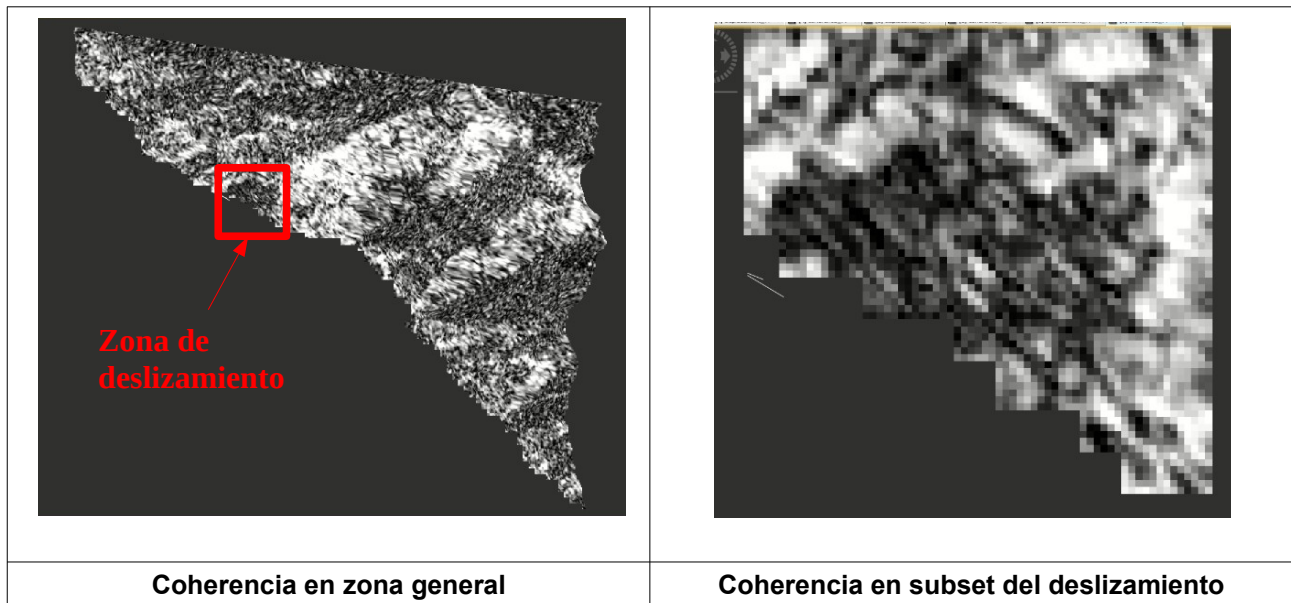
Figura 4.5-4: Comparación de “Sentinel 2 MSI Vegetation Anlysis” en zona noroeste del subset analizado

A falta de estudios adicionales de ratificación que pudieran realizarse para complementar este trabajo, parece llegarse a la conclusión de que en las zonas con cubierta vegetal de tipo forraje y arbusto en esta zona, la coherencia que puede obtenerse en análisis de interferometría diferencial tiene una considerable dependencia de la época del año en la que se realice, debido a los cambios sufridos por este tipo de vegetación a lo largo del año. Asimismo, también se pone de manifiesto que en zonas con vegetación densa tipo arboleda, la baja coherencia se mantiene todo el año.

#### **4.6 Observación de cambios en la superficie en la zona del deslizamiento antes de producirse el fallo catastrófico**

La fuerte aceleración que experimenta la zona del deslizamiento durante los 2 o 3 meses previos al fallo catastrófico queda recogida tanto en la gráfica de velocidades del estudio de Handwerger et al. [2], como en la gráfica obtenida en este estudio (ver figuras 3.3-2 y 4.4-3). Asimismo, otro indicio de que en este período las velocidades de deslizamiento y las consecuentes deformaciones experimentadas en el terreno pudieron ser bastante significativas es el hecho de que en el análisis interferométrico de pares de imágenes entre el 01/05/2017 y el 13/05/2017 el mapa de coherencia muestra un cambio de coherencia significativo justamente en la zona del deslizamiento, apareciendo esta oscura, con una geometría muy similar a zona que se ve afectada por el deslizamiento y cuyos valores de coherencia están claramente diferenciados de los de alrededor. Como ya se ha comentado, esta reducción localizada de la coherencia es propia de zonas de

deslizamiento en las etapas previas a un fallo catastrófico (Jacquemart et al., 2020). Esto puede apreciarse en la siguiente figura:



**Figura 4.6-1: Representación de mapas de coherencia del análisis con imágenes 01/05/2017 y 13/05/2017, poniendo de manifiesto la bajada de coherencia en la zona del deslizamiento**

