



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) Y ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO SBAS, PARA TRES CASOS DE ESTUDIO EN CHILE CENTRAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MARIO GASTÓN GARCÉS MUÑOZ

PROFESORA GUÍA:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

PROFESOR CO-GUÍA:

LENART GONZÁLEZ LAGOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARISOL LARA CASTILLO

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Geólogo

POR: Mario Gastón Garcés Muñoz

FECHA: 27/08/2020

PROFESORA GUÍA: Sofía Rebolledo Lemus

APLICACIÓN DE INTEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) Y ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO SBAS, PARA TRES CASOS DE ESTUDIO EN CHILE CENTRAL

Las características geológicas y geomorfológicas de Chile, además de su disposición tectónica determinan la existencia de distintos peligros geológicos, incluidos terremotos, tsunamis, volcanismo y deslizamientos de terreno. En este contexto, comprender la evolución temporal y espacial de los desplazamientos superficiales y los mecanismos responsables de estos es de gran importancia, con miras a mitigar sus efectos.

En este estudio, la deformación del suelo es monitoreada a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 1 mediante la aplicación de técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Las imágenes seleccionadas, presentan tanto geometrías ascendentes como descendentes adquiridas desde 2017 a 2019, para el estudio de tres casos relevantes en Chile central.

El procedimiento empleado consistió en la utilización de la metodología de series de tiempo SBAS, en donde se generaron pilas de imágenes procesadas en el *software* de código abierto GMTSAR, posterior a eso, el efecto rampa fue retirado para cada uno de los productos interferométricos y fue fijado el umbral de coherencia correspondiente. Finalmente, a partir de la utilización del algoritmo SBAS fueron generados mapas de desplazamiento acumulado (mm) y de velocidad de desplazamiento (mm/a), en función de la línea de visión del satélite (LOS).

Los resultados obtenidos se dividen para cada caso de estudio. La primera zona corresponde a la ciudad de Rancagua, donde se obtuvieron velocidades de desplazamiento promedio para el sector de 4 mm/a, considerándose una zona estable, sin embargo, presenta algunos focos de movimiento con una tasa máxima de 12 mm/a, asociados principalmente al río Cachapoal y sectores industriales. En la segunda zona, correspondiente a la mina El Teniente, se determinaron dos dominios de deformación, que corresponden al límite exterior del cráter de hundimiento y al límite interior al cráter. En el límite exterior se observaron valores entre -2,5 a 2,5 cm, en geometría ascendente en 15 meses de estudio, y -7,5 a 7,5 cm, en geometría descendente en los 18 meses observados. Mientras que para el límite interior del cráter se observaron valores entre -21,4 a 15 cm, en geometría ascendente en 15 meses de estudio y -37 a 18 cm, en geometría descendente en los 18 meses observados. La tercera zona corresponde al deslizamiento ocurrido en Yerba Loca, donde no fue posible observar la totalidad de deformaciones del evento, pero sí se pudo cuantificar las tasas de deformación del halo del deslizamiento con valores máximos absolutos de 16 cm/a, para el momento previo, una tasa para el periodo que engloba un momento previo, durante y posterior al evento de 10,8 cm/a, y varios meses luego del evento, de 4 cm/a.

Se concluye que mediante la aplicación de técnicas InSAR, es posible realizar análisis que permitan cuantificar procesos relevantes de deformaciones de terreno a escala de detalle lo que en perspectiva posibilita que en trabajos futuros en esta área sigan optimizándose, configurando así una útil y eficaz herramienta para la comprensión de estos fenómenos.

“Todos nos contamos una historia sobre nosotros mismos. Siempre. Continuamente. Esa historia es lo que nos convierte en lo que somos. Nos construimos a nosotros mismos a partir de esa historia.”

Patrick Rothfuss

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por el apoyo a lo largo de la carrera, en especial a mi madre por enseñarnos con su amor y con su ejemplo, también a mi hermano Sebastián por estar siempre conmigo como el sol está en trigo.

A mis amigos de Puerto Montt, con quienes aún tengo la suerte de vernos seguido, Joako, Oso, Miki, Becks, Osvaldo y Vito, por tantos días felices.

A F. Delgado, M. Moreno y J. Hormazábal, por su ayuda valiosa y desinteresada en momentos claves del trabajo, sin su aporte no estaría escribiendo estas palabras. A Benja G.C quien me salvo mil veces con problemas computacionales, también a la Javi por involucrarse en el trabajo realizado.

A las personas de la carrera, donde tuve la suerte de conocer demasiada gente increíble en este tiempo, como la Romy, Vanne, Puli, Morita entre muchos otros.

Al departamento de geología, en especial a las funcionarias/os, Rosita, Vero, y la Blanca quien siempre de buena gana nos ayuda a resolver un sin fin de problemas.

Quiero agradecer a las personas con quienes compartí en el tránsito de la memoria por las risas y la buena onda, en especial al Gabriel, Jess, Nine y Nacho, también al Benja G.L por los almuerzos, hicieron de esta etapa algo mucho más llevadero.

A mis profesores de la comisión, Sergio, Marisol, Lenart por su invaluable ayuda y conocimientos entregados, en especial a mi profesora guía, Sofía por la cercanía, el apoyo y sobre todo por la paciencia en los momentos en que la memoria no resultaba para nada.

A las personas que conocí en política universitaria, a la gente de la UNE hoy muchos en RD y también con quienes fuimos CEG, agradezco todas esas experiencias de construcción colectiva y en que soñamos un Chile distinto, que esperamos conquistar de a poco, comenzando con la nueva constitución.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivo específico.....	2
1.2	Ubicación del estudio.....	2
1.3	Selección de casos de estudio.....	4
1.4	Hipótesis de trabajo	5
1.5	Metodología	5
1.6	Antecedentes	6
2.	Marco Teórico	7
2.1	Fundamentos básicos	7
2.2	Radars de apertura sintética.....	10
2.3	Conceptos importantes de SAR.....	11
2.4	InSAR.....	16
2.5	Misión Sentinel-1	18
2.6	DInSAR.....	22
2.7	Series de Tiempo.....	22
3.	Zonas de Estudio	24
3.1	Ubicación y accesos	24
3.2	Morfoestructuras	26
3.3	Geología general	27
4.	Metodología	34
4.1	Base de datos	34
4.2	Generic Mapping Tools SAR (GMTSAR).....	35
4.3	Procesamiento.....	36
4.3.1	Corregistro de imágenes	36
4.3.2	Deburts.....	36
4.3.3	Formación de interferogramas y coherencia	37
4.3.4	Aplicar Multilooking	39
4.3.5	Filtrado de Imagen.....	40
4.3.6	Desenrollado (Unwrapping).....	40
4.3.7	Geocodificación	40

4.4	Postproceso: remover rampa.....	40
4.5	Procesamiento SBAS	41
4.6	Resumen esquemático del procedimiento utilizado	43
5.	Resultados	44
5.1	Resultados caso de estudio 1: Zona de Rancagua	44
5.1.1	Selección de pares interferométricos.....	44
5.1.2	Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia.....	45
5.1.3	Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento.....	47
5.1.4	Revisión de casos específicos	50
5.2	Resultados caso de estudio 2: Zona de mina El Teniente	53
5.2.1	Selección de pares interferométricos.....	53
5.2.2	Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia	55
5.2.3	Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento	57
5.2.4	Revisión de casos específicos	63
5.3.	Resultados caso de estudio 3 deslizamiento Yerba Loca	67
5.3.1	Evolución geomorfológica del deslizamiento.....	68
5.3.2	Selección de pares interferométricos.....	69
5.3.3	Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia	72
5.3.4	Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento	74
6.	Discusiones	83
6.1	Instrumento satelital.....	83
6.2	Metodología	84
6.3	Interpretación de resultados.....	85
6.3.1	Interpretación de resultados: Caso 1	85
6.3.2	Interpretación de resultados: Caso 2	86
6.3.3	Interpretación de resultados Caso 3	88
6.4	GMTSAR	90
7.	Conclusiones	91
8.	Recomendaciones	92
9.	Bibliografía	93

Índice de Figuras

Figura 1 Primera zona de estudio. Ciudad de Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	2
Figura 2 Segunda zona de estudio. Mina El Teniente, Rajo Sur. Fuente: Elaboración propia.	3
Figura 3 Tercera zona de estudio. Deslizamiento Yerba Loca. Fuente: Elaboración propia	4
Figura 4 Geometría de orbitas satelitales Fuente: Freumueller (2015).	9
Figura 5 Espectro electromagnético. Fuente: Muller (2017).	10
Figura 6 Diagrama esquemático de un satélite SAR en su órbita. La antena SAR tiene su eje largo en la dirección de vuelo, también llamado la dirección del acimut y el eje corto corresponde al rango. Fuente: Sandwell et al. (2011).	11
Figura 7 Diagrama esquemático de una onda emitida por un satélite, da cuenta de la fase y la amplitud. Fuente: Meyer (2019).	12
Figura 8: Diagrama de un radar emplazado en una plataforma aérea o espacial en dirección hacia dentro de la página, se encuentra emitiendo un pulso de longitud de onda ρ . Que refleja la señal de onda desde dos puntos en la superficie de la tierra. Fuente: Sandwell et al. (2011).	13
Figura 9 Vista superior de la antena SAR que representa a un determinado reflector puntual. El cual permanece dentro del patrón de iluminación sobre la longitud de apertura real de $2R_a$ Fuente: Sandwell et al. (2011).	14
Figura 10 Diagramas de distorsiones geométricas, junto con ejemplos obtenidos de ESA (A) Foreshortening. (B) Layover. (C). Shadow. Fuente: Meyer (2019).	15
Figura 11 Ilustración esquemática que explica la revisita de un satélite para la obtención de un interferograma. La primera captura corresponde la imagen maestra, se muestra la línea de visión y la medición de fase. Utilizando la posición de la segunda adquisición esclava, la línea de base perpendicular (B_{\perp}), paralela (B_{\parallel}) se forma un vector con la suma de ambas líneas de base perpendicular y paralela que definen un valor total de línea de base espacial entre imagen maestra y esclava. La porción roja de la señal representa la diferencia en las mediciones de fase. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).	17
Figura 12 La fase envuelta (wrapped) se encuentra representada por el color azul y oscila entre valores de $+\pi$ y $-\pi$, la fase desenrollada (unwrapped), la relativa está representada por el color verde y la absoluta de color rojo. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).	18
Figura 13 Esquema de los modos de operación de las diferentes resoluciones espaciales. Fuente: ESA (2019).	19
Figura 14 Diagrama de la geometría de adquisición de TOPS donde v es la velocidad del satélite, T_B es la duración de la ráfaga y ω es la velocidad de dirección. Cada sub-barrido tiene aproximadamente 80 km de ancho y cada ráfaga cubre una distancia de 20 km en dirección del recorrido. Existe cierta superposición entre los sub-barridos de las ráfagas para proporcionar un mosaico continuo de amplitud y fase. La diferencia de la fase en la superposición se utiliza para refinar la alineación de la imagen. Fuente: Mittermayer et al. (2010).	20
Figura 15: Geometría de orbitas satelitales. Fuente: TRE ALTAMIRA (2020).	21
Figura 16 Ejemplo de detección de deformación en la superficie desde ambas geometrías de trayectoria. a) Orientación de la imagen. b) Componentes de movimiento en LOS. Fuente: Vassileva et al. (2017).	21
Figura 17 a) Enfoque PS y b) técnica SBAS. Fuente: Hopper et al. (2012).	23

<i>Figura 18 Mapa del sendero de acceso al glaciar la paloma, la zona de estudio se encuentra destacada en la figura. Fuente: Modificado de Outlife (2020).</i>	25
<i>Figura 19 Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Fuente: Fock (2005).</i>	26
<i>Figura 20 Mapa geológico regional, modificado de Charrier et al.,1996. Fuente: Harrison (2010).</i>	28
<i>Figura 21 Modificado del mapa de la Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua. Fuente: Godoy et al. (2009).</i>	31
<i>Figura 22 : Mapa geológico de Chile Central de Latitud 33° a 34°. Modificado de Thiele (1980), Sellés y Gana (2001) y SERNAGEOMIN (2002). Leyenda en la página siguiente. Fuente: Fock (2005).</i>	32
<i>Figura 23 Continuación de la figura anterior. Leyenda del mapa geológico. Fuente: Fock (2005).</i>	33
<i>Figura 24 Diagrama de flujo de 2 pasos en GMTSAR, desde un par de imágenes sin procesar hasta productos geo codificados. Fuente: Elaboración propia adaptado de Eghbali (2019) y Sandwell et al. (2016.)</i>	35
<i>Figura 25 Ejemplo de correregistro entre una imagen maestra y esclava. Fuente: Delgado (2020).</i>	36
<i>Figura 26 Superposición de ráfagas en un interferograma Fuente: modificado de Veci (2015).</i>	37
<i>Figura 27 a) Cálculo de interferograma. b) Remover tierra plana. c) Remover topografía. Fuente: modificado de Delgado (2020).</i>	39
<i>Figura 28 Diagrama esquemático de un proceso de Multi-vista. Fuente: elaboración propia. Modificado de Delgado (2020).</i>	39
<i>Figura 29 : Ejemplo de eliminación de rampa de un par interferométrico perteneciente al caso de estudio de Rancagua. Fuente: Elaboración propia</i>	41
<i>Figura 30 Diagrama esquemático de una pila de imágenes SAR y un DEM Fuente: Sandwell et al. (2011).</i>	42
<i>Figura 31: Diagrama esquemático del flujo de trabajo de la presente investigación. Fuente: Elaboración propia.</i>	43
<i>Figura 32 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes ascendentes de la zona de Rancagua generadas en GMTSAR. Cada punto representa una imagen Sentinel-1B y cada línea representa un interferograma originado entre cada par de imágenes. Fuente: Elaboración</i>	45
<i>Figura 33 Se presentan 6 ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desenrollados de la zona de Rancagua. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: elaboración propia</i>	46
<i>Figura 34 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de Rancagua para período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia</i>	47
<i>Figura 35: Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de Rancagua para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia</i>	48
<i>Figura 36 Se presentan tres mapas de acercamiento A) Cauce del Río Cachapoal B) Sector industrial C) Sitio eriazo usado como estacionamiento. Fuente: Elaboración propia</i>	52

<i>Figura 37 : Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona de mina El Teniente de geometría ascendente generadas en GMTSAR. Fuente: Elaboración propia.</i>	54
<i>Figura 38 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona de mina El Teniente de geometría descendente generadas en GMTSAR. Fuente: Elaboración propia.</i>	55
<i>Figura 39 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desenrollados de la zona de la mina El Teniente, con geometría ascendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: Elaboración propia.</i>	56
<i>Figura 40 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desenrollados de la zona de la mina El Teniente, con geometría descendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: Elaboración propia.</i>	57
<i>Figura 41 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de la mina El Teniente para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia</i>	58
<i>Figura 42 Mapa de velocidad de desplazamiento LOS de la mina El Teniente para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia.</i>	59
<i>Figura 43 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de la mina El Teniente para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	60
<i>Figura 44 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de la mina El Teniente para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	61
<i>Figura 45 Perfil del desplazamiento acumulado en geometría ascendente de la zona del cráter de subsidencia, visión sureste. Fuente: Elaboración propia</i>	63
<i>Figura 46 Se presentan dos mapas de acercamiento de deformación acumulada A) Fondo del cráter de hundimiento ascendente. B) Fondo del cráter de hundimiento descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	64
<i>Figura 47 Se presentan dos mapas de acercamiento de deformación acumulada A) Geometría ascendente. B) Geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	66
<i>Figura 48 Evolución de la zona de estudio entre 09/01/2018 – 23/04/2019. Dentro del círculo amarillo se marca la zona del deslizamiento. A (04/01/2018) y B (09/04/2018), C (02/07/2018), D (27/08/2018) E (11/01/2019) y F (04/04/2019). Fuente: Modificado de Carrasco (2020).</i>	69
<i>Figura 49 Red de interferogramas espacio-temporal de imágenes de la zona del deslizamiento Yerba Loca. Fase previa al deslizamiento. Fuente: Elaboración propia.</i>	70
<i>Figura 50: Red de interferogramas espacio-temporal de imágenes de la zona del deslizamiento Yerba Loca. Geometría descendente generadas en GMTSAR. Fase que comprende fase anterior y posterior al evento principal. Fuente: Elaboración propia</i>	71
<i>Figura 51 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona del deslizamiento Yerba Loca. Geometría ascendente generadas en GMTSAR. Fase posterior al evento principal del deslizamiento. Fuente: Elaboración propia</i>	72

<i>Figura 52 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto rampa en productos interferométricos desenrollados del deslizamiento Yerba Loca, con geometría descendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: elaboración propia.</i>	73
<i>Figura 53 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto rampa en productos interferométricos desenrollados del deslizamiento Yerba Loca, con geometría ascendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar Fuente: elaboración propia</i>	74
<i>Figura 54 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	75
<i>Figura 55 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	76
<i>Figura 56 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo, durante y posterior al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría descendente. Fuente: Elaboración propia.</i>	77
<i>Figura 57: Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo, durante y posterior al evento, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia</i>	78
<i>Figura 58 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia.</i>	79
<i>Figura 59 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia</i>	80
<i>Figura 60 Comparación general de las velocidades de deformación en el área del deslizamiento, entre las 3 fases temporales determinadas. Fuente: Elaboración propia</i>	82
<i>Figura 61 Ejemplos de productos desenrollados del caso de estudio 2 de geometría ascendente que dan cuenta de los saltos de fase para el cráter de la mina. Fuente: Elaboración propia.</i>	87
<i>Figura 62 Ejemplos de productos desenrollados del caso de estudio 2 de geometría descendente que dan cuenta de los saltos de fase para el cráter de la mina. Fuente: Elaboración propia.</i>	87
<i>Figura 63 Ejemplos de productos desenrollados del caso de estudio 3 de geometría descendente que dan cuenta de los saltos de fase para el deslizamiento estudiado. Fuente: Elaboración propia</i>	89
<i>Figura 64. Ejemplos de productos desenrollados del caso de estudio 3 de geometría ascendente, que dan cuenta de los saltos de fase, para el deslizamiento estudiado. Fuente: Elaboración propia.</i>	90

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Principales bandas utilizadas por en frecuencia de radar.</i>	10
<i>Tabla 2 Resumen de pilas de imágenes descargadas para la zona de estudio 2</i>	34
<i>Tabla 3 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector de la ciudad de Rancagua en el periodo analizado.</i>	52
<i>Tabla 4 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector de la ciudad de la mina El Teniente para el periodo analizado de ambas geometrías</i>	67
<i>Tabla 5 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector del deslizamiento Yerba Loca en los periodos analizados</i>	81

Anexos

<i>Anexo A: Código de Matlab</i>	98
<i>Anexo B: Resumen Base de datos de imágenes SAR utilizadas</i>	102
<i>Anexo C: Productos desarrollados, caso Rancagua</i>	103
<i>Anexo D: Productos desarrollados, caso yacimiento El Teniente (ascendente)</i>	119
<i>Anexo F: Productos desarrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (Ascendente) – posterior al evento principal del deslizamiento</i>	129
<i>Anexo G: Productos desarrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (descendente)-desde el momento previo al posterior al evento principal</i>	130
<i>Anexo H: Productos desarrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (descendente)- momento previo al evento principal</i>	133

1. Introducción

La interferometría de Radares de Apertura Sintética (InSAR) es una herramienta única para la medición cuantitativa de deformaciones en la superficie de la tierra, las que pueden ser inducidas por una gran variedad de causas, tanto de origen geológico como erupciones volcánicas, deslizamientos y terremotos, además de origen antropogénico, por ejemplo, la extracción extensiva de aguas subterráneas, la construcción y operación de obras civiles, entre otras.

En este contexto, la aplicación de la tecnología InSAR hace posible el monitoreo a largo plazo de deformaciones de la superficie, y por ende el análisis de fenómenos geodinámicos relevantes causantes de dichos procesos. El aumento de la disponibilidad de datos SAR (Radar de apertura sintética) obtenidos de diferentes instrumentos que operan en distintos espectros de microondas (banda X, L y C) y la aplicación de las técnicas multitemporales y multisatelitales, favorecen la caracterización de los patrones deformativos. A través del análisis integrado de conjuntos de imágenes SAR se ha gestionado en los últimos años el desarrollo de algoritmos que buscan reducir las limitaciones propias del uso de dos imágenes, las que obedecen a distorsiones atmosféricas o la decorrelación espacio-temporal.

Debido a la ubicación de Chile al suroeste de Sudamérica, la evolución geológica y geomorfológica es controlada fuertemente por la subducción de las placas de Nazca y Antártica por debajo de la Placa Sudamericana. Como resultado de esta disposición tectónica, en Chile existen distintos peligros geológicos, incluidos terremotos, tsunamis, volcanismo y deslizamientos de terreno. El país adicionalmente presenta una alta vulnerabilidad debido a que muchas ciudades densamente pobladas, están ubicadas en zonas de peligro.

En relación con lo anterior, el monitoreo, la caracterización y detección de deformaciones de terreno a través de técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) se plantea como posibilidad para realizar análisis que pueden contribuir a entender y mitigar posibles impactos negativos de estos fenómenos. Estas son las directrices que serán abordadas en la presente investigación, por medio de la aplicación de monitoreos de series de tiempo a través de la técnica SBAS (*Small Baseline Subset*), propuesta por Berardino et al. (2002), para tres casos representativos en la zona central de Chile.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la aplicación de Interferometría de Radars de Apertura Sintética (InSAR) y análisis de series de tiempo (SBAS) para el monitoreo de deformaciones de terreno, en tres casos de estudio en Chile central.

1.1.2 Objetivo específico

Definir una metodología que permita cuantificar a escala de detalle zonas con deformación de terreno.

Obtener interferogramas generados mediante la metodología InSAR de imágenes satelitales SAR de acceso libre (Sentinel 1A y 1B) utilizando softwares de código abierto.

Generar mapas de registro temporal con las deformaciones acumuladas en las zonas estudiadas.

1.2 Ubicación del estudio

El monitoreo de deformaciones de terreno fue realizado en tres zonas distintas del centro de Chile, seleccionadas como casos representativos de aplicaciones relevantes de la técnica InSAR. La primera de ellas corresponde a la ciudad de Rancagua (ver figura 1). Ubicada en la zona central de Chile, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

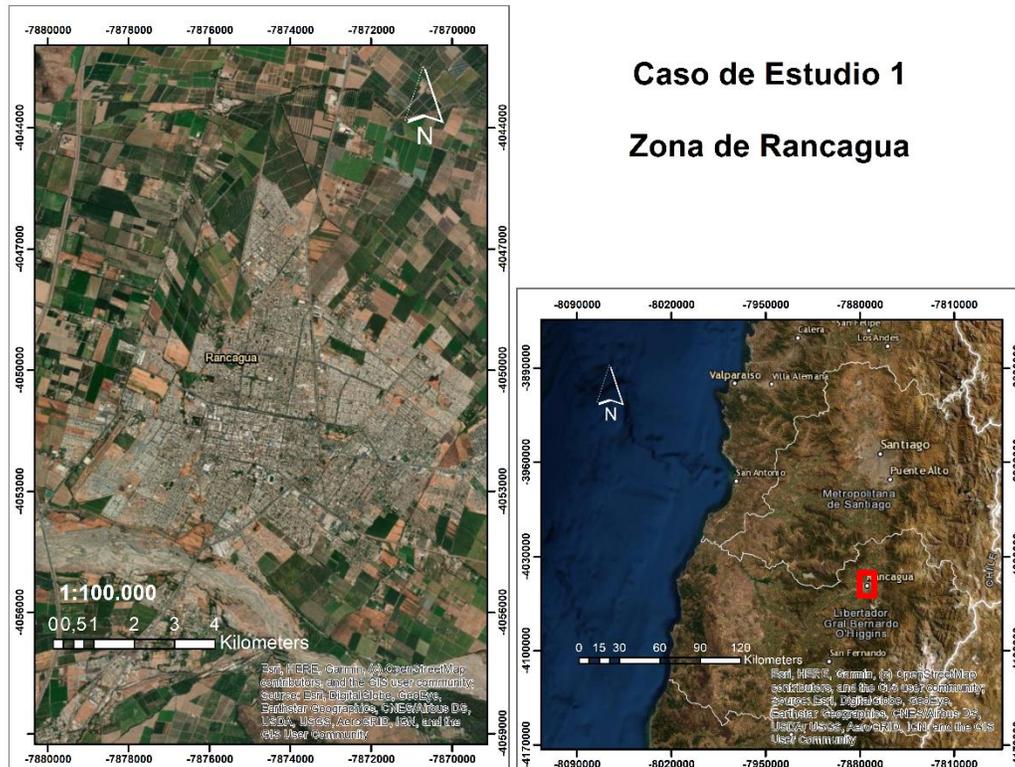


Figura 1 Primera zona de estudio. Ciudad de Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

El segundo caso corresponde a la mina El Teniente, la que se encuentra emplazada en la cordillera de los Andes, al este de la ciudad de Rancagua en la Región de O'Higgins. El estudio se concentró específicamente en la operación minera observada en la figura 2.

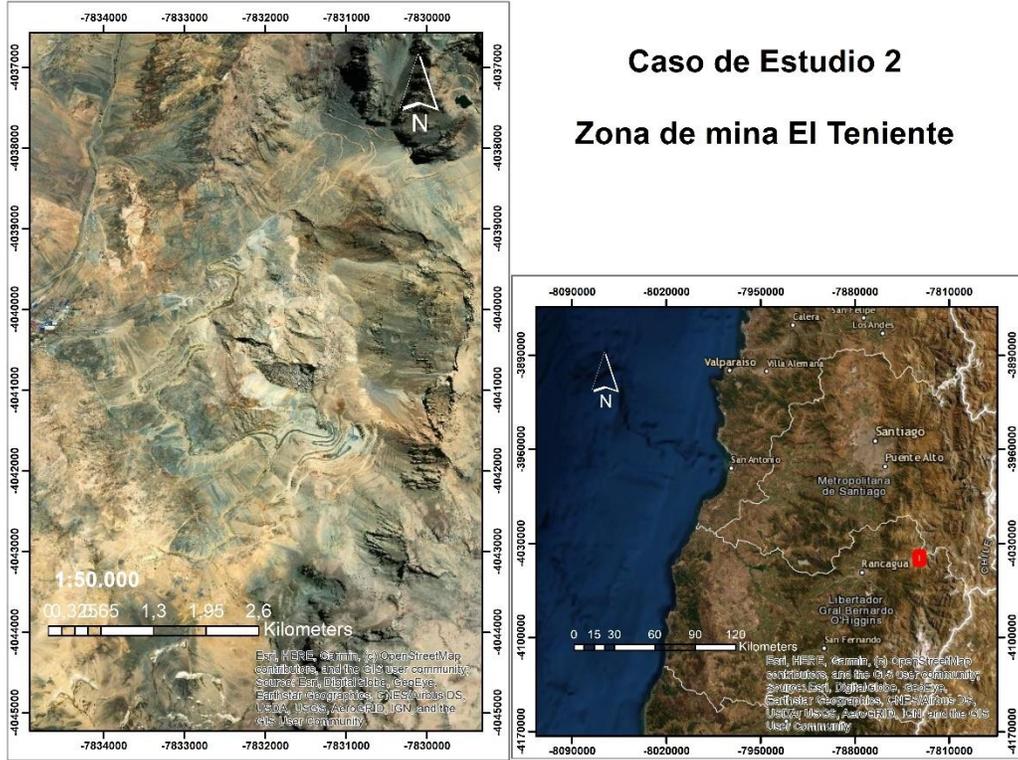


Figura 2 Segunda zona de estudio. Mina El Teniente, Rajo Sur. Fuente: Elaboración propia.

El tercer caso de estudio considera el área del deslizamiento ocurrido en Yerba Loca, ubicado en la región metropolitana al noreste de la ciudad de Santiago (ver figura 3).

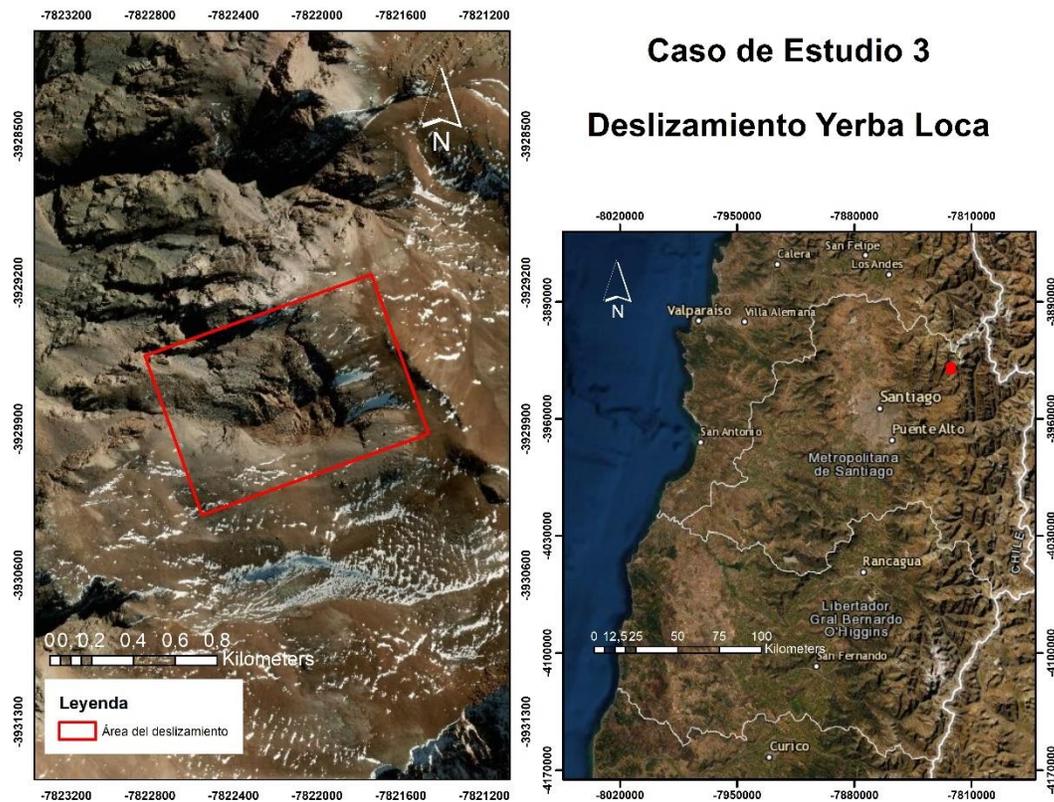


Figura 3 Tercera zona de estudio. Deslizamiento Yerba Loca. Fuente: Elaboración propia

1.3 Selección de casos de estudio

Los casos de estudio seleccionados agrupan distintas características relevantes, disposiciones geológicas y complejidades propias con respecto a la aplicación de las técnicas de monitoreo InSAR. Para realizar una evaluación más amplia del rendimiento de la técnica y la metodología utilizada se plantean tres zonas diferentes ubicadas en Chile central al ser la zona más densamente poblada del país. Cada una responde a posibles aplicaciones de interés que permitan seguir explorándose y perfeccionándose en un futuro.

El primero caso, se plantea como el monitoreo de un ambiente urbano, que permita establecer fenómenos de desplazamiento inducidos debido a causas geológicas o antropogénicas, que pudieran establecer patrones o dinámicas de cambios en la infraestructura relacionado con actividades propias de las ciudades como lo son la expansión urbana o extracción excesiva de agua subterránea entre otros eventos.

La ciudad seleccionada corresponde a Rancagua, capital de la región de O'Higgins. Se realiza la aclaración de que no se cuenta con mediciones específicas previas que hagan presente algún fenómeno de subsidencia u otro proceso relevante que ocurra en la zona, sin embargo, por la disposición geológica y la actividad antropogénica permite evaluar la aplicabilidad de la metodología planteada en una ciudad que además cuenta con abundante actividad agrícola en sus

inmediaciones permitiendo verificar la magnitud y el rendimiento del método, además de utilizar la misma pila de imágenes para el caso siguiente.

El segundo caso, se plantea como la aplicación de la técnica en un entorno minero, donde se ha empleado una metodología de explotación *block and caving* o uno de sus derivados. Las que son responsables de provocar una dinámica de hundimiento como consecuencia al colapso natural que se propaga en el macizo rocoso hacia la superficie debido a la extracción del material (Gómez y Labbé, 2019). Se espera poder detectar y monitorear en superficie deformaciones de terreno con el fin de visualizar patrones de hundimiento que aporten información sobre la dinámica de este proceso.

La mina El Teniente se ha escogida al ser el yacimiento de cobre subterráneo más grande del mundo con más de 3000 kilómetros de galerías subterráneas, además cuenta con una operación a rajo abierto. La zona se presenta con una topografía compleja y presencia de nieve estacional. La explotación subterránea de esta mina es mediante la técnica *Panel Caving* la que ha generado un cráter de hundimiento, este caso ofrece la oportunidad de estudiar la dinámica del cráter y el entorno minero intensivo de la zona.

El tercero, se propone como eje de estudio las remociones en masa, en el país este fenómeno es considerado como uno de los principales peligros geológicos presentes en el contexto cordillerano. un deslizamiento activo puede corresponder tanto a un movimiento lento o rápido de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, gatillado por múltiples factores (Hauser, 1993).

El deslizamiento elegido corresponde al ocurrido en el Santuario de la naturaleza Yerba Loca en agosto de 2018, que obligó a cerrar el sendero hacia el glaciar La Paloma. Este fenómeno fue estudiado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) donde se determinó que correspondió a un deslizamiento rotacional. El sector de estudio está caracterizado por superficies rocosas y material no consolidado, además presenta nieves estacionales. Se espera poder determinar patrones deformativos del evento mediante el monitoreo a través de las técnicas InSAR.

1.4 Hipótesis de trabajo

La técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) posibilitaría la detección, la caracterización y el monitoreo de deformaciones de terreno, lo que contribuiría a entender la naturaleza de dichos fenómenos y mitigar sus efectos.

1.5 Metodología

Para la elaboración de interferogramas (InSAR) y análisis mediante técnicas multitemporales de imágenes SAR se utilizará como base de datos las imágenes disponibles pertenecientes a los satélites Sentinel 1A y 1B del portal Alaska Satellite Facility (ASF) DAAC, datos de acceso público. Esta información se trabaja en formato *Single Look Complex* (SLC), en donde cada adquisición representa una captura perteneciente a la zona de estudio, acotada al momento temporal de su obtención. Para cada una de las imágenes utilizadas se especifica la fecha de su captura, las características de polarización y si corresponde a un movimiento ascendente o descendente del satélite.

A partir de los pares de imágenes SAR seleccionados, se generan interferogramas utilizando el *software* de procesamiento InSAR de código libre GMTSAR (Sandwell et al., 2011). El *Unwrapping* o desenrollado de los interferogramas se realiza mediante el *software* SNAPHU (Chen y Zebker, 2000), que relaciona la topografía con la fase interferométrica y permite generar mapas de deformación en *Line of sight* o línea de visión del satélite (LOS). El error asociado al efecto rampa es removido mediante un código de elaboración propia en Matlab (ver Anexo A).

El último paso consiste, mediante la metodología *Small Baseline Subset* (SBAS), en extraer series de tiempo InSAR de deformaciones de terreno. Se presentan los resultados del análisis SBAS con mapas de deformación acumulada en el período y mapas de velocidad de deformación en la línea de visión del satélite o LOS, estos mapas son representados mediante los *softwares* ArcMap y Google Earth Pro.

1.6 Antecedentes

Con antelación, ya se han realizado investigaciones que aplican la tecnología InSAR para el monitoreo de deformaciones de terreno, tanto a nivel global, como en Chile. Primero se revisarán algunos ejemplos de estudios realizados en distintos lugares del mundo para luego realizar una revisión de trabajos efectuados en el país.

A partir de la utilización de imágenes SAR pertenecientes al satélite ALOS-1, Tong y Schmidt (2016), investigaron el complejo de deslizamientos Cascade a lo largo de la garganta del río Columbia desde 2007 a 2011 ubicado en el estado de Washington, Estados Unidos. Para este objetivo los autores desarrollaron un método derivado de la técnica SBAS basado en la coherencia que condujo a la obtención de en series temporales de movimiento de los deslizamientos a través del *software* GMTSAR. Los datos de InSAR para el sector de Redbluff, que es parte de este complejo, revelan movimientos de deslizamiento lentos de hasta aproximadamente 25 cm de desplazamiento en línea de visión del satélite en el periodo de observación de 4 años. El deslizamiento Redbluff presenta una activación estacional con un movimiento acelerado observado a principio del invierno de cada año.

Utilizando un procedimiento similar Xu et al. (2016), estudiaron la subsidencia en El Campo Geotérmico Cerro Prieto (CPFG) situado en Baja California, México. La técnica SBAS, fue aplicada en base a la coherencia utilizando imágenes SAR pertenecientes al satélite Sentinel 1A con 42 imágenes de geometría ascendente y 34 de geometría descendente el procesamiento de imágenes fue realizado por el programa GMTSAR. La tasa de subsidencia máxima es de 160 mm/año, debido a la extracción de fluidos geotérmicos y calor, por otro lado, fue medida una tasa de deformación de aproximadamente 40 mm/año cercano al dominio de las Fallas Imperial y Cerro Prieto.

De igual manera, un estudio formulado por Vassileva et al. (2017), presentaron un monitoreo de la Ciudad de México, donde fue utilizado el *software* SARscape. A partir de un conjunto de 27 imágenes de geometría descendentes adquiridas en el período desde el 15 de octubre de 2014 al 1 de noviembre de 2015, realizaron un procesamiento SBAS que arrojó resultados de fenómenos de intenso hundimiento sobre el área urbana de la ciudad, con una tasa máxima de -450 mm/año.

En Chile, C. Sánchez et al. (2016), presentan resultados del monitoreo al movimiento del suelo obtenido mediante la aplicación de técnicas de procesamiento basadas en técnicas avanzadas de *Persistent Scatterers Interferometry* (PSI) En la Mina Andina, en la región de Valparaíso. Fueron

empleados 25 imágenes, durante el periodo de noviembre 2014 a mayo 2015 correspondientes a los satélites gemelos TerraSAR-X y TanDEM-X de geometría ascendente. Los resultados obtenidos consisten en 2700000 puntos medidos de movimiento de diferentes magnitudes desde pocos milímetros, a partir de 4mm, hasta decenas de centímetros en el periodo del estudio, en las zonas de botaderos y el fondo del cráter de subsidencia con movimientos acumulados máximos de hasta 400 mm.

F. Sánchez et al. (2016), plantean en su investigación un análisis de la dinámica de las pendientes del cráter de hundimiento, deslizamientos, rajo abierto y otras áreas de deformación superficial de la mina El Teniente ubicada en la región de O'Higgins. Los resultados presentados fueron obtenidos mediante el procesamiento de imágenes SAR del satélite Cosmo-SkyMed, mediante técnicas avanzadas PSI. Los autores definen dos patrones predominantes, el primero corresponde a movimientos de magnitudes milimétricas a centimétricas, ubicadas fuera del límite del cráter de subsidencia con magnitudes de desplazamiento acumulados cercanos a los 4 cm para los tres meses de estudio. El otro patrón de movimiento se encuentra en el cráter de subsidencia en donde se cuantifican movimientos métricos.

2. 2. Marco Teórico

En el presente apartado se realizará una revisión general de los conceptos teóricos a utilizar, junto con una breve explicación de principios básicos asociados a la teledetección, radares y radares de apertura sintética (SAR, en sus siglas en inglés).

2.1 Fundamentos básicos

La teledetección, en términos generales, corresponde a la ciencia y tecnología a través de los cuales es posible identificar, medir y analizar las características de los objetos u objetivos que se encuentran sobre la superficie terrestre, sin que exista un contacto directo entre los sensores y los objetivos o eventos observados (Richards, 1994; Murai, 1999, Jensen, 2009). Esto permite obtener información sobre dichas características de objetos mediante la detección y el registro de la energía reflejada o emitida, y el procesamiento de estas señales. Esta técnica utiliza todo el espectro electromagnético, desde longitudes de onda corta, por ejemplo, ultravioleta hasta longitudes de onda larga como las microondas.

La detección remota implica adquisición de datos por radiación electromagnética de sensores que vuelan tanto en plataformas aéreas o espaciales, y la interpretación de los atributos físicos de los objetos terrestres (Campbell, 2011). De acuerdo con el tipo de energía se pueden distinguir dos tipos de teledetección, pasiva y activa, y así mismo cada sensor posee características propias. Para el caso de los sensores pasivos ópticos, estos trabajan a partir de ondas electromagnéticas naturales, es decir, mayoritariamente los rayos del sol. Debido al rango del espectro electromagnético en el que son realizadas las capturas de imágenes, es posible realizar interpretaciones y analizar diferentes patrones del terreno a través de la selección de las múltiples bandas disponibles, detectar cambios de coberturas, analizar firmas espectrales y realizar monitoreos a nivel global, sin embargo, su principal desventaja es la pérdida de información debido a nubosidad o falta de luz solar. Para el caso de los sensores activos como RADAR o SAR, se pueden analizar distintas características del terreno como los son la rugosidad, geometría, altura y topografía.

Según Leslie en “*Comprehensive Remote Sensing*” (2018), se define la teledetección activa como la transmisión de una onda de radiación electromagnética coherente a un objetivo, que puede variar desde objetos celestes o apuntar hacia el suelo. El sistema activo tiene dos características adicionales que el pasivo no puede medir: (1) el tiempo que tarda la onda electromagnética transmitida en regresar al receptor, y (2), la información de la fase de la señal de la onda recibida.

Un RADAR o detección de radio y alcance, se puede clasificar como una técnica de teledetección activa. Este sistema por principio es capaz de emitir energía electromagnética de microonda y detectar la señal de onda que regresa reflejada por el medio y deducir información sobre el objetivo (Burgmann et al., 2000). Un sensor de RADAR, emplazado tanto en plataformas aéreas como espaciales, emite radiación de microondas en una serie de pulsos a partir de una antena, desde una perspectiva lateral a la superficie, perpendicular a la dirección de movimiento (ver figura 4). Cuando esta alcanza al objetivo, parte de la energía se refleja hacia el sensor. Esta radiación retrodispersada se detecta, se mide y cronometra. El tiempo requerido para para que la energía viaje al objetivo y regrese al sensor determina la distancia o el alcance del objetivo. Dado que la velocidad de la ida en el aire es la velocidad de luz (3×10^8 m/s), y como el tiempo entre la emisión de la onda y su recepción tienen en consideración el tiempo total usado para el proceso, la distancia al objeto se puede calcular mediante la fórmula siguiente:

$$D = \frac{t * c}{2} \text{ (ec. 2.1)}$$

En donde “t” es el tiempo de viaje de ida y vuelta de la onda, “c” es la constante de la velocidad de la luz y “D” es la distancia resultante. Debido a que el radar proporciona su propia fuente de energía, las imágenes pueden ser adquiridas tanto de día como de noche.

Al registrar el rango y la magnitud de la energía reflejada desde todos los objetivos, a medida que el sistema realiza su recorrido, se puede producir una imagen bidimensional de la superficie (figura 4). El cambio de frecuencia debido al efecto *Doppler* por el movimiento del instrumento o plataforma, permite que el radar pueda tener una resolución mayor dentro del rastro (*footprint*) de la antena principal agrupando la duración de las señales de retorno y el cambio de frecuencia, que es utilizado en los radares de apertura sintética (SAR) (Leslie, 2018).

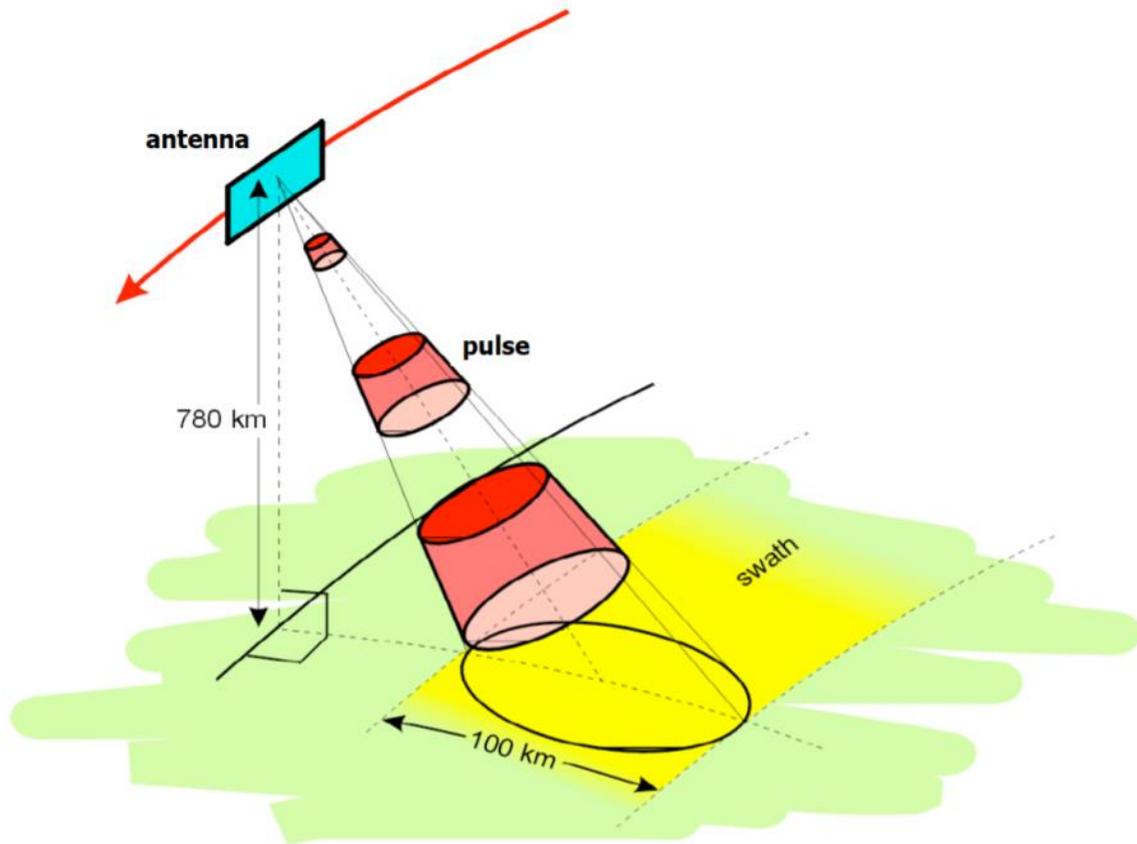


Figura 4 Geometría de orbitas satelitales Fuente: Freumueller (2015).

Uno de los principales parámetros a considerar de las técnicas de teledetección activa, son la longitud de onda (λ) y frecuencia (f), que se relacionan físicamente entre ellas mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{ec.2.2}$$

En donde f es la frecuencia en ciclos por segundo o Hertz, y “c” es la velocidad de la luz (cm/s). Tanto para RADAR como para SAR, son utilizadas microondas, las cuales forman una pequeña parte del espectro electromagnético con longitudes de onda que van desde los 1mm hasta 1m. (figura 5)

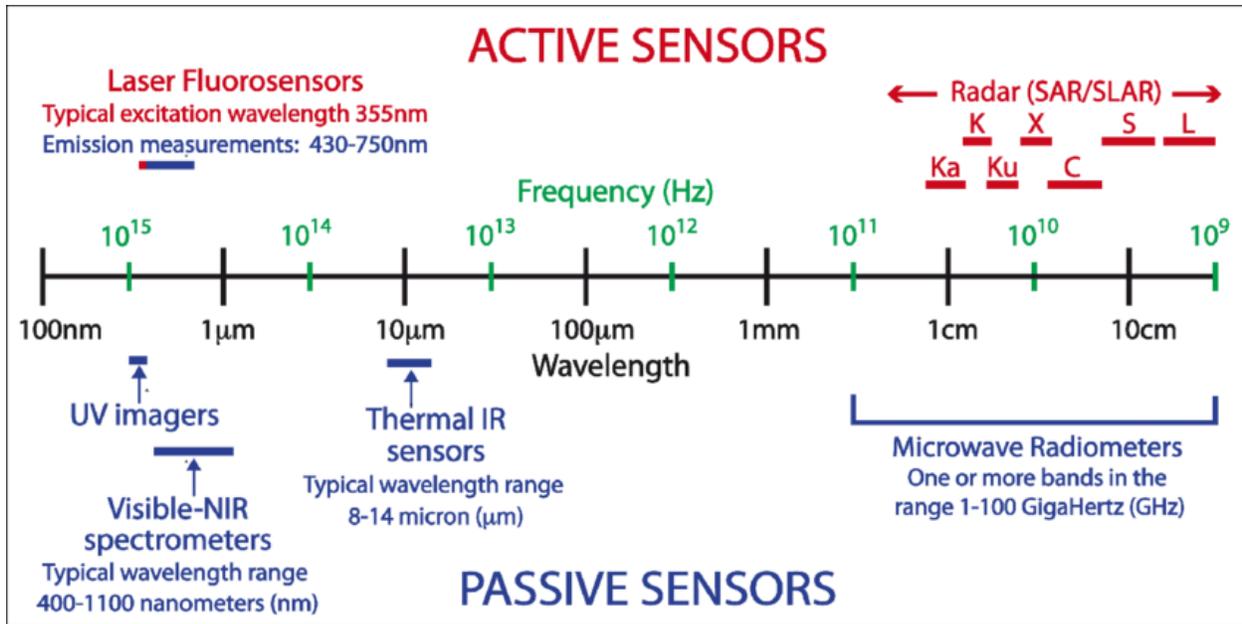


Figura 5 Espectro electromagnético. Fuente: Muller (2017).

La variación de la longitud de onda cambiará la interacción entre la señal y el terreno, generando cambios en la retrodispersión de ésta. Siendo la penetración un factor clave a la hora de la selección de bandas para distintos fines. A continuación, se presenta una tabla resumen para las principales bandas utilizadas.

Tabla 1 Principales bandas utilizadas por en frecuencia de radar.

Banda	Longitud de Onda (cm)	Frecuencia (GHz)
K	1.1 - 1.7	18-27
X	1.7 - 2.5	8-12
C	3.8 - 7.5	4-8
S	7.5 - 15	2-4
L	15 - 30	0.5-2
P	30 - 130	0.2-0.5

Fuente: IEEE 521-2002

2.2 Radares de apertura sintética

Radar de apertura sintética (SAR) es un radar capaz de producir imágenes bidimensionales a partir de mediciones obtenidas desde perspectivas laterales al objetivo, estos aparatos suelen operar en satélites o aeronaves. El instrumento trasmite una serie de pulsos electromagnéticos cortos y coherentes al suelo produciendo un rastro (*footprint*) cuyo tamaño es inversamente proporcional al tamaño de la antena principal, este concepto se entiende como la apertura. Debido a que el tamaño de la antena es pequeño, el rastro es grande, y cualquier objetivo es iluminado por cientos de pulsos. El nivel de procesamiento de la señal permite determinar pequeños cambios producto del efecto *Doppler* en las señales reflejadas desde los objetivos al radar en movimiento, esto

produce una imagen de mayor resolución, como si hubiera sido captada por un radar de mayor apertura. Este aumento de apertura es conocido como “apertura sintética” y es por definición igual a la distancia recorrida por la plataforma espacial mientras la antena del radar está recopilando información sobre el objetivo. Las técnicas SAR dependen de la capacidad de medir con precisión la posición relativa y la velocidad del radar con respecto al objetivo. Lo anterior se puede apreciar en la siguiente imagen.

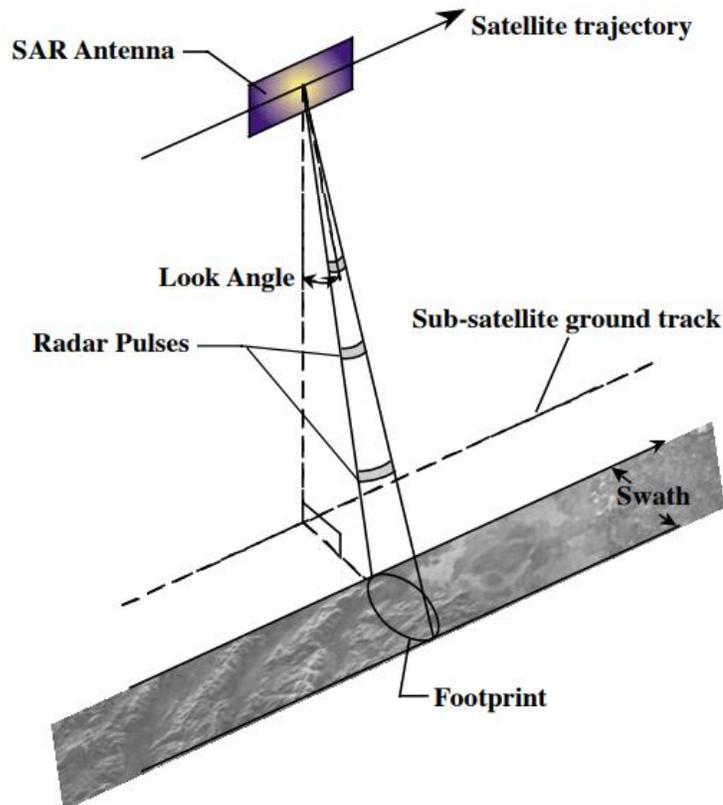


Figura 6 Diagrama esquemático de un satélite SAR en su órbita. La antena SAR tiene su eje largo en la dirección de vuelo, también llamado la dirección del acimut y el eje corto corresponde al rango. Fuente: Sandwell et al. (2011).

2.3 Conceptos importantes de SAR

En la siguiente sección se presentarán los conceptos relevantes que serán empleados en la presente investigación. Se enumeran a continuación.

Fase y Amplitud: Los sistemas SAR emiten radiación de microondas coherentes, lo que significa que estas ondas electromagnéticas poseen patrones de radiación sinusoidal con amplitudes entre mínimos y máximos bien definidas, cada longitud de onda corresponde a 2π radianes. La longitud de onda define la distancia unitaria para cada medición de fase SAR (ver figura 7). Por tanto, la amplitud es la fuerza de la onda electromagnética dispersada, mientras que la fase es la distancia de onda recorrida.

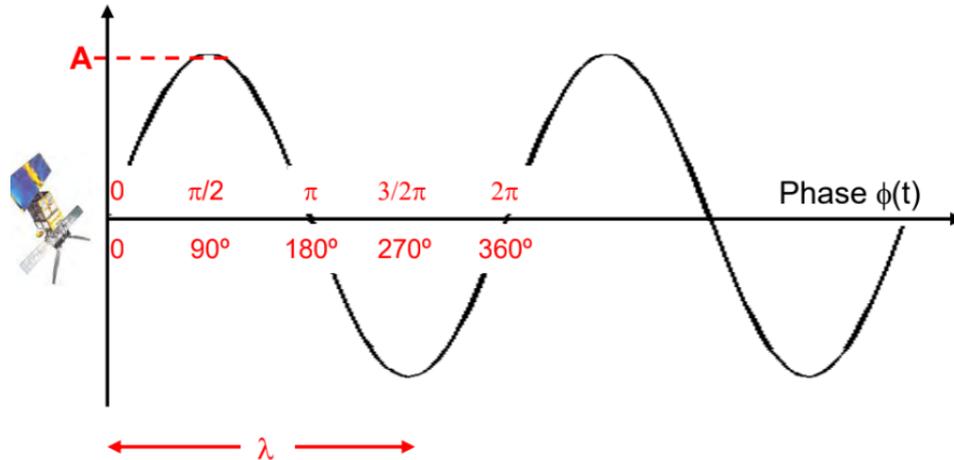


Figura 7 Diagrama esquemático de una onda emitida por un satélite, da cuenta de la fase y la amplitud. Fuente: Meyer (2019).

Ángulo de incidencia θ : es el ángulo que se crea entre la línea de visión del sensor (LOS) y la normal a la superficie de la tierra. Los valores de ángulo más pequeños ocurren en el rango cercano, mientras que valores más grandes al rango lejano (Palubinskas et al., 2007), esto se puede apreciar la zona de “Look Angle” en la figura 6.

Resolución de un Radar de apertura Sintética (SAR): En un sistema SAR, la resolución del sensor posee dos dimensiones, la primera es la dirección de rango, el que corresponde a la distancia entre el sensor y el objetivo, la segunda es la dirección del acimut que se relaciona con la dirección de la plataforma de vuelo.

Resolución del rango: Es la capacidad que posee el sensor para distinguir entre dos o más objetos u objetivos que se encuentran en el mismo rumbo, pero a distancias distintas. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$Rr = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \text{ ec. 2.3}$$

En donde, τ es la duración del pulso, c es la constante de la velocidad de la luz y θ es el ángulo de visión. El factor 2 representa el tiempo de ida y vuelta del pulso. La figura 8 muestra la relación geométrica entre la resolución del terreno y la resolución del rango.

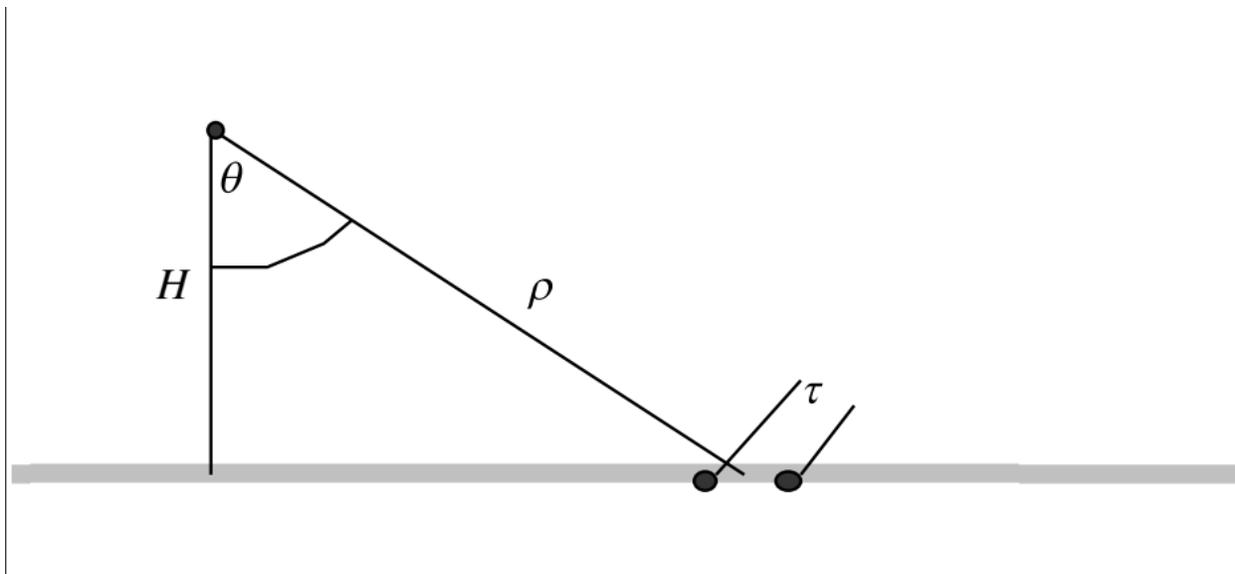


Figura 8

Figura 8: Diagrama de un radar emplazado en una plataforma aérea o espacial en dirección hacia dentro de la página, se encuentra emitiendo un pulso de longitud de onda ρ . Que refleja la señal de onda desde dos puntos en la superficie de la tierra. Fuente: Sandwell et al. (2011).

