



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DINÁMICA DE GLACIARES Y GLACIARES ROCOSOS EN LOS PIRINEOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA RADAR DE SATÉLITE UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL-1

Alumno: Adrián Martínez Fernández

Tutor: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Dpto: Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Septiembre, 2021



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ing. Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Don ANTONIO MIGUEL RUIZ ARMENTEROS, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: DINÁMICA DE GLACIARES Y GLACIARES ROCOSOS EN LOS PIRINEOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA RADAR DE SATÉLITE UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL-1, que presenta ADRIÁN MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2021

El alumno:

Los tutores:

Adrián Martínez Fernández

Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Agradecimientos

La realización de este Trabajo Fin de Grado para el Grado en Ing. Geomática y Topográfica ha sido posible gracias al apoyo, contribuciones y paciencia del director, Antonio Miguel Ruiz Armenteros.

Gracias al Grupo de Investigación Reconocido Patrimonio Natural y Geografía Aplicada (GIR PANGEA) de la Universidad de Valladolid, por introducirme en el entorno de La Paúl, y al Laboratorio de Cartografía Digital y Análisis 3D del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH, Burgos) por apoyar la realización de este trabajo.

Finalmente, agradecer la ilusión de mis padres, y el apoyo y perseverancia de Gizéh, sin ellos, no me habría metido en este “lío”.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ZONA DE ESTUDIO	8
2.1. Glaciar y glaciar rocoso de La Paúl	8
3. CONJUNTO DE DATOS Y MÉTODOS	10
3.1. Criterios para la selección de pares interferométricos	10
3.1.1. Fechas sin cobertura nival	10
3.1.2. Cobertura de las zonas de estudio	13
3.1.3. Línea base temporal y perpendicular	13
3.2. Visualización, selección y descarga de imágenes	14
3.3. Procesado de imágenes.....	16
3.3.1. Preprocesado (TOPSAR Split y Orbit).....	18
3.3.2. Corregistro (<i>Back Geocoding</i> ; ESD).....	19
3.3.3. Interferograma.....	20
3.3.4. TOPSAR Deburst.....	22
3.3.5. Recorte por la zona de interés	22
3.3.6. Eliminación Fase Topográfica	23
3.3.7. Filtro de Fase (<i>Goldstein</i> y <i>Multilooking</i>).....	24
3.3.8. Desenrollado de la fase (<i>Unwrapping</i>)	25
3.3.9. Fase a Desplazamiento.....	27
3.3.10. Creación de stack y máscaras	27
3.4. Preparación de resultados.....	30
4. RESULTADOS.....	30
4.1. Interferogramas mensuales del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl	31
4.1.1. Adquisiciones del 28-jul-2016 y 09-ago-2016.....	32
4.1.2. Adquisiciones del 09-ago-2016 y 21-ago-2016.....	33
4.1.3. Adquisiciones del 21-ago-2016 y 14-sep-2016.....	34
4.1.4. Adquisiciones del 14-sep-2016 y 02-oct-2016.....	35
4.1.5. Adquisiciones del 23-jul-2017 y 04-ago-2017.....	36
4.1.6. Adquisiciones del 04-ago-2017 y 09-sep-2017.....	37
4.1.7. Adquisiciones del 09-sep-2017 y 21-sep-2017.....	38
4.1.8. Adquisiciones del 21-sep-2017 y 03-oct-2017.....	39
4.1.9. Adquisiciones del 05-ago-2018 y 29-ago-2018.....	40
4.1.10. Adquisiciones del 29-ago-2018 y 10-sep-2018.....	41
4.1.11. Adquisiciones del 10-sep-2018 y 22-sep-2018.....	42

4.1.12.	Adquisiciones del 31-jul-2019 y 18-ago-2019.....	43
4.1.13.	Adquisiciones del 18-ago-2019 y 11-sep-2019.....	44
4.1.14.	Adquisiciones del 11-sep-2019 y 11-oct-2019.....	45
4.1.15.	Adquisiciones del 18-ago-2020 y 05-sep-2020.....	46
4.1.16.	Adquisiciones del 05-sep-2020 y 17-sep-2020.....	47
4.2.	Desplazamiento estacional del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl	48
4.2.1.	Adquisiciones del 28-jul-2016 y 02-oct-2016	49
4.2.2.	Adquisiciones del 23-jul-2017 y 03-oct-2017	50
4.2.3.	Adquisiciones del 05-ago-2018 y 22-sep-2018.....	51
4.2.4.	Adquisiciones del 31-jul-2019 y 11-oct-2019.....	52
4.2.5.	Adquisiciones del 18-ago-2020 y 17-sep-2020.....	53
4.3.	Desplazamiento anual del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl	54
4.3.1.	Adquisiciones del 02-oct-2016 y 03-oct-2017	55
4.3.2.	Adquisiciones del 03-oct-2017 y 22-sep-2018.....	56
4.3.3.	Adquisiciones del 22-sep-2018 y 11-oct-2019.....	57
4.3.4.	Adquisiciones del 11-oct-2019 y 17-sep-2020.....	58
5.	DISCUSIÓN	59
5.1.	Análisis mensual	59
5.2.	Análisis estacional.....	61
5.3.	Análisis anual	62
5.4.	DInSAR en la monitorización del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl	62
6.	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	65
	Bibliografía	68
	Anexos	71
	Anexo 1. Imágenes Sentinel-2	71
	Anexo 2. DInSAR glaciar de Maladeta.....	81

1. INTRODUCCIÓN

Los glaciares son masas permanentes de hielo denso que se mueven constantemente. Estos, se deforman y fluyen bajo tensiones inducidas por su propio peso y la topografía del entorno. En climas templados, como los Pirineos, los glaciares almacenan agua en forma de hielo durante las estaciones más frías y la liberan cuando las temperaturas más cálidas del verano hacen que se derrita el hielo. Esta liberación de agua suele ser un recurso especialmente importante para la biodiversidad de la región, entre otros. Sin embargo, la reposición de hielo en este tipo de cuerpos helados no ha dejado de reducirse, especialmente desde inicios del siglo XXI (Hugonnet et al., 2021). Vinculados a la criosfera (superficie de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido), los glaciares se han visto directamente afectados por el calentamiento global. Conocer sus tasas de pérdida de hielo o deformación, implica la aportación de más información sobre la criosfera y, con ello, aspectos como el cambio climático.

Menos conocidos, pero también relacionados con la criosfera, son los glaciares rocosos. Los glaciares rocosos activos son formas geomorfológicas dinámicas formadas por derrubios o bloques rocosos que se mantienen unidos a partir de hielo intersticial. Normalmente se encuentran en latitudes y/o altitudes elevadas y suelen extenderse ladera abajo en forma de lengua rocosa (similar a glaciares o coladas de lava) en zonas montañosas. Son una clara expresión del permafrost (suelo congelado) de montaña y su actividad, que puede variar de milímetros a varios metros al año, está estrechamente ligada al calentamiento global. El estudio del comportamiento de los glaciares rocosos y su distribución, puede dar información valiosa en aspectos como geodiversidad, geoconservación o recursos para el geoturismo, entre otros (Serrano et al., 2019).

En las últimas décadas, las fotos aéreas o las imágenes ópticas de satélite han sido de las herramientas más ampliamente utilizadas para generar inventarios regionales de glaciares y glaciares rocosos. Desde hace unos años, con la llegada de satélites con sensores activos basados en radar de apertura sintética (SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*) ha sido posible cuantificar el movimiento de glaciares y glaciares rocosos. Estas plataformas y sensores han permitido aspectos como la

identificación objetiva de glaciares rocosos activos y la cuantificación de su movimiento (Villarroel et al., 2018). Se trata de una herramienta complementaria y poderosa que permite mejorar los inventarios existentes y/o ayudar al control de deformaciones en la superficie de estos cuerpos, sin la necesidad de estar físicamente en su entorno. Estos aspectos mejoran significativamente el uso tradicional de imágenes satelitales ópticas, donde el grado de actividad de los cuerpos helados, como los glaciares o glaciares rocosos, se determina a partir de criterios geomorfológicos, lo que da un enfoque cualitativo y subjetivo de las variaciones (Villarroel et al., 2018). A partir de técnicas como interferometría SAR diferencial (DInSAR, por el inglés *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*), es posible explotar las imágenes SAR para la estimación de tasas de movimiento en estos cuerpos (Sánchez-Gómez & Navarro, 2017; Villarroel et al., 2018). La diferencia de fase entre dos ecos o señales SAR tomados con ángulos de visión ligeramente diferentes de una misma zona del terreno, puede utilizarse para detectar variaciones en la superficie de tan solo unos pocos centímetros.

La distribución gratuita de imágenes SAR como las que ofrece la Agencia Espacial Europea (ESA) con la constelación de satélites Sentinel-1 (S1; Tabla 1.1) desde el 2014 (Sentinel-1 Mission, 2021), ha favorecido aún más la aplicación de estas imágenes para la monitorización de diferentes formas geomorfológicas de alta montaña. Varios estudios han demostrado las ventajas de la combinación de técnicas DInSAR e imágenes Sentinel-1 para el control de la superficie de glaciares (Sánchez-Gómez & Navarro, 2017; Lippl, Vijay, & Braun, 2018) y glaciares rocosos (Villarroel et al., 2018; Strozzi et al., 2020). El estudio de cuerpos helados con esta técnica suele tener lugar en regiones montañosas extensas y ampliamente estudiadas, como los Alpes o los Andes. Sin embargo, a nuestro conocimiento, la aplicación de esta técnica en los Pirineos se ha limitado al control de formas geomorfológicas no directamente relacionadas con la criosfera, como deslizamientos de tierra (Herrera et al., 2013).

Modo de adquisición	IW (<i>Interferometric Wide Swath</i>)
Período mínimo de revisita	6 días (desde el lanzamiento de S1B)
Longitud de onda	Banda-C, 5.55 cm
Polarización	VV
Resolución	14 / 4 m
Ángulo de incidencia	36° - 42°

Tabla 1.1. Características generales de las imágenes Sentinel-1

El no uso de la interferometría radar para el control de deformaciones en cuerpos helados pirenaicos, no significa una falta de seguimiento del estado de la criosfera en la región. La aplicación de técnicas geomáticas para el control de la superficie de diferentes cuerpos helados en los Pirineos es constante desde hace años (González García et al, 2017; López-Moreno et al., 2016; López-Moreno et al., 2019; Serrano et al., 2019; Serrano et al., 2020) debido a la importancia de la criosfera como parte integral del sistema climático global.

Por los motivos expuestos, el presente TFG busca estudiar la aplicabilidad de la técnica DInSAR con imágenes Sentinel-1 para el análisis de dinámicas superficiales en cuerpos helados pirenaicos. En concreto, se busca aplicar la técnica en el glaciar y glaciar rocoso de La Paúl, en el Macizo de Posets, Huesca. Se trata de dos cuerpos helados con una superficie muy diferente (una formada por hielo y la otra por bloques de roca), que reciben el mismo nombre. La dinámica del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl a partir de técnicas geomáticas ha sido objeto de estudio a lo largo del tiempo (Martínez-Fernández et al., 2019; Rico, 2019). Sin embargo, la aplicación de interferometría SAR diferencial con imágenes S1 puede ser un reto debido a localización y orientación de estas formaciones.

El entorno de La Paúl se encuentra cubierto de nieve casi todo el año, es en la época estival cuando los cuerpos helados comienzan a perder este manto nival de forma acelerada y comienza a observarse la superficie de hielo o rocosa de los cuerpos helados. Es también en esas fechas, cuando las formaciones deberían mostrar más variaciones en su superficie debido al aumento de las temperaturas y la pérdida de hielo. Por ello, este estudio se centra en los meses de verano, inicios de otoño, para el análisis de la dinámica los cuerpos. A través de imágenes ópticas de la plataforma Sentinel-2, se determinará la primera y última fecha de las adquisiciones (imágenes S1) a emplear en el análisis DInSAR.

Como primera aproximación en la aplicación de la técnica en el entorno de La Paúl, en el estudio se emplean tres estrategias para el análisis de las deformaciones. La primera, busca determinar variaciones entre adquisiciones con menos de 30 días entre ellas. La segunda, emplea la primera y última adquisición de un mismo año. Finalmente, la tercera, busca determinar variaciones entre la última adquisición de dos

años consecutivos. Idealmente, esta última estrategia debería mostrar valores similares a los obtenidos en estudios previos sobre el glaciar y glaciar rocoso de La Paúl (Martínez-Fernández et al., 2019; Rico, 2019). Debido a que diferentes factores (p.ej., atmosféricos, orbitales) pueden afectar a los resultados de la técnica (InSAR Principles, 2021), estas estrategias son aplicadas con adquisiciones del 2016 al 2020. Con ello, se busca identificar patrones en la aplicación de la técnica sobre los cuerpos helados estudiados.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. Glaciar y glaciar rocoso de La Paúl

En el macizo del Posets (Parque Natural Posets-Maladeta, Pirineos españoles) se encuentran el glaciar y el glaciar rocoso de La Paúl (Lat. 42°39'40" N/ Long. 0°26'34" E; Figura 2.1). Ambos cuerpos helados se sitúan en la cara noroeste del Pico de Posets (3375 m), zona que forma parte de la figura de protección del Monumento Natural de Glaciares Pirenaicos.

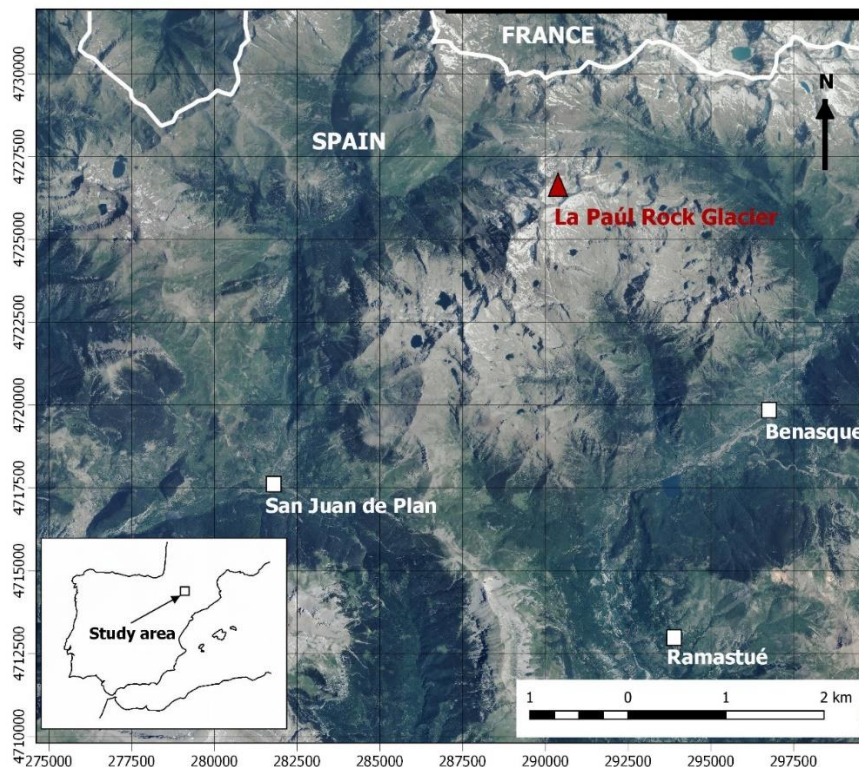


Figura 2.1. Localización (ETRS89, UTM H31) del glaciar rocoso de la Paúl (Martínez-Fernández et al., 2019). El glaciar de La Paúl se encuentra en el mismo circo, a unos 200-400 m al oeste del glaciar rocoso.

El glaciar rocoso (Figura 2.2) está compuesto por bloques periglaciares con una lengua de unos 400 m de longitud, extendida entre 2830 y 2950 m de altitud, que ha sido erosionada en su borde noroeste durante la Pequeña Edad de Hielo (Serrano & Martín-Moreno, 2018). A unos 300 m al oeste, se encuentra el glaciar de La Paúl (Figura 2.2). En la actualidad, el glaciar cuenta con una extensión aproximada de unas 6 ha, acercándose cada vez más al estatus de un helero (masa de hielo de alta montaña) debido a su continua pérdida de extensión, que supera las 4 ha desde comienzos de siglo XXI (Rico, 2019). El glaciar se encuentra arrinconado en su parte sur y oeste al pie de las paredes del mismo pico y de sus crestas cimeras, por encima de los 2900 m.



Figura 2.2. Fotografías del glaciar rocoso (arriba) y del glaciar (abajo) de La Paúl a vista de dron durante la campaña de campo del GIR PANGAEA (Universidad de Valladolid) en el 2020.

3. CONJUNTO DE DATOS Y MÉTODOS

El flujo de trabajo principal hasta la obtención de los resultados para este estudio se muestra a continuación:

- Criterios para la selección de pares interferométricos
- Visualización, selección y descarga de imágenes
- Procesado de imágenes
- Preparación de resultados

3.1. Criterios para la selección de pares interferométricos

Los criterios para la selección de los pares de interferométricos se muestran a continuación:

- Fechas sin cobertura nival
- Cobertura de las zonas de estudio
- Línea base temporal y perpendicular

3.1.1. Fechas sin cobertura nival

El objetivo de este estudio es la localización y cuantificación de deformaciones en el hielo o estructura rocosa de cuerpos helados de alta montaña. Estos cuerpos helados, se encuentran cubiertos de nieve casi todo el año, siendo la época estival cuando pierden esta cobertura casi por completo. Por ello, un primer filtro para la selección de pares interferométricos se definió a partir de la observación de imágenes ópticas de la plataforma Sentinel-2 (S2).

El visualizador web EO Browser (Sentinel Hub, 2021) permite la visualización de imágenes de múltiples plataformas satelitales, entre ellas imágenes de S2. Además, el visualizador ofrece la posibilidad de aplicar combinaciones de bandas o índices para un mejor análisis de las características del terreno (Figura 3.1). Para este estudio, se empleó la combinación Color Verdadero (combinación de bandas 4,3,2) y el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI por sus siglas en inglés; Ecuación 3.1) sobre imágenes S2 Level-2A (con corrección atmosférica) o Level-1C (sin corrección atmosférica) en caso de no disponer de ellas. La combinación permite ver la imagen

de forma similar a como la veríamos con nuestra propia vista, mientras que el índice permite resaltar y diferenciar entre cubiertas de nubes y nieve-hielo.

$$\text{NDSI} = (\text{Banda 3} - \text{Banda 11}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 11})$$

(Ecuación 3.1)

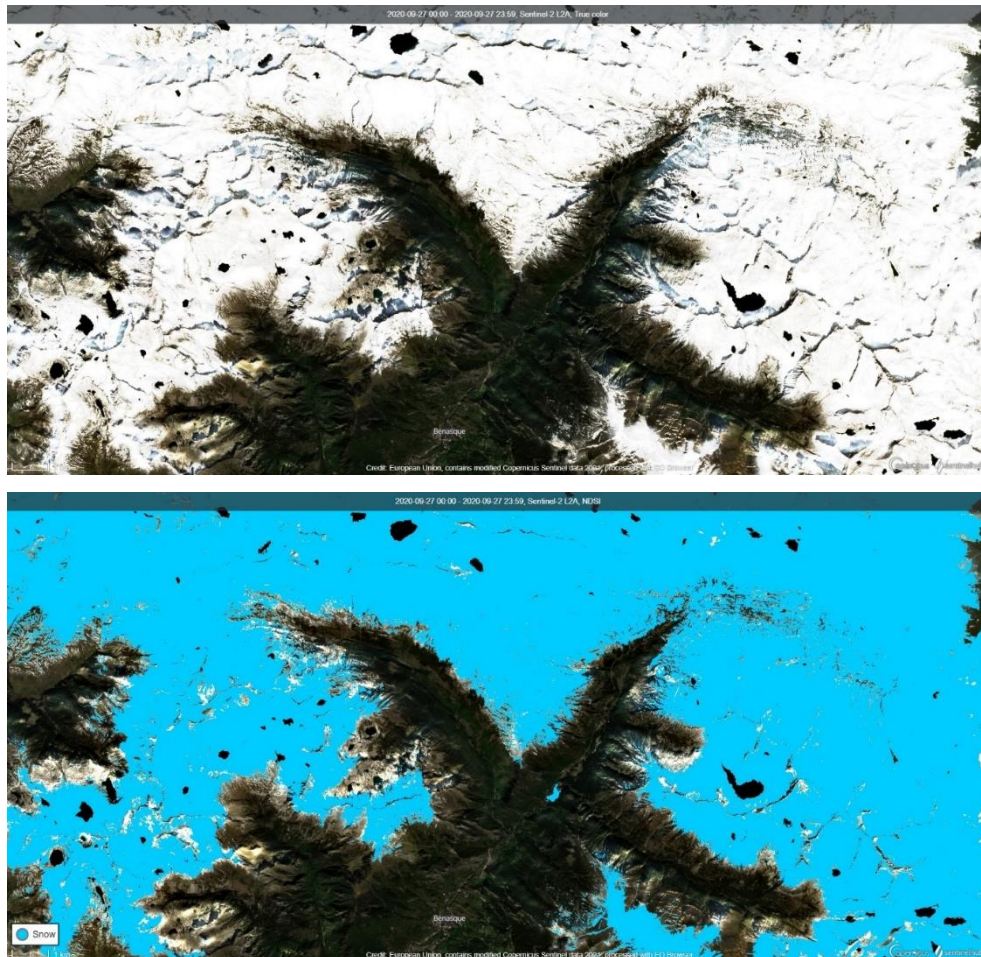


Figura 3.1. Imágenes Sentinel-2 del 27-sep-2020 donde se muestra parte de los Pirineos donde se encuentra la zona de estudio. Combinación Color Verdadero arriba e Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) abajo. Color azul representa la superficie de nieve-hielo determinada por el índice.

De este modo, se analizaron imágenes S2 del 1 de julio al 31 de octubre, desde el 2016 hasta el 2020. A lo largo del mes de julio, principios de agosto, los glaciares pirenaicos pierden gran parte de la cobertura de nieve que cubre los glaciares y glaciares rocosos (Figura 3.2), mientras que, a finales de septiembre, inicios de octubre, las primeras nevadas de otoño vuelven a cubrir con un manto blanco los cuerpos helados. A lo largo de esos meses, es cuando los glaciares suelen perder mayor espesor de hielo y los glaciares rocosos suelen sufrir mayores deformaciones por las altas temperaturas y la pérdida del recubrimiento nival.

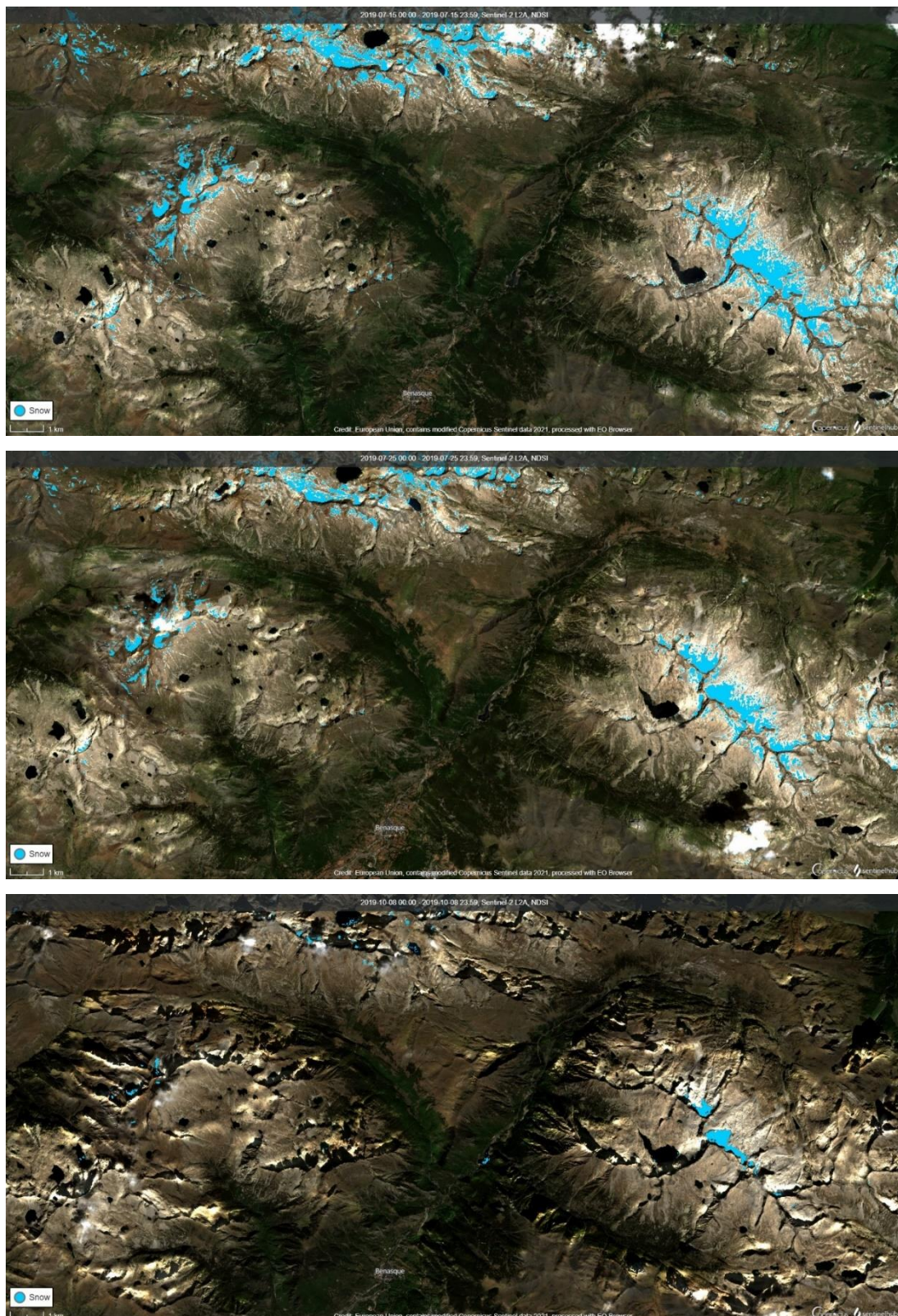


Figura 3.2. Vistas del entorno de los glaciares con el índice NDSI a 15-jul-2019 (arriba) 25-jul-2019 (centro) y a 08-oct-2019 (abajo). Imágenes del 15 al 25 de julio muestran la desaparición de restos de nieve en glaciares rocosos de la zona. La imagen del 8 de octubre fue la última imagen del Sentinel-2 antes de las primeras nevadas del otoño

A continuación, se muestra el rango de fechas seleccionadas en función de la cobertura de nieve apreciable en las imágenes Sentinel-2 (Tabla 3.1). En el Anexo 1. Imágenes Sentinel-2, pueden encontrarse algunas de las imágenes S2 visualizadas para la definición de estas fechas.

Año	Inicio	Final
2016	30-jul	08-oct
2017	25-jul	13-oct
2018	14-ago	28-sep
2019	25-jul	08-oct
2020	03-ago	12-sep

Tabla 3.1. Rango de fechas determinadas a partir de imágenes S2 para la obtención de imágenes radar en función de la cantidad de nieve en el entorno de estudio

3.1.2. Cobertura de las zonas de estudio

Se determinaron los *tracks* que ofrecieron imágenes de los glaciares y glaciares rocosos objeto de estudio. Debido a la orientación Sur-Norte de los cuerpos helados y la estructura de los satélites (obtención de imágenes a partir de emisión lateral de la señal), no se estableció una preferencia con relación al tipo de órbita ascendente o descendente de las imágenes. Los tracks que obtienen imágenes de la zona son: 132 ascendente (asc); 30 asc; 110 descendente (des); 8 des. La selección del *track* más adecuado para este estudio, se realizó a partir de pruebas con cada uno de ellos.

3.1.3. Línea base temporal y perpendicular

La línea base temporal representa el tiempo entre las dos adquisiciones, mientras que la línea base perpendicular representa la distancia entre dos puntos de adquisición perpendiculares a la dirección de visualización del satélite.

Las líneas base temporales deben ser lo suficientemente reducidas como para que no haya pérdida de coherencia entre imágenes, pero lo suficientemente elevada como para determinar alguna variación en la superficie de estudio. Por otro lado, las líneas base perpendiculares elevadas son adecuadas para la generación de Modelos Digitales de Elevación, pero no para la determinación de deformaciones en la superficie. Por ello, es necesario contar con líneas perpendiculares reducidas para una mejor cuantificación de desplazamientos.

Se establecieron como condicionantes para la selección de las imágenes SAR, una línea base temporal inferior a 30 días entre adquisiciones consecutivas de un

mismo año y una línea base perpendicular inferior a ± 50 m a partir de la una adquisición del 2018 (año intermedio entre el rango de años estudiado).

3.2. Visualización, selección y descarga de imágenes

El proceso de visualización y descarga de imágenes S1 se llevó a cabo a partir de la plataforma VERTEX, del centro de procesamiento de datos y estación terrestre de seguimiento de satélites *Alaska Satellite Facility* del *Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks* (ASF, 2021). VERTEX permite definir zonas de interés en su visualizador geográfico para realizar búsquedas con diferentes filtros (p.ej., plataforma, fechas, productos, etc.). Incluso, permite realizar búsquedas en función de tracks orbitales y líneas base (Figura 3.3).

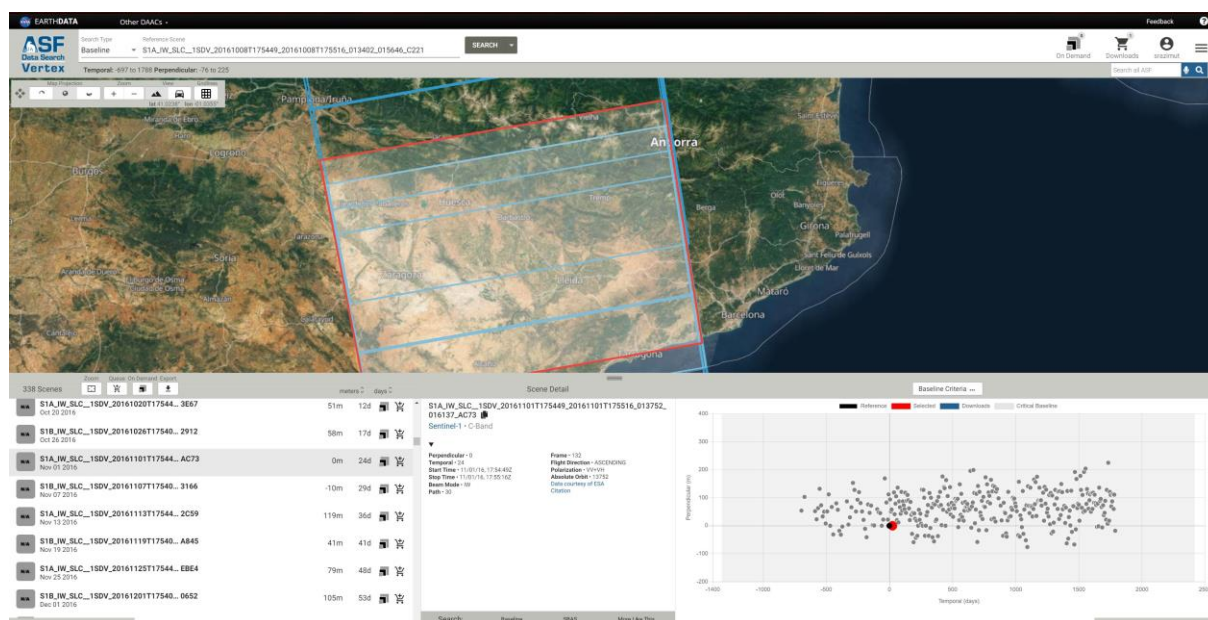


Figura 3.3. Plataforma de visualización y descarga VERTEX (Alaska Setellite Facility). Resultado de búsqueda “Baseline” sobre el track 30 en la zona de estudio.