Por ello surge la duda de si las deformaciones experimentadas en el terreno en este período previo al desastre eran tan significativas que pudieron percibirse visualmente desde imágenes aéreas de la zona. Para contrastarlo, se han analizado imágenes obtenidas en Sentinel 2 en diferentes instantes previos al fallo catastrófico. Estas imágenes se muestran a continuación:



Figura 4.6-2: Representación de diferentes imágenes Sentinel 2 de la zona de deslizamiento en torno al fallo catastrófico

Observando las imágenes se llega a la conclusión de que la resolución en las imágenes proporcionadas por Sentinel 2 (mínima de 10 m x 10 m), así como las diferencias cromáticas entre imágenes (influenciadas probablemente por una diferente iluminación solar), no permiten distinguir con claridad los cambios en la superficie que pudieran haberse producido previamente al deslizamiento. En este caso se comprueba que la mera apreciación visual de imágenes Sentinel 2 del terreno no parece ser una herramienta de análisis cualitativo eficaz para prevenir deslizamientos.

## 5 CONCLUSIONES Y APLICABILIDAD

### 5.1 Conclusiones

A lo largo del presente trabajo fin de máster se ha realizado el análisis mediante la técnica DInSAR de los desplazamientos en el terreno experimentados por el deslizamiento de Mud Creek (California, EEUU) durante el año anterior a que se produjera su fallo catastrófico el 20 de mayo de 2017. Para ello se han analizado 13 pares de imágenes radar procedentes de los satélites Sentinel 1, lo que representa un volumen de información de partida de unos 104 Gb. Adicionalmente, se han analizado 4 imágenes multiespectrales fotográficas proporcionadas por el satélite Sentinel 2 de la zona del deslizamiento, que han aportado información del aspecto de su superficie, así como de las características y evolución de su cubierta vegetal en diferentes épocas previas al fallo catastrófico.

Se han llevado a cabo principalmente 2 grupos de análisis de interferometría diferencial: análisis con pares interferométricos espaciados en torno a 2 meses y análisis con pares interferométricos con intervalos lo más cortos posibles (espaciados 12 o 24 días). El comportamiento mostrado por el deslizamiento en el conjunto de estos análisis ha resultado en la existencia de una velocidad de deslizamiento en mayo de 2016 que se va reduciendo lentamente hasta finales del verano/comienzos del otoño de 2016; posteriormente se produce un aumento de la velocidad de deslizamiento, alcanzando un máximo a principios de 2017; tras esto se produce un cierto descenso de la velocidad de deslizamiento para iniciar finalmente una segunda aceleración en los 2 meses previos al fallo catastrófico (abril y mayo de 2017), tal y como se puede apreciar en la figura 4.4-3.

Se ha comprobado que este comportamiento obtenido del deslizamiento en este trabajo es similar (a nivel cualitativo) al recogido en un análisis previo, también mediante DInSAR, que sobre esta zona realizaron Handwerger et al. en su estudio en [2]. A nivel cuantitativo se han constatado diferencias, más notables en los análisis con períodos de análisis cortos, que pueden deberse al hecho de que en [2] se utilizan valores de desplazamiento compuestos procedentes de 2 análisis Sentinel (con direcciones diferentes) más un análisis con vehículo no tripulado NASA UAVSAR. También puede influir la baja coherencia mostrada en algunos de los análisis.

A diferencia de en el estudio en [2], en este trabajo, aparte de exponer los resultados de desplazamientos obtenidos en los análisis DInSAR, se ha llevado a cabo un completo análisis sobre las posibles causas que pueden afectar a los diferentes valores de coherencia de los resultados que se han ido obteniendo en el deslizamiento de Mud Creek. Es de indicar que las diferencias de coherencia media entre unos análisis y otros pueden ser de en torno al doble, por lo tanto ha resultado de interés investigar las causas de estas variaciones.

Se ha confirmado que existen unas zonas, en el área general de estudio, que siempre presentan bajos valores de coherencia, pudiendo detectarse (mediante imágenes Sentinel 2) que la causa de ello es que contienen una vegetación frondosa de tipo arboleda, causante de esta baja coherencia en análisis DInSAR. Al margen de estas zonas, que siempre poseen valores bajos de coherencia, se ha comprobado que la coherencia del resto de zonas del análisis (incluyendo la zona exacta del movimiento de tierras) varía mucho de unos análisis a otros, y por lo tanto, la investigación acerca de los factores que influyen en la variación de coherencia se centra en lo que sucede en estas zonas. Para ello se han tenido en cuenta factores como el intervalo de tiempo transcurrido entre imágenes, la precipitación registrada en las fechas de toma de imágenes y los cambios en la vegetación existente según las diferentes épocas del año en que se realizan los análisis.