La mejor resolución del rango para el suelo ocurrirá desde una visión vertical, y mejorará a medida que el ángulo de visión también aumente si consideramos la figura 8, a medida que el ángulo de visión vertical aumenta la resolución del rango lo hará de la misma manera. La altura H en que se encuentre la plataforma del sensor es independiente de la resolución de rango (Sandwell et al., 2011).

Resolución de la dirección del acimut: Para entender este concepto, es necesario considerar un reflector de un solo punto en el suelo que se ilumina a medida que el radar pasa por encima (ver figura 9). Desde el análisis de la difracción de *Franunhoffer*, se sabe que el ancho del haz proyectado está relacionado con la longitud de onda del radar dividido por el largo de la antena. Esto se conoce como la resolución acimutal del radar de apertura real (RAR), lo que puede ser presentado a través de la siguiente relación:

$$Ra \cong \frac{\rho\lambda}{L} = \frac{\lambda H}{L \cos\theta} \text{ ec. 2.4}$$

Donde L es el largo de la antena del radar, ρ representa la distancia del sensor al objetivo, mientras que λ es la longitud de onda del radar lo que se puede ver en la presente figura.

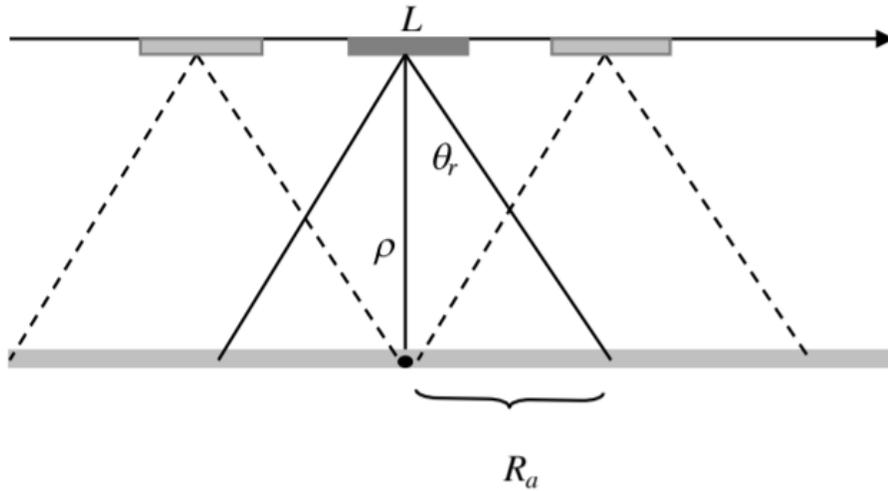
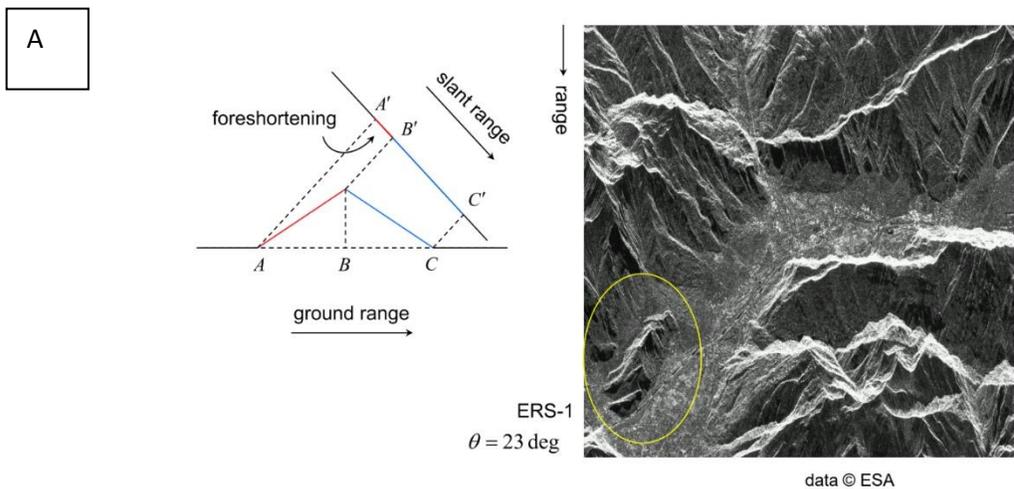


Figura 9 Vista superior de la antena SAR que representa a un determinado reflector puntual. El cual permanece dentro del patrón de iluminación sobre la longitud de apertura real de $2R_a$ Fuente: Sandwell et al. (2011).

Distorsiones Geométricas: Existen tres tipos de distorsiones geométricas, provocadas a partir del punto de vista lateral del sensor. (A) El efecto *Foreshortening* ocurre en un terreno con pendiente donde la cara apunta hacia la iluminación lateral del radar, esto produce que la imagen se comprima en pocos píxeles. Este efecto consiste en que la apariencia de compresión esté más inclinadas al radar. Si el ángulo de visión aumenta, disminuye la distorsión. (B) *Layover* o inversión por relieve, ocurre cuando el pulso del radar alcanza primero la cima de una montaña y luego su base, como resultado la cima de la montaña se desplaza desde su posición original hacia la dirección de visión del radar. Esta distorsión sucede cuando el ángulo de incidencia es más pequeño que la pendiente del terreno. (C) El efecto *Shadow* o sombra se presenta cuando existe un mayor objeto al ángulo de incidencia, en donde parte de la información de una montaña, por ejemplo, no puede ser vista por el sensor. Tiene como resultado zonas negras en la imagen puesto que el paso del pulso es obstruido. Los casos descritos se pueden apreciar a continuación.



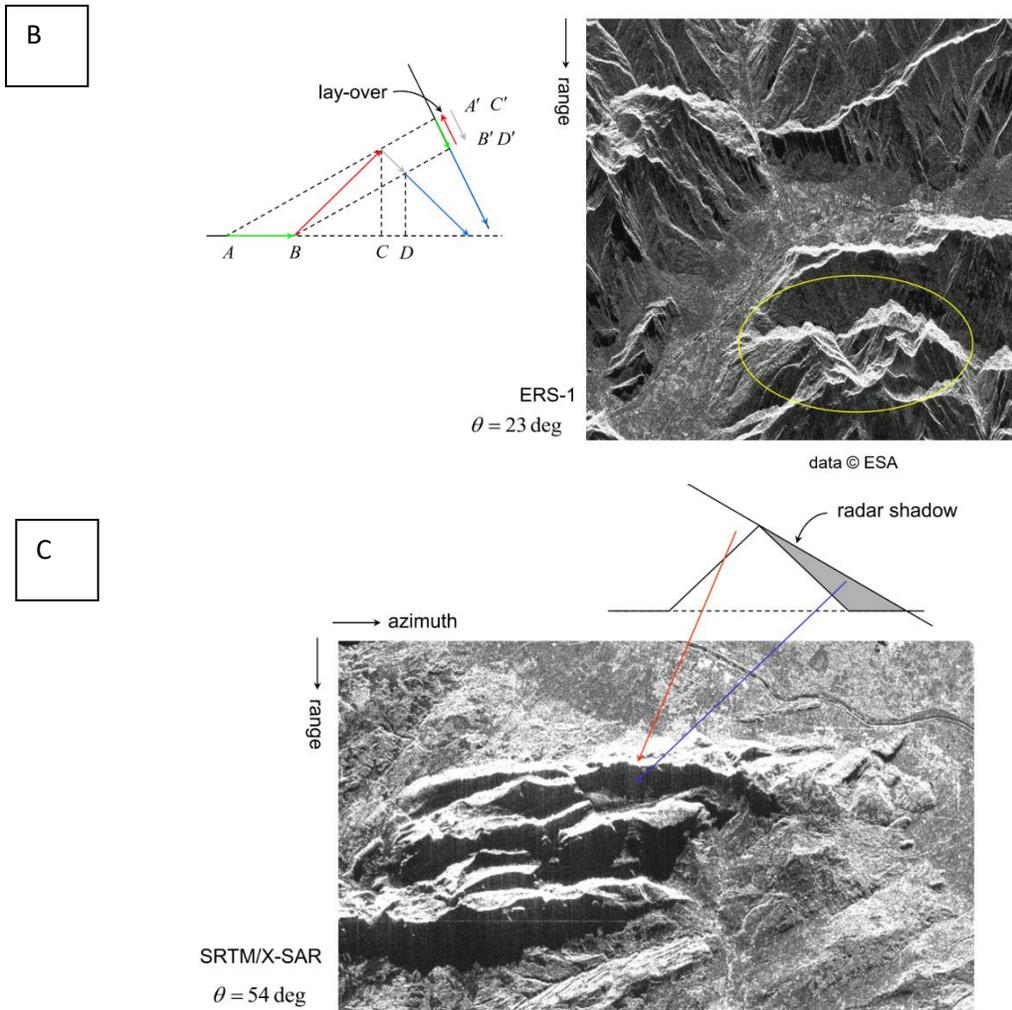


Figura 10 Diagramas de distorsiones geométricas, junto con ejemplos obtenidos de ESA (A) Foreshortening. (B) Layover. (C). Shadow. Fuente: Meyer (2019).

La Polarización de una onda electromagnética se refiere a la orientación del vector de intensidad del campo eléctrico. Un SAR generalmente transmite una onda de manera que posea alguna polarización dada. La configuración HH (transmisión y recepción horizontal) se denomina retorno de polarización similar, mientras que por ejemplo una configuración HV (transmisión horizontal y recepción vertical) se denomina retorno de polarización cruzada. Las imágenes producidas por estos dos retornos pueden variar debido a los diferentes procesos de dispersión para cada uno. Algunos de los nuevos SAR polarimétricos son capaces de transmitir y recibir señales tanto horizontales como verticales, lo que permite que HH, HV, VH y VV vuelvan todos al mismo tiempo

Retrodispersión (Backscattering): Para un área u objetivo con una longitud de onda particular variará por distintas condiciones, como lo son el tamaño físico de los dispersores en el área estudiada, las propiedades dieléctricas del medio y el contenido de humedad, puesto que los objetos más húmedos aparecen más brillantes, mientras que los objetos más secos aparecen más oscuros. Las imágenes obtenidas mediante la técnica SAR muestran una estimación de la

retrodispersión del radar, en donde las áreas oscuras de la imagen representan baja retrodispersión, mientras que las áreas más brillantes representan alta retrodispersión, lo cual teóricamente significa que gran parte de la energía emitida inicialmente por el radar se reflejó de regreso al sensor.

Simple Look Complex (SLC) son una matriz de valores complejos compuestos de la información de la amplitud y el cambio de fase de la señal retrodispersada. Se debe hacer la precisión que el cambio de fase por sí misma no proporciona ninguna información útil. Sin embargo, la diferencia de fase o interferograma, entre dos adquisiciones SAR con geometrías compatibles contiene información sobre topografía superficial y posibles desplazamientos de terreno en la dirección de la línea de visión (LOS) (Vassileva et al., 2017).

2.4 InSAR

A partir de dos imágenes SAR combinadas, es posible producir un interferograma capaz de revelar información sobre una tercera dimensión (elevación) del área objetivo (Burgmann et al., 2000). Cada adquisición SAR presenta dos mediciones de gran importancia, como lo son la amplitud y la fase. La amplitud es la fuerza con que la onda electromagnética retrodispersada regresa al sensor, este factor se relaciona con la forma, la orientación y las propiedades eléctricas de los objetivos. A medida que la onda se propaga en el aire, la fase de la onda cambia desde $+2\pi$ a -2π por cada longitud de onda recorrida en la distancia. Los sistemas SAR son capaces de medir la señal de retorno de forma muy precisa, pero en cambio el número total de longitudes de onda resulta difícil de medir (Osmanoglu et al., 2016). La técnica InSAR detecta cambios de fase entre dos adquisiciones SAR, que son generalmente referidas en la literatura como “imagen maestra” e “imagen esclava”, como se ilustra en la figura 11, se observa un caso tipo del procedimiento InSAR.

Las mediciones de InSAR son especialmente sensibles a distintos factores como la topografía, el movimiento del suelo, las condiciones atmosféricas, la separación espacial entre satélites y las propiedades eléctricas del suelo. Como se observa en la siguiente ecuación 2.5 (Ferretti et al., 2001; Colonsanti et al., 2003).

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{orbit} + \varphi_{defo} + \varphi_{tropo} + \varphi_{iono} + \varphi_{scat} + \varphi_{noise} \text{ ec 2.5}$$

Donde,

$\Delta\varphi$: corresponde a la diferencia de la fase interferométrica (también se puede entender como la diferencia de fase entre dos adquisiciones SAR).

φ_{flat} : corresponde a la fase de tierra plana

φ_{topo} : corresponde a la fase topográfica

φ_{orbit} : corresponde a los errores de fase asociados a imprecisiones en la información de orbita

φ_{defo} : corresponde a la fase inducido por deformación del suelo

φ_{tropo} : corresponde a la contribución de fase de la troposfera.

φ_{iono} : corresponde a la contribución de fase de la ionosfera

φ_{scat} : corresponde a la contribución de fase asociada a las propiedades dieléctricas del terreno.

φ_{noise} : corresponde al ruido de la fase

La señal de fase InSAR corresponde a la suma de todos los cambios en los factores mencionados, y dependiendo de la aplicación, algunos factores pueden considerarse como ruido. De esta forma en métodos como el análisis de series de tiempo se elimina la contribución de la fase topográfica estable mediante un DEM o modelo de elevación digital externo para obtener el movimiento de terreno.

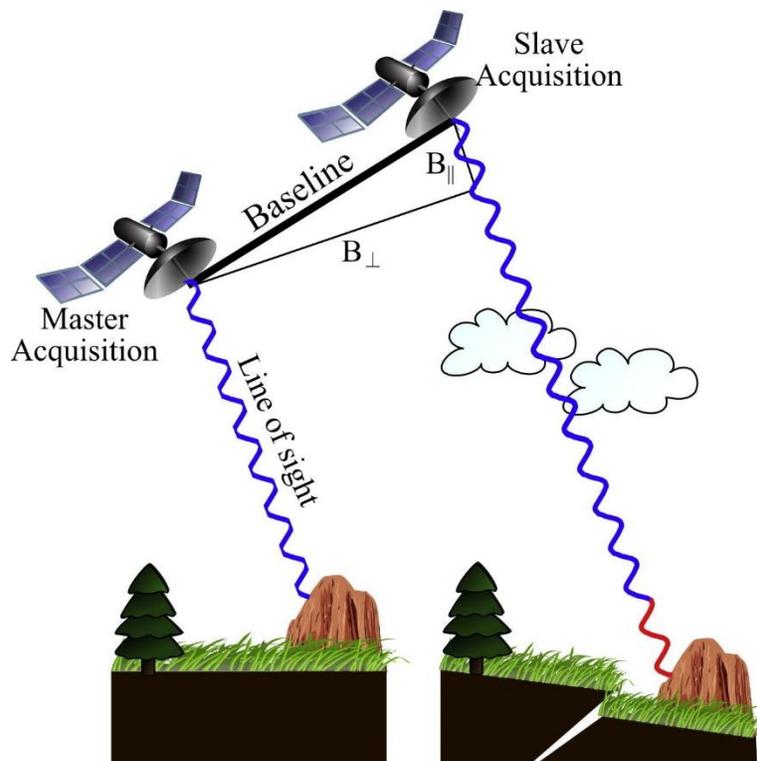


Figura 11 Ilustración esquemática que explica la revisita de un satélite para la obtención de un interferograma. La primera captura corresponde la imagen maestra, se muestra la línea de visión y la medición de fase. Utilizando la posición de la segunda adquisición esclava, la línea de base perpendicular (B_{\perp}), paralela (B_{\parallel}) se forma un vector con la suma de ambas líneas de base perpendicular y paralela que definen un valor total de línea de base espacial entre imagen maestra y esclava. La porción roja de la señal representa la diferencia en las mediciones de fase. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).

El termino ruido de la fase (φ_{noise}) se puede asociar a la coherencia y se puede dividir en cuatro términos diferentes de decorrelación (Zebker y Villaseñor, 1992). El efecto de los diferentes factores de decorrelación son aditivos y se pueden representar como:

$$\gamma_{total} = \gamma_{spatial} + \gamma_{Doppler} + \gamma_{temporal} + \gamma_{thermal} \text{ ec. 2.6}$$

Donde γ_{total} es la correlación total (coherencia interferométrica), $\gamma_{spatial}$ es la decorrelación espacial basal, $\gamma_{temporal}$ es la decorrelación temporal, $\gamma_{Doppler}$ es la decorrelación del centroide de Doppler, y $\gamma_{thermal}$ es la decorrelación térmica. Cuando la correlación total es 1 significa que no hay decorrelación. La decorrelación de la línea de base espacial está relacionada

con la distancia horizontal entre dos orbitas satelitales. El Centroide Doppler se relaciona con los efectos de decorrelación asociados a diferencias de altitud entre adquisiciones maestra y esclava. La decorrelación temporal ocurre cuando la distancia de tiempo entre 2 capturas es muy grande. El ruido térmico está asociada a las propiedades del radar.

Desenrollado de la fase: Para conocer mediciones absolutas de fase en InSAR es necesario realizar un proceso de desenrollado (*unwrapped*) puesto que inicialmente los componentes se encuentran enrollados (*wrapped*), es decir con valores entre $+\pi$ y $-\pi$. Este paso se realiza para relacionar la altura topográfica y la fase interferométrica integrando píxeles vecinos (figura 12). Para efectos de este estudio el proceso de desenrollado se realiza mediante el *software* SNAPHU, que corresponde a la implementación del algoritmo de flujo de red de costo estadístico para el desenvolvimiento de fase propuesto por Chen y Zebker (2000).

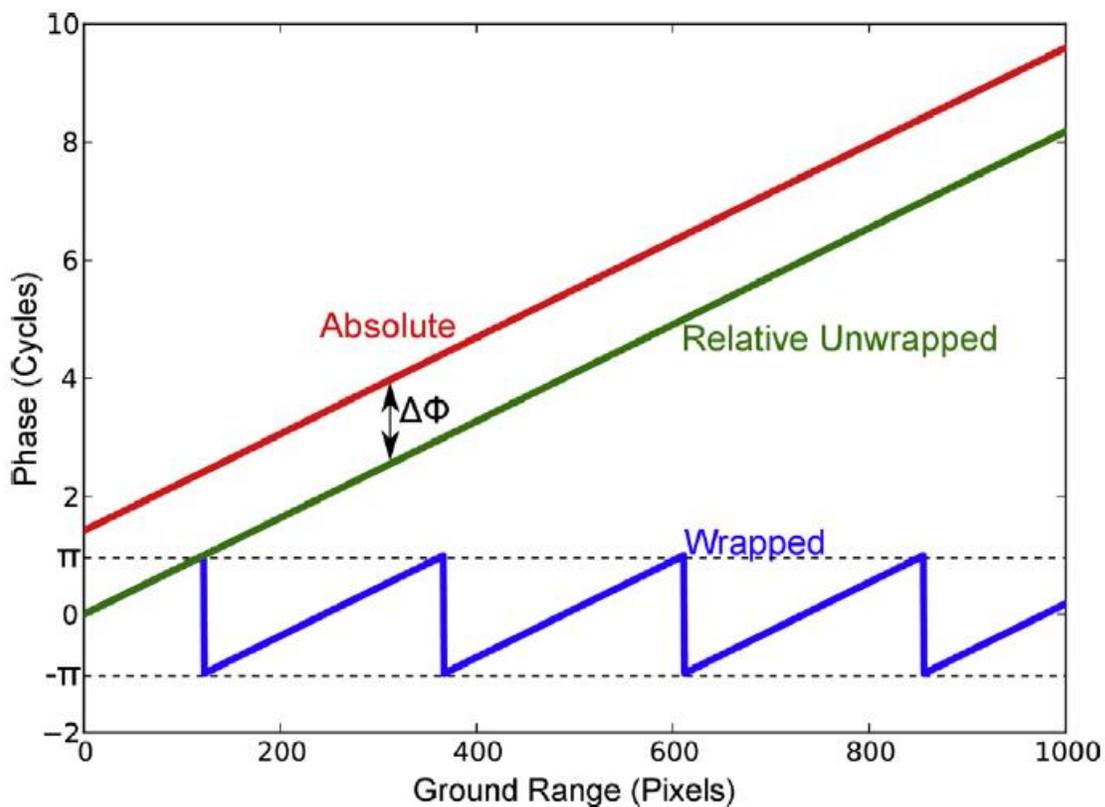


Figura 12.

Figura 12 La fase envuelta (*wrapped*) se encuentra representada por el color azul y oscila entre valores de $+\pi$ y $-\pi$, la fase desenrollada (*unwrapped*), la relativa está representada por el color verde y la absoluta de color rojo. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).

2.5 Misión Sentinel-1

Sentinel-1 es una misión espacial de radar de imágenes continuas que abarcan todo el globo, está compuesto por una constelación de dos satélites con órbita polar que transitan a una altura aproximada de 690 km. Los satélites Sentinel-1A y Sentinel-1B, cuyas fechas de lanzamiento fueron en abril de 2014 y abril 2016 respectivamente, pertenecen a la Agencia Espacial Europea

(ESA), y forman parte del Programa Copérnico (CE). Los instrumentos SAR de la misión Sentinel-1 operan en la banda C y admiten tanto polarización HH o VV y polarización dual (HH+HV o VV+VH). Estos satélites presentan distintos modos de adquisición: Strip Map Mode, Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Mode y Wave- Mode (ver figura 13).

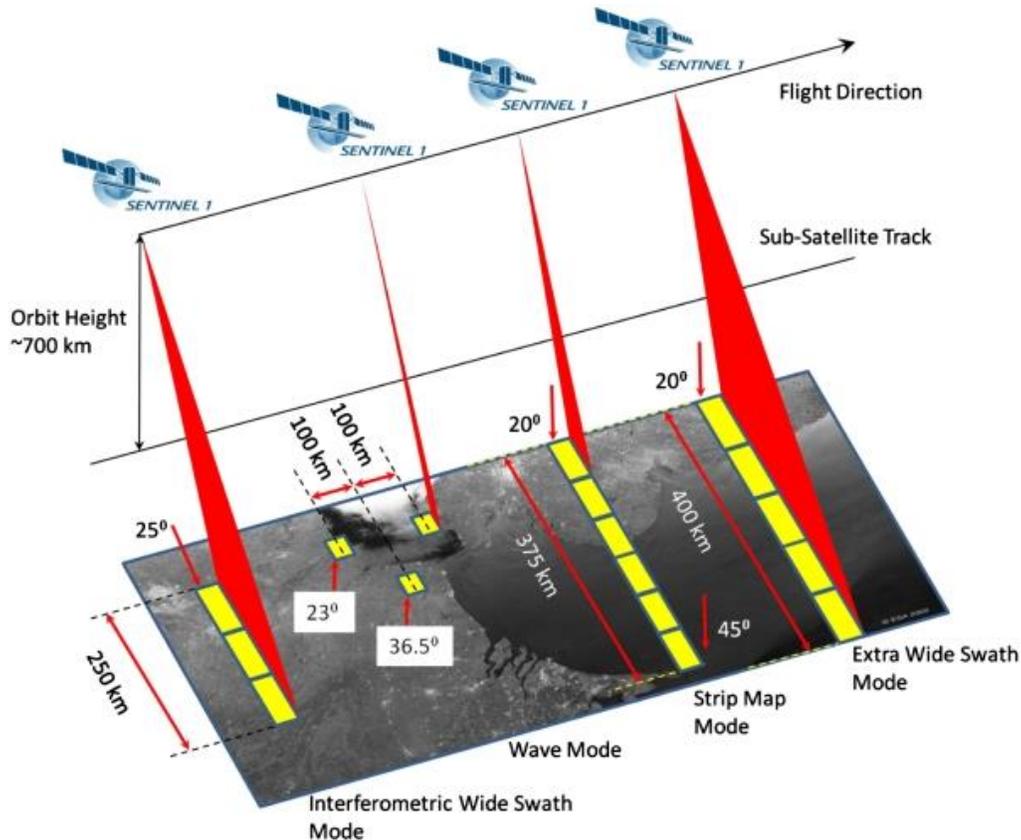


Figura 13 Esquema de los modos de operación de las diferentes resoluciones espaciales. Fuente: ESA (2019).

Las imágenes utilizadas para este estudio corresponden al método de adquisición “*Interferometric Wide Swath (IW)*”. Este modo de adquisición recolecta imágenes con un barrido o swath de 250 km y resolución espacial de 5 metros de azimut y 20 m de rango; estos datos son capturados con longitud de onda correspondiente a la banda “C” con un SARScan denominado TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) (Meta et al., 2010), de este modo el radar escanea una zona a través de tres sub-barridos (sub-swath) sucesivamente como se observa en la siguiente figura 14. Los ángulos de incidencia se encuentran entre los 29.1° a 46.0° (ESA, 2019).

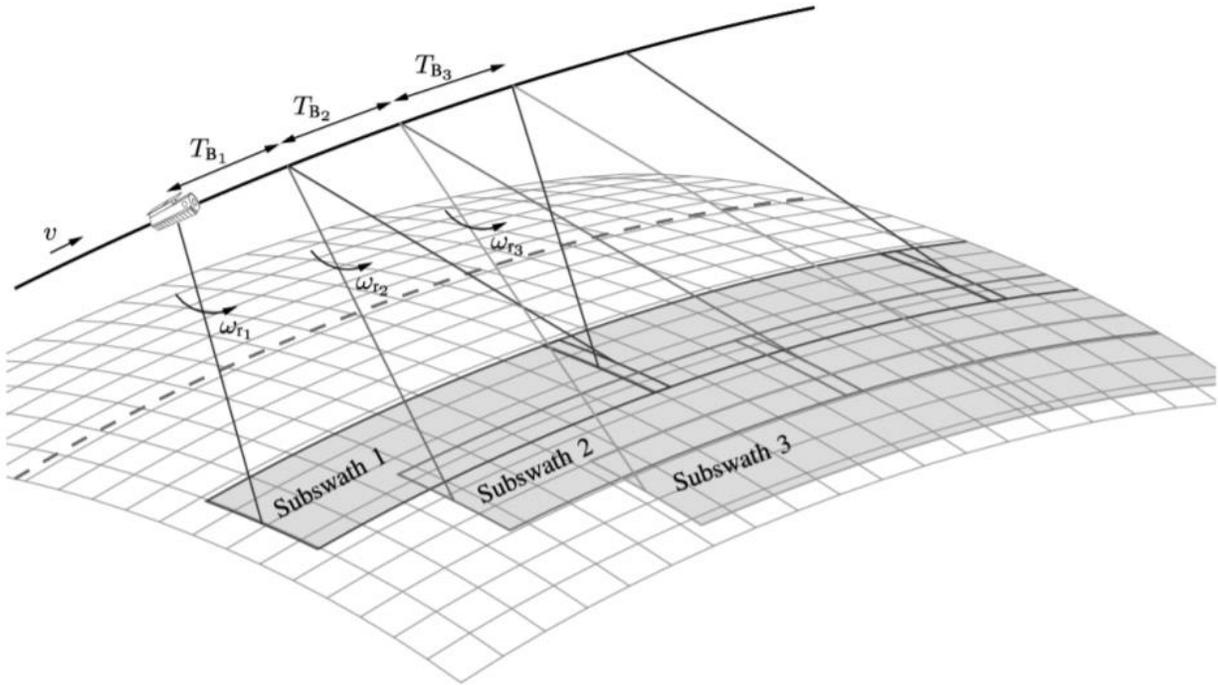


Figura 14 Diagrama de la geometría de adquisición de TOPS donde v es la velocidad del satélite, T_B es la duración de la ráfaga y ω es la velocidad de dirección. Cada sub-barrido tiene aproximadamente 80 km de ancho y cada ráfaga cubre una distancia de 20 km en dirección del recorrido. Existe cierta superposición entre los sub-barridos de las ráfagas para proporcionar un mosaico continuo de amplitud y fase. La diferencia de la fase en la superposición se utiliza para refinar la alineación de la imagen. Fuente: Mittermayer et al. (2010).

Los satélites Sentinel 1, realizan un barrido completo del mundo una vez cada 12 días, pero como se cuenta con dos satélites en la constelación, es posible obtener un ciclo de repetición completo en 6 días. Esta constelación de satélites presenta orbitas de geometría casi polar, lo que hace referencia a que mientras uno de los satélites realiza su recorrido hacia el polo norte (geometría ascendente), el otro realiza lo propio hacia el polo sur (geometría descendente) como se ilustra en la figura siguiente.

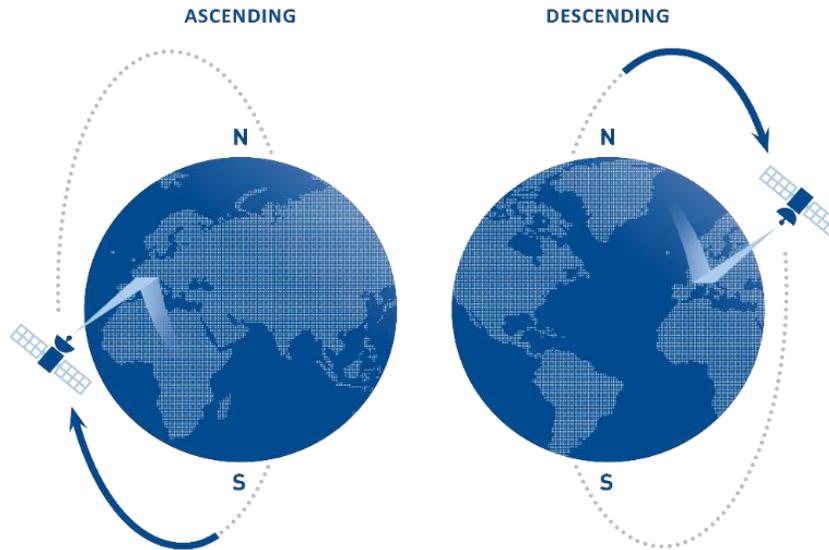


Figura 15: Geometría de orbitas satelitales. Fuente: TRE ALTAMIRA (2020).

La interferometría SAR, es capaz de realizar mediciones de deformación en la superficie en una sola dimensión, que corresponde a la línea de visión del satélite o LOS. En la figura siguiente es posible observar un ejemplo de capturas SAR, para geometrías ascendentes y descendentes. En donde los movimientos superficiales observados se pueden interpretar de la siguiente manera; 1) Los mismos signos de valor de movimientos para ambas geometrías indica movimientos predominantemente verticales, positivo al acercarse al satélite (alzamiento) y negativo al alejarse (descenso). 2) Signos opuestos de valor de movimiento en ambas geometrías. Indican predominantemente movimientos al este u oeste según el caso (Vassileva et al., 2017).

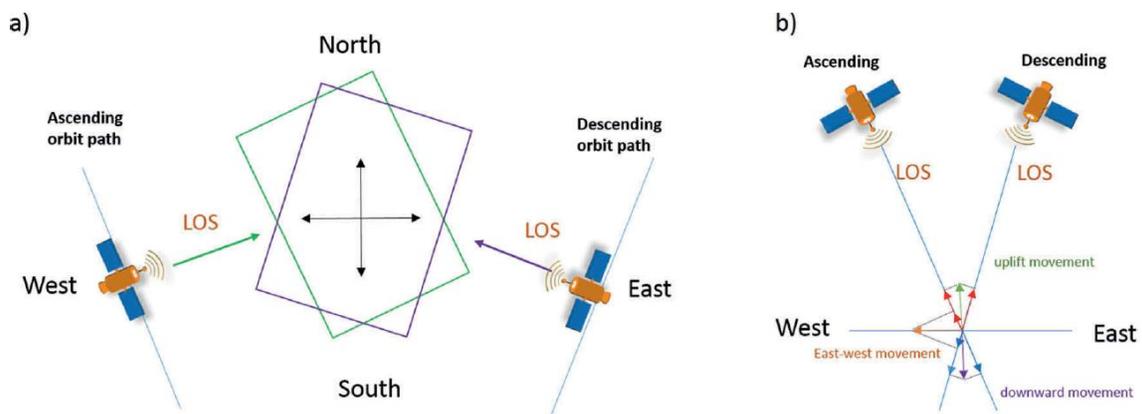


Figura 16 Ejemplo de detección de deformación en la superficie desde ambas geometrías de trayectoria. a) Orientación de la imagen. b) Componentes de movimiento en LOS. Fuente: Vassileva et al. (2017).

2.6 DInSAR

La interferometría diferencial (DInSAR), explicada por Moreira et al. (2013) se plantea como una de las técnicas derivadas de InSAR, en donde se aprovecha la alta sensibilidad de los instrumentos SAR, para realizar una medición de la deformación a lo largo de la superficie estudiada en función de la proyección de la línea de visión del radar (LOS). Esta medición requiere dos imágenes SAR adquiridas con una cierta separación temporal que se combinan para generar un interferograma, en el caso ideal ambas capturas deberían presentar una distancia de línea de base de valor nulo, esto con el fin de que solo la información de la fase esté relacionada con el desplazamiento según la línea de visión (LOS) de la escena. Sin embargo, un cierto valor de línea de base siempre existirá, lo que implica que el interferograma también será sensible a la topografía de la escena. Mediante el uso de un DEM externo, la información topográfica se puede restar de la fase del interferograma, esto es lo que se denomina una medición interferométrica diferencial SAR o DInSAR, donde los cambios sutiles entre dos adquisiciones pueden ser detectados removiendo la fase topográfica de la fase del interferograma lo cual se ve reflejado en la siguiente fórmula:

$$\varphi_{disp} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp} \text{ ec 2.7}$$

Donde φ_{disp} corresponde al cambio de fase total, mientras que Δr_{disp} es el cambio de fase debido al desplazamiento medido en términos de LOS. Como se puede notar de la ec 2.7, La precisión que la técnica DInSAR puede lograr está condicionada por la fracción longitud de onda λ en la medición del desplazamiento LOS, convirtiéndose en una poderosa herramienta para el monitoreo de deformaciones de grandes áreas.

Al igual que la técnica InSAR, la fase diferencial necesita ser desenvuelta y calibrada para obtener un valor de desplazamiento absoluto. Varios aspectos pueden perjudicar la eficacia de este enfoque; El primero, es la resolución del DEM externo que al menos debe ser de la misma magnitud o superior a la sensibilidad fase de la línea de base en el interferograma. Es necesario considerar el ruido de la fase debido a factores de decorrelación y variaciones en el medio de propagación (efectos atmosféricos).

2.7 Series de Tiempo

El análisis de series de tiempo a partir de datos InSAR, observa el desplazamiento de la superficie de la tierra a lo largo del tiempo, es una técnica indispensable para muchos campos en las ciencias de la tierra (Osmanoglu et al., 2016). Se han desarrollado varios algoritmos para el análisis de series temporales. Algunos de los algoritmos más ampliamente utilizados en las últimas décadas son PS (Ferreti et al., 2001) y SBAS (Berardino et al., 2002). Según Vassileva et al. (2017), estas técnicas avanzadas son aplicadas para detectar la evolución temporal de las deformaciones superficiales y son capaces de superar algunas de las limitaciones encontradas en aproximaciones como DinSAR, como lo son la eliminación de los efectos atmosféricos, problemas de la línea de base, distintos fenómenos de decorrelación, aumento en la coherencia y la robustez de datos con respecto a posibles errores en los DEM (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007). Ambos enfoques requieren una base de datos que contenga una serie de imágenes SAR adquiridas con geometrías compatibles. Sin embargo, tanto la aproximación PS y SBAS presentan distintos enfoques.

El enfoque PS (*Persistent Scattering*) (Ferreti et al., 2001) se basa en la identificación de reflectores puntuales persistentes, como estructuras antropogénicas y rocas, presentando alta coherencia durante el periodo de observación y proporcionando una estimación de desplazamiento puntual para los objetivos detectados como estables. Debido a esta característica, la técnica PS explota todos los pares interferométricos, esto es, aquellos caracterizados por largas líneas de base. La principal limitación de la técnica viene dada porque todos los interferogramas se generan en relación de la misma imagen maestra como se aprecia en la figura 17a (Vassileva et al., 2017). En ese sentido la principal limitación del enfoque PS está dado por la heterogeneidad de la técnica identificando objetivos sobre áreas con diferentes coberturas de suelo, mayor densidad en zonas urbanas, incluso en áreas con nula vegetación. Por otro lado, SBAS (*Small Baseline Subset*) (Berardino et al., 2002) consiste en la combinación de múltiples imágenes, para limitar los efectos de la decorrelación espacial y temporal. Esta técnica permite seguir la evolución del desplazamiento en el tiempo, para esto los diferentes interferogramas deben estar conectados en el tiempo (ver Figura 17b). El desplazamiento de la superficie se genera sobre dispersores distribuidos con características homogéneas, tales como áreas de poca vegetación, escombros o áreas desérticas. (Vassileva et al, 2017).

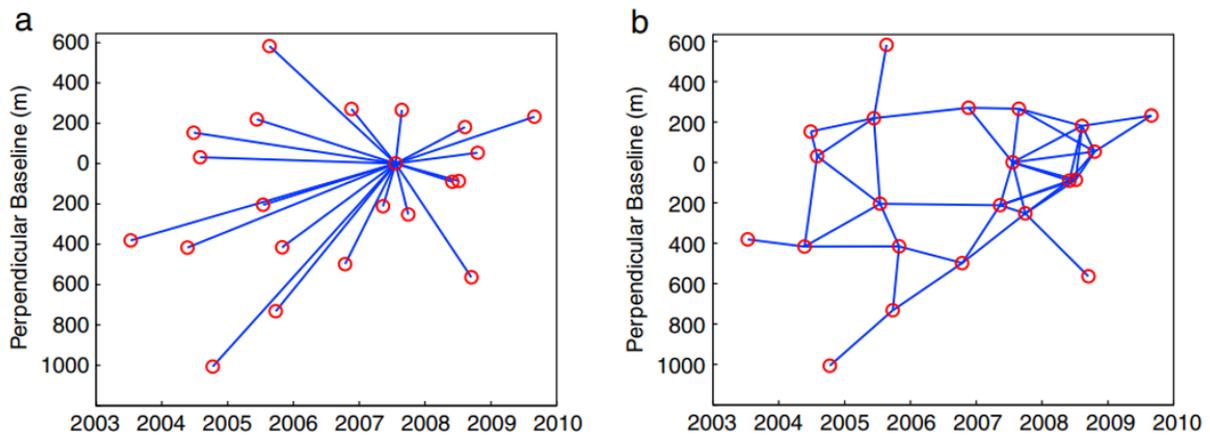


Figura 17 a) Enfoque PS y b) técnica SBAS. Fuente: Hopper et al. (2012).

3. Zonas de Estudio

3.1 Ubicación y accesos

El primer caso de estudio corresponde a la ciudad de Rancagua (volver a figura 1), que cubre una superficie aproximada de 260 km² en la región de O'Higgins, en la latitud 34,16° S. El acceso terrestre al área de estudio se puede realizar en vehículo tanto desde el norte como el sur, mediante el uso de la carretera panamericana Ruta 5.

El segundo caso de estudio corresponde al yacimiento El Teniente de Codelco (volver a figura 2) que se encuentra ubicada en la región de O'Higgins, en la comuna de Machalí, a una distancia aproximada de 50 km de Rancagua (NE) y 80 km de Santiago (SE), en la latitud 34,09° S, a una elevación superior a los 2000 m.s.n.m (metros sobre nivel del mar). El acceso al yacimiento se puede realizar en vehículo desde Rancagua por la carretera Eduardo Frei Montalva, que une la ciudad con Colón alto, desde donde es posible ingresar por distintas vías a las dependencias de la Mina.

El tercer caso de estudio corresponde al deslizamiento ocurrido en Yerba Loca, que se encuentra ubicado en la Región Metropolitana (volver a figura 3). El área estudiada pertenece a las dependencias del Santuario de la naturaleza Yerba Loca, al cual se accede en vehículo desde la ciudad de Santiago a través de la ruta G21. Desde Villa Paulina es necesario continuar a pie por aproximadamente 10 km siguiendo el sendero al glaciar La Paloma (ver figura 18).

3.2 Morfoestructuras

El segmento andino emplazado entre la latitud 32° S y los 35° S, que engloba las tres zonas de estudio, comprende cinco unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas de orientación norte –sur, las que, de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera, además del Antepaís Andino (ver figura 18). Cabe señalar que dos casos de estudio se emplazan en la Cordillera principal, mientras que el restante se ubica en la Depresión Central.

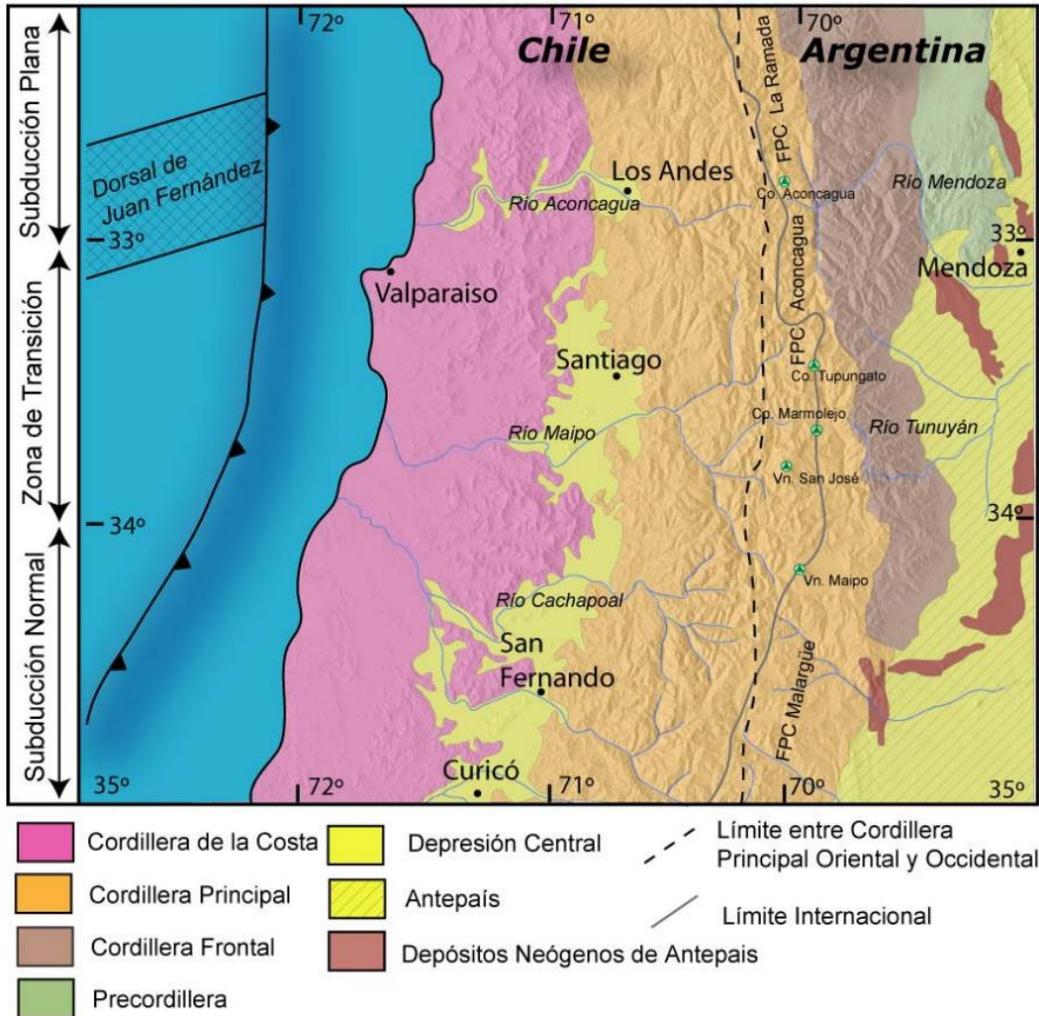


Figura 19 Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Fuente: Fock (2005).

La Cordillera de la Costa está compuesta por cerros cuyos relieves rara vez superan los 2000 m.s.n.m. Esta unidad se encuentra formada principalmente por granitoides del Paleozoico Superior en su flanco más occidental en tanto que su flanco oriental, está formada por secuencias volcánicas y sedimentarias Mesozoicas. (Thomas, 1958; Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005).

La Depresión Central se extiende desde los 33° S hasta los 40° S, está constituida por rellenos sedimentarios y volcano-sedimentarios Pleistocenos a Holocenos, con presencia de algunos niveles cineríticos, que localmente superan los 500 m de espesor (Thiele, 1980; Araneda et al., 2000; Rauld, 2002; Farías, 2007). Esporádicamente aflora parte del basamento en forma de “cerros isla”, con alturas que van entre los 650 y 480 m.s.n.m. decrecientes de este a oeste y cordones que cierran y aíslan esta depresión. Al norte de la latitud 33° S, la Depresión Central desaparece, dando paso a una serie de cordones montañosos de baja altitud separados por valles que conectan la Cordillera Principal con la Cordillera de la Costa (Fock, 2005; Farías, 2007). Al sur de los 33° S el límite oriental de la Depresión Central es abrupta y marcada, quedando limitada por la Cordillera principal de los Andes (Fock, 2005).

Entre los 32° y 35° S se encuentra bien desarrollada tanto la Cordillera Principal como la Frontal. La Cordillera Principal puede ser subdividida en tres franjas (occidental, central, y oriental) a partir de sus rasgos estructurales y litológicos. La franja occidental de la Cordillera Principal está conformada por rocas de la Formación Abanico de edad Eoceno Superior – Mioceno Inferior, que presentan deformaciones y pliegues en su frente cordillerano, seguidamente al este se ubica la Formación Farellones (Mioceno Inferior-Mioceno Superior), esta unidad presenta débiles deformaciones y se encuentra intruida por cuerpos del Mioceno. La franja central de la cordillera está compuesta por afloramientos de niveles basales de la Formación Farellones. La franja oriental de la Cordillera Principal está constituida por unidades mesozoicas (Jurásico -Cretácico medio) que están organizadas de la más antigua a la más joven hacia el este, a pesar de que los desplazamientos tectónicos puedan invertir la secuencia. Las unidades mesozoicas y cenozoicas en conjunto constituyen las franjas central y oriental de la Cordillera Principal y conforman las fajas plegadas y corridas de Aconcagua y Malargüe (Fock, 2005; Rodríguez, 2007; Farías, 2007).

La Cordillera Frontal está constituida por un basamento Pre-Cámbrico, Paleozoico y Triásico, mientras que la Precordillera lo está por rocas del Paleozoico Inferior principalmente (ambas cordilleras aparecen en lado argentino). Desde el Mioceno hasta el Holoceno se han desarrollado cuencas de antepaís al este de estas cordilleras (Fock, 2005).

3.3 Geología general

Como se mencionó anteriormente los casos estudiados se encuentran entre las latitudes 32° a 35° S, a continuación, se describen brevemente las unidades identificadas para los casos de Rancagua y el yacimiento El Teniente, basándose en los trabajos de Klohn (1960) y Charrier (1996).

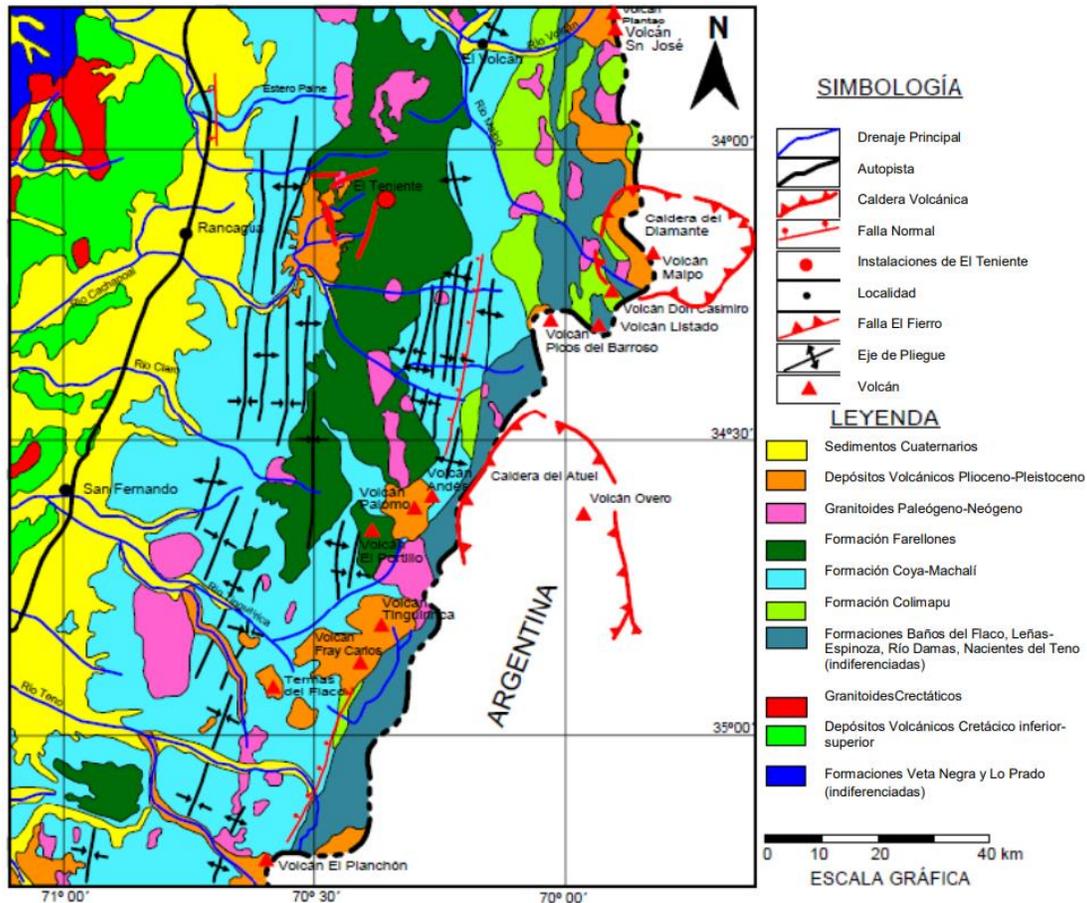


Figura 20 Mapa geológico regional, modificado de Charrier et al., 1996. Fuente: Harrison (2010).

Rocas estratificadas

-Formación Nacientes del Teno (Bajociano – Kimmeridgiano Inferior):

Fue definida por Klohn (1960), corresponde a rocas sedimentarias de textura clástica distribuidas discontinuamente al este del mapa presentado en la figura 20, subyace concordantemente a la Formación Río Damas. Los autores Davidson y Vicente (1973), dividen esta formación en dos miembros, El miembro superior Santa Elena constituido de yeso y anhidrita, con potencias de 500 a 600 metros, que disminuyen su espesor hacia el este, y un miembro inferior detrítico y calcáreo.

-Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior. Titoniano Inferior):

Fue definida por Klohn (1960), y su localidad tipo se encuentra en el río homónimo; corresponden principalmente a rocas sedimentarias, brechas gruesas con clastos e intercalaciones volcánicas, litarenitas, conglomerados finos e intercalaciones de limo (Piquer, 2005). Esta formación se distribuye como una franja de dirección norte – sur (ver figura 20). Su mayor espesor se encuentra en la zona del Río Dama, donde presenta un promedio de 3000 m. Subyace en forma concordante a la Formación Baños del Flaco y sobreyace de manera concordante a la Formación Nacientes del Teno. Estando limitada por contacto de falla con la Formación Leñas-Espinoza (Charrier, 1973).

-Formación Leñas-Espinoza (Kimmeridgiano Superior – Titoniano Inferior)

Fue definida por Klohn (1960) y posteriormente modificada por Charrier (1982). Se encuentra formada por una secuencia rítmica de 1200 m de espesor dividida por cuatro miembros, que consisten principalmente en arenitas, brechas y limolitas. Las rocas de esta formación se depositaron principalmente como turbiditas piroclásticas (Charrier, 1982). Esta formación está distribuida con orientación norte-sur. Subyace a la formación Baños del Flaco en contacto gradual y Coya-Machalí discordante. El límite inferior estaría en contacto por falla con la Formación Río Dama (Charrier, 1973; Charrier, 1982).

-Formación Baños del Flaco (Titoniano- Neocomiano)

Fue definida por Klohn (1960), está compuesta principalmente por calizas, calizas arenosas, margas y areniscas calcáreas, y en menor medida por conglomerados, areniscas glauconíticas y lutitas. Sobreyace de manera concordante la Formación Río Damas y Leñas-Espinoza, además subyace de manera concordante la Formación Colimapu (Charrier, 1981). Esta formación representa características de un ciclo transgresión-regresión. Su distribución corresponde a una franja de orientación norte-sur.

-Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):

Fue definida por Klohn (1960) posteriormente modificada por Charrier (1981), corresponde a un conjunto de rocas estratificadas volcano-sedimentarias de origen continental; se incluyen areniscas tobíferas rojizas, lutitas tobíferas y tufitas rojizas, con presencia de intercalaciones de conglomerados, brechas, lavas andesíticas, calizas y niveles de yeso. Su contacto superior ocurre de manera discordante con la Formación Coya-Machalí, mientras que el contacto inferior es concordante con la Formación Baños del Flaco.

-Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior)

Definida por Klohn (1960), corresponde a una potente secuencia de rocas estratificadas de origen continental de predominancia volcánica, con importantes intercalaciones sedimentarias (Charrier y Munizaga, 1979). Se superpone discordantemente sobre las formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Dama y Nacientes del Teno y subyace en discordancia angular a la Formación Farellones (Charrier et al., 1994).

-Formación Farellones (Mioceno Superior):

Definida por Klohn (1960), corresponde a una sucesión compuesta de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas. En donde las lavas son más predominantes que las tobas y brechas, mientras que rocas volcanoclásticas finas, en tramos de 4 a 5 m, presentan marcada estratificación en la serie (Thiele, 1980). Esta formación también presenta intercalaciones de arenisca, lutita, tufitas y capas de caliza fina (Charrier, 1983). En la presente formación se encuentra emplazada el yacimiento El Teniente.

-Formación Colón-Coya (Plioceno-Pleistoceno):

Identificada por Enrione (1972) y Definida posteriormente por Gómez (2001). Corresponde a depósitos laháricos de granulometría heterogénea, con potencia variable de algunos centímetros a 150 m. Localmente presentan intercalaciones de ceniza, coladas andesíticas y gravas fluviales.

-Depósitos no consolidados (Cuaternarios):

Corresponden a depósitos de origen aluvial, fluvial, lacustre y glacio-fluvial, se encuentran asociados a las redes de drenaje del área, estos drenajes son alimentados por los valles de los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco (Charrier, 1983). Sobre estos depósitos se emplaza la ciudad de Rancagua.

La geología de los depósitos no consolidados locales puede ser descrita en mayor detalle mediante el mapa de la Geología del área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua a escala de 1:100.000. Las edades de estos depósitos se encuentran principalmente desde el Pleistoceno hasta el Holoceno. A continuación, se describen brevemente las litologías presentes en la zona, las que se observan en la figura 21.

-Depósitos fluviales antiguos PIHf (Pleistoceno superior? -Holoceno)

Corresponden a depósitos de facies fluviales que se depositaron en antiguos cauces de ríos y que forman terrazas sobre el lecho actual de los ríos. Compuestos principalmente por gravas clastosoportadas, imbricadas y granodecrecientes.

-Depósitos aluviales PIHa (Pleistoceno?-Holoceno)

Corresponde a sedimentos conformados por gravas clastosoportadas, arenas, limos y arcillas mal consolidadas, usualmente forman abanicos coalescentes a la salida de cursos fluviales mayores.

-Depósitos aluviales de valle PIHav (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a sedimentos acumulados en los depocentros topográficos de la Depresión Central. Están formados por sedimentos pobremente consolidados, estratificados y compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas.

-Depósitos fluviales Hf (Holoceno)

Corresponden a depósitos de facies fluviales, identificados en las planicies fluviales próximas a los cauces de los ríos con actividad actual o probablemente durante el Holoceno. Están compuestos por bolones y gravas no consolidadas, redondeados a bien redondeados, clastosoportados, y de baja esfericidad.