Con el fin de determinar los tracks que podrían ofrecer mejores resultados, se realizaron pruebas con pares interferométricos del 2019. Se establecieron una serie de condiciones:

- Las fechas de las imágenes tenían que corresponder con fechas donde quedara poca cantidad de nieve en la escena.
- Línea base perpendicular inferior a ± 50 m.
- Línea base temporal inferior a 30 días.

Con estas condiciones se buscó evitar la decorrelación de las imágenes S1 y obtener resultados, teóricamente, más fiables que con líneas base mayores o fechas con más cobertura de nieve en el entorno.

De esto modo, pruebas como las del track 110 des, entre las fechas 11-sep-2019 y 5-oct-2019, aunque se encontraron en fechas con poca nieve al ser finales de la época estival, líneas base relativamente reducidas (31 m y 24 días) y coherencia alta (0.95%), los resultados finales no mostraron apenas información de los desplazamientos acontecidos en las zonas de interés.

Finalmente, se escogió el track 30 asc por los, a priori, mejores resultados en comparación al resto de órbitas. Seleccionado el track, se procedió a la búsqueda de las imágenes (Tabla 3.2) según los criterios (fechas y líneas base) establecidos en la sección anterior (3.1). El glaciar y glaciar rocoso de La Paúl se encontrarían en la subfranja (IW, *Subswath*) 2 y se procesarían tres ráfagas (*Bursts*) que en función del satélite y año variarían entre los *bursts* 1-3 y 5-7.

Fecha adquisición	Plataforma
28-jul-2016	S1A
09-ago-2016	S1A
21-ago-2016	S1A
14-sep-2016	S1A
02-oct-2016	S1B
23-jul-2017	S1A
04-ago-2017	S1A
09-sep-2017	S1A
21-sep-2017	S1A
03-oct-2017	S1A
05-ago-2018	S1B
29-ago-2018	S1B
10-sep-2018	S1B
22-sep-2018	S1B
18-ago-2019	S1A
11-sep-2019	S1A
11-oct-2019	S1B
18-ago-2020	S1B
05-sep-2020	S1A
17-sep-2020	S1A

Tabla 3.2. Imágenes S1 seleccionadas para el estudio

Seleccionadas las imágenes, se procedió a la descarga masiva de las imágenes Sentinel-1 *L1 Single Look Complex* (SLC) en VERTEX. La descarga masiva

tiene lugar a partir de un script de *Phyton* (*.py) que es descargado desde la misma plataforma VERTEX (Figura 3.4). Existen instrucciones para la descarga de las imágenes radar en el mismo script (basta con abrir el *.py con un bloc de notas como Notepad++ para verlas). De forma resumida, el flujo de trabajo para la descarga consiste ejecutar el script en la carpeta donde se quieren descargar las imágenes a través del terminal o ventana de comandos. Es necesario tener instalado el lenguaje Phyton en el equipo para ejecutar el script. Ejemplo empleado para la descarga masiva en VERTEX de algunas de las imágenes para el presente proyecto en el terminal de Windows 10:

`"C:\Users\PC\Downloads>python ./download-all-2021-09-04_08-59-17.py"`

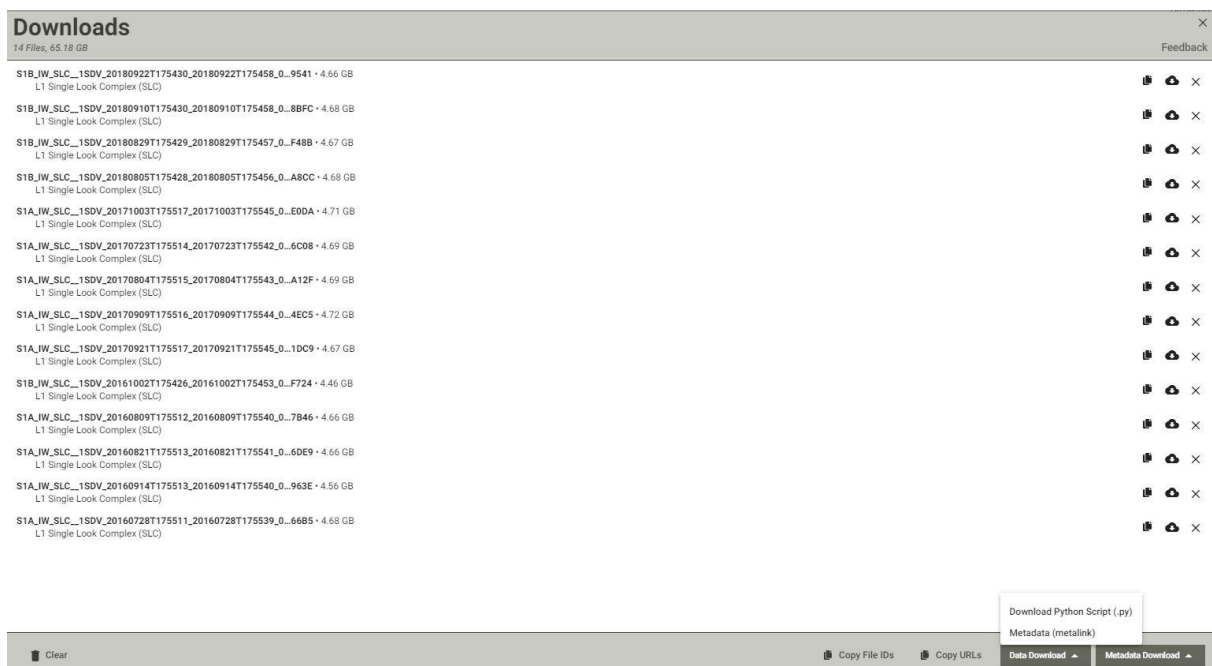


Figura 3.4. Visualización de los productos SLC (L1 Single Look Complex) en la zona de descargas de la plataforma VERTEX. En la sección Data Download, es posible descargar el Python script (*.py) para la descarga masiva de productos.

3.3. Procesado de imágenes

El procesamiento de las imágenes SLC (*L1 Single Look Complex*) de las plataformas Sentinel-1 (S1A y S1B), se realizó a partir de *Sentinel Application Platform* (SNAP v.8.0, 2021). Software gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea (ESA) parte de sus *Toolboxes* para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

El flujo de trabajo seguido con SNAP para la obtención de desplazamientos en las superficies estudiadas, se basó en la guía de la ESA “*TOPS Interferometry Tutorial*” para la *Sentinel-1 Toolbox* (ESA Tutorials, 2021); los webinars de *RUS Copernicus Training* (RUS Training, 2021) y los *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation* de la Agencia Espacial Europea (InSAR Principles, 2021). Se aconseja dirigirse a este último para completar las explicaciones dadas en este estudio.

Por comodidad, el flujo de trabajo seguido para el tratamiento de los pares interferométricos, se ha separado en fases de procesado. A continuación, se detalla brevemente dicho flujo de trabajo y se muestran los gráficos (en caso de haberlo empleado) definidos en el *Graph Builder* de SNAP para agilizar el procesado de las imágenes.

Primera fase de procesado (Figura 3.5):

- Pre-procesado. - *TOPSAR Split; Orbit*
- Corregistro. - *Back Geocoding; ESD*
- Interferograma
- *TOPSAR Deburst*

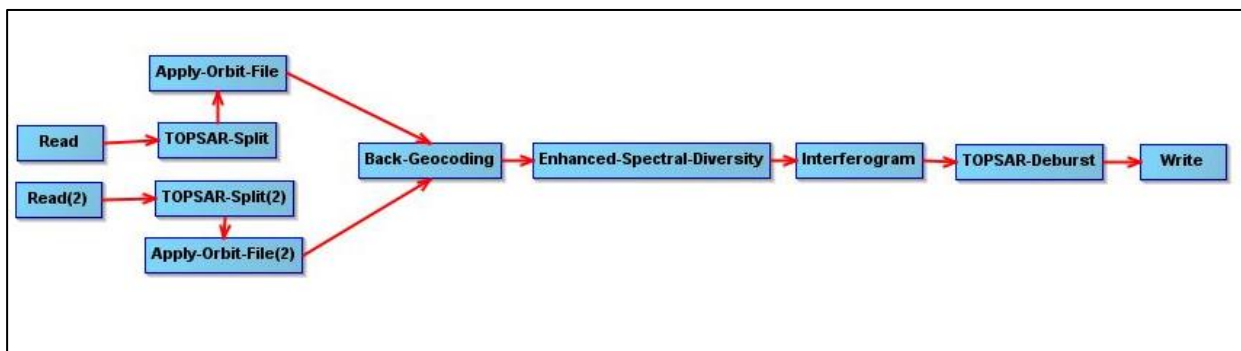


Figura 3.5. Vista del gráfico (Graph Builder, SNAP) diseñado para la primera fase de procesado de las imágenes S1.

Segunda fase de procesado (Figura 3.6):

- Recorte de la zona de interés
- Eliminación Fase Topográfica
- Filtros de Fase. - *Goldstein Filter; Multilooking*

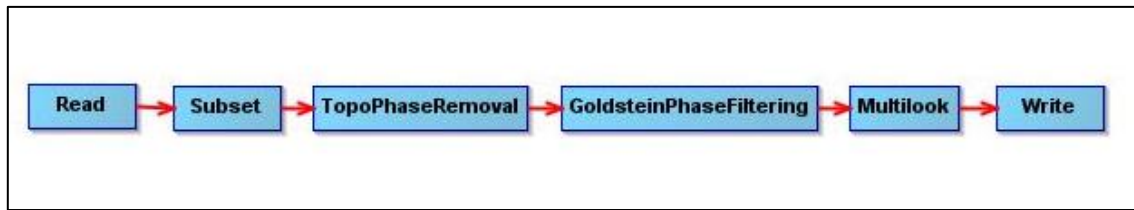


Figura 3.6. Vista del gráfico (Graph Builder, SNAP) diseñado para la segunda fase de procesamiento de las imágenes S1.

Tercera fase de procesamiento:

- Desenrollado de la fase (*Unwrapping*)
- Fase a Desplazamiento
- Creación de *stack* y máscaras
- Correcciones del terreno

3.3.1. Preprocesado (TOPSAR Split y Orbit)

La primera fase de procesamiento comienza con el preprocesado de los pares de imágenes a través de la selección de las ráfagas (*bursts*) requeridas para el estudio. Para ello, se aplicó la herramienta TOPSAR Split (Figura 3.7) para la elección de la subfranja (*subswath*), polarización y ráfagas que contuviera el glaciar y glaciar rocoso de La Paúl en ambas imágenes S1. Aunque la zona estudiada tiene dimensiones reducidas y puede abarcarse con una única ráfaga, se optó por seleccionar tres para evitar errores en el corregistro debido las características del terreno (zona montañosa).

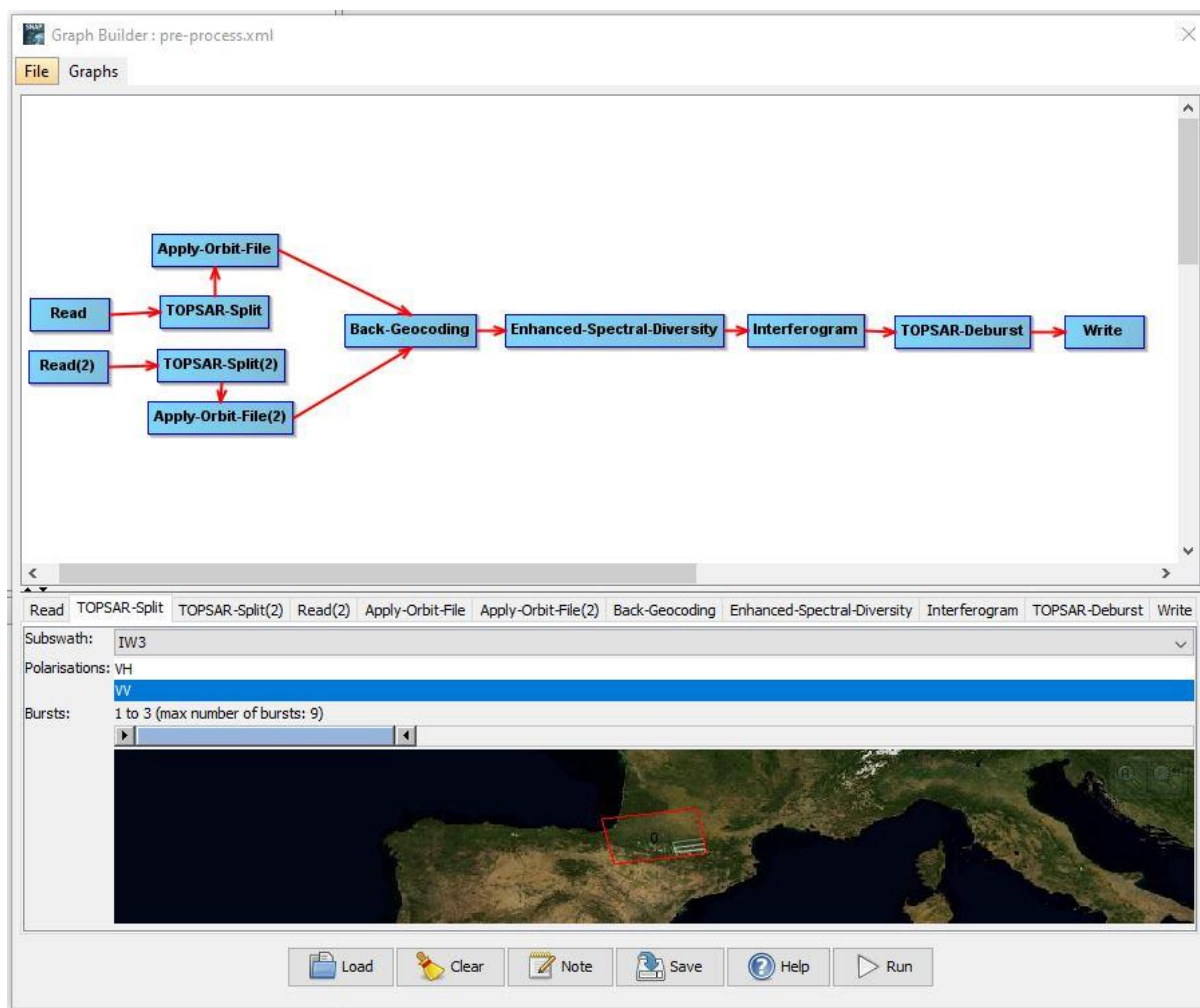


Figura 3.7. Definición de parámetros para el TOPSAR Split (subfranja, polarización y ráfaga) en el Graph Builder de SNAP.

Tras la selección de las ráfagas, se proporcionó información sobre la posición de los satélites durante la adquisición de la imagen SAR. Para ello, se aplicaron ficheros con datos precisos de la órbita de los satélites (Figura 3.8). Dichos ficheros son descargados automáticamente en SNAP según los metadatos de la imagen.



Figura 3.8. Definición de parámetros para la aplicación de órbita precisa en el Graph Builder de SNAP.

3.3.2. Corregistro (*Back Geocoding*; ESD)

Para explotar la diferencia de fase entre adquisiciones, es necesario corregir las imágenes SAR. El proceso de corregistro trata de alinear ambas imágenes a un

nivel subpixel a partir de estadísticas extraídas de las imágenes. Para esta alineación, se emplearon las herramientas *Back Geocoding* y *Enhanced Spectral Diversity* (ESD). *Back Geocoding* (Figura 3.9) realiza un correregistro del par de imágenes con la ayuda de un Modelo Digital de Elevación (MDE). Para este estudio se empleó el MDE *Copernicus 30 Global DEM*, el cual se descarga automáticamente desde SNAP. ESD (Figura 3.10) permite el correregistro a nivel subpixel cuando se está trabajando con varios bursts.

The screenshot shows the SNAP Graph Builder interface with the 'Back-Geocoding' tool selected. The configuration parameters are as follows:

Parameter	Value
Digital Elevation Model:	Copernicus 30m Global DEM (Auto Download)
DEM Resampling Method:	BICUBIC_INTERPOLATION
Resampling Type:	BISINC_5_POINT_INTERPOLATION
Mask out areas with no elevation	☒
Output Deramp and Demod Phase	☐
Disable Reramp	☐

Figura 3.9. Definición de parámetros para el correregistro Back Geocoding en el Graph Builder de SNAP.

The screenshot shows the SNAP Graph Builder interface with the 'Enhanced Spectral Diversity' tool selected. The configuration parameters are as follows:

Parameter	Value
Registration Window Width:	512
Registration Window Height:	512
Search Window Accuracy in Azimuth Direction:	16
Search Window Accuracy in Range Direction:	16
Window oversampling factor:	128
Cross-Correlation Threshold:	0.1
Coherence Threshold for Outlier Removal:	0.3
Number of Windows Per Overlap for ESD:	10
ESD Estimator:	Periodogram
Weight function:	Inv Quadratic
Temporal baseline type:	Number of images
Maximum temporal baseline (inclusive):	4
Integration method:	L1 and L2
Do not write target bands (store range and azimuth offsets in json files).	☐
Use user supplied range shift (please enter it below)	☐
The overall range shift in pixels:	0.0
Use user supplied azimuth shift (please enter it below)	☐
The overall azimuth shift in pixels:	0.0

Figura 3.10. Definición de parámetros (por defecto) para el correregistro Enhanced Spectral Diversity en el Graph Builder de SNAP.

3.3.3. Interferograma

La fase interferométrica de cada píxel de la imagen SAR depende de la diferencia en las trayectorias seguidas por la señal emitida. De forma resumida, la diferencia de fase entre imágenes SAR es lo que permite determinar desplazamientos en el terreno. Sin embargo, esta fase se ve afectada por varios factores que producen la variación

de fase ϕ en el interferograma final. Con el fin de determinar la diferencia de fase producida por la deformación del terreno, es necesario eliminar o mitigar parte de estos factores.

Los factores que principalmente contribuyen a esta variación de fase son (Ecuación 3.2):

- Fase plana de la tierra ϕ_{flat} (curvatura de la Tierra)
- Fase topográfica ϕ_{DEM} (superficie topográfica de la tierra)
- Condiciones atmosféricas ϕ_{atm} (cambio de humedad, temperatura y presión entre las dos adquisiciones)
- Ruido ϕ_{noise} (cambios de los *scatterers*, ángulos de incidencia, etc.)
- Deformación de la superficie ϕ_{disp} (cambios en la superficie entre las dos adquisiciones). Factor que interesa determinar para la posterior derivación de desplazamientos en el terreno.

$$\phi = \phi_{DEM} + \phi_{flat} + \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{noise}$$

(Ecuación 3.2)

Con interferometría diferencial (DInSAR) se estima la contribución de la superficie de la Tierra (ϕ_{flat} y ϕ_{DEM}) al considerarse iguales en ambas adquisiciones, quedando la diferencia de fase atribuida a las variaciones del terreno (ϕ_{disp}) entre ambas épocas. La contribución a la variación de fase de las condiciones atmosféricas (ϕ_{atm}) y al ruido (ϕ_{noise}) no es fácilmente modelable, por lo que no es posible eliminar estos factores mediante DInSAR. Para que su contribución en la variación de fase (ϕ) sea lo más reducida posible, es aconsejable trabajar en épocas secas del año y trabajar con líneas base perpendiculares pequeñas.

Además, en el proceso de creación del interferograma, se estiman valores de coherencia en los píxeles. La coherencia es un indicador de la calidad de la fase interferométrica obtenida entre la imagen empleada como referencia y la imagen empleada como esclava durante el proceso DInSAR. Existen diferentes factores que pueden afectar a la pérdida de coherencia, pero emplear líneas base temporales pequeñas puede evitar parte de esta pérdida.

En la Figura 3.11 se muestra el proceso de generación del interferograma con corrección de fase por curvatura de la Tierra en SNAP. Mientras que en el siguiente apartado 3.3.6 se muestra como eliminar la fase topográfica.

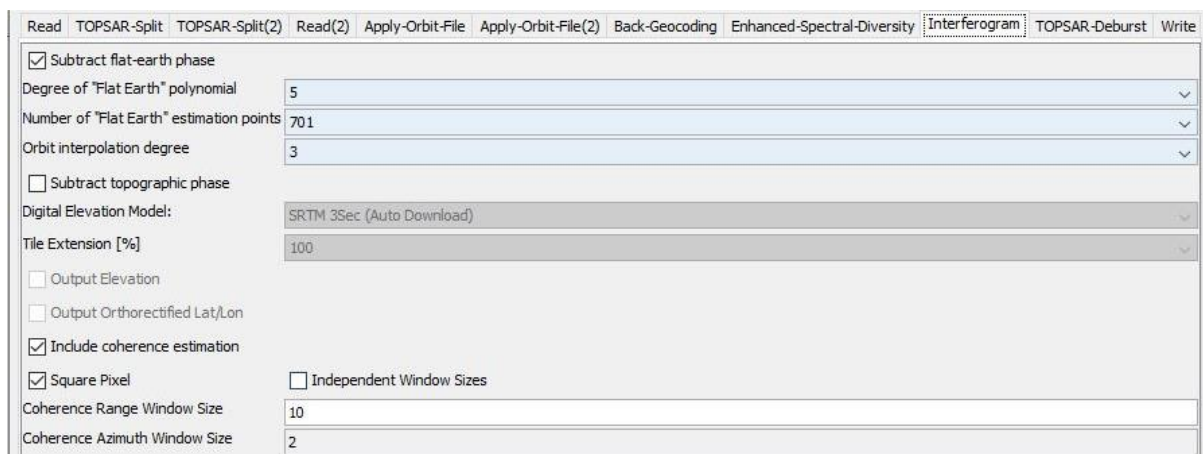


Figura 3.11. Definición de parámetros para la generación del interferograma en el Graph Builder de SNAP.

3.3.4. TOPSAR Deburst

El paso TOPSAR Deburst (Figura 3.12) elimina las líneas sin información entre ráfagas o bursts propias de las imágenes S1. No necesita la definición de ningún parámetro más que la polarización empleada en el interferograma.

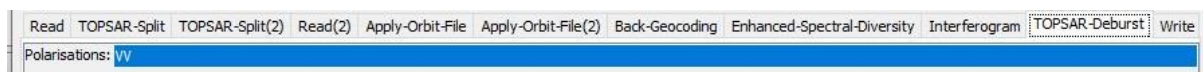


Figura 3.12. Parámetro de TOPSAR Deburst para la eliminación de líneas sin información entre ráfagas del interferograma en el Graph Builder de SNAP.

3.3.5. Recorte por la zona de interés

La segunda fase de procesamiento comienza con el recorte de la zona de interés (subset). Este paso es opcional, pero es recomendable para reducir tiempo de procesamiento si la extensión de la zona de trabajo es menor que una ráfaga. La zona de recorte se definió a partir de un rectángulo en el visor geográfico del Graph Builder de SNAP (Figura 3.13).

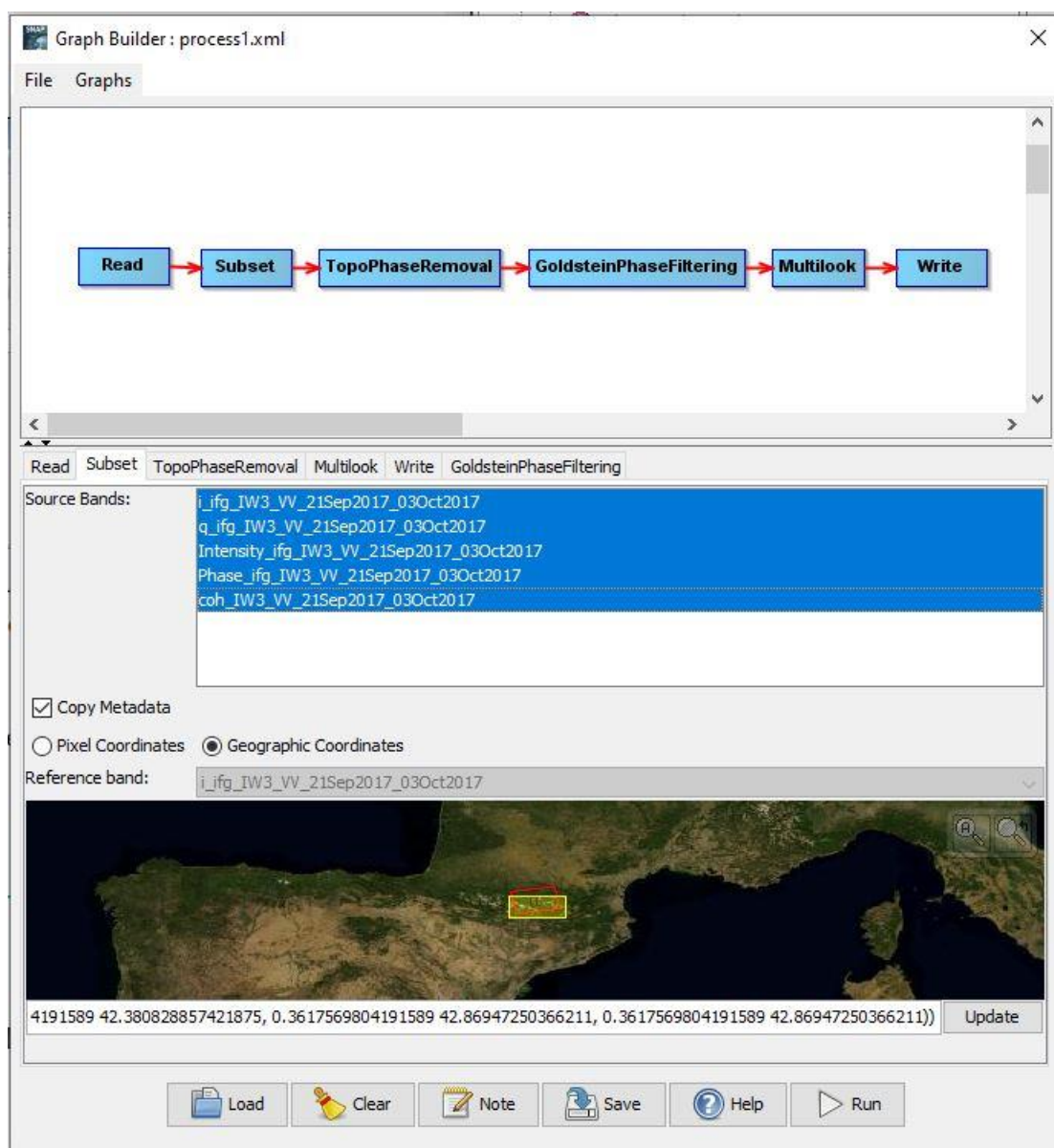


Figura 3.13. Parámetros del recorte sobre la zona de interés realizado en el Graph Builder de SNAP.

3.3.6. Eliminación Fase Topográfica

La eliminación de la fase topográfica sustrae los efectos de la topografía en la fase del interferograma (ϕ_{DEM}). Del mismo modo que en el corrección de las adquisiciones, entre los parámetros se seleccionó el MDE *Copernicus 30m Global*, entre otros (Figura 3.14). Para más información sobre la fase topográfica ver apartado 3.3.3.

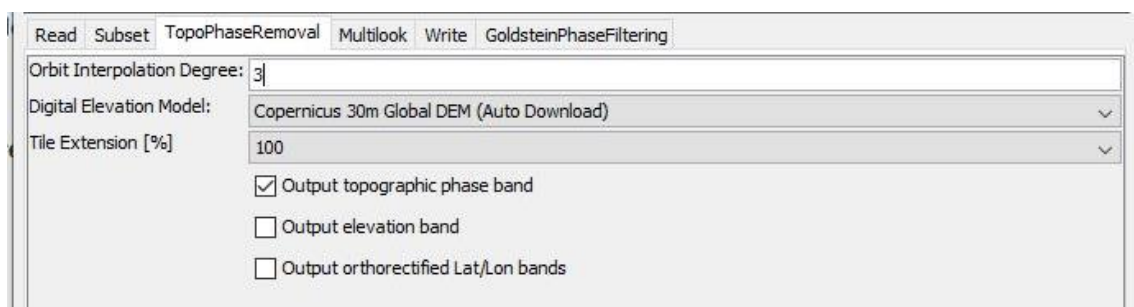


Figura 3.14. Parámetros para la eliminación de la fase topográfica en el Graph Builder de SNAP.

3.3.7. Filtro de Fase (*Goldstein y Multilooking*)

La aplicación de filtros a la fase interferométrica pueden mejorar los resultados, reduciendo ruido y otros errores de procesado. Filtros como Goldstein permiten mejorar la calidad de las franjas existentes en el interferograma y con ello los resultados de posteriores pasos como el desenrollado de la fase. Otros filtros menos complejos como Multilooking, permiten mejorar también los resultados, aunque en perjuicio de la resolución espacial del interferograma.

Aunque son múltiples las opciones para definir los parámetros de ambos filtros, se optó por emplear los parámetros por defecto (Figura 3.15 y Figura 3.16).

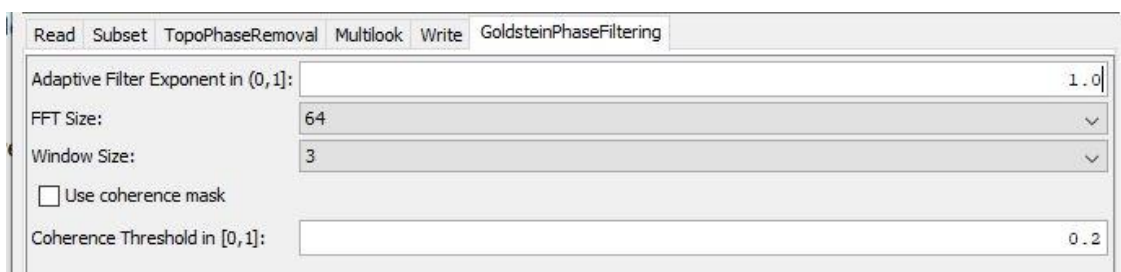


Figura 3.15. Parámetros (por defecto) para el filtro de fase Goldstein en el Graph Builder de SNAP.

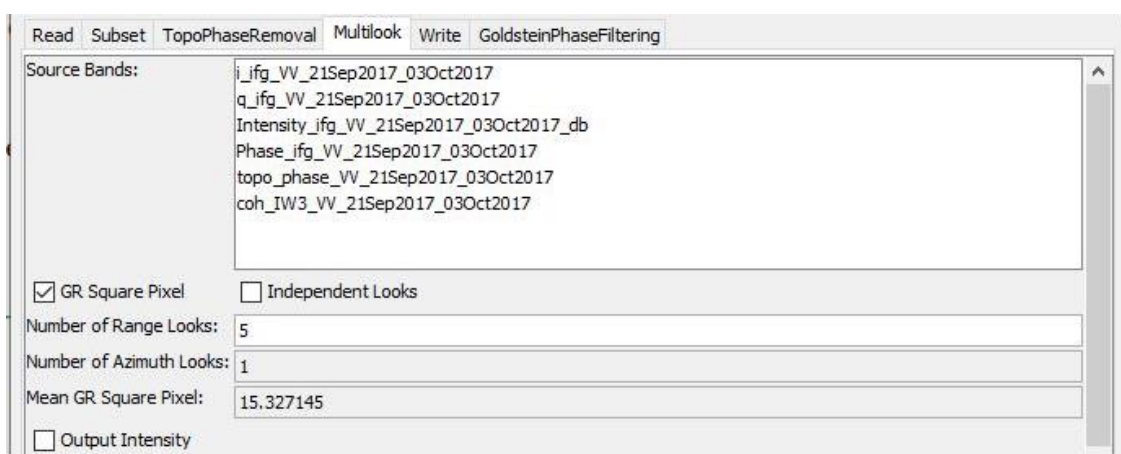


Figura 3.16. Parámetros (por defecto) para el filtro Multilooking en el Graph Builder de SNAP.

