



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**CONTROL DE SUBSIDENCIAS
DEL TERRENO EN PINHEIRO
(MACEIÓ - ALAGOAS,
BRASIL) MEDIANTE TÉCNICAS
MULTITEMPORALES DE
INTERFEROMETRÍA RADAR DE
SATÉLITE**

Alumno: Lucas Goes Passos de Carvalho

Tutor: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros
Dpto: Departamento de Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría

Junio, 2020



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

D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: Control de subsidencias del terreno en Pinheiro (Maceió - Alagoas, Brasil) mediante técnicas multitemporales de interferometría radar de satélite, que presenta Lucas Goes Passos de Carvalho, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2020

El alumno: 

Lucas G. P. Carvalho

El tutor:



Firmado digitalmente por
RUIZ ARMENTEROS ANTONIO
MIGUEL - 26016256J
Fecha: 2020.06.18 19:57:28
+02'00'

Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Agradecimientos

Siempre me he considerado muy privilegiado por haber conocido personas muy especiales a lo largo de mi vida. Eso no sería diferente en los dos últimos años, así que quiero agradecerles por ayudarme en este viaje.

La Universidad de Jaén (UJAEN) por haber provisto de la infraestructura necesaria para llevar a cabo este trabajo. Además, por haberme brindado varias ocasiones y momentos que me ayudaron a crecer.

A mi profesor y tutor Don Antonio Miguel Ruiz Armenteros, por haberme elegido para formar parte del grupo de investigación "Microgedesia Jaén" (RNM-282) altamente cualificado y importante, estaré por siempre agradecido. Además, por haberme proporcionado un ambiente muy especial para el desarrollo de ese trabajo. Gracias por su orientación, el esfuerzo y la paciencia, principalmente por la ayuda en las interpretaciones y discusiones de los resultados interferométricos y en la realización del trabajo.

Al Dr. Daniele Perissin por proporcionar una licencia del software SARPROZ y su soporte durante mi periodo como becario en el grupo de investigación.

Finalmente, quiero agradecer el apoyo incondicional de mi madre y mis amigos que han estado allí todo el tiempo.

Índice de figuras

Fig. 1 - Mapa de localización del área de estudio - Fuente propia.	1
Fig. 2 - Mapa tectónico del Estado de Alagoas adaptado de Mendes y otros (2016).	5
Fig. 3 - Mapa geomorfológico del estado de Alagoas. Fuente: Gobierno del Estado de Alagoas – SEPLANDE.	7
Fig. 4 - Mapa hipsométrico de la zona de estudio.	8
Fig. 5 - Adaptado de Moreira, Alberto (2013).	11
Fig. 6 - Fuente: Hassen (2001) adaptado al castellano.	12
Fig. 7 - Ejemplo de foreshortening. Fuente: Raney (1998).	14
Fig. 8 - Ejemplo de sombra.	14
Fig. 9 - Ejemplo de layover. Fuente: Raney (1998).	15
Fig. 10 - Desplazamiento de la plataforma en una órbita cualquiera.	16
Fig. 11 - Geometría de la adquisición y huella del radar.	18
Fig. 12 – Modo de escaneado TOPSAR. Fuente: Sentinel Product Definition.	19
Fig. 13 - Imagen de Intensidad de la zona de interés.	21
Fig. 14 - La relación entre amplitud, fase y longitud de onda de una señal de radar. Fuente: ESA.	22
Fig. 15 - Esquema de la interacción del haz con el objeto.	23
Fig. 16 - Doble respuesta en una única celda de resolución.	23
Fig. 17 - Suma vectorial de todas las respuestas de la reflexión sobre la celda de resolución.	24
Fig. 18 - Detalles de una onda electromagnética.	25
Fig. 19 – Polarización de las microondas (Jensen, 2000).	26
Fig. 20 - Parámetros geométricos de un sistema de Interferometría SAR satelital (ESA, 2007).	27
Fig. 21 - Imagen adaptada del Sentinel-1 Toolbox 2016.	28
Fig. 22 – Mapa de coherencia del norte de la Sicilia- Italia (ESA, 2007).	31
Fig. 23 – Representación del desenrollado de la fase. Fuente: TOPS Interferometry Tutorial (ESA)	31
Fig. 24 - Geometría del DInSAR	35
Fig. 25 - Simulaciones de fase para (a) un píxel de dispersores distribuidos y (b) un píxel con un dispersor persistente. Los gráficos superiores representan los dispersores que contribuyen a la fase de un píxel en una imagen y las inferiores simulaciones de la fase para 100 iteraciones.	38
Fig. 26 – Procesado para formar la imagen SLC. Fuente: ESA Technical Guides.	40
Fig. 27 - Líneas de base de las imágenes slaves en relación a imagen master.	45
Fig. 28 - Cantidad del número de imagen por valor del centroid Doppler.	46
Fig. 29 - Selección del Subswath y polarización de la imagen master en el entorno SNAP.	47
Fig. 30 - Subdataset con las características determinadas (IW1-VV).	48
Fig. 31 - Área máxima basada en las imágenes SLC.	49
Fig. 32 - Recorte de la zona de interés.	50
Fig. 33 - Ventana de creación del interferograma.	53

Fig. 34 - Interferograma formado en el proceso.....	53
Fig. 35 - Gráficos de la desviación y ruido del proceso de weeding en cada uno de los 6 PATCH.....	59
Fig. 36 - Imagen de todos los interferogramas enrollados.	60
Fig. 37 - Imágenes de los interferogramas envueltos. Tres ejemplos de los 74 pares.	61
Fig. 38 - Interferogramas desenrollados (resultado del phase unwrapping).....	63
Fig. 39 - Imagen del error espacialmente correlado (SCLA).	64
Fig. 40 - Plot de la estimación atmosférica de la imagen master y del error orbital.....	65
Fig. 41 - PSI. Fase desenrollada (rad) menos SCLA, master AOE, órbitas y slave AOE, en radianes.	67
Fig. 42 - PSI. Fase desenrollada menos SCLA, master AOE, órbitas y slave AOE. En milímetros.....	68
Fig. 43 - La variación de la deformación acumulada (mm) en relación al año de 2016.	69
Fig. 44 - Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2016-2017.	70
Fig. 45- Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2017-2018.	71
Fig. 46 - Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2018-2019.	72
Fig. 47 - Velocidad media (mm/año) en dirección de la LOS.	74
Fig. 48 - Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en la dirección LOS.	75
Fig. 49 - velocidad media (mm/año) en dirección LOS superpuestas en imagen de Google Earth. Zona de referencia indicada mediante una estrella.	75
Fig. 50 - Puntos amuestras sobre la velocidad media (mm/año) en dirección LOS.	76
Fig. 51 - Series temporales de la deformación producida (mm) para el punto-muestra 1.	77
Fig. 52 - Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra de 2 hasta 5.	78
Fig. 53 -Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra de 7 hasta 15.	79
Fig. 54 - Correlación entre resultado del procesado InSAR y los efectos causados en la zona por la subsidencia.	80
Fig. 55 - Correlación entre VLOS por arriba del 3.0 mm/año y los efectos causados por la subsidencia.	81
Fig. 56 - Correlación entre inmuebles afectados y el mapa de calor con las velocidades medias.	82
Fig. 57 - Mapa de la disposición de los pozos y la VLOS media.	83
Fig. 58 - Probable vector de fuerzas del hundimiento.....	83