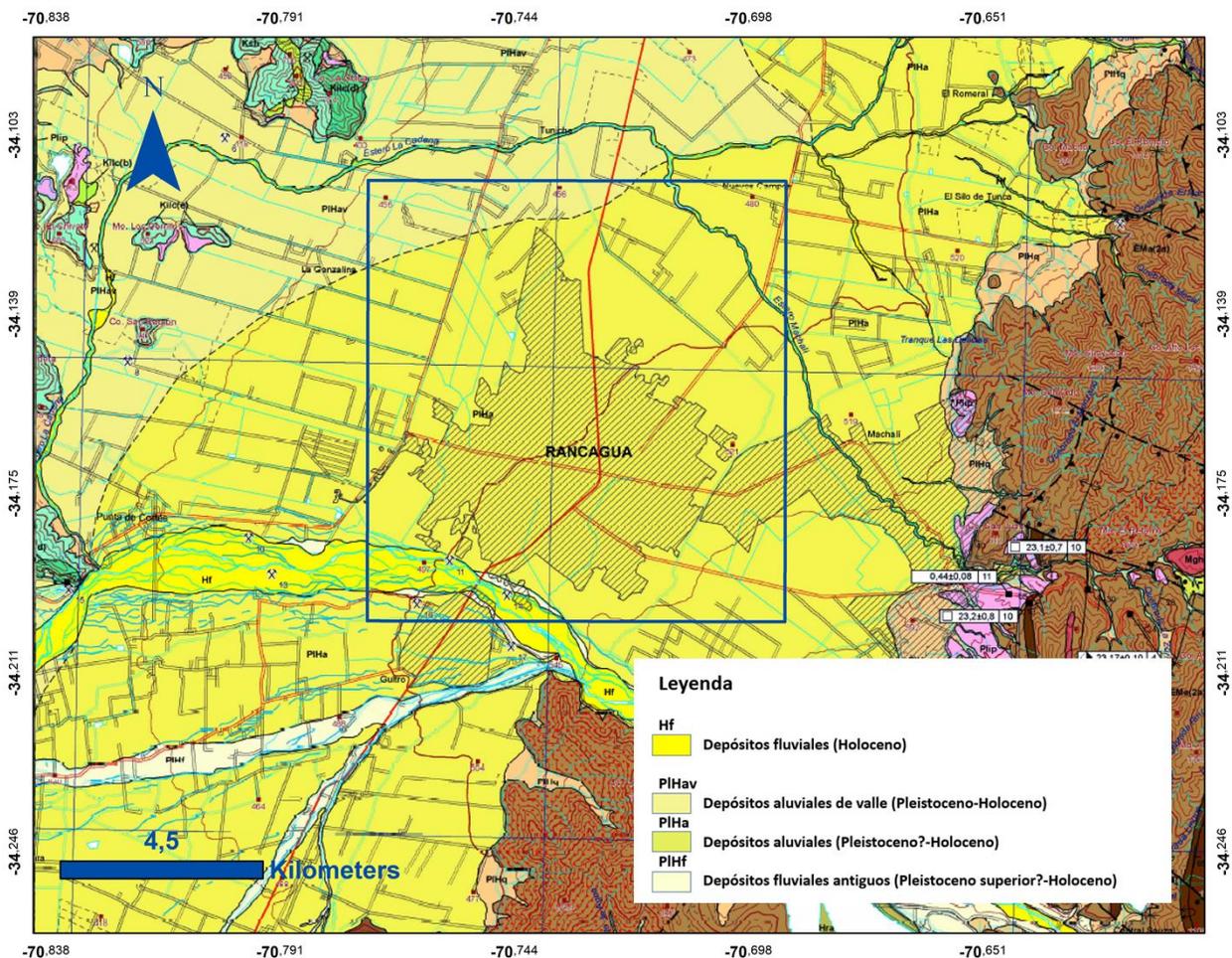


Figura 21 Modificado del mapa de la Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua. Fuente: Godoy et al. (2009).

Rocas Intrusivas

Para el caso de la unidad morfoestructural de la Cordillera Principal, las franjas intrusivas poseen orientaciones en dirección norte-sur. Los intrusivos del Mioceno Inferior corresponden principalmente a granodioritas y son correlacionables a la formación abanico (Sellés y Gana, 2001), mientras que los intrusivos del Mioceno Medio-Superior corresponden a granodioritas, monzonitas cuarcíferas y son correlacionables a la formación Farellones (Thiele, 1980).

Es posible reconocer adicionalmente en la zona cuerpos menores, principalmente stocks, apófisis, diques y filones provenientes de cuerpos intrusivos mayores. Presentan variadas composiciones que van desde granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas a dioritas cuarcíferas (Charrier, 1981).

A continuación, se procede a realizar una identificación similar para el deslizamiento de Yerba Loca.

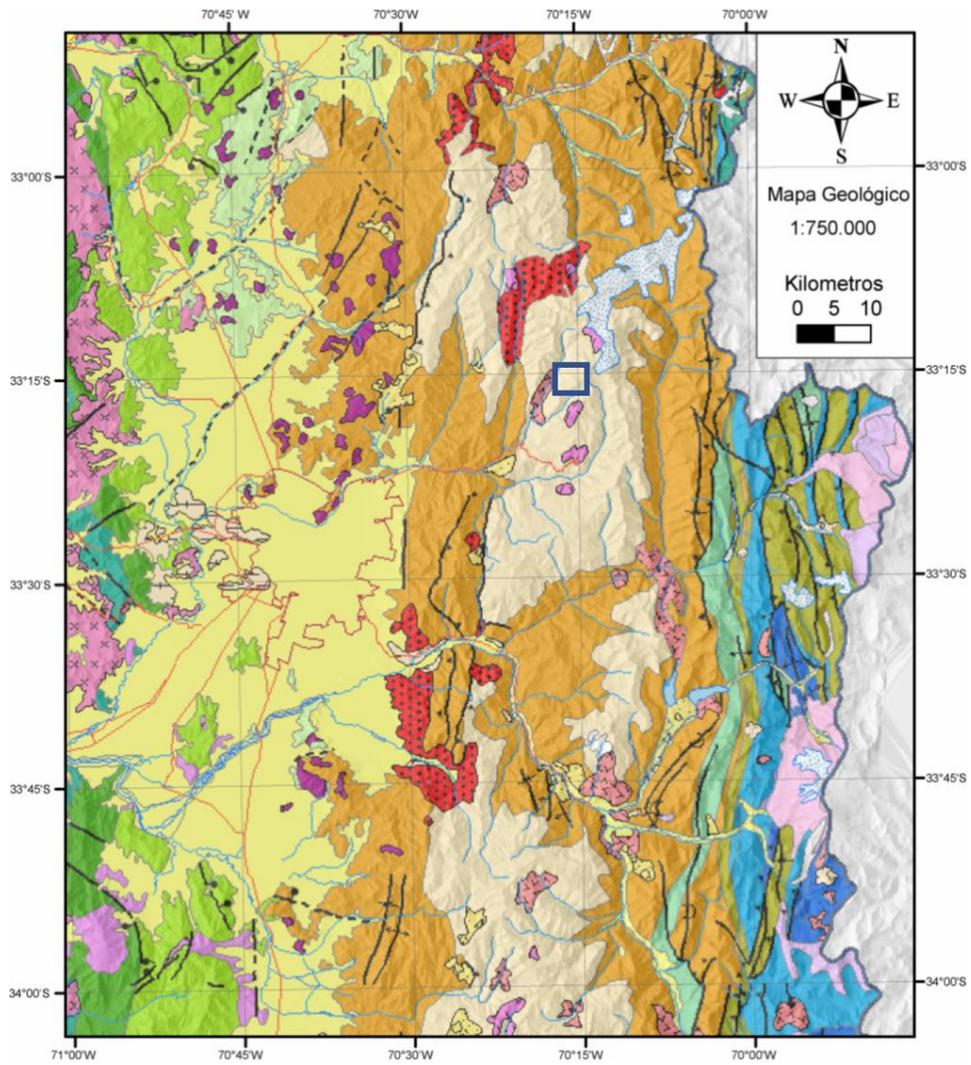


Figura 22 : Mapa geológico de Chile Central de Latitud 33° a 34°. Modificado de Thiele (1980), Sellés y Gana (2001) y SERNAGEOMIN (2002). Leyenda en la página siguiente. Fuente: Fock (2005).

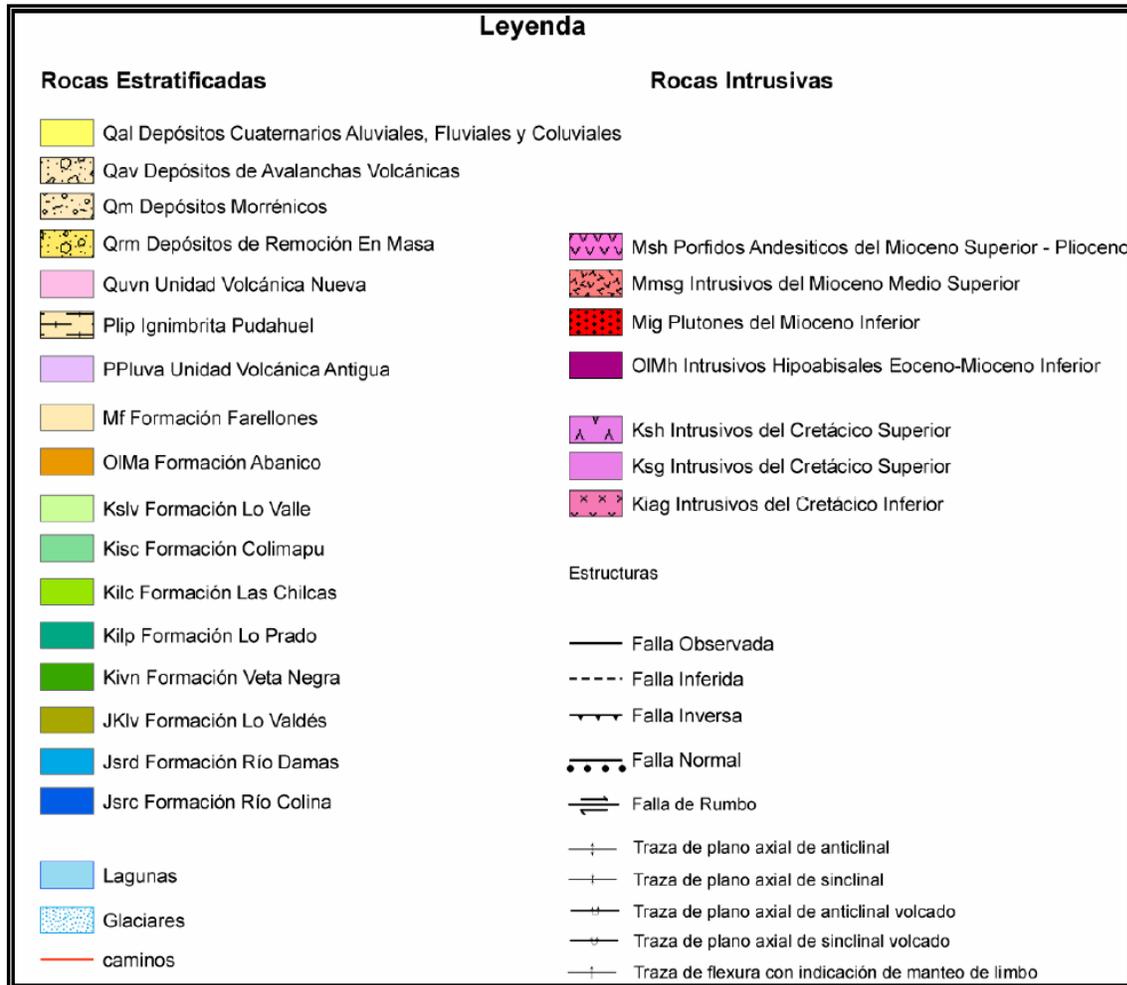


Figura 23 Continuación de la figura anterior. Leyenda del mapa geológico. Fuente: Fock (2005).

Rocas estratificadas

-Formación Farellones (Mioceno Superior):

Definida por Klohn (1960), corresponde a una sucesión compuesta de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas. En donde las lavas son más predominantes que las tobas y brechas, mientras que rocas volcanoclásticas finas, en tramos de 4 a 5 m, presentan marcada estratificación en la serie (Thiele, 1980). Esta formación también presenta intercalaciones de arenisca, lutita, tufitas y capas de caliza fina (Charrier, 1983). En la presente formación se encuentra emplazada la zona del deslizamiento Yerba Loca.

Intrusivos

-Intrusivos del Mioceno medio superior:

Esta unidad Intrusiva se emplaza al oeste del deslizamiento, cuyo rango de edad varía entre los 13 y 8 Ma, de litologías principales para esta unidad son granodiorita, monzogranito y monzonita cuarcífera (Thiele, 1980; Cornejo y Mahood, 1997; Kurtz et al., 1997).

-Intrusivos del Cretácico superior

Esta unidad intrusiva aflora al sur de la zona de estudio, y podría corresponder a los siguientes grupos; a) Stocks y plutones monzodioríticos cuarcíferos a granodiorita de anfíbola, biotita y piroxeno. b) intrusivos hipabisales andesíticos y dioríticos, que corresponde a pequeños stocks y filones de mato porfídicos, andesíticos o dioríticos de piroxeno y/o anfíbola. (Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005).

4. Metodología

En este capítulo se presentan los detalles para el desarrollo de esta investigación, en primer lugar, las bases de datos que se utilizan, su posterior procesamiento y post-procesamiento.

4.1 Base de datos

Para la elaboración de interferogramas (InSAR) y el posterior análisis multi-temporal SBAS, con el fin de medir la deformación en las zonas de estudio seleccionadas se utiliza como base de datos las imágenes SAR disponibles pertenecientes a los satélites Sentinel 1A y 1B del portal Alaska Satellite Facility (ASF) DAAC, cuya data es de libre acceso. Esta información se trabaja en formato *Single Look Complex* (SLC), en donde cada adquisición representa una captura perteneciente a la zona de estudio, acotada al momento temporal de su obtención, detallando además los datos de su órbita, geometría y polarización.

Cada una de las imágenes representa una captura acotada al momento del tránsito específico del satélite por su recorrido o *path*, esto significa que la progresión de mediciones está delimitada por el periodo de revisita entre una obtención y la siguiente.

Los periodos analizados varían dependiendo de la zona de estudio y la disponibilidad de imágenes. La data que se empleará se extiende desde febrero de 2017 a mayo de 2019, con variaciones caso a caso. Esto se debe a que luego del lanzamiento del satélite Sentinel 1-B, en el año 2016, existe una mayor densidad de imágenes utilizables, por lo cual disminuye el sesgo del estudio. No obstante, se reconoce que se puede realizar la revisión de datos anteriores con el fin de analizar una progresión desde un periodo anterior.

Para la generación de un interferograma es necesario la utilización de pares de imágenes SAR, además de un DEM externo, que en este caso corresponden a SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), los cuales poseen una resolución de 30m. Un ejemplo de las características de las imágenes descargadas se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2 Resumen de pilas de imágenes descargadas para la zona de estudio 2

Nº de imágenes	Path	Frame	Geometría	Polarización
37	18	165	Ascendente	VV+VH
43	83	705	Descendente	VV+VH

En la sección de anexos, se presenta el detalle de la información relacionada con la adquisición y características de imágenes SAR, para todos los casos de estudio.

4.2 Generic Mapping Tools SAR (GMTSAR)

GMTSAR es un software de código abierto diseñado para el procesamiento de InSAR, con el objetivo de ser empleado por usuarios con conocimientos en *Generic Mapping Tools* (GMT). El código está escrito en lenguaje C. El programa presenta tres componentes principales: 1) Un preprocesador para cada tipo de datos de los distintos satélites, soportados por el programa, con el fin de convertir el formato nativo o *raw* junto con la información de órbita en un formato genérico, como por ejemplo SLC. 2) Un procesador de InSAR para enfocar y alinear (*align*) las pilas de imágenes, mapear la topografía en la fase del radar y formar interferogramas complejos. 3) Un postprocesador, basado en GMT, para filtrar los interferogramas y construir productos interferométricos de fase, coherencia, y desplazamiento con respecto a la línea de visión del satélite (LOS) tanto en coordenadas de radar como en coordenadas geográficas (GMTSAR, Manual segunda edición 2016). A continuación, se presenta un ejemplo en la figura 24, del proceso de flujo de trabajo del *software*.

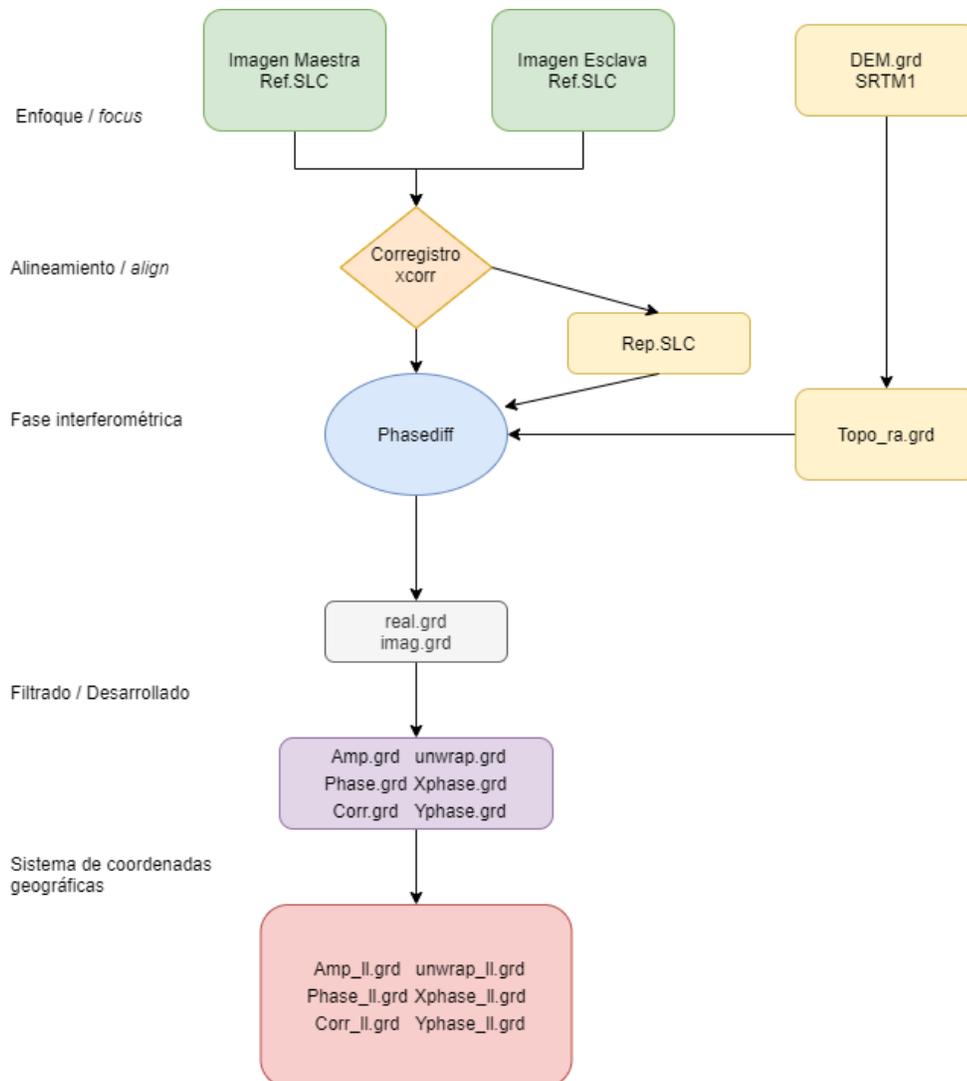


Figura 24 Diagrama de flujo de 2 pasos en GMTSAR, desde un par de imágenes sin procesar hasta productos geocodificados. Fuente: Elaboración propia adaptado de Eghbali (2019) y Sandwell et al. (2016.)

Para la elaboración de la base de imágenes a analizar con el *software*, se utiliza la recopilación de datos realizado previamente, en específico, la información proviene de los satélites Sentinel 1A y 1B de la plataforma portal Alaska Satellite Facility (ASF) DAAC, en formato SLC. El análisis utiliza imágenes con geometría tanto ascendente como descendente.

4.3 Procesamiento

El procesamiento de imágenes varía según los productos del satélite utilizado y del *software* elegido. En esta sección, se describe un procedimiento estándar para generar interferogramas desde un par de imágenes en formato SLC, luego el desenrollado o *unwrapping* de los datos.

El proceso consiste en los siguientes pasos:

4.3.1 Corregistro de imágenes

Para el procesamiento interferométrico de dos o más imágenes es necesario realizar un corregistro. Una de las imágenes se selecciona como maestra y las otras como esclavas. Los píxeles en las imágenes SLCs esclavas serán trasladadas de tal manera que coincidan con la imagen maestra con una precisión de subpíxeles (Veci, 2015). El corregistro de imágenes asegura que cada punto coincida en coordenadas de radar (rango/acimut) de cada píxel entre la imagen maestra y esclavas. Un ejemplo de esto se puede apreciar en la siguiente representación.



Figura 25 Ejemplo de corregistro entre una imagen maestra y esclava. Fuente: Delgado (2020).

4.3.2 Debursts

Las imágenes pertenecientes a Sentinel 1, en modo *interferometric Wide Swath* (IW) consta de tres sub-barridos o *sub-swaths*, cada uno de ellos posee un total de nueve *burst* o ráfagas (ver figura 26). Los límites de los *burst* se observan con una alta decorrelación al tratar de superponerse (*overlapping*), Este fenómeno es provocado por cambios en el movimiento del satélite o variaciones ocurridas durante la captura del dato debido a variaciones de frecuencia causados por el efecto *Doppler*. El proceso de superposición mencionada crea una fuerte decorrelación en los límites de las ráfagas o *burst* (Grandin et al., 2015).

El *Deburst* se aplica para eliminar el efecto de decorrelación (Veci, 2015). Esto se realiza detectando los límites entre las ráfagas, calculando el tiempo azimutal para cada límite y así eliminar las líneas superpuestas (Sandwell et al., 2016).

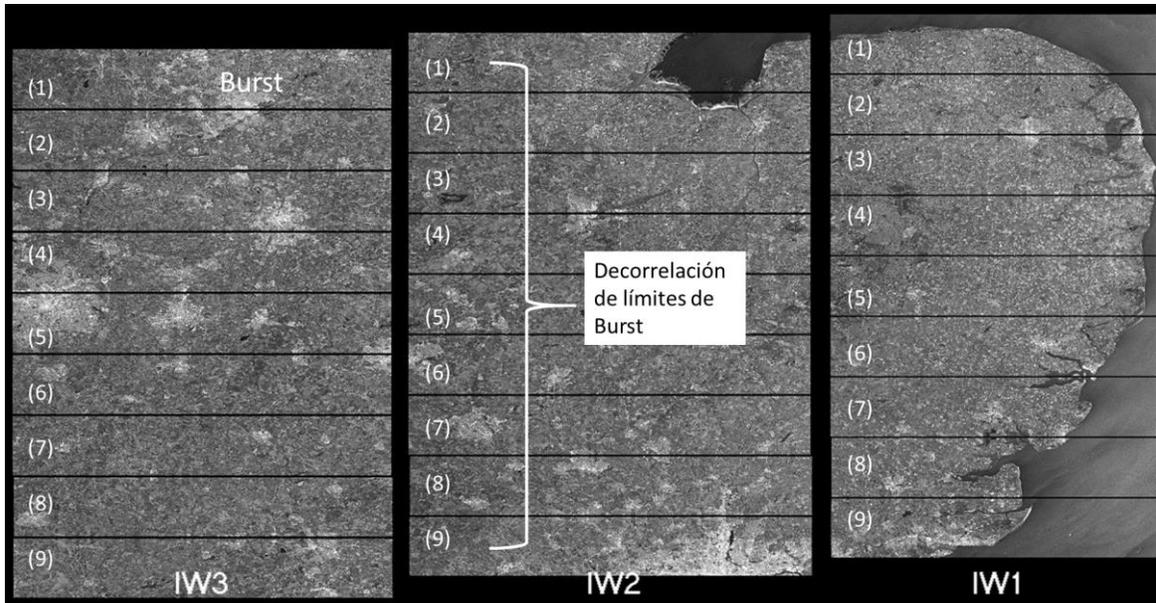


Figura 26 Superposición de ráfagas en un interferograma Fuente: modificado de Veci (2015).

4.3.3 Formación de interferogramas y coherencia

Un interferograma se construye a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el complejo conjugado de la esclava. La amplitud es el resultado de la multiplicación de las amplitudes pertenecientes a ambas imágenes, mientras que la fase interferométrica representa la diferencia de fase entre ambas imágenes (Veci, 2015). El producto de este proceso es la generación de dos bandas, la primera corresponde a la banda de fase interferométrica y la segunda se refiere a la banda de coherencia. La coherencia tiene un rango de 0 a 1 y representa la similitud de cada píxel entre las imágenes esclava y maestra. Las áreas oscuras representan baja coherencia, mientras que las áreas con alta coherencia aparecen brillantes en el mapa (Veci, 2015).

Como se detalla en el capítulo de marco teórico, existen distintas fuentes que contribuyen a la diferencia de fase (ver ecuación 2.5). Para efectos del procesamiento en este trabajo se consideran 5 aportes principales definidos por Veci, 2015, las cuales corresponden a la siguiente expresión:

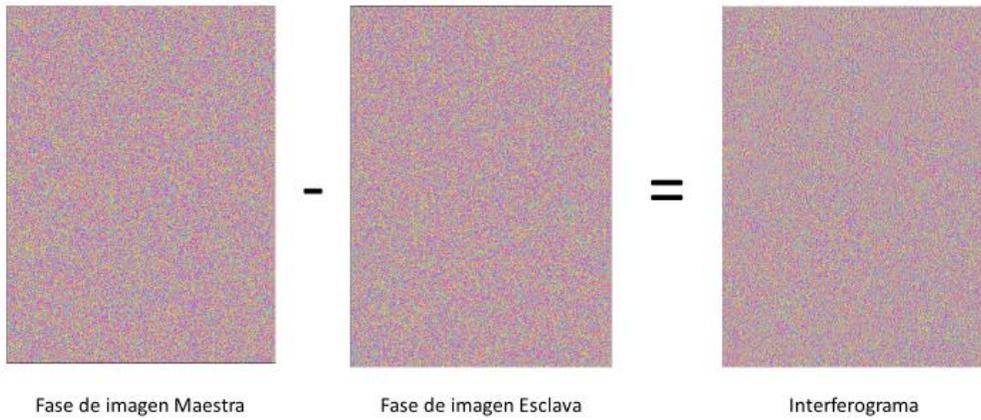
$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_t + \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_r \text{ ec. 4.1}$$

- Fase Interferométrica $\Delta\phi$; es la suma de la totalidad de los aportes de fase
- Tierra plana $\Delta\phi_f$; es la fase que se genera debido a la curvatura de la tierra.
- Topográfica $\Delta\phi_t$; es la fase provocada por la topografía.
- Desplazamiento $\Delta\phi_d$; es la fase que corresponde a la deformación superficial.
- Atmosférica $\Delta\phi_a$; es el componente atmosférico, que da cuenta del efecto de la atmósfera en la fase interferométrica, como lo es la humedad, temperatura y la presión.
- Ruido $\Delta\phi_r$; se crea por los cambios en los dispersores, diferentes ángulos de mirada del satélite y dispersión de volumen durante el entre transcurrido entre dos adquisiciones.

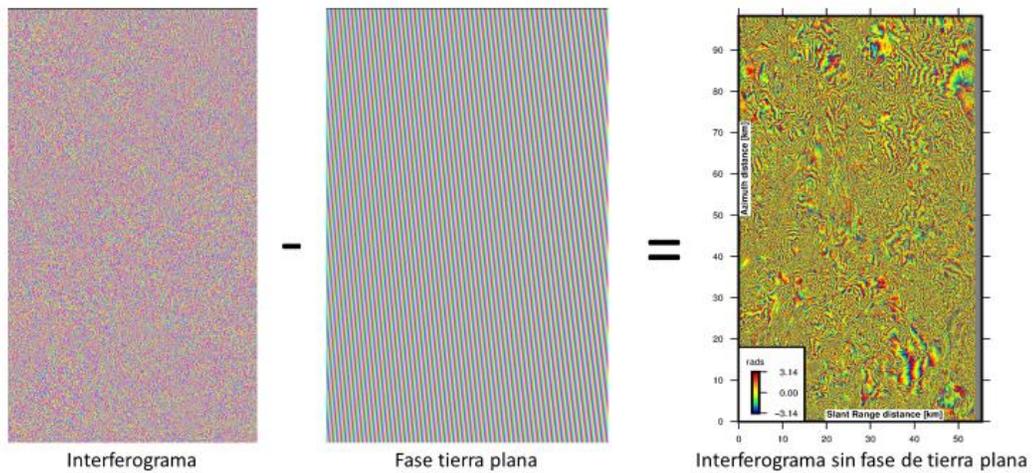
En la figura 27, se pueden observar algunos ejemplos del tratamiento genérico de las imágenes para el cálculo de un interferograma, como es el caso a). A continuación, se puede apreciar la

sustracción de fases que no resultan de utilidad para lo puntual de esta investigación, junto a sus representaciones gráficas, como se puede apreciar en los casos b) y c).

a)



b)



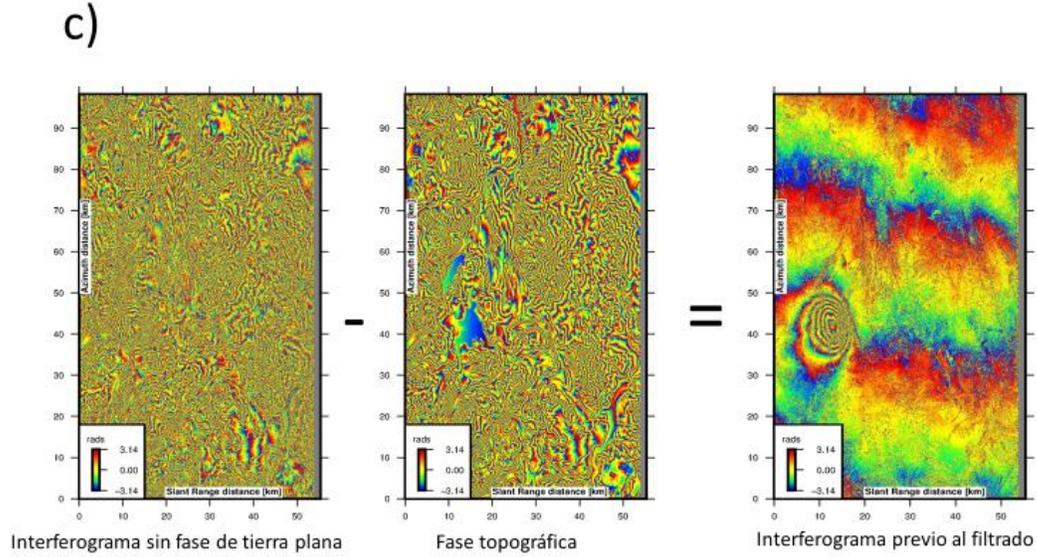


Figura 27 a) Cálculo de interferograma. b) Remove tierra plana. c) Remove topografía. Fuente: modificado de Delgado (2020).

4.3.4 Aplicar Multilooking

El procesamiento Multilook o multi-vista se puede utilizar para generar un producto con un tamaño de píxel de imagen nominal. Se pueden generar múltiples miradas promediando el rango con las celdas de rango acimutal mejorando la resolución radiométrica, pero reduciendo la resolución espacial. Como resultado, la imagen tendrá menos ruido aproximado de píxeles cuadrados después de convertirse de rango inclinado (*Slant Range*) a rango de la tierra (Veci, 2015). En la figura 28 se observa un ejemplo de este proceso.

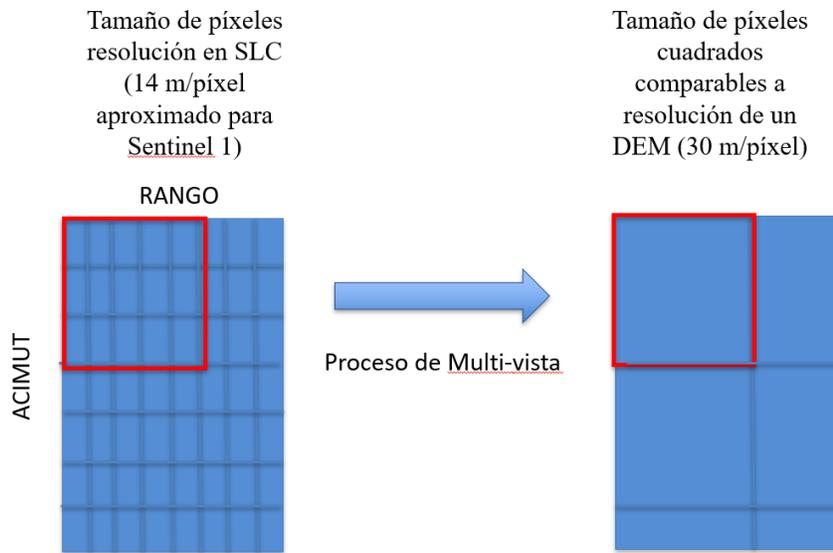


Figura 28 Diagrama esquemático de un proceso de Multi-vista. Fuente: elaboración propia. Modificado de Delgado (2020).

4.3.5 Filtrado de Imagen

Para facilitar los problemas de desenrollado o *unwrapping* del siguiente paso, es necesario realizar un filtrado del interferograma para producir mapas desenrollados precisos. La aplicación de filtros reduce los errores y residuos de fase mientras se conservan los detalles originales relevantes (Zhou et al., 2009). Se han introducido varios métodos de filtrado, en donde los filtros *low-pass* son los más comúnmente utilizados. En este estudio se emplean dos conjuntos de filtros de *low-pass* en primer lugar un filtro gaussiano de longitud de onda y en segundo lugar un algoritmo de filtro de modificado de Goldstein (Goldstein y Werner, 1998), mediante el programa GMT.

4.3.6 Desenrollado (*Unwrapping*)

Como se describe en el capítulo 2.4, el desenrollado relaciona la altura topográfica y la fase interferométrica integrando los píxeles vecinos para resolver la ambigüedad de fase que se mide entre $+\pi$ y $-\pi$ radianes, y de esta manera obtener un valor absoluto. En GMTSAR, el desenvolvimiento es realizado por SNAPHU.

4.3.7 Geocodificación

Los interferogramas son generados en coordenadas de radar, por esto es necesario geocodificar los productos a un sistema de coordenadas geográficas. En este paso, es aplicado una corrección de terreno en la banda de fase a fin de visualizar el producto en latitud y longitud en lugar de coordenadas de radar, este proceso se realiza en GMT donde se obtiene una resolución de 25 m/píxel.

4.4 Postproceso: remover rampa

La influencia del efecto rampa en la precisión final de los productos de deformación depende en gran medida de distintos aportes, como los son imprecisiones en las órbitas, señales atmosféricas, ionosféricas, cosísmicas y el grado de superposición de la rampa con las señales de deformación (Xin et al., 2018). Existen distintas aproximaciones diseñadas con el fin de remover la rampa, para efectos del trabajo se utiliza un código de Matlab (ver anexo A) que estima de forma independiente la fase de rampa en cada interferograma utilizando aproximaciones de mínimos cuadrados, luego se genera una rampa invertida la cual es restada para obtener un producto sin componentes del efecto rampa, finalmente se construye para cada interferograma una figura que resume el proceso como se aprecia en la imagen siguiente.

2018035 2018047

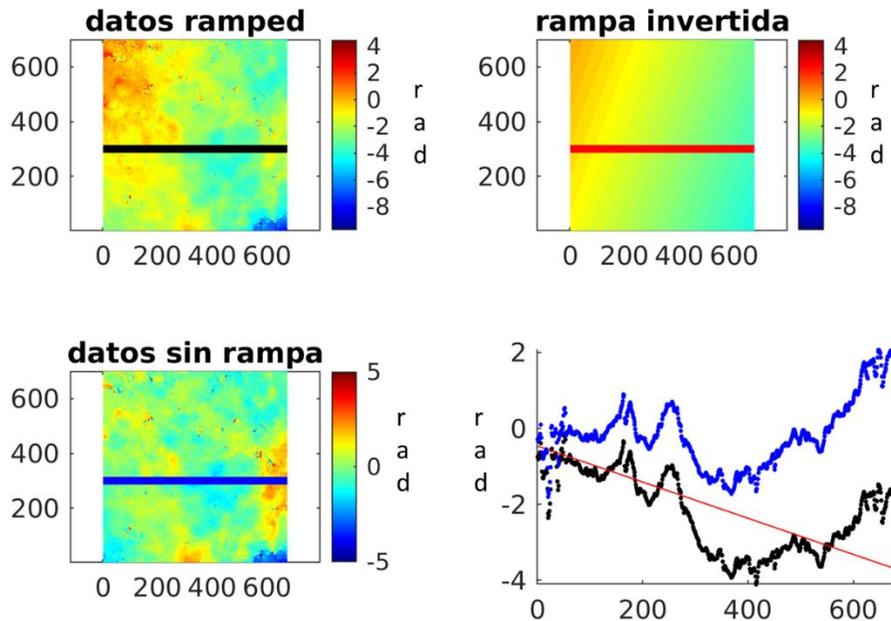


Figura 29 : Ejemplo de eliminación de rampa de un par interferométrico perteneciente al caso de estudio de Rancagua. Fuente: Elaboración propia

4.5 Procesamiento SBAS

Existen distintos algoritmos que permiten realizar análisis de series de tiempo a partir de imágenes SAR. El análisis de series de tiempo se configura como una herramienta fundamental para la medición y el monitoreo de desplazamientos de la superficie terrestre (Osmanoglu et al., 2016). *Small Baseline Subset* (SBAS) es la metodología seleccionada para el estudio de deformaciones en los casos seleccionados.

En la técnica multitemporal SBAS, el mayor desafío es alinear una gran pila de imágenes geométricamente con el objetivo de remover la fase topográfica de la pila (Eghbali, 2019). A continuación, se presenta un diagrama esquemático (ver figura 30) de un apilamiento de imágenes SAR, donde se requiere alinear con precisión de subpíxeles cada captura para lograr obtener la coherencia necesaria. En este paso se asume que la imagen maestra y las esclavas presentan geometrías similares, luego de este paso es posible generar interferogramas a partir de cualquier par de imágenes de la pila.

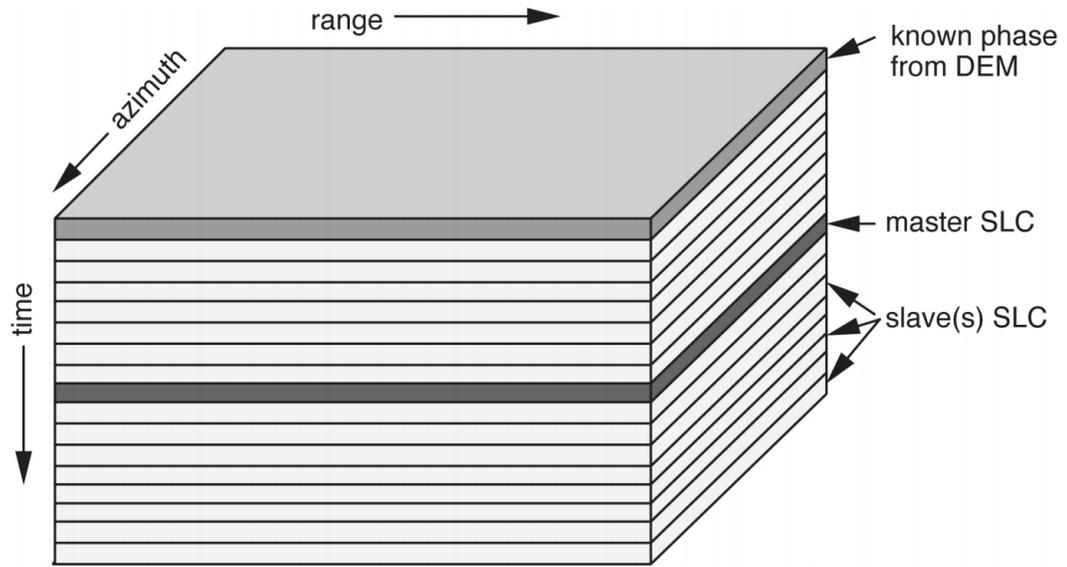


Figura 30 Diagrama esquemático de una pila de imágenes SAR y un DEM Fuente: Sandwell et al. (2011).

4.6 Resumen esquemático del procedimiento utilizado

En la figura siguiente se muestra un diagrama esquemático del flujo de trabajo utilizado en la presente investigación.

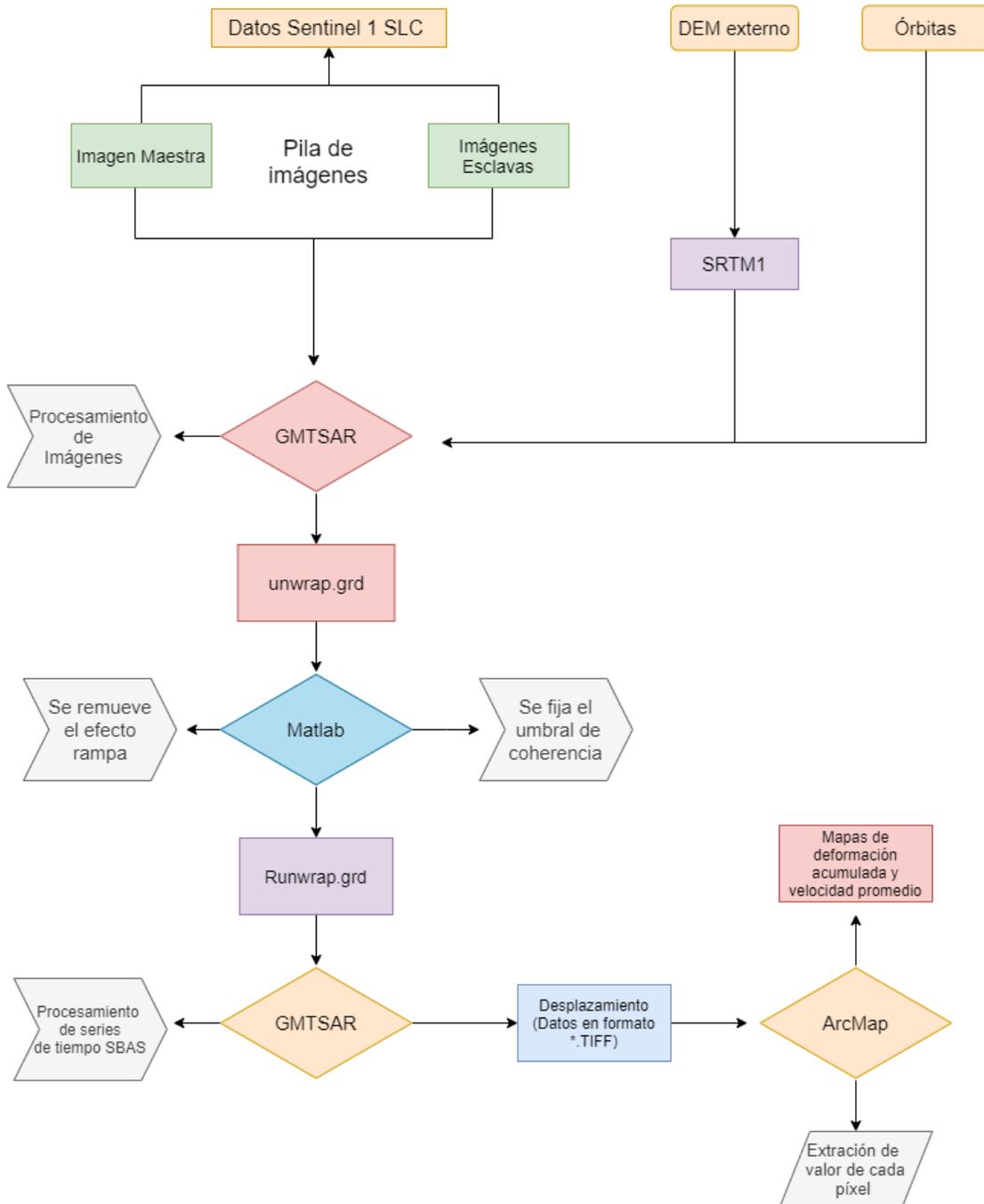


Figura 31: Diagrama esquemático del flujo de trabajo de la presente investigación. Fuente: Elaboración propia.

5. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos para cada zona. Al principio se establecen los parámetros utilizados y los procesos de tratamientos de las imágenes Sentinel-1.

5.1 Resultados caso de estudio 1: Zona de Rancagua

Las características geológicas y geomorfológicas más relevantes del caso de estudio 1; son enunciadas en el capítulo 3. El área comprendida por la ciudad de Rancagua está emplazada en la cuenca del mismo nombre, por ende, la zona no presenta relieve relevante, es decir, es un sector plano, caracterizada principalmente por depósitos cuaternarios. La relevancia de esta zona para el estudio corresponde a la aplicación de la técnica en un ambiente urbano, además cuenta con un área agrícola extensiva, lo que permite comprobar la precisión del instrumento en lugares de abundante vegetación, en este caso cultivos.

Se seleccionan un número total de 37 imágenes Sentinel-1B de geometría ascendente adquiridas entre el 4 de febrero de 2018 hasta el 24 de abril de 2019 las cuales fueron procesadas con el fin de monitorear las deformaciones de terreno para el período descrito. Con este propósito se generan 244 interferogramas.

5.1.1 Selección de pares interferométricos

A partir de las 37 imágenes SAR de geometría ascendente seleccionadas para la zona de Rancagua, se presenta la figura 32, donde se muestra una red espacio-temporal de los interferogramas, donde el eje de las ordenadas representa la línea de base espacial o *baseline* (m) y en el eje de las abscisas se observa el tiempo (años) de cada adquisición. Cada punto de la figura señala una imagen y cada línea entre los puntos establece un interferograma generado por ese par de capturas SAR. Todos los puntos que cumplan con los parámetros iniciales de borde establecidos con respecto a la cantidad de días y los metros de distancia de referencia entre ellos se conectarán con una línea, el mismo proceso se repite para cada una de las imágenes. Se definen los parámetros iniciales de 100 metros de distancia y 150 días, donde el algoritmo de selección de pares define que se procesen 244 interferogramas utilizando GMTSAR.

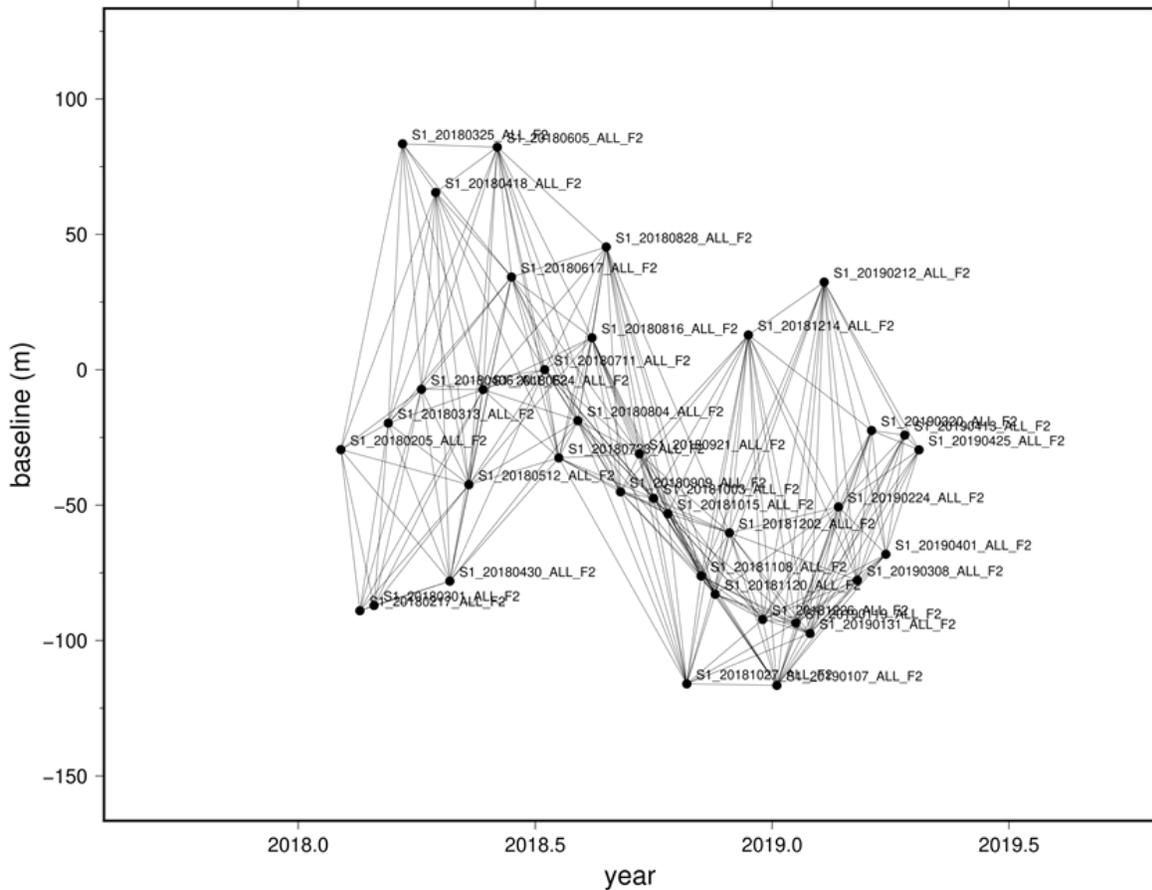


Figura 32 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes ascendentes de la zona de Rancagua generadas en GMTSAR. Cada punto representa una imagen Sentinel-1B y cada línea representa un interferograma originado entre cada par de imágenes. Fuente: Elaboración

5.1.2 Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia.

Luego de formar los 244 interferogramas definidos en la etapa anterior, se procede a revisar todos los productos desenrollados generados en GMTSAR (unwrap.grd), el efecto rampa se observa como un patrón presente en mayor o menor medida en cada uno de los interferogramas. A partir del código de programación de Matlab se aplica una eliminación de la rampa a cada uno de los productos desenrollados, esto con el fin de obtener mapas finales de deformación de mayor precisión. La siguiente figura representa ejemplos del uso del código que ilustran cómo se remueve la fase de la rampa.

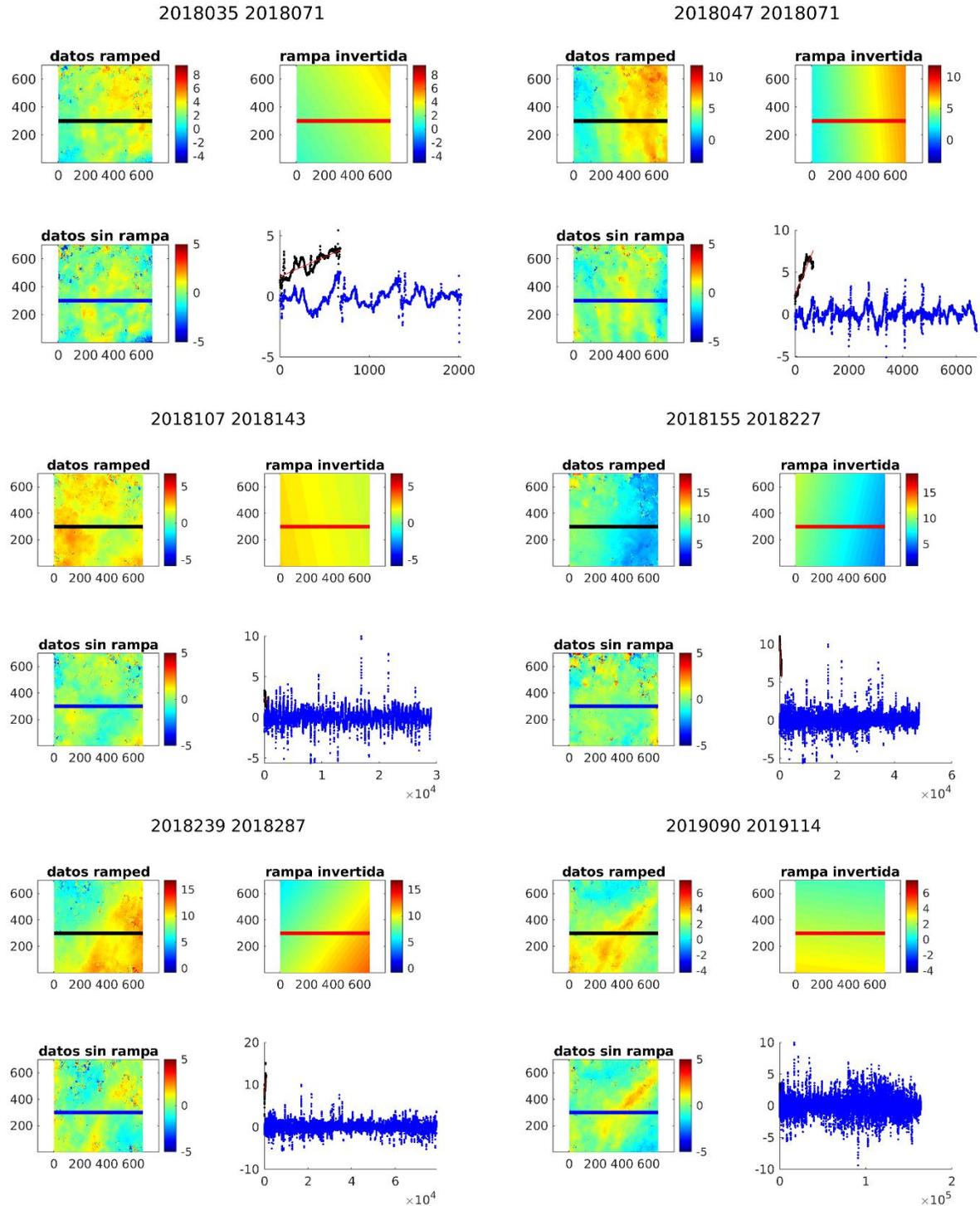


Figura 33 Se presentan 6 ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desarrollados de la zona de Rancagua. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: elaboración propia

Luego de remover la rampa, se procede a fijar un umbral de coherencia para este caso de 0,2, es decir que todos los píxeles por debajo de ese valor son eliminados, puesto que presentan poca fiabilidad y pueden alterar la calidad del producto final.

5.1.3 Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento

Mediante el *software* GTMSAR, se realiza el cálculo a través de la técnica SBAS, de la deformación acumulada de la zona para el período analizado y la velocidad de deformaciones. La visualización de resultados se elabora en la herramienta ArcMap. En los siguientes mapas se presentan los resultados obtenidos. El primer mapa correspondiente (figura 34) da cuenta del desplazamiento acumulado, medido en la línea de visión del satélite (LOS) en mm para el período estudiado. El segundo mapa da cuenta de la velocidad promedio calculada en LOS en mm/a.

Como se aprecia en la figura siguiente, los resultados de desplazamiento de terreno para la ciudad de Rancagua en el periodo analizado, corresponde a movimientos de rangos milimétricos, además la mayoría de los valores para los puntos obtenidos se encuentran entre los -4 y 4 mm, que son considerados por debajo del umbral de estabilidad y por tanto como puntos estables. Adicionalmente se detectan algunos focos de movimiento cuyos valores máximos oscilan entre -15 y 18 mm en magnitud, en el siguiente apartado serán analizados algunos ejemplos de esos focos con mayor detalle.

Mapa de desplazamiento acumulado (mm) - Rancagua
04/02/2018 - 24/04/2019

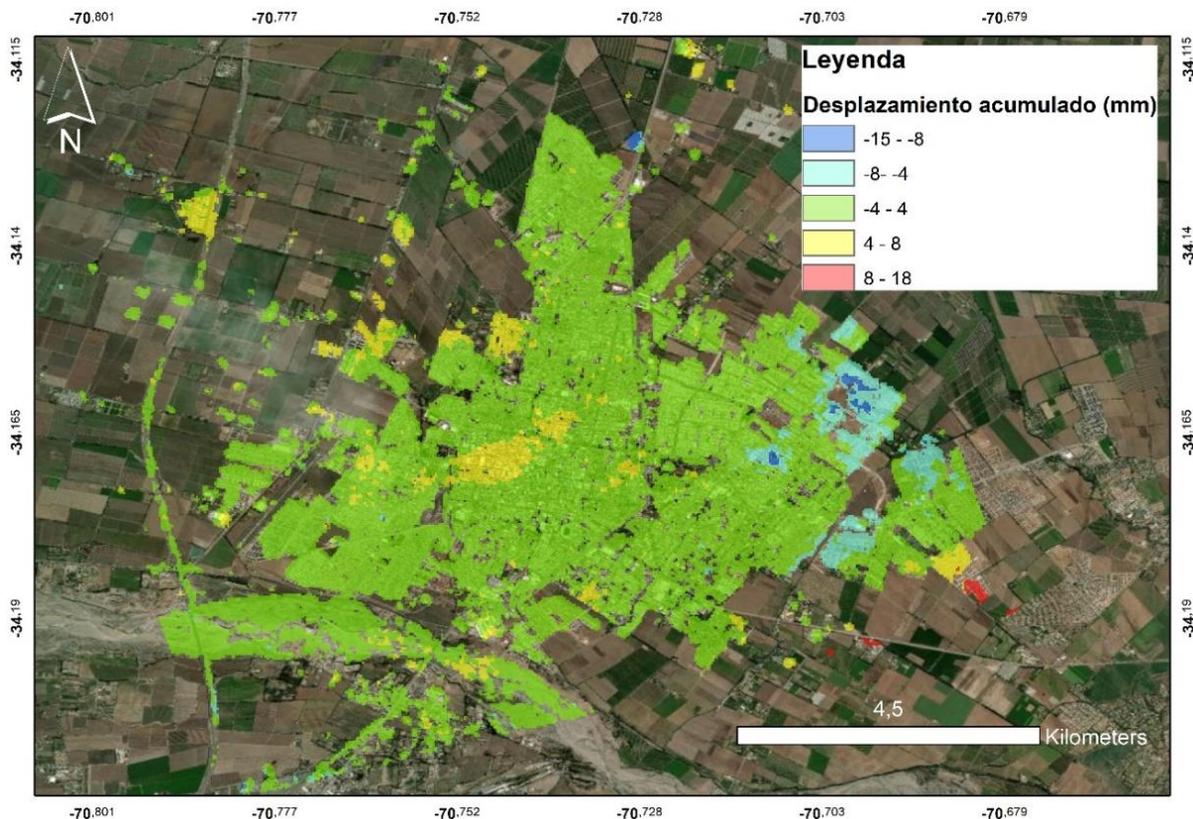


Figura 34 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de Rancagua para período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia

En el mapa de velocidad de desplazamiento de la figura 35 es posible observar un comportamiento similar al mapa anterior, en donde la mayoría de los valores en los puntos observados muestran una velocidad entre los -4 y 4 mm/a que se encuentran por debajo del umbral de estabilidad, lo cual la configura como una zona mayoritariamente estable. Por otro lado, los puntos por sobre este umbral son considerados como puntos activos, es decir, que presentan un determinado movimiento, los focos de mayor velocidad de movimiento se encuentran principalmente distribuidos en el caudal del Río Cachapoal ubicado al sur del mapa.