3.3.8. Desenrollado de la fase (*Unwrapping*)

La tercera fase de procesamiento comienza con desenrollar la fase (*unwrapping*). En un interferograma, la fase es ambigua y solo se conoce su valor dentro de una escala 2π . Para relacionar la fase con desplazamientos, la fase tiene que ser desenvuelta. De forma simplificada, desenrollar la fase implica resolver la ambigüedad de la fase integrando la diferencia de fase entre píxeles vecinos. Esto da un número entero de ciclos de la fase (2π es igual a ciclo) equivalente a la ambigüedad. Eliminando este número de ciclos, se obtiene un interferograma aplanado (libre de ambigüedad), y toda diferencia de fase entre dos puntos del interferograma proporciona la variación real del terreno.

SNAP cuenta con el plugin SNAPHU (SNAPHU Plugin, 2021) que realiza el proceso de desenrollado de la fase o, lo que es lo mismo, permite restaurar el múltiplo correcto de 2π a cada punto de la imagen de fase del interferograma. El plugin consta de tres partes; una primera para exportar el interferograma y los parámetros de procesamiento a emplear para el desenrollado (Figura 3.17); una segunda para desenrollar la fase (Figura 3.18); y una tercera para importar la fase desenvuelta (Figura 3.19).

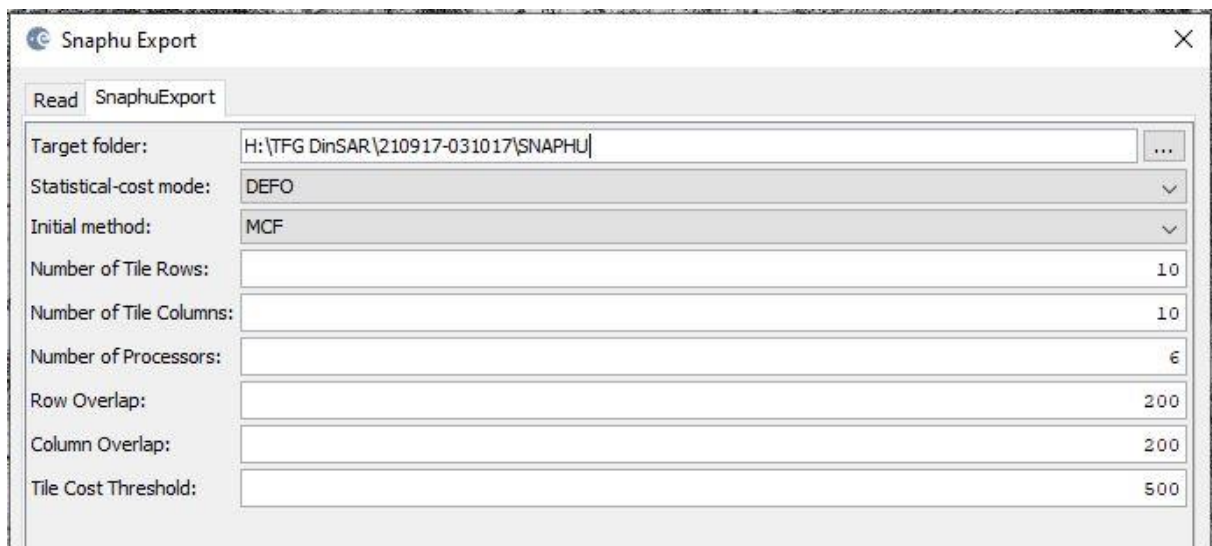


Figura 3.17. Parámetros empleados para desenrollar la fase con SNAPHU en SNAP.

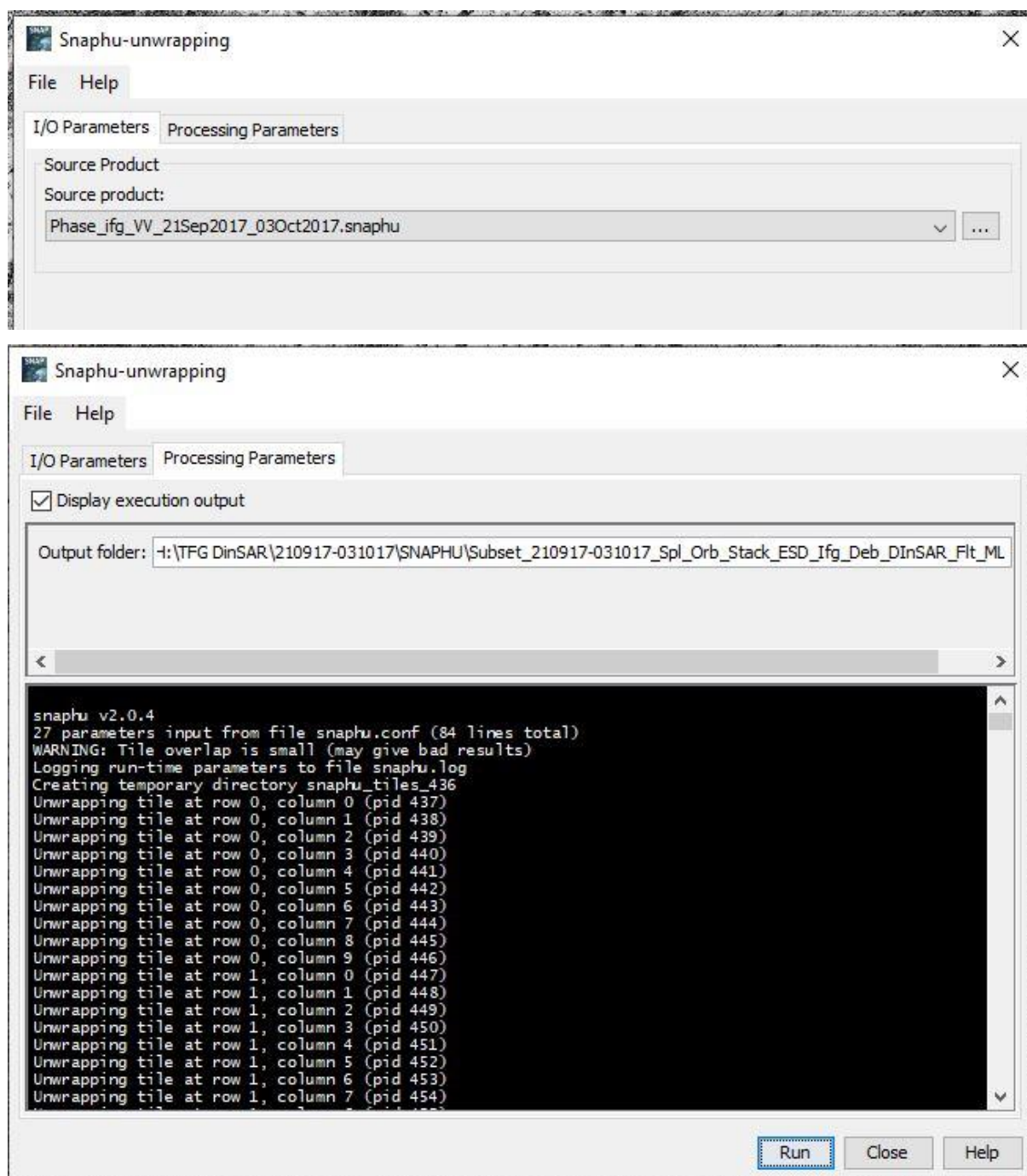


Figura 3.18. Parámetros y proceso de unwrapping con SNAPHU en SNAP.

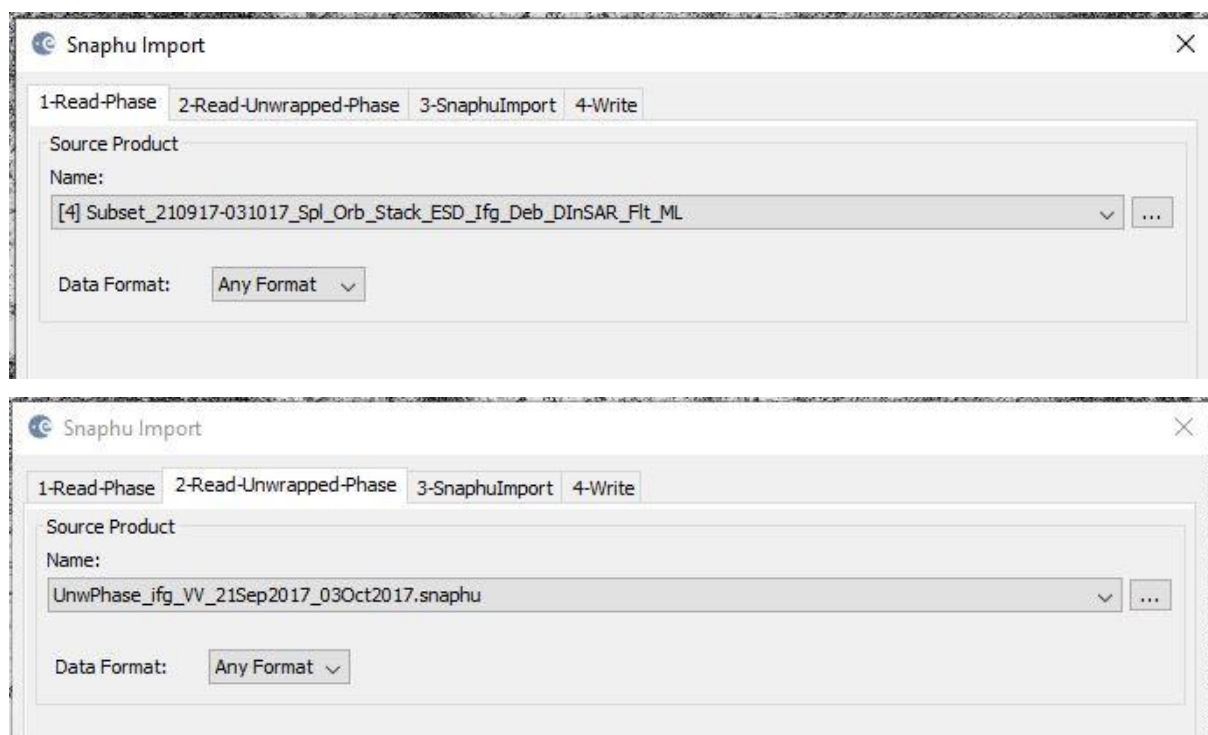


Figura 3.19. Parámetros empleados para importar la fase desenvuelta desde SNAPHU.

3.3.9. Fase a Desplazamiento

Es posible cuantificar el desplazamiento (metros) en cada píxel de la imagen en la dirección LOS (*Line of Sight*, línea entre el sensor y un píxel) una vez desenvuelta la fase. Si la imagen de referencia tiene fecha de adquisición anterior a la esclava, los valores positivos significarán un levantamiento del terreno, mientras que los negativos significarán el hundimiento de la superficie.

A partir del archivo importado de SNAPHU, la herramienta *Phase to Displacement* de SNAP realiza la conversión de fase a desplazamiento. No necesita la definición de ningún parámetro más allá de la localización donde se va a almacenar el producto resultante.

3.3.10. Creación de stack y máscaras

Con el objetivo de unificar bandas de los diferentes productos generados, se empleó la herramienta *Create Stack* de SNAP. De este modo, se unió en una única imagen las bandas resultado del proceso de *Unwrapping* y de *Phase to Displacement*. Detalle de las imágenes con las que se generó uno de los *stacks* y los parámetros empleados en la Figura 3.20.

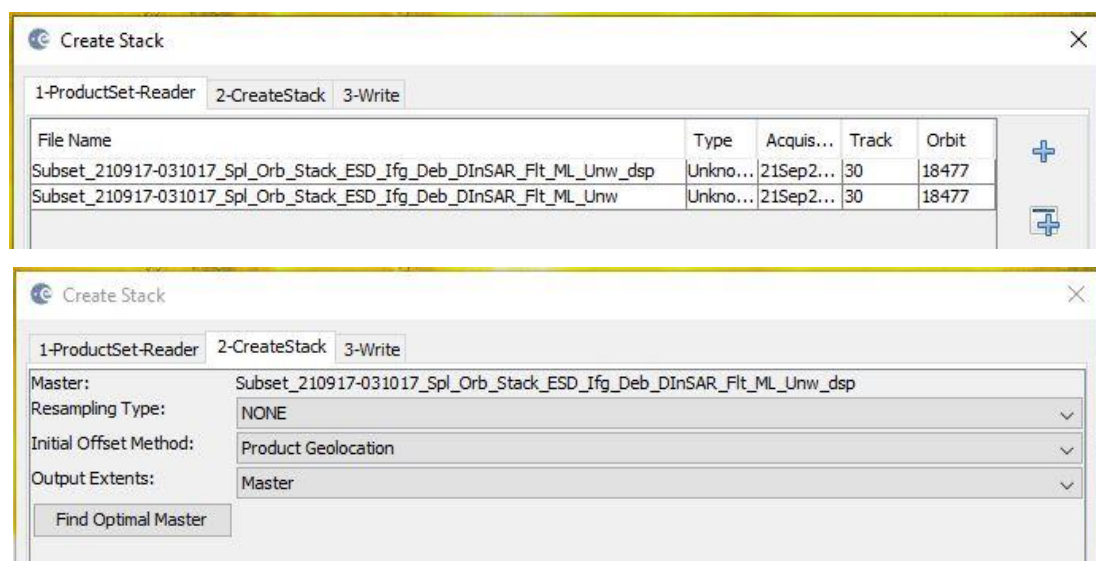


Figura 3.20. Ejemplo de los parámetros empleados para la generación de un stack con la fase desenvuelta y los desplazamientos en la dirección LOS

Unificadas en un mismo stack, las bandas de coherencia y desplazamiento se emplearon para generar una nueva banda que eliminara los píxeles en la banda de desplazamientos donde la coherencia fuera inferior a 0.3. Esto se consiguió a partir de Matemáticas de Bandas (*Band Maths*) sobre el stack. La nueva banda se llamó “displacement_mask_cohe0.3” y se generó a partir de la expresión mostrada en la Figura 3.21.

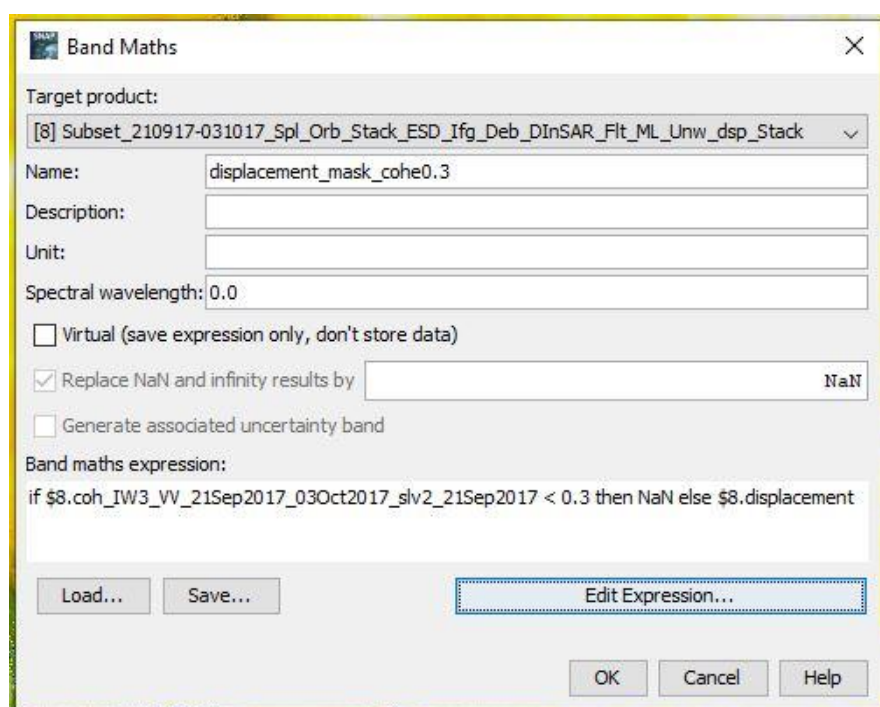


Figura 3.21. Generación de una nueva banda “displacement_mask_cohe0.3” donde no se mostraran desplazamientos con coherencias asociadas inferiores a 0.3.

3.3.11. Correcciones del terreno

El último paso en SNAP antes de la exportación de los resultados es la georreferenciación. A partir de la corrección del terreno *Range-Doppler* de SNAP, se transformaron los sistemas de referencia satelitales a un sistema de referencia global como el WGS84. En este proceso, se seleccionaron las bandas de desplazamiento, coherencia y el desplazamiento con valores de coherencia iguales o superiores a 0.3, además de definirse otros parámetros para la georreferenciación (Figura 3.22).

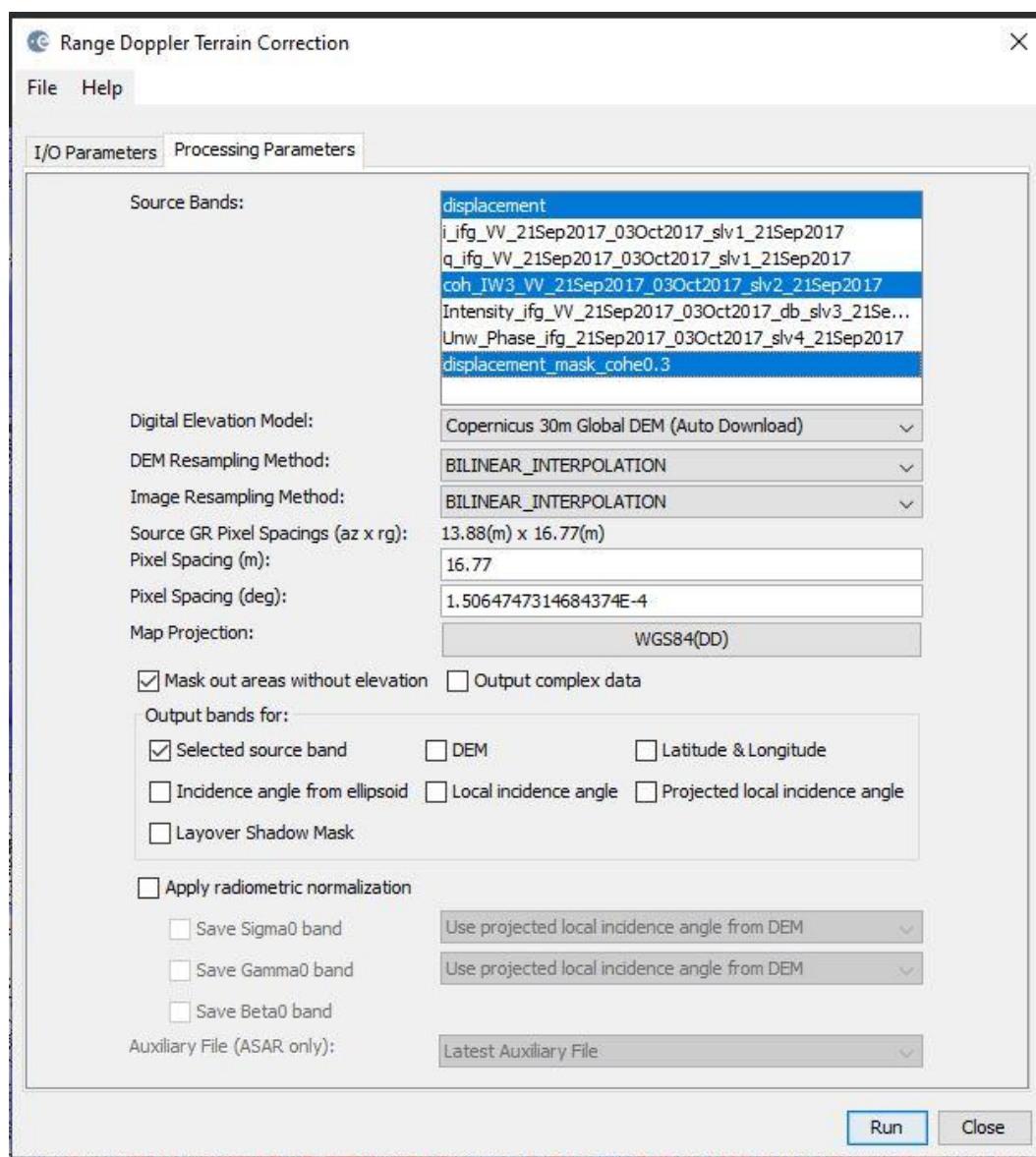


Figura 3.22. Bandas y parámetros empleados para la corrección del terreno o georreferenciación.

3.4. Preparación de resultados

Las imágenes procesadas en SNAP, compuestas por las bandas desplazamiento (“displacement”), coherencia (“coh_”*) y desplazamiento con máscara (“displacement_mask_cohe0.3”) fueron exportadas como GeoTIFF para su posterior análisis en el Sistema de Información Geográfica QGIS v.3.8 y v.3.18 (QGIS Project, 2021). De este modo, se generó una imagen *.tif por cada par interferométrico procesado.

En QGIS se identificaron zonas supuestamente estables con coherencia de la fase superior a 0.6. El objetivo fue corregir el desplazamiento relativo, propio de la técnica, que sufre toda la escena. El desplazamiento se sustraería para redefinir con valores de desplazamiento nulos esas zonas. La selección de zonas estables se realizó a partir del servicio WMS de ortofotografías del PNOA de máxima actualidad del Instituto Geográfico Nacional (Proyecto PNOA, 2021).

Para facilitar la identificación de los resultados, las imágenes DInSAR se apoyaron sobre las ortofotografías del PNOA de máxima actualidad gracias al servicio WMS que ofrece el IGN. Además, se definió un contorno aproximado de la extensión del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl a partir de ortofotografías PNOA del 2012. Finalmente, se modificó el estilo de las bandas de cada imagen GeoTIFF para una mejor identificación de las variaciones.

4. RESULTADOS

Un total de 25 interferogramas generados para la determinación de desplazamientos mensuales (uso de adquisiciones consecutivas), estacionales (uso de la primera y última adquisición de un mismo año) y anuales (uso de la última adquisición entre años consecutivos), fueron derivadas a partir del proceso detallado en la sección 3.3 de este estudio.

4.1. Interferogramas mensuales del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl

En este apartado, se muestran los resultados de desplazamiento entre adquisiciones consecutivas con una línea base temporal igual o inferior a 30 días. Las deformaciones se acompañan con ortofotos del PNOA y contornos de los cuerpos helados para facilitar la interpretación de estas. Además, se detalla información relevante sobre las características de las imágenes y el interferograma generado (Tabla 4.1).

Adquisiciones	Base Temp. (días)	Base Perp. (m)	Coherencia	Despl. zona estable (m)
28-jul-2016				
09-ago-2016	-12	-27	0.96	0.043
09-ago-2016				
21-ago-2016	-12	7	0.98	0.01
21-ago-2016				
14-sep-2016	-24	59	0.92	-0.015
14-sep-2016				
02-oct-2016	-18	34	0.95	0.023
23-jul-2017				
04-ago-2017	-12	-49	0.95	-0.059
04-ago-2017				
09-sep-2017	-36	16	0.95	-0.037
09-sep-2017				
21-sep-2017	-12	15	0.98	-0.002
21-sep-2017				
03-oct-2017	-12	-6	0.98	0.003
05-ago-2018				
29-ago-2018	-24	-41	0.94	-0.008
29-ago-2018				
10-sep-2018	-12	27	0.96	0.079
10-sep-2018				
22-sep-2018	-12	-18	0.97	-0.098
31-jul-2019				
18-ago-2019	-18	-95	0.9	-0.016
18-ago-2019				
11-sep-2019	-24	34	0.95	0
11-sep-2019				
11-oct-2019	-30	48	0.93	0.023
18-ago-2020				
05-sep-2020	-18	-28	0.96	-0.088
05-sep-2020				
17-sep-2020	-12	70	0.93	0.045

Tabla 4.1. Información básica de las adquisiciones mensuales para la generación de los interferogramas. Líneas base temporales y perpendiculares, coherencia del interferograma y desplazamientos identificados en zonas estables con coherencia >0.6 de las imágenes DiSAR en el entorno de La Paúl.

4.1.1. Adquisiciones del 28-jul-2016 y 09-ago-2016

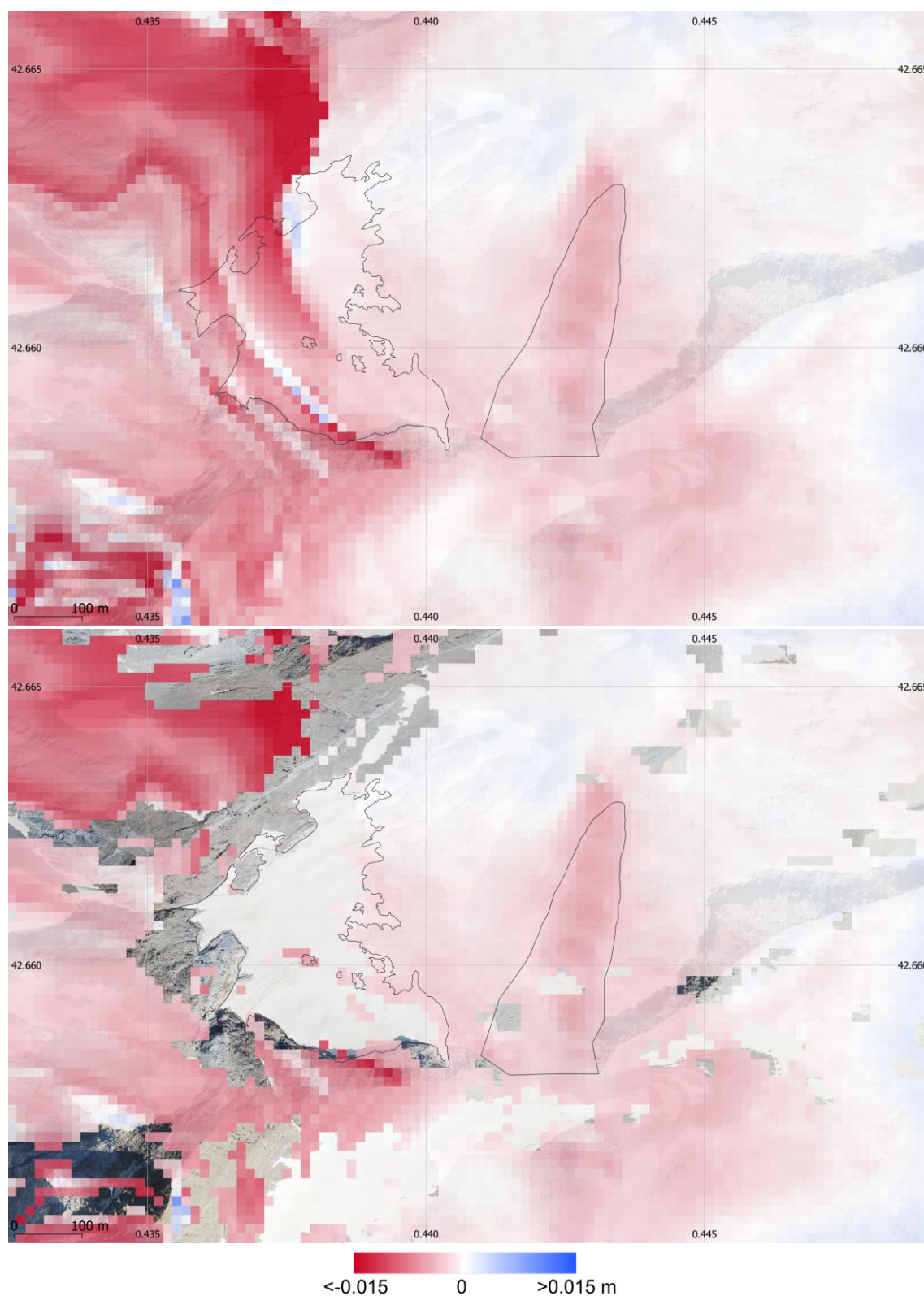


Figura 4.1. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 28-jul-2016 a 09-ago-2016 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.2. Adquisiciones del 09-ago-2016 y 21-ago-2016

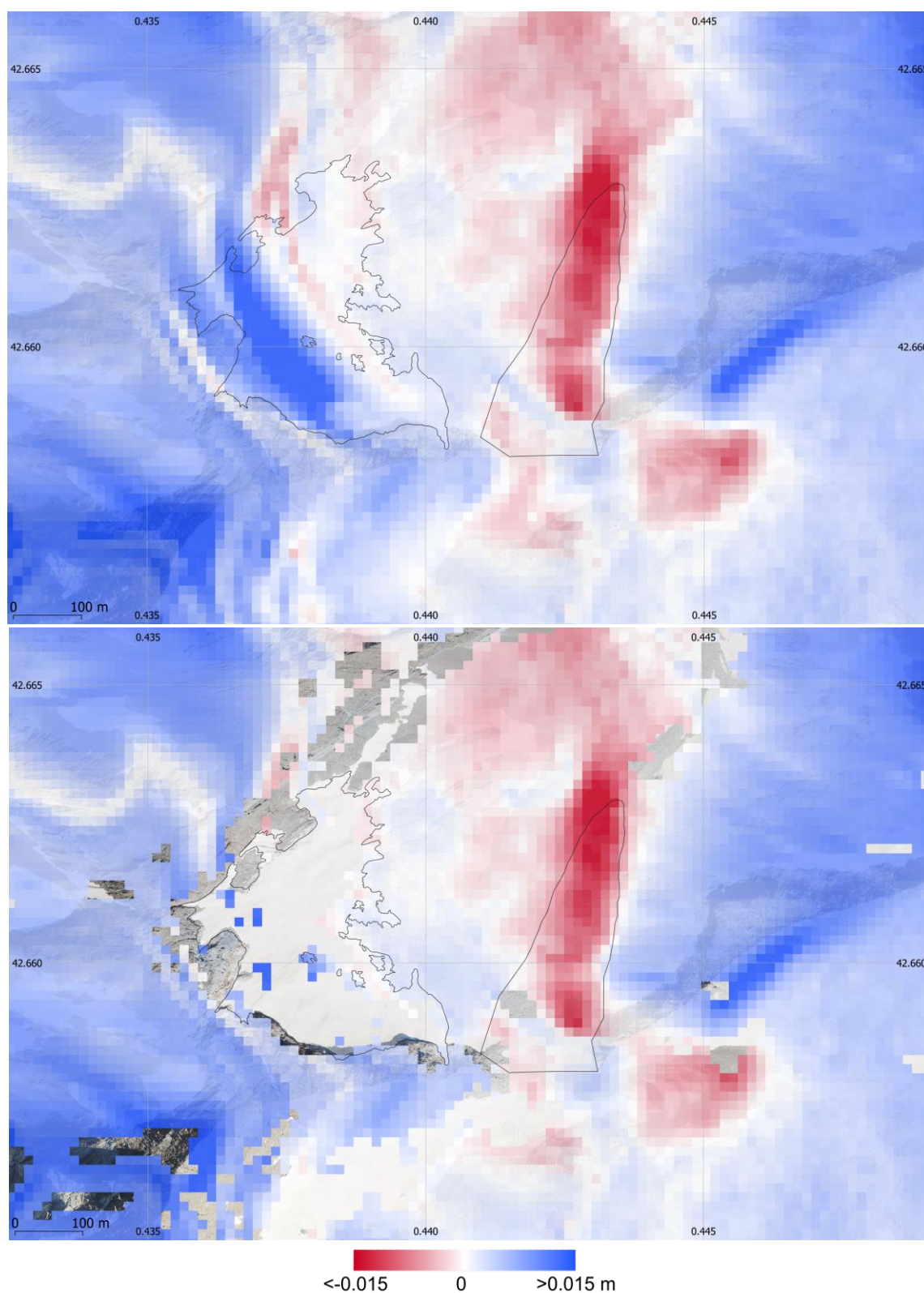


Figura 4.2. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 09-ago-2016 a 21-ago-2016 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.3. Adquisiciones del 21-ago-2016 y 14-sep-2016