En cuanto al estudio de la influencia del tamaño elegido del intervalo entre imágenes, factor que se presumía que podía afectar a la coherencia debido a su relación con la decorrelación temporal, se ha comprobado que los períodos más cortos analizados (típicamente 12 días) no han mostrado en general valores de coherencia mejores que los análisis en los períodos más largos analizados (en torno a 2 meses), sobre todo en las épocas del año en las que se obtienen coherencias bajas. Por tanto, la reducción del período de análisis no ha resultado ser un factor determinante para conseguir mejorar la coherencia, a la vista de los resultados obtenidos.

Por su parte, también se ha confirmado que la causa que produce variaciones de coherencia entre unos análisis y otros no es exclusivamente las precipitaciones en la fecha de toma de imágenes, ya que existen varios ejemplos de pares interferométricos en los que no se registró ninguna precipitación en las fechas de toma y sin embargo muestran valores bajos de coherencia (véase como ejemplo los resultados obtenidos en el par interferométrico entre fechas 19/04/2017 y 01/05/2017 y compárese con los del par 27/09/2016 - 09/10/2016).

Finalmente se ha realizado en este trabajo un estudio de la vegetación, para tratar de constatar su influencia en los valores de coherencia obtenida. Se ha comprobado, mediante imágenes de Sentinel 2 y de Google Street View, que la vegetación predominante en las zonas cuyos valores de coherencia oscilan mucho entre unos análisis y otros es esencialmente arbusto y forraje, alternado con zonas sin vegetación. Asimismo, se ha podido apreciar, procesando las imágenes obtenidas con SNAP, que las características de la cubierta vegetal en estas zonas varían significativamente dependiendo de la época del año en la que nos encontremos (Como ejemplo puede verse como en la época de septiembre de 2016 las zonas con cubierta vegetal eran significativamente menores que en otros períodos más primaverales, como en abril de 2017). Relacionando estos cambios en la cubierta vegetal y los diferentes valores obtenidos de coherencia en las diferentes épocas, se ha llegado a la conclusión de que en Mud Creek en las zonas con vegetación de tipo arbusto y forraje, los cambios que experimenta esta vegetación a lo largo del año pueden ser los causantes de que la coherencia de los análisis de pares interferométricos sea bastante variable en función de

la época del año en que se realicen los mismos, mejorando a medida que se aproxima el verano (siendo la finalización del verano la época más favorable).

Adicionalmente, se ha comprobado en este estudio como en los pares interferométricos más próximos al fallo catastrófico de 20/05/2017 (sobre todo apreciable en el de fechas de toma de imágenes 01/05/2017 – 13/05/2017) la zona concreta del deslizamiento presenta una marcada disminución de la coherencia localizada en la misma, claramente diferenciable de la existente en la zona de alrededor. Este aspecto detectado en este trabajo refuerza la importancia y utilidad que conlleva estudiar los cambios de la coherencia de análisis DInSAR en las zonas en las que existan deslizamientos, como técnica para poder predecir cuándo se puede producir un fallo catastrófico del mismo, tal y como apuntan Jacquemart et al. en su artículo publicado en 2020 (referencia [11]).

Por otra parte, el estudio ha puesto de manifiesto que aunque era de esperar que se hubieran producido cambios en la superficie del terreno en los meses previos al fallo catastrófico lo suficientemente significativos como para que pudieran apreciarse con la mera observación visual de imágenes fotográficas en el espectro visible del Satélite Sentinel 2, en este caso se comprueba que esta estrategia no sería suficientemente fiable, y por tanto no tendría utilidad para analizar la evolución de un deslizamiento de estas características, debido a aspectos como la diferente iluminación entre imágenes o la insuficiente resolución obtenida en las mismas. En comparación, es mucho más recomendable la utilización de imágenes radar de Sentinel 1 y su procesamiento mediante la técnica DInSAR, a pesar del alto coste computacional.

## 5.2 Aplicabilidad

El fallo catastrófico del deslizamiento de Mud Creek se ha prestado (y continuará prestándose) a la realización de estudios sobre sus causas y la evolución que experimentó, debido a sus características, trascendencia y magnitud. Como ejemplo, pueden verse los estudios previos al presente trabajo de Handwerger et al. (2019), Jonathan A. Warrick et al. (2019) o Mylène Jacquemart et al. (2020). Por lo tanto, cualquier información o análisis adicional que sea aportado sobre el comportamiento del deslizamiento de Mud Creek, como el realizado en el presente trabajo, es siempre valioso para que pueda ser tenido en cuenta como información de partida en los futuros estudios que seguro seguirán llevándose a cabo de este deslizamiento.

En este trabajo se ha aportado información detallada sobre los mapas de desplazamiento obtenidos en diferentes etapas durante el año anterior a que sucediera el fallo catastrófico de Mud Creek. Esta información queda disponible para su consulta.