Mapa de velocidad de desplazamiento (mm/a) - Rancagua 04/02/2018 - 24/04/2019

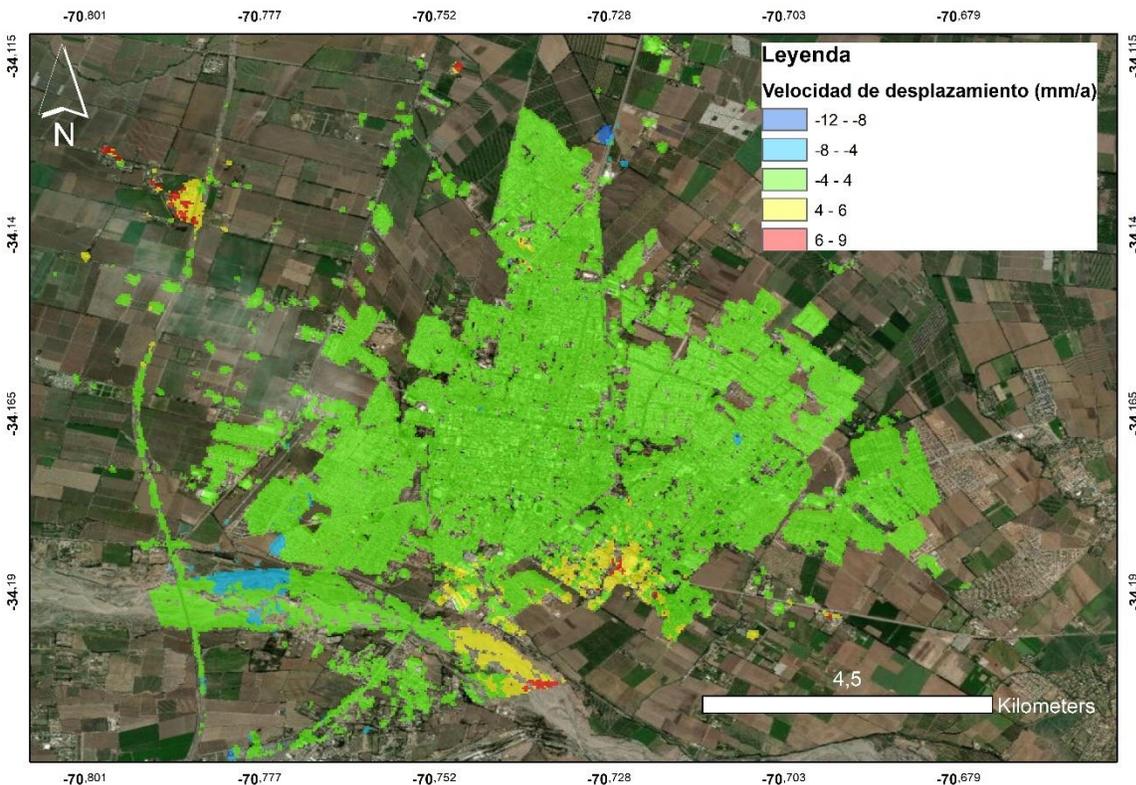


Figura 35: Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de Rancagua para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia

En forma general de acuerdo con las mediciones obtenidas en los 14 meses de estudio se establece que el comportamiento de la ciudad de Rancagua ocurre de forma homogénea, en donde mayoritariamente la magnitud de los puntos medidos se ubican por debajo del umbral de estabilidad definido (± 4 mm/a), por ende, se interpreta la zona como estable, lo cual resulta consecuente con la disposición geológica y la información de actividades antropogénicas presentes que no dan cuenta de posibles fenómenos que permitan suponer subsidencia o alzamiento relevantes en el área de estudio.

Los valores medidos corresponden a movimientos relativos, puesto que el análisis de la zona fue realizado con una geometría ascendente, de esta manera los valores negativos, como se explicita en la sección de marco teórico expresan movimientos de alejamiento con respecto al satélite, por

otro lado, los valores positivos dan cuenta de acercamientos al satélite entre las capturas, dado esta característica la interpretación se centrará en la magnitud de los datos.

Los pixeles medidos que presentan magnitudes de desplazamiento con valores por sobre el umbral de estabilidad se consideran como activos, lo cual puede ser gatillado por múltiples factores tanto de carácter geológico o antropogénico. De lo observado en los mapas presentados, la magnitud del desplazamiento para los puntos activos es menor que 18 mm, para el caso del desplazamiento acumulado, y las tasas de desplazamientos son menores a 12 mm/a valor.

De los procesos involucrados en las mediciones de puntos activos, se consideran tres principales, el primero es por la acción del Río Cachapoal en donde el cauce produce movilización de sedimentos debido al aumento o disminución de su caudal según la estación, además de la erosión propias de medios fluviales, estas movilizaciones son tomadas como cambios de fase que dan cuenta de un movimiento relativo para el satélite. El segundo factor considerado está asociado a zonas con presencia vegetal en donde su crecimiento o desaparición podría ser vinculado a un cambio de fase de cierta magnitud con algunos puntos aislados, una coherencia alta que se encuentre por sobre el umbral fijado y que sea detectado, lo que asegura la confiabilidad del dato captado. En tercer lugar, existiría una componente de acción antropogénica.

Espacialmente se observa una alta concentración de mediciones en el interior de la ciudad, lo que establece una alta coherencia de la zona, es decir, que la mayoría de los puntos representan una fiabilidad alta, por otra parte, en los alrededores, en las áreas agrícolas se observa una cantidad muy baja de pixeles con valores medibles, esta característica viene dada por propiedades del instrumento SAR.

Realizando una comparación entre el desplazamiento acumulado y la velocidad de desplazamientos se aprecian magnitudes de valores y tendencias similares por un parte, el desplazamiento acumulado engloba la totalidad de movimientos medidos para el periodo analizado que en este caso corresponde a 14 meses, mientras que la velocidad da cuenta de la tasa estimada por año, así las interpretaciones se realizarán a partir de los datos de velocidad, puesto que resultan una tasa representativa del periodo.

De los rangos de clasificación definidos para los mapas de velocidad de desplazamiento y mediante la foto interpretación de imágenes satelitales de libre acceso y la herramienta Google Earth, se observa que en los puntos activos presentan una alta correspondencia, en primer lugar, para los tonos amarillos y celestes (valores de hasta 8mm/a) con el Cauce del río Cachapoal, sectores industriales y estacionamientos, los tonos azules y rojos de hasta 12mm/a, se correlacionan con sectores del río, parques y áreas verdes mayoritariamente.

5.1.4 Revisión de casos específicos

En esta sección se procede a realizar una revisión de algunos casos relevantes, donde se evidencian algunos ejemplos de las tendencias generales observadas en el mapa de velocidad de desplazamiento de la zona.

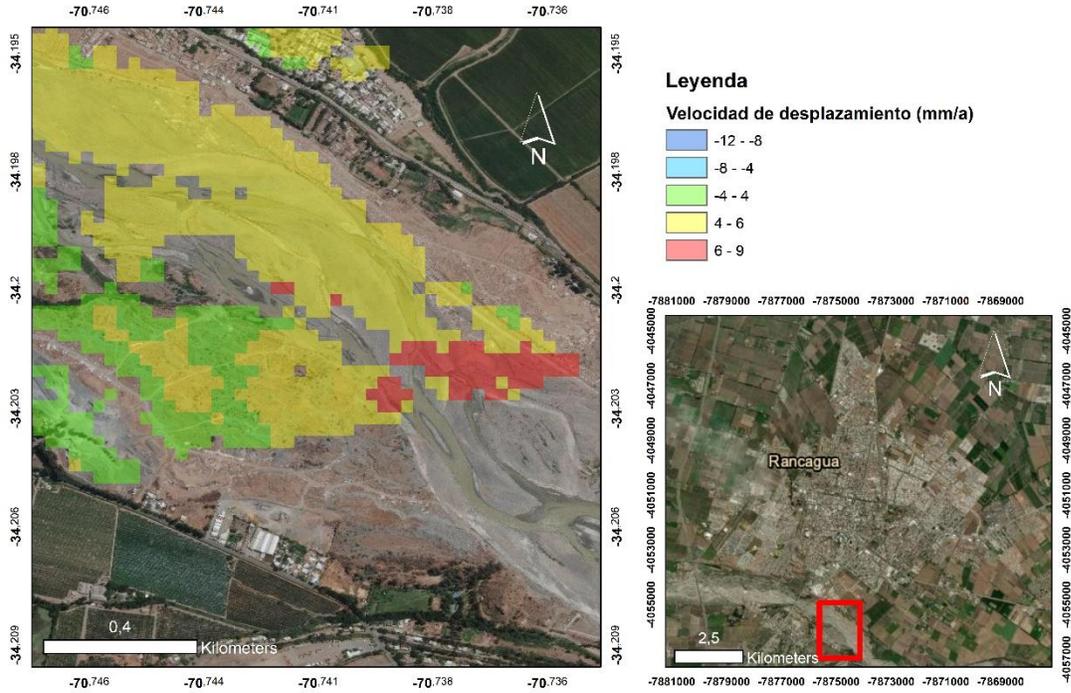
En la figura 36 se presentan tres acercamientos al mapa general de velocidad de desplazamiento para la zona de Rancagua, el primer caso (A), corresponde a un sector del cauce del Río Cachapoal en donde la tasa de deformación está en un rango de 4 a 9 mm/a, este foco de movimiento corresponde a cambios debido a la acción del cauce del río por transporte fluvial de sedimentos. El río es uno de los sectores de la zona con mayor actividad.

El segundo caso (B) da cuenta de un sector industrial, que exhibe una tasa de deformación mayor a la tendencia de la zona, de un rango entre los 4 y 9 mm/a este movimiento está dado por acción de agentes antrópicos. En general los sectores que presentan esta tendencia están relacionados con sectores industriales, estacionamientos y presencia vegetal.

El tercer caso (C) da cuenta de uno de los puntos con una de las mayores tasas de deformación, de hasta 12 mm/a, cuyo valor está asociado a varios factores como la presencia y crecimiento vegetal además de intensa actividad de vehículos.

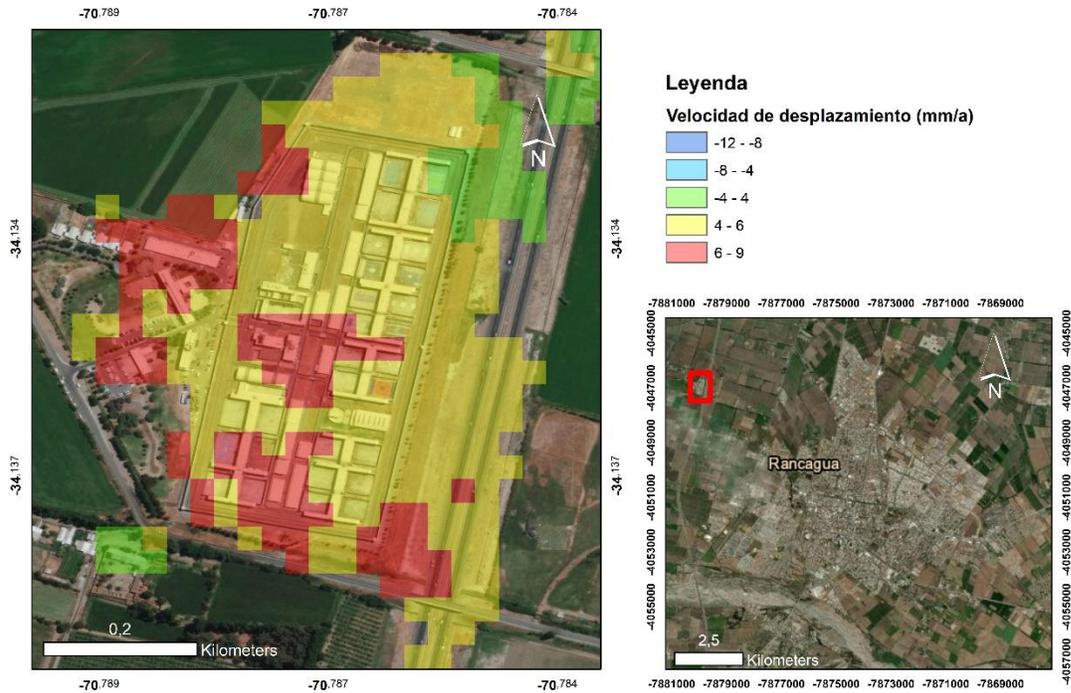
A)

Acercamiento de mapa de velocidad de desplazamiento (mm/a) - Rancagua
04/02/2018 - 25/04/2019



B)

Acercamiento de mapa de velocidad de desplazamiento (mm/a) - Rancagua
04/02/2018 - 25/04/2019



C)

Acercamiento de mapa de velocidad de desplazamiento (mm/a) - Rancagua
04/02/2018 - 25/04/2019

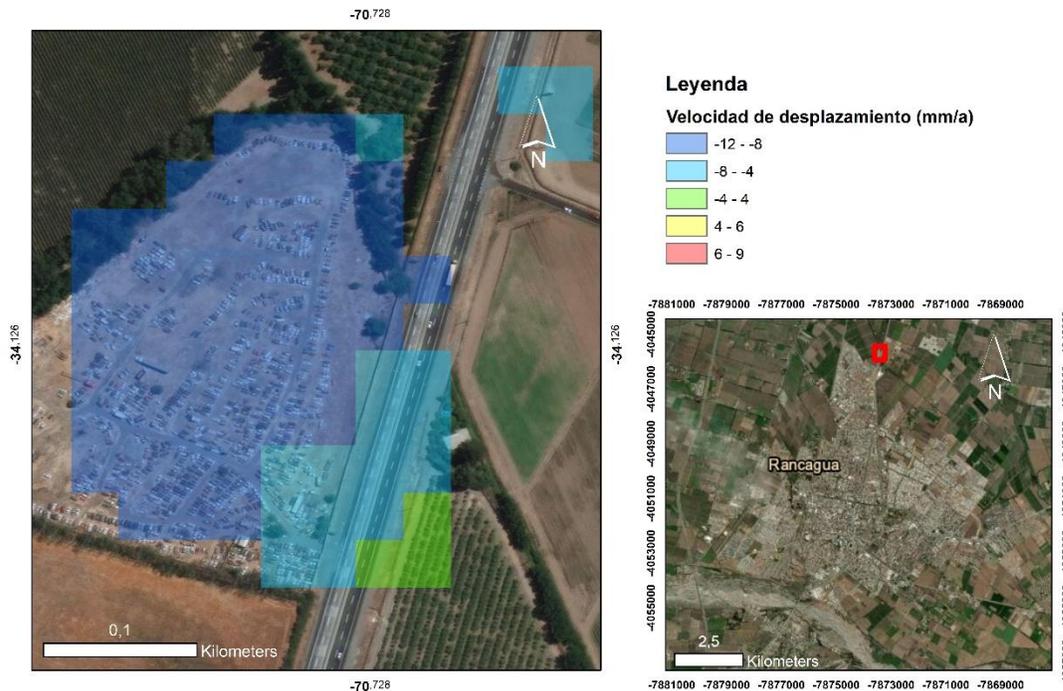


Figura 36 Se presentan tres mapas de acercamiento A) Cauce del Río Cachapoal B) Sector industrial C) Sitio eriazo usado como estacionamiento. Fuente: Elaboración propia

Resumen de resultados de la ciudad de Rancagua

Para resumir el periodo de observación de 15 meses en la ciudad de Rancagua son presentados los valores máximos absolutos obtenidos en la Tabla 3, estos dan cuenta del comportamiento del área de estudio, se destaca que tanto la velocidad y el desplazamiento acumulado comparten un orden de magnitud similar, así como tendencias semejantes en el mapa.

Tabla 3 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector de la ciudad de Rancagua en el periodo analizado.

Periodo		Desplazamiento acumulado absoluto máximo (mm)	Velocidad de desplazamiento absoluta máxima (mm/año)	Umbral de estabilidad definida (mm)
04/02/2018	25/04/2019	18	12	± 4

5.2 Resultados caso de estudio 2: Zona de mina El Teniente

El caso de estudio 2 pertenece a la zona de la mina El Teniente, que corresponde al yacimiento de cobre subterráneo de mayor tamaño en el mundo, además cuenta con una explotación minera a cielo abierto. La operación subterránea se realiza mediante la técnica *panel caving* que genera un cráter de hundimiento modelado para este yacimiento por Kvapil (1989). La importancia de este caso de estudio es aplicar la técnica InSAR en el cráter de hundimiento generado por la metodología de extracción, la que produce tasas de subsidencia y una amplia variedad de inestabilidades. Adicionalmente la zona se encuentra en una topografía compleja con altas pendientes y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Para el análisis y monitoreo de la deformación de terreno en la zona de la mina El Teniente, fueron seleccionadas un total de 80 imágenes Sentinel-1 adquiridas desde el año 2017 hasta el 2019 para generar 149 interferogramas en total. Las escenas SAR descendentes y ascendentes se examinan de manera independiente. Por un lado, se produjeron 81 interferogramas a partir de 43 imágenes Sentinel-1B de geometría descendente adquiridas desde el 6 de noviembre de 2017 hasta el 6 de abril de 2019. Por otra parte, se generaron 68 interferogramas a partir de 37 imágenes Sentinel-1B de geometría ascendente comprendidas entre el 4 de febrero de 2018 y 25 de abril de 2019.

5.2.1 Selección de pares interferométricos

A partir de las 37 imágenes SAR de geometría ascendente seleccionadas para la zona de la mina El Teniente, se generó en GMTSAR una red de interferogramas espacio-temporal de imágenes de geometría ascendente, como se puede apreciar en la figura 37 donde se muestra una red espacio-temporal de los interferogramas, en el cual el eje de las ordenadas representa la línea de base espacial o *baseline* (m) y en el eje de las abscisas se observa el tiempo (años) de cada adquisición. Cada punto de la figura señala una imagen y cada línea entre los puntos establece un interferograma generado por ese par de capturas SAR. Todos los puntos que cumplan con los parámetros iniciales de borde establecidos con respecto a la cantidad de días y los metros de distancia de referencia entre ellos se conectarán con una línea, el mismo proceso se repite para cada una de las imágenes. Se definen los parámetros iniciales de 100 metros de distancia y 20 días, donde el algoritmo de selección de pares define que se procesen 68 interferogramas utilizando GMTSAR.

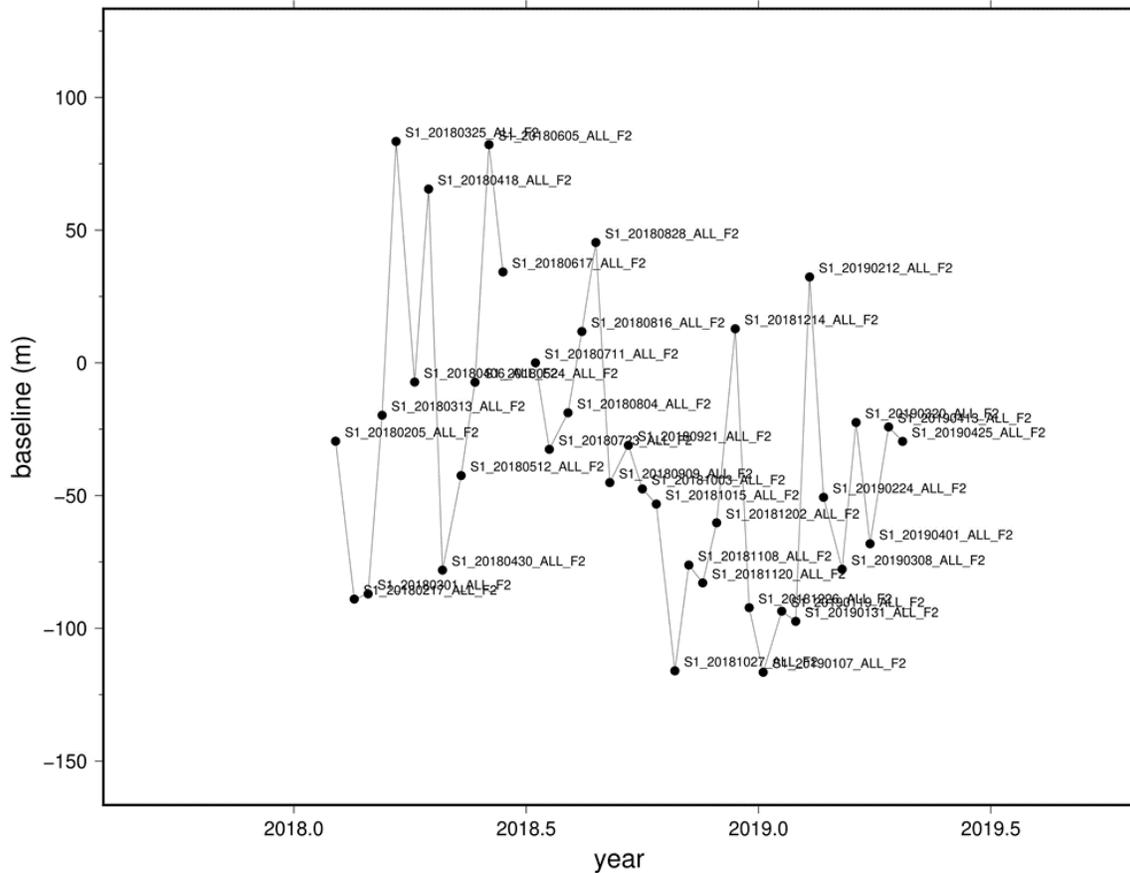


Figura 37 : Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona de mina El Teniente de geometría ascendente generadas en GMTSAR. Fuente: Elaboración propia.

La figura 38 contiene la red espacio-temporal de los interferogramas de escenas SAR descendentes, en donde 43 imágenes se procesan de la manera descrita en el diagrama dando origen a 81 interferogramas empleando GMTSAR. Se definen los parámetros iniciales de 100 metros de distancia y 25 días, donde el algoritmo de selección de pares define que se procesen 81 interferogramas utilizando GMTSAR.

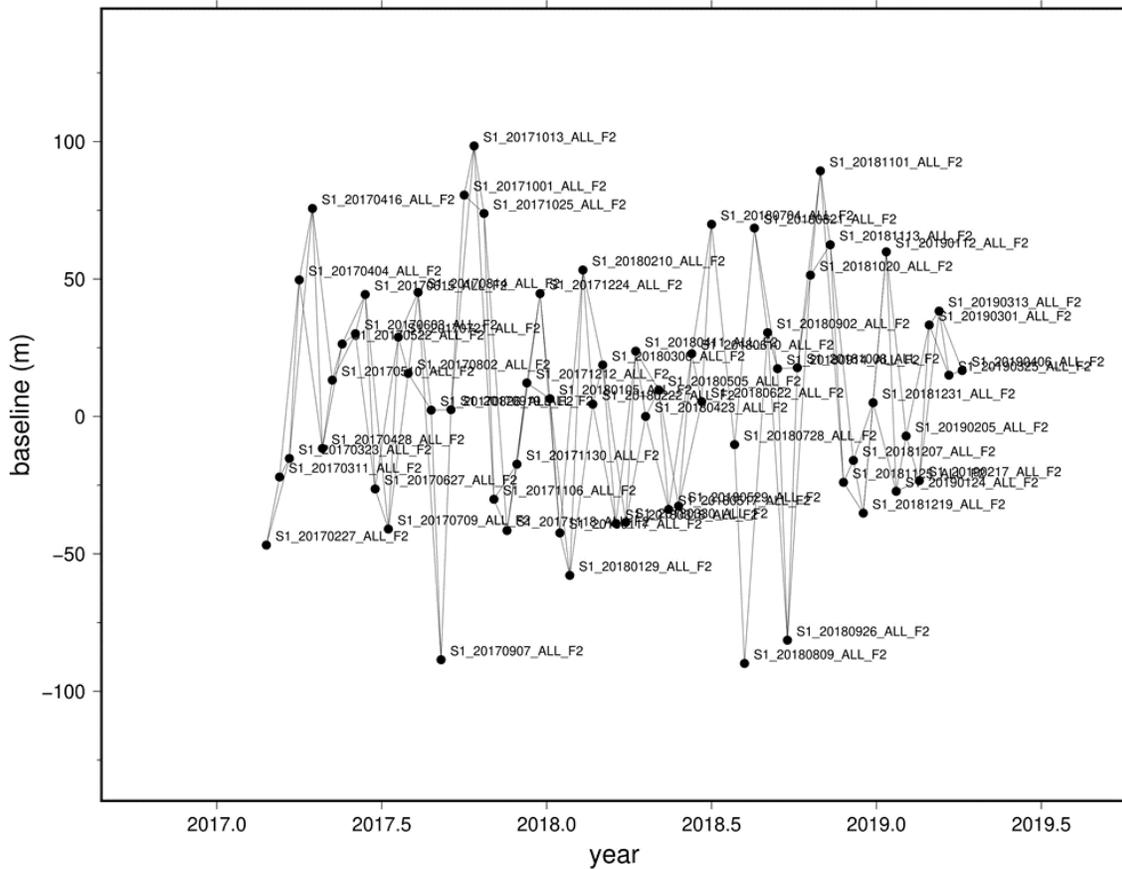
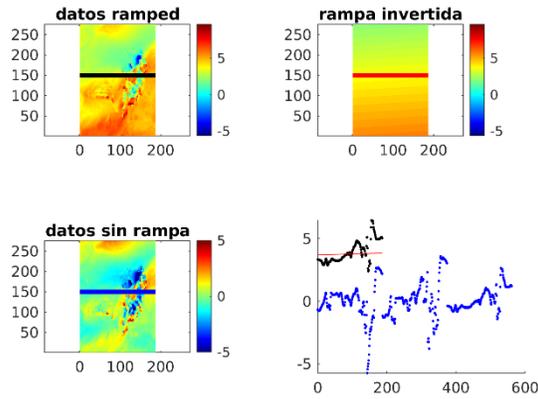


Figura 38 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona de mina El Teniente de geometría descendente generadas en GMTSAR. Fuente: Elaboración propia.

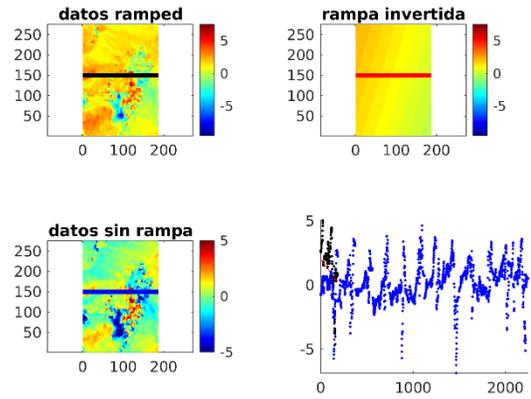
5.2.2 Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia

De forma similar al primer caso, posterior a la obtención de los 149 interferogramas anteriormente definidos, los productos desenrollados son revisados con el fin de poder aplicar la eliminación de la rampa a cada uno de ellos. A continuación, se presentan las figuras que ejemplifican la sustracción de la rampa, tanto para capturas de geometría ascendente como descendente.

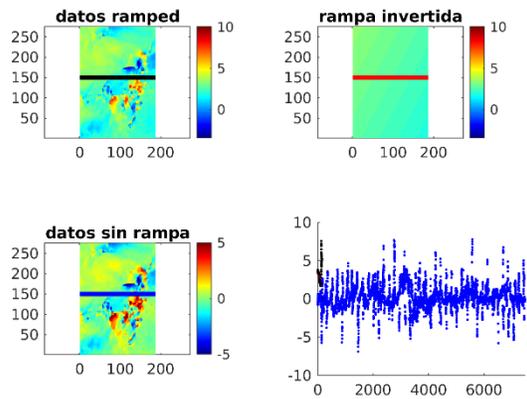
2018047 2018059



2018107 2018119



2018299 2018311



2019102 2019114

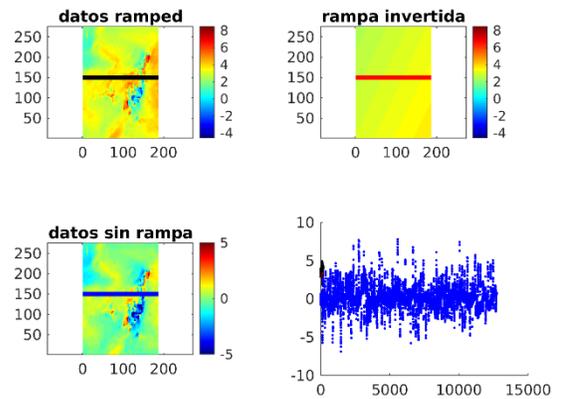
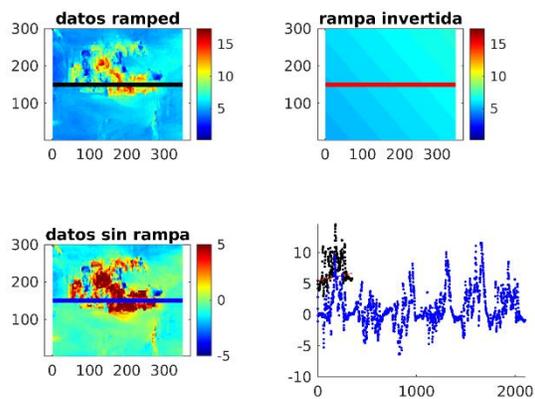
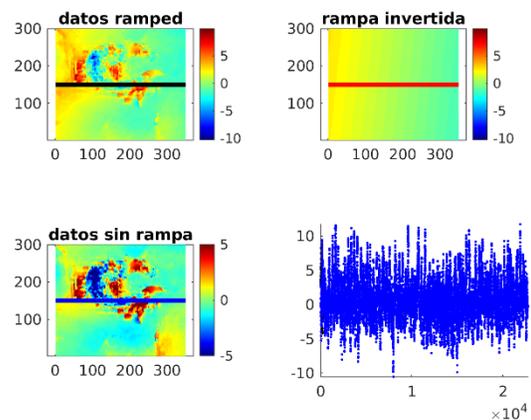


Figura 39 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desarrollados de la zona de la mina El Teniente, con geometría ascendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: Elaboración propia.

2017333 2017357



2018352 2018364



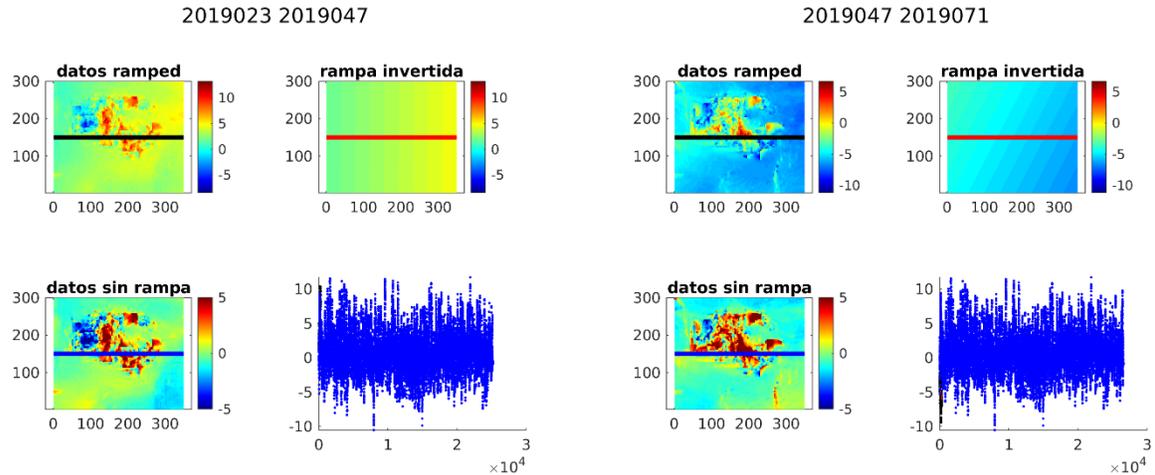


Figura 40 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto de rampa en productos interferométricos desenrollados de la zona de la mina El Teniente, con geometría descendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: Elaboración propia.

Posterior a remover el efecto rampa para ambas geometrías es fijado un umbral de coherencia de 0,12, el umbral estándar utilizado por el programa GMTSAR. Todos los píxeles por debajo de ese valor son eliminados, puesto que presentan poca fiabilidad y pueden afectar la calidad del resultado.

5.2.3 Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento

En los siguientes mapas se exponen los resultados obtenidos para la zona de mina El Teniente, tanto para geometría ascendente como descendente.

Mapa de desplazamiento acumulado LOS (mm) - Mina El Teniente 04/02/2018 - 25/04/2019

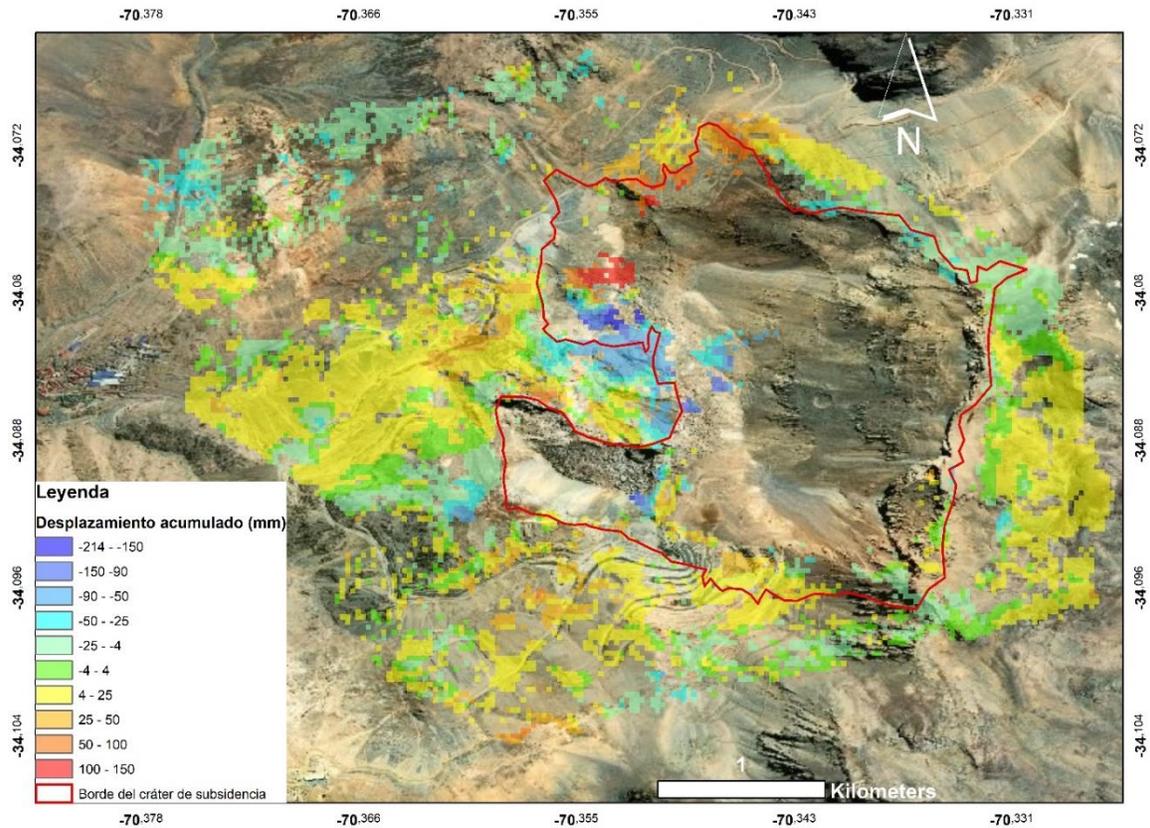


Figura 41 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de la mina El Teniente para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia

El mapa de la figura 41 da cuenta del desplazamiento acumulado en la línea de visión del satélite (LOS) para la geometría ascendente en el tiempo de 15 meses del estudio. Se observa una tendencia de desplazamientos heterogénea en el mapa, caracterizada por valores predominantes de 4mm a 2,5 cm en valor absoluto distribuidos espacialmente fuera del límite del cráter de subsidencia, representados por el color amarillo y tonos verde claro en el mapa. El umbral de estabilidad de la zona se define en ± 4 mm con colores verdosos, estos puntos son considerados estables, se encuentran distribuidos en zonas alejadas al cráter de subsidencia.

La zona presenta múltiples puntos activos de deformación causados por los movimientos propios de una faena minera e inestabilidades asociadas al cráter de hundimiento. Los focos de movimiento de mayor magnitud se encuentran dentro del límite del cráter específicamente en el sector norte del fondo del cráter de hundimiento, que tienen valores máximos de -21,4 cm y 15 cm, estas tasas se encuentran asociadas a la extracción minera subterránea.

Mapa de velocidad de desplazamiento LOS (mm/a) - Mina El Teniente 04/02/2018 - 25/04/2019

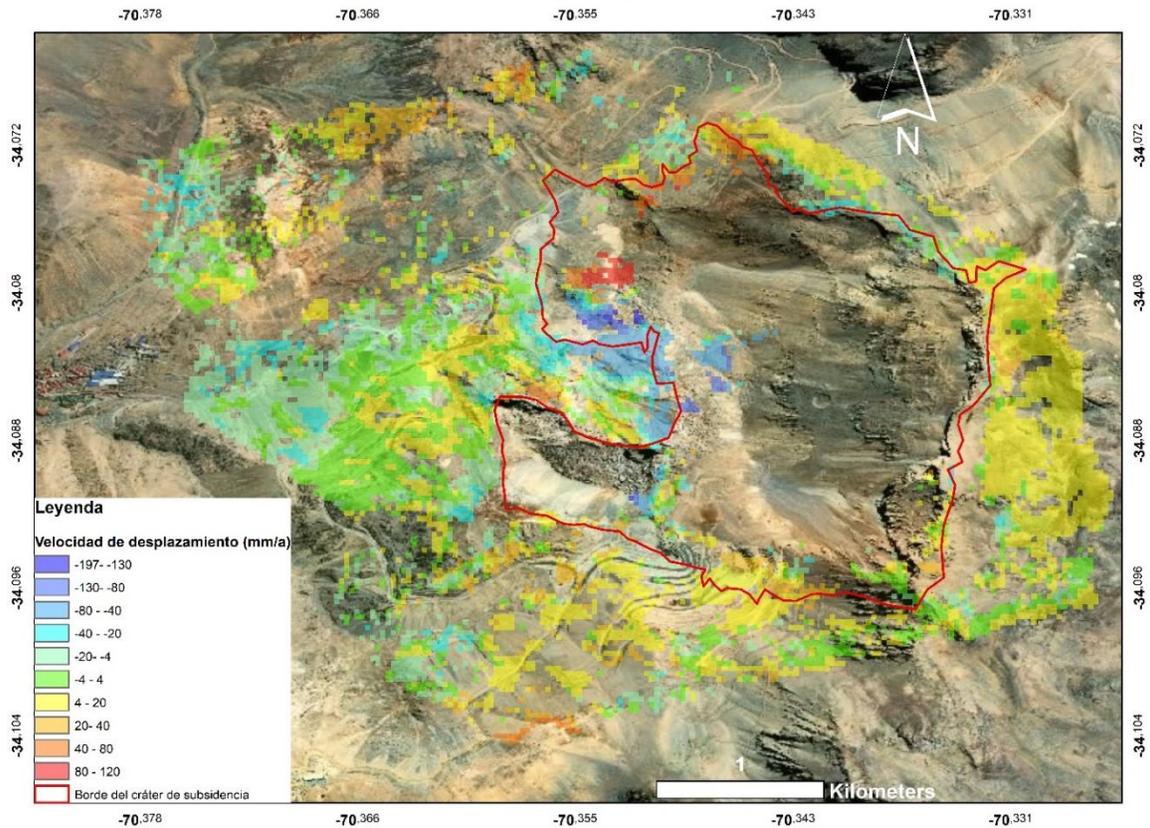


Figura 42 Mapa de velocidad de desplazamiento LOS de la mina El Teniente para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia.

El mapa de la figura 42 da cuenta de la velocidad promedio de desplazamiento en LOS, que presenta una tendencia similar al mapa anterior, en donde la mayoría de los puntos distribuidos fuera del límite del cráter presentan un rango de valores de tasas de deformación entre los 4 mm/año a 4 cm/año en valor absoluto. Mientras que los focos de mayor movimiento se encuentran principalmente dentro del cráter de hundimiento y exhiben velocidades de deformación máximas mayores a -13 cm/a y 12 cm/a.

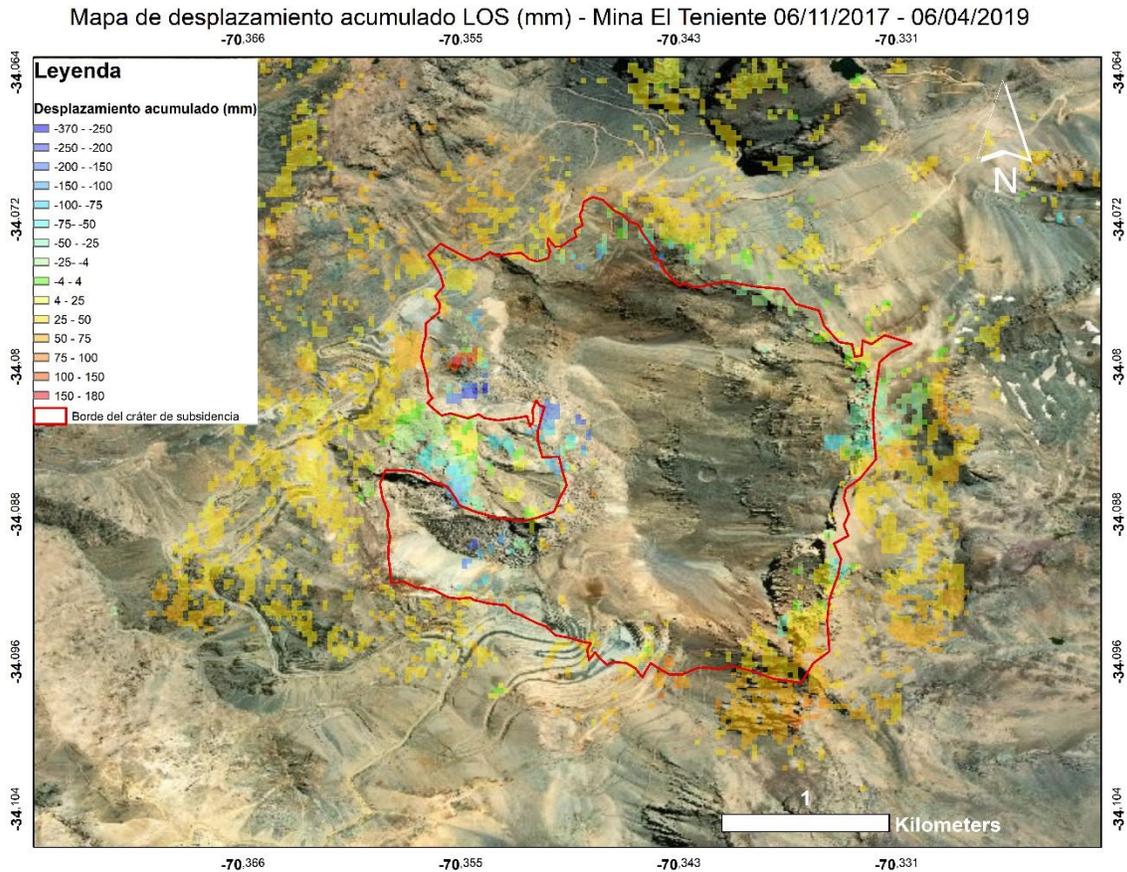


Figura 43 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS de la mina El Teniente para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

La figura 43, muestra el desplazamiento acumulado en la línea de visión del satélite (LOS) para la geometría descendente en el tiempo del estudio. Se observa como tendencia de desplazamiento que la mayoría de los puntos distribuidos espacialmente fuera del límite del cráter de subsidencia, presentan valores entre los rangos de 4 mm a 7,5 cm en valor absoluto. Esta deformación es causada por los movimientos propios de la faena minera e inestabilidades asociadas al cráter de hundimiento. Los focos de movimiento de mayor magnitud se encuentran dentro del límite del cráter, específicamente en el sector norte del fondo del cráter de hundimiento, presentan valores máximos de -37 a 18 cm, estas tasas se encuentran asociadas con la extracción minera subterránea.

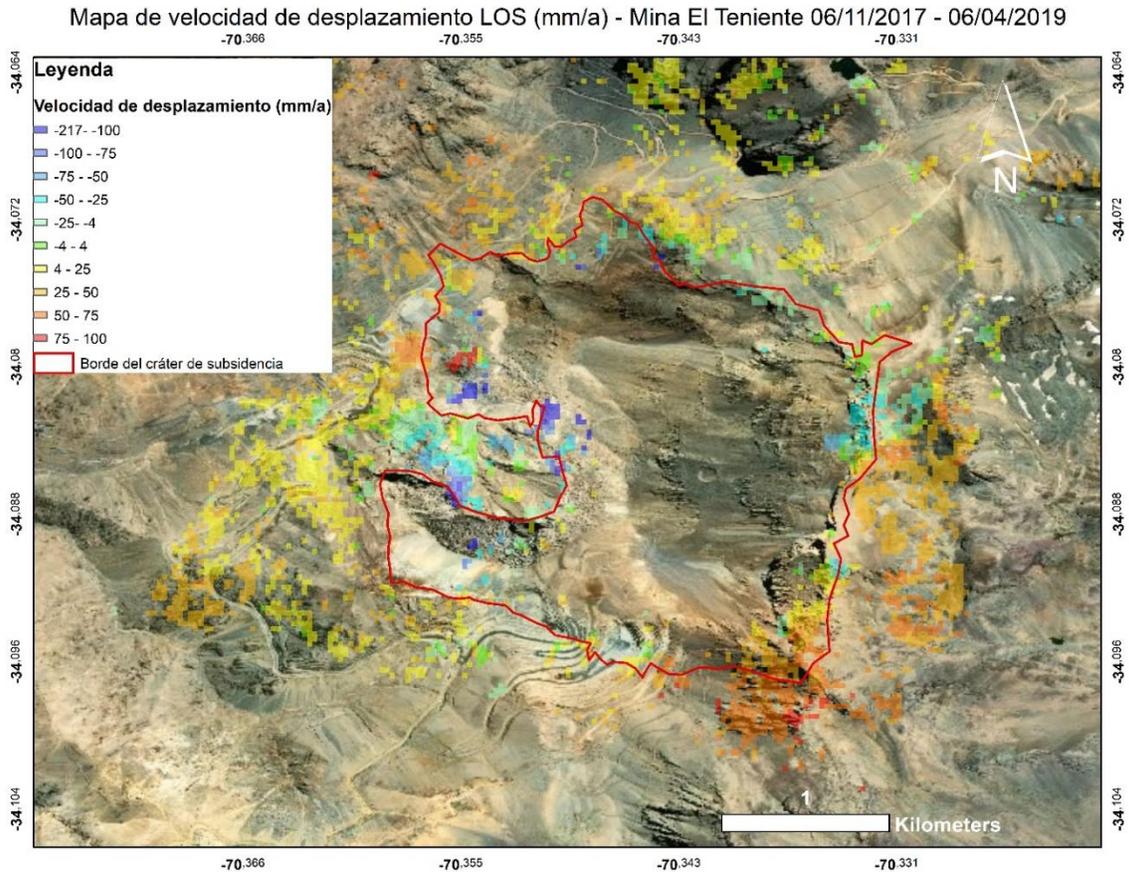


Figura 44 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de la mina El Teniente para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

El mapa de la figura 44 da cuenta de la velocidad promedio de desplazamiento en LOS; se observa una tendencia similar al mapa anterior, en donde la mayoría de los puntos distribuidos fuera del límite del cráter presentan un rango de valores de velocidad de deformación de hasta 5 cm/año en valor absoluto. Mientras que los focos de mayor movimiento se encuentran principalmente dentro del cráter de hundimiento y exhiben velocidades de deformación máximas mayores a -27 a 10 cm/año.

Debido a que estos análisis son en base a mediciones relativas a la línea de visión del satélite (LOS), se debe realizar una interpretación paralela para cada caso, puesto que está condicionada a la geometría del vuelo del instrumento satelital. En esa línea, ambas mediciones presentan tendencias similares con respecto a los máximos focos de deformación, en específico un mismo sector ubicado en el norte del fondo del cráter cuya magnitud de la tasa de deformación es muy superior al resto de mediciones de la zona, sobre 15 cm/a en valor absoluto.

La zona del yacimiento se encuentra caracterizada mayoritariamente de puntos activos, sin embargo, en menor medida cuenta con sectores en ambas geometrías con mediciones dentro del rango de valores del umbral de estabilidad fijado, para este caso de 4 mm en valor absoluto, considerados como puntos estables. Tienen la característica de presentarse en lugares

mayoritariamente de bajo relieve y alejados de caminos o sectores de la explotación propiamente tal.

De los procesos involucrados en las mediciones de puntos activos se encuentran tanto componentes de carácter geológico como antrópicos, en primer lugar, existen inestabilidades generadas por pendientes, procesos de relleno o flujo de material no consolidado, condiciones erosivas por presencia y derretimiento de nieve estacional. Por otra parte, condiciones propias de alta cordillera conviven con una operación minera a gran escala tanto a rajo abierto como subterránea, lo que configura una zona con altas tasas de desplazamiento del orden centimétrico para los 15 y 18 meses de estudio, mediante criterios de foto interpretación y la utilización de la herramienta Google Earth se establecen algunos patrones generales.

Para ambas geometrías es apreciable que en zonas alejadas del cráter de subsidencia se presenten magnitudes de movimientos del orden de pocos centímetros, y tienen una alta correlación sectores de la faena activos, como caminos y otras infraestructuras, además de sectores de mayor pendiente.

Otro aspecto que se destaca es la baja densidad de pixeles medidos dentro del cráter como el escarpe, esto se debe a que presenta una baja coherencia, por tanto, las mediciones de esa zona fueron descartadas por la metodología. De esta manera también es posible resaltar que la geometría descendente presenta una diferencia importante en la cantidad de pixeles medidos, siguiendo una misma metodología y periodos de tiempo similares.

Para ejemplificar la naturaleza de los datos presentados en la figura 45, es posible observar una vista en perfil del sureste de la operación minera El Teniente, que engloba sectores del fondo del cráter de hundimiento, escarpes cercanos y en la parte superior derecha de la imagen se observa la operación a rajo abierto.

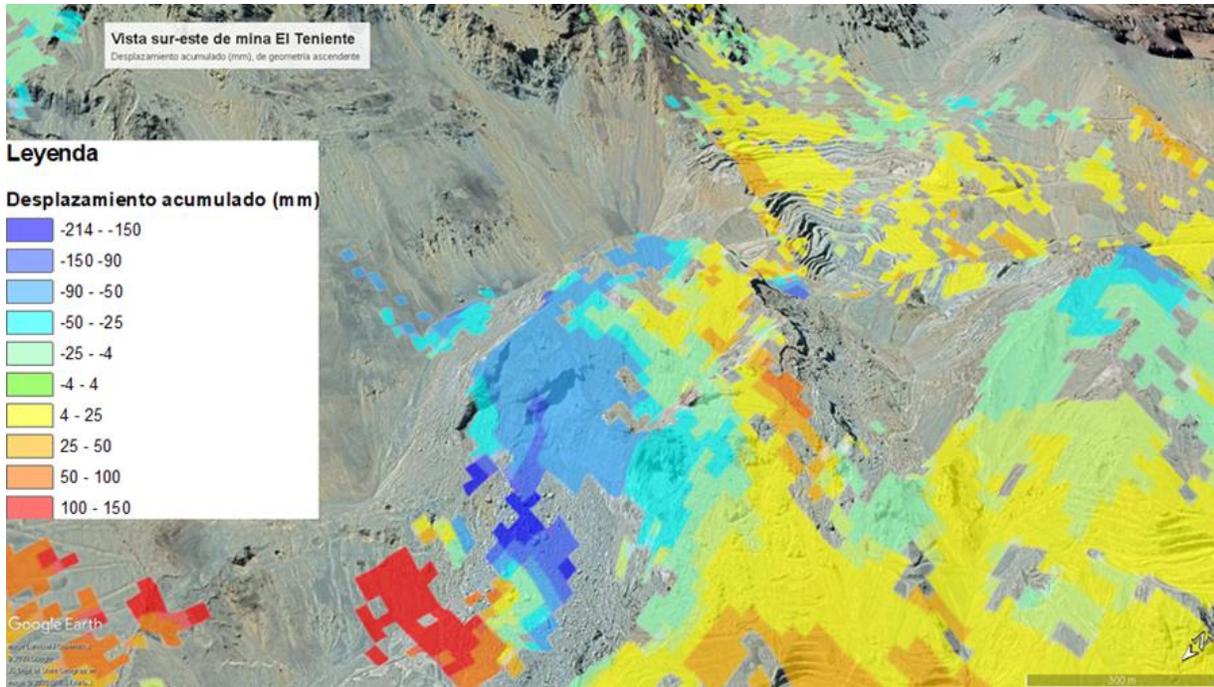


Figura 45 Perfil del desplazamiento acumulado en geometría ascendente de la zona del cráter de subsidencia, visión sureste. Fuente: Elaboración propia

De esta manera los valores con mayor grado de anomalía, superiores a 10 cm en valor absoluto, se asignarían a proyecciones de deformaciones en las galerías subterráneas, mientras que en el rajo abierto se presenta un comportamiento dominado mayoritariamente por componentes de deformaciones relacionadas con la pendiente, con desplazamientos entre 4 mm a 5 cm.

5.2.4 Revisión de casos específicos

A continuación, se presentan algunos casos relevantes.

La figura 46 muestra dos acercamientos a los mapas de deformación acumulada, para cada geometría donde se observa la zona del fondo del cráter de hundimiento. Este sector presenta las mayores tasas de desplazamiento acumulado de todo el yacimiento. Los puntos medidos describen una tendencia de hundimiento de hasta - 215 mm para el caso ascendente, en 15 meses de observación, mientras que para el caso descendente presenta zonas con una subsidencia mayor a los -300 mm en 18 meses estudiados. Estas mediciones dan cuenta de un pequeño sector que mostraría el impacto de las actividades de la minería subterránea, de forma que se corresponden a proyecciones de niveles de colapso, que en superficie se combinan con movimientos lentos y deslizamientos en las laderas cercanas al cráter debido a la acomodación del material.

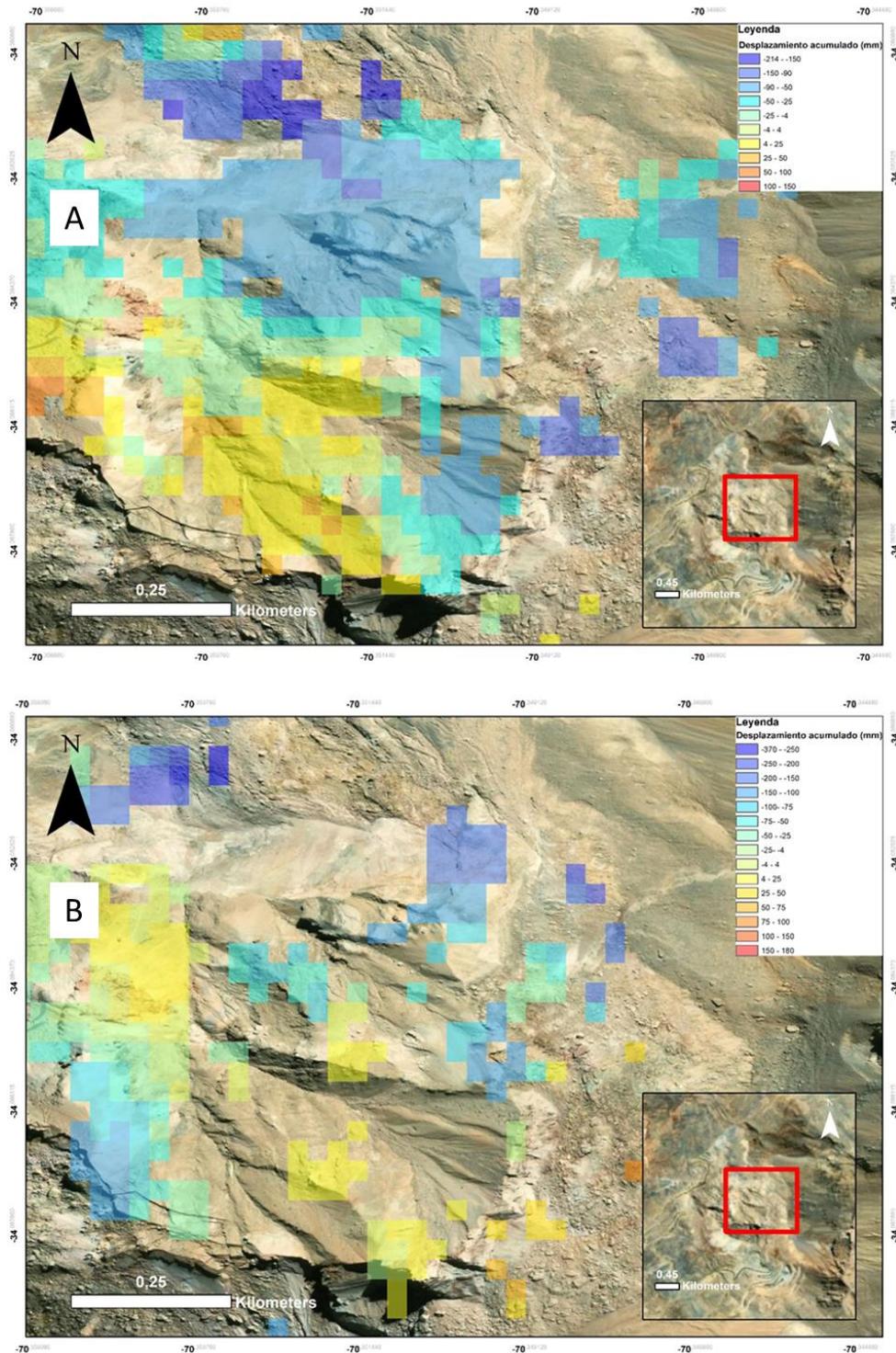
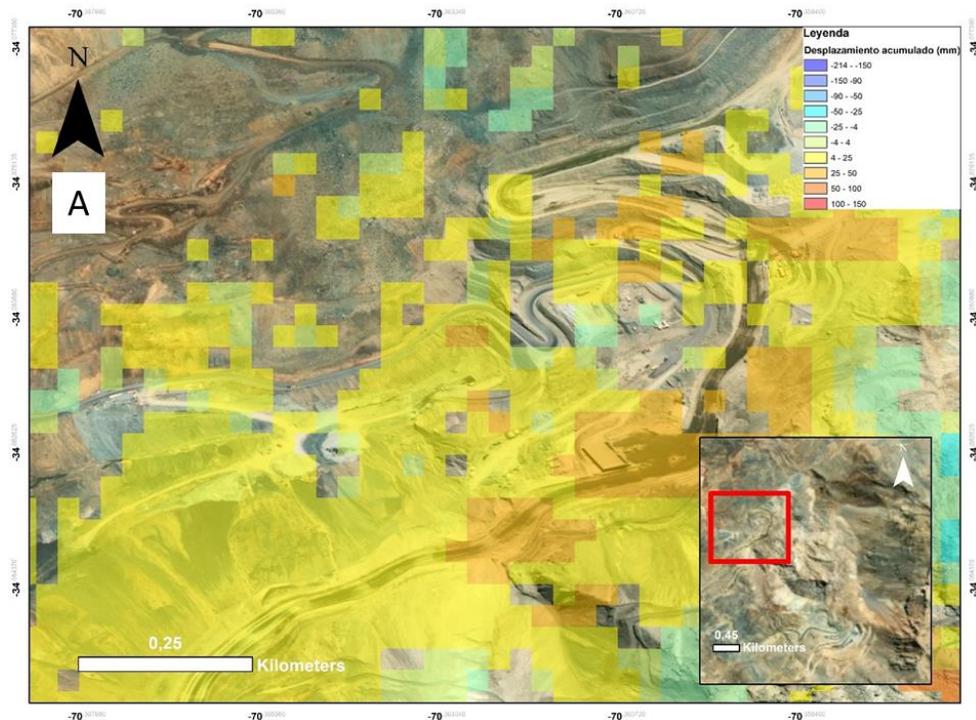


Figura 46 Se presentan dos mapas de acercamiento de deformación acumulada A) Fondo del cráter de hundimiento ascendente. B) Fondo del cráter de hundimiento descendente. Fuente: Elaboración propia

La figura 47 muestra dos acercamientos a los mapas de deformación acumulada para una zona fuera del límite del cráter de hundimiento con actividad de la faena minera, taludes y caminos.