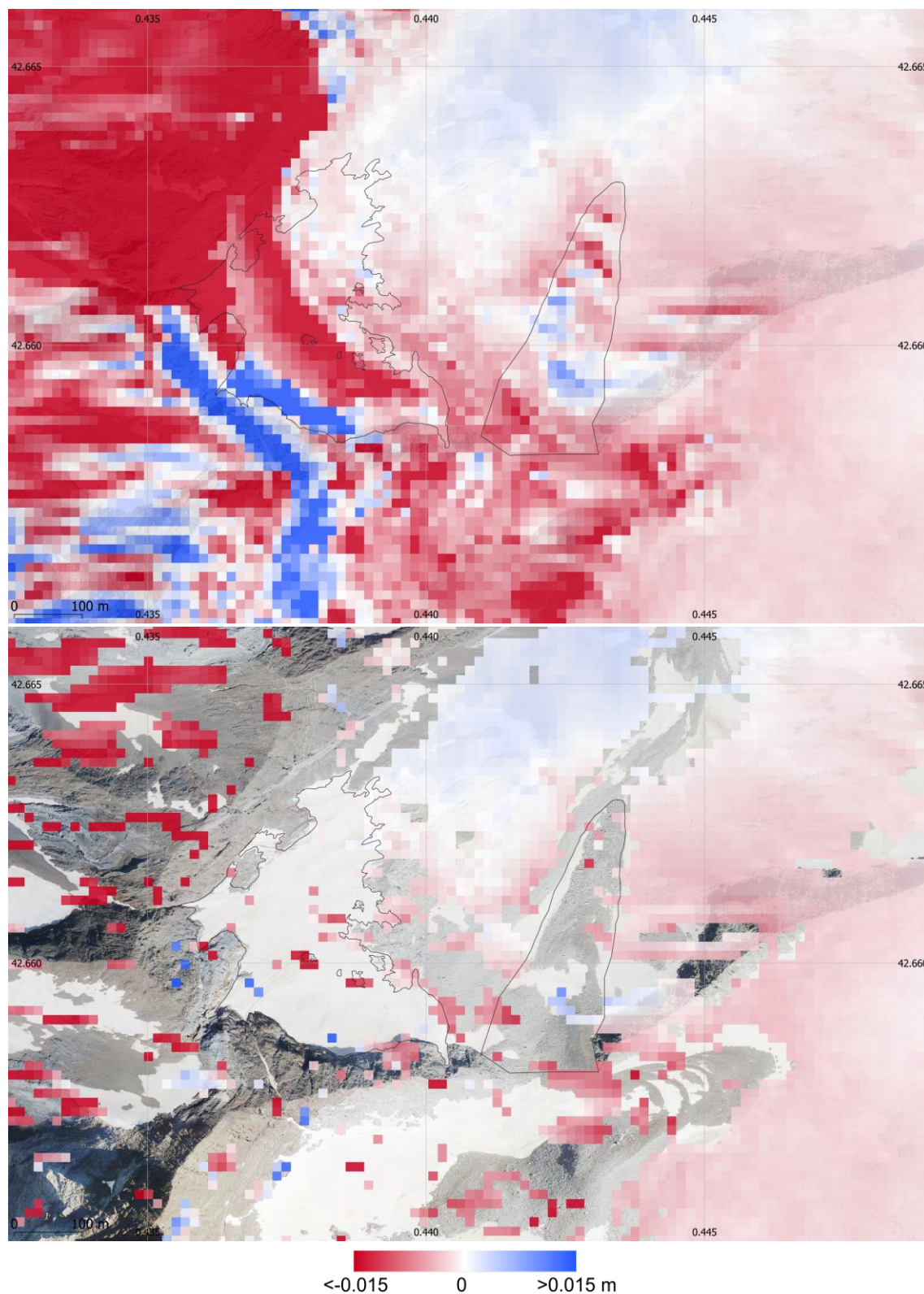


Figura 4.3. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paül del 21-ago-2016 y 14-sep-2016 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.4. Adquisiciones del 14-sep-2016 y 02-oct-2016

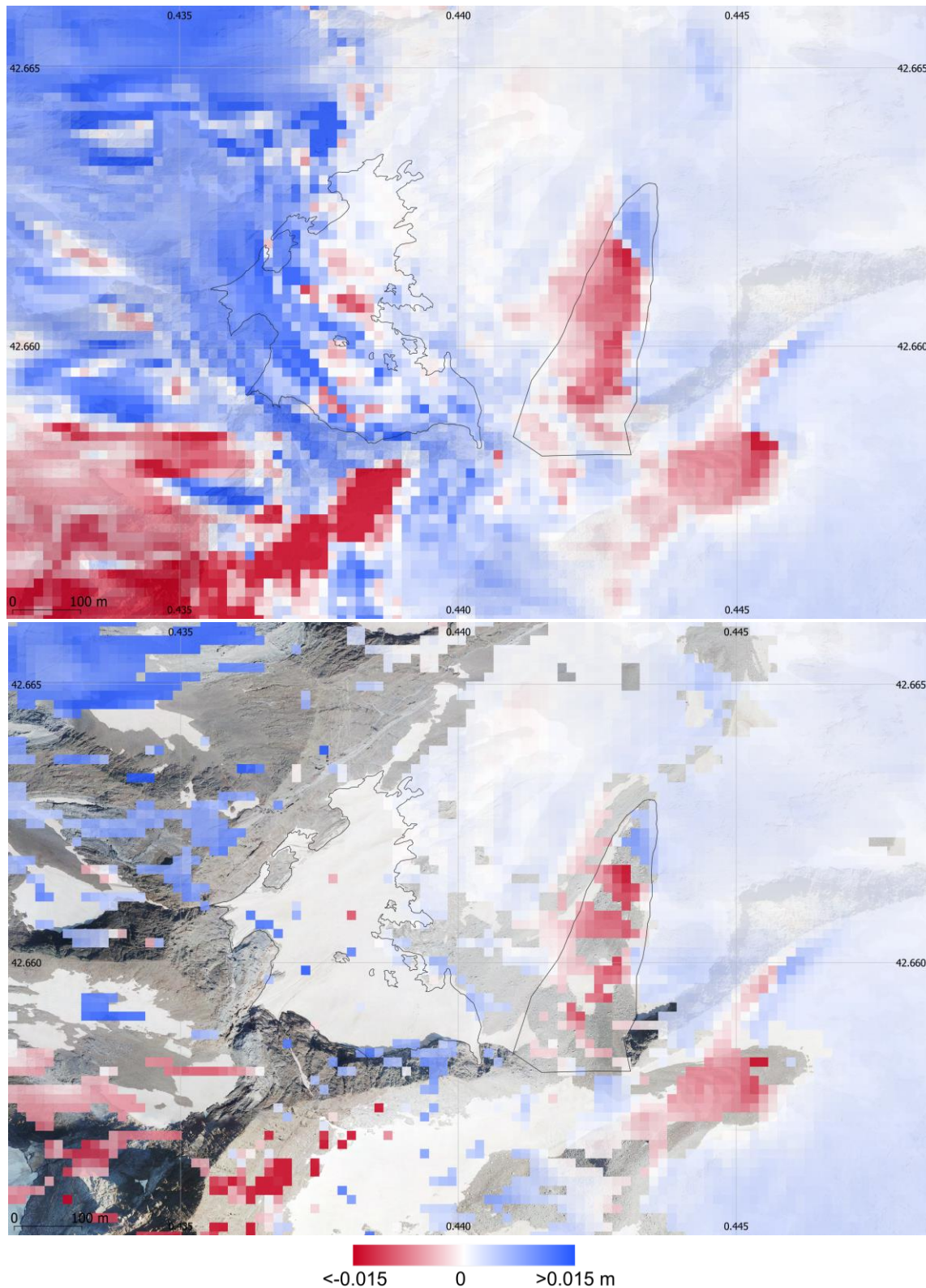


Figura 4.4. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 14-sep-2016 a 02-oct-2016 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.5. Adquisiciones del 23-jul-2017 y 04-ago-2017

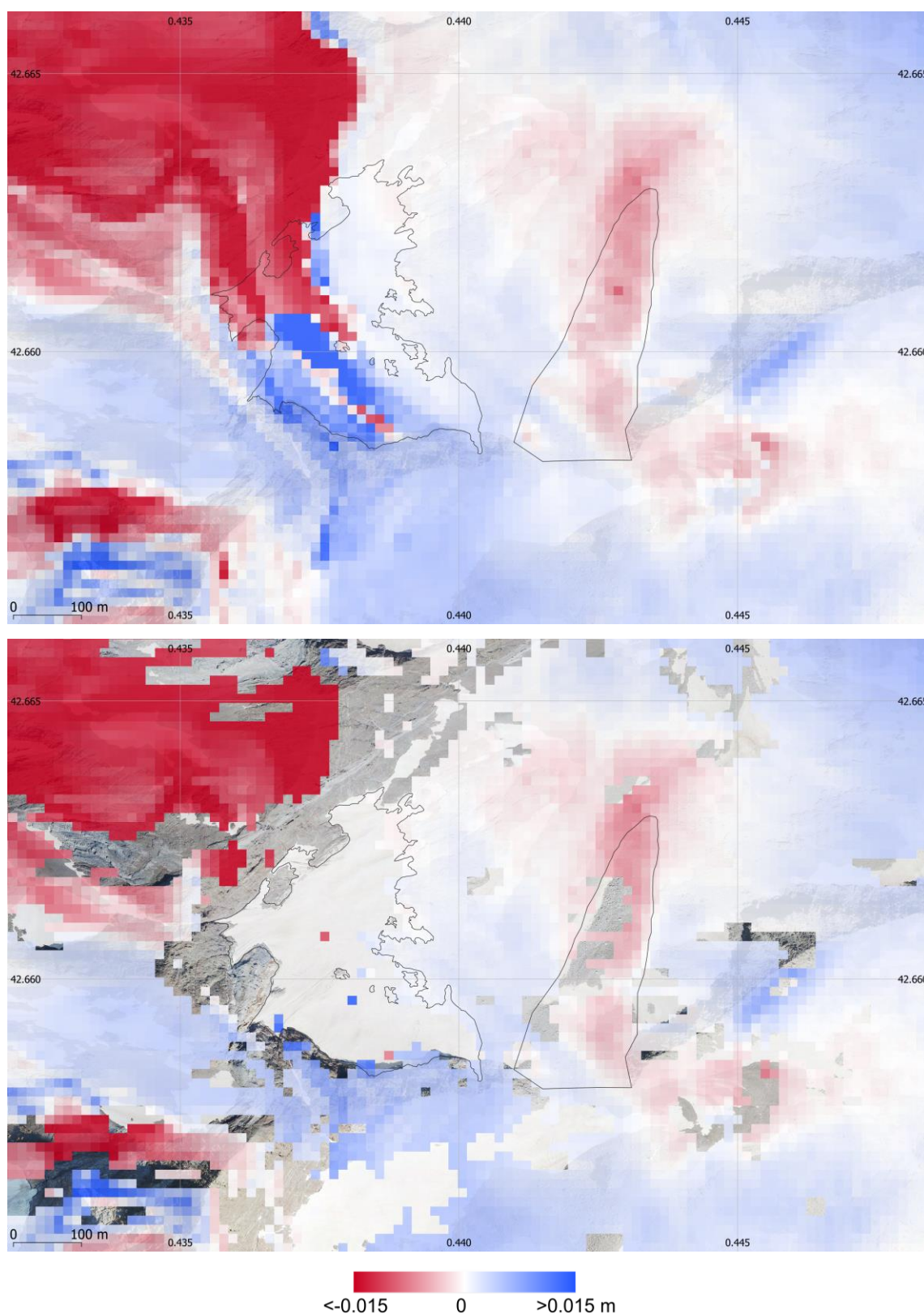


Figura 4.5. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 23-jul-2017 a 04-ago-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.6. Adquisiciones del 04-ago-2017 y 09-sep-2017

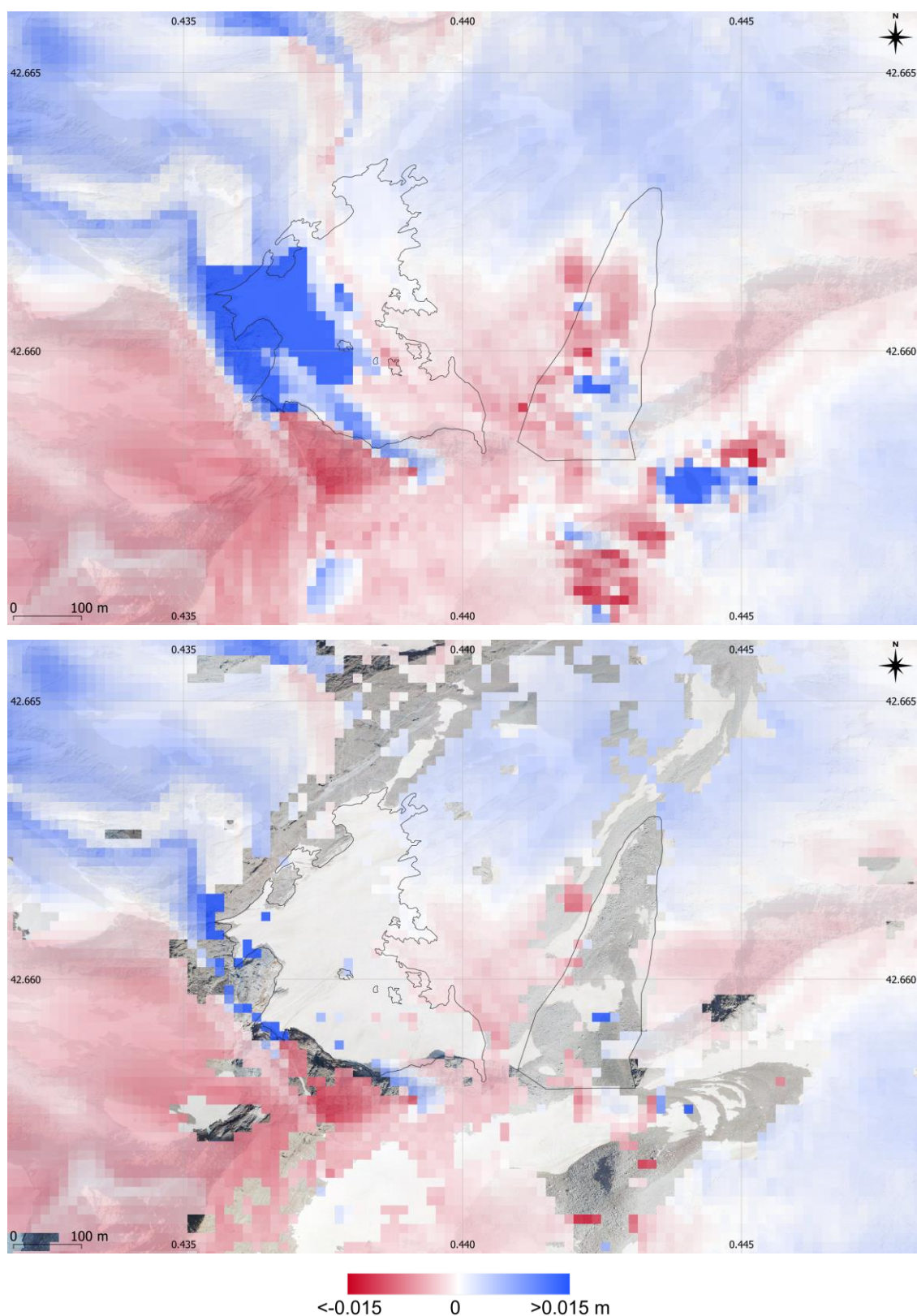


Figura 4.6. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 04-ago-2017 a 09-sep-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.7. Adquisiciones del 09-sep-2017 y 21-sep-2017

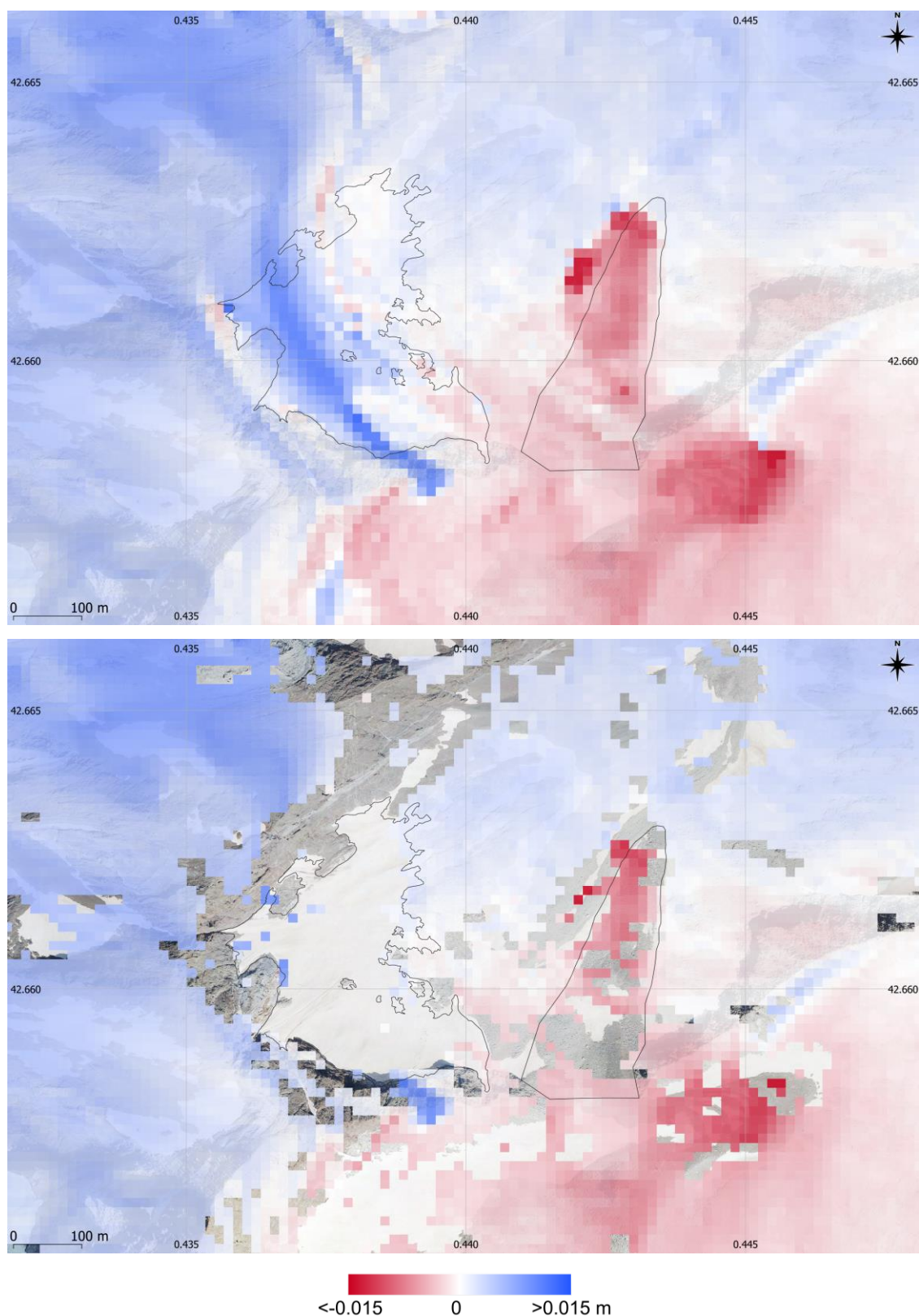


Figura 4.7. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 09-sep-2017 a 21-sep-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.8. Adquisiciones del 21-sep-2017 y 03-oct-2017

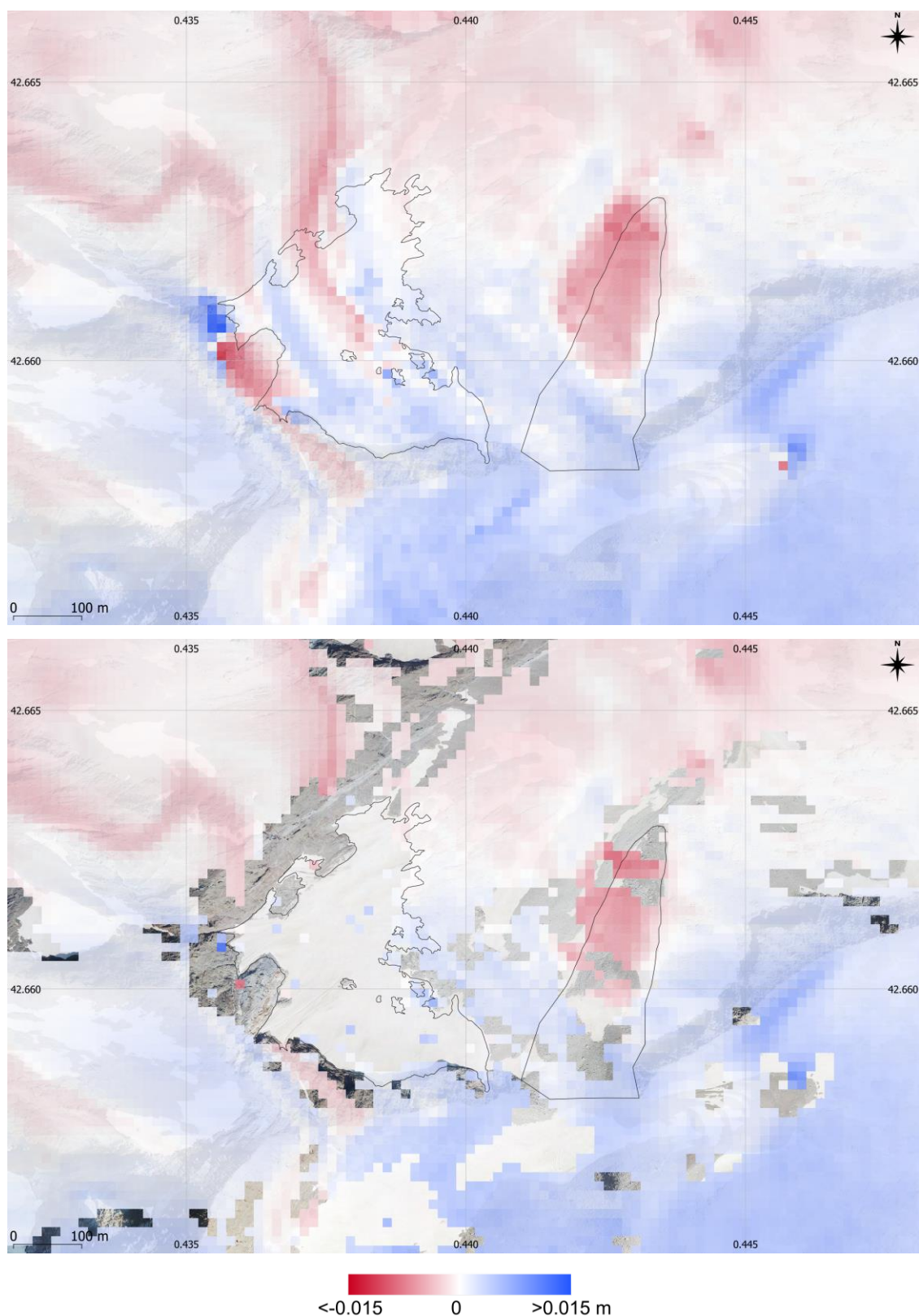


Figura 4.8. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 21-sep-2017 a 03-oct-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.9. Adquisiciones del 05-ago-2018 y 29-ago-2018

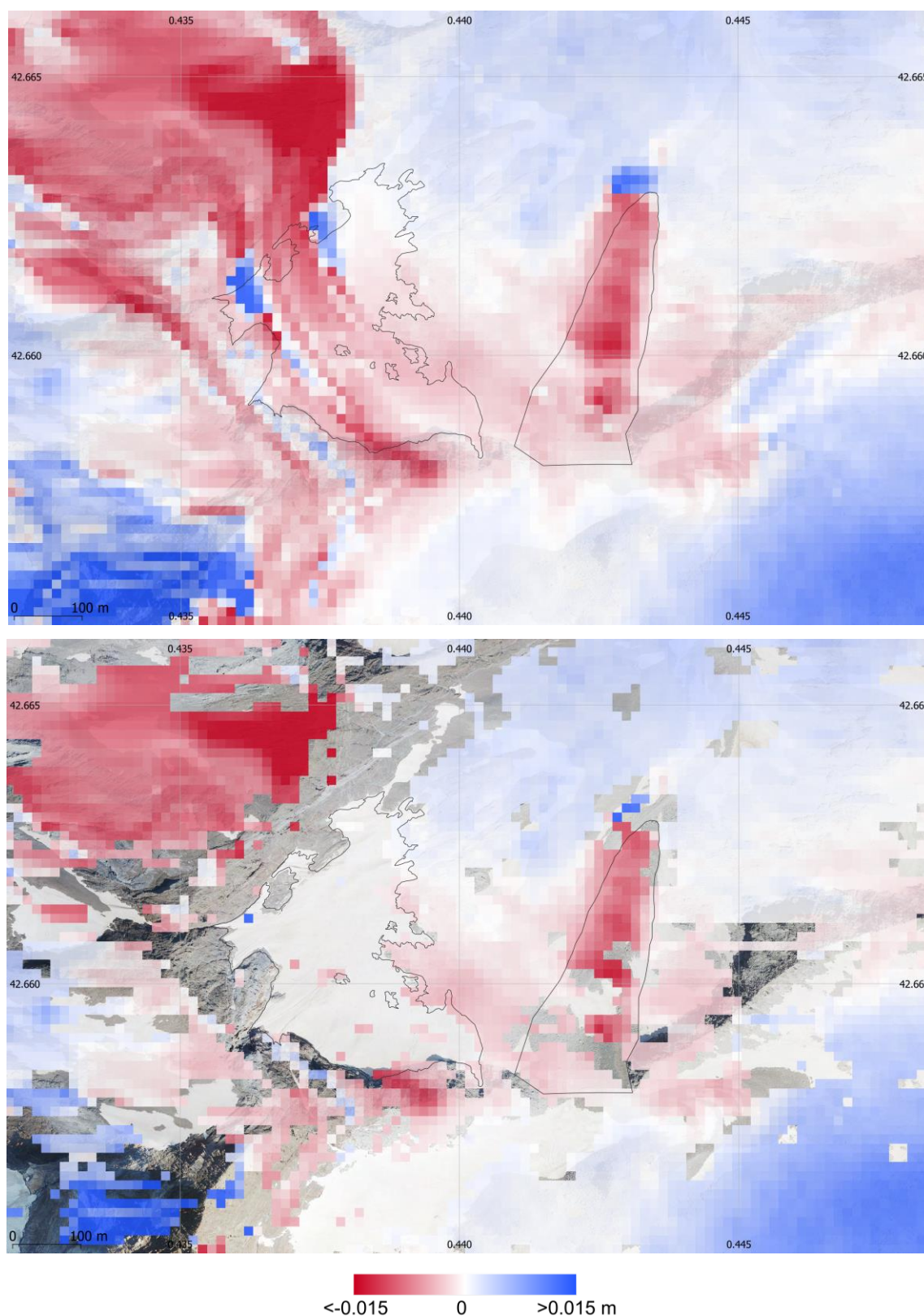


Figura 4.9. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 05-ago-2018 al 29-ago-2018 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.10. Adquisiciones del 29-ago-2018 y 10-sep-2018

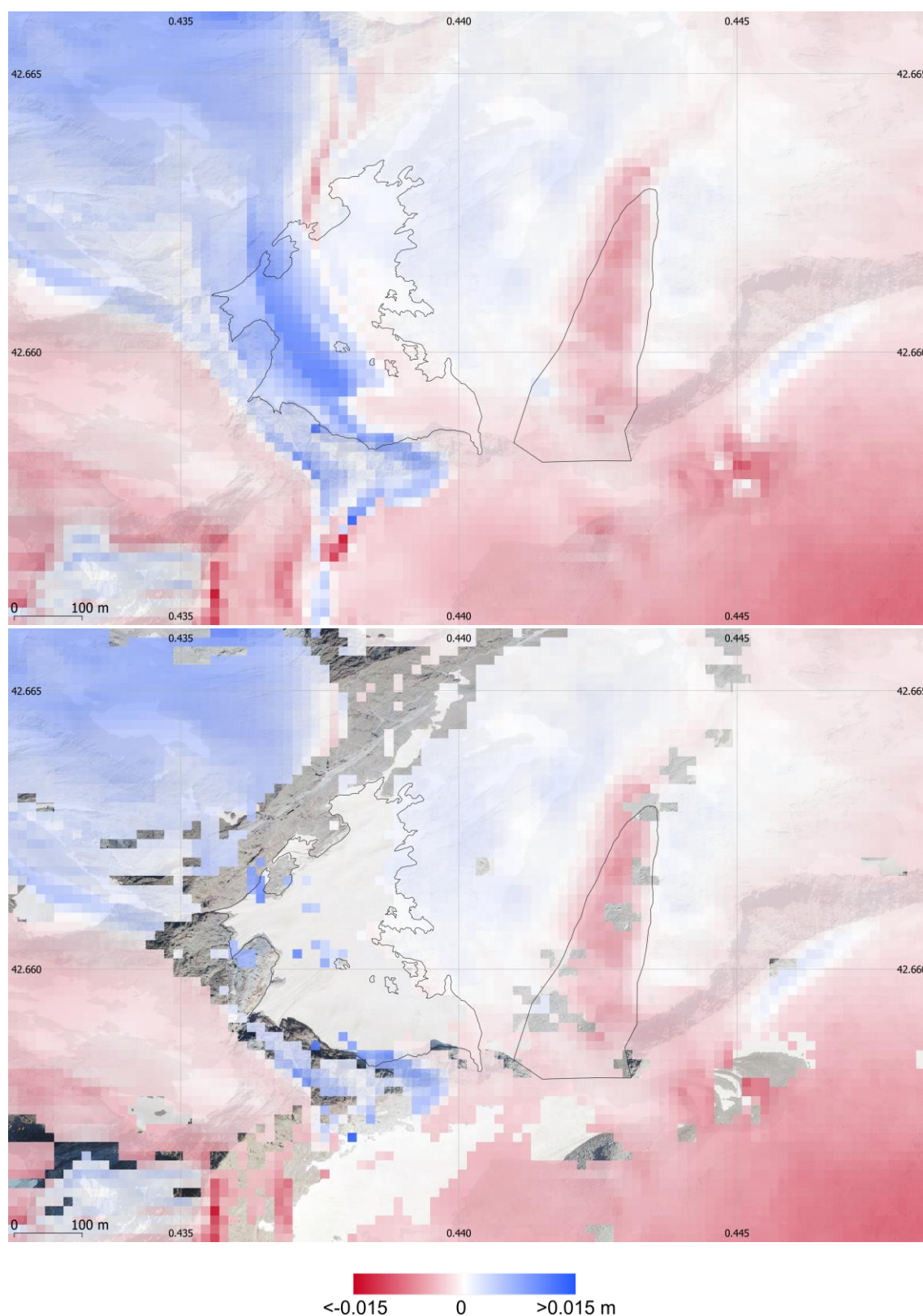


Figura 4.10. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 29-ago-2018 a 10-sep-2018 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.11. Adquisiciones del 10-sep-2018 y 22-sep-2018