Asimismo, y de forma más novedosa, se aporta en el presente trabajo un estudio completo de la coherencia de los análisis mediante la técnica DInSAR llevados a cabo.



Este estudio ha puesto de manifiesto significativas variaciones de la coherencia entre unos análisis y otros, mostrando un comportamiento cíclico de los valores de coherencia, influido por la época del año en la que se lleve a cabo el análisis. También se ha detectado que existe una disminución localizada de la coherencia en la zona exacta del deslizamiento en las etapas previas a su fallo catastrófico. Como se ha indicado, la puesta en conocimiento general de todos estos comportamientos detectados en Mud Creek puede servir como importante conocimiento de partida cuando sean planificados nuevos estudios con la técnica DInSAR en la zona.

Respecto al estudio de deslizamientos en otras zonas diferentes a Mud Creek, los comportamientos analizados en este trabajo pueden servir como experiencia a tener en cuenta cuando se aprecien cambios significativos en la coherencia localizados en la zona de deslizamiento, pudiendo este hecho servir de aviso de un próximo fallo catastrófico, como ya se ha constatado en este trabajo. Asimismo, en el caso de que se analicen zonas con vegetación similar a la de Mud Creek, este estudio puede servir para predecir que la coherencia de los análisis DInSAR puede presentar un comportamiento cíclico en función de la época del año.

Es de indicar que los deslizamientos activos en nuestro país se encuentran registrados en la Base de Datos de Movimientos del terreno (BDMOVES) del Ministerio de Ciencia e Innovación, que incluye movimientos del terreno de origen geológico gravitacional que afectan a territorio español, tales como los deslizamientos. Como desarrollo futuro de este trabajo se puede plantear el estudio mediante DInSAR de la evolución de los desplazamientos y la coherencia de los análisis en alguno de estos deslizamientos, tratando de buscar relaciones entre las variaciones de coherencia y los períodos del año, así como analizar la evolución de la coherencia localizada en la zona de deslizamiento y observar posibles disminuciones en épocas previas a los períodos en que se haya registrado mayor actividad en los mismos.

## 6 REFERENCIAS.

- [1] Eric Jameson Fielding y Alexander Louis Handwerger, NASA ARSET (2019). *SAR Interferométrico para la Observación de Deslizamientos de Tierra..* Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4 de diciembre de 2019. URL: <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-sar-para-desastres-y-aplicaciones-hidrologicas>
- [2] Alexander L. Handwerger, Mong-Han Huang, Eric Jameson Fielding, Adam M. Booth & Roland Bürgmann (2019). *A shift from drought to extreme rainfall drives a stable landslide to catastrophic failure.* Revista Nature, 7 de febrero de 2019. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-38300-0>
- [3] Instituto Geográfico Nacional (2018): *Fundamentos de teledetección radar.* Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea mediante acuerdo 2018/SI2.810140/04
- [4] Beatriz Alacid, Damián Mira, Pablo Gil, Fernando Torres (2015). *DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA ZONA CIEGA DE UN SLAR.* Actas de las XXXVI Jornadas de Automática, Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC) 2 - 4 de septiembre de 2015.
- [5] NASA ARSET (2016). Introducción a Radar. 16 de julio de 2016.
- [6] Zhong Lu, Daniel Dzurisin (2014). *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes.* Springer-2014.
- [7] Jonathan A. Warrick et al. (2019). *Characterizing the catastrophic 2017 Mud Creek landslide, California, using repeat structure-from-motion (SfM) photogrammetry.* Springer Link, 14 de marzo de 2019.
- [8] Thomas M. Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan W. Chipman (2008). *Remote sensing and image interpretation.* John Wiley & Sons, c2008.
- [9] Burrows, K., Walters, R. J., Milledge, D., Spaans, K., and Densmore, A. L. (2019). *A new method for large-scale landslide classification from satellite radar, Remote Sensing,* 11, <https://doi.org/10.3390/rs11030237>, 2019.
- [10] Yun, S. H., Hudnut, K., Owen, S., Webb, F., Simons, M., Sacco, P., Gurrola, E., Manipon, G., Liang, C., Fielding, E., Milillo, P., Hua, H., and 335 Coletta, A. (2015). *Rapid damage mapping for the 2015 Mw 7.8 Gorkha Earthquake Using Synthetic Aperture radar data from COSMO-SkyMed and ALOS-2 satellites.* Seismological Research Letters, 86, 1549–1556, <https://doi.org/10.1785/0220150152>, 2015.
- [11] Mylène Jacquemart and Kristy Tiampo (2020). *Radar coherence and NDVI ratios as landslide early warning indicators.* Natural Hazards and Earth System Sciences, 27 de julio de 2020.