Este sector presenta tasas de desplazamiento acumulado promedio entre -2,5 y 2,5 cm para el caso ascendente en 15 meses de observación, mientras que para el caso descendente presenta zonas de deformación entre 2,5 y 7,5 cm, en 18 meses estudiados. Estas mediciones dan cuenta de un fenómeno deformativo, mayoritariamente homogéneo en donde resulta difícil establecer características relevantes y causalidades derivadas de ella, debido a la ausencia de una predominancia como por ejemplo pendientes pronunciadas.



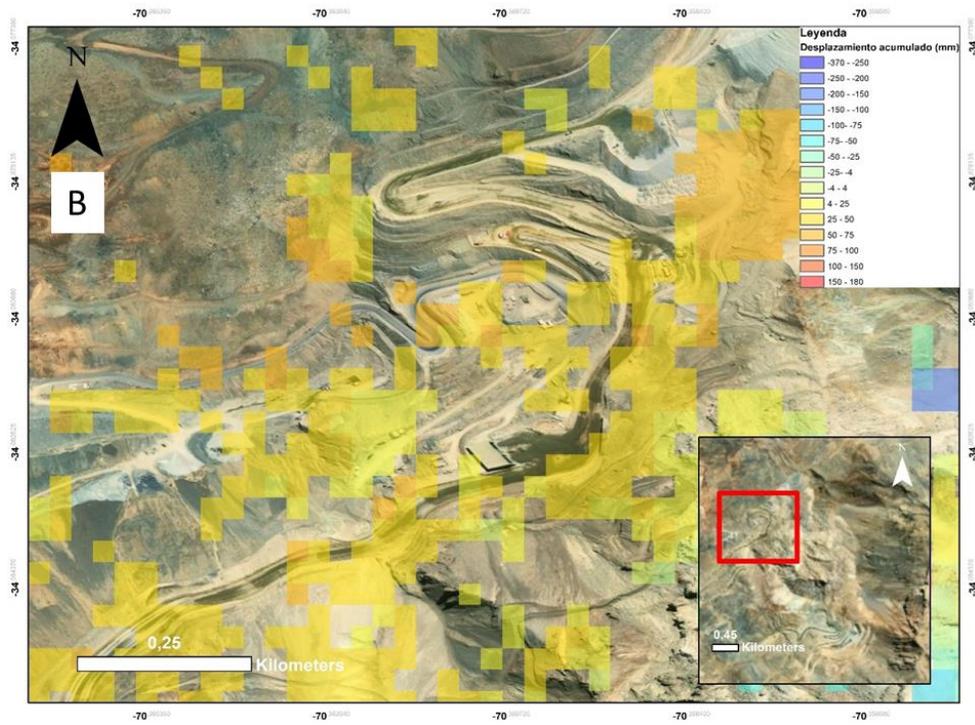


Figura 47 Se presentan dos mapas de acercamiento de deformación acumulada A) Geometría ascendente. B) Geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

Resumen de resultados de la Mina El teniente

Para el caso de estudio de la mina El Teniente se presenta la siguiente tabla que da cuenta del resumen de los máximos valores obtenidos, los cuales en ambas mediciones se encuentran relacionados con un pequeño foco en el sector norte del cráter de subsidencia, el cual evidencia de manera parcial fenómenos que ocurren en el plano subterráneo.

Tabla 4 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector de la mina El Teniente para el periodo analizado de ambas geometrías

Geometría Del Vuelo	Periodo		Desplazamiento acumulado absoluto máximo (mm)	Velocidad de desplazamiento absoluta máxima (mm/año)	Umbral de estabilidad definida (mm)
Ascendente	04/02/2018	25/04/2019	214	197	± 4
Descendente	06/11/2017	06/04/2019	370	217	

5.3. Resultados caso de estudio 3 deslizamiento Yerba Loca

Corresponde a una remoción en masa cuya ubicación es en un sector de difícil acceso dentro del Santuario Natural Yerba Loca. La fecha del evento principal del deslizamiento es estimada en el mes de agosto de 2018¹. El interés de esta investigación es mostrar la aplicación de técnicas satelitales InSAR, para la detección y monitoreo del movimiento de terreno relacionado con el deslizamiento.

Para el análisis y monitoreo de la deformación en el deslizamiento ocurrido en Yerba Loca, fueron definidos tres periodos relevantes de estudio. El primero corresponde a la fase previa al evento; la segunda fase abarca el momento previo, durante y posterior al hecho, finalmente la tercera fase comprende la etapa posterior al suceso.

Para el proceso total fueron seleccionadas 36 imágenes Sentinel-1 adquiridas, desde enero de 2018 hasta abril de 2019, generándose 80 interferogramas en total. Para el estudio de la fase previa al deslizamiento son seleccionadas 15 imágenes Sentinel-1B de geometría descendentes que engloban desde el 9 de enero de 2018 hasta el 9 de julio de 2018, generando 26 interferogramas. Para la segunda fase a partir de 28 imágenes Sentinel-1B de geometría descendente, comprendidas entre el 9 de enero de 2018 a 25 de abril de 2019, dieron origen a 39 interferogramas. Finalmente, para la tercera fase 8 imágenes Sentinel-1A de geometría ascendente adquiridas entre el 1 de mayo de 2019 y el 29 de agosto de 2019, originan 15 interferogramas.

Se realiza la salvedad de que las capturas de geometría descendente darán cuenta de la evolución desde el momento previo hasta un momento posterior del deslizamiento, para la fase anterior se utiliza una submuestra de la pila total de imágenes de geometría descendentes que den cuenta de

¹ En <https://www.latercera.com/nacional/noticia/lluvias-encienden-alarma-aluvion-yerba-locas/335243/>, consultado el 5 de febrero de 2020

los momentos previos al fenómeno, por otro lado, la geometría ascendente dará cuenta de la evolución del deslizamiento en los meses próximos luego de ocurrido el evento principal.

5.3.1 Evolución geomorfológica del deslizamiento

En esta sección es presentada la evolución de la zona de deslizamiento con algunas imágenes ópticas representativas, pertenecientes a los satélites Sentinel 2, con una combinación de bandas natural, como se observa en la figura 48, para poder comprender de manera general los eventos del deslizamiento y así poder complementar la interpretación de los resultados.

El periodo anterior al deslizamiento es representado por (A), (B) y (C) donde es posible determinar una acentuación en la grieta en la cabecera del deslizamiento además de la formación de surcos transversales (representados por flechas rojas en la figura 48) a la pendiente que interpretan como un aumento del régimen erosivo o a cambios en la pendiente, dicho fenómeno es observado en el intervalo de tiempo ocurrido entre (A) y (B), para el caso de (C) la zona del deslizamiento se encuentra cubierto de nieve impidiendo la observación de la evolución de la deformación previa al evento.

El evento principal del deslizamiento se visualiza en (D) en donde se observa que el derretimiento de nieve ya ha sucedido. En la imagen se aprecia la ocurrencia del deslizamiento rotacional con un significativo movimiento de terreno cuyo volumen de material desplazado se encuentra en un rango de 2.520.000 y 2.850.000 m³ estimado por el SERNAGEOMIN, además de aumento en el tamaño de grietas y generación de múltiples niveles de despegue en la roca, el deslizamiento configura un desplazamiento con movimiento del orden métrico.

Posterior al evento principal la representación viene dada por (E) y (F), en donde no es apreciable notar cambios que indiquen movimientos o actividad de orden mayor, como remociones parciales en el área cercana al deslizamiento a la escala de resolución de la imagen, por tanto, mediante este método no es posible establecer si continua en actividad con acumulación o pérdida de material o se encuentra estable.

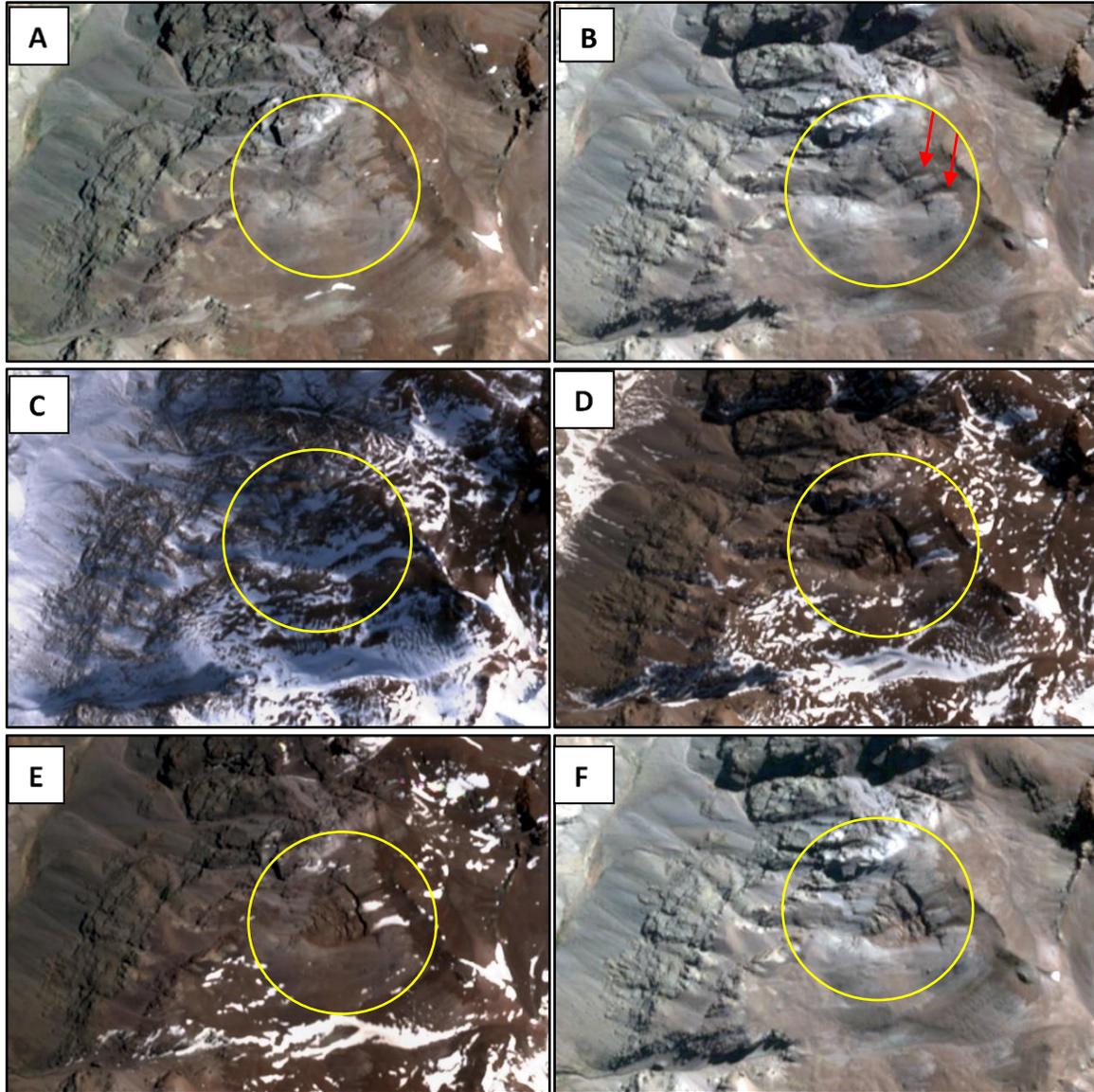


Figura 48 Evolución de la zona de estudio entre 09/01/2018 – 23/04/2019. Dentro del círculo amarillo se marca la zona del deslizamiento. A (04/01/2018) y B (09/04/2018), C (02/07/2018), D (27/08/2018) E (11/01/2019) y F (04/04/2019). Fuente: Modificado de Carrasco (2020).

5.3.2 Selección de pares interferométricos

En esta sección son presentadas las figuras que contienen las redes espacio-temporales de los interferogramas, donde se muestra una red para cada una de las fases temporales definidas, donde el eje de las ordenadas representa la línea de base espacial o *baseline* (m) y en el eje de las abscisas se observa el tiempo (años) de cada adquisición. Cada punto de la figura señala una imagen y cada línea entre los puntos establece un interferograma generado por ese par de capturas SAR. Todos los puntos que cumplan con los parámetros iniciales de borde establecidos con respecto a la cantidad de días y los metros de distancia de referencia entre ellos se conectarán con una línea, el mismo proceso se repite para cada una de las imágenes.

Para el periodo previo al evento principal, son generados 26 interferogramas a partir de 15 imágenes de geometría descendente, utilizando los parámetros de 100 metros de distancia y 25 días, representada por la figura 49.

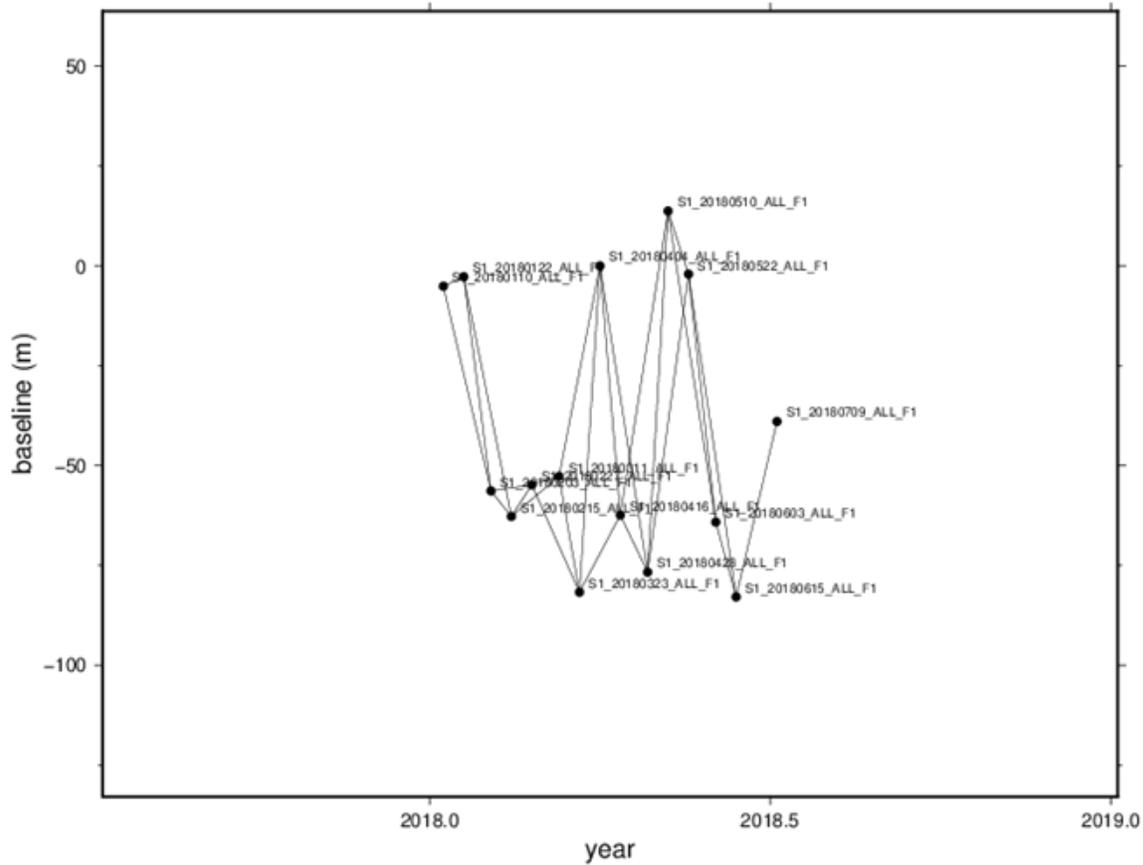


Figura 49 Red de interferogramas espacio-temporal de imágenes de la zona del deslizamiento Yerba Loca. Fase previa al deslizamiento. Fuente: Elaboración propia.

En el periodo que engloba la totalidad del evento la red interferométrica fue construida con escenas SAR de geometría descendentes, en donde 28 imágenes se procesan de la manera descrita en el diagrama (ver figura 50) dando origen a 39 interferogramas empleando GMTSAR. Se definen los parámetros iniciales de 100 metros de distancia y 25 días.

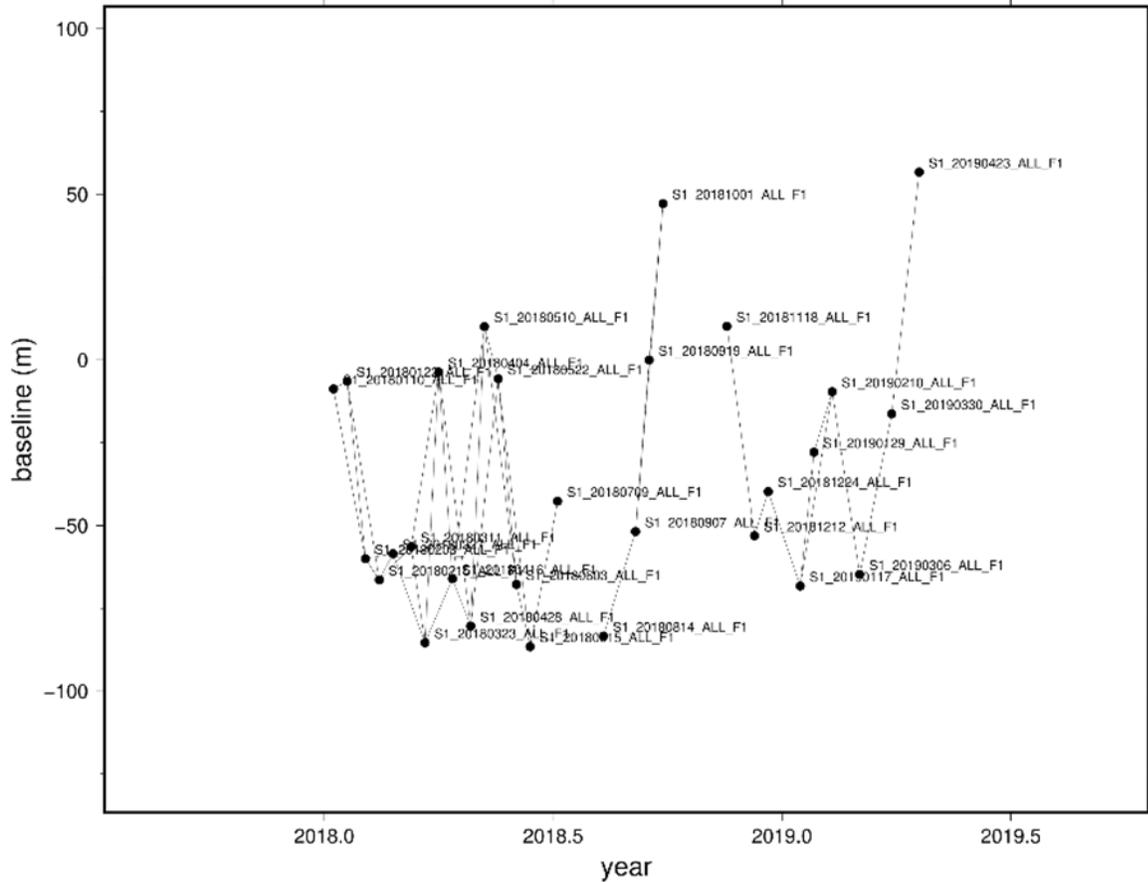


Figura 50: Red de interferogramas espacio-temporal de imágenes de la zona del deslizamiento Yerba Loca. Geometría descendente generadas en GMTSAR. Fase que comprende fase anterior y posterior al evento principal. Fuente: Elaboración propia

A partir de las 8 imágenes SAR de geometría ascendente seleccionadas para la zona del deslizamiento Yerba Loca, se presenta la fase temporal posterior al deslizamiento en la siguiente figura donde se observa una red espacio-temporal de los interferogramas. Se definen los parámetros iniciales de 100 metros de distancia de línea de base y 50 días de distancia temporal, donde el algoritmo de selección de pares define que se procesen 15 interferogramas utilizando GMTSAR.

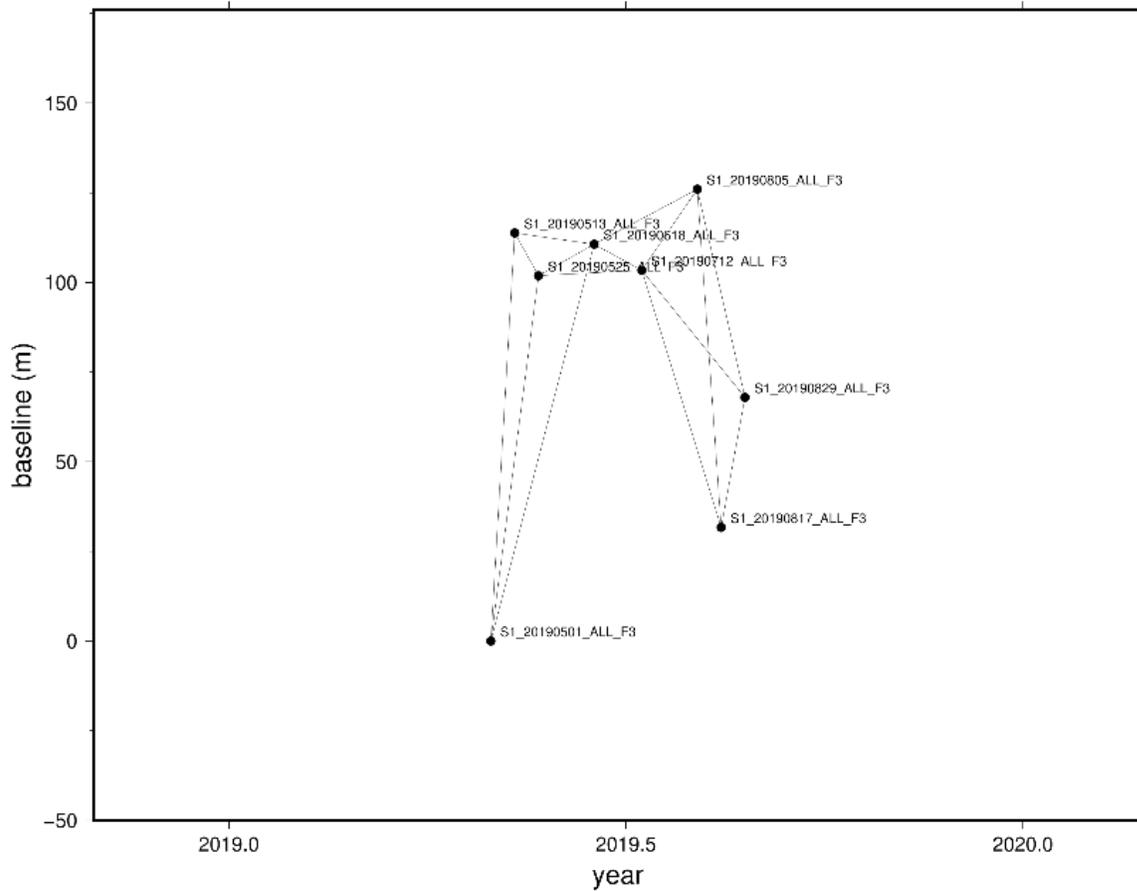
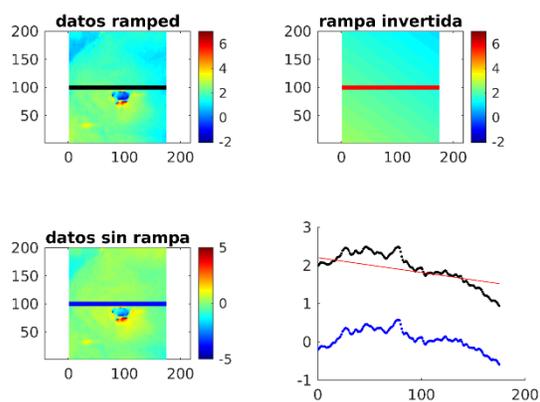


Figura 51 Red de interferogramas espacio temporal de imágenes de zona del deslizamiento Yerba Loca. Geometría ascendente generadas en GMTSAR. Fase posterior al evento principal del deslizamiento. Fuente: Elaboración propia

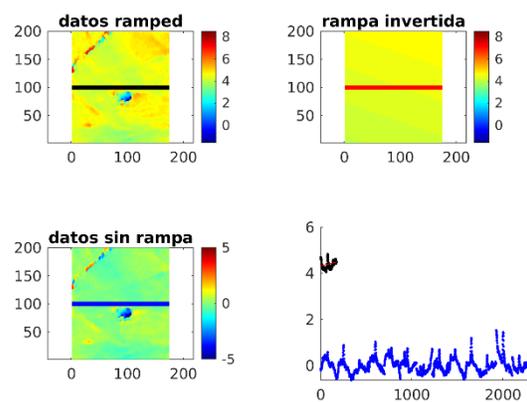
5.3.3 Eliminación del efecto rampa y fijación de umbral de coherencia

Luego de la obtención de los productos desenrollados, estos son chequeados con el fin de poder aplicar la eliminación de la rampa a cada uno de ellos. A continuación, se presentan las figuras 52 y 53 que ejemplifican la sustracción de la rampa, tanto para capturas de geometría ascendente como descendente.

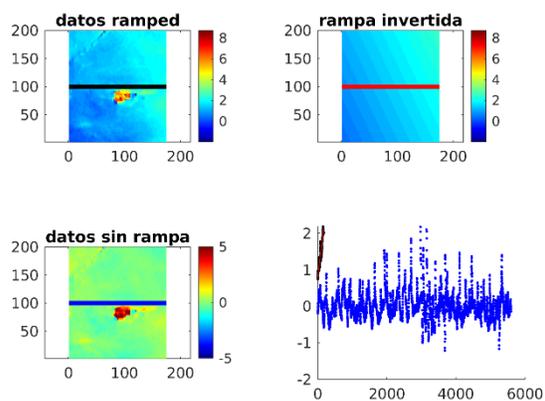
2018009 2018021



2018081 2018093



2018345 2018357



2018345 2018357

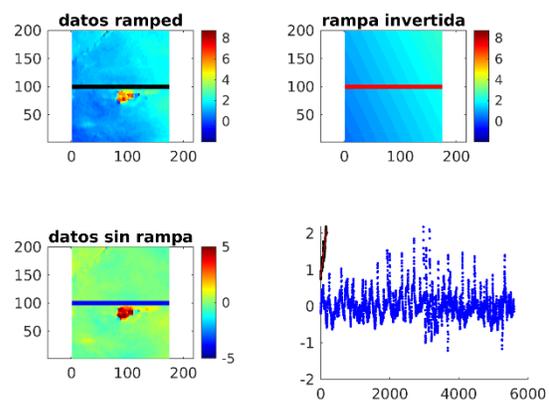
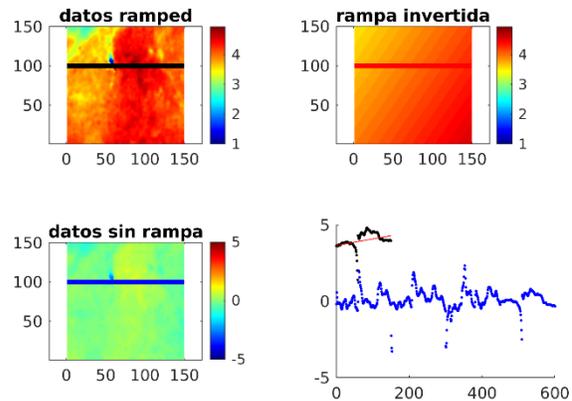
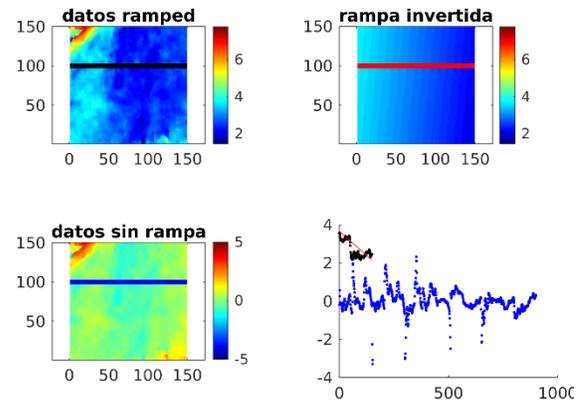


Figura 52 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto rampa en productos interferométricos desarrollados del deslizamiento Yerba Loca, con geometría descendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar. Fuente: elaboración propia.

2019132 2019144



2019144 2019168



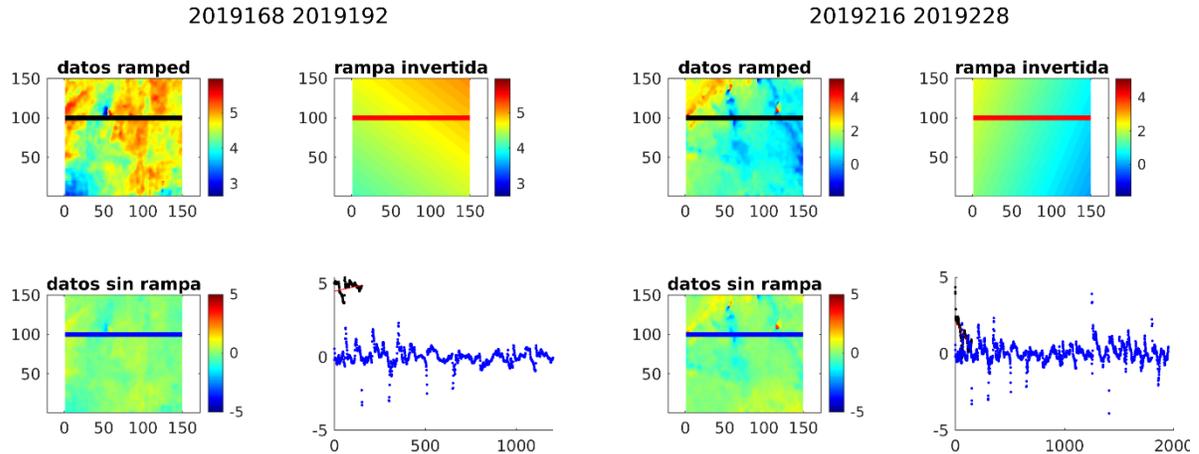


Figura 53 Se presentan cuatro ejemplos de eliminación del efecto rampa en productos interferométricos desarrollados del deslizamiento Yerba Loca, con geometría ascendente. Donde el título representa las fechas de adquisición de los pares de imágenes, la fase se mide en radianes y se encuentran en coordenadas de radar Fuente: elaboración propia

Posterior a remover el efecto rampa para ambas geometrías es fijado un umbral de coherencia de 0,12, el umbral estándar utilizado por el programa GMTSAR. Todos los píxeles por debajo de ese valor son eliminados, puesto que presentan poca fiabilidad y pueden afectar la calidad del resultado.

5.3.4 Mapas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento

En las siguientes figuras se exponen los resultados obtenidos para la zona del deslizamiento Yerba Loca, para las fases definidas del deslizamiento.

Periodo previo al evento principal (09/01/2018-09/07/2018)

Para el periodo anterior al deslizamiento los resultados obtenidos a través del monitoreo se presentan en la figura 54, donde mediante el mapa de desplazamiento acumulado en la línea de visión del satélite (LOS), se observan valores de desplazamientos homogéneos con una tendencia general en la zona de -5 a 5 mm en promedio, lo que se ubica por debajo del umbral de estabilidad fijado, considerando esas mediciones como pixeles estables, se encuentra representado en el mapa por los colores verdosos.

Mientras que en la zona norte se exhiben desplazamientos en un rango de 5 a 15 mm, representados por colores anaranjados, el rango de estos desplazamientos indicaría que son puntos activos, este cambio se asocia a que esa zona corresponde a una más escarpada, de pendiente mayor a la de la zona próxima al deslizamiento, también mediante fotointerpretación se observa material no consolidado que se emplaza en unas zonas inestables y que cuyo flujo sería captado por el satélite como cambios de fase e indicaría ese rango de desplazamientos.

Se definen dos focos máximos de deformación el primero ubicado en el área del deslizamiento el cual da cuenta de un halo deformativo que indica actividades asociados previas al evento principal del deslizamiento, no es posible observar de forma detallada el deslizamiento, pero sí existe una pequeña cantidad de pixeles que dan cuenta de la presencia de desplazamientos heterogéneos que temporalmente se correlacionan con la formación de surcos y las actividades de movimiento

observadas mediante el análisis de imágenes ópticas (ver figura 48). Los valores se presentan en un rango de -7,3 a 4 cm dentro del área del deslizamiento. El segundo foco se ubica al noreste del mapa, y presenta magnitudes de desplazamiento similares en magnitud, donde el máximo valor de desplazamiento medido es de -7,3 cm para el periodo analizado de 6 meses.

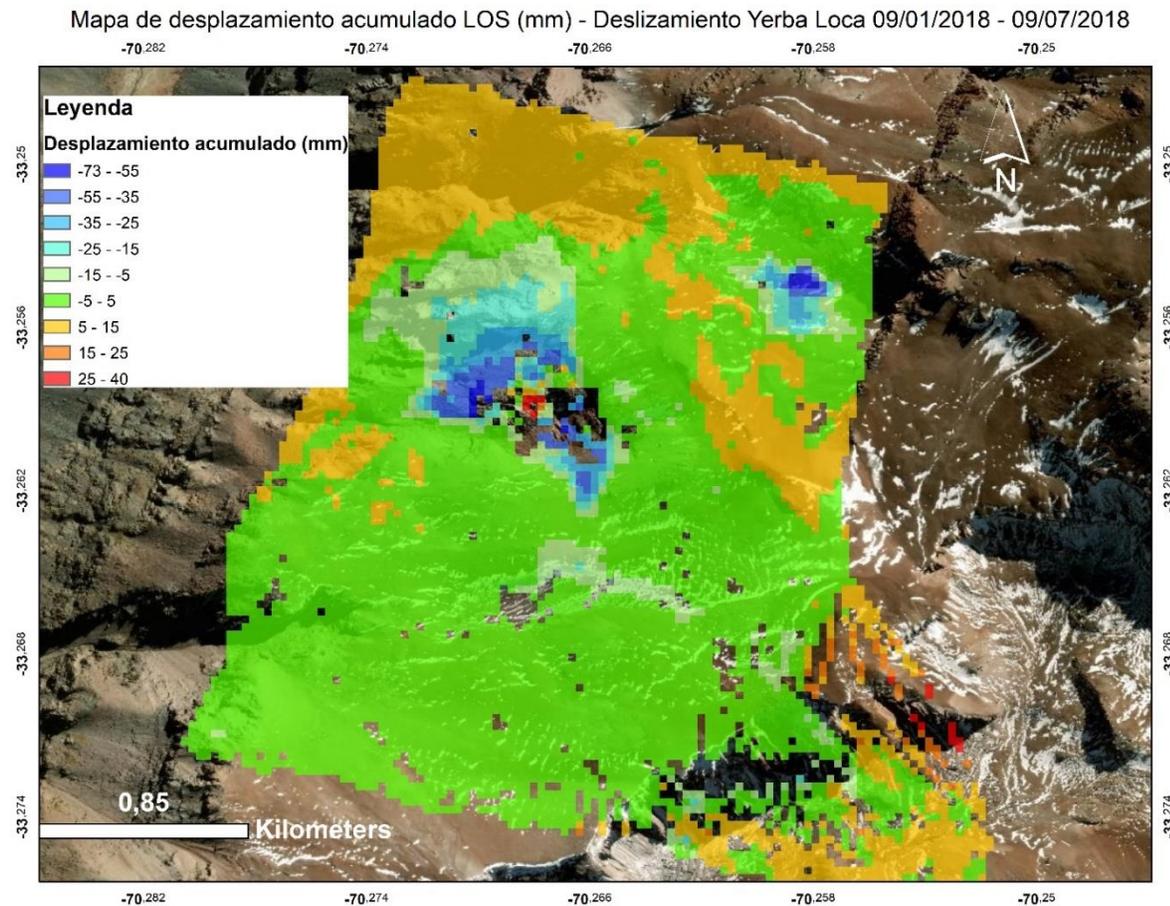


Figura 54 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

De forma similar al análisis anterior, en la figura 55 son exhibidas las velocidades estimadas (mm/a) para la zona. Se observa un comportamiento y distribución espacial similar al caso del desplazamiento acumulado, aunque a nivel general los valores de velocidad son más heterogéneos, en la mayoría de los puntos las tasas de desplazamiento están en torno a -5 a 25 mm/a, disminuyendo en proporción los puntos obtenidos bajo el umbral de estabilidad definido de -5 a 5 mm, esto viene dado porque la muestra anterior corresponde a 6 meses de observación, de modo que al ser estimada una tasa de desplazamiento anual, ocurre un aumento de la magnitud de las mediciones en muchos casos de hasta el doble. Cabe destacar que no necesariamente las deformaciones ocurrirán de manera constante en el año, por ende, se debe entender como la proyección de desplazamientos medidos hasta ese momento particular.

De esta manera la tasa de desplazamiento anual para el deslizamiento oscila entre los -16 a 6,5 cm/a, mientras que para el foco al noreste del mapa se observa una deformación de magnitud similar de -16 cm/a.

Mapa de velocidad de desplazamiento LOS (mm/a) - Deslizamiento Yerba Loca 09/01/2018 - 09/07/2018

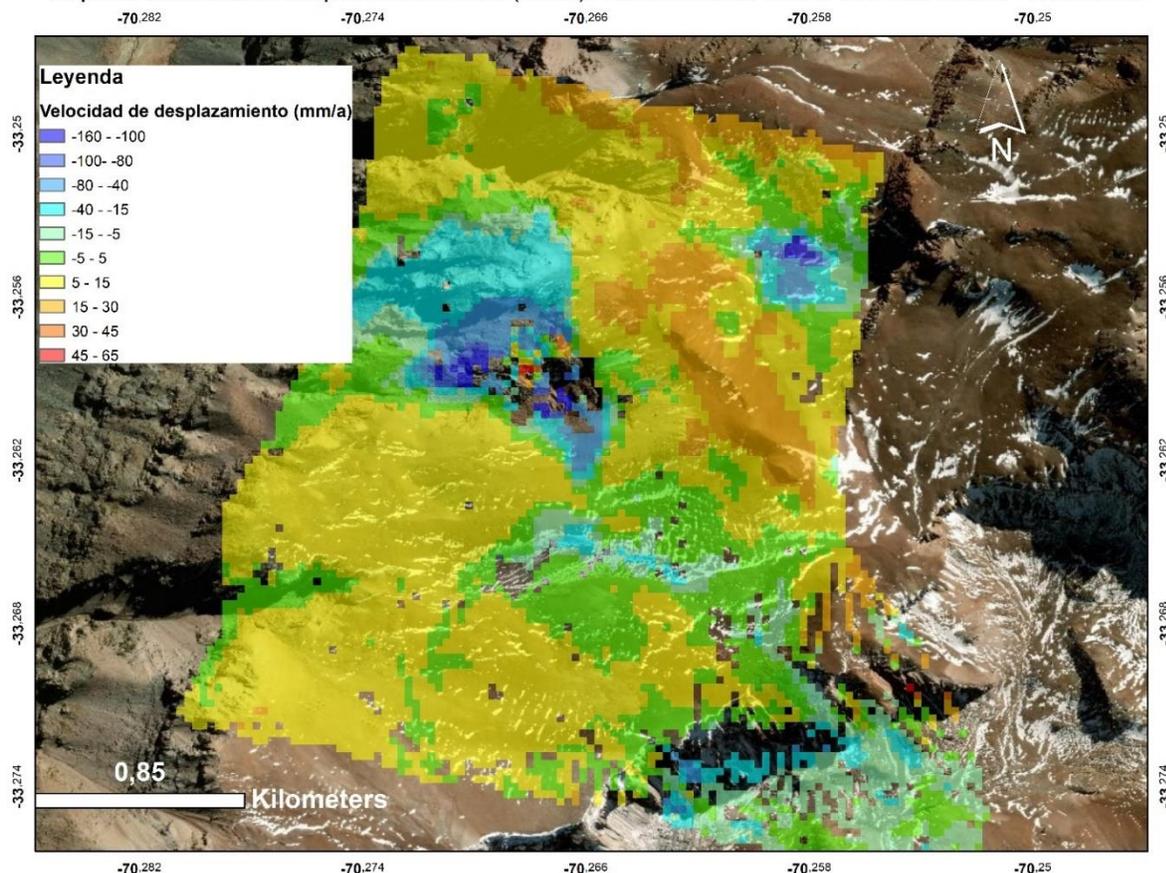


Figura 55 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

Periodo previo, durante y posterior al evento principal (09/01/2018-23/04/2019)

Este análisis contempla 15 meses de observación desde un momento previo hasta varios meses luego de ocurrido el evento. En la figura 56 se exhibe el desplazamiento acumulado en la línea de visión del satélite (LOS) para la geometría descendente. La mayoría de las mediciones presentan un rango de valores de deformación entre los -2 cm a 3 cm, en donde los puntos entre -5 y 5 mm son definidos por debajo del umbral de estabilidad y se encuentran representados por el color verde, los desplazamientos por sobre este umbral en magnitud son considerados como puntos activos, en específico para el rango de valores entre 5mm hasta 3cm en valor absoluto, los que estarían asociados a distintos factores como lo son agentes erosivos, pequeñas redes de drenaje, áreas de cierta pendiente, además de cambios producto de la presencia o derretimiento de nieve estacional, las variaciones en este orden de magnitud se consideran propias dada su disposición geológica en una zona de pendientes en torno a los 30°.

Existen dos focos de movimiento más relevante, el primero corresponde al área circundante al deslizamiento y el segundo se encuentra al noreste respecto del anterior; estos puntos presentan valores máximos de deformación de -16,5 cm. El deslizamiento en comparación del análisis previo

muestra una coherencia menor, por tanto cuenta con pocos píxeles medidos dentro del deslizamiento, sin embargo, el área circundante a ésta muestra un halo deformativo vinculado al deslizamiento que va desde los -6 cm hasta -16,5 cm de desplazamiento acumulado.

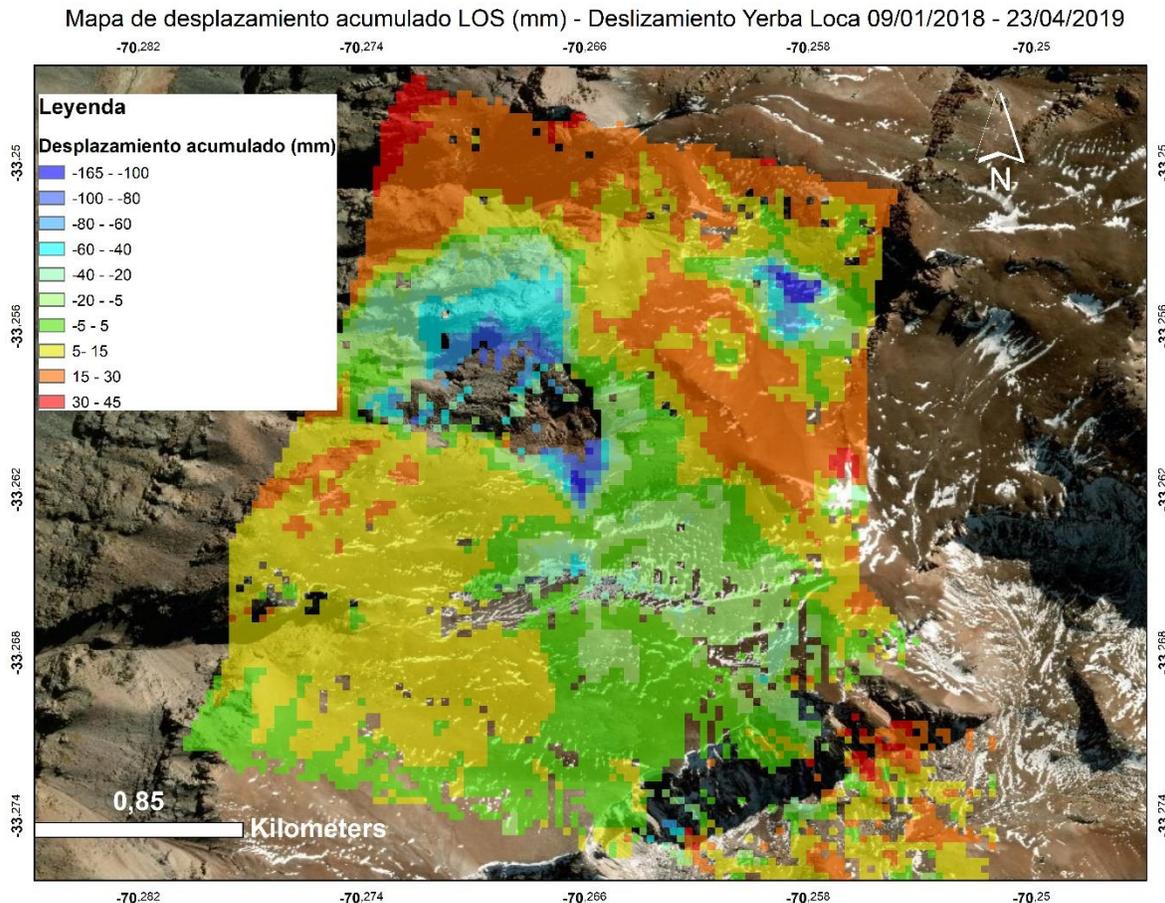


Figura 56 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo, durante y posterior al evento principal, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría descendente. Fuente: Elaboración propia.

El mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de geometría descendente (Figura 57), presenta una disposición similar al mapa anterior, existen dos focos de mayor movimiento y exhiben tasas de deformación máximas anuales mayores a -10 cm/a, las cuales se condicen con el área del deslizamiento y el sector ubicado al noreste. La mayoría de los puntos presentan un rango de valores de velocidad de deformación entre los 5 mm a 3 cm/año en valor absoluto.

Mapa de velocidad de desplazamiento LOS (mm/a) - Deslizamiento Yerba Loca 09/01/2018 - 23/04/2019

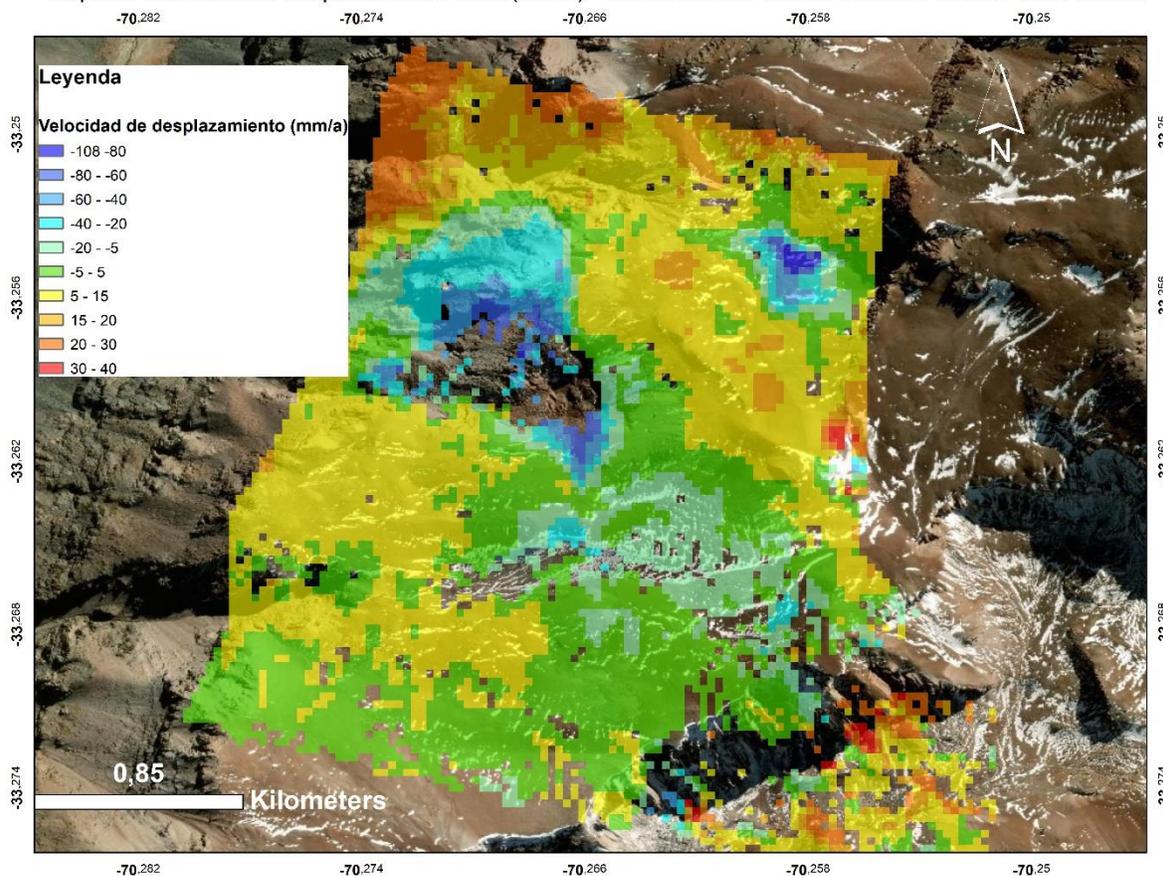


Figura 57: Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período previo, durante y posterior al evento, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes con geometría descendente. Fuente: Elaboración propia

Periodo posterior al evento principal (01/05/2019-29/08/2019)

La figura 58 da cuenta del desplazamiento acumulado en LOS para un período posterior al evento principal del deslizamiento, ocurrido en agosto de 2018, específicamente 9 meses después. La geometría para este análisis cambia a ascendente, lo cual se traduce en que la imagen presenta una disposición espacial con mayor área hacia el oeste, producto del corte realizado en la imagen, adicionalmente se observan cambios de signos en la zona del deslizamiento que también están asociados al cambio de geometría.

Es posible establecer que la mayoría de los píxeles se encuentran en el rango del umbral de estabilidad de -5 a 5 mm definido para este caso, siendo considerados como estables representados por el color verde en el mapa.

Los focos principales de movimiento se visualizan como tres, en primer lugar, debido al corte de la imagen aparece un nuevo sector al oeste del mapa, donde existe una zona de redes de drenaje, con una deformación en un rango de valores entre -1 a -2,2 cm de características homogéneas. Mediante un análisis por medio de Google Earth, es posible observar que toda la zona corresponde a una quebrada, compuesta principalmente por material no consolidado, sujeto a la erosión y relleno de material proveniente de zonas más altas topográficamente. En segundo lugar, el área del deslizamiento posee valores que están entre 1 y 2 cm, además aumenta la cantidad de datos

captados en el deslizamiento causado por un aumento de coherencia en la zona. En tercer lugar, al noreste del mapa se observa una zona concéntrica con la misma magnitud que el deslizamiento, que ha sido constante en todas las observaciones.

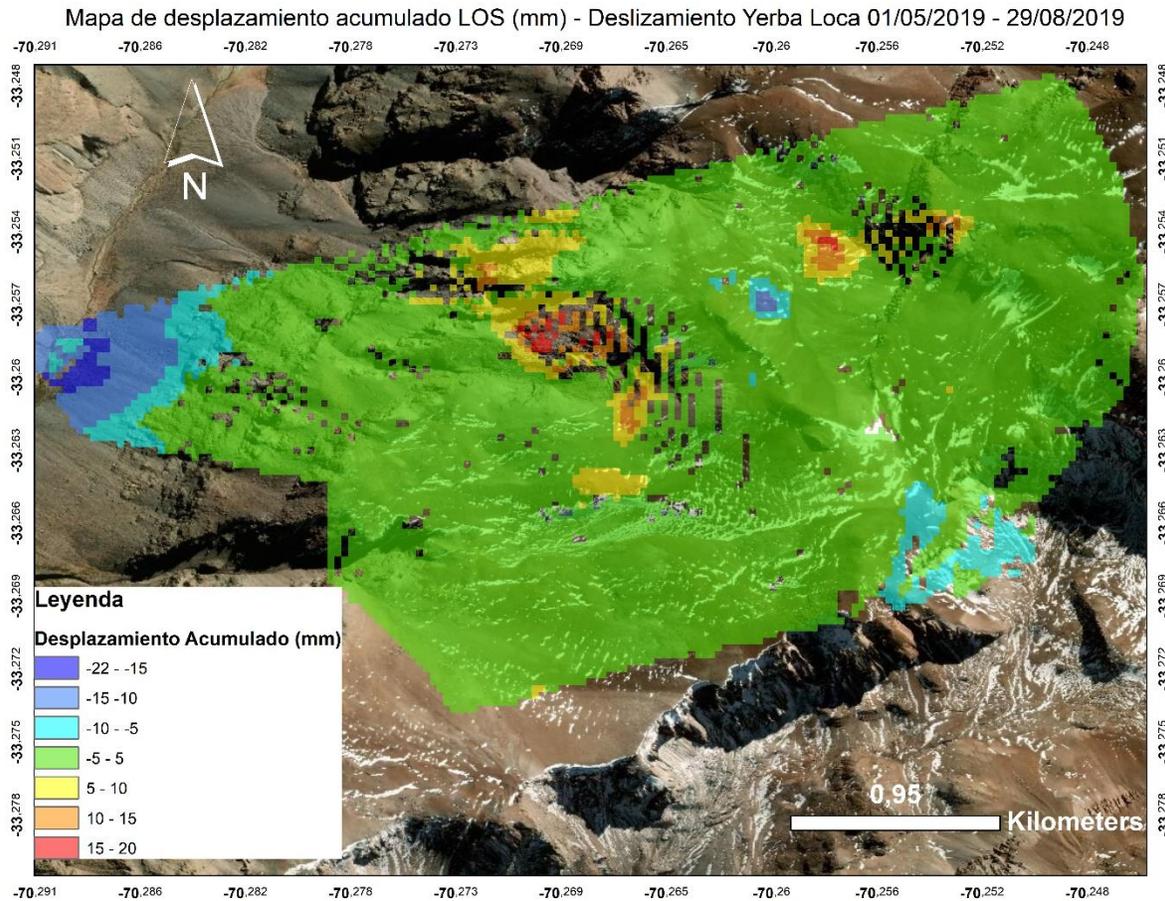


Figura 58 Mapa de desplazamiento acumulado en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia.