Índice de tablas

Tabla. 1 - Ángulos de incidencia de la técnica TOPSAR. Fuente: Sentinel Product Definition.....	20
Tabla. 2 - Características del modo IW. Fuente: ESA user Guides adaptado al Castellano..	51
Tabla. 3 - Características del dataset de Sentinel-1A utilizado.	43
Tabla. 4 - Características del dataset	50
Tabla. 5 - Divisiones de los PATCHs y sus candidatos de PSC calculados.....	56

Resumen

La emergente necesidad de monitorizar de forma más rápida, continua y precisa se ha convertido en el dogma central del control de deformaciones. El rápido desarrollo de las tecnologías espaciales ha posibilitado la capacidad de detectar desplazamientos naturales o de estructuras antrópicas desde el espacio, con elevada precisión y volumen de información. Dentro de este progreso, la técnica InSAR (Satellite Radar Interferometry) facilitó el desarrollo de este campo, teniendo en cuenta que posibilita la observación y monitorización del espacio continuo terrestre con el coste reducido en relación a las técnicas geodésicas y fotogramétricas ya establecidas. Además, con su característica de sensor activo y con la variedad de características ondulares (longitud y polarización), lo torna un sistema de gran potencial.

En este estudio se aplican las técnicas de interferometría radar de satélite para monitorizar mediante series temporales una zona de hundimiento localizada en el barrio del Pinheiro que está ubicado en la 3ª Región Administrativa de Maceió (capital del estado brasileño de Alagoas). El 15 de febrero de 2018 presentó numerosas grietas en los hogares y hundimiento en la vía pública, fenómenos que se intensificaron después de las fuertes lluvias y tras un evento sísmico de magnitud 2,4 en la escala Richter el 3 de marzo de 2018. La Defensa Civil identificó tres grietas principales, cada una de aproximadamente 1,5 km de largo, afectando a 2.480 casas, de las cuales más de 500 familias tuvieron que abandonar sus hogares.

En este trabajo analizamos imágenes procedentes del satélite Sentinel-1A obtenidos de la Agencia Espacial Europea (ESA). Se aplicó la técnica de Interferometría Radar de Apertura Sintética (MT-InSAR) para monitorizar la deformación dentro del periodo 2016 a 2019. Se utilizó la capacidad de procesamiento del software Sentinel Application Platform (SNAP) en conjunto con el método InSAR multitemporal de Stanford para dispersores persistentes (StaMPS). Los resultados logrados indicaron el comportamiento del hundimiento de la zona con el paso del

tiempo, constatando una deformación media máxima en la dirección (LOS) de hasta - 7.1 mm/año en la zona más afectada del área de estudio. Estos valores de subsidencias adquiridos coinciden espacialmente con las deformaciones superficiales observadas en las edificaciones y vías del barrio, por consiguiente, se presentan resultados coherentes.

Índice

1	Introducción.....	1
1.1.	Justificación	1
1.1.1	Justificación de la zona	1
1.1.2	Justificación del método aplicado.....	3
2	Caracterización de la zona de estudio.....	4
2.1	Geología local del barrio de Pinheiro.....	5
2.2	Geomorfología	6
3	Antecedentes	8
3.1	Subsidencia en las grandes ciudades	8
3.2	Estudios de subsidencia y deformaciones con InSAR	9
4	Objetivos	10
5	Material y Métodos	10
5.1	Teledetección Radar de Apertura Sintética (SAR).....	10
5.2	Geometría de adquisición	12
5.3	Distorsiones Geométricas en las Imágenes Radar	13
5.4	Principios de funcionamiento SAR	15
5.5	Imagen detectada	17
5.6	Imagen SAR compleja.....	19
5.7	La fase SAR.....	21
5.8	Interacción con los objetos (Scattering).....	22
5.9	Speckle	24
5.10	Polarimetría en los radares	25
5.11	Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR).....	26
5.11.1	Principios de la Interferometría SAR	26
5.11.2	Geometría InSAR.....	26
5.11.3	Fase Interferométrica	28
5.11.4	Coherencia Interferométrica (γ)	29
5.11.5	Desenrollado de la fase (Phase Unwrapping)	31
5.11.6	Contribución de ruidos en la fase (Decorrelación)	32
5.12	Interferometría SAR diferencial	34

5.13	Interferometría multitemporal mediante Persistent Scatteres (PSI)	36
5.14	Material	39
5.14.1	Imágenes SAR – Sentinel-1A SLC IW	39
5.14.2	Modelo digital de elevaciones preciso	41
5.14.3	Órbitas precisas	41
5.14.4	Datos atmosféricos	41
5.14.5	Datos CPRM	41
5.14.6	Software empleado	42
5.15	Metodología del procesado	42
5.15.1	Procesamiento de las imágenes SLC	42
5.15.2	Selección del dataset	43
5.15.3	Selección de la subpasada y polarización	46
5.15.4	Aplicación de las órbitas satelitales	48
5.15.5	Selección de la zona de Interés (Cropping)	48
5.15.6	Extracción de la master y slaves	50
5.15.7	Coregistro	50
5.15.8	Cálculo de la fase topográfica	51
5.15.9	Creación de los interferogramas	52
5.15.10	Geocodificación	54
5.15.11	Exportación del SNAP a StaMPS	54
5.15.12	Definición de los PSC	55
5.15.13	Procesado PSI	56
5.15.14	Carga de los datos	57
5.15.15	Estimación del ruido de la fase	57
5.15.16	Selección de PS	58
5.15.17	PS weeding	58
5.15.18	Corrección de fase	59
5.15.19	Desenrollado de la fase (Phase unwrapping)	61
5.15.20	Estimación del error espacialmente correlado (SCLA) y del error atmosférico y orbital de la imagen master (AOE)	64
5.15.21	Filtrado de los artefactos atmosféricos	72
6	Resultados y Discusión	73
6.1	Mapa de velocidad media	73
6.2	Correlaciones con los datos observados por la CPRM	79
7	Conclusiones	84
8	Bibliografía	86