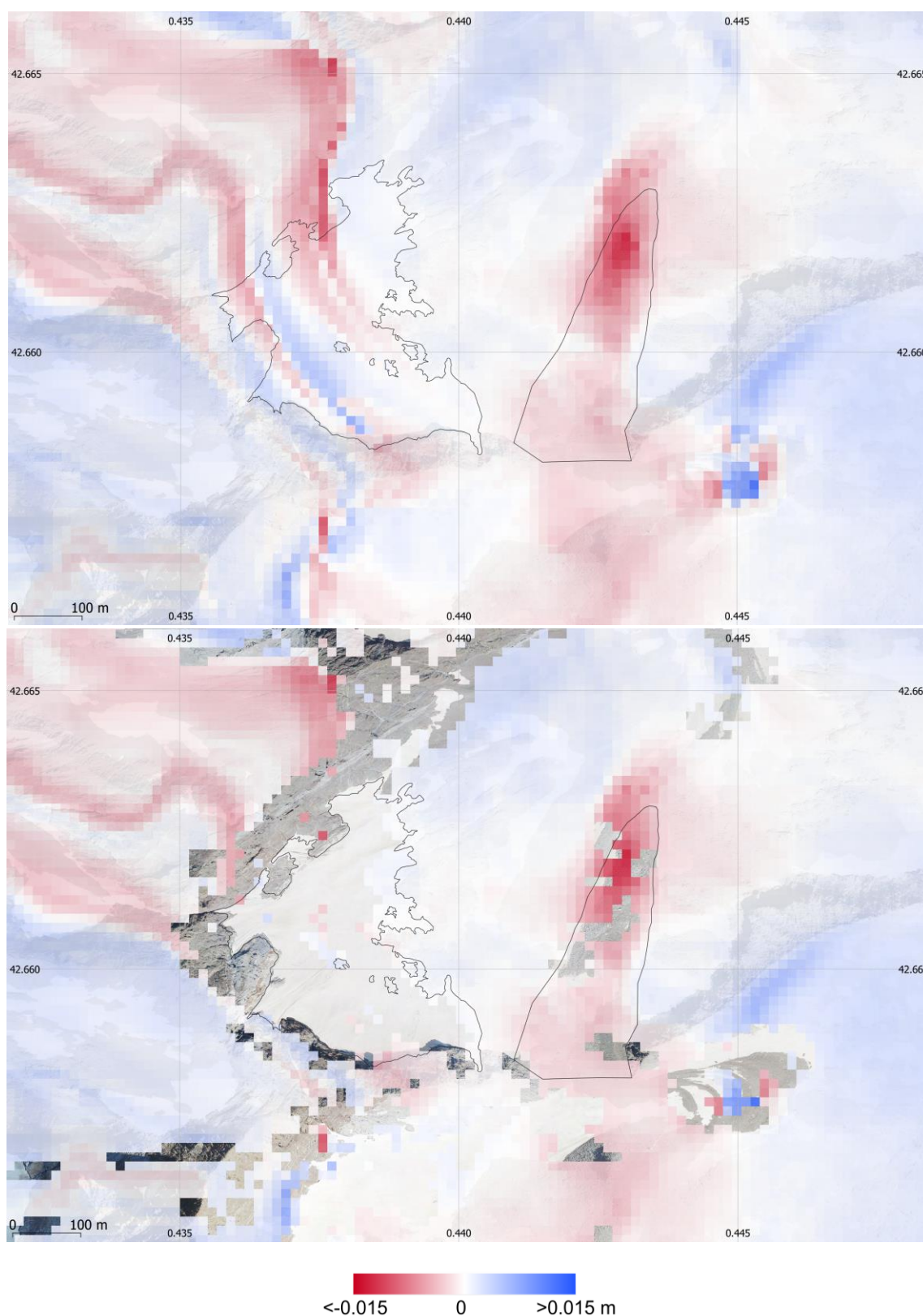


Figura 4.11. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 10-sep-2018 a 22-sep-2018 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.12. Adquisiciones del 31-jul-2019 y 18-ago-2019

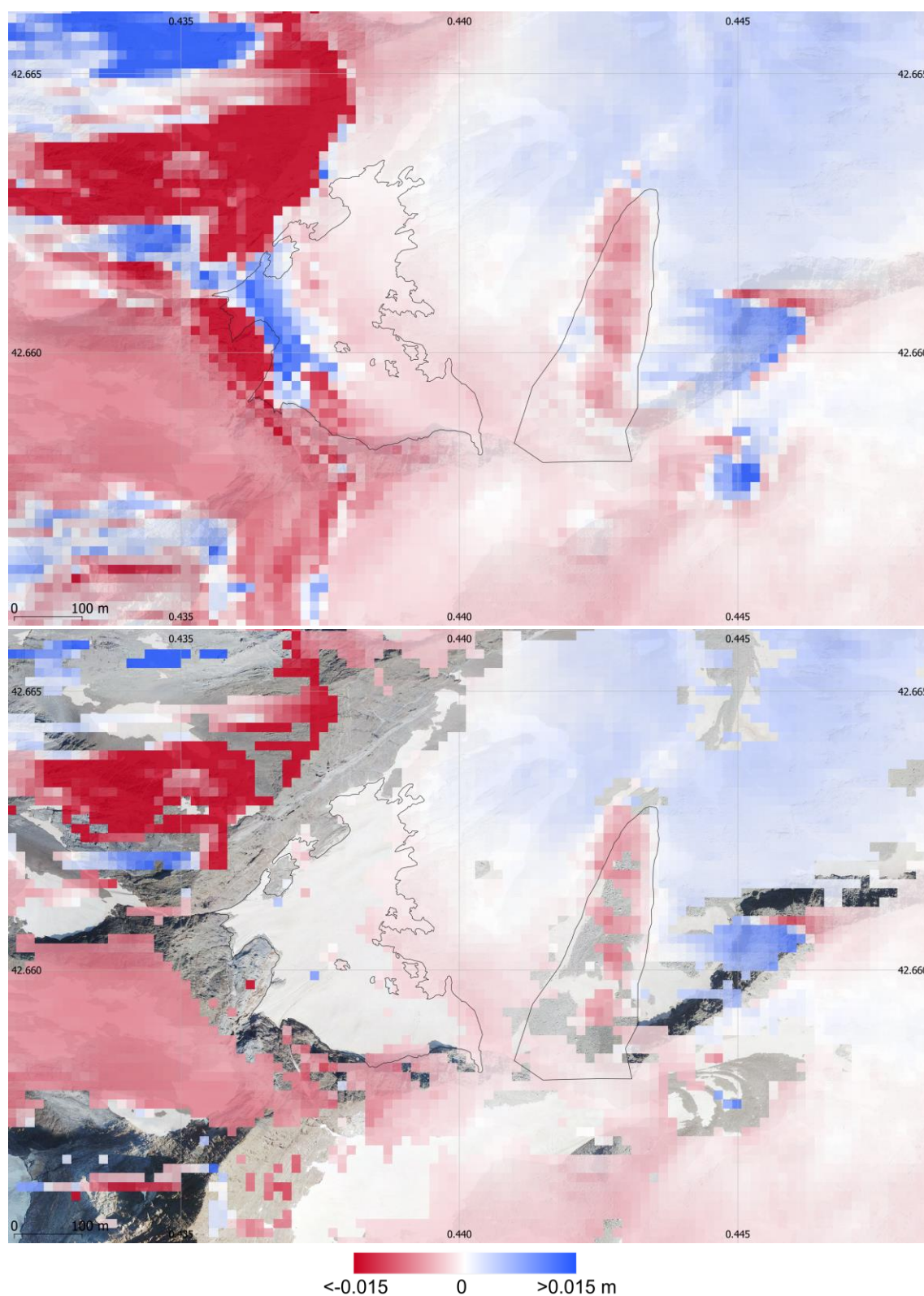


Figura 4.12. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 31-jul-2019 a 18-ago-2019 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.13. Adquisiciones del 18-ago-2019 y 11-sep-2019

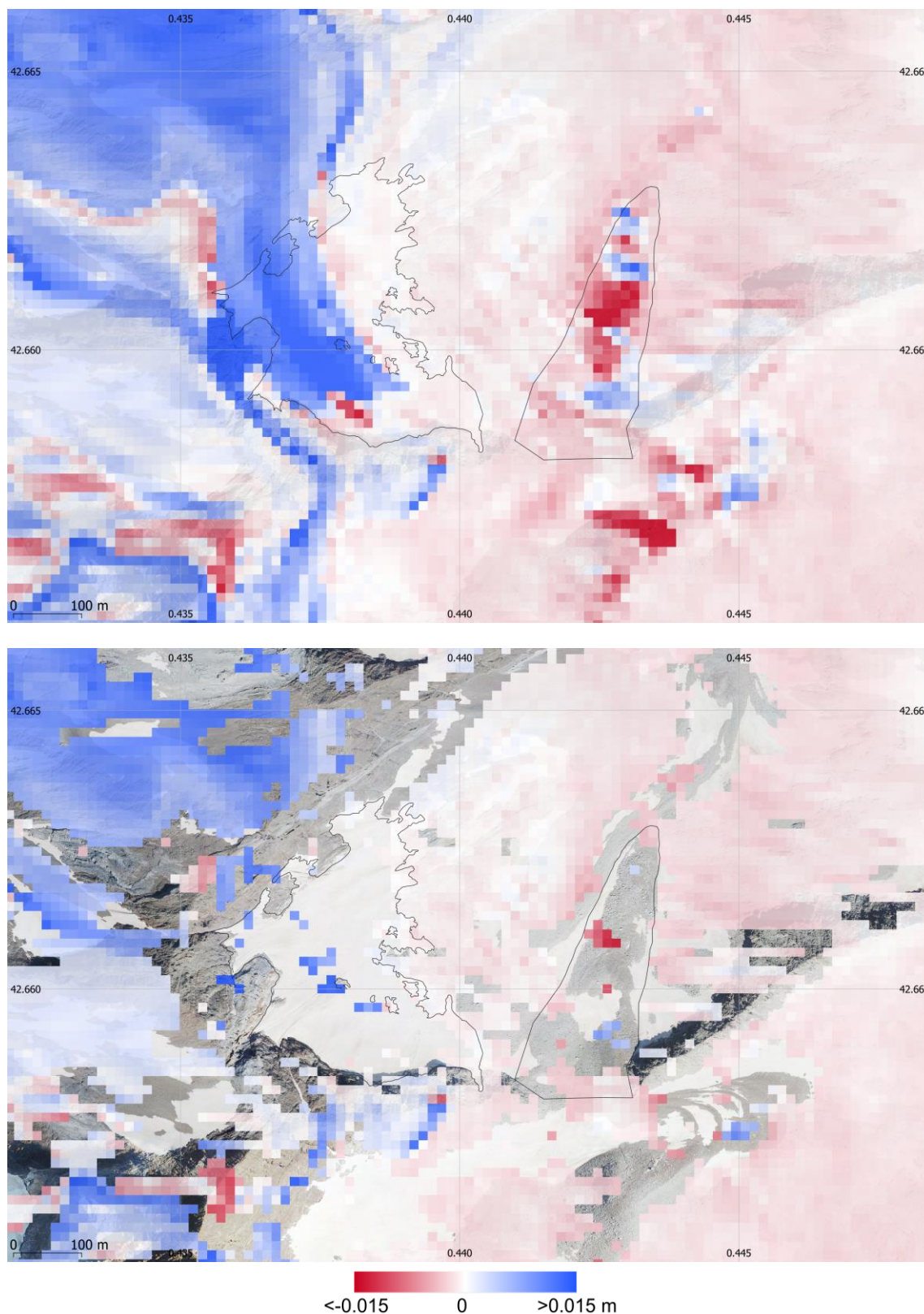


Figura 4.13. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 18-ago-2019 a 11-sep-2019 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.14. Adquisiciones del 11-sep-2019 y 11-oct-2019

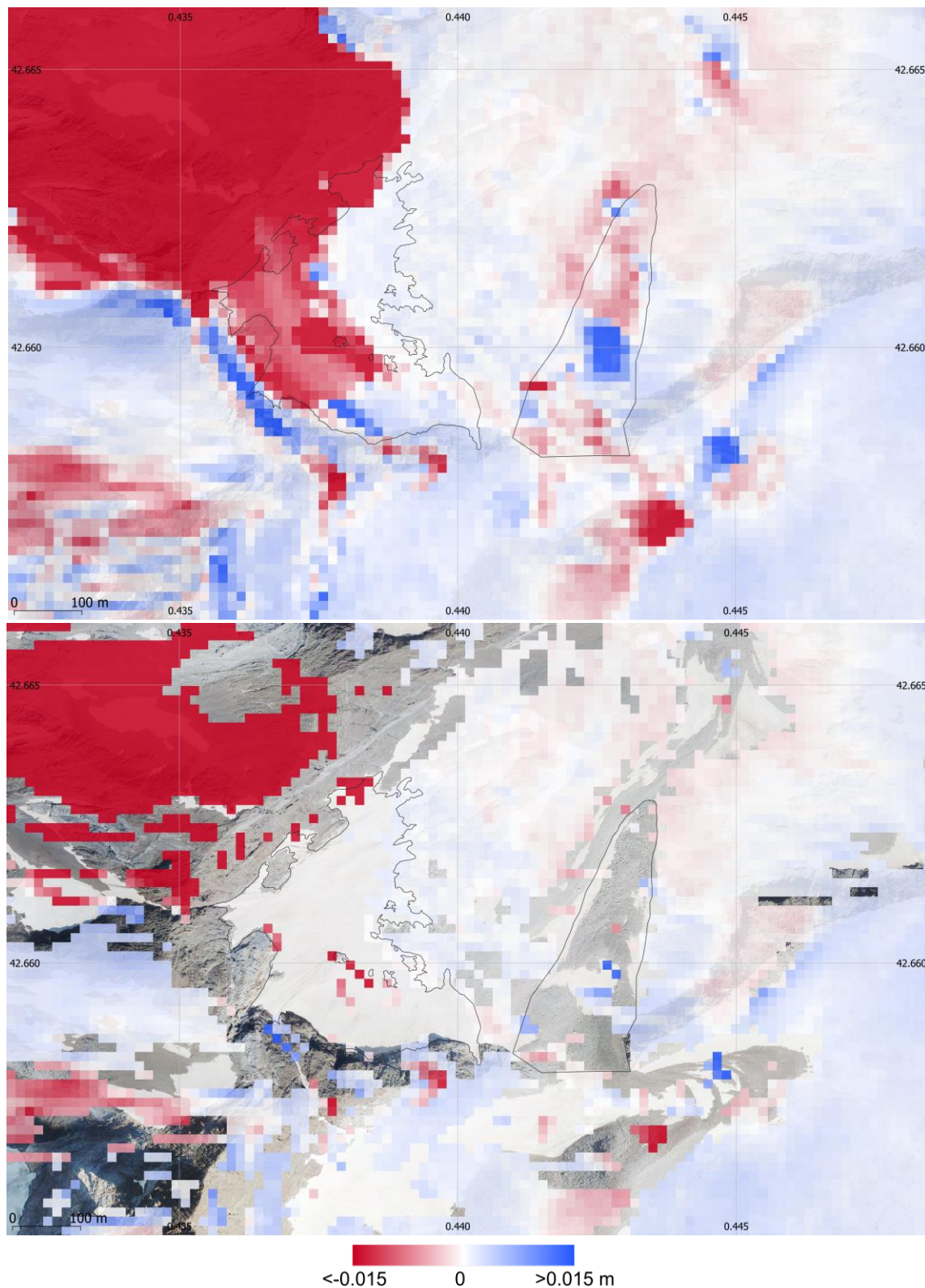


Figura 4.14. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 11-sep-2019 a 11-oct-2019 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.15. Adquisiciones del 18-ago-2020 y 05-sep-2020

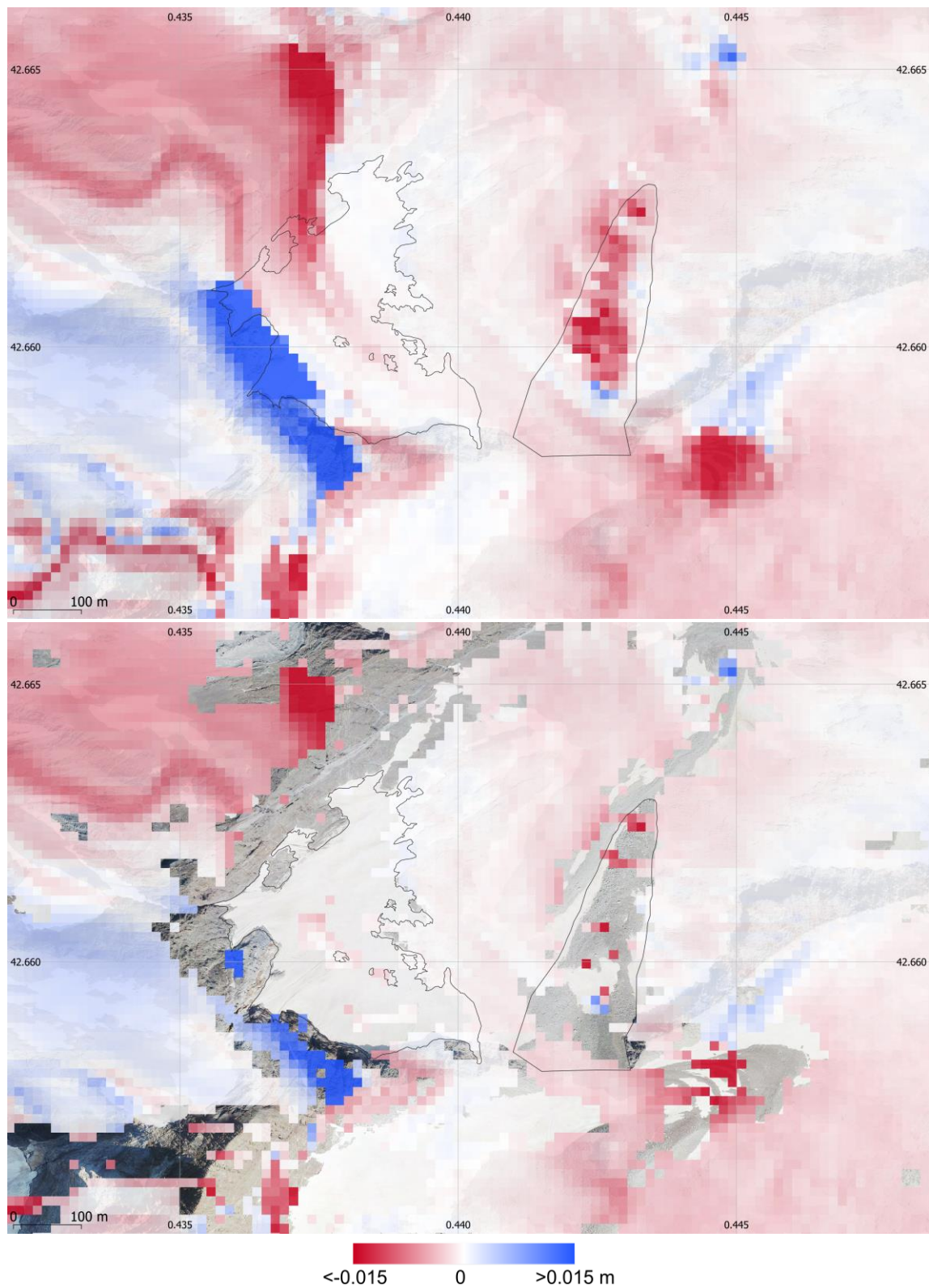


Figura 4.15. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 18-ago-2020 a 05-sep-2020 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.1.16. Adquisiciones del 05-sep-2020 y 17-sep-2020

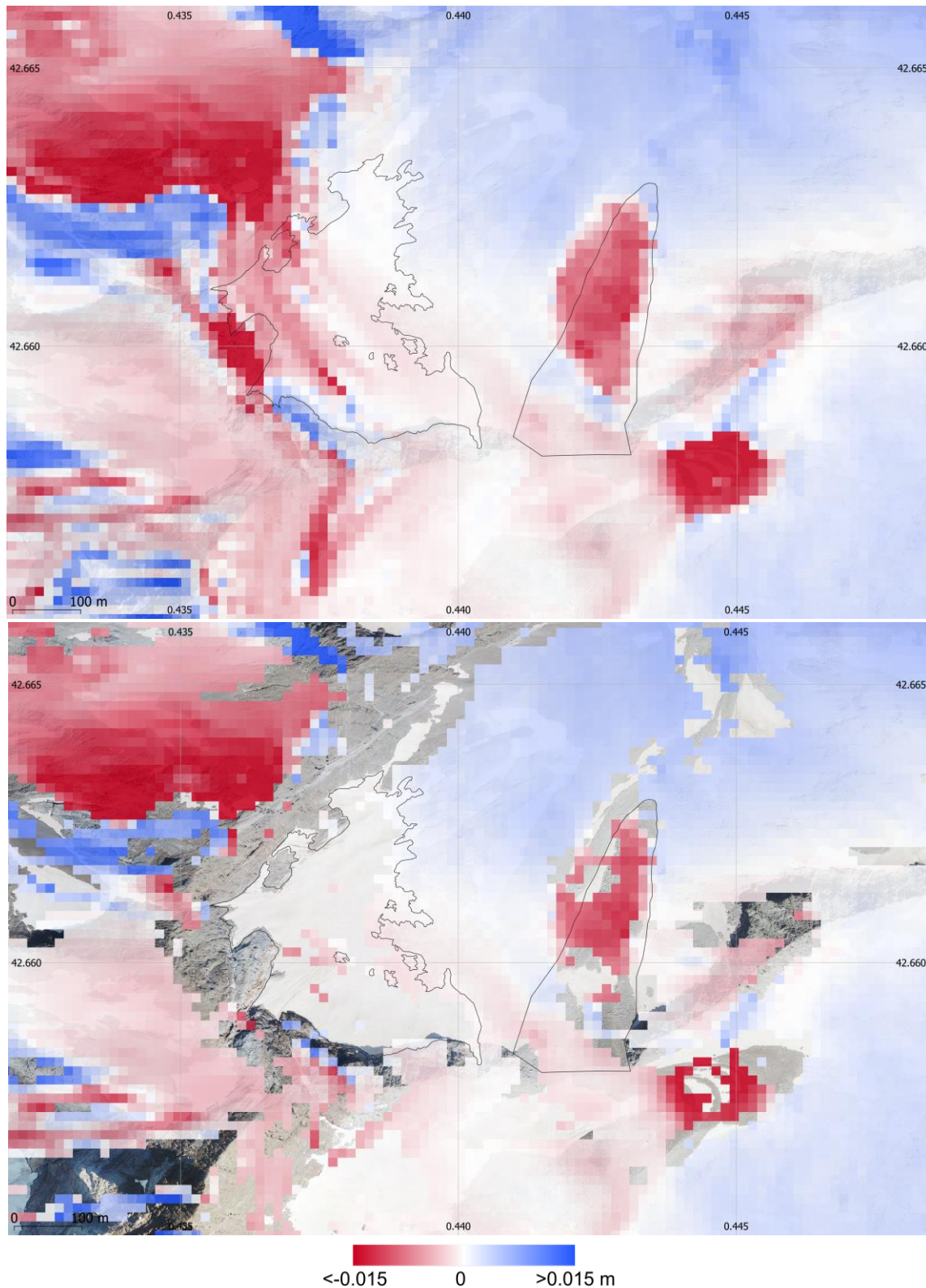


Figura 4.16. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 05-sep-2020 a 17-sep-2020 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.2. Desplazamiento estacional del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl

En este apartado, se muestran los resultados de desplazamiento entre la primera y última adquisición de un mismo año. Las deformaciones se acompañan con ortofotos del PNOA y contornos de los cuerpos helados para facilitar la interpretación de estas. Además, se detalla información relevante sobre las características de las imágenes y el DInSAR generado (Tabla 4.2).

Adquisiciones	Base Temp. (días)	Base Perp. (m)	Coherencia	Despl. zona estable (m)
28-jul-2016	-66	71	0.88	0.03
02-oct-2016				
23-jul-2017	-72	-24	0.91	-0.063
03-oct-2017				
05-ago-2018	-48	-36	0.93	0.002
22-sep-2018				
31-jul-2019	-72	-15	0.91	0.007
11-oct-2019				
18-ago-2020	-30	42	0.93	-0.07
17-sep-2020				

Tabla 4.2. Información básica de las adquisiciones estacionales para la generación de los interferogramas. Líneas base temporales y perpendiculares, coherencia del interferograma y desplazamientos identificados en zonas estables con coherencia >0.6 de las imágenes DiSAR en el entorno de La Paúl.

4.2.1. Adquisiciones del 28-jul-2016 y 02-oct-2016

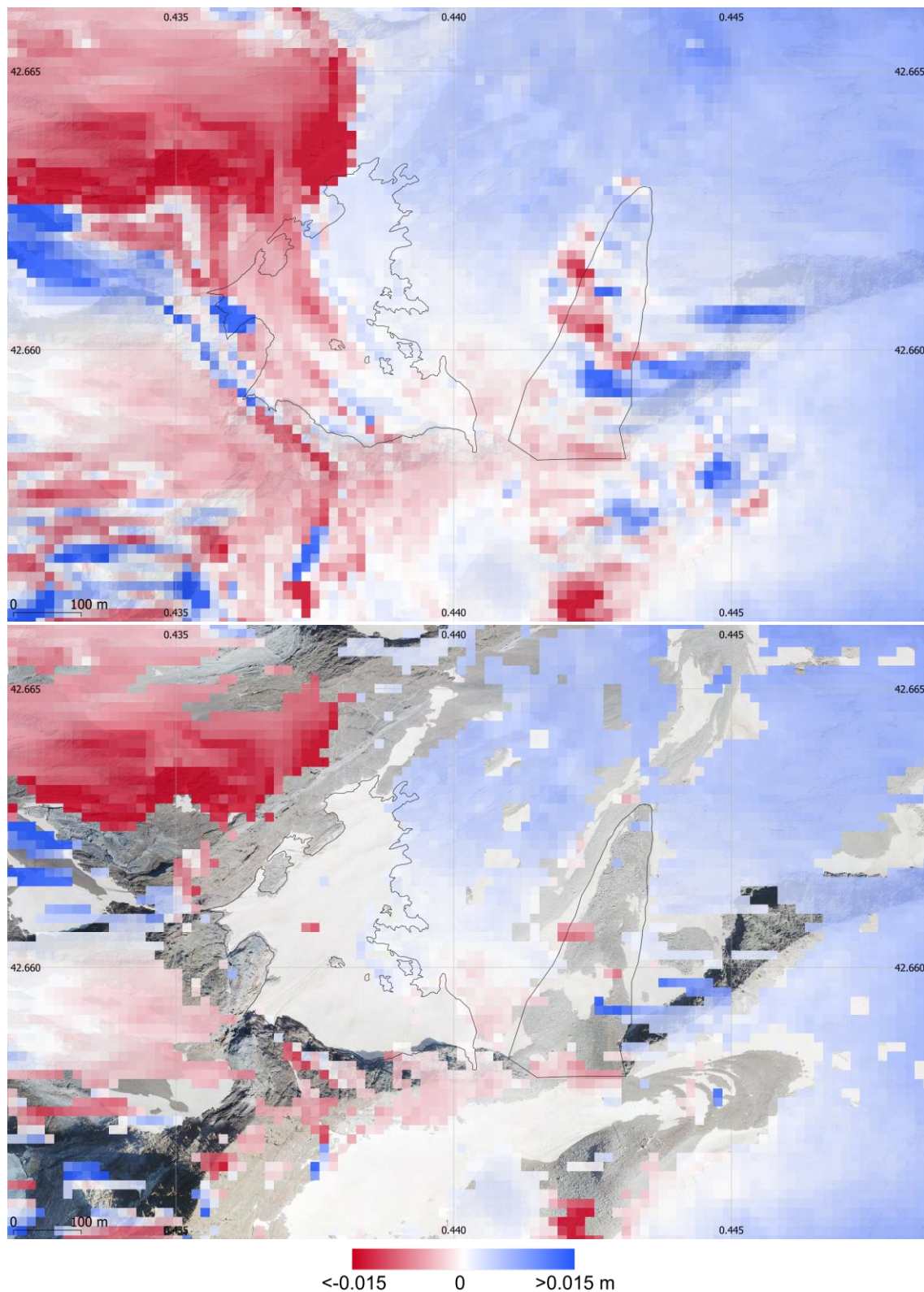


Figura 4.17. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 28-jul-2016 a 02-oct-2016 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.2.2. Adquisiciones del 23-jul-2017 y 03-oct-2017

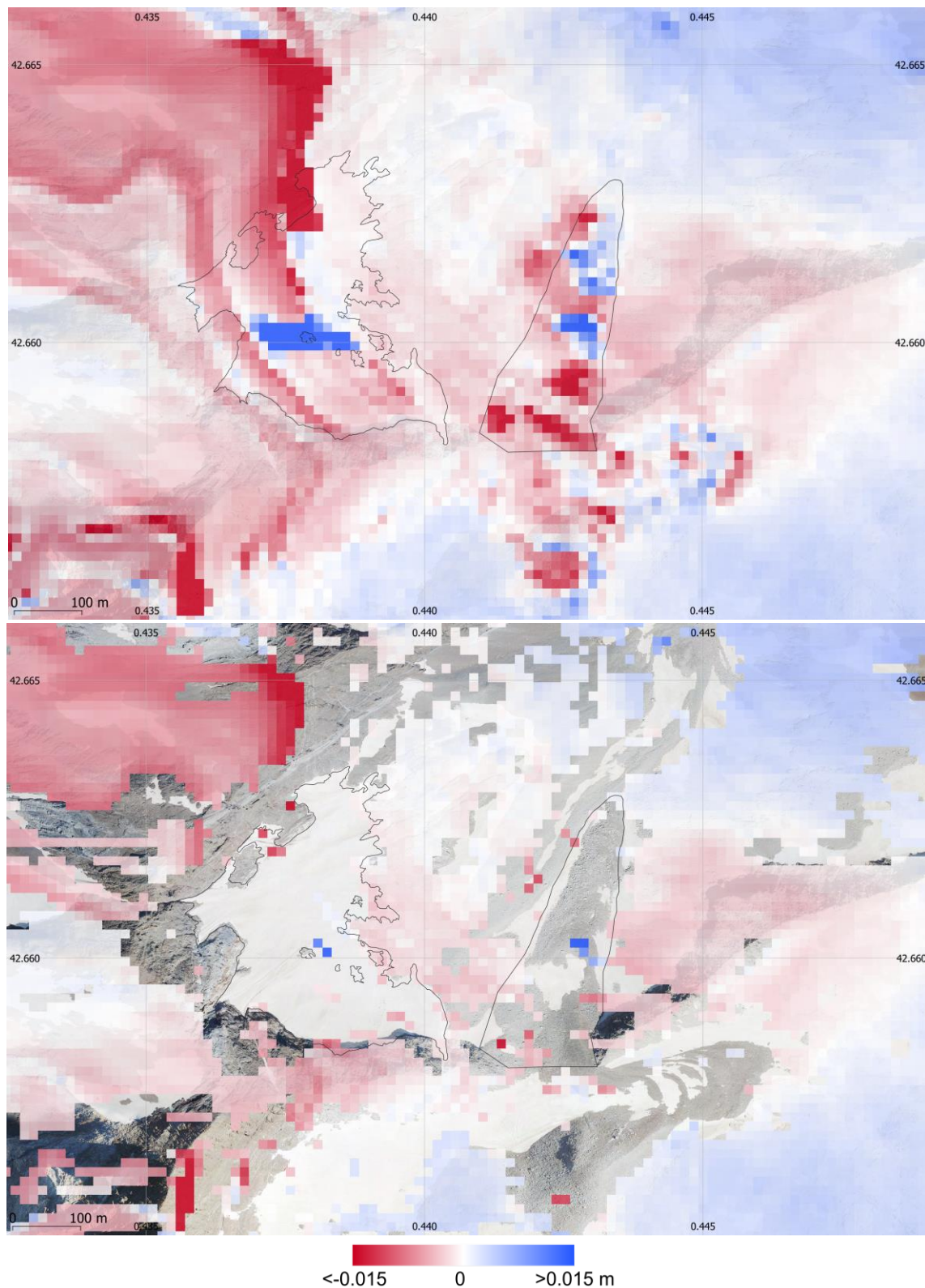


Figura 4.18. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 23-jul-2017 y 03-oct-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.2.3. Adquisiciones del 05-ago-2018 y 22-sep-2018