La figura 59 muestra un mapa de velocidad de desplazamiento en LOS de geometría ascendente, el cual exhibe patrones semejantes al mapa de desplazamiento acumulado. La zona de redes de drenaje al oeste del mapa muestra un rango de velocidades de -1 a -5,5 cm/a. Mientras el área del deslizamiento y el sector ubicado al noreste poseen velocidades entre 2 y 4 cm/a. El aumento de magnitud viene dado por la estimación de las tasas de desplazamiento anual en base a observaciones de un periodo de 4 meses

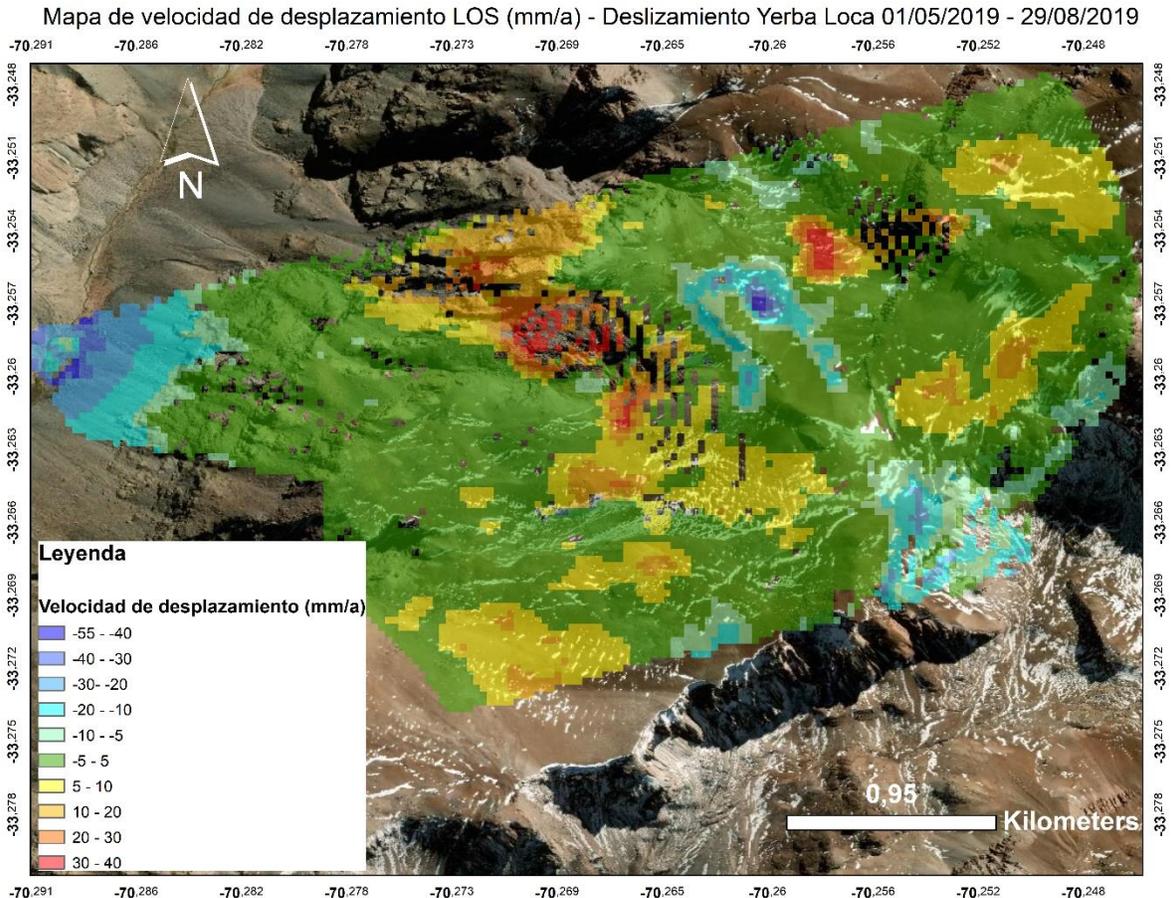


Figura 59 Mapa de velocidad de desplazamiento en LOS del deslizamiento Yerba Loca para el período analizado, generado como resultado del monitoreo de series de tiempo con la técnica SBAS a partir de imágenes de geometría ascendente. Fuente: Elaboración propia

Resumen del deslizamiento Yerba Loca

Para el análisis del deslizamiento se hará énfasis en las tasas de deformación obtenidas, ya que al ser estimaciones de carácter anual permiten establecer mejores comparaciones al contrastar magnitudes similares, la totalidad de los datos son presentados en la Tabla 5.

Cronológicamente en la fase previa al evento principal el área cercana al deslizamiento experimenta la mayor velocidad de deformación, de esto se desprende que el deslizamiento se encontraba en actividad previo al suceso, como pudo corroborarse a través del análisis de imágenes ópticas, tras el evento principal el deslizamiento presenta la menor velocidad estimada del periodo, es posible establecer que el deslizamiento se mantiene en actividad y su tasa de deformación presenta una disminución a partir de los datos.

Por otra parte, en la zona noreste del mapa existe una anomalía que comparte la magnitud de mediciones con el halo deformativo del deslizamiento consistentemente en todos los análisis, no es posible establecer mediante fotointerpretación.

En cuanto a la coherencia al momento previo y posterior existe una mayor densidad de puntos medibles dentro del área del deslizamiento, mientras que la totalidad del evento solo es apreciable el halo deformativo.

Tabla 5 Resumen de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento máximas del sector del deslizamiento Yerba Loca en los periodos analizados

Período		Desplazamiento acumulado absoluto máximo(mm)	Velocidad de desplazamiento absoluta máxima (mm/año)	Umbral de estabilidad definida (mm)
09/01/2018	09/07/2018	73	160	±5
09/01/2018	23/04/2019	165	108	
01/05/2019	29/08/2019	22	40	

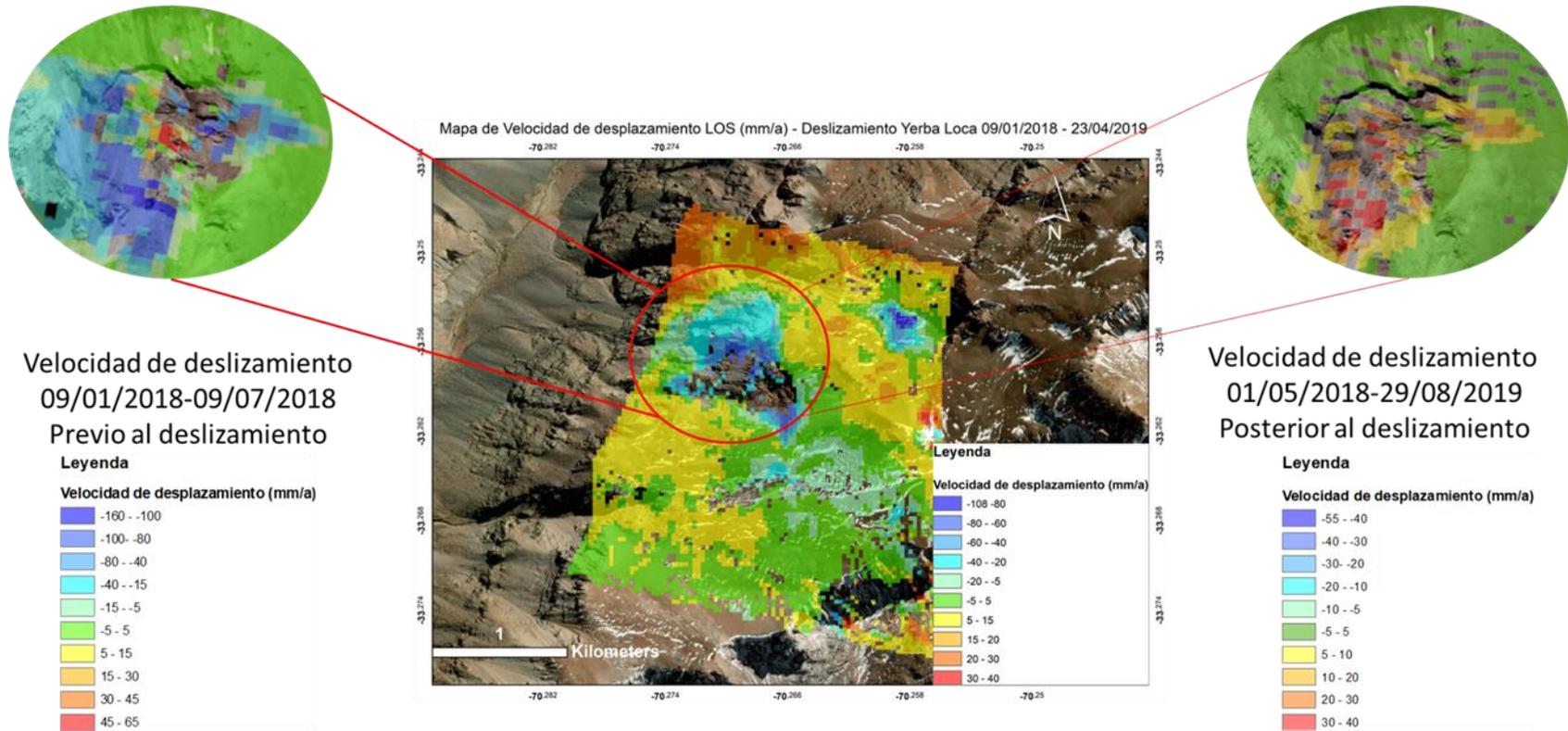


Figura 60 Comparación general de las velocidades de deformación en el área del deslizamiento, entre las 3 fases temporales determinadas. Fuente: Elaboración propia

En la figura 60, se presenta una comparativa que resume las características más relevantes del evento, como lo son la comparación entre las tasas de desplazamiento anuales y permite visualizar la cantidad de pixeles con mediciones en el deslizamiento, dando cuenta de la coherencia en la temporalidad de eventos.

6. Discusiones

En este apartado se analizarán las limitaciones y alcances del instrumento satelital, del método utilizado además se realizará la interpretación de los resultados obtenidos caso a caso, y finalmente se efectuará un breve comentario sobre las limitaciones del *software*.

6.1 Instrumento satelital

Para las técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética InSAR y derivadas de ella, como lo son las técnicas de series de tiempo, un elemento importante a destacar es el tipo de satélite utilizado, debido a que las características propias del instrumento resultan fundamentales en los resultados obtenidos, y a su vez, este podría plantear limitantes a tener en cuenta dependiendo del objetivo que se busque. En este estudio como se ha mencionado anteriormente, se utiliza la constelación de satélites Sentinel 1, compuesta por los satélites hermanos S1-A y S1-B.

Un aspecto importante de los satélites Sentinel, para efectos de este estudio es que operan en banda C, este tipo de banda electromagnética tiene la particularidad de presentar bajo rendimiento con respecto a algunos materiales, debido a su longitud de onda, como lo son principalmente la vegetación y la nieve, lo que genera que se pierda la información de esos sectores.

Otro factor relevante es mencionado por Solari et al. (2017) donde la aplicabilidad de la metodología y la obtención de resultados están influenciado por factores intrínsecos y limitaciones debido a las características de los datos de entrada. Desde un punto de vista de la teoría interferométrica, la metodología puede ser aplicada utilizando todo tipo de imágenes SAR para el análisis InSAR, independiente de la banda que posea el sensor C, X y L. Una de las mayores limitaciones en el uso de este tipo de datos es el desplazamiento máximo medible entre dos adquisiciones que es igual a $\lambda/4$, donde λ corresponde a la longitud de onda de la señal del radar, aproximadamente 1,4 cm para sensores de banda C, como es el caso de los satélites de la constelación Sentinel. De esta manera se desprende que no solo la longitud de onda debe ser considerada, sino que también una característica fundamental es el tiempo de revisita entre adquisiciones, ambos factores configuran la tasa de deformación máxima detectable. Así Crosetto et al. (2016) estima que la tasa teórica de deformación máxima detectable para los satélites Sentinel 1 es 42,6 cm/año, por lo tanto, fenómeno que presenten tasas de deformación por debajo de este umbral pueden ser detectadas con éxito.

La misión Sentinel opera bajo distintos modos de adquisición de imágenes, siendo el *Interferometric Wide Swath* o IW, el más ampliamente utilizado, este modo cubre en total 250 km de área de observación y tiene una resolución espacial por píxel de 5 metros en el rango y 20 en acimut (ficha de aspectos técnicos, ESA), esto quiere decir una resolución aproximada aplicando un proceso de *Multilooking* de 10 a 14 m/píxel nominal. En este estudio se trabajó con una resolución de 25 m/píxel, debido principalmente a la resolución moderada del DEM utilizado de 30 m cuadrados. Este podría ser un aspecto para mejorar, con un DEM externo de mejor resolución Lo que permitiría observar de mejor manera procesos relevantes a escala de detalle.

Finalmente, una característica transversal de todos los satélites SAR es que solamente pueden medir una dimensión de la deformación superficial que corresponde a la línea de visión del satélite o LOS (Vassileva et al. 2017).

6.2 Metodología

En la metodología definida para la obtención de los mapas de deformación acumulada es utilizada la técnica SBAS (Berardino et al., 2002), en donde se unen todas las posibles combinaciones interferométricas para un conjunto de imágenes SAR. Esta combinación de interferogramas se hace por medio de una función del *software* GMTSAR, que selecciona pares de imágenes respetando la distancia de línea de base y el tiempo, lo que podría dar como resultado subconjuntos de interferogramas. Para el caso de Rancagua se fijaron parámetros de 100 m de línea de base y 100 días, lo cual origina una red interferométrica robusta, mientras que para la mina El Teniente y el deslizamiento Yerba Loca, se fijó un umbral de tiempo de 20 a 50 días, esto debido a la alta decorrelación temporal existente, no siendo el óptimo para el rendimiento del algoritmo usado. Ya que al aumentar el número de combinaciones entre pares interferométricos se consigue mayor densidad de medidas de desplazamiento, lo que permitirá estimar de mejor manera un desplazamiento acumulado en el tiempo. No obstante a lo anterior, el análisis sigue siendo válido y superior a un análisis DInSAR, que solo integra un único par interferométrico.

Cada interferograma generado mediante el algoritmo representa la diferencia de fase total entre la imagen maestra y esclava, presentadas anteriormente por las ecuaciones 2.5 y 2.8. En este estudio se realizó la remoción del efecto rampa, asociado principalmente a errores orbitales, sin embargo, quedaron fuera otras correcciones que podrían mejorar aún más la precisión de los resultados, como aplicar correcciones atmosféricas, ionosféricas y troposféricas.

Un parámetro clave para la evaluación del nivel de ruido general (sensibilidad) de los mapas de deformación que indicarían estabilidad, existen distintas aproximaciones. Para efectos de este estudio se buscó homologar la metodología planteada por Barra et al. (2016) Donde la sensibilidad de las mediciones fue evaluada utilizando la desviación estándar σ de los valores de velocidad de los mapas generados. Se establece un umbral de estabilidad como 2σ para distinguir puntos activos, de aquellos donde medir los movimientos, de aquellos que no hacemos. Un punto se considera en movimientos si $[v] > 2\sigma$, donde $[v]$ es el valor absoluto de velocidad del punto. Cabe destacar que los clasificados como “estables” puede ser puntos verdaderamente estables o inestables, con un movimiento no detectable. Para simplificar la comprensión de este fenómeno, se consideran como “estables” a todos los puntos con velocidad LOS absoluta por debajo del umbral de estabilidad. Por ejemplo, Barra et al. (2016) es su investigación estableció como sitio de prueba las Islas Canarias, el umbral de estabilidad en ese caso fue establecido como $\pm 4,7$ mm/a. A partir del dato σ de Rancagua cercano a 2,6 se establecieron los umbrales de estabilidad ± 4 mm/a para el Caso 1 y 2 y ± 5 para el caso 3.

Altas tasas de desplazamiento tienen una correlación directa con las mediciones de fase InSAR que se registran en la fase envuelta con el rango de $-\pi$ a $+\pi$. En los productos desenrollados es resuelta esta ambigüedad calculando el número correcto de ciclos de fase que se deben agregarse a cada medición envuelta para que se pueda calcular la distancia en la línea de visión del satélite. Sin embargo, en áreas donde existe más de un ciclo de fase el desenrollado puede fallar. La ambigüedad de las mediciones de fase implica la imposibilidad para rastrear de forma correcta e inequívocamente una sola deformación.

Los mapas de velocidad producidos en GMTSAR, se calculan mediante la regresión lineal de las deformaciones acumuladas obtenidas, por ende, representan una estimación y sirven como referencia para comprender la tasa de velocidad en mm/a, en la que transcurren los eventos. Sin

embargo, son poco representativos en algunos casos puesto que al ser promedios pueden sobrestimar o subestimar tasas, sobre todo si los subconjuntos de imágenes utilizadas abarcan periodos cortos de tiempo inferiores a un año.

6.3 Interpretación de resultados

6.3.1 Interpretación de resultados: Caso 1

El primer caso de estudio comprendió el monitoreo de deformación de terreno a través de la aplicación de la técnica SBAS que corresponde a una de las metodologías de series de tiempo InSAR. Esta zona se identifica como un ambiente urbano, específicamente engloba a la ciudad de Rancagua y un área circundante que en su mayoría es de uso agrícola.

En consonancia con lo anterior y como se observa en la sección de resultados en el mapa de velocidad de deformación (volver a figura 35), se evidencian pocos píxeles con valores en esta zona de cultivos, ya que al aplicar la técnica InSAR con banda electromagnética C, utilizada por la constelación de satélites Sentinel 1, se comprueba su bajo rendimiento para este tipo de material como lo son las áreas de alta vegetación. Esta característica viene dada debido por la baja penetración de la onda con el material que impide que ocurra retrodispersión suficiente y que retorne la señal al instrumento.

En contraste a lo anterior, dentro de los límites de la ciudad se aprecia alta coherencia incluso entre interferogramas con alta distancia temporal, por esto, es posible fijar altos parámetros de borde para la fijación de la función de selección de pares, en este caso 100 días y 100 metros de distancia de línea de base, definiéndose la cantidad de 244 interferogramas a partir de 37 imágenes SAR, lo cual aumenta el rendimiento del algoritmo SBAS. De esta manera los resultados obtenidos en la zona son robustos y comprenden una alta confiabilidad metodológica.

De lo expuesto en el capítulo 3, a partir de la configuración geológica y geomorfológica de la zona, se desprende que no existen disposiciones previas que induzcan deformaciones a tasas relevantes. De esta manera los resultados obtenidos se correlacionan con las condiciones esperables, en donde las tasas de desplazamiento obtenidas para casi la totalidad de la ciudad se encuentran en un rango de valores de -4 a 4 mm/a en el tiempo estudiado, que por los parámetros utilizados y la sensibilidad del instrumento se consideran como mediciones dentro del umbral de estabilidad y por ende son consideradas como estables.

Por otro lado, los focos de movimiento detectados presentan una alta correspondencia a sectores con condiciones previas que podrían dar cuenta de las causas de los movimientos detectados. Los puntos con mayores tasas presentan una alta correspondencia, en primer lugar, para el rango de valores de hasta 8mm/a con el Cauce del río Cachapoal, sectores industriales y estacionamientos, en segundo lugar, para el rango de valores entre 8mm/a y 12mm/a, se correlacionan con sectores del río, parques y áreas verdes mayoritariamente.

6.3.2 Interpretación de resultados: Caso 2

El segundo caso de estudio comprendió el monitoreo de deformación de terreno a través de la aplicación de la técnica SBAS que corresponde a una de las metodologías de series de tiempo InSAR. Ésta consistió en aplicar la misma metodología de trabajo para el monitoreo de deformación en la zona de la mina El teniente, la cual corresponde a una explotación minera emplazada en la Cordillera de los Andes, por ende posee varias dificultades topográficas propias de áreas montañosas, así como por la propia actividad minera tanto en la explotación subterránea como para la minería a cielo abierto.

De acuerdo con las características mencionadas anteriormente, se observa una alta decorrelación temporal en la zona de estudio, es decir, la coherencia decrece producto de la distancia en el tiempo entre los interferogramas generados. Principalmente para este caso son la presencia de nieve en los meses de invierno, altas tasas de deformación (saltos de fase) y cambios en las condiciones de terreno por la explotación de la mina. De esta manera los interferogramas generados no superaron 24 días entre adquisiciones.

Realizando una comparativa entre los resultados obtenidos para las geometrías analizadas, se observa que la densidad de puntos es mayor en la geometría ascendente que en la geometría descendente, para una dimensión temporal semejante de las mediciones correlacionables con condiciones similares de borde. La explicación de este fenómeno radica en distorsiones geométricas (explicadas en el marco teórico), al ser mediciones en la línea de visión del satélite o LOS, las observaciones son relativas, y para una zona con una topografía compleja, como lo es este caso, se desprende la dificultad que tiene el recorrido del satélite en geometría descendente para medir esta zona. Sin perjuicio de lo anterior, ambas mediciones dan cuenta de tendencias de desplazamientos similares.

Al observar la zona del cráter de hundimiento y el escarpe de este, se aprecia poca o nula presencia de píxeles con mediciones en el sector, esto se debe principalmente a que la zona del cráter se encuentra en movimiento activo. Esto se desprende a través de las figuras 61 y 62 siguientes donde existe una componente de fase importante en la mayoría de los productos desenrollados, tanto para la geometría ascendente como para la descendente, lo que indica para este caso que la velocidad de desplazamiento es mayor a la tasa que es posible medir mediante la técnica InSAR, o que existen señales con múltiples valores de fase, esto ocasiona que puntos del área no superen el umbral de coherencia, quedando descartados.

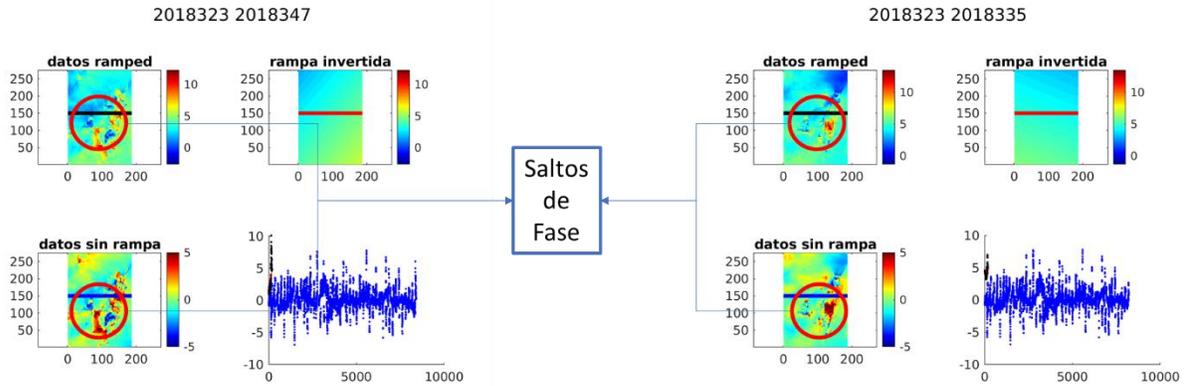


Figura 61 Ejemplos de productos desarrollados del caso de estudio 2 de geometría ascendente que dan cuenta de los saltos de fase para el cráter de la mina. Fuente: Elaboración propia.

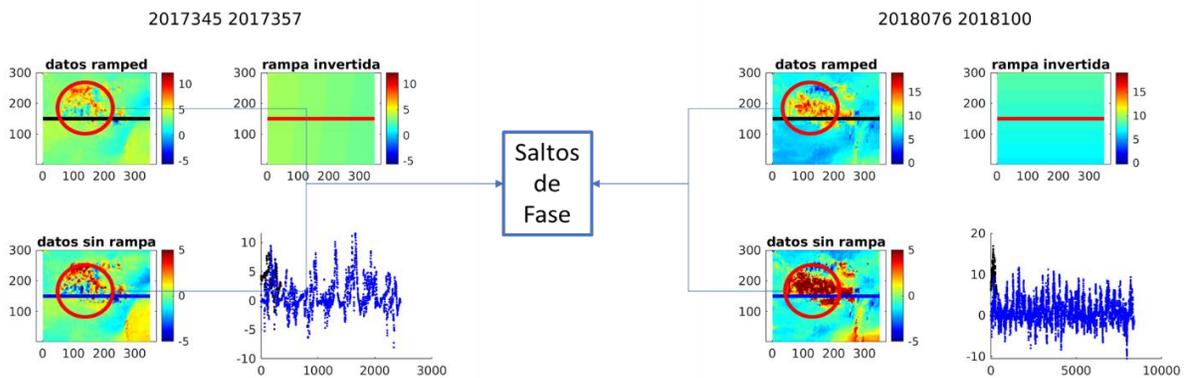


Figura 62 Ejemplos de productos desarrollados del caso de estudio 2 de geometría descendente que dan cuenta de los saltos de fase para el cráter de la mina. Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de resultados obtenidos para la zona de mina El Teniente, es posible categorizar los focos de movimientos en dos dominios, el primero fuera de los límites del cráter de hundimiento y el segundo dentro de los límites. Se observa así un desplazamiento acumulado en la línea de visión de satélite fuera del límite del cráter con valores entre -2,5 a 2,5 cm y dentro del límite del cráter, valores que varían desde -21,4 a 15 cm para más de 15 meses de observación. Mientras que para la geometría descendente los valores obtenidos fuera de los límites del cráter varían entre -7,5 a 7,5 cm, y dentro de los límites del cráter se observan rangos que van desde -37 a 18 cm en, aproximadamente 18 meses de estudio.

Con respecto a la magnitud de los valores obtenidos, son pocas las comparativas posibles con respecto a la literatura. Sin Embargo, C. Sánchez et al. (2016), En la Mina Andina, en la región de Valparaíso. presentan resultados del monitoreo al movimiento del suelo obtenido la técnica (PSI) Fueron empleados 25 imágenes, durante el periodo de noviembre 2014 a mayo 2015 correspondientes a los satélites gemelos TerraSAR-X y TanDEM-X de geometría ascendente. Los resultados obtenidos consisten puntos medidos de movimiento de diferentes magnitudes desde pocos milímetros, a partir de 4mm, hasta decenas de centímetros en el periodo del estudio, en las zonas de botaderos y el fondo del cráter de subsidencia con movimientos acumulados máximos 400 mm. En este estudio de 6 meses se obtienen magnitudes de valores comparables a los

obtenidos por esta investigación, sin embargo, al utilizar otra técnica y ser una medición más corta temporalmente no es posible realizar una interpolación directa.

F. Sánchez et al. (2016), plantean en su investigación un análisis de la dinámica de las pendientes del cráter de hundimiento, deslizamientos, rajo abierto y otras áreas de deformación superficial de la mina El Teniente. Los resultados presentados fueron obtenidos mediante el procesamiento de imágenes SAR del satélite Cosmo-SkyMed, mediante técnicas avanzadas PSI. Los autores definen dos patrones predominantes, el primero corresponde a movimientos de magnitudes milimétricas a centimétricas, ubicadas fuera del límite del cráter de subsidencia con magnitudes de desplazamiento acumulados cercanos a los 4 cm, en los tres meses de estudio.

Comparativamente con el estudio de F. Sánchez et al. (2016), es posible establecer similitudes en los sectores de mayor actividad que se correlacionan bien con los obtenidos en este estudio, y se observa una tendencia semejante en donde a medida que los puntos se alejan del borde del cráter de subsidencia, también se reducen sus valores de desplazamiento. Sin embargo, las magnitudes obtenidas no son comparables, puesto que la duración del estudio es significativamente menor.

6.3.3 Interpretación de resultados Caso 3

El tercer caso de estudio comprendió el monitoreo de deformación de terreno a través de la aplicación de la técnica SBAS que pertenece a una de las metodologías de series de tiempo InSAR. Esta zona comprende al área del deslizamiento ocurrido en Yerba Loca en agosto de 2018.

Sobre la completitud de la base de datos seleccionada para el caso del deslizamiento se debe señalar que la zona de estudio se encuentra ubicada entre 2 *frames* para el camino o *path* del satélite, esto produce poca continuidad en la captura de imágenes, y trunca la medición de deformaciones entre las dos geometrías. Siendo la geometría descendente la que posee mayor número de productos SAR, y temporalmente comprende el periodo anterior y posterior al evento principal ocurrido en 2018. Mientras que, para la geometría ascendente temporalmente solo comprende el monitoreo posterior al deslizamiento.

Dado que el análisis solamente se encuentra acotado a un periodo temporal en torno al evento, no es posible establecer características previas como patrones de activaciones estacionales, tasas de desplazamiento promedio, para comprender de mejor manera anomalías en el área

Otro factor es que con el objetivo de facilitar el procesamiento la imagen, ésta fue cortada, de tal manera que solo fuese observable el deslizamiento y un área próxima. De esta manera no se cuenta con mediciones locales, que permitan establecer un contexto del comportamiento del sector.

Existe una alta decorrelación temporal en la zona de estudio, es decir la coherencia decrece producto de la distancia en el tiempo entre los interferogramas generados. Esto se puede producir por distintos factores entre ellos presencia de nieve, altas tasas de deformación y cambios en las condiciones de suelo, como humedad. De esta manera los interferogramas generados no superaron 24 días entre adquisiciones.

Los resultados obtenidos para el deslizamiento en geometría descendente son divididos en 2 análisis el primero da cuenta del periodo previo al evento principal del deslizamiento y el segundo engloba tanto la fase previa como varios meses luego del evento principal. En la cronología del

evento existe poca densidad de puntos medibles en el deslizamiento propiamente tal, en el análisis de fase previa presenta mayor concentración de puntos medibles, sin embargo, para el segundo análisis solo es visible el halo alrededor del deslizamiento.

Esto se debe principalmente a que el deslizamiento se encuentra activo en este periodo, dato que viene dado de la progresión de productos desarrollados en la sección de anexos, en la figura 63 es apreciable una componente de fase importante en la mayoría de los productos desarrollados, que aumenta o disminuye de acuerdo a su cercanía temporal con el evento principal. Esta observación indica que para este caso que la velocidad de desplazamiento es mayor a la tasa que es posible medir mediante la técnica InSAR. Sin embargo, el área aledaña al deslizamiento presenta un halo de desplazamiento con las mayores tasas de deformación de hasta 10,8 cm/a para el tiempo de observación que engloba la totalidad del evento, dicho halo estaría asociado a inestabilidades generadas por el deslizamiento activo.

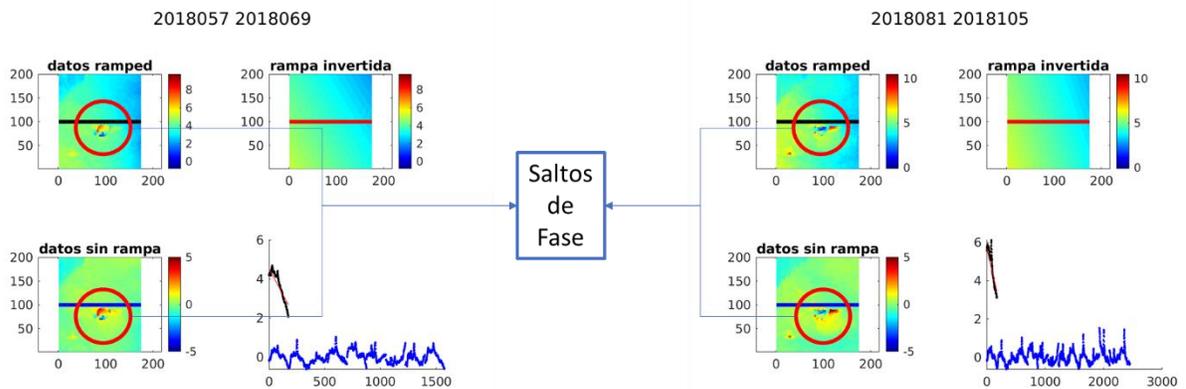


Figura 63 Ejemplos de productos desarrollados del caso de estudio 3 de geometría descendente que dan cuenta de los saltos de fase para el deslizamiento estudiado. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados obtenidos para la geometría ascendente, que comprende el monitoreo para un periodo posterior al evento principal del deslizamiento, es posible notar un aumento de densidad de puntos medidos en el deslizamiento. Estos las tasas de desplazamiento se encuentran en torno a los 4 cm/a de desplazamiento acumulado en el periodo, donde el cambio de signo respecto al análisis anterior se debe al uso de otra geometría. En la figura 64 es posible notar que, a diferencia de la geometría descendente, ya no existen saltos de fase.

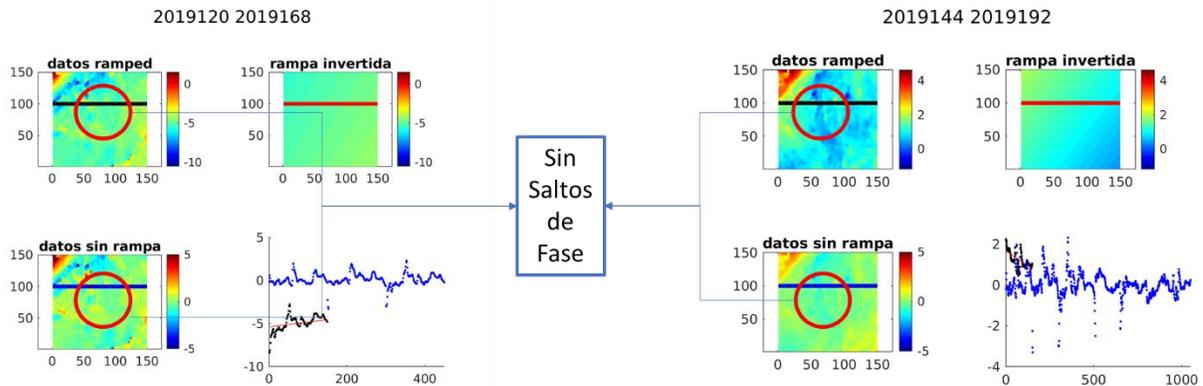


Figura 64. Ejemplos de productos desenrollados del caso de estudio 3 de geometría ascendente, que dan cuenta de los saltos de fase, para el deslizamiento estudiado. Fuente: Elaboración propia.

Se visualiza adicionalmente un punto de inestabilidad ubicado al noreste del deslizamiento, que se desplaza a tasas semejantes a las observadas en el deslizamiento, las que son consistentes para todos los análisis, se desconoce la naturaleza del fenómeno se plantea como hipótesis como una zona de acumulación posiblemente inestable, aunque hace falta realizar una comprobación en terreno.

6.4 GMTSAR

La utilización del *Software* de código abierto GMTSAR, para el procesamiento InSAR, solo presenta una problemática relevante para el estudio. Esta limitante está relacionada con la preparación de archivos, en donde no es posible crear una pila de imágenes que combine tanto imágenes pertenecientes al satélite 1A y 1B, por lo que deben ser procesadas por separado. Lo que causa una disminución en la base temporal, puesto que el período de revisita de cada uno de los satélites Sentinel es de 12 días, y al utilizar la combinación de ambos satélites podría acortarse la base temporal a 6 días, reduciendo así decorrelaciones temporales.

7. Conclusiones

En este estudio fue aplicado con éxito una de las técnicas derivadas de la interferometría de radar de apertura sintética InSAR, específicamente *Small Baseline Subset* (SBAS), para el monitoreo y análisis de series de tiempo en tres casos relevantes de Chile central. El primer caso corresponde a un ambiente urbano, el segundo a una operación minera en un ambiente montañoso y el tercero a un deslizamiento.

Este análisis fue realizado a partir de imágenes SAR, capturadas por la constelación de satélites Sentinel 1A y 1B, de libre acceso. El procesamiento interferométrico se realizó mediante el *software* de código abierto GMTSAR, luego de la formación de la pila de interferogramas, fue retirado el efecto rampa mediante un código de formulación propia en Matlab, finalmente utilizando una vez más GMTSAR se obtuvieron mapas de desplazamiento acumulado y de velocidad de desplazamiento en la línea de visión del satélite de cada lugar de interés planteado.

En el caso de la ciudad de Rancagua se obtuvieron tasas de desplazamientos promedio de -4 a 4 mm/a, lo que se interpreta, como una zona estable. A pesar de ello, en lugares específicos fueron captados focos de movimientos de hasta 12mm/a, estas tasas de movimiento se encuentran relacionadas en primer lugar para el rango de valores de hasta 8mm/a con el Cauce del río Cachapoal, sectores industriales y estacionamientos, en segundo lugar, para el rango de valores entre 8mm/a y 12mm/a, se correlacionan con sectores del río, parques y áreas verdes. Para el área exterior a la ciudad, que corresponde a un sector agrícola no fue posible obtener mediciones, lo que plantea un mal desempeño de la técnica en áreas densamente vegetadas.

En el caso de la mina El Teniente, al aplicarse similar procedimiento, se determinó 2 dominios de deformación. El primero corresponde al límite exterior del cráter de hundimiento que presenta valores de deformación acumulada entre los rangos de -2,5 a 2,5 cm, en 15 meses de observación para la geometría ascendente. Mientras que para la geometría descendente se aprecian rangos entre -7,5 a 7,5 cm, en 18 meses de mediciones. Para el área interior del límite del cráter de hundimiento se observan los mayores valores de deformación, que en el caso de la geometría ascendente se observaron valores entre -21,4 a 15 cm en 15 meses de observación. Para el caso de geometría descendente se presentan valores de -37 a 18 cm en 18 meses de observación.

En el caso del deslizamiento Yerba Loca, se establecieron tres periodos de análisis el primero previo al deslizamiento, el segundo desde el momento previo hasta uno posterior y el tercero varios meses luego del evento principal. no fue posible observar las deformaciones del deslizamiento, pero sí se pudo cuantificar un halo de deformación asociado al deslizamiento, con tasas de desplazamiento máximas iniciales de 16 cm/a, una tasa general para la totalidad del periodo de 10,8 cm/a y posterior al evento de 4 cm/a. De esta manera se establece que el deslizamiento se encontraba activo previo al evento y que se mantiene con cierta actividad asociada 9 meses después del evento principal.

En el sector noreste del deslizamiento fue identificada una anomalía que comparte la magnitud de mediciones con el halo deformativo del deslizamiento, no fue posible establecer su naturaleza mediante fotointerpretación, ya que no es posible relacionar la magnitud de su desplazamiento con su disposición espacial en el mapa generándose una dificultad respecto a las condiciones que explican el suceso, siendo imposible determinar si se está rellenando o si es una zona inestable que podría deslizar, se recomienda observarlo en terreno a fin de esclarecer esta dificultad.

8. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda acompañar este tipo de estudios con observaciones en terreno, para poder validar de manera efectiva los resultados obtenidos. De igual manera integrar variadas fuentes de información geológica como mapeos litológicos, fotointerpretación, y topografía de las zonas de estudio, permite mejorar considerablemente las interpretaciones y evitar errores.

Por otra parte, la integración de GPS permite comparar los resultados con mediciones InSAR y cuantificar errores.

Se recomienda trabajar con ambos satélites Sentinel-1 en combinación para reducir las decorrelaciones temporales y espaciales, lo que resulta clave para la metodología.

En el caso puntual de la Mina El Teniente se recomienda, para comprender de mejor manera la influencia de la explotación a nivel subterránea en superficie, aplicar la metodología para un periodo menor temporalmente que coincida con los meses de verano y así reducir las decorrelaciones temporales, así mismo contrastar los resultados con la planificación de la operación subterránea y de esta manera poder establecer interpretaciones más certeras sobre los fenómenos involucrados.

9. Bibliografía

- Araneda, M., Avendaño, M., & Merlo, C. (2000). Modelo gravimétrico de la Cuenca de Santiago, etapa III final. In Congreso Geológico Chileno (No. 9, pp. 404-408).
- Barra, A., Monserrat, O., Mazzanti, P., Esposito, C., Crosetto, M., & Scarascia Mugnozza, G. (2016). First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection. *Geomatics, Natural Hazards And Risk*, 7(6), 1874-1883. doi: 10.1080/19475705.2016.1171258
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for Surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 40 (11), 2375–2383.
- Bürgmann, R., Rosen, P., & Fielding, E. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review Of Earth And Planetary Sciences*, 28(1), 169-209. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.169
- Campbell, James. (2011). *Introduction to Remote Sensing.*: Guilford.
- Carrasco, J. (2020). Aplicación de técnica INSAR sobre deslizamiento en Yerba Loca ocurrido en agosto 2018. Santiago.
- Charrier, R., Linares, E., Niemeyer, H., & Skarmeta, J. (1979). K-Ar ages of basalt flows of the Meseta Buenos Aires in southern Chile and their relation to the southeast Pacific triple junction. *Geology*, 7(9), 436-439.
- Charrier, R., & Muñoz, N. (1994). Jurassic Cretaceous Palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23–24 S latitude and 34–35 S latitude: A comparative analysis. In *Tectonics of the southern Central Andes* (pp. 233-242). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The geology of Chile* (pp. 21-114).
- Chen, C., Zebker, H. (2000). Network approaches to two-dimensional phaseunwrapping: intractability and two new algorithms. *J. Opt. Soc. Am. A* 17 (3),401–414.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 41 (7), 1685–1701.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, 115, 78-89. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
- Delgado, F. (2020). Interferometría de radar de apertura sintética: teoría y aplicaciones en volcanología, tectónica activa, y deformación antropogénica. Charla, Sala John von Neumann, CMM. Santiago, Chile.

- Davidson, J., & Vicente, J. C. (1973). Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35° 15' latitud sur). In Congreso Geológico Argentino (No. 5, pp. 11-55).
- Eghbali, M. (2019). Ground Deformation Monitoring in Mining Areas on the Central Andean Plateau (Puna, Argentina) Using Sentinel-1 Data (Magíster en Ciencias). Technical University of Berlin.
- ESA. (2019). User Guides - Sentinel-1 SAR - Acquisition Modes - Sentinel Online. Consultado el 12 agosto 2019, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>
- Falorni, G., Del Conte, S., Bellotti, F., & Colombo, D. (2018). InSAR monitoring of subsidence induced by underground mining operations. Proceedings Of The Fourth International Symposium On Block And Sublevel Caving. doi: 10.36487/acg_rep/1815_54_falorni
- Farias Thiers, M. (2007). Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis de Doctorado. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 236 p.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 39 (1), 8–20.
- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33 y los 34 S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Freumueller, J. (2015). Revisado el 25 junio 2019, en http://www.grapenthin.org/teaching/geop572_2015/lectures/lecture11_InSAR_Intro_SAR.pdf
- Godoy, E., Schilling, M., Solari, M., Fock, A. (2009). Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 118: 50 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: twodimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23 (4), 713–720.
- Goldstein, R., & Werner, C. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038. doi: 10.1029/1998gl900033
- Gómez, R. & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del “block caving”. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (1), pp.181-198.
- Grandin, R., Vallée, M., Satriano, C., Lacassin, R., Klinger, Y., Simoes, M., & Bollinger, L. (2015). Rupture process of the Mw=7.9 2015 Gorkha earthquake (Nepal): Insights into Himalayan megathrust segmentation. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8373-8382. doi: 10.1002/2015gl066044
- Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.

- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
- IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. doi: 10.1109/ieeestd.2003.94224
- InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar - TRE ALTAMIRA. (2020). Revisado el 26 enero 2020, recuperado de <https://site.tre-altamira.com/insar/>
- Jensen, John. (2009). *Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall.
- Klohn Giehm, C. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín 8, pp.1-95.
- Kvapil, R., Ceccarelli, B & Lonergan, J. (1989), Quantitative analysis of subsidence at El Teniente mine, Technical report, El Teniente division, CODELCO-Chile.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A. (2007). An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for Surface deformation analysis. *Pure Appl. Geophys.* 164 (4), 637–661.
- Leslie, R. (2018). 1.16 - Microwave Sensors. Elsevier, (Volume 1), Pages 435-474.
- Meisina, C., Zucca, F., Notti, D., Colombo, A., Cucchi, A., & Savio, G. et al. (2008). Geological Interpretation of PSInSAR Data at Regional Scale. *Sensors*, 8(11), 7469-7492. doi: 10.3390/s8117469
- Meta, A., Mittermayer, J., Prats, P., Scheiber, R. and Steinbrecher, U., 2010. TOPS Imaging With TerraSAR-X: Mode Design and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (2), pp.759-769.
- Meyer, J. (2019). GEOS 657 – Microwave Remote Sensing [Curso de primavera] University of Alaska Fairbanks, Alaska. Estados Unidos.
- Mittermayer, J., Prats, P., D’Aria, D., Piantanida, R., Sauer, S., & Monti Guarnieri, A. et al. (2010). TOPS Sentinel-1 and TerraSAR-X processor comparison based on simulated data. *Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, 8th European Conference en VDE
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6-43. doi: 10.1109/mgrs.2013.2248301
- Muller, J. (2017). *Indirect Soil Salinity Detection In Irrigated Areas Using Earth Observation Methods (Magíster en Ciencias)*. Stellenbosch University.
- Murai, S. (1999). *GIS Work Book: Fundamental and Technical Courses*. New York: National Space Development Agency.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, 115, 90-102. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003

Outlife. (2020). Mapas - Yerba Loca. Consultado el 26 Marzo de 2020, en <http://yerbaloca.cl/mapas/>

Palubinskas, G., Müller, R., Reinartz, P. and Schroeder, M. (2007). Radiometric normalization of sensor scan angle effects in optical remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 28:19, 4453 – 4469. doi: 10.1080/01431160601050403

Rauld, R. A. (2002). Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la Quebrada Macul. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, p.57.

Richards, J. (1994). *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Springer: Berlin.

Sánchez, C., Montells, D., Manso, A., & Farías, E. (2016). Aplicación de la metodología InSAR en la detección de deformaciones en el cráter se subsidencia y entorno minero. Caso de estudio: Codelco Mina Andina. Conference: 1st International Conference of Underground Mining, At Santiago de Chile.

Sánchez, F., Conde, A., Salvá, B., & Colombo, D. (2016). Use of SAR radar satellite data to measure ground deformation in underground and open pit mine sites, El Teniente case study, Chile. *Proceedings Of The First Asia Pacific Slope Stability In Mining Conference*. doi: 10.36487/acg_rep/1604_22_sanchez

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). Open radar interferometry software for mapping surface Deformation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(28), 234-234. doi: 10.1029/2011eo280002

Sassa, K., & Canuti, P. (2009) *Landslides - Disaster Risk Reduction*. Springer.

Sellés, D., & Gana, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica 74: 30 p., escala 1: 100.000. Santiago

Sernageomin - Servicio Nacional de Geología y Minería, (2019). Remoción en masa en Santuario de la Naturaleza Yerba Loca. Servicio Nacional de Geología y Minería, INF-2019. METROPOLITANA-01, Santiago.

Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini, S., Monserrat, O., & Béjar-Pizarro, M. et al. (2017). Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data. *Geomatics, Natural Hazards And Risk*,9(1), 152-174. doi: 10.1080/19475705.2017.1413013

Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, 29, 21.

Tong, X., & Schmidt, D. (2016). Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing Of Environment*, 186, 405-415. doi: 10.1016/j.rse.2016.09.008

Vassileva, M., Giulio Tonolo, F., Riccardi, P., Lecci, D., Boccardo, P., & Chiesa, G. (2017). Satellite SAR interferometric techniques in support to emergency mapping. *European Journal Of Remote Sensing*, 50(1), 464-477. doi: 10.1080/22797254.2017.1360155

Veci, L. (2015). Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial. Consultado en <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials>

Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). Área Tilti-Santiago, Región Metropolitana. Servicio nacional de geología y minería. Mapas geológicos N° 11, escala 1:100.000, 1 anexo.

Xu, X., Sandwell, D., Tymofyeyeva, E., Gonzalez-Ortega, A., & Tong, X. (2017). Tectonic and Anthropogenic Deformation at the Cerro Prieto Geothermal Step-Over Revealed by Sentinel-1A InSAR. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 55(9), 5284-5292. doi: 10.1109/tgrs.2017.2704593

Zebker, H. A., Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.

Zhou, X., Chang, N., & Li, S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors*, 9(3), 1876-1912. doi: 10.3390/s90301876

Anexos

Anexo A: Código de Matlab

Código elaborado por Mario Garcés con ayuda de Joaquín Hormazábal, basado en un script proporcionado por F. Delgado, (2020).

```
1      clear all;close all;clc
2      fid= fopen ('/media/mgarces/Expansion/Teniente_ASC_full/SBAS/intf.tab');
3      %modificar línea anterior según la ruta del archivo intf.tab
4      l=fopen(fid)
5      %l=fgetl(fid)
6      ifg_list=[]; ind=1; n_ifgs=244;%modificar según la cantidad de interferogramas
7      while length(l)>1
8          if exist(l(4:38))
9              ifg_list=[ifg_list; str2num(l(83:end))]; % should be checked
10         ind
11         [x,y,phase]=grdread2(l(4:38)); % abre archivo unwrap.grd
12         [a,b,corr]=grdread2(l(43:80)); %abre archivo corr
13         [X,Y]=meshgrid(x,y);
14         phase_r=phase;
15         % ramp removal Start
16         ind_nn=find(~isnan(phase));
17         ph_ramp=zeros(length(ind_nn),n_ifgs,'single');
18         G=double([ones(length(ind_nn),1),X(ind_nn),Y(ind_nn)]);
19         d=phase(ind_nn);
20         m=G\double(d(:));
21         ph_this_ramp=G*m;
22
```

```

23     phase(ind_nn)=phase(ind_nn)-ph_this_ramp;
24     Phase_ifg(:,:,ind)=phase;
25
26     nx=length(x);
27     ny=length(y);
28     fit = reshape(ph_this_ramp,ny,nx);
29
30     % ramp removal END
31
32     ind2=300; %indice a plotear, cambiar a gusto
33     figure
34         subplot(2,2,1)
35             pcolor(phase_r);shading flat;colormap jet;axis
equal;c=caxis;colorbar;title('datos ramped')
36         hold on
37         plot([1 nx],[1 1]*ind2,'k','LineWidth',3)
38     subplot(2,2,2)
39         pcolor(fit);shading flat;colormap jet;axis
equal;caxis(c);colorbar;title('rampa invertida')
40     hold on
41     plot([1 nx],[1 1]*ind2,'r','LineWidth',3)
42     subplot(2,2,3)
43         pcolor(Phase_ifg(:,:,ind));shading flat;colormap jet;axis
equal;caxis([-5 5]);colorbar;title('datos sin rampa')
44     hold on
45     plot([1 nx],[1 1]*ind2,'b','LineWidth',3)
46     subplot(2,2,4)
47     hold on

```

```

48         plot(phase_r(ind2,:),'.k')
49         plot(fit(ind2:),'r')
50         plot(Phase_ifg(ind2:),'b.')
51         titulo=strcat(num2str(1(13:27)));
52         titulo(8)=' ';
53         subtitle(titulo);
54         %print('dpng', [titulo], '-r300');
55         print([titulo],'-dpng','-r300')    ;
56         threshold=0.12
57
58
59         phase(corr<threshold) = NaN;%se fija un umbral de coherencia, donde se
remueven los valores de baja calidad
60
61
62         outname = strcat(num2str(i),'_flat.grd');
63
64         grdwrite2(x,y,phase,'Runwrap.grd') %se genera un archivo desenrollado sin
rampa y se con umbral de coherencia fijado compatible con GMTSAR
65         s1=1(4:27)
66         dir=fullfile('/', 'media', 'mgarces', 'Expansion', 'Teniente_ASC_full', '/')
67         ruta=strcat(dir,s1)
68         movefile('Runwrap.grd',ruta);%mueve archivo Runwrap.grd a cada carpeta "intf"
para el siguiente proceso en GMTSAR
69
70         pause(4)
71         close all
72         l=fgetl(fid);

```

```
73     ind=ind+1;
```

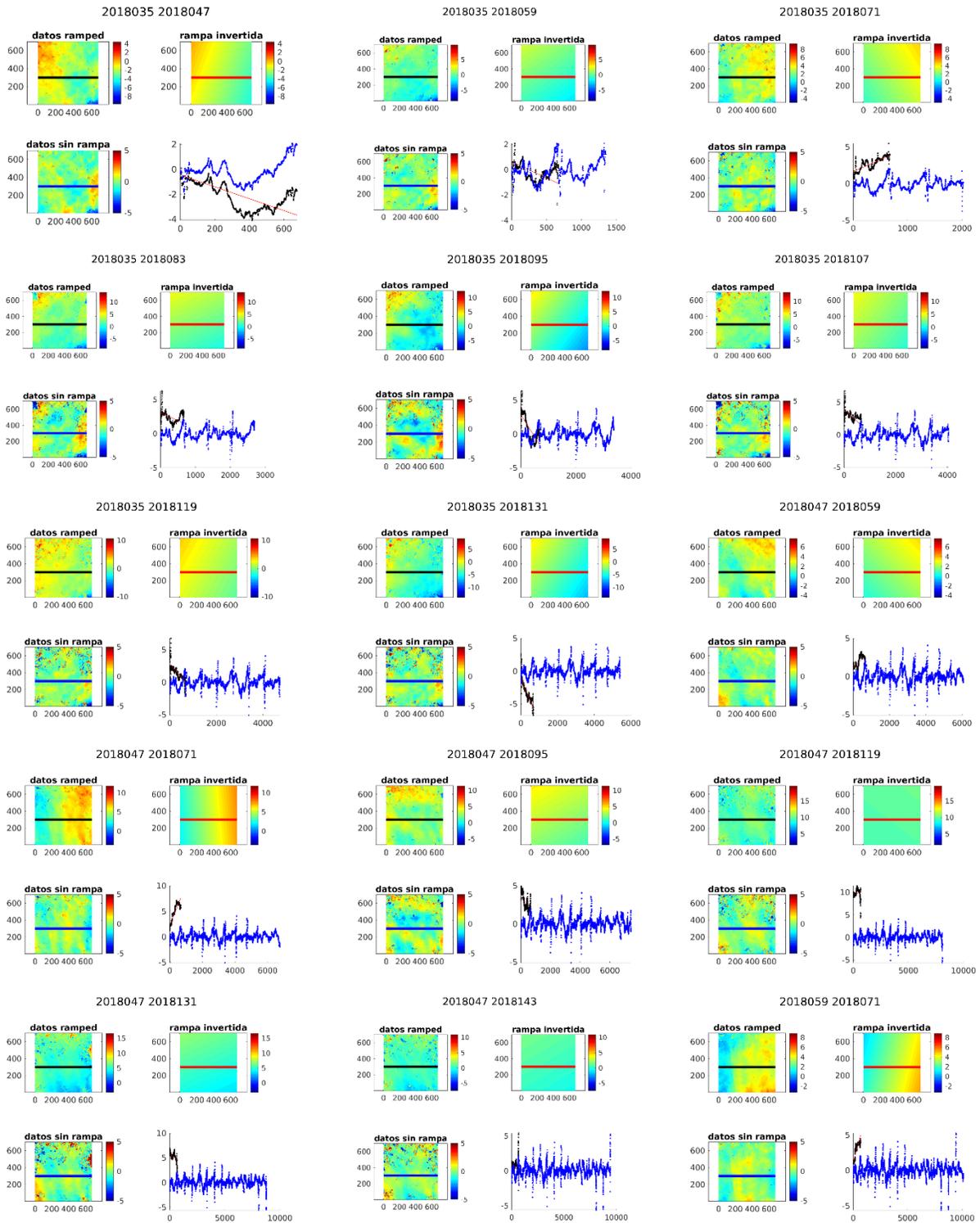
```
74     end
```

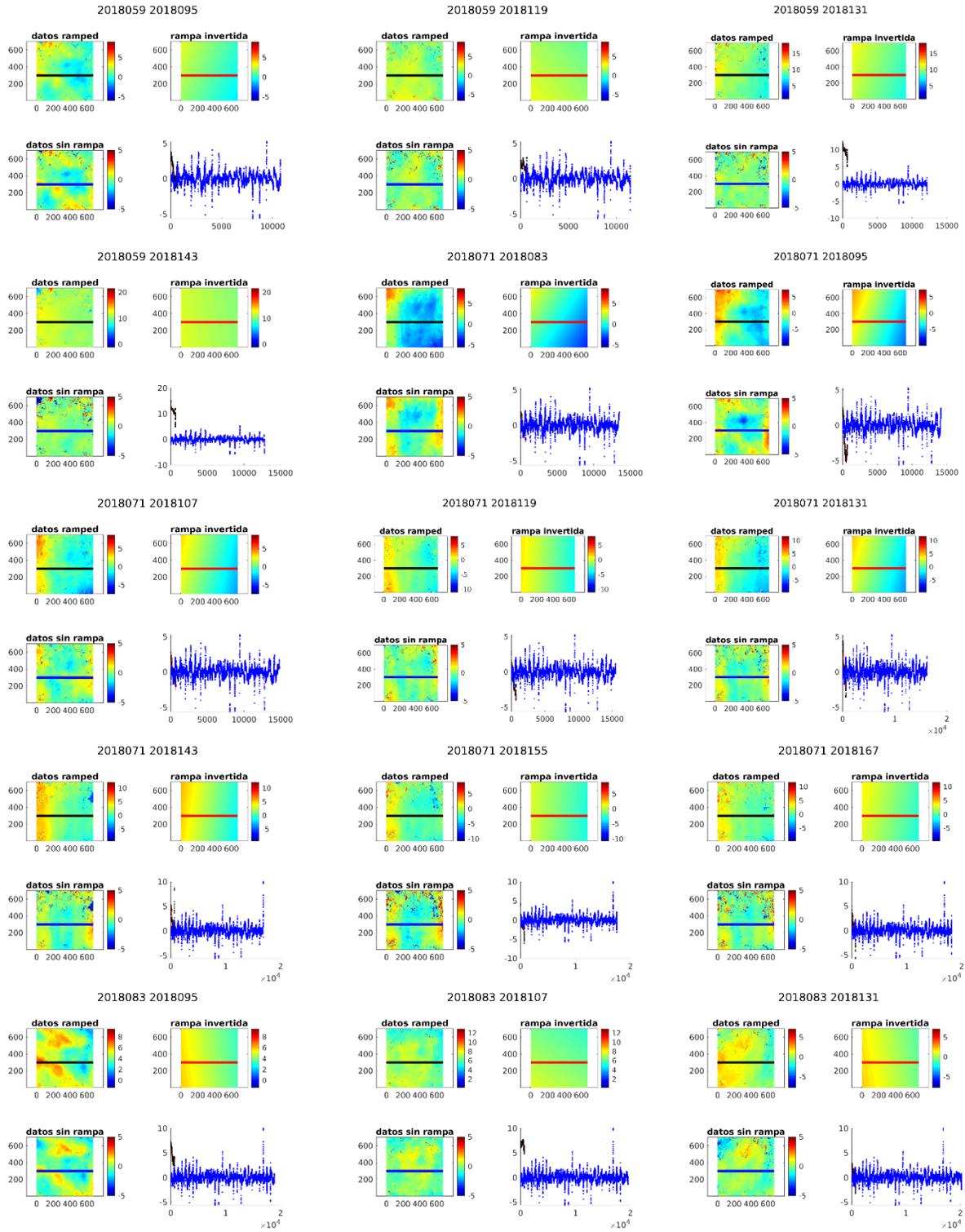
```
75     end
```

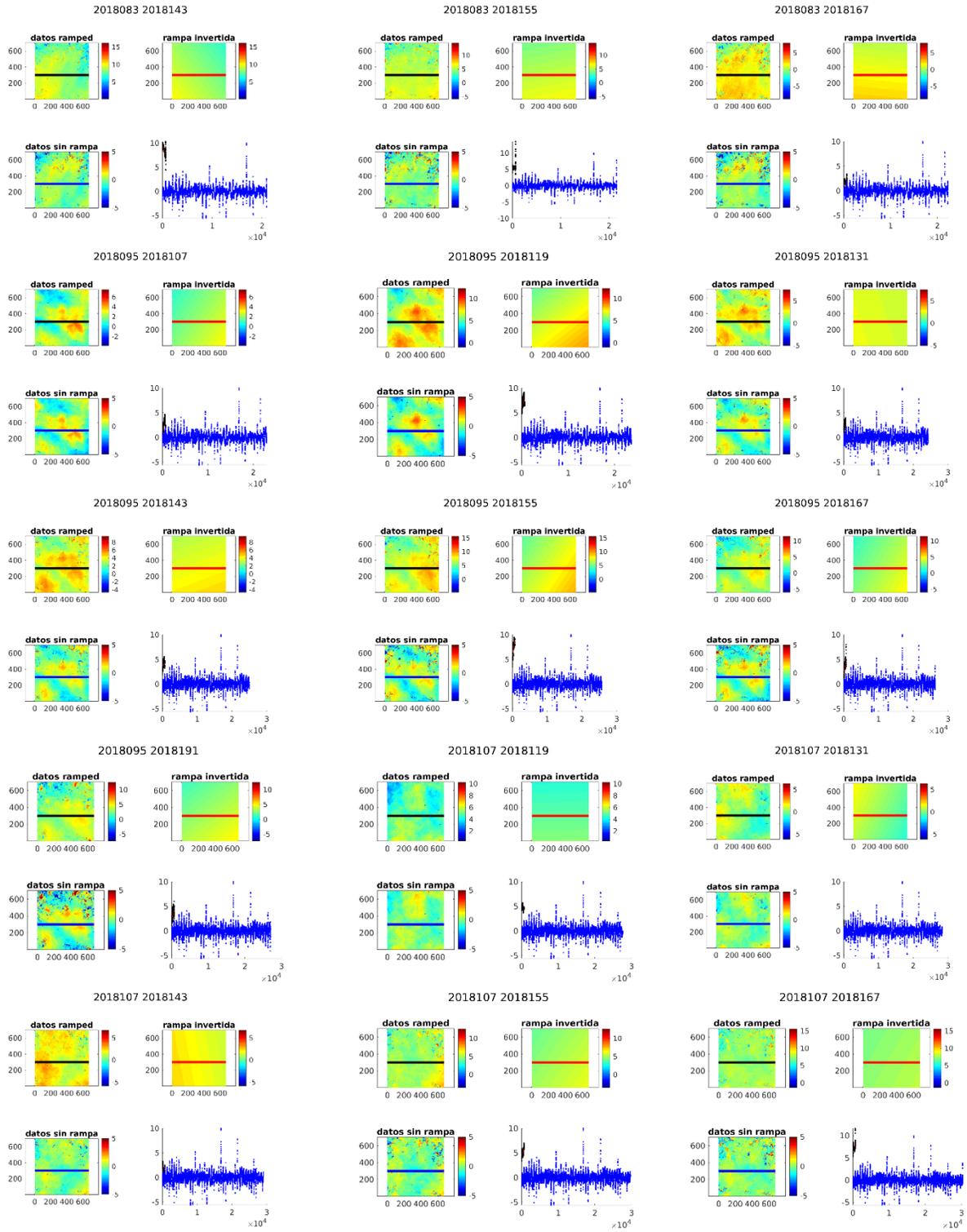
Anexo B: Resumen Base de datos de imágenes SAR utilizadas