9	Anejos.....	89
9.1	Anejo 1. Mapa de correlación entre resultado del procesado InSAR y los efectos causados en la zona por la subsidencia.....	89
9.2	Mapa de correlación entre VLOS mayores de -3.0 mm/año y los efectos causados por la subsidencia.....	90
9.3	Mapa de la correlación entre inmuebles afectados y el mapa de calor con las velocidades medias.	91
9.4	Mapa de la disposición de los pozos y la VLOS media.....	92

1 Introducción

1.1. Justificación

1.1.1 Justificación de la zona

El ámbito de estudio de este trabajo es el barrio del Pinheiro que está ubicado en la costa de la 3ª región administrativa de Maceió, capital del estado de Alagoas en noreste de Brasil. El barrio tiene un área de 98 km², caracterizado por ser una zona residencial situada entre el gran eje Fernandes Lima y la laguna Mandaú (Fig. 1).

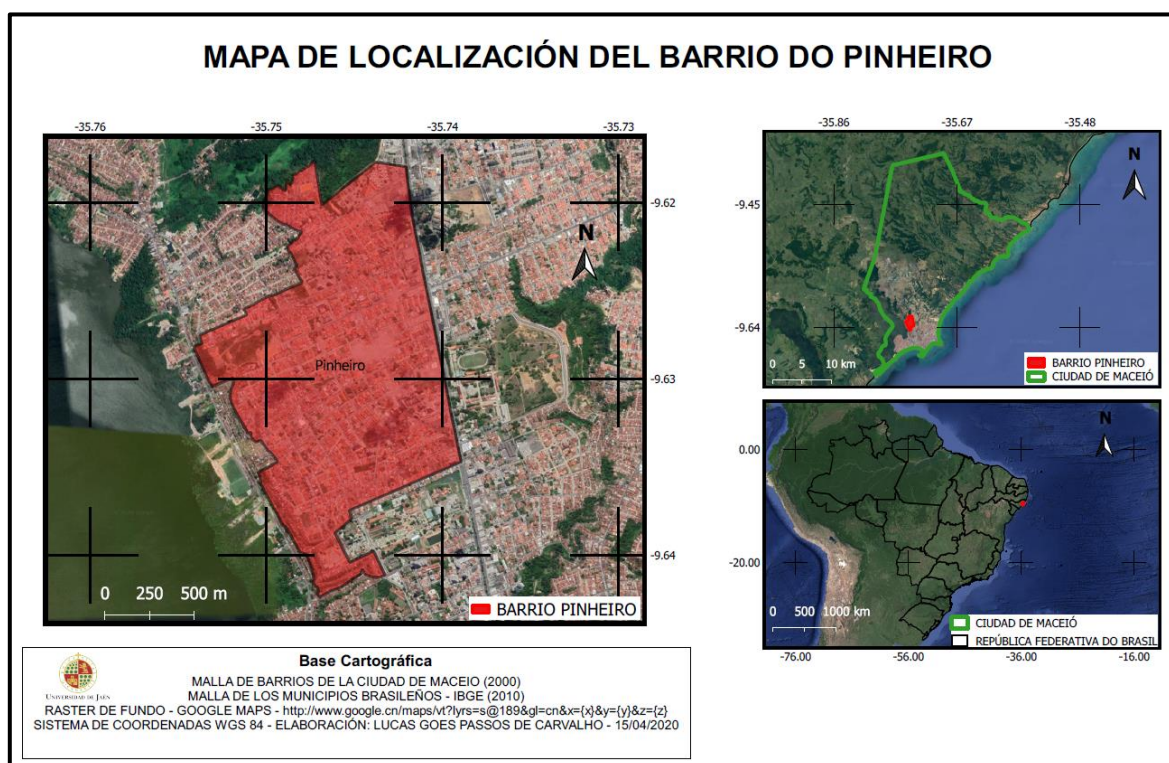


Fig. 1 - Mapa de localización del área de estudio - Fuente propia.

En los últimos años, la zona presentó el surgimiento de innumerables grietas en los inmuebles residenciales y hundimientos de las vías públicas. A principio del año 2018, los fenómenos se intensificaron a consecuencia de las lluvias del final del verano, un fenómeno muy típico de estas zonas de Brasil, según Hastenrath y Heller (1977). Los datos de precipitación de 17 estaciones pluviométricas en el estado de Alagoas registraron precipitaciones mayores que 50mm/24h. Además, el día 3 de

marzo de 2018 hubo en la zona un terremoto de magnitud 2.4 m_R (escala de magnitud regional de Brasil).

Referente a las acciones antrópicas ligadas con lo ocurrido, tenemos en la zona la extracción de sal gema y agua subterránea que es operada por una concesión entre el gobierno estatal y una empresa privada desde la década de los 70. En esta zona existen un total de 35 pozos de extracción, 14 de ellos direccionales y 21 verticales.

Tras estos eventos, la formación de grietas se fue intensificando, llegando a ser declarado por los organismos públicos responsables el estado de emergencia dentro del perímetro afectado. En concreto, la situación generó dos grandes problemas para la población local afectada, uno de carácter social y otro económico. Debido a su carácter residencial, la mayoría de las personas afectas tuvieron que dejar sus casas, las vías de transporte fueron inhabilitadas y, además, las pequeñas tiendas locales cerraran sus servicios.

Durante el año 2019 se realizaron diversos estudios, consultas públicas y acciones para mitigar el proceso de hundimiento ya establecido. Hasta noviembre de 2019, estos han consistido en intentos de alojar a los residentes en hogares temporales con el fin de lograr el aislamiento de las zonas potenciales de mayor riesgo. En este sentido, la monitorización multitemporal de esta zona tiene un papel muy importante como es el de describir el comportamiento de la deformación y comprobar si los esfuerzos de contingencia y/o reparación están surtiendo el efecto esperado.