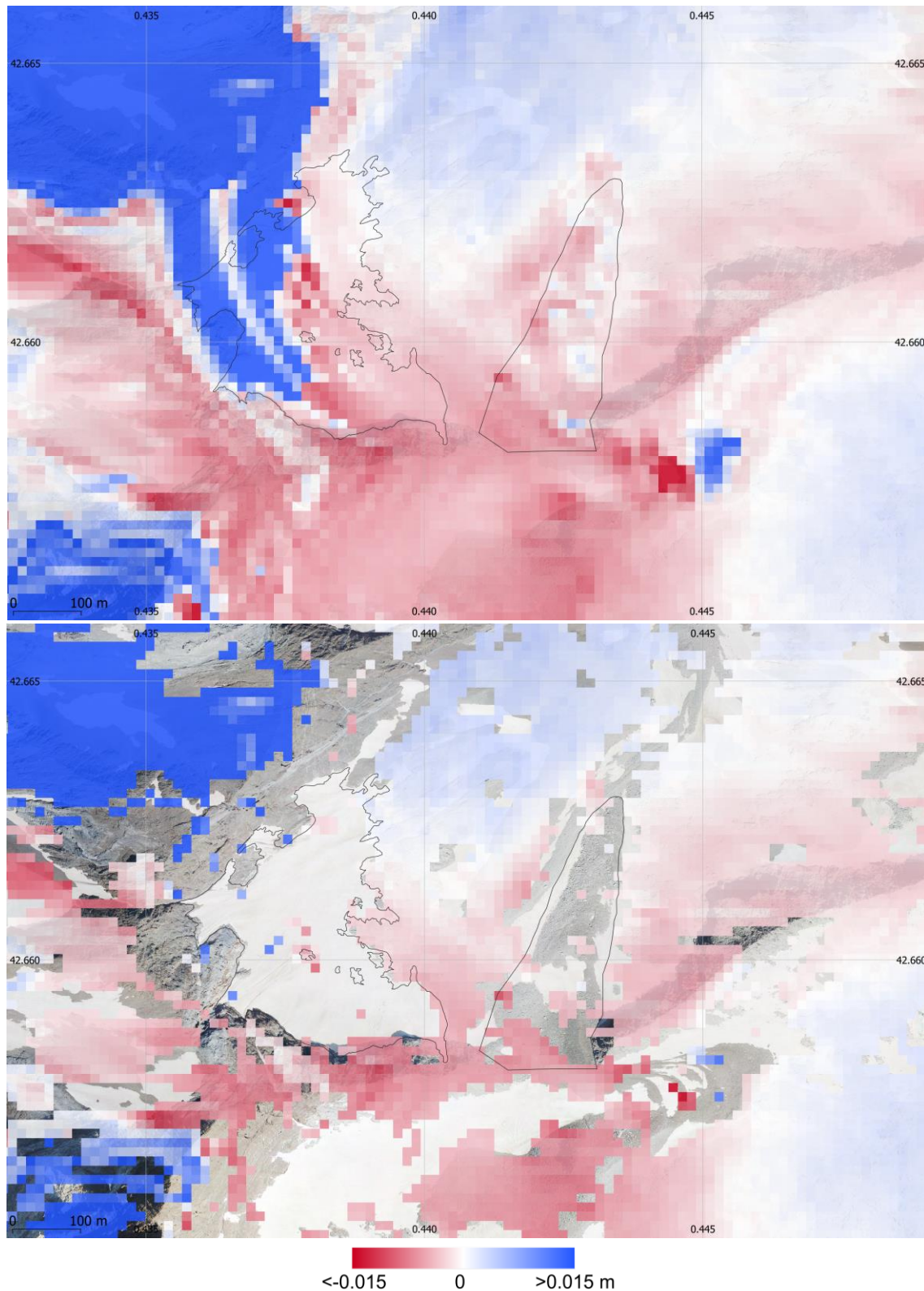


Figura 4.19. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 05-ago-2018 y 22-sep-2018 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.2.4. Adquisiciones del 31-jul-2019 y 11-oct-2019

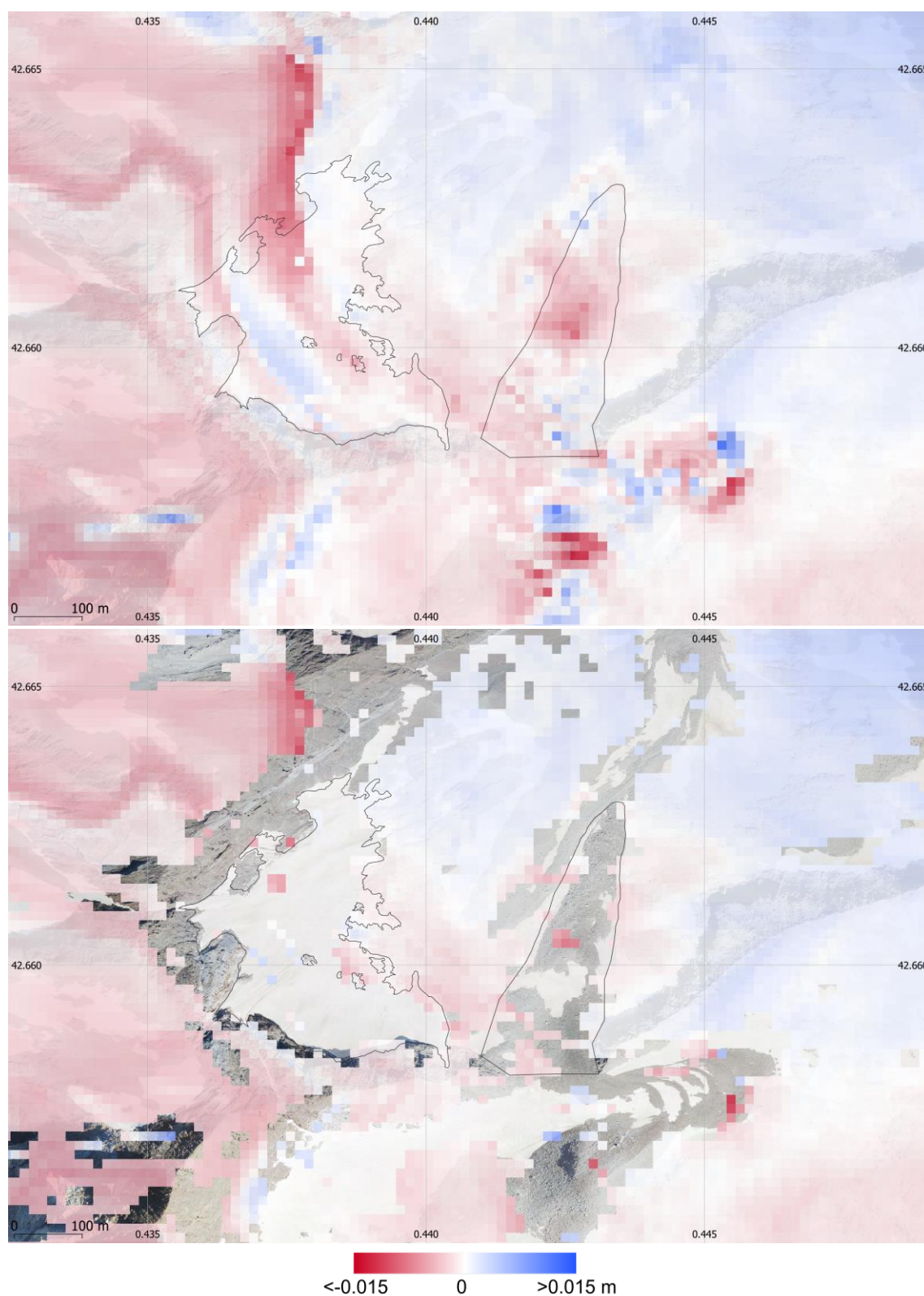


Figura 4.20. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 31-jul-2019 y 11-oct-2019 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.2.5. Adquisiciones del 18-ago-2020 y 17-sep-2020

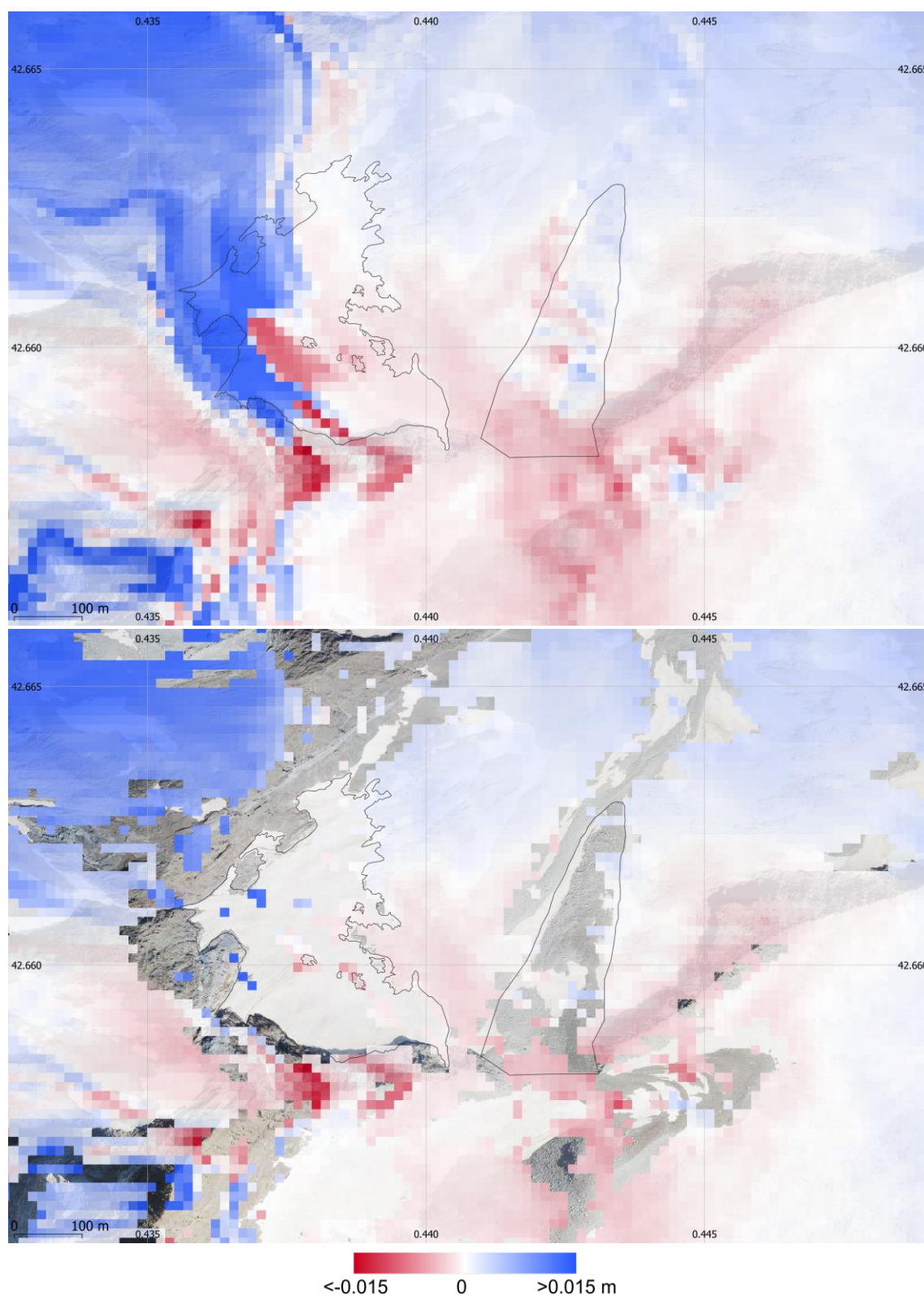


Figura 4.21. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 18-ago-2020 a 17-sep-2020 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.3. Desplazamiento anual del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl

En este apartado, se muestran los resultados de desplazamiento entre años consecutivos. Las deformaciones se acompañan con ortofotos del PNOA y contornos de los cuerpos helados para facilitar la interpretación de estas. Además, se detalla información relevante sobre las características de las imágenes y el DInSAR generado (Tabla 4.3).

Adquisición	Base Temp. (días)	Base Perp. (m)	Coherencia	Despl. zona estable (m)
02-oct-2016	-366	-36	0.86	-0.022
03-oct-2017				
03-oct-2017	-354	13	0.66	-0.174
22-sep-2018				
22-sep-2018	-384	19	0.64	0.167
11-oct-2019				
11-oct-2019	-303	-50	0.66	-0.033
17-sep-2020				

Tabla 4.3. Información básica de las adquisiciones anuales para la generación de los interferogramas. Líneas base temporales y perpendiculares, coherencia del interferograma y desplazamientos identificados en zonas estables con coherencia >0.6 de las imágenes DiSAR en el entorno de La Paúl.

4.3.1. Adquisiciones del 02-oct-2016 y 03-oct-2017

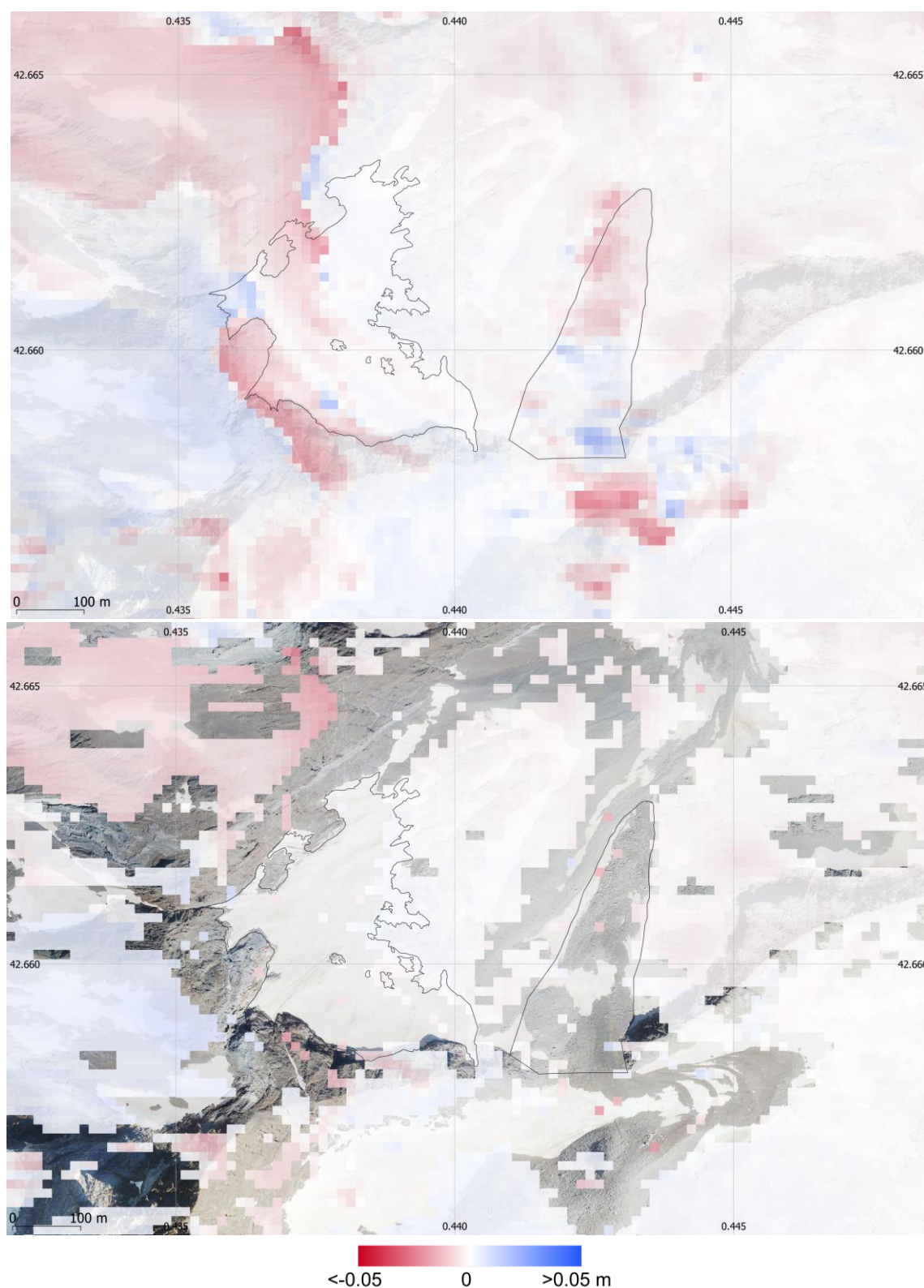


Figura 4.22. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paül del 02-oct-2016 a 03-oct-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.3.2. Adquisiciones del 03-oct-2017 y 22-sep-2018

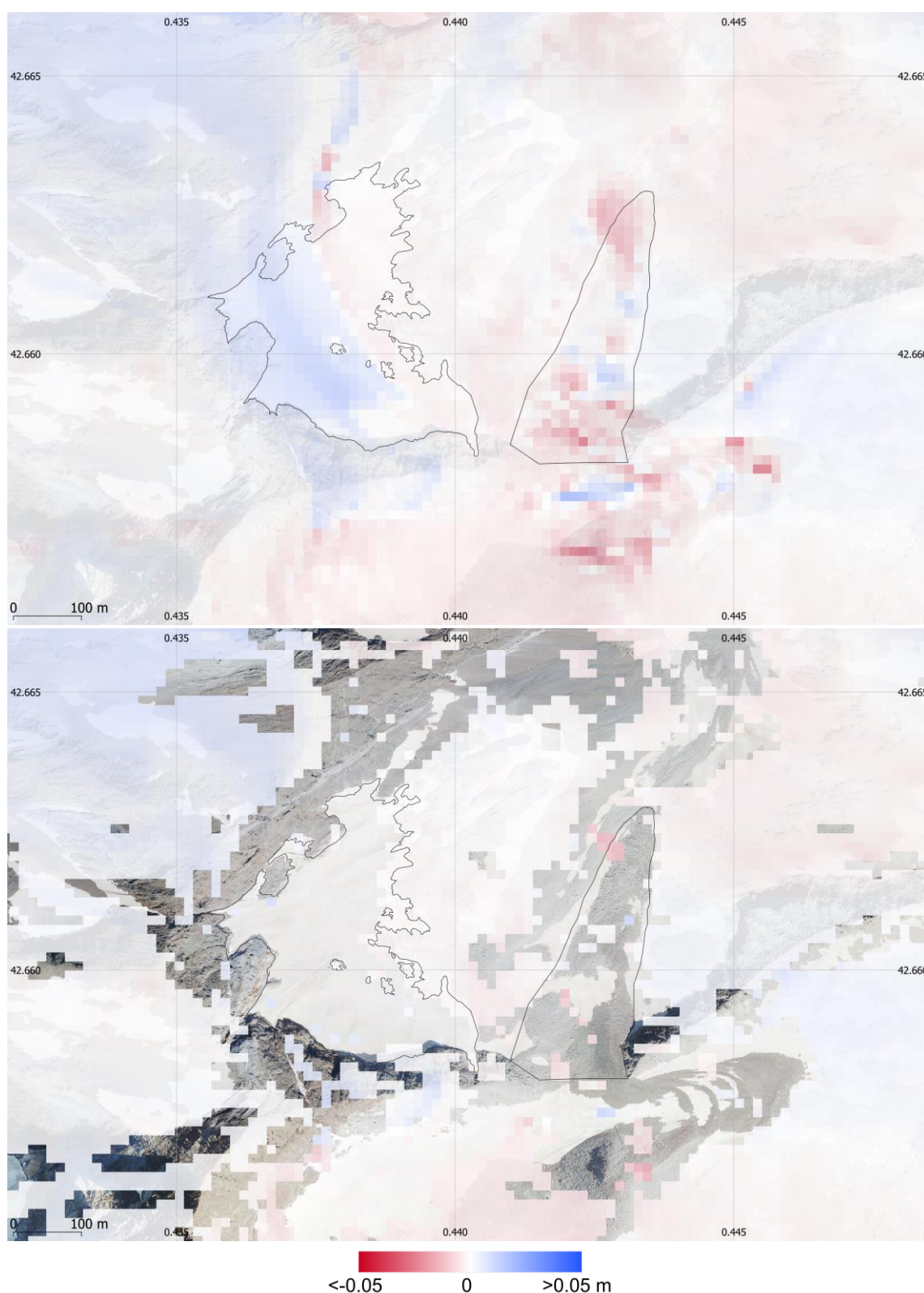


Figura 4.23. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 03-oct-2017 a 22-sep-2018 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.3.3. Adquisiciones del 22-sep-2018 y 11-oct-2019

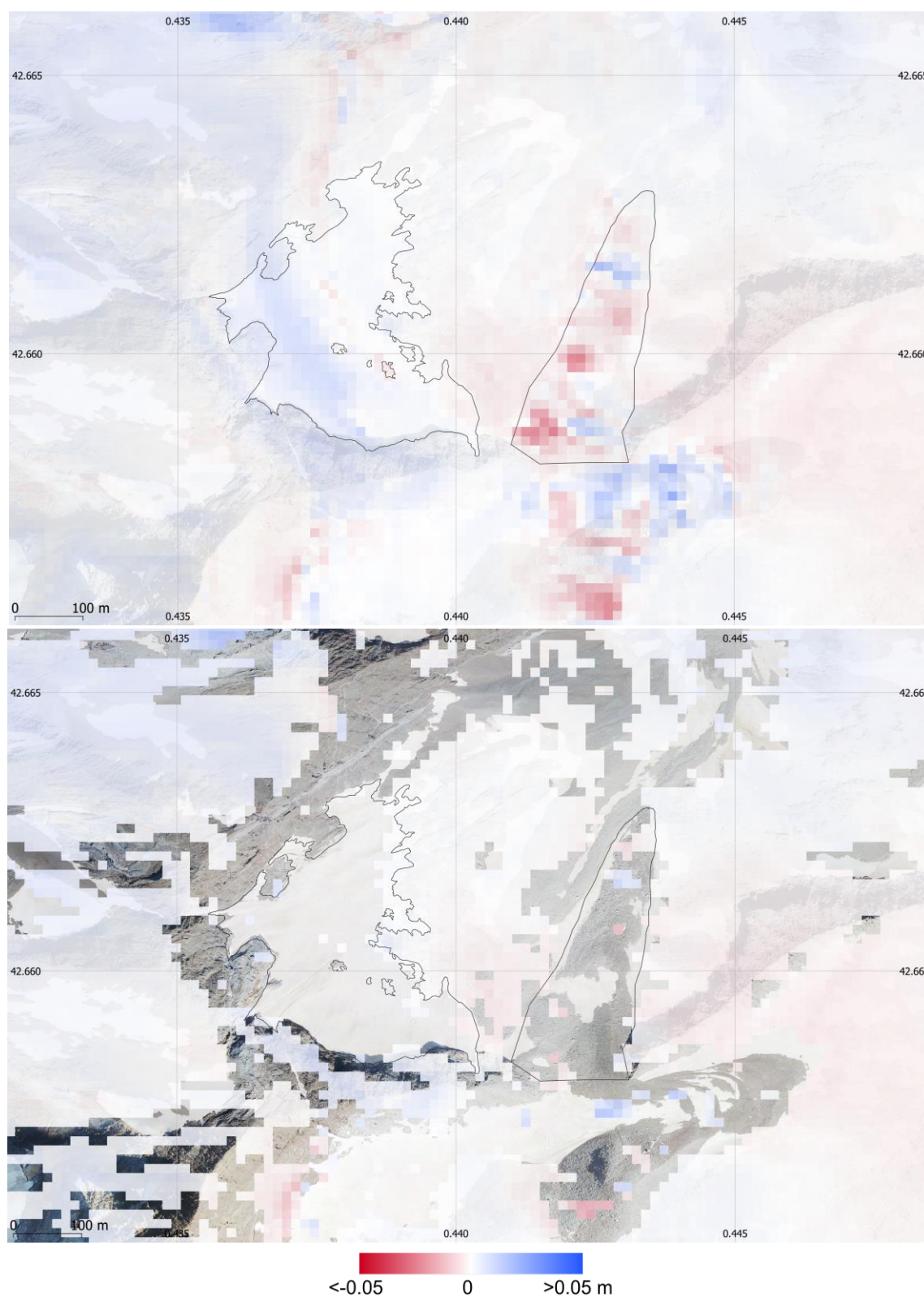


Figura 4.24. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 22-sep-2018 a 11-oct-2019 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

4.3.4. Adquisiciones del 11-oct-2019 y 17-sep-2020

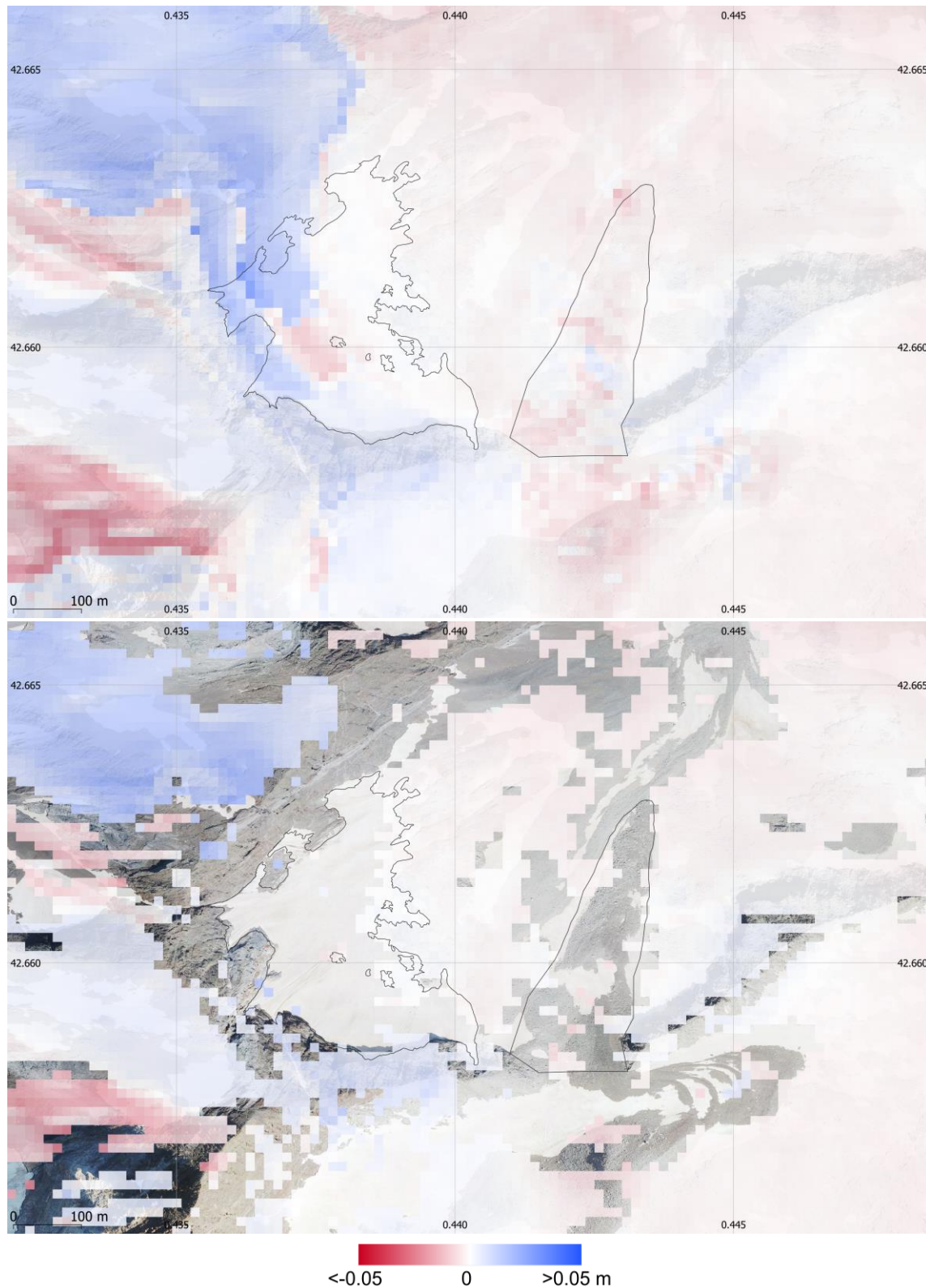


Figura 4.25. Desplazamientos DInSAR (LOS) del entorno de La Paúl del 11-oct-2019 a 17-sep-2020 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

5. DISCUSIÓN

Este estudio muestra una primera aproximación al potencial de la técnica DInSAR con imágenes de la plataforma Sentinel-1 para la monitorización de cuerpos helados de alta montaña, como el glaciar y glaciar rocoso pirenaico de La Paúl. De este modo, desde el 2016 hasta 2020 se ha analizado la respuesta de la técnica en cada uno de estos cuerpos helados. De este modo, los resultados obtenidos han variado en función de las características físicas de cada cuerpo y la época estudiada.

5.1. Análisis mensual

Los interferogramas generados a partir de adquisiciones consecutivas parten de una línea base perpendicular inferior a 50 m (exceptuando tres interferogramas, de los años 2016, 2019 y 2020) y una línea base temporal inferior a 20 días en la mayoría de los casos (Tabla 4.1). Esto, se ha traducido en unos valores de coherencia elevados en los interferogramas, superiores a 0.95 en casi todos los casos para las ráfagas escogidas.

Analizando los niveles de coherencia en la zona de estudio, se observa que el glaciar de La Paúl presenta valores muy bajos en todos los interferogramas. De hecho, una vez aplicada la máscara para eliminar píxeles con valores de coherencia inferiores a 0.3, el glaciar prácticamente no ha mostrado resultados (p. ej. Figura 4.1). En el glaciar rocoso, esta tendencia ha variado en función de las adquisiciones empleadas, pero por lo general ha mostrado valores de coherencia mucho más elevados que en la superficie del glaciar. Múltiples interferogramas han manifestado no solo una coherencia bastante extensa a lo largo de toda la superficie del glaciar rocoso, sino que los desplazamientos obtenidos han representado en gran medida la estructura del cuerpo, en forma de lengua formada por bloques que reptan ladera abajo. Observando las líneas base de todos los interferogramas, se podría decir que existe una relación entre las líneas base temporales más extensas y la reducción de coherencia en la zona (p. ej., Figura 4.3, Figura 4.6, Figura 4.14). Incluso, interferogramas con líneas base perpendiculares relativamente extensas en comparación al resto (95 m; Figura 4.12) han mostrado valores de coherencia más elevados que aquellos interferogramas

con líneas perpendiculares pequeñas, pero temporales más elevadas (p.ej., Figura 4.6 o Figura 4.13).

Si se observan las deformaciones sin las máscaras de coherencia, el glaciar rocoso de La Paúl muestra, por lo general, variaciones que bien podrían ser interpretadas como un comportamiento real del cuerpo helado. Mostrando el mapa de deformaciones movimientos significativos en lo que sería la superficie rocosa del cuerpo y desapareciendo esos desplazamientos en su entorno inmediato (p.ej., Figura 4.4). Estas deformaciones, pierden sentido al observar el glaciar de La Paúl. En todos los interferogramas, la superficie helada del glaciar muestra franjas de deformación que no parecen tener ninguna relación con los límites del glaciar o el comportamiento del mismo (p.ej., Figura 4.16). Estas franjas se localizan en la parte más elevada del glaciar (sur-oeste), en el contacto del hielo con las paredes montañosas. Por otro lado, el frente del glaciar no ha mostrado variaciones que permitan determinar algún patrón de comportamiento del mismo.

Debido a la extraña representación de las deformaciones del glaciar de La Paúl, se analiza únicamente la magnitud de las deformaciones en el glaciar rocoso. Si se observa el conjunto de los interferogramas, se pueden confirmar tendencias de deformación en LOS en forma de subsidencia que superan en muchas ocasiones los ± 15 mm. Existen casos en los que se representan deformaciones positivas (Figura 4.13 o Figura 4.14) con valores superiores a los 15 mm. Esto puede justificarse al tratarse de un cuerpo rocoso, donde el desplazamiento de los bloques, puede provocar situaciones en las que se gana volumen por una nueva distribución de los mismos.