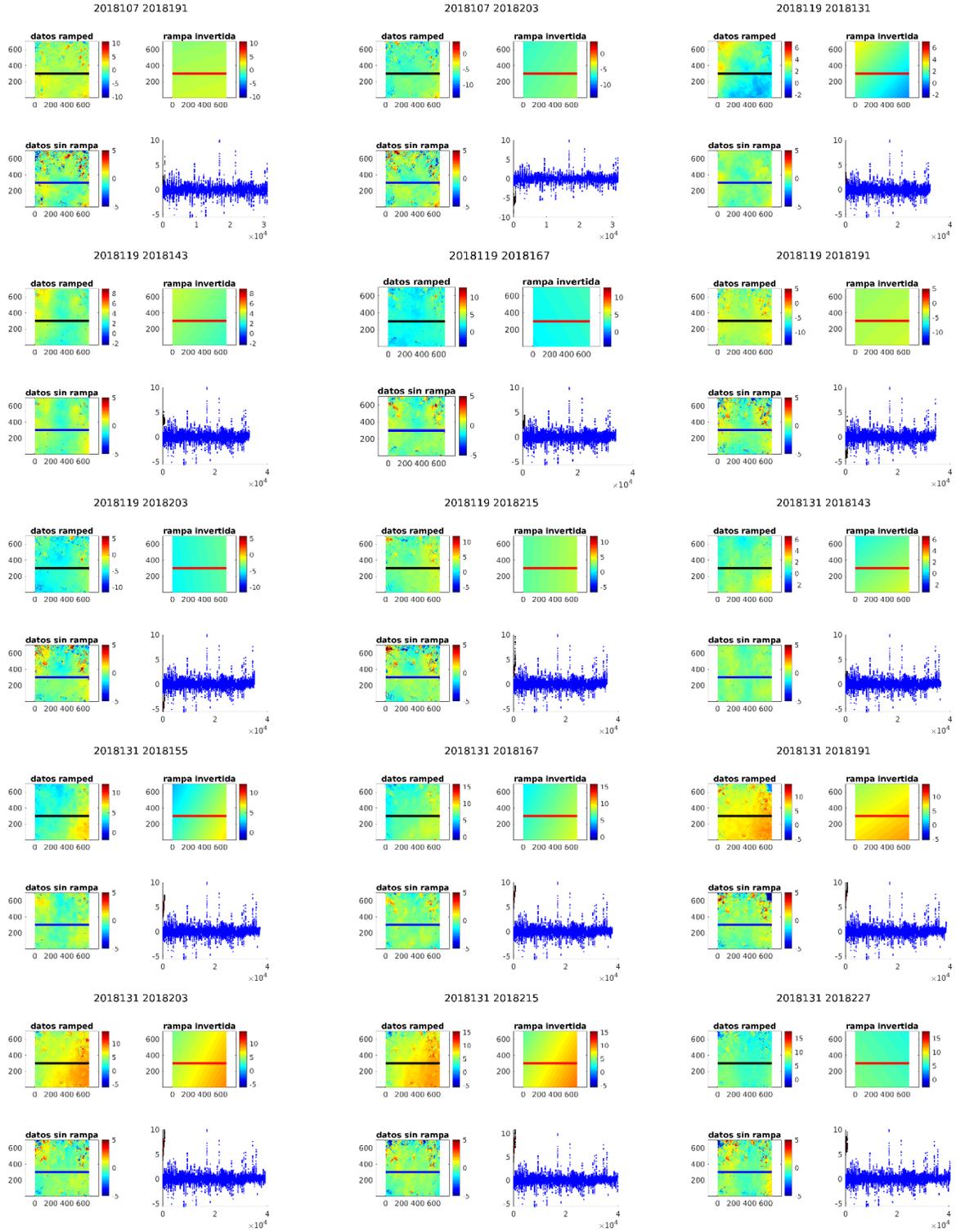
Lugar/ Geometría	Star Time	End Time	Beam Mode	Polarización	Path	Frame	Nº de Imágenes	Satélite
Rancagua/ Ascendente	04/02/2018	25/04/2019	IW	VV + VH	18	1065	37	Sentinel 1B
Teniente/ Ascendente	04/02/2018	25/04/2019	IW	VV + VH	18	1065	37	Sentinel 1B
Teniente/ Descendente	06/11/2017	06/04/2019	IW	VV + VH	83	705	43	Sentinel 1B
Yerba Loca/ Ascendente	01/05/2019	29/08/2019	IW	VV + VH	18	1065	8	Sentinel 1A
Yerba Loca/ Descendente	09/10/2018	23/04/19	IW	VV + VH	156	701	28	Sentinel 1B

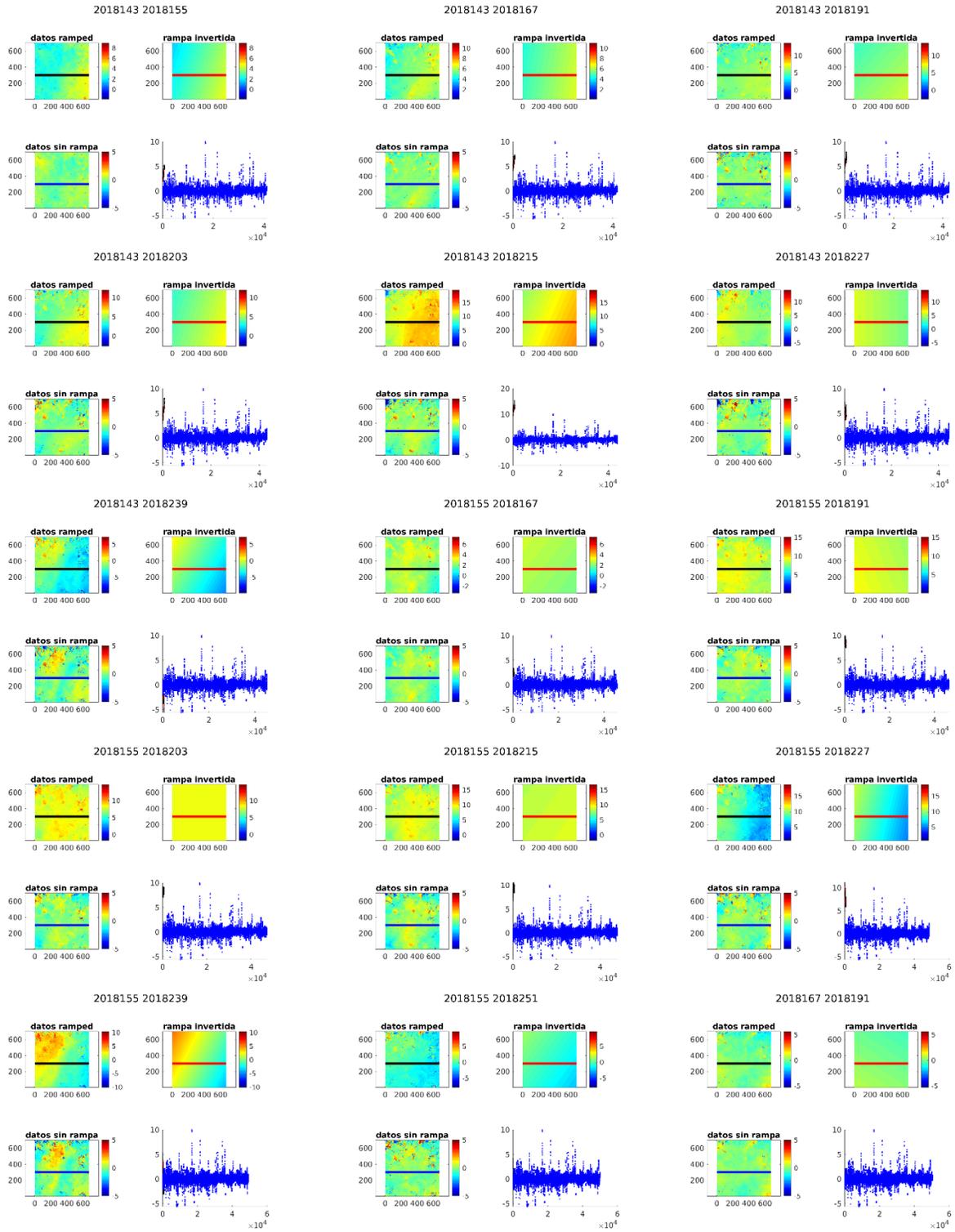
Anexo C: Productos desenrollados, caso Rancagua