Los estudios multitemporales, también conocidos como estudios evolutivos, consisten en el análisis de un fenómeno, proceso u objeto de interés, en distintos instantes o intervalos de tiempo, con el fin de entender el comportamiento del objeto durante un determinado periodo.

Por tanto, este trabajo se realizará un estudio multitemporal por medio de interferometría radar de satélite para analizar y obtener información sobre el pasado y estado actual de la deformación presente en dicha zona.

1.1.2 Justificación del método aplicado

El término interferometría se refiere a las técnicas que utilizan las propiedades coherentes y geométricas de la radiación electromagnética para comparar dos o más ondas. El USGS (U.S. Geological Survey) clasifica el método de interferometría radar de apertura sintética (InSAR) como un método efectivo para medir los cambios en la altitud de la superficie terrestre, realizando mediciones de alta densidad y en grandes áreas a partir del uso de las señales de radar de los satélites en órbita terrestre, obteniendo alto grados de resolución y detalles espaciales.

La interferometría de imágenes radar ha madurado a una técnica geodésica ampliamente utilizada para medir la topografía y la deformación de la tierra. En particular, el análisis e interpretación de los datos interferométricos requiere una comprensión profunda de los principios de la técnica, las fuentes y la propagación del error (Hanssen, 2001).

La emergente necesidad de monitorizar de forma más rápida, continua y precisa se convierte en la temática central cuando tratamos del tema del control de deformaciones. El rápido desarrollo de las tecnologías espaciales ha posibilitado la cuantificación del espacio de desplazamientos naturales y/o de estructuras antrópicas, con elevada precisión ofreciendo un gran volumen de información. Dentro de este progreso, la técnica InSAR tuvo una gran influencia positiva, debido a que posibilita la observación y la monitorización continua de la superficie terrestre con un coste reducido en relación a las técnicas geodésicas y fotogramétricas ya establecidas. Además, trabaja con un sensor activo y con una variedad de características ondulares (longitud y polarización), que lo torna en un sistema con un gran potencial.

En los últimos años se ha empleado la interferometría radar de apertura sintética para monitorizar el hundimiento del suelo en áreas urbanas relacionadas con la construcción de importantes estructuras de ingeniería (Catalão y otros, 2011). Esta se presenta también como una potente herramienta para controlar la sobreexplotación de recursos hídricos subterráneos. La técnica permite la monitorización de la evolución del hundimiento relacionado con el descenso del nivel de agua subterránea y los daños en las infraestructuras no percibidos por la población o autoridades locales (Ruiz-Constán y otros, 2016).

Combinando las posibilidades de detección precisas de la técnica de interferometría radar con la disponibilidad de datos, esta se torna en una herramienta ideal para el caso de estudio.

2 Caracterización de la zona de estudio

Maceió es la capital del estado de Alagoas, situada en la región del noreste de Brasil. Ocupa un área de 509.5 km², siendo el municipio más poblado del estado con aproximadamente 1.018.948 de personas en el año de 2019 según el IBGE (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística), representando la 17ª ciudad más poblada de Brasil. Se encuentra acotada entre las latitudes 9°30'18 S – 9°42' S y longitudes 35°41 O y 35°50' O. Fisiográficamente, el estado tiene el 46.36% de su territorio insertado en el polígono de sequía, con el clima semiárido tipo BSH según la clasificación Köppen de 1954. La otra parte, llamada de zona da mata, donde se encuentra Maceió, tiene un clima tropical húmedo, con lluvia en invierno durante el periodo de abril a agosto, con una variación de temperatura entre 22.5°C a 29.0°C todo el año.

La vegetación local presenta aún algunas pocas áreas de bosque tropical, incluso zonas naturales de mangle, también conocidas como manguezales. Esta zona consiste en un ecosistema de litoral que se produce en tierras cercas del nivel del mar, formado por una capa de lodo o arenosas, que está sumergida en gran parte en agua salina y están sujetas a influencia directa de la marea. Al total el área corresponde a cerca de 5.2 km² que representa en torno al 1.0% del área total del municipio.

La división tecno-estructural del territorio estatal de Alagoas está insertado en la denominada provincia borborema, que consiste esencialmente en litotipos precámbricos, que incluyen núcleos arcaicos a paleoproterozoicos y bandas plegadas del meso a neoproterozoico (Santos, 2003). La ciudad de Maceio está insertada en un dominio tectónico de cobertura fanerozoica, representado por sedimentos paleozoicos de la cuenca Sergipe-Alagoas (BSA) que fue uno de los resultados de la fragmentación del supercontinente Gondwana entre el continente sudamericano y el continente africano, como se puede ver en la Fig. 2. Según Mendes (2016), esta zona constituye una entidad tectónica de margen pasiva, representando el episodio inicial del océano Atlántico, que culminó en la separación de placas africanas y

sudamericanas y con la formación de los Andes oeste. Además, según Mohriak (2003), entre las cuencas del margen continental brasileño, la BSA presenta la sucesión más completa de secuencias estratigráficas, siendo reconocidas pre-rift, syn-rift, transicional y post-rift con diferentes fases de desarrollo tectono-sedimentario.