A pesar de todo lo expuesto, si se analiza la orientación de los cuerpos helados estudiados y la banda-C empleada para la generación de interferogramas, habría que considerar la posibilidad de una cuantificación errónea de los desplazamientos. Emplear DInSAR para estudiar la deformación de superficies con banda-C, genera una franja de deformación (*fringe*) cada 28 mm de desplazamiento en la dirección LOS. Si se considera que el desplazamiento principal de la superficie controlada se está produciendo en una dirección prácticamente perpendicular a la dirección LOS (como sucede en el glaciar rocoso de La Paúl), un desplazamiento real de 28 mm de

la superficie, no va a generar una *fringe* de deformación en el interferograma. Con esto, se quiere dar a entender, que si las deformaciones reales en el glaciar rocoso de La Paúl pueden ser de unos escasos 5-10 cm en dirección norte-sur en el intervalo de un mes, adquisiciones con líneas temporales de unos 30 días, podrían ofrecer 2-4 de *fringes* en el mejor de los casos. Es decir, si el desplazamiento de la superficie controlada fuera completamente paralelo a la trayectoria del satélite (caso opuesto al de este estudio). Al emplearse líneas temporales incluso más pequeñas, como se ha realizado en el estudio mensual, la capacidad de detección de desplazamientos menores se reduce si cabe. Finalmente, a este aspecto habría que añadir el efecto de artefactos atmosféricos, que van a estar presentes inevitablemente y pueden enturbiar cualquier resultado de deformación de pocos milímetros o algunos centímetros y, máxime, si se están produciendo en dirección perpendicular al LOS.

5.2. Análisis estacional

Gran parte de los efectos y limitaciones mencionados en el apartado anterior (5.1), se mantienen en los interferogramas generados a partir de adquisiciones estacionales.

Todos los interferogramas generados, a excepción del 2016, cuentan con líneas base perpendiculares inferiores a 50 m (Tabla 4.2). Sin embargo, en este caso el intervalo de tiempo entre adquisiciones ha sido muy superior al del análisis mensual, siendo las adquisiciones del 2020 las que han contado con la línea temporal más pequeña (30 días; Tabla 4.2). Del mismo modo que en el análisis mensual, los interferogramas con líneas temporales relativamente extensas (>24 días) parecen afectar a la coherencia en la zona.

Si bien la interacción del glaciar con las imágenes S1 y la técnica DInSAR, muestra el mismo comportamiento en relación a la distribución de las deformaciones y coherencia que en el análisis mensual, el glaciar rocoso presenta un comportamiento diferente. El interferograma sobre el cuerpo rocoso revela desplazamientos más localizados en zonas concretas de su superficie (Figura 4.17, Figura 4.18), en lugar de presentar deformaciones en toda su extensión de forma homogénea, como sucedía con adquisiciones con líneas temporales más cortas. Por otro lado, los

desplazamientos obtenidos podrían ajustarse más a las variaciones reales del cuerpo rocoso según lo explicado en el apartado 5.1, no obstante la baja coherencia en la superficie del cuerpo helado en todos los interferogramas indica la poca fiabilidad de los resultados.

5.3. Análisis anual

El análisis anual de las deformaciones en el glaciar de la Paúl, presenta los mismos inconvenientes que en los apartados anteriores (5.1 y 5.2). El glaciar rocoso, por otra parte, sigue mostrando deformaciones localizadas en zonas concretas de su superficie, al igual que en el análisis estacional (5.2). Si bien, esas deformaciones localizadas, en algunos casos, son de mayor magnitud que en los interferogramas estacionales (Figura 4.24). Debido a la línea temporal superior a los 300 días (Tabla 4.3), sería más factible considerar que los desplazamientos del terreno en LOS en la superficie del glaciar rocoso son reales o, por lo menos, más cercanos que con el resto de aproximaciones. Sin embargo, al igual que en los análisis anteriores (especialmente en el estacional), la coherencia en casi toda su superficie es muy reducida, indicando deformaciones poco fiables.

5.4. DInSAR en la monitorización del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl

La localización, orientación y composición de los cuerpos estudiados han mostrado tener una gran influencia en los resultados de deformación en los cinco años analizados (2016-2020).

Tanto el glaciar como el glaciar rocoso de La Paúl se encuentran en una zona con topografía muy abrupta, cercana a picos que superan los 3000 m. Efectos atmosféricos, así como relacionados con la topografía, pueden afectar a la determinación de la fase y la coherencia adquirida entre adquisiciones y con ello el proceso de creación del interferograma. Además, la proximidad de los cuerpos estudiados a paredes verticales de grandes dimensiones genera distorsiones geométricas en las imágenes que parecen haber afectado a las deformaciones cuantificadas. Este efecto es especialmente identificable en el glaciar de La Paúl. Dicho glaciar, se encuentra encajado de sur a oeste por paredes que pueden llegar a

los 100 m de diferencia en altitud respecto al punto más elevado del glaciar. Mientras que la dirección de medición del *track* ascendente escogido para este estudio (*track* 30), es en la componente oeste-este. Esto significa que, al menos, la parte sur y oeste del glaciar, la más elevada y próxima a la pared montañosa, no recibe incidencia directa de la señal SAR (son zonas ciegas para el sensor). Esta parece ser una de las razones por las que el análisis DInSAR no presenta casi deformaciones en la superficie del glaciar en los cinco años estudiados una vez aplicada la máscara de coherencia. Es más, si se observan las imágenes sin la máscara (Figura 5.1), se puede apreciar cómo en las paredes mencionadas, así como las zonas más elevadas del glaciar (zonas de sur a oeste), las deformaciones obtenidas muestran un comportamiento extraño para lo que cabría esperar de un glaciar que pierde volumen y extensión anualmente (Rico, 2019). Este aspecto resalta las dificultades de la técnica con relación a la localización de la superficie en estudio y el diseño de medición del sensor en ciertos escenarios.

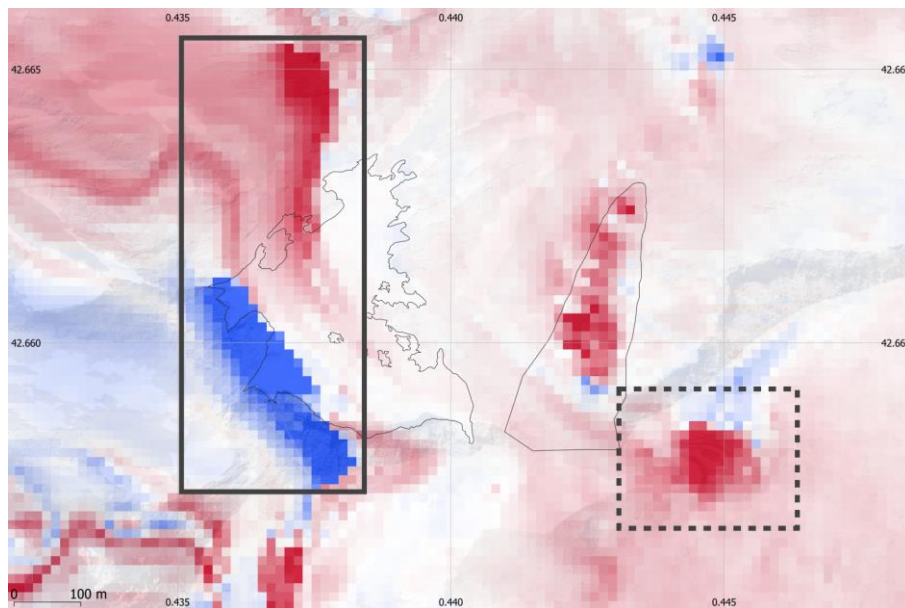


Figura 5.1. Ejemplo de los efectos de las distorsiones geométricas provocadas por la localización, entre otros, del glaciar de La Paúl en el interferograma generado a partir de las adquisiciones del 18-ago-2020 y 05-sep-2020 (recuadro negro continuo). Glaciar rocoso activo de Posets (recuadro negro discontinuo), el cual ha mostrado patrones de deformación durante las adquisiciones al igual que el glaciar rocoso de La Paúl.

Por otro lado, el aspecto de la localización ha influenciado en menor medida a las mediciones sobre el glaciar rocoso de La Paúl. Más alejado de esas paredes verticales, la técnica ha mostrado valores de deformación en las imágenes con máscara de coherencia en más casos. Es más, si se observan las imágenes de

deformación sin la máscara aplicada, las diferencias determinadas en la superficie del glaciar muestran una cierta relación con el comportamiento general de un glaciar rocoso activo, en casi todos los casos. Sin embargo, la coherencia también ha mostrado la poca fiabilidad de muchas de las mediciones hechas sobre este cuerpo rocoso, sobre todo en las comparaciones anuales (apartado 4.3).

La orientación de los cuerpos ha sido otro de los inconvenientes a la hora de obtener buenos resultados con la técnica. A pesar de que la combinación de la técnica DInSAR con imágenes Sentinel-1 ofrece buenos resultados para el control de glaciares rocosos (Villarroel et al., 2018; Strozzi et al., 2020), la orientación principalmente sur-norte del glaciar rocoso de la Paúl, hace que las deformaciones por el desplazamiento de bloques ocurran especialmente en la dirección de la pendiente, perpendicular a la línea de visión del satélite (LOS). Esto hace que las magnitudes de los desplazamientos en el glaciar rocoso parezcan infravaloradas en comparación a otros métodos geomáticos aplicados para la monitorización del mismo cuerpo rocoso (Martínez-Fernández et al., 2019). Sin embargo, el patrón de deformación observado en muchos de los interferogramas, con variaciones más acentuadas en la parte occidental del glaciar rocoso, sugiere una concordancia con el patrón de deformación obtenido en otros estudios (Martínez-Fernández et al., 2019). Hay que destacar que, del mismo modo que el glaciar rocoso de La Paúl, otros glaciares rocosos activos de la zona como el de Posets (Figura 5.1; Serrano et al., 2019), también han mostrado variaciones en su superficie, exponiendo la capacidad de la técnica para el control de deformaciones en este tipo de cuerpos.

La contribución de la dirección de la pendiente y, por lo tanto, la dirección de los principales desplazamientos es más acentuada si cabe en el glaciar de La Paúl. La composición de hielo y nieve y la dirección de movimiento principal sur-norte del glaciar, ha contribuido a que la coherencia en su superficie sea muy reducida y, por lo tanto, los desplazamientos obtenidos poco fiables. La desfavorable interacción del hielo y la nieve con las mediciones SAR es identificable en el frente del glaciar durante los intervalos de tiempo estudiado. Si bien, se ha observado que la parte más elevada del glaciar pudo tener problemas por el bloqueo de la señal SAR sobre el glaciar, el frente de este (distribuido entre el norte y el este del cuerpo) no debería verse tan

afectado. Sin embargo, los interferogramas comenzaron a mostrar valores de coherencia altos (superiores a 0.3) en el frente del glaciar, en lo que sería el cambio de la superficie de hielo y nieve, a la superficie rocosa predominante en el entorno. La monitorización de masas de hielo como los glaciares con técnicas DInSAR e imágenes Sentinel-1 ha mostrado ser efectiva en ciertas condiciones (Sánchez-Gámez & Navarro, 2017). Sin embargo, la longitud de onda de la banda-C (5.6 cm) con las que se obtienen las imágenes Sentinel-1, ha resultado ser de menor utilidad que longitudes de onda más largas (como la banda-L), en situaciones donde los flujos del hielo son medios o rápidos (Cheng, Li, Shao, & Li, 2007). Incluso, se ha llegado a emplear la baja coherencia de las imágenes S1 en glaciares para la delineación de su superficie (Lippl, Vijay, & Braun, 2018). Esto podría dar a entender que, junto a la localización y orientación del glaciar, su composición y rápido deshielo (Rico, 2019), podría afectar a la calidad de la señal recibida por el sensor SAR en el caso del glaciar de La Paúl. Para comprobar esta hipótesis, se realizó una prueba en el glaciar de Maladeta (Anexo 2. DInSAR glaciar de Maladeta), cuya orientación es similar al glaciar de La Paúl, pero su extensión es mucho mayor (de unas 6 ha en La Paúl a unas 30 ha en Maladeta). Los resultados de coherencia en el interferograma en esa prueba apoyaron la idea de que la composición de hielo y nieve, la orientación y el rápido deshielo (que puede llegar a varios metros en la época estival en el glaciar de Maladeta; Rico, 2019), pueden afectar a los resultados obtenidos en el glaciar de La Paúl.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El presente TFG muestra una primera aproximación al estudio de deformaciones de cuerpos helados pirenaicos con técnicas DInSAR. En concreto, muestra la aplicación de la técnica para el control del glaciar y glaciar rocoso de La Paúl, Macizo de Posets, Huesca. Se trata de un ambiente de alta montaña con unos cuerpos helados con localización y orientación que, a priori, no serían ideales para la aplicación de esta técnica.

Las pruebas realizadas en los cinco años de estudio (2016-2020), han mostrado la complejidad de la técnica y sus ventajas en la monitorización de estos cuerpos a

partir de la generación de 25 interferogramas, con 21 imágenes SAR, que han variado de pocos días, a estaciones completas, o años.

En una situación ideal, la técnica DInSAR se emplearía en zonas extensas con movimientos súbitos grandes, preferiblemente con orientaciones este-oeste, o viceversa, y sobre superficies que permitieran una dispersión de la señal radar óptima. En su lugar, en este estudio existen, por lo general, desplazamientos reducidos (submétricos), constantes a lo largo de unos pocos meses, en cuerpos que tienen desplazamientos predominantes sur-norte y su composición no es la más adecuada para la dispersión de la señal (en el caso del glaciar).

Las características del estudio se han hecho visibles en los resultados obtenidos, donde la coherencia en los DInSAR ha mostrado ser crítica en la superficie de los cuerpos helados estudiados. Además, en muchos casos los datos arrojados por la técnica han implicado desplazamientos en LOS que podrían asociarse a errores atmosféricos, más que a desplazamientos reales (sobre todo entre adquisiciones con líneas base temporales de días). A pesar de las dificultades, la aplicación de imágenes gratuitas de las plataformas Sentinel-1, ha mostrado ventajas respecto a otras técnicas. Si bien el glaciar de La Paúl no ha arrojado información sobre su tasa de deformación, los interferogramas han permitido observar otros aspectos del cuerpo, como puede ser la extensión del frente del glaciar. Esto podría ser útil para analizar la tasa de retroceso del frente a lo largo del tiempo. En el caso del glaciar rocoso de La Paúl, la magnitud de los desplazamientos no parece concordar exactamente con lo que otras técnicas geomáticas muestran, sobre todo, entre adquisiciones con líneas temporales extensas. Las mediciones en la dirección LOS, los errores o artefactos atmosféricos que afectan a la señal y enmascaran pequeños desplazamientos y los errores residuales derivados de un MDE con resolución de 30 m no exento de posibles errores, son causas que pueden afectar a esa cuantificación de las deformaciones en una superficie que, además, no tiene una orientación óptima para la aplicación de técnicas DInSAR. A pesar de todo ello, la distribución de las deformaciones, sí que ha mostrado una concordancia con resultados obtenidos en estudios previos sobre el cuerpo rocoso, lo que motiva a seguir estudiando las posibilidades de las imágenes SAR en el entorno estudiado.

Como aproximación, este TFG muestra diversas dificultades para la monitorización de cuerpos helados de alta montaña, a la vez que incita a la aplicación de otras soluciones relacionadas con las imágenes SAR. Entre ellas, puede encontrarse la combinación de imágenes ascendentes y descendentes con la técnica DInSAR para la mejorar de resultados en ambos cuerpos helados o la aplicación de otras técnicas como *Pixel Offset Tracking* para monitorizar la superficie helada del glaciar. El empleo de técnicas más complejas y completas, como son las series temporales (*Persistent Scatterer Interferometry*), también parece mostrar buenos resultados en el control de glaciares y glaciares rocosos. Esta técnica, permitiría reducir los efectos atmosféricos en la determinación de fase entre adquisiciones, entre otros, para una mejor determinación de la magnitud de las deformaciones. Otras soluciones, pasan por el empleo de diferentes longitudes de onda. Como puede ser la banda-X empleada por la plataforma satelital española PAZ, que debido a su menor longitud de onda en comparación a la banda-C de Sentinel-1, podría ofrecer resultados más precisos.

La interferometría radar muestra un gran potencial para el control de deformaciones de cuerpos helados en los Pirineos, cuya información puede ser de gran ayuda para entender los efectos del cambio climático en la región. En la actualidad, CSIC como el Instituto Pirenaico de Ecología (Jaca) o grupos de investigación como el GIR PANGAEA (Universidad de Valladolid), alternan cada cierto período de tiempo el control de diferentes glaciares y glaciares rocosos pirenaicos. El control preciso de estos cuerpos exige un esfuerzo personal y logístico difícilmente alcanzable con los métodos que vienen empleándose en la zona (GNSS, drones, escáner láser, etc.). Disponer de desplazamientos a partir de imágenes SAR, significaría el control de muchos más cuerpos pirenaicos y más información acerca del cambio climático.

Bibliografía

ASF. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://asf.alaska.edu/>

Cheng, X., Li, X., Shao, Y., & Li, Z. (2007). DINSAR measurement of glacier motion in Antarctic Grove Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 52, 358–366. doi:<https://doi.org/10.1007/s11434-007-0054-y>

ESA Tutorials. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/>

González García, M., Serrano, E., Sanjosé, J., & González Trueba, J. (2017). Surface dynamic of a protalus lobe in the temperate high mountain. Western Maladeta, Pyrenees. *Catena*, 149, 689-700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.011>

Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J., Guerrero, J., D. Notti, J. G., Fernández-Merodo, J., & Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 31-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.020>

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>

InSAR Principles. (10 de 09 de 2021). Obtenido de InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation: https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19

Lipl, S., Vijay, S., & Braun, M. (2018). Automatic delineation of debris-covered glaciers using InSAR coherence derived from X-, C- and L-band radar data: A case study of Yazgyl Glacier. *Journal of Glaciology*, 64(247), 811-821. doi:<https://doi.org/10.1017/jog.2018.70>

López-Moreno, J., Alonso-González, E., Monserrat, O., Del Río, L., Otero, J., Lapazaran, J., Revuelto, J. (2019). Ground-based remote-sensing techniques for diagnosis of the current state and recent evolution of the Monte Perdido Glacier, Spanish Pyrenees. *Journal of Glaciology*, 65 (249), pp. 85-100. doi:<https://doi.org/10.1017/jog.2018.96>

López-Moreno, J., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., García-Ruiz, J. (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *Cryosphere*, 10 (2), 681-694. doi:<https://doi.org/10.5194/tc-10-681-2016>

Martínez-Fernández, A., Serrano, E., Sanjosé, J. J., Gómez-Lende, M., Pisabarro, A., & Sánchez, M. (2019). Geomatic methods applied to the change study of the La Paúl rick glacier, Spanish Pyrenees. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 1771–1775. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1771-2019>

Proyecto PNOA. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://pnoa.ign.es/presentacion-y-objetivo>

QGIS Project. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://www.qgis.org/en/site/>

Rico, I. I. (2019). Los glaciares de los Pirineos. Estudio glaciológico y dinámica actual en el contexto del cambio global. Universidad del País Vasco. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10810/33085>

RUS Training. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-offer/training/>

Sánchez-Gámez, P., & Navarro, F. (2017). Glacier Surface Velocity Retrieval Using D-InSAR and Offset Tracking Techniques Applied to Ascending and Descending Passes of Sentinel-1 Data for Southern Ellesmere Ice Caps, Canadian Arctic. *Remote Sens.*, 9, 442. doi:<https://doi.org/10.3390/rs9050442>

Sentinel Hub. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://www.sentinel-hub.com/>

Sentinel-1 Mission. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>

Serrano, E., & Martín-Moreno, R. (2018). Surge glaciers during the Little Ice Age in the Pyrenees. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44, 213-244. doi:<https://doi.org/10.18172/cig.3399>

Serrano, E., de Sanjosé-Blasco, J. J., Gómez-Lende, M., López-Moreno, J. I., Pisabarro, A., & Martínez-Fernández, A. (2019). Periglacial environments and frozen ground in the central Pyrenean high mountain area: Ground thermal regime and distribution of landforms and processes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 30, 4, 1045-6740. doi:<https://doi.org/10.1002/ppp.2032>

Serrano, E., López-Moreno, J., Gómez-Lende, M., Pisabarro, A., Martín-Moreno, R., Rico, I., & Alonso-González, E. (2020). Frozen ground and periglacial processes relationship in temperate high mountains: a case study at Monte Perdido-Tucarroya area (The Pyrenees,

Spain). Journal of Mountain Science, 17 (5), pp. 1013-1031.
doi:<https://doi.org/10.1007/s11629-019-5614-5>

SNAP v.8.0. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

SNAPHU Plugin. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/snaphu/>

Strozzi, T., Caduff, R., Jones, N., Barboux, C., Delaloye, R., Bodin, X., Schrott, L. (2020). Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar. Remote Sens., 12, 559. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12030559>

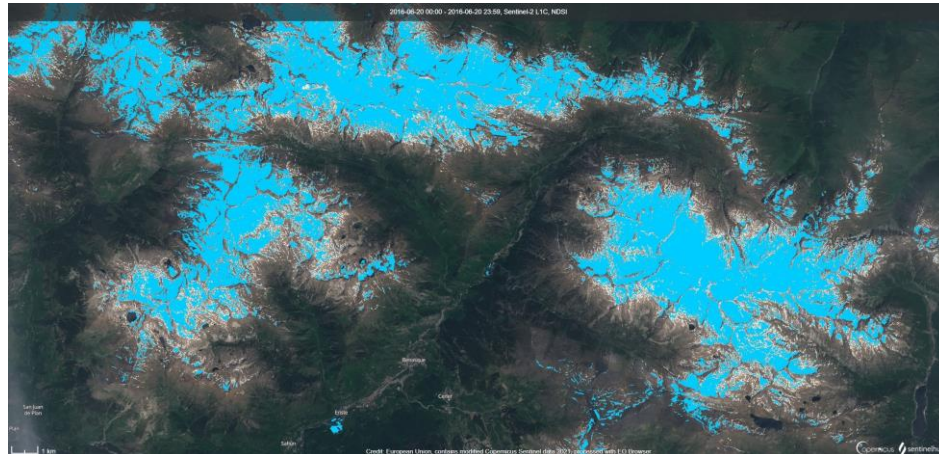
Velasco, J. G. (2009). Energías renovables. Editorial Reverte.

Villarroel, C., Tamburini Beliveau, G., Forte, A., Monserrat, O., Morvillo, M. C., Tamburini Beliveau, G., Morvillo, M. (2018). DInSAR for a Regional Inventory of Active Rock Glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with Sentinel-1 Data. Remote Sens., 10, 1588. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10101588>

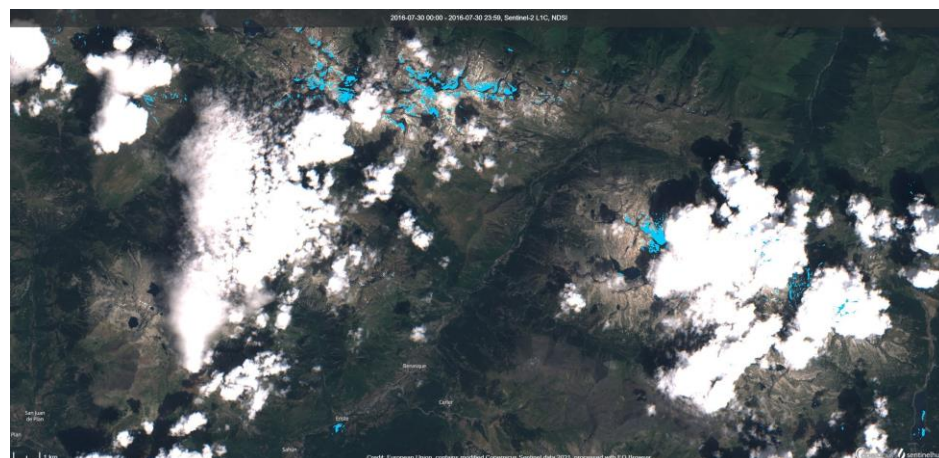
Anexos

Anexo 1. Imágenes Sentinel-2

Imágenes Sentinel-2 con índice NDSI obtenidas de *Sentinel Hub*, donde se aprecia la evolución de la cubierta de nieve durante la época estival.