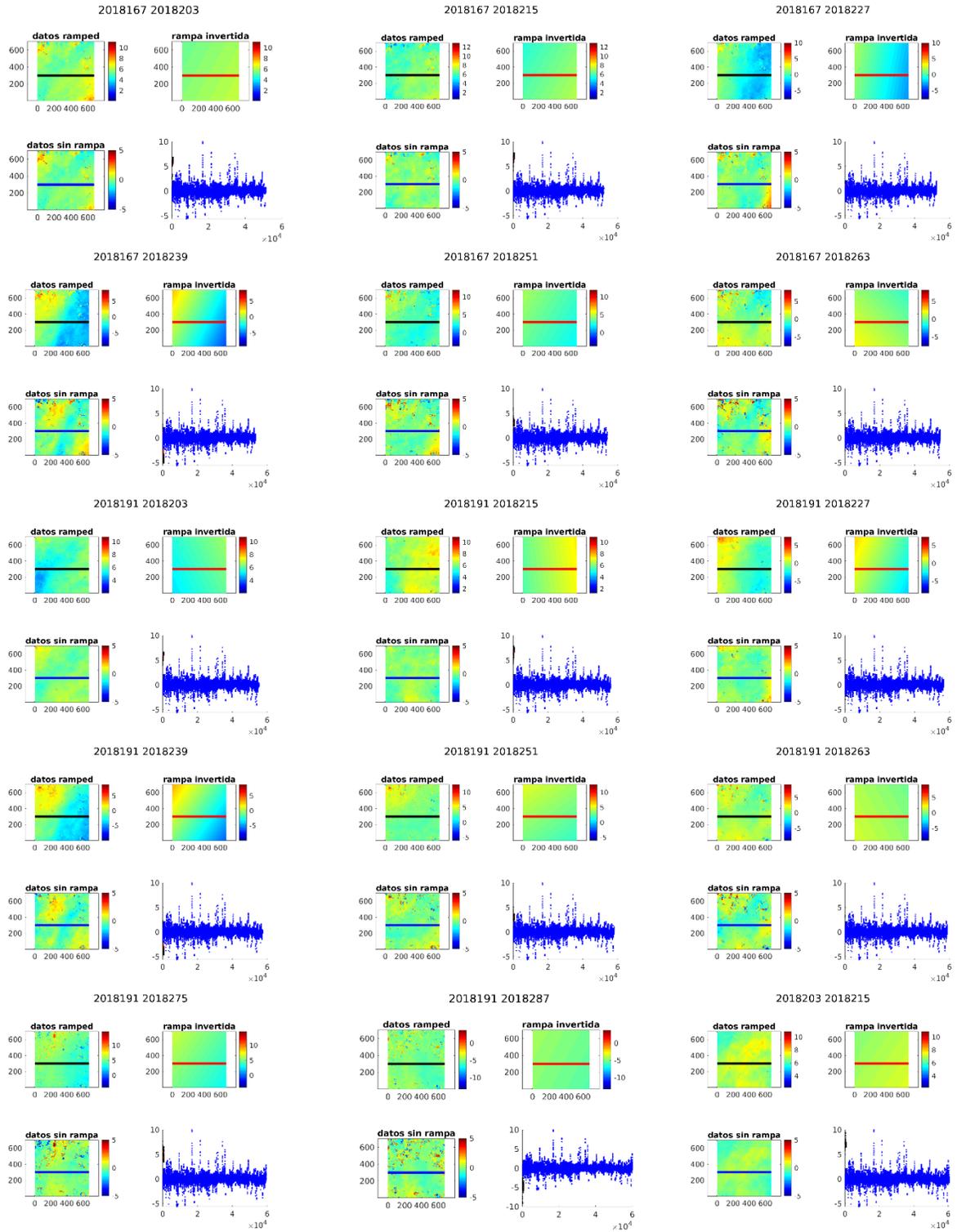


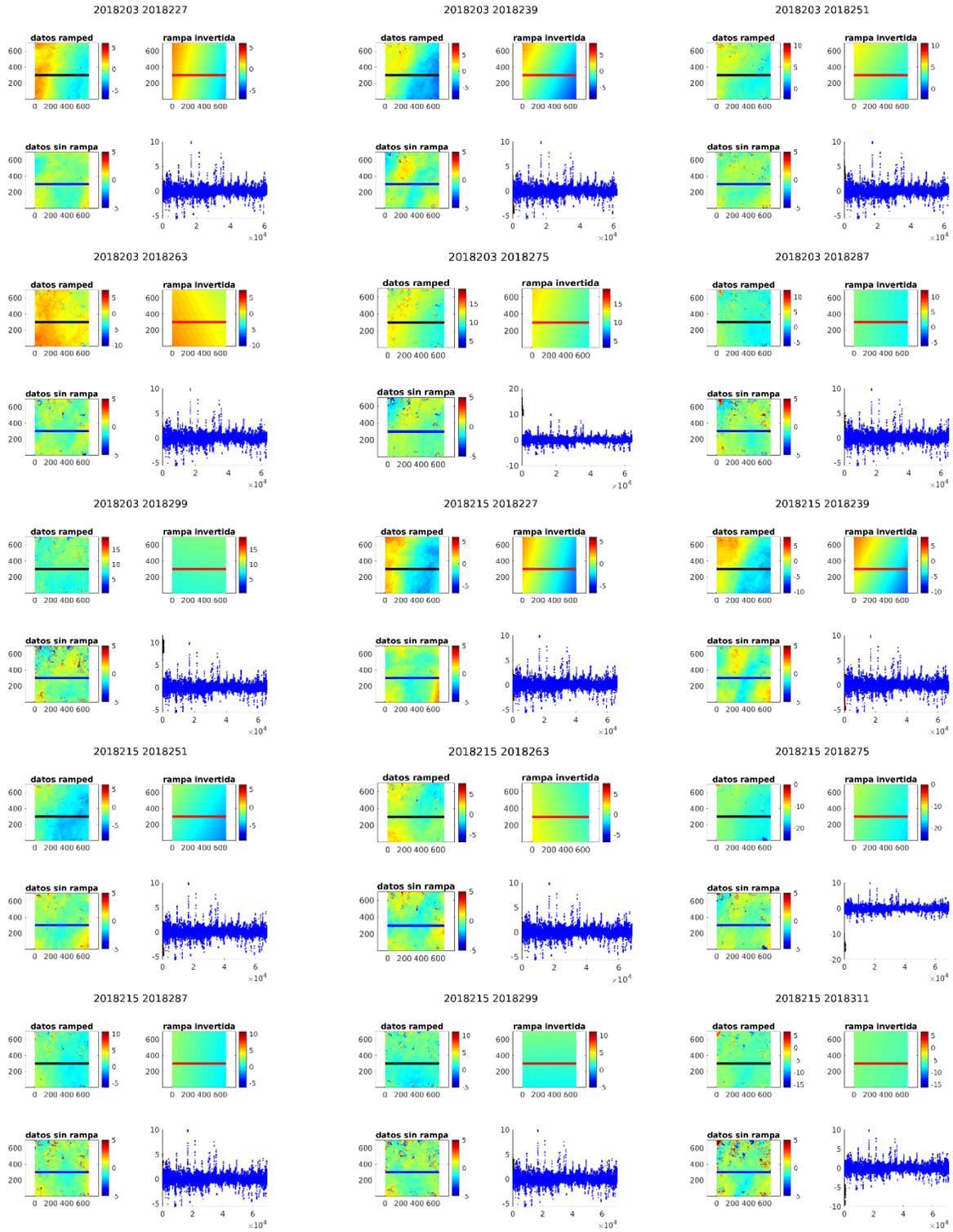


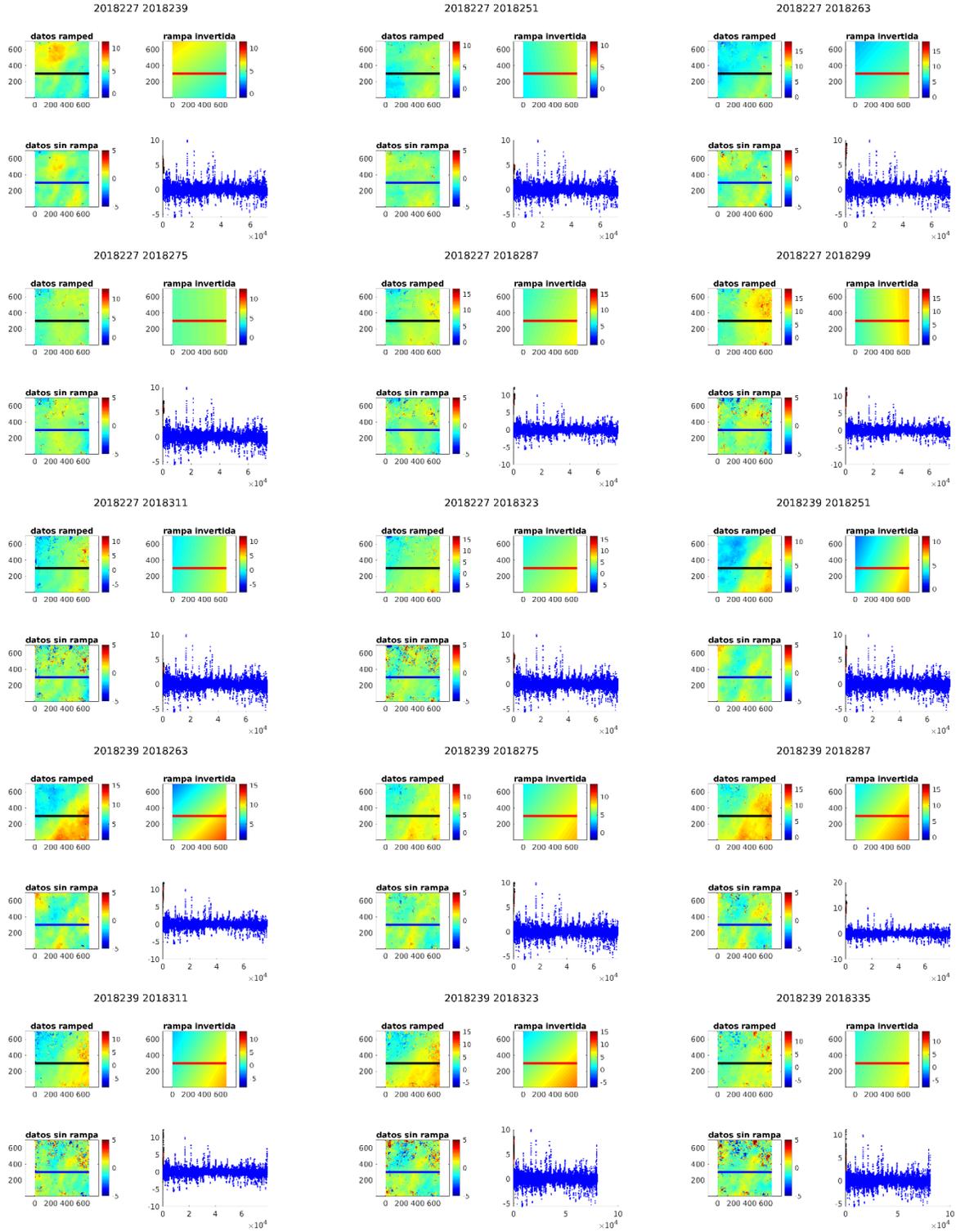


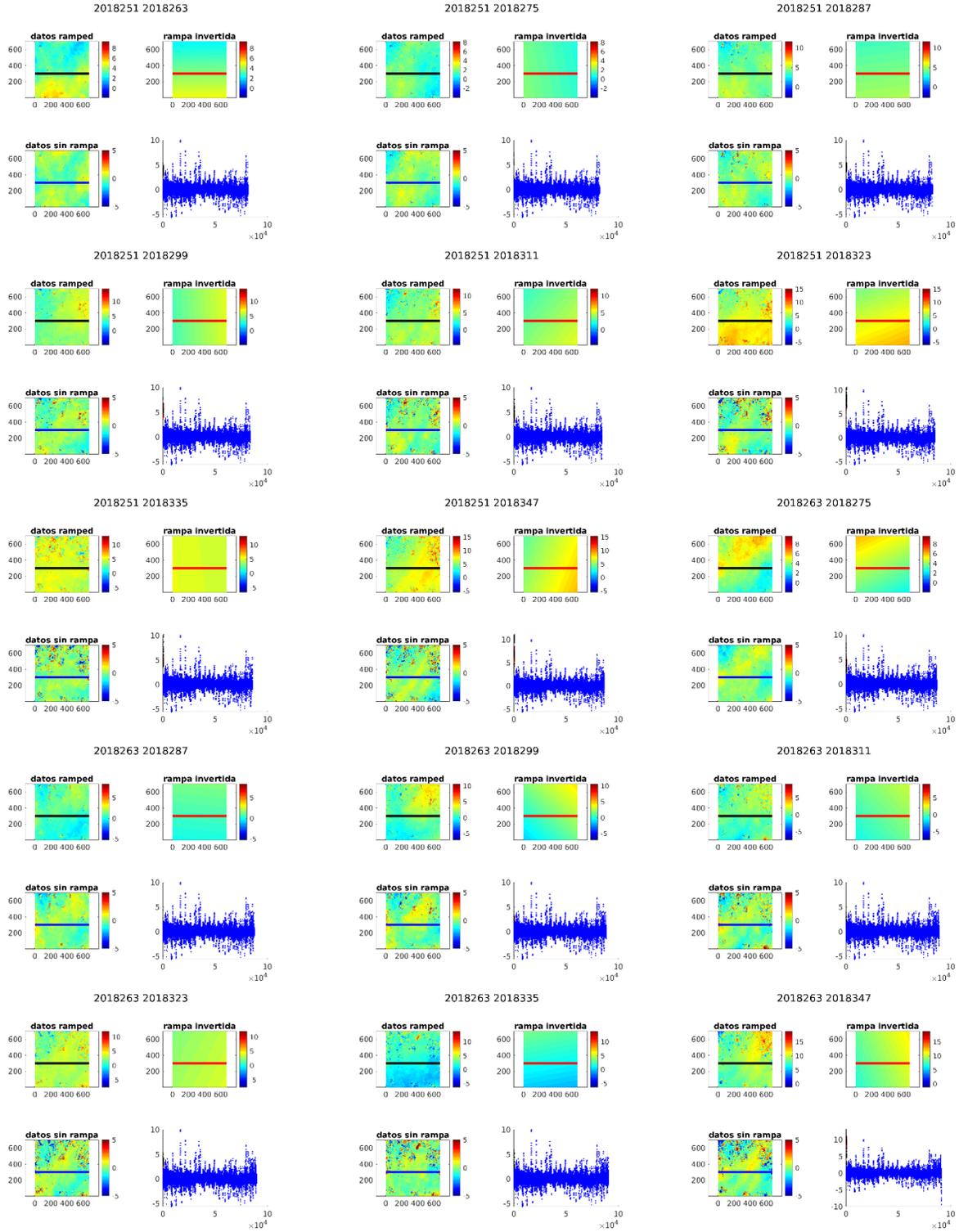


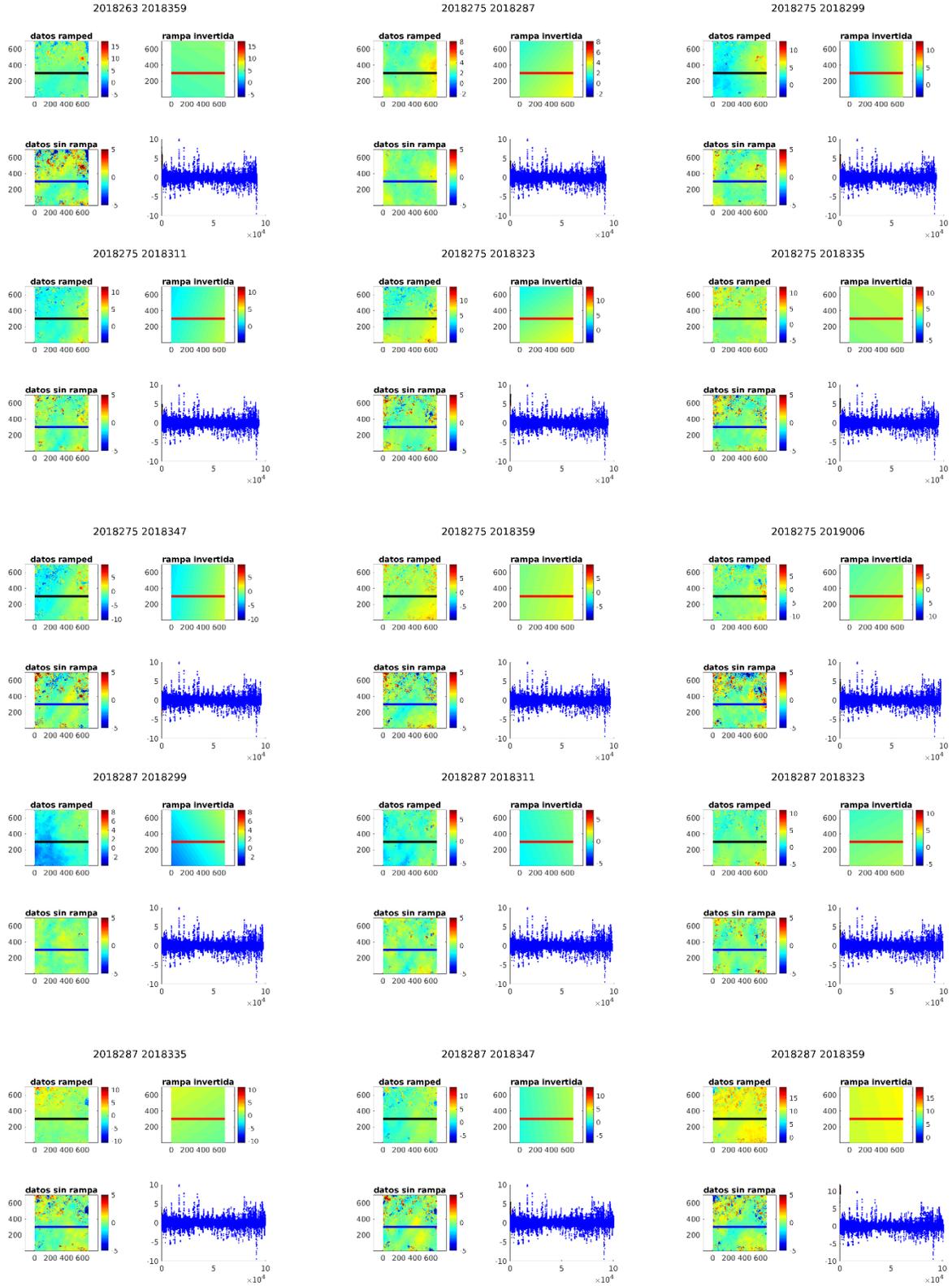


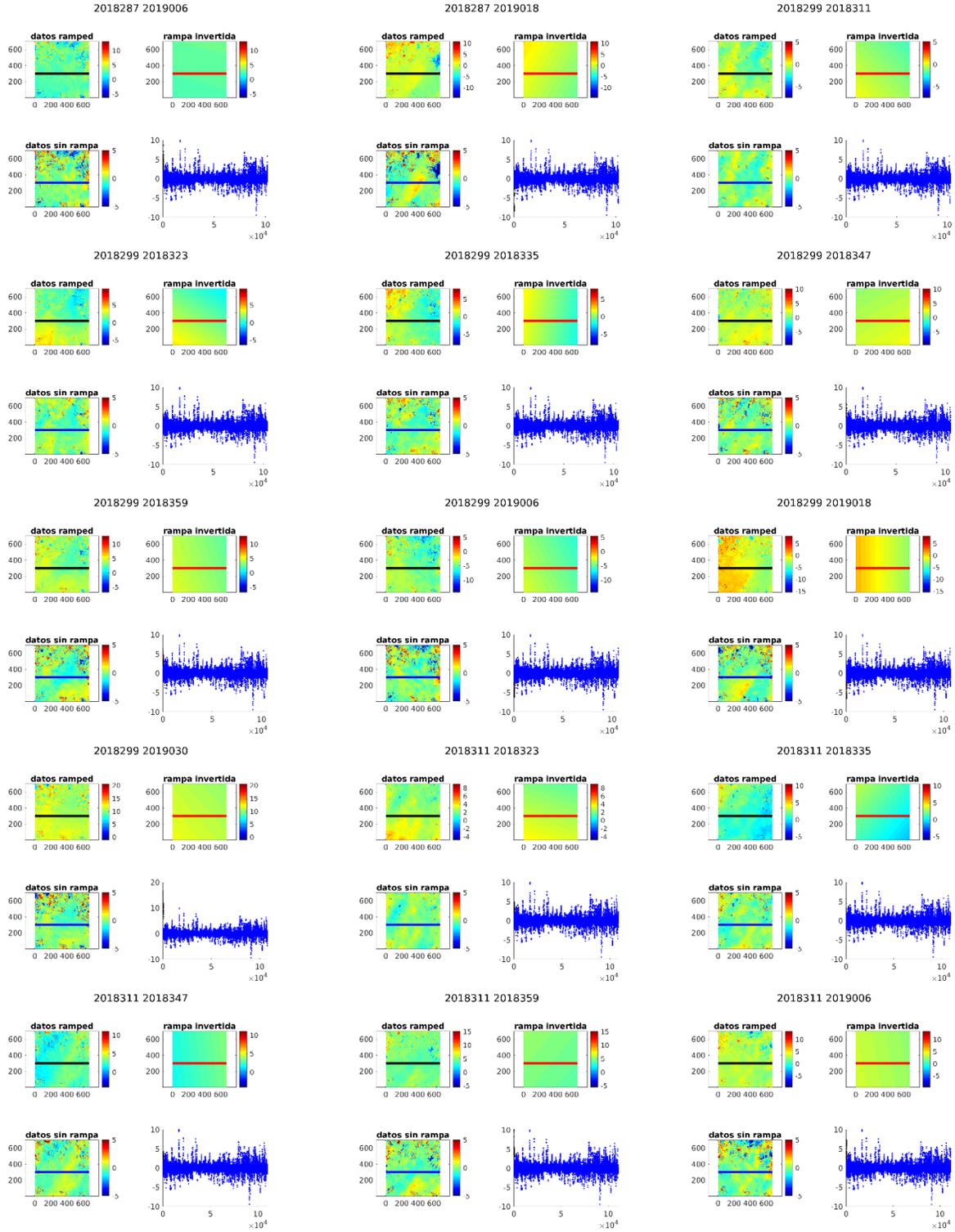


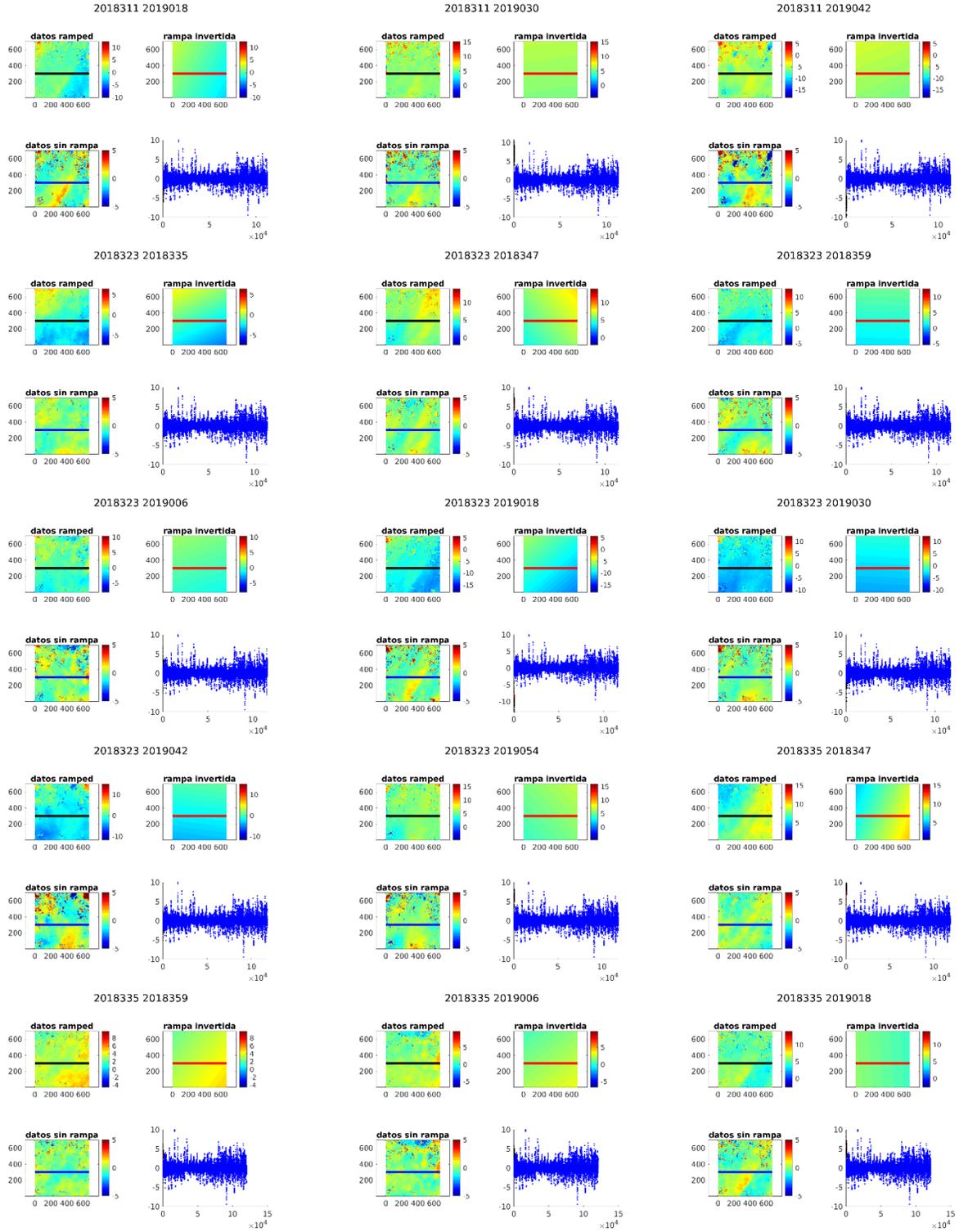


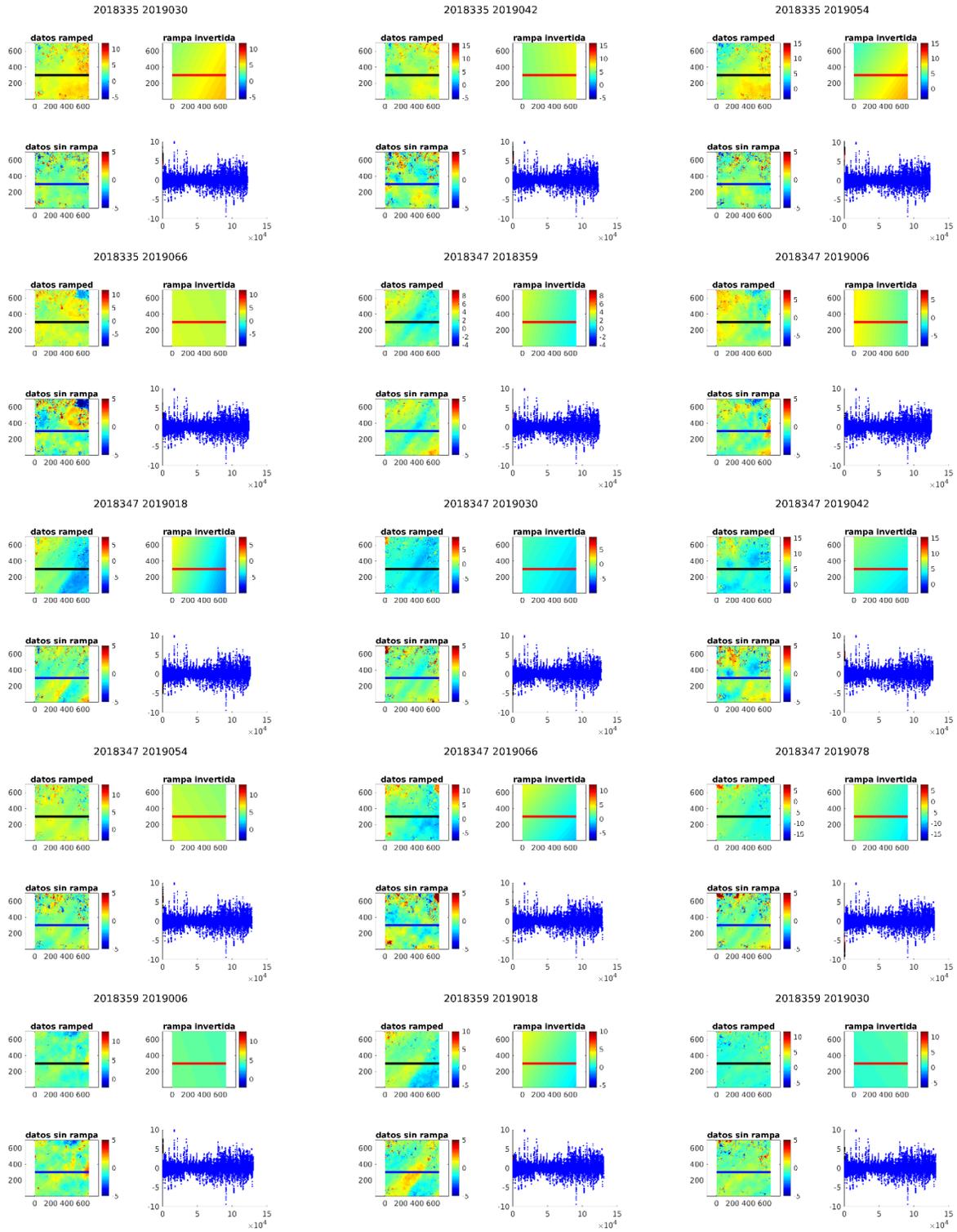


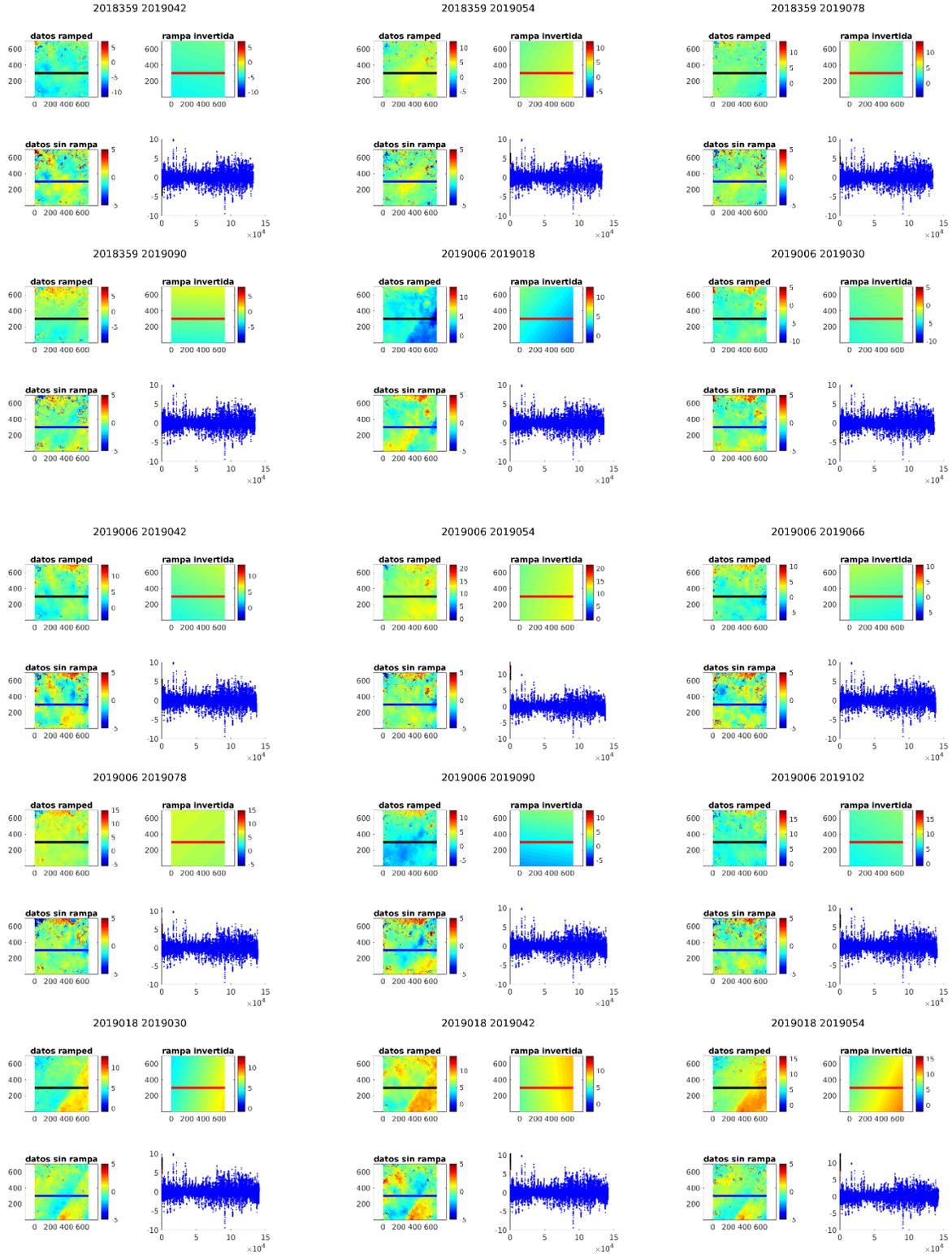


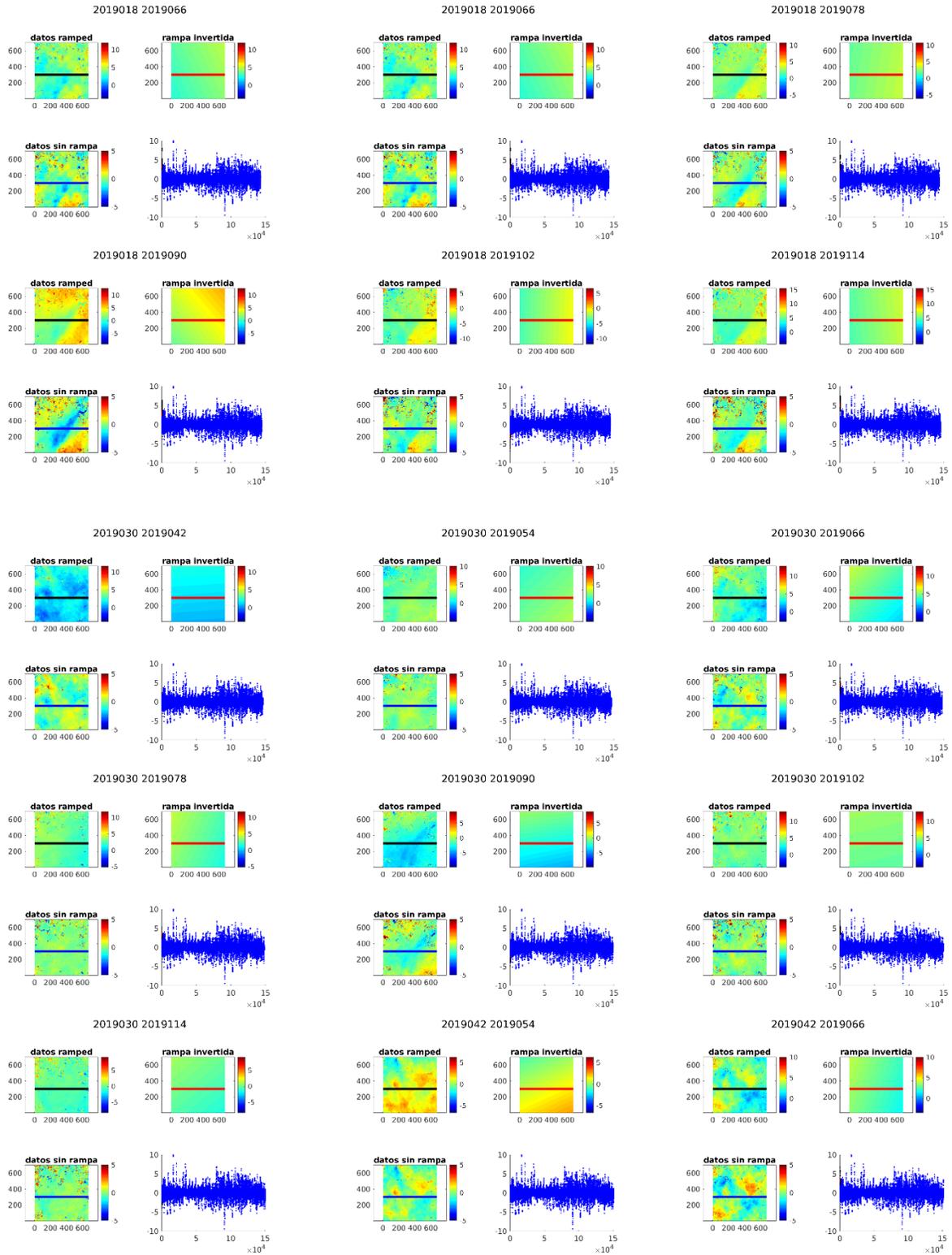


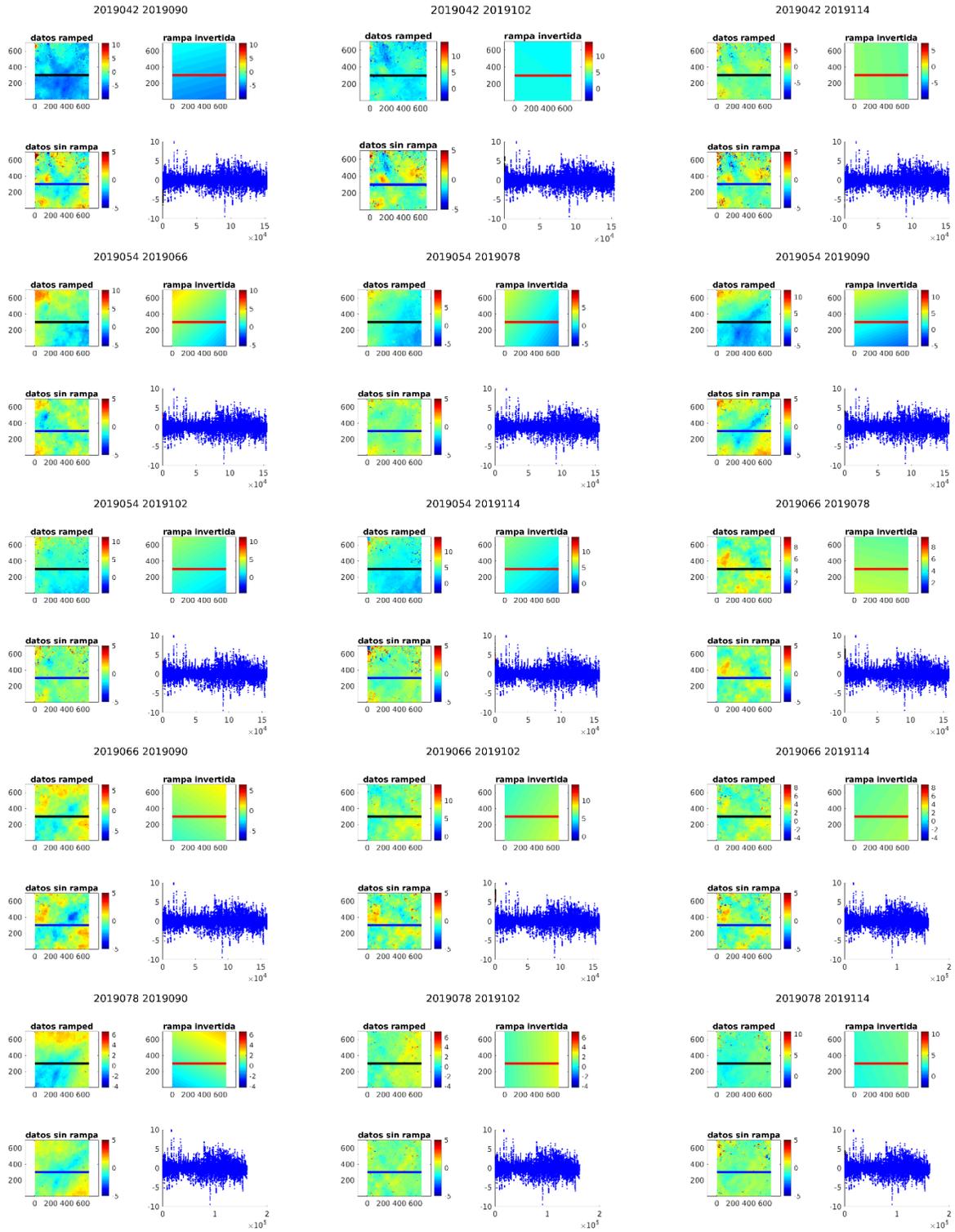


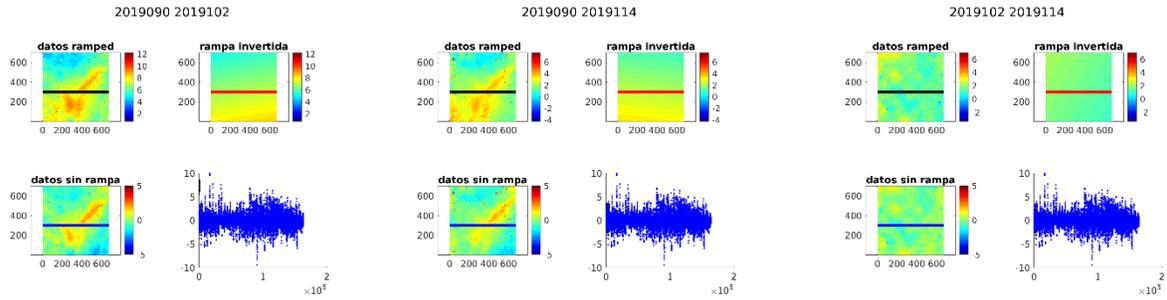




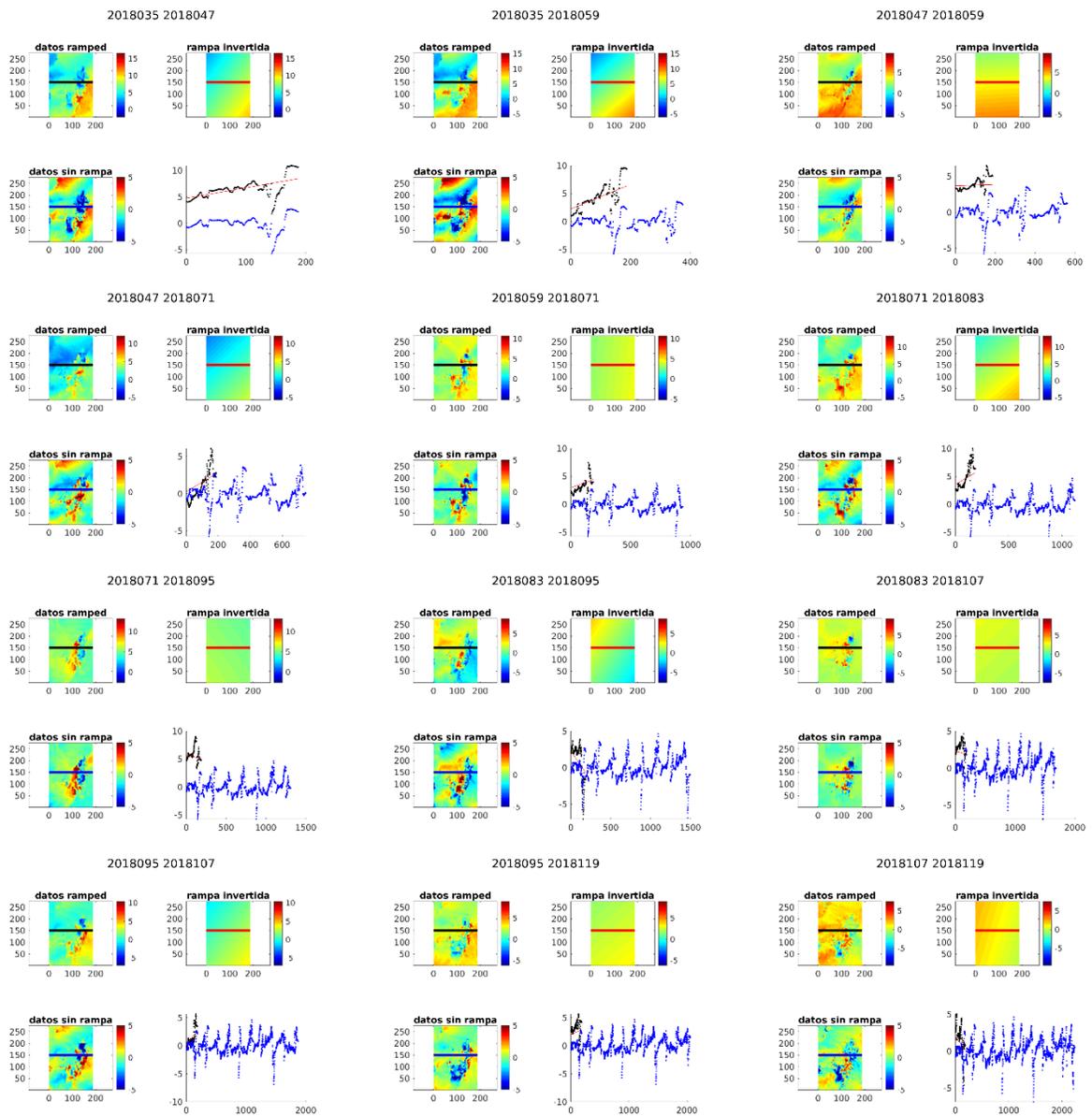


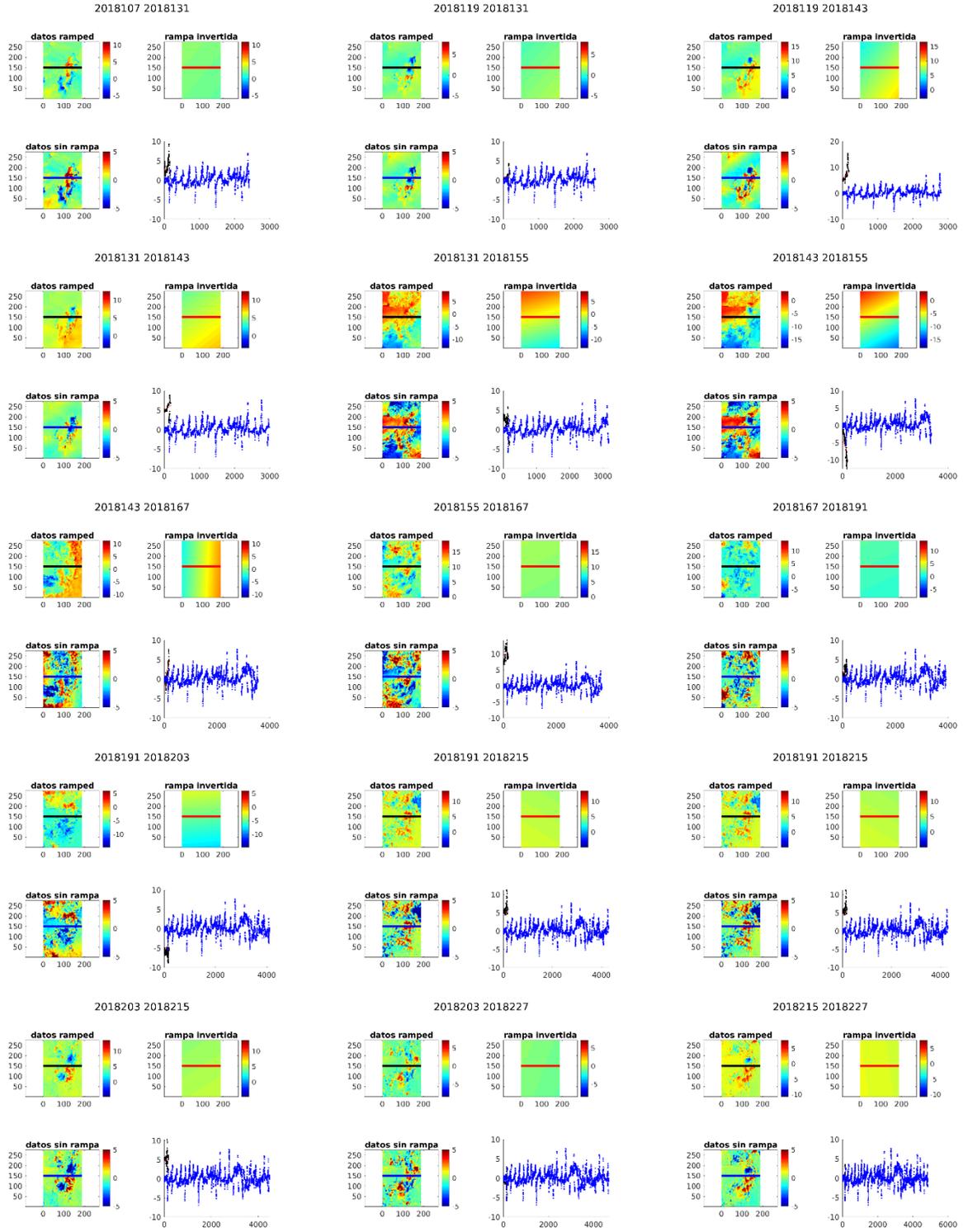


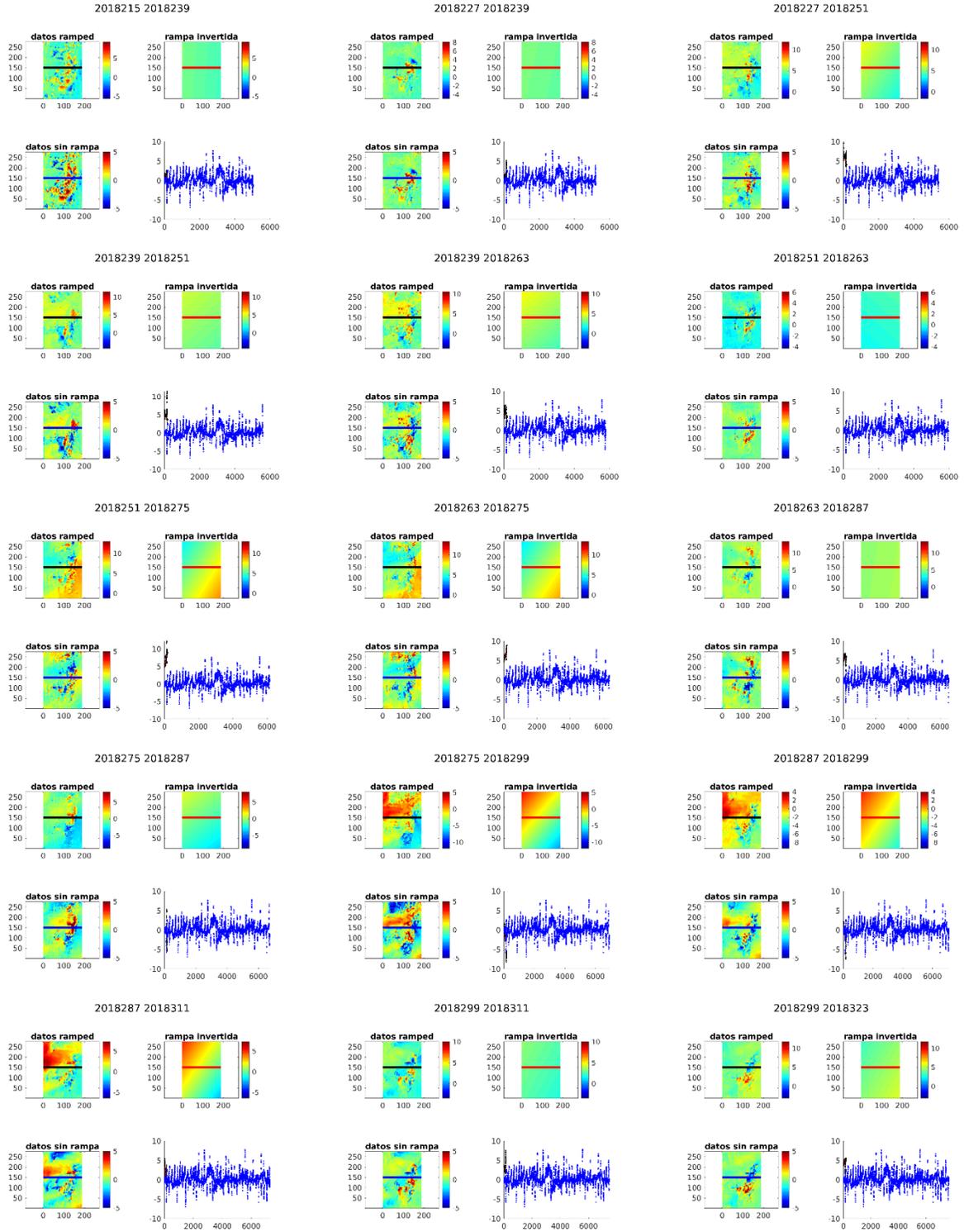


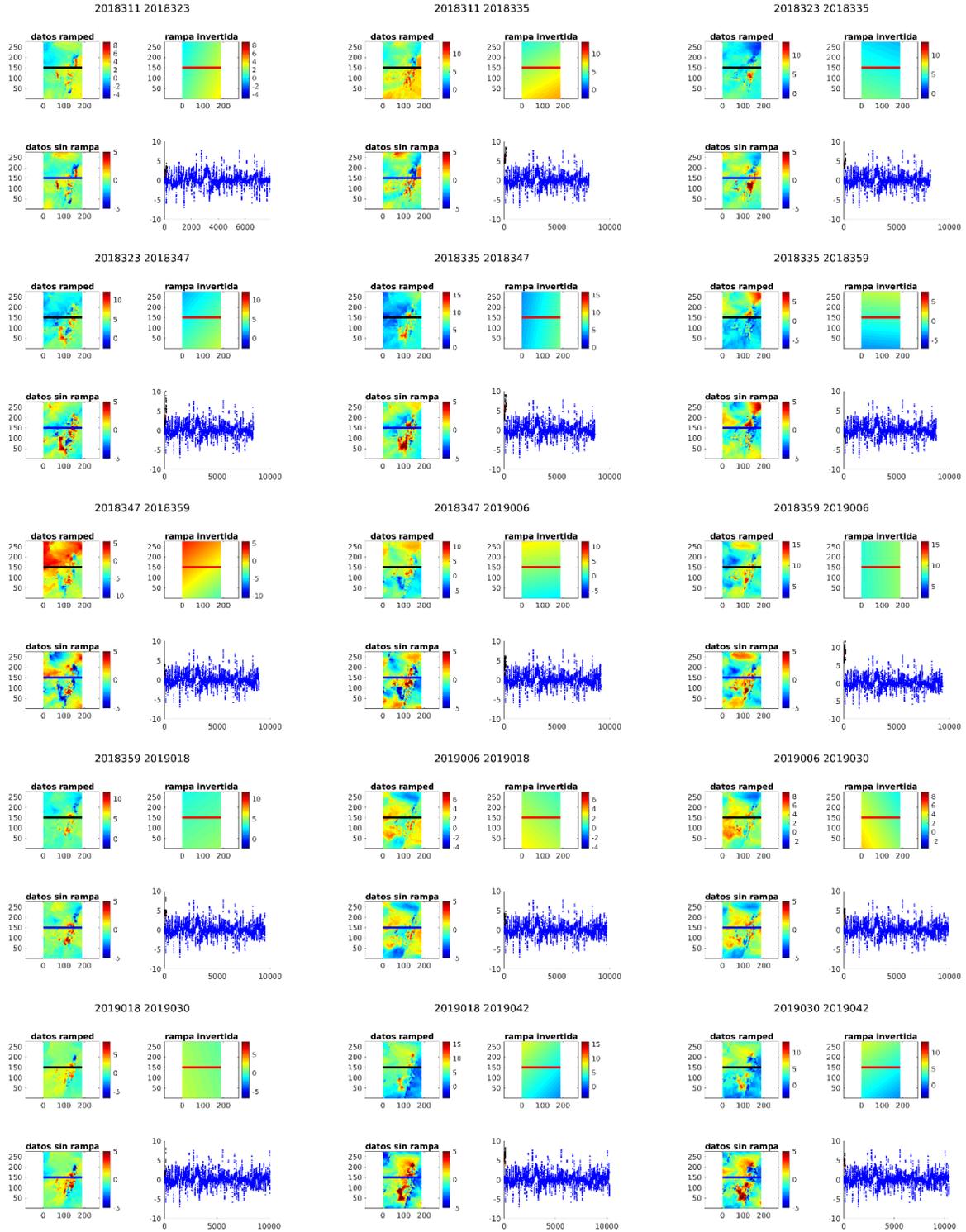


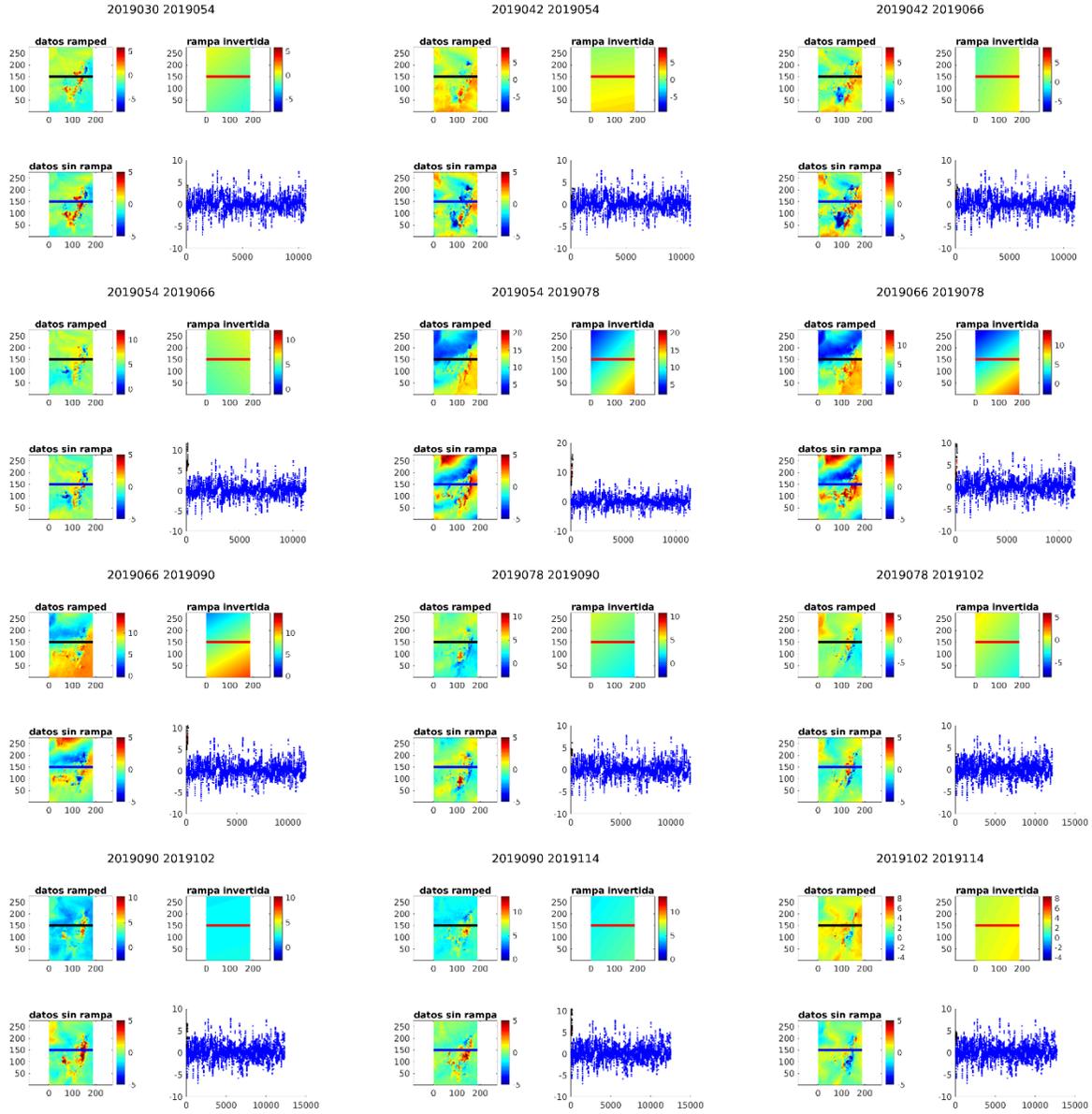
Anexo D: Productos desenrollados, caso yacimiento El Teniente (ascendente)



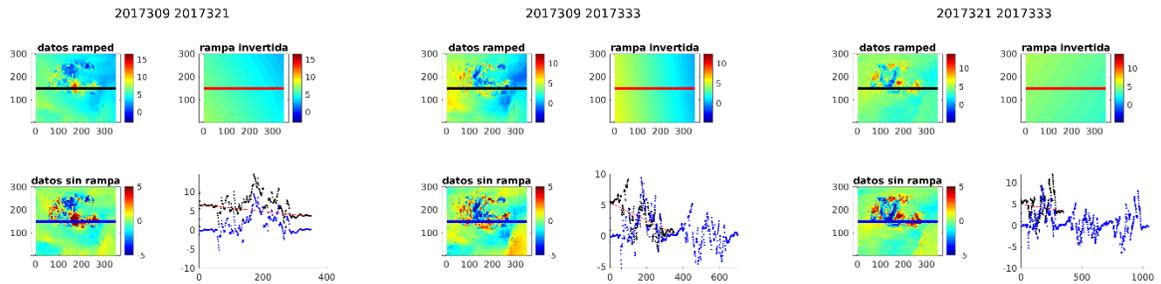


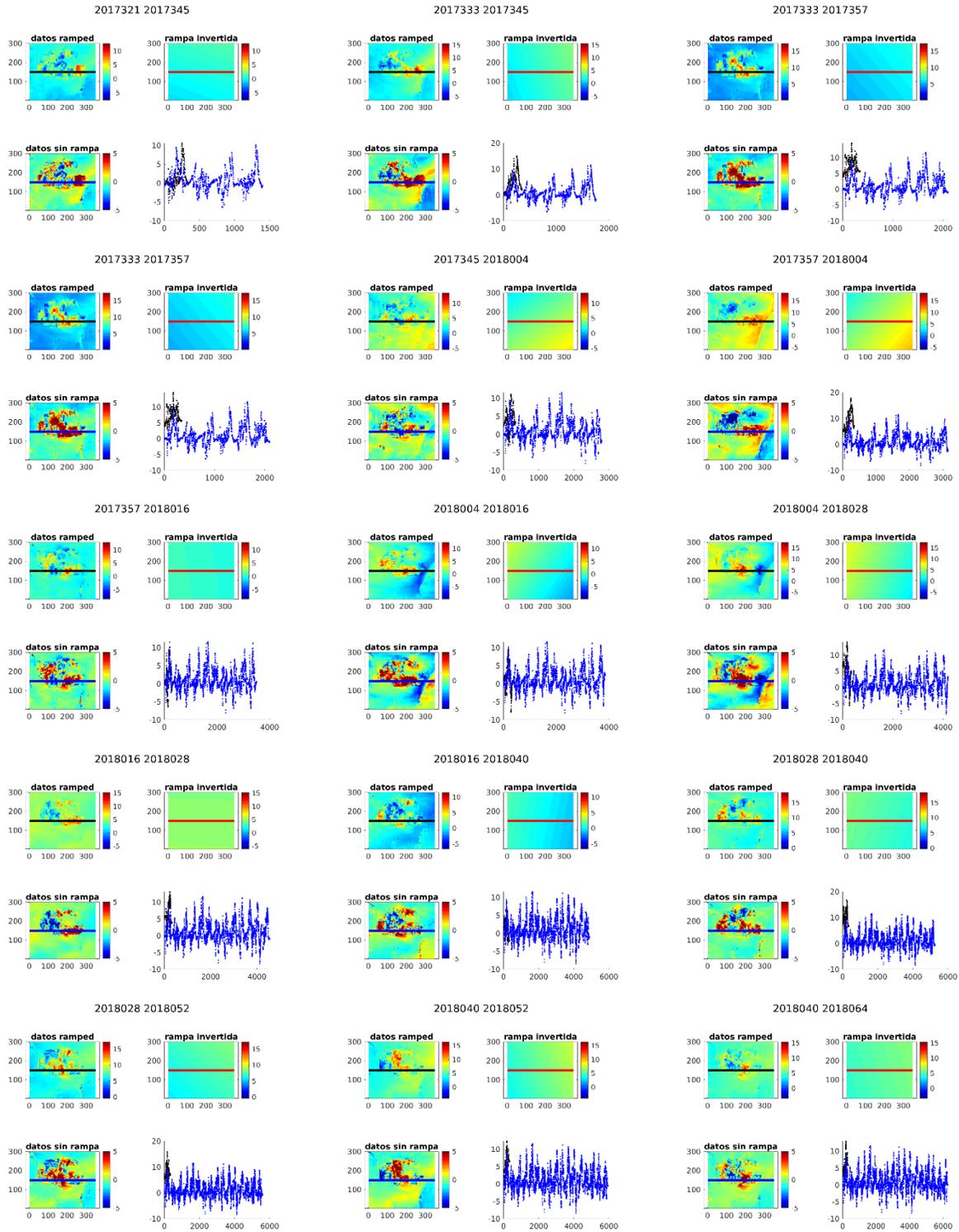


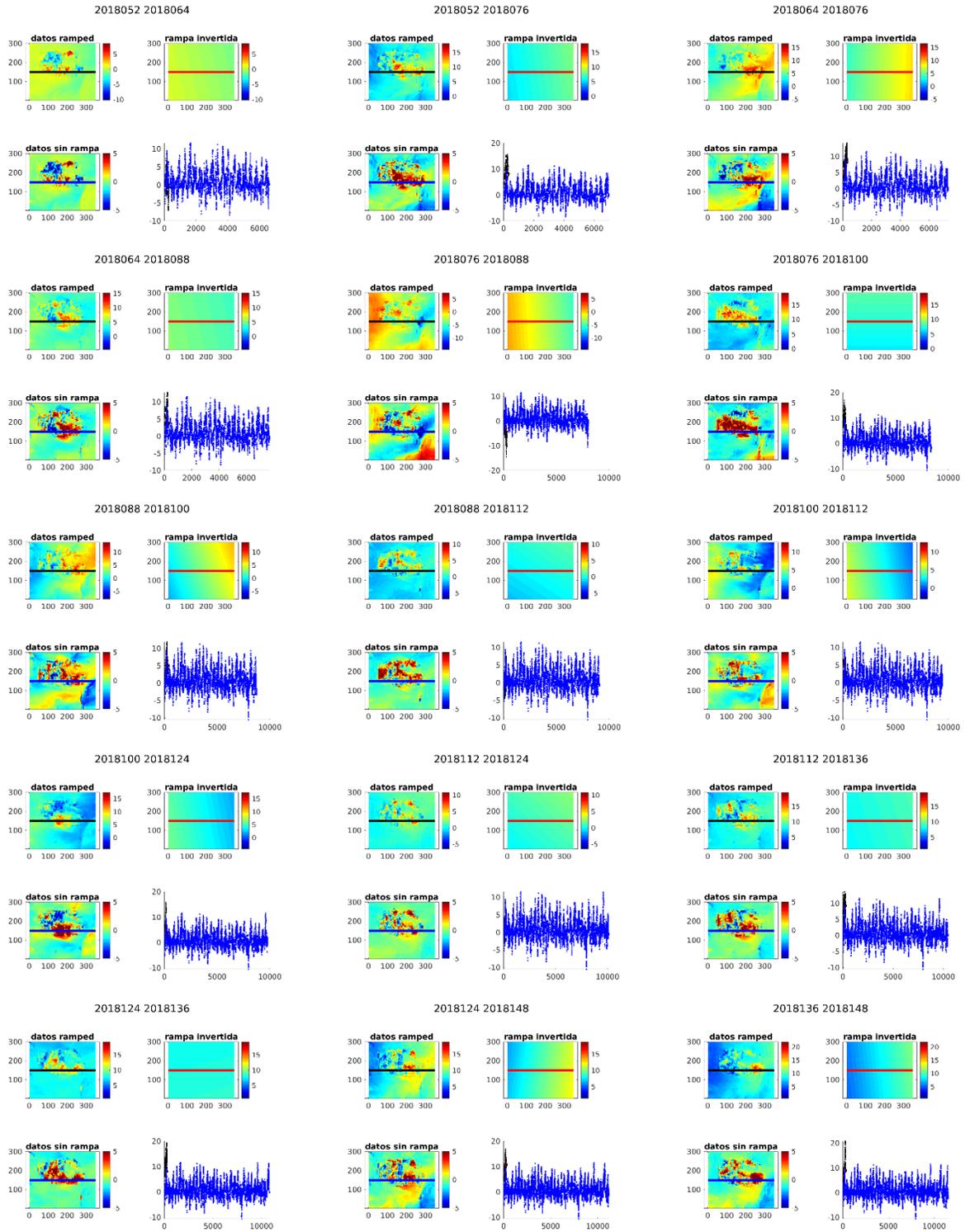


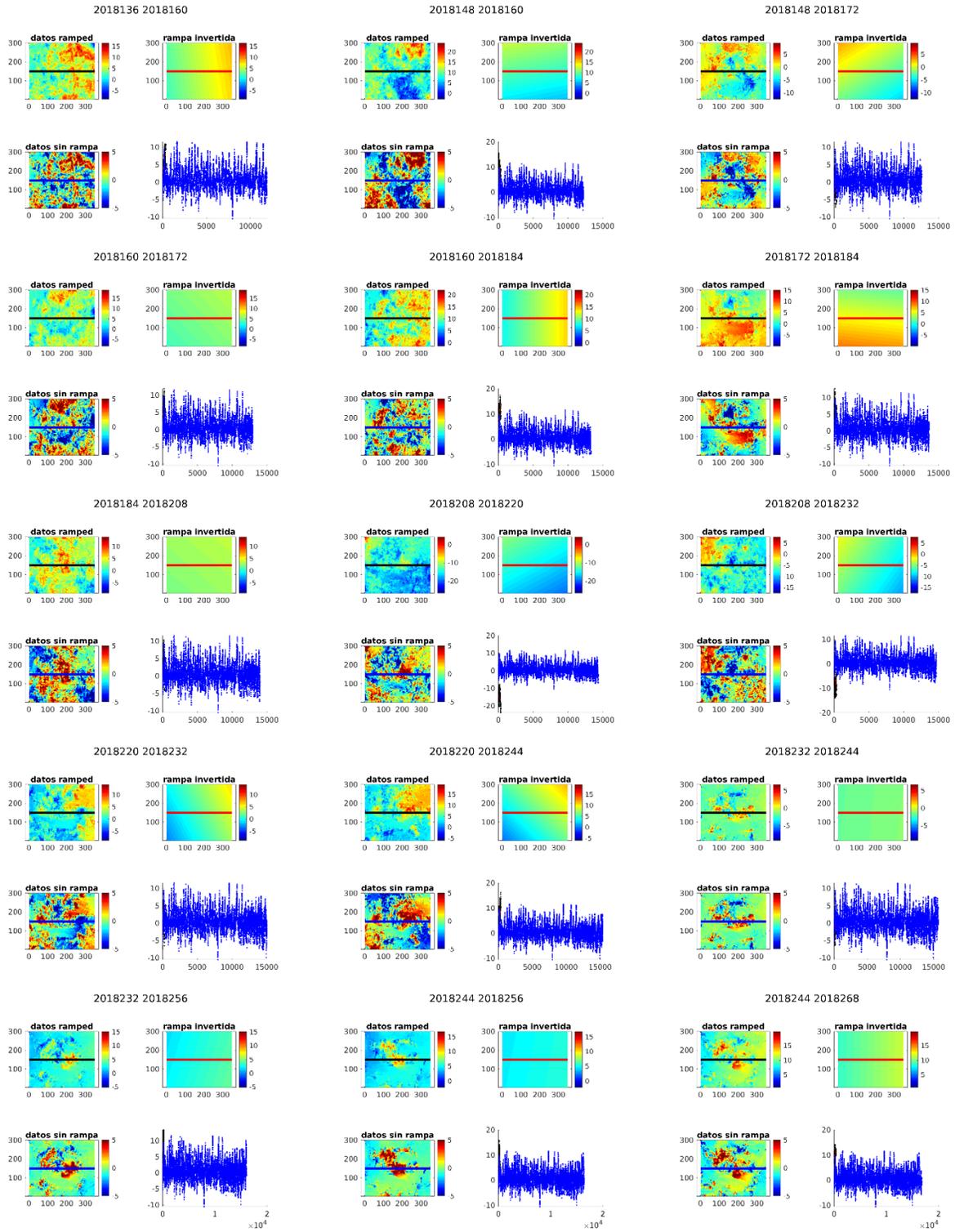


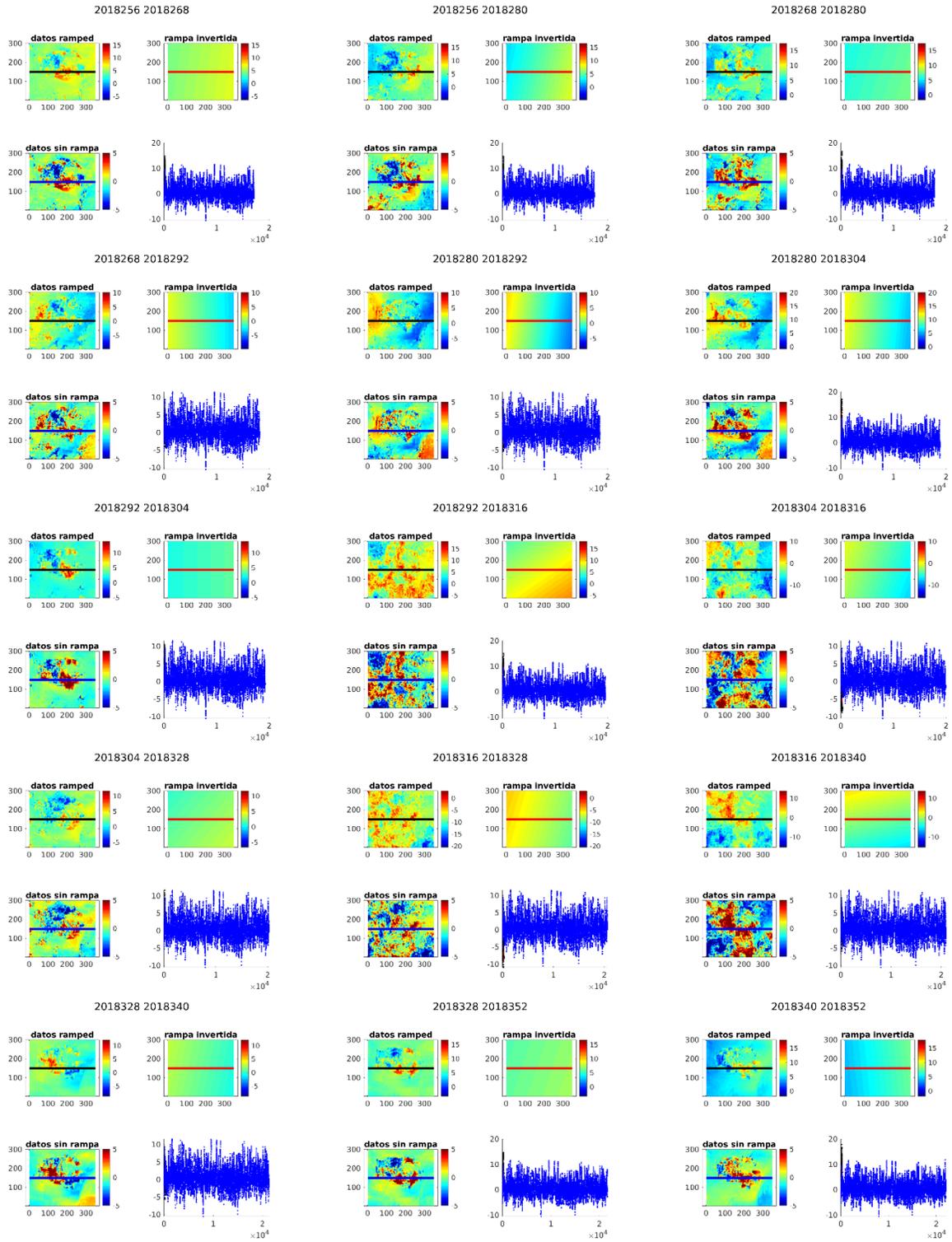
Anexo E: Productos desenrollados, caso yacimiento El Teniente (descendente)

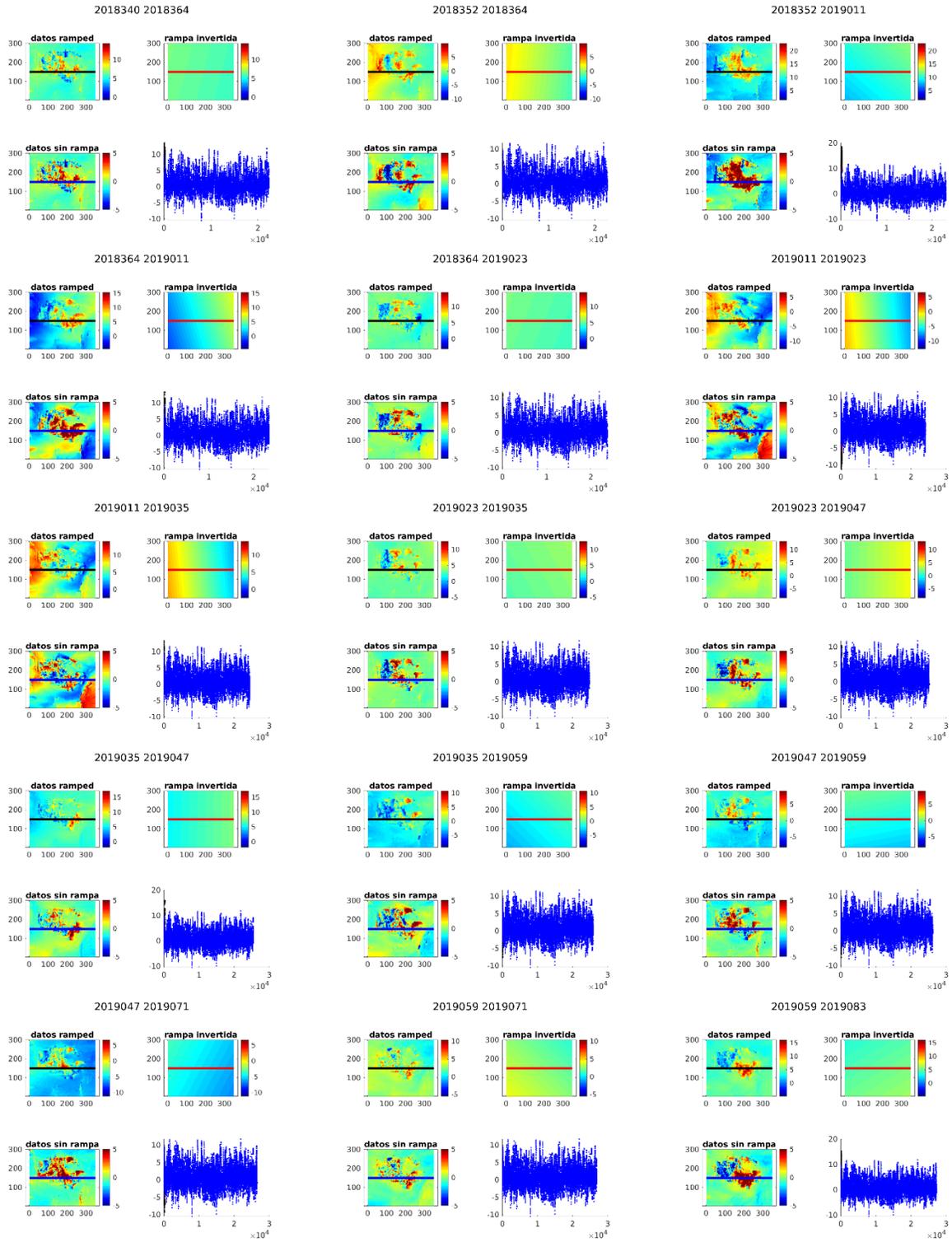


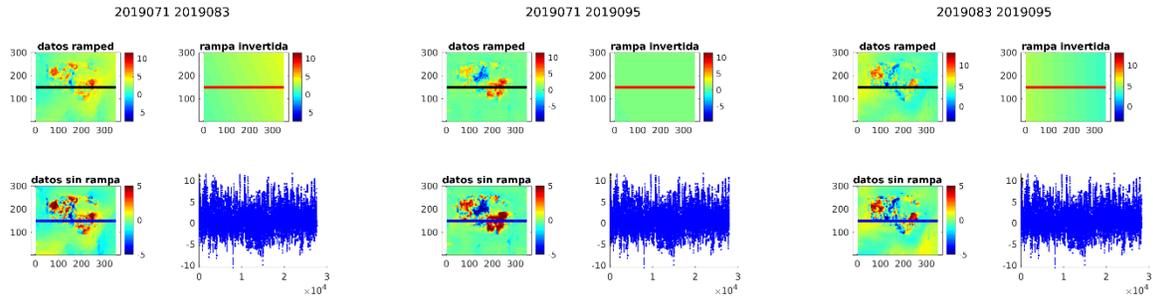




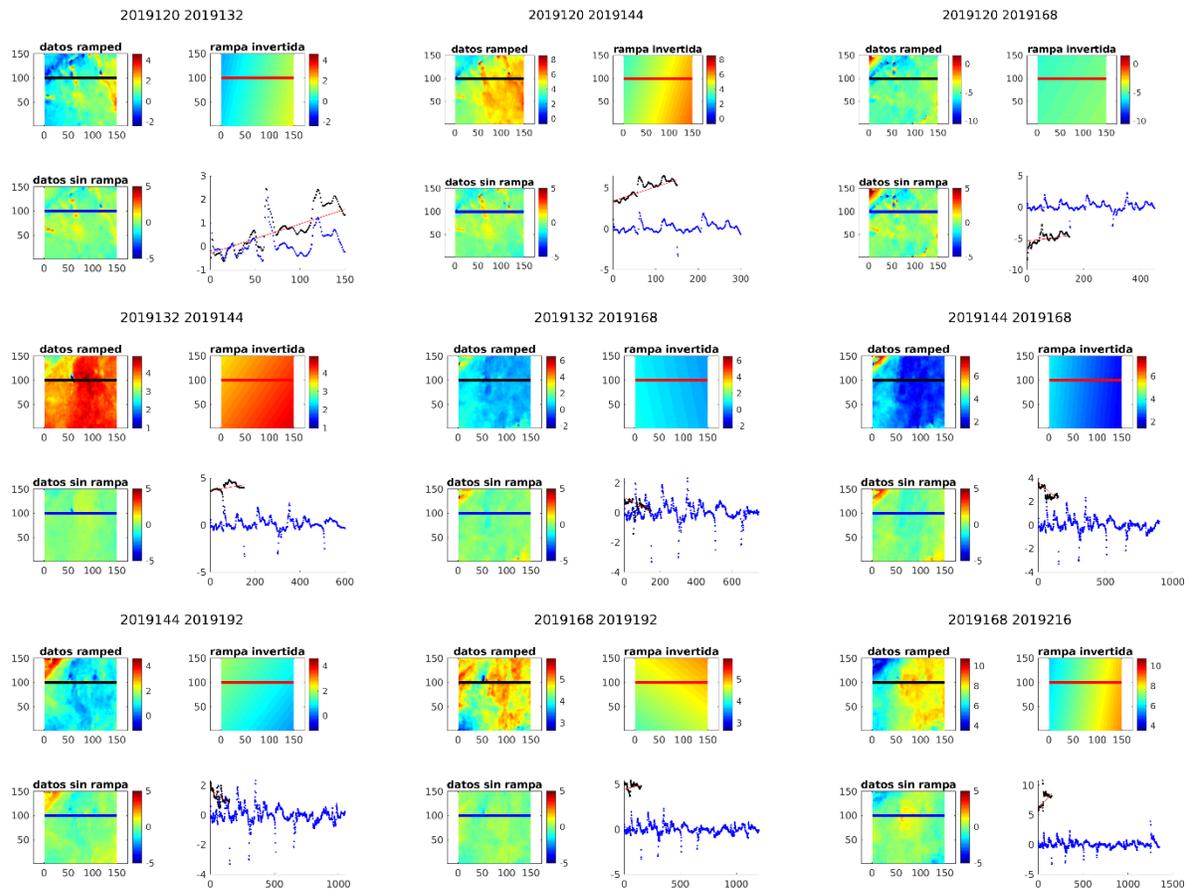


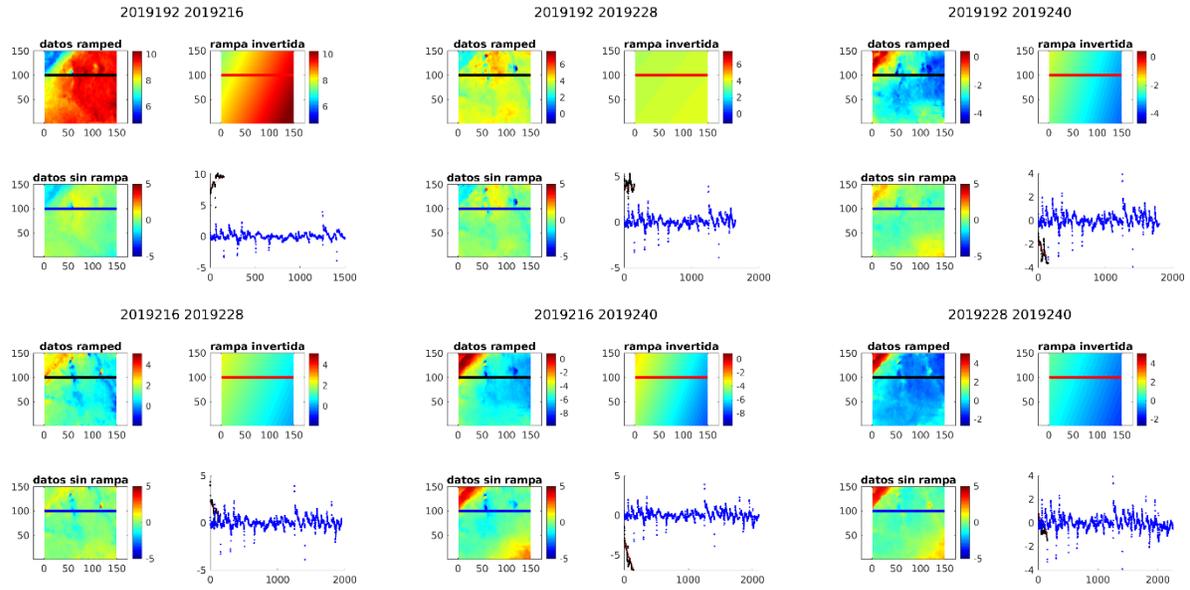




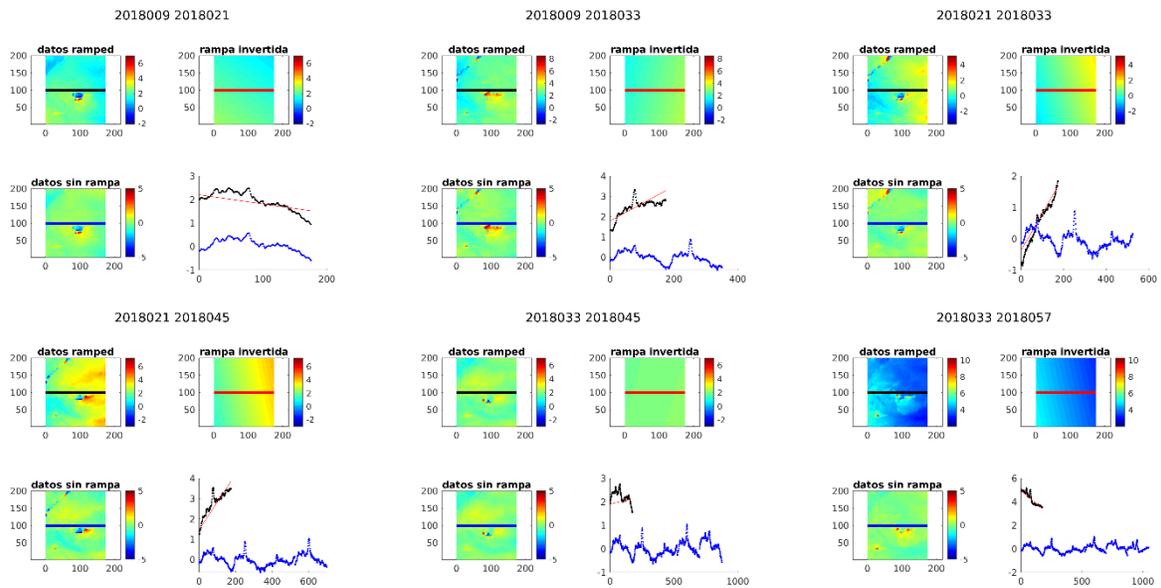


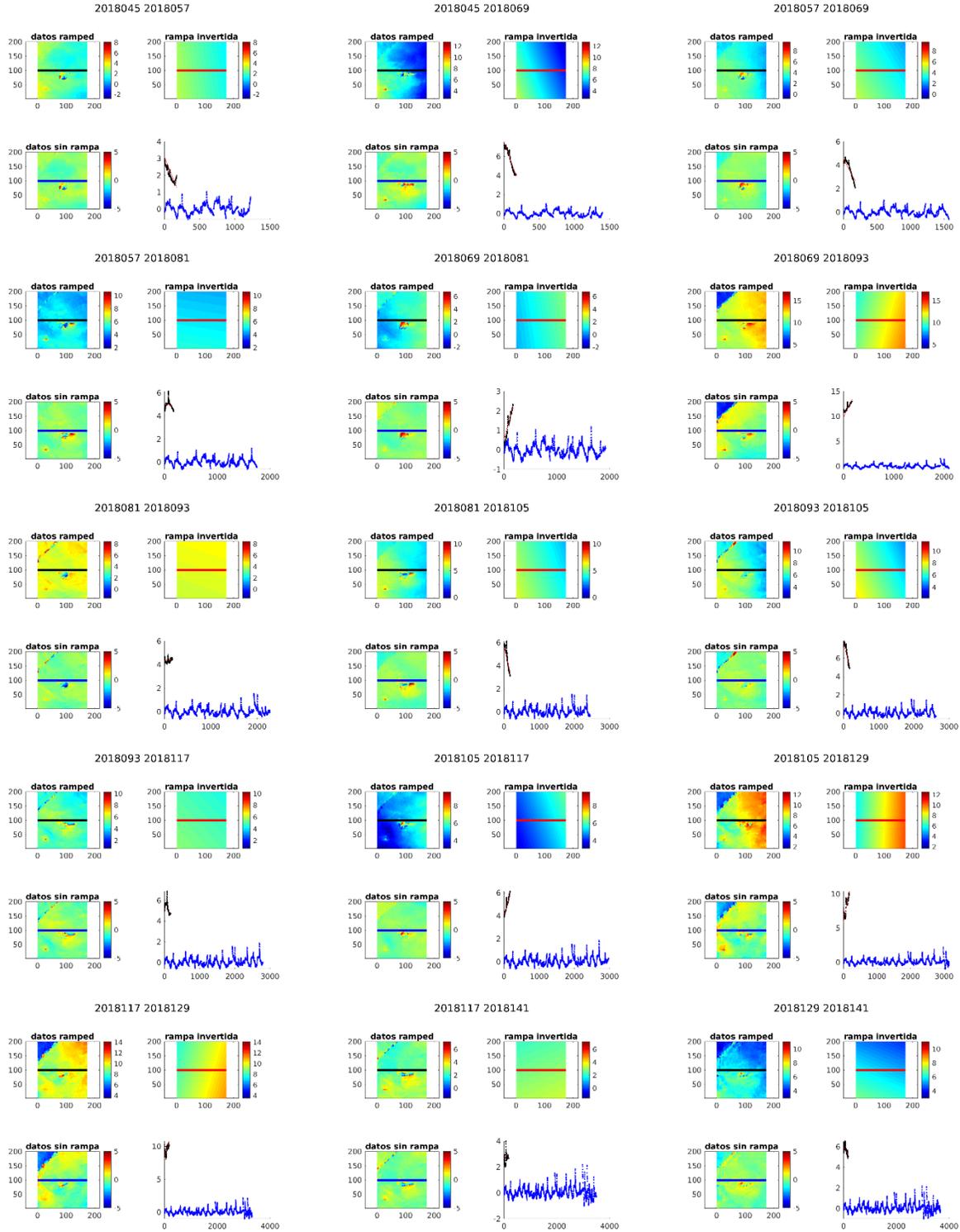
Anexo F: Productos desenrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (Ascendente) – posterior al evento principal del deslizamiento

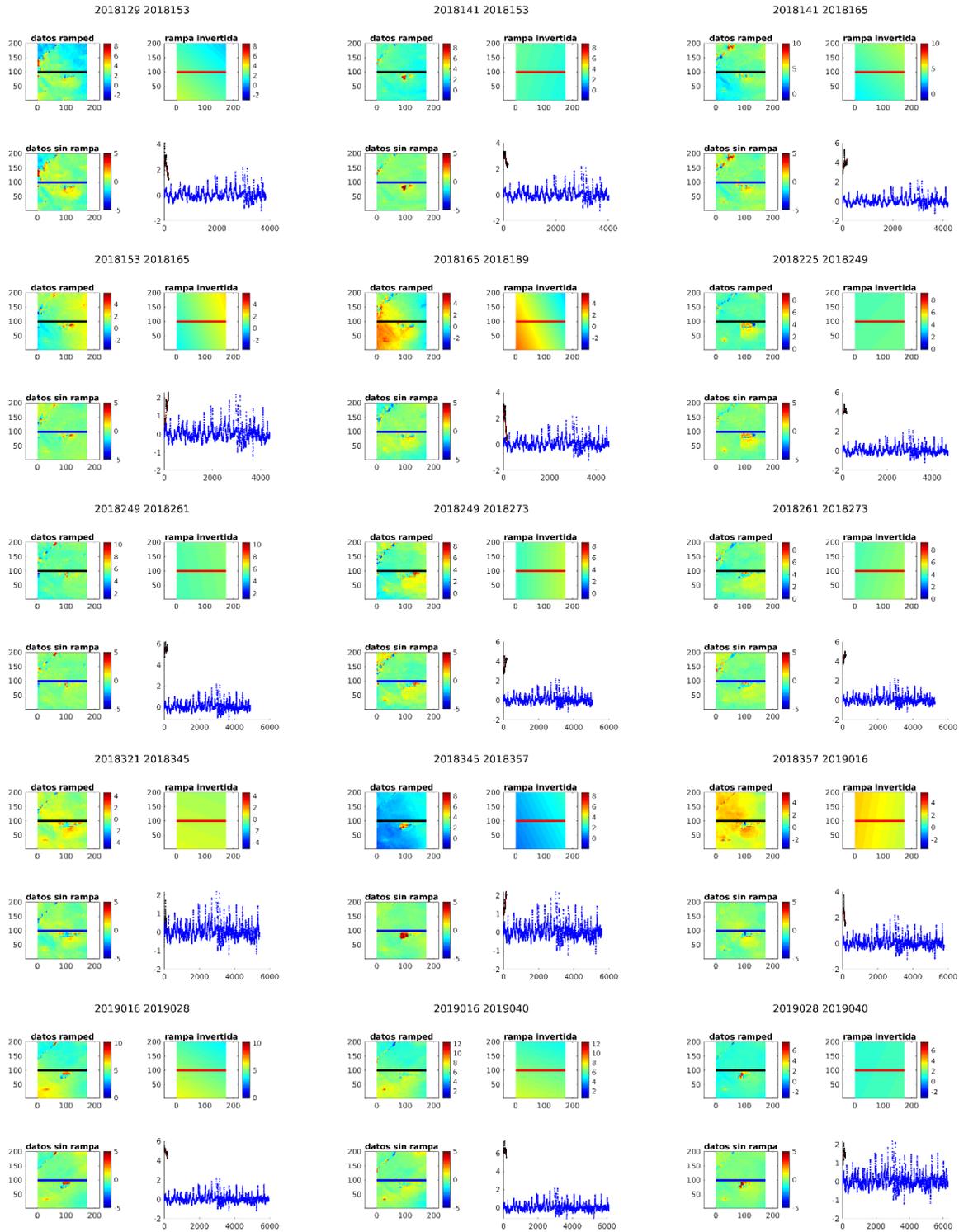


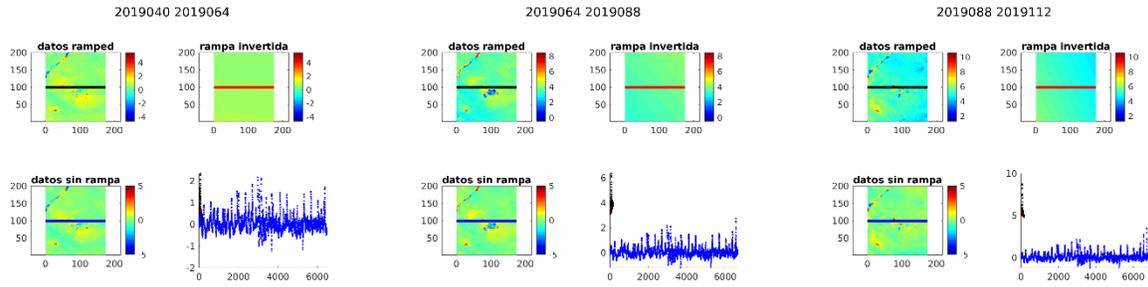


Anexo G: Productos desenrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (descendente)- desde el momento previo al posterior al evento principal

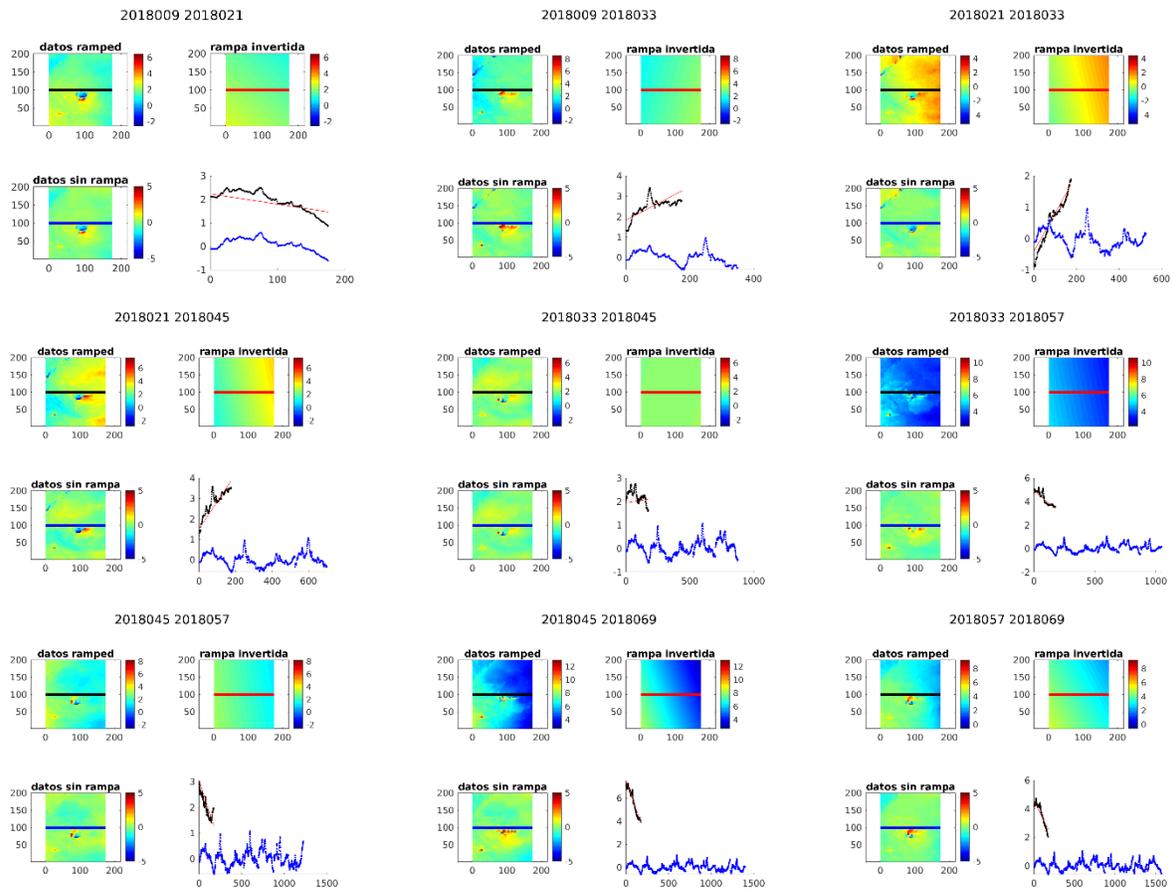


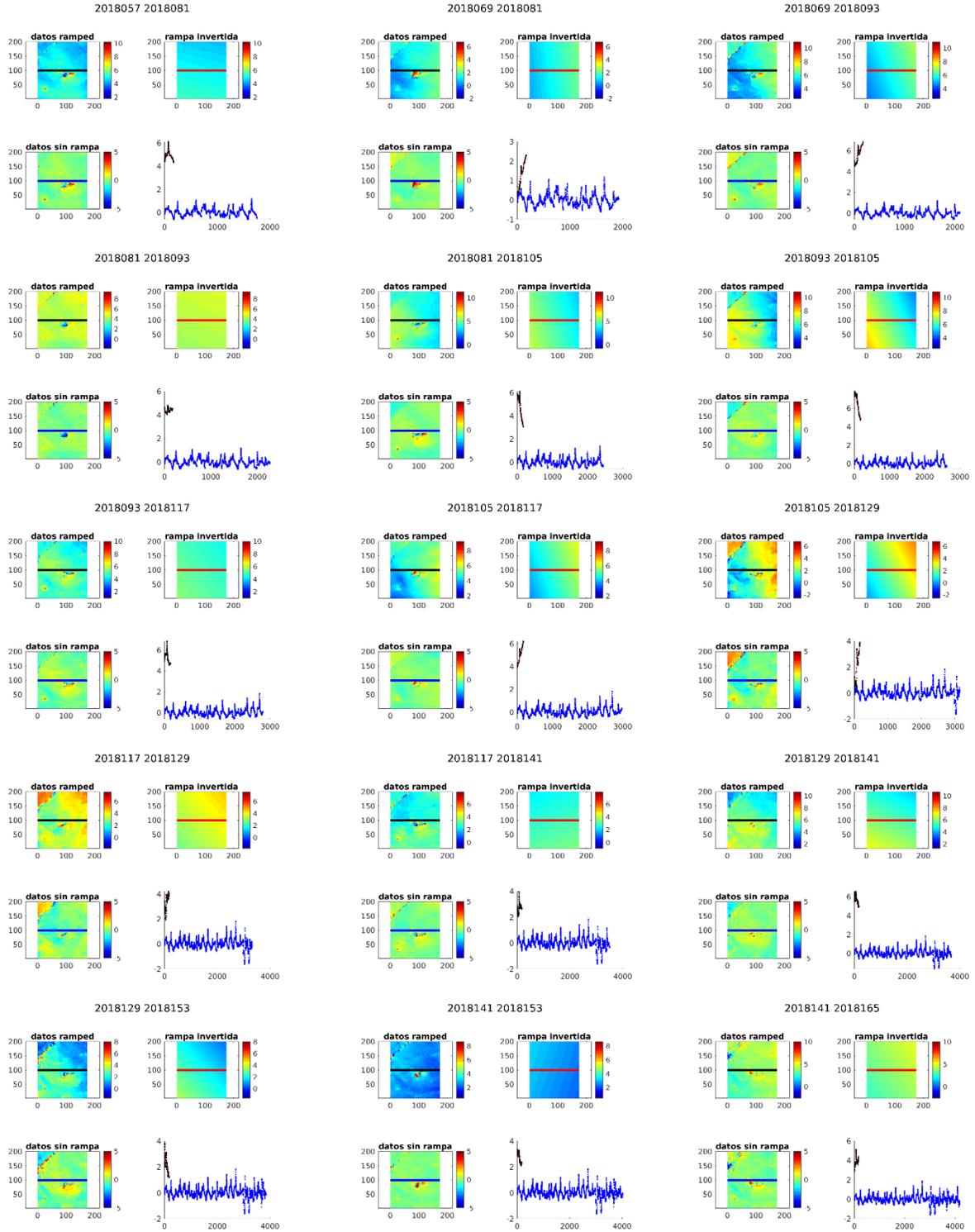




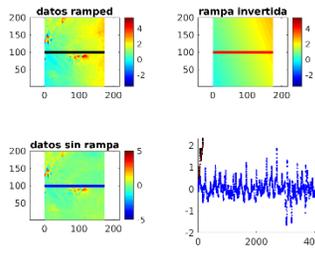


Anexo H: Productos desenrollados, caso deslizamiento Yerba Loca (descendente)-momento previo al evento principal





2018153 2018165



2018165 2018189