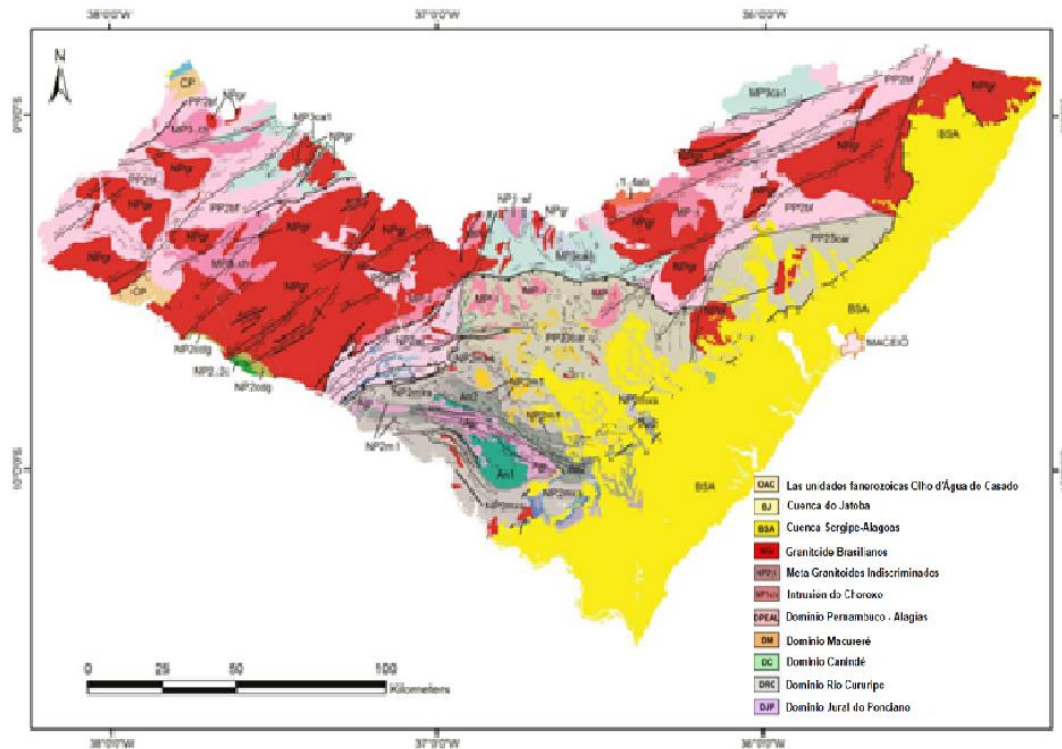


Fig. 2 - Mapa tectónico del Estado de Alagoas adaptado de Mendes y otros (2016).

2.1 Geología local del barrio de Pinheiro

De acuerdo con el CPRM (Servicio geológico de Brasil) el barrio de Pinheiro fue construido sobre sedimentos poco consolidado, constituidos básicamente de arena, limo y arcilla, teniendo niveles concretos de hierro y conglomerados con disposición de las capas en forma irregular. Estos sedimentos son conocidos en la literatura como grupo de barreras, según Aria y otros (1988,1994).

La estratigrafía es conocida gracias a los perfiles de los pozos de explotación de sal gema localizados en la zona del barrio, con pozos en su entorno, con lo cual posibilitaron la construcción de un perfil estratigráfico de cerca de 1200 m de profundidad.

El perfil trazado por los posteriores estudios de la explotación mineral en la zona, está disponible por el servicio geológico de Brasil, siendo caracterizado a partir de una profundidad de 80 m donde hay rocas que pertenecen a la subcuenca Alagoas, compuesto por arcillas intercalados con arenitas de granulometría. A partir de esta profundidad hasta 280 m se encuentran calizas, algunas veces dolomitas, intercaladas con arcillas y esquistos.

A la profundidad comprendida entre los 280 y 330 m predominan las calizas intercaladas con lalitas y arenitas. Una vez que se alcanza la profundidad entre 350 y 390 m, se encuentran rocas compuestas por fragmentos de cuarcita angulosas. Este conglomerado tiene como matriz más fina de arena conglomerada.

A una profundidad cercana a los 830 m predominan la formación de lalitas, calcita negra y arenita. Esta formación se localiza justo arriba de una capa de sal, compuesta de un elevado contenido de halita. Las rocas con alto contenido de halita tienen aproximadamente 400 m de profundidad, en algunas zonas con su base llega hasta 1255 m de profundidad.

2.2 Geomorfología

La geomorfología se define por sedimentos y, en general, presenta una topografía ligeramente ondulada. Por lo general, forman grandes cuerpos sub-horizontales, con ángulos de inclinación hacia el SE y hacia el océano.

La Fig. 3 representa el mapa de la geomorfología del estado de Alagoas, destacando nuestra área de estudio, que es zona al sur de la ciudad de Maceió.

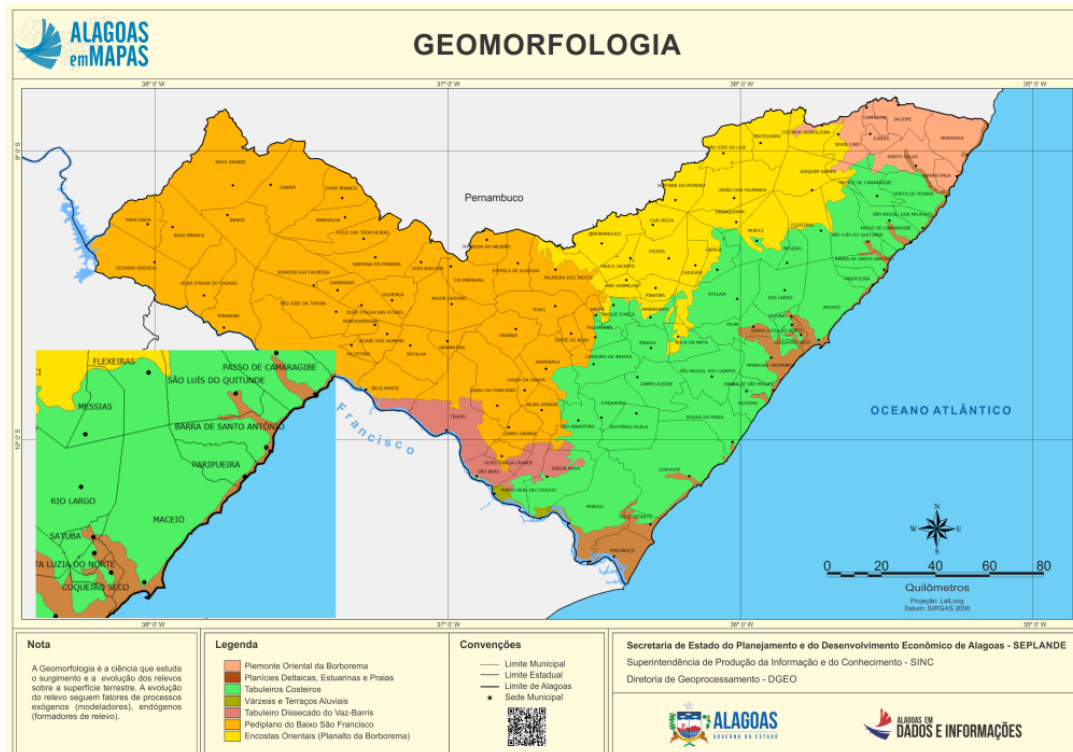


Fig. 3 - Mapa geomorfológico del estado de Alagoas. Fuente: Gobierno del Estado de Alagoas – SEPLANE.