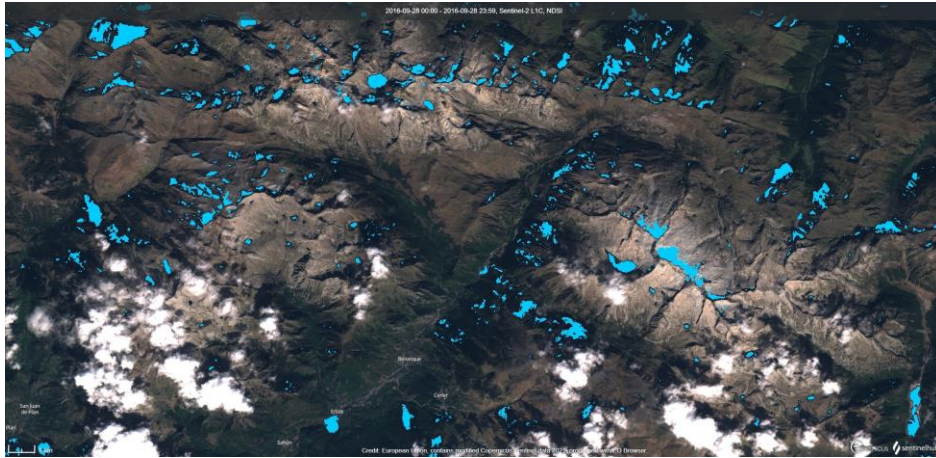
20-jun-2016



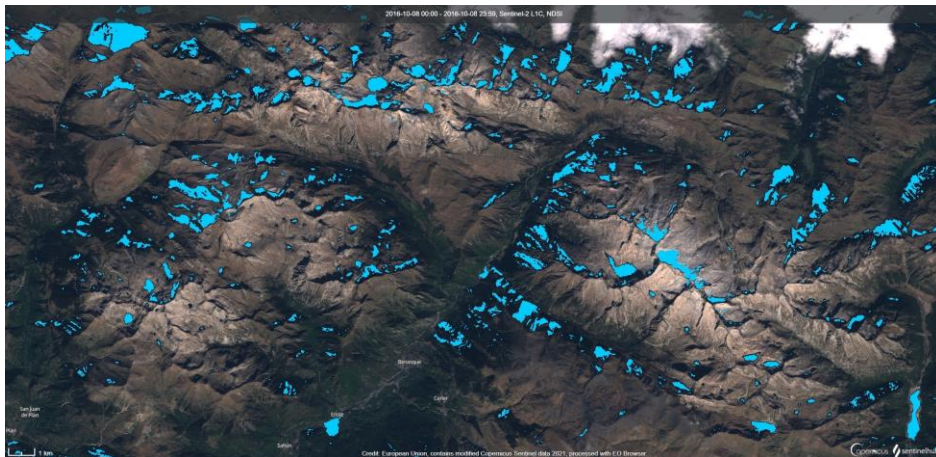
30-jul-2016



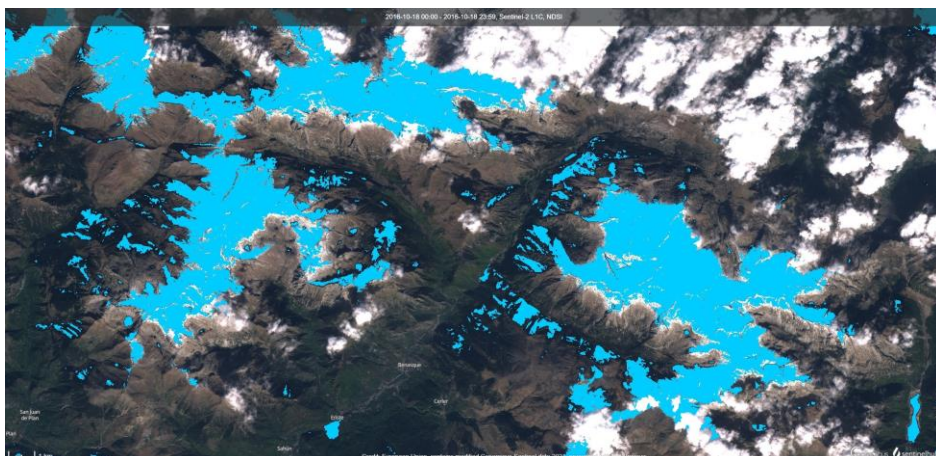
08-sep-2016



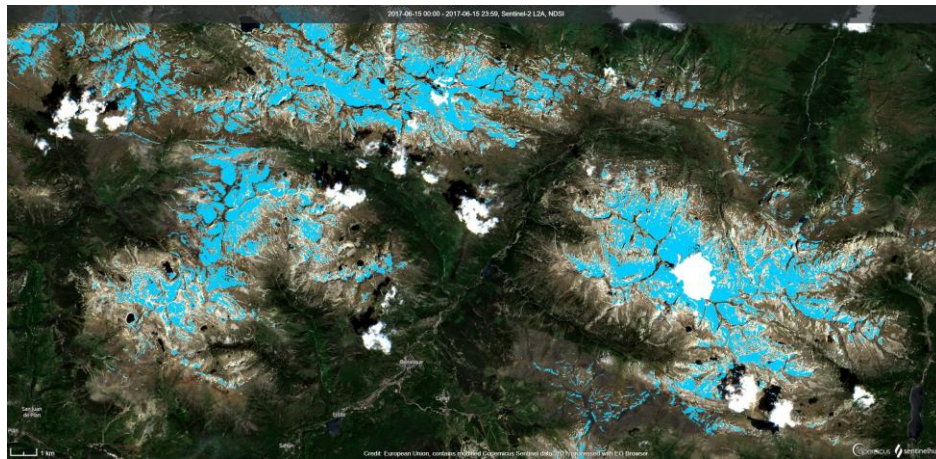
28-sep-2016



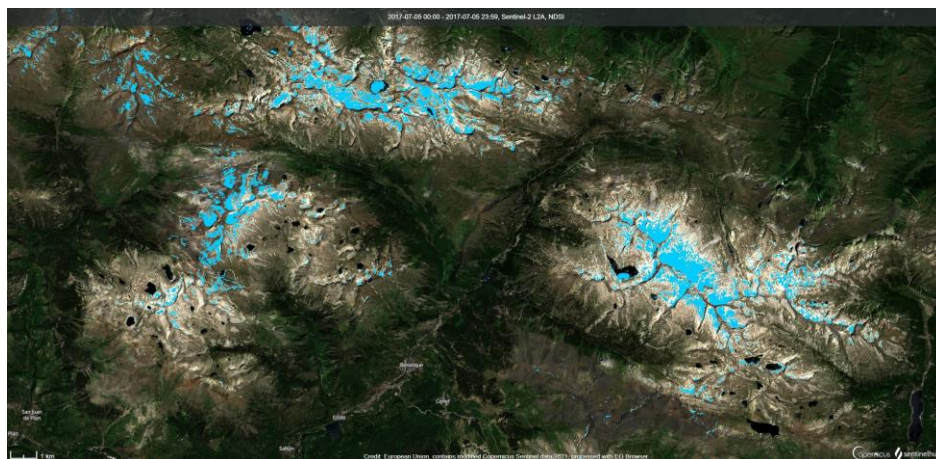
08-oct-2016



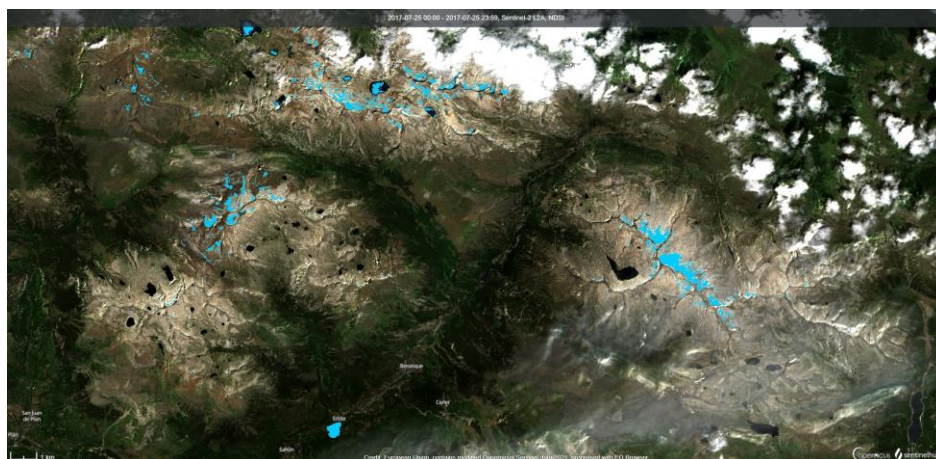
18-oct-2016



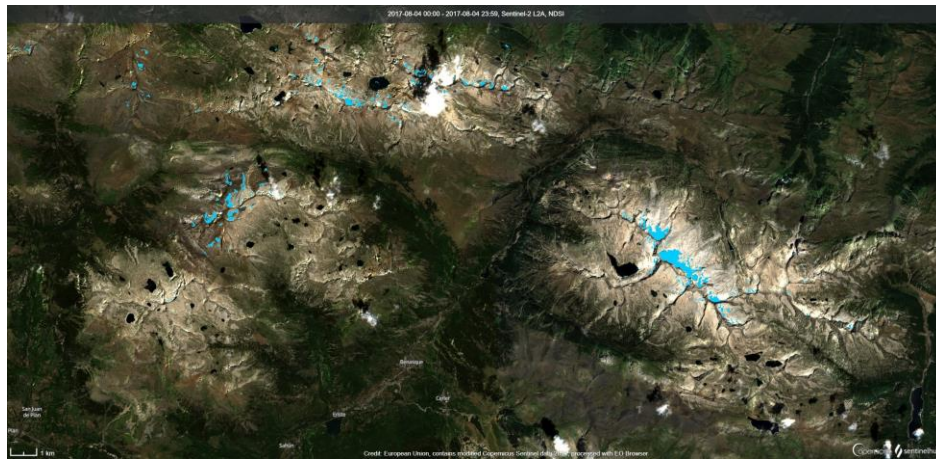
15-jun-2017



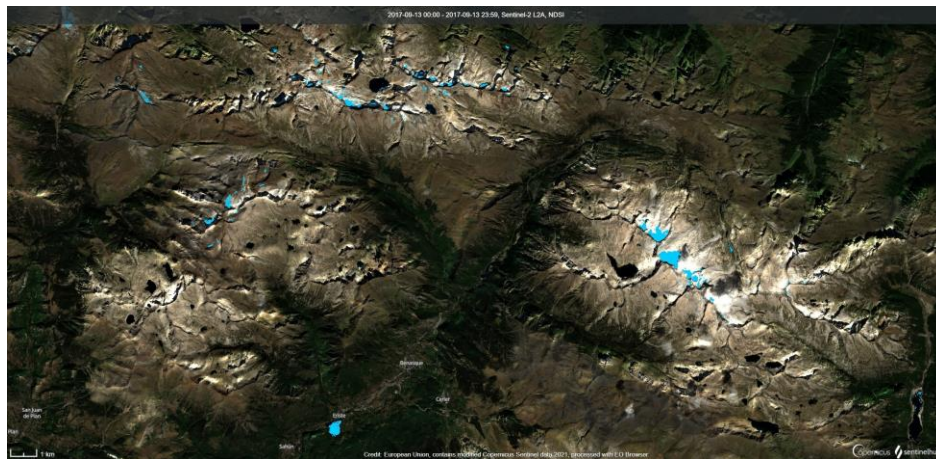
05-jul-2017



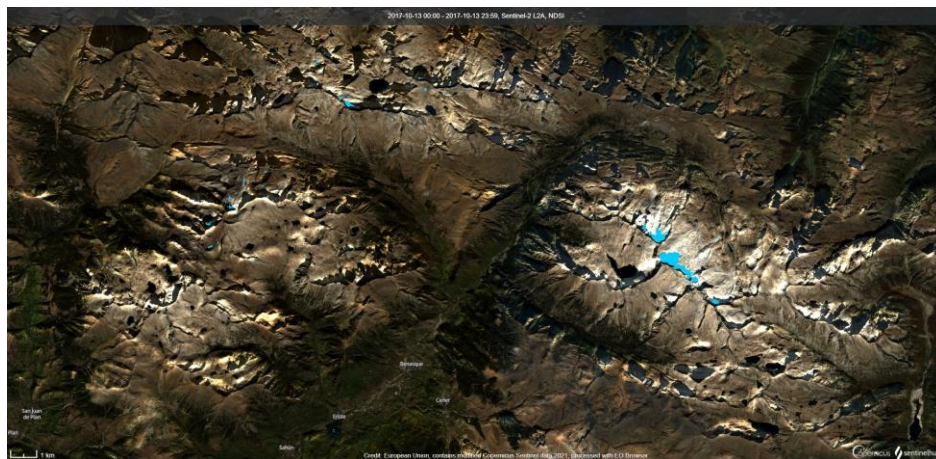
25-jul-2017



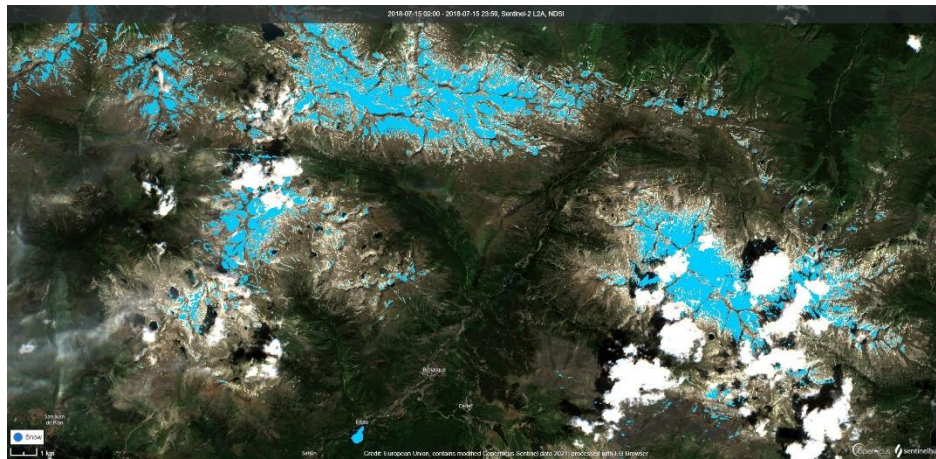
04-ago-2017



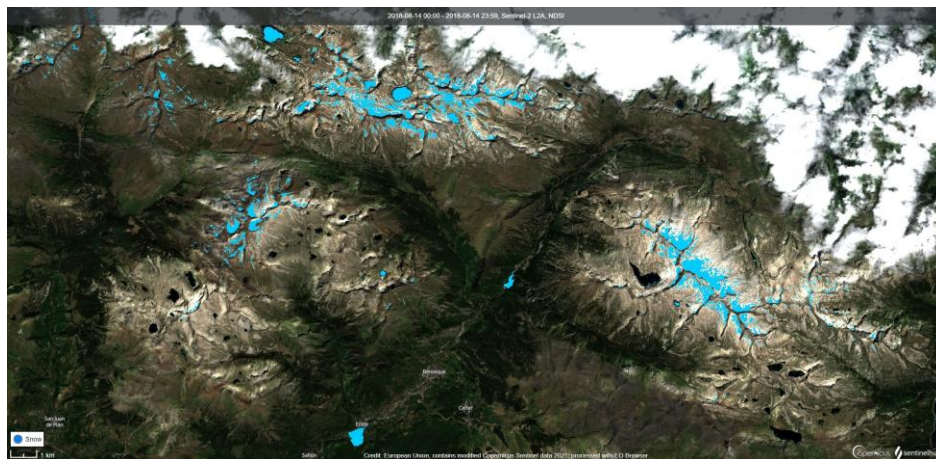
13-sep-2017



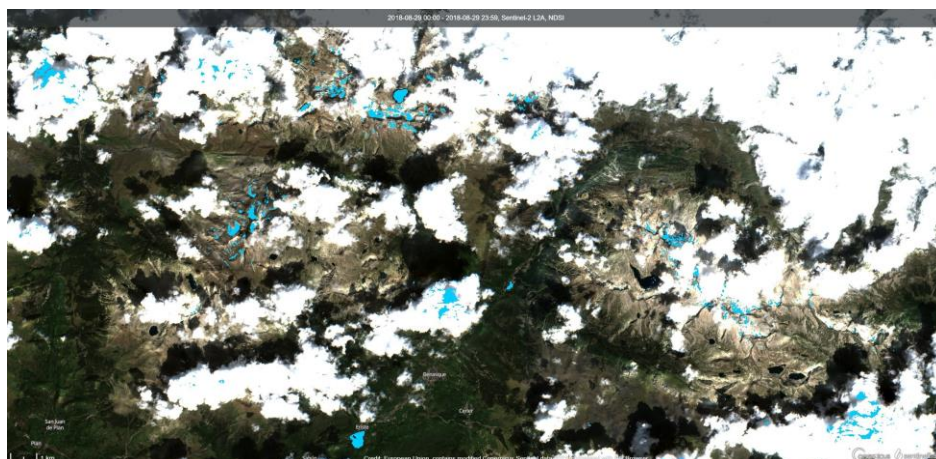
13-oct-2017



15-jul-2018



14-ago-2018



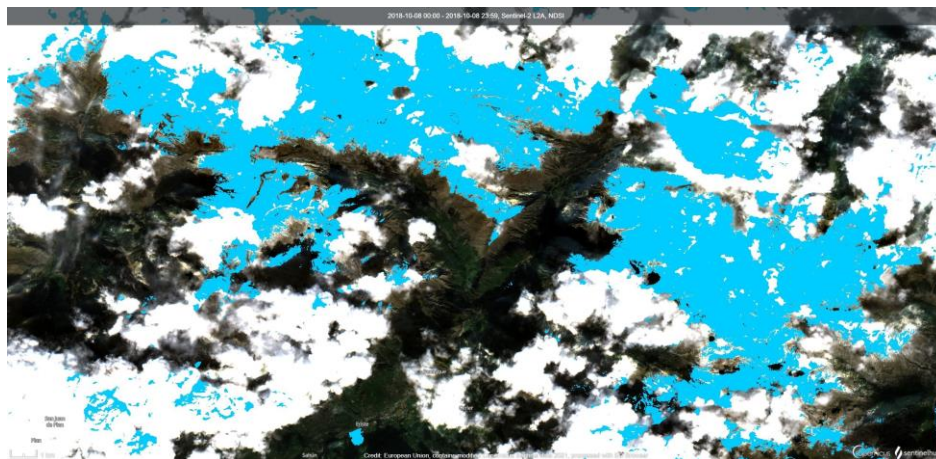
29-ago-2018



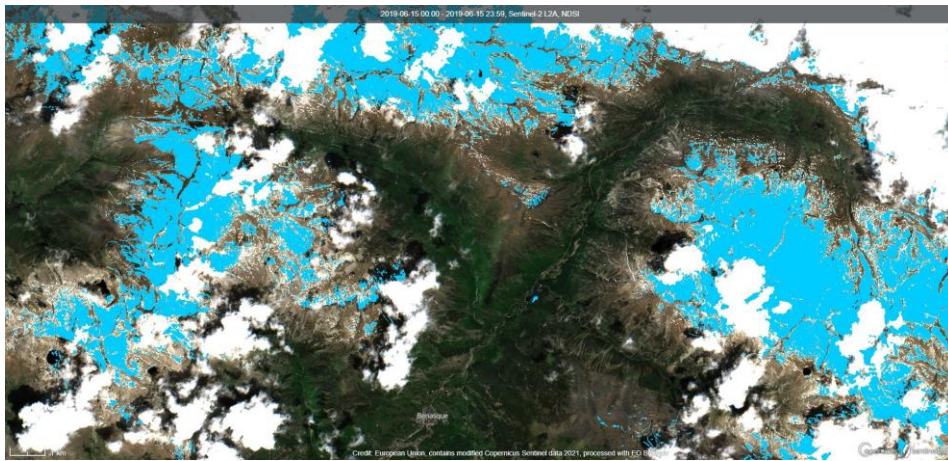
18-sep-2018



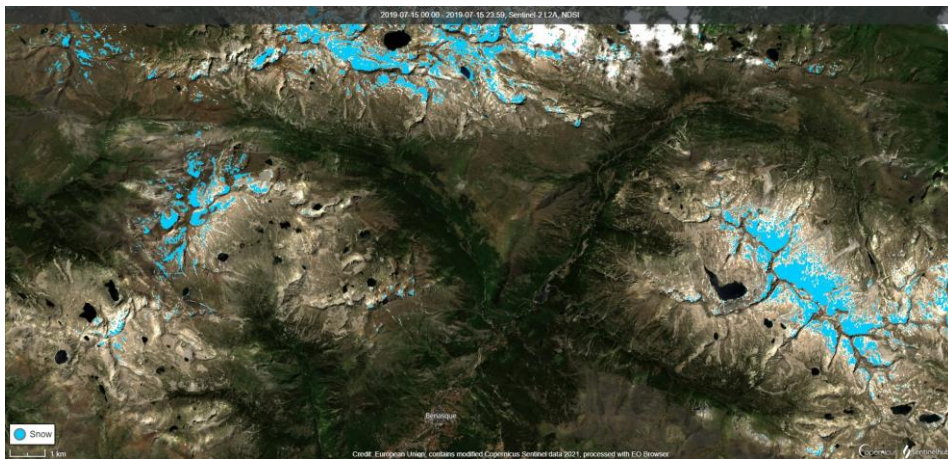
28-sep-2018



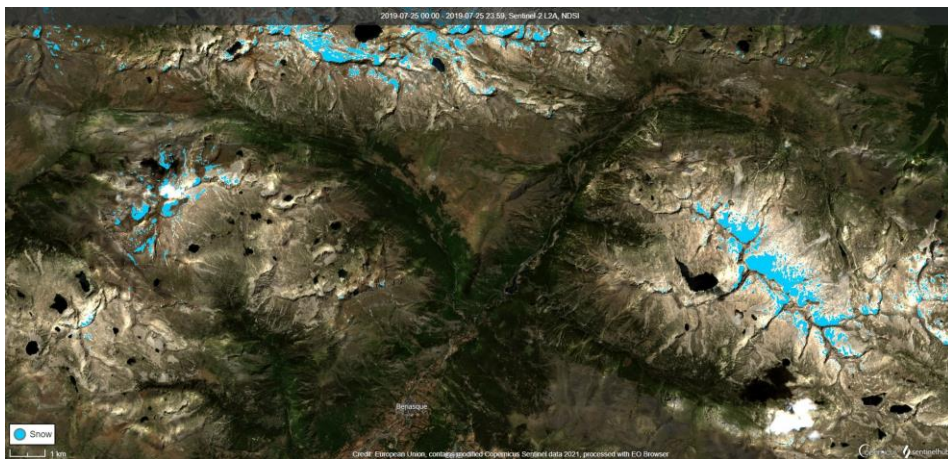
08-oct-2018



15-jun-2019



15-jul-2019



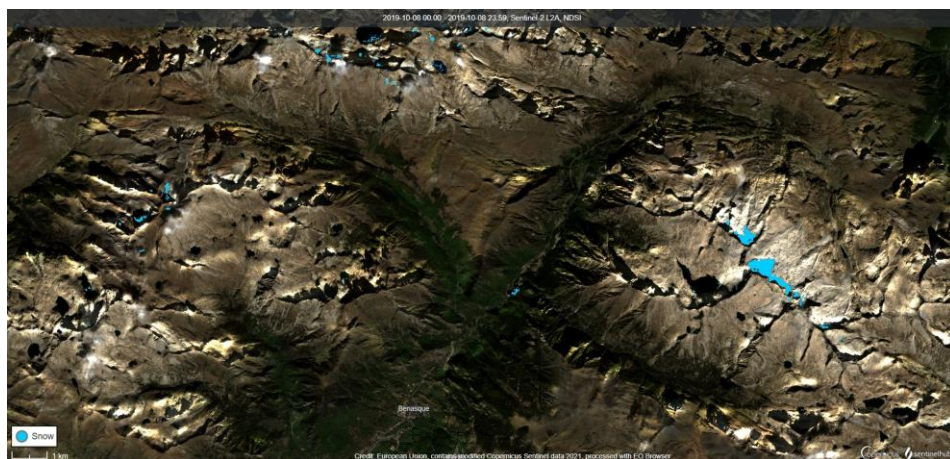
25-jul-2019



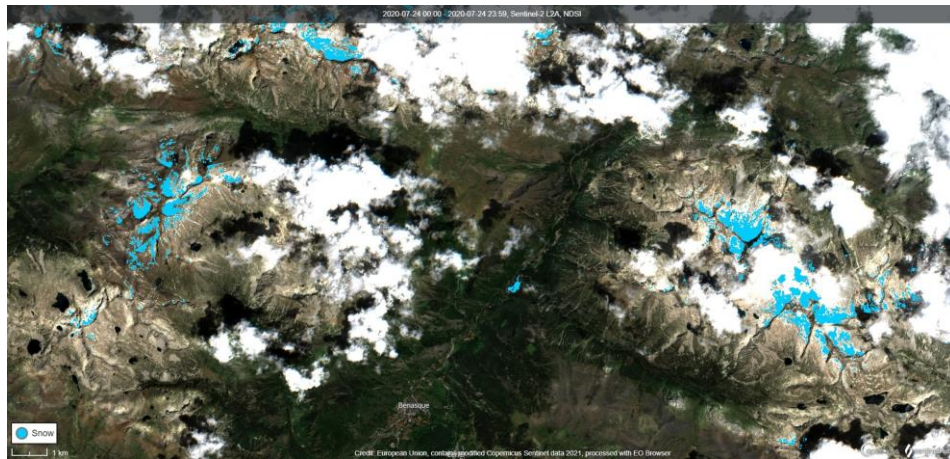
14-ago-2019



08-sep-2019



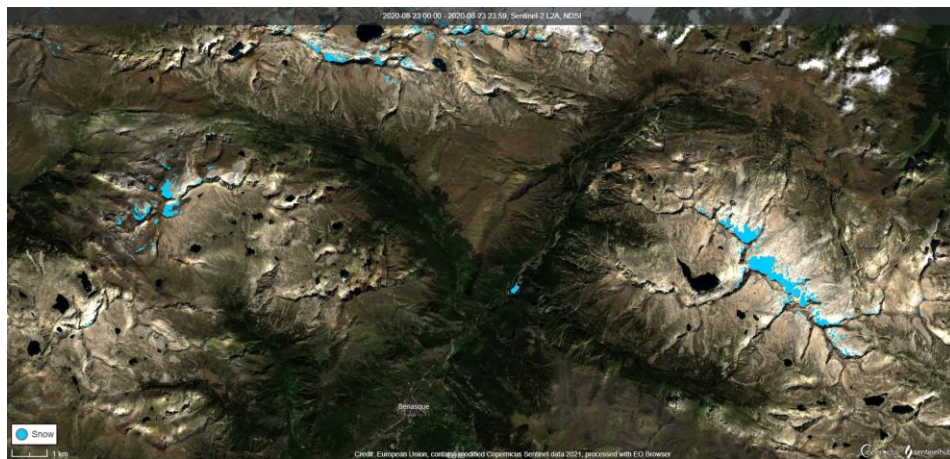
08-oct-2019



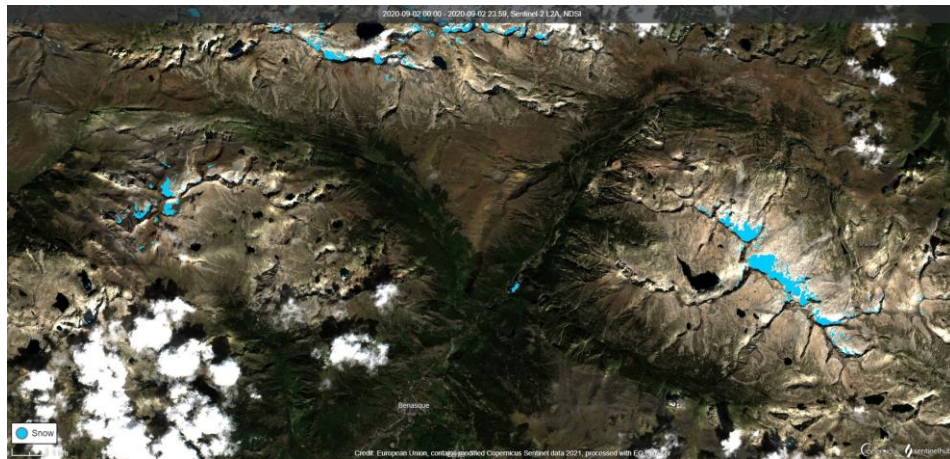
24-jul-2020



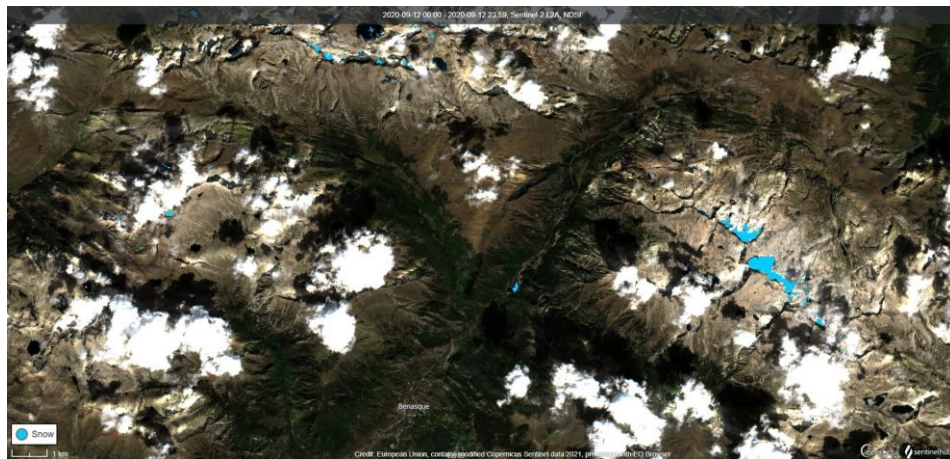
03-ago-2020



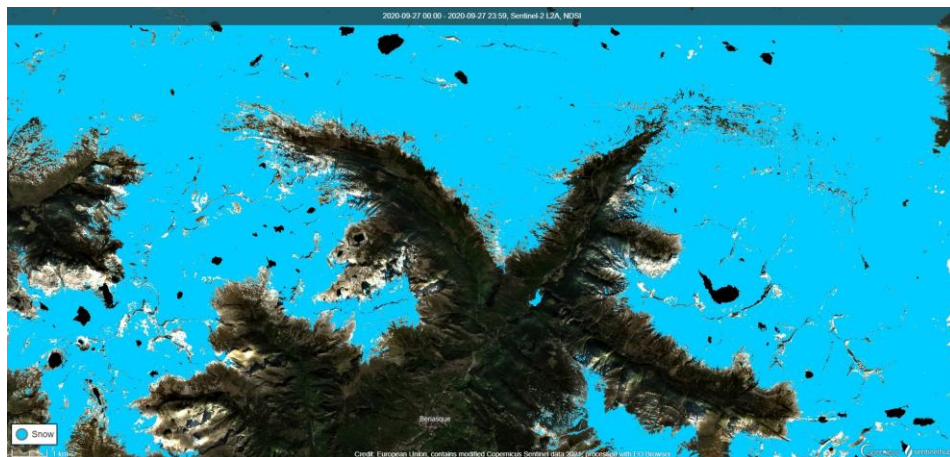
23-ago-2020



02-sep-2020



12-sep-2020



27-sep-2020

Anexo 2. DInSAR glaciar de Maladeta

04-ago-2017 a 09-sep-2017

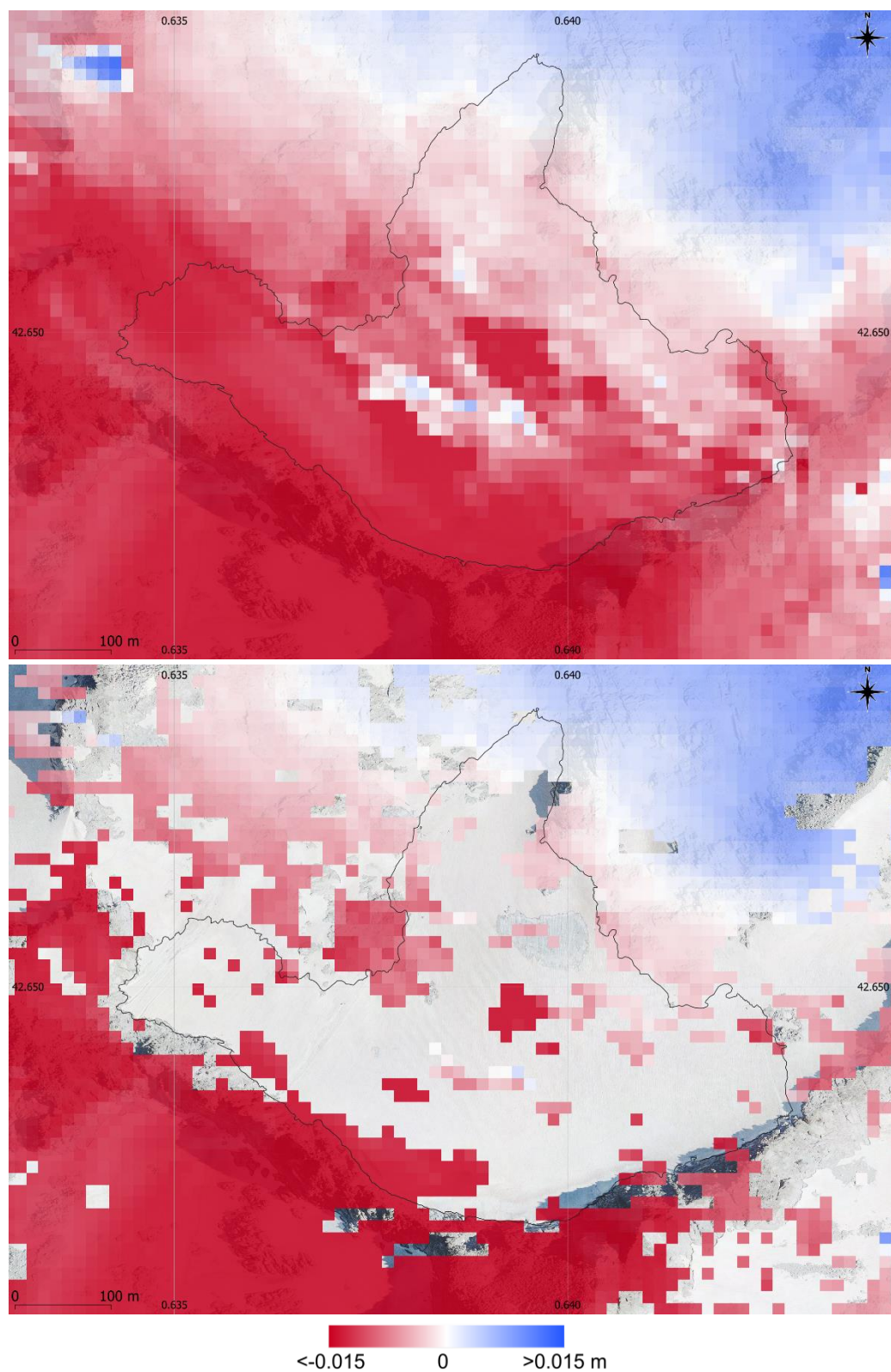


Figura 0.1. Desplazamientos DInSAR (LOS) del glaciar de Maladeta del 04-ago-2017 a 09-sep-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

21-sep-2017 a 03-oct-2017

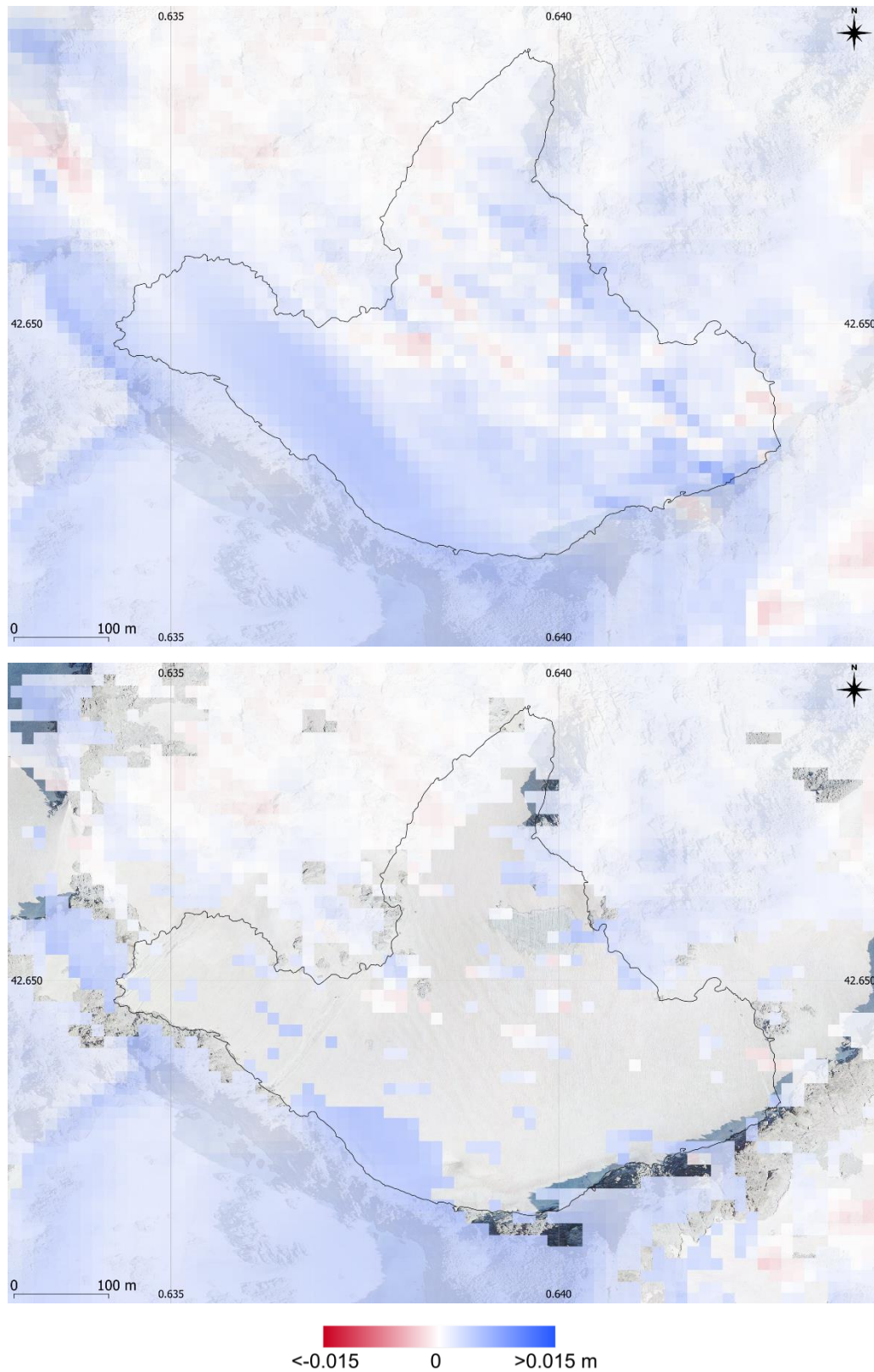


Figura 0.2. Desplazamientos DInSAR del glaciar de Maladeta del 21-sep-2017 a 03-oct-2017 sin máscara de coherencia (arriba) y con máscara de coherencia ≥ 0.3 (abajo).