Una información importante sobre la geomorfología es el mapa hipsométrico de la región, el cual puede ser fácilmente confeccionado con ayuda de un modelo de elevaciones. El barrio del Pinheiro está localizado en una zona muy próxima del nivel del mar, con altitudes entre aproximadamente 1 a 34 m, como es posible observar en la Fig. 4.

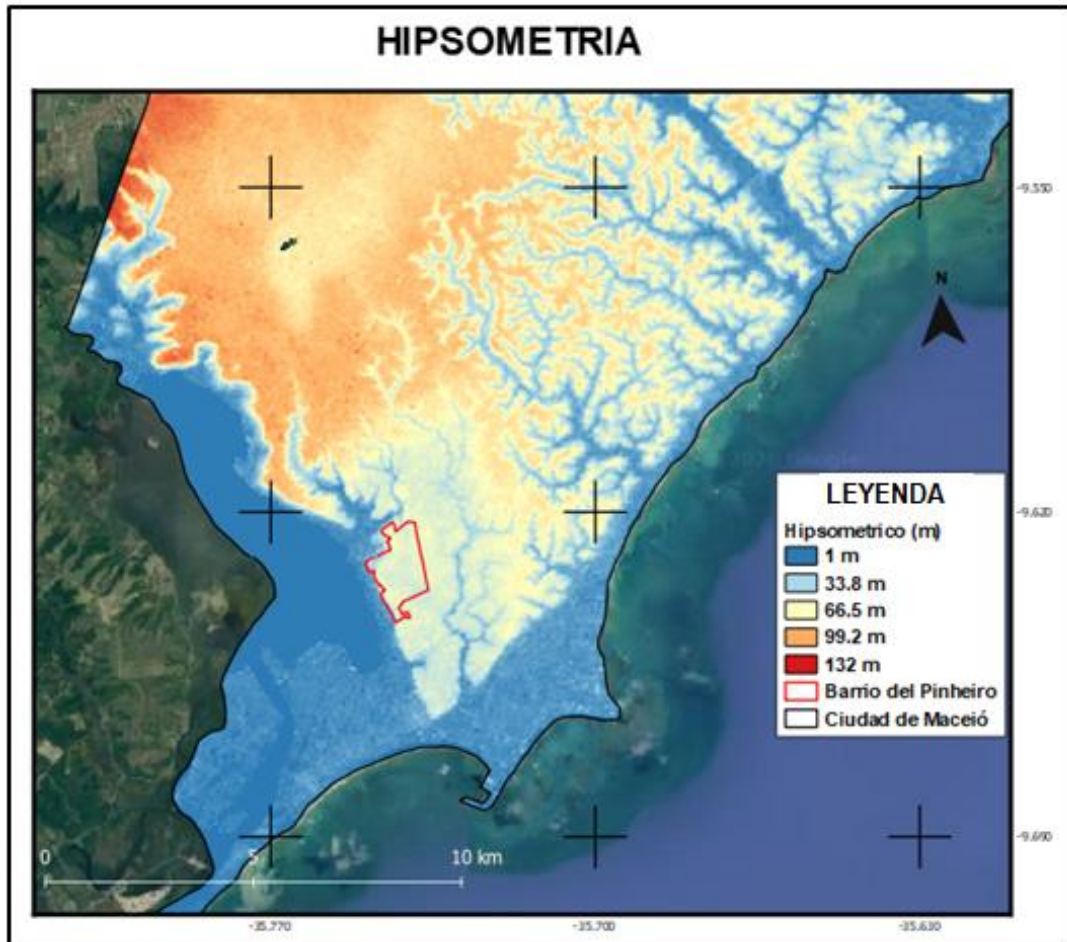


Fig. 4 - Mapa hipsométrico de la zona de estudio.

3 Antecedentes

En este apartado se exponen sucesivamente algunos de los antecedentes tenidos en cuenta para la realización de este proyecto.

3.1 Subsidencia en las grandes ciudades

El hundimiento de la tierra se produce cuando se han extraído cantidades de materiales subterráneos, provocando la compactación de los sedimentos en la zona de extracción. El proceso natural resultante es la compactación de estas rocas, efecto determinante en la mayoría de los casos en donde nos encontramos el hundimiento de una zona.

La situación más común es cuando se extrae el agua subterránea. De las diferentes causas que nos podemos encontrar en relación a este fenómeno antrópico,

el cual se produce por una necesidad de reabastecer de materias primas a la sociedad, nos encontramos con el abastecimiento de agua en todos sus diferentes usos.

Los eventos de hundimientos importantes de la tierra debido a la extracción de agua subterránea son relativamente comunes en áreas altamente desarrolladas (Poland, 1984). Este es un problema presente en diversas áreas del planeta, teniendo como ejemplos más conocidos e investigados, la ciudad de Jakarta, capital de Indonesia, con un hundimiento con tasas de aproximadamente 1–15 cm al año (Abidin y otros, 2011) y la ciudad de México, con subsidencia máxima de 30 cm al año (Osmanoğlu y otros, 2011).

Otras formas en las cuales se manifiestan los hundimientos son las de extracción de sal como es el caso de las deformaciones del terreno en Wieliczka, donde se encontraron dos tipos de subsidencia asociados con este tipo de extracción. Primero, un hundimiento lento y casi lineal debido a la convergencia de galerías y cámaras. El segundo es uno hundimiento rápido, no lineal, debido a catástrofes, como la acumulación causada por las entradas de agua subterránea y/o el colapso en la cámara de la mina. (Perski y otros, 2009).

3.2 Estudios de subsidencia y deformaciones con InSAR

La técnica de interferometría radar de apertura sintética es una técnica de considerable valor para mediciones de deformación de la superficie terrestre, debido a su alta resolución espacial y a su habilidad de adquirir datos de forma remota (Hooper, 2008).

Con el desarrollo de técnicas multitemporales como MT-InSAR (Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar) es posible explotar múltiples imágenes SAR adquiridas en una serie temporal, así pues, es posible estudiar los cambios y deformaciones del terreno por medio de una serie temporal de imágenes (Ferretti y otros, 2001; Berardino y otros, 2002). Aplicando técnicas MT-InSAR con datos del satélite ERS-1/2 entre 1992-2000 fue posible identificar diversas áreas de subsidencia en la Costa del Sol, localizada en los pueblos de Benalmádena, Torremolinos y al suroeste de Málaga (Ruiz y otros, 2011; Ruiz-Armenteros y otros, 2018). En estos estudios fueron utilizados los datos disponibles por la ESA (Agencia Espacial

Europea) que operan con banda C, identificando desplazamientos de más de 10 mm al año.

Mediante el uso de series temporales es posible identificar el comportamiento y el desplazamiento total de la deformación referente al periodo de los datos. El seguimiento se hace más notable cuando tenemos en consideración los cortos periodos de revisita de los satélites que monitorean la superficie terrestre.

4 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la identificación y cuantificación del comportamiento de la subsidencia ocurrida en el barrio del Pinheiro en la ciudad de Maceió (capital del estado brasileño de Alagoas), aplicando las técnicas multitemporales de interferometría radar de satélite.

La metodología de procesamiento de series temporales MT-InSAR, tiene por objeto la identificación de píxeles (Persistent Scatterers o PS) en las imágenes SAR caracterizadas por pequeño ruido de fase, alta intensidad de la señal reflejada y respuesta constante con el paso del tiempo. Con estas técnicas se obtendrá el mapa de velocidad media de deformación, así como un análisis de series temporales con la evolución espacio-temporal en todas las zonas de estudio.

5 Material y Métodos

5.1 Teledetección Radar de Apertura Sintética (SAR)

El término radar se usa de forma general para clasificar sistemas o herramientas que trabajan en bandas de frecuencia clasificadas como microondas, es decir, que tienen como valor entre 0.3 GHz y 300 GHz, y una longitud de onda (λ) entre 1 mm y 1 m. En la Fig. 5 es posible visualizar el rango de trabajo de las ondas radar dentro del espectro electromagnético.

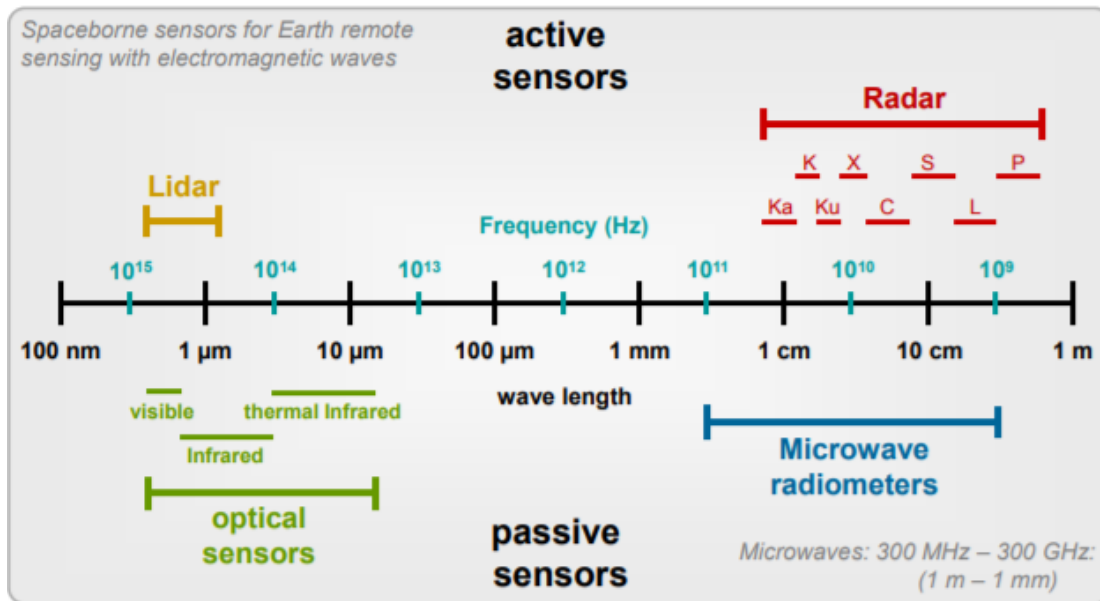


Fig. 5 - Adaptado de Moreira, Alberto (2013).

El funcionamiento de los radares se basa en el principio de la ecolocalización, es decir, transmitir una señal y medir su eco que retorna algún tiempo después. Midiendo el tiempo de viaje del eco se puede estimar la distancia, una vez que se conoce la velocidad de la señal (Woodhouse, 2015).

Según Woodhouse (2015), la operación básica de un sistema radar se basa en la transmisión de una duración de uno pulso (τ), que viaja con una velocidad similar a de la luz (c). El pulso podría viajar a una velocidad de la luz en una situación ideal, que es de la no presencia de partículas atmosféricas entre el radar emisor y el objeto, una vez que la atmosfera actúa como un medio refractante. Entonces, el viaje de ida y de retorno expresada por la ecuación (1) de la señal entre la antena emisora y el objeto, se puede calcular mediante el producto de la velocidad por el retardo del tiempo:

$$R_{ida-retorno} = c \cdot \tau \quad (1)$$

La distancia hasta el objeto viene dada por la ecuación (2):

$$R = \frac{(c \cdot \tau)}{2} \quad (2)$$

En los últimos años los radares de apertura de apertura sintética SAR se han convertido en una gran herramienta para la observación terrestre, ofreciendo diversas ventajas en el campo de la teledetección. Su principal ventaja es la adquisición independiente de la iluminación solar, es decir, es un sensor activo y totalmente exento de la dependencia de la iluminación solar e incluso de la presencia de nubes. Posee una mayor capacidad de penetración comparado con sensores ópticos, además de la posibilidad de usos distintos de la polarización de la onda y una gran sensibilidad a los cambios de la morfología de la superficie terrestre.

5.2 Geometría de adquisición

Los sistemas SAR en general, aerotransportado o espacial, disponen de una antena fija que apunta lateralmente de modo que ilumina una huella sobre el terreno paralela a la dirección de vuelo u órbita del sensor. Esta característica diferencia el sensor SAR (observación lateral oblicua, SLAR) de los sensores ópticos (observación nadiral). Según Woodhouse (2015), la observación lateral se utiliza para evitar la ambigüedad de la señal de retrodispersión de objetos equidistantes a la fuente de emisión. La geometría se presenta en la Fig. 6.

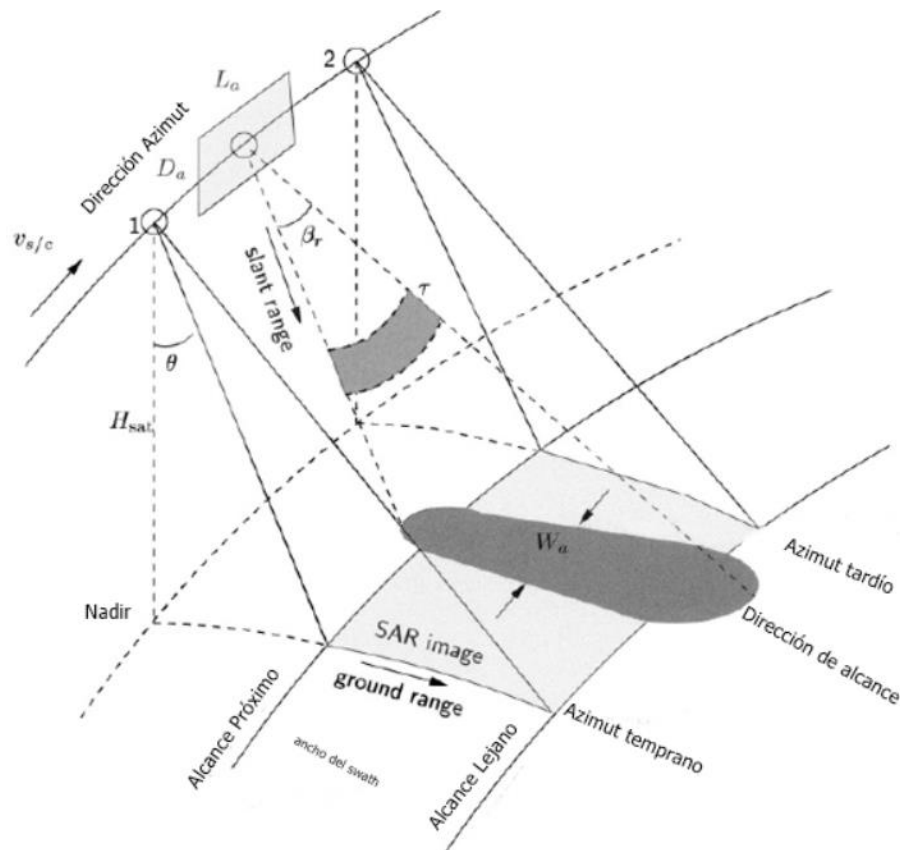


Fig. 6 - Fuente: Hassen (2001) adaptado al castellano.

La dirección de vuelo de la plataforma es paralela a la dirección azimutal, también conocida como “along-track”, y en la perpendicular (la dirección que apunta la antena), tenemos la dirección de alcance (range), también conocida como “across-track”.

El ángulo de inclinación (θ) es el formado entre la vertical del satélite y la dirección del haz de iluminación. La mayoría de los satélites operan con valores de θ fijos, como por ejemplo los satélites ERS-1/2 de la ESA (Agencia Espacial Europea) que son de aproximadamente 23° . Por otro lado el ángulo β indica la apertura de la antena, que en el plano, determina la anchura de la pasada o swath.

En la dirección del alcance, el swath es caracterizado por dos parámetros, el alcance próximo que es la parte más cercana de la huella y la antena, y el alcance lejano que es la parte más lejana de la huella y la antena; estos son definidos por el ángulo de apertura de la antena.

En la dirección azimutal tenemos dos parámetros de la imagen, que son el azimut inicial y el azimut final, donde cada uno representa respectivamente el tiempo inicial (t_i) de adquisición de la huella y el tiempo final (t_f) en una determinada órbita. Con lo cual, el Δt representa la anchura de la imagen en el terreno en dirección de vuelo del sensor.

τ , como se ha demostrado anteriormente, es la duración del pulso emitido por la antena y H es la altura correspondiente a la plataforma sobre el terreno.

La definición de la geometría es fundamental para la extracción de información de una imagen radar, pues los objetos con orientación perpendicular a la dirección de iluminación son realzados por la señal radar pero, por otro lado, los paralelos pueden no ser detectados (Woodhouse, 2015).

5.3 Distorsiones Geométricas en las Imágenes Radar

Como consecuencia de la geometría de observación lateral, el sistema radar genera imágenes con características geométricas diferentes a las imágenes ópticas,

una de estas características es la distorsión que se produce cuando nos encontramos ante una pendiente orientada hacia la antena, ya que esta se proyecta como más estrecha que en una imagen óptica. Es decir, se produce la compresión de las características de los objetos que están inclinados hacia el radar, esta distorsión es llamada de foreshortening, como se puede observar en la Fig. 7. Tiene su valor máximo cuando la pendiente es ortogonal al pulso radar.

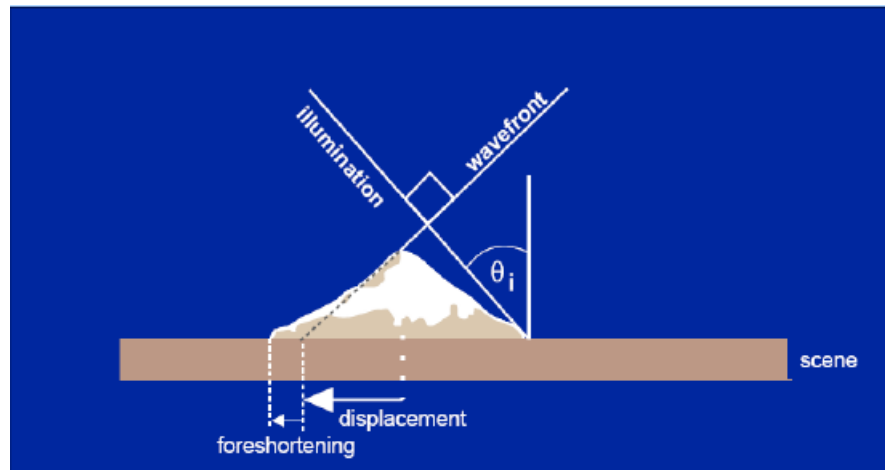


Fig. 7 - Ejemplo de foreshortening. Fuente: Raney (1998).

Otra distorsión causada por la geometría de adquisición es la sombra. Estas representan las áreas del terreno que no son “iluminadas” por el radar, es decir, donde no hay retorno en la antena de la señal reflejada por el terreno. Ocurre cuando el objeto sin respuesta está escondido por otro de mayor altitud, como se puede observar en la Fig. 8.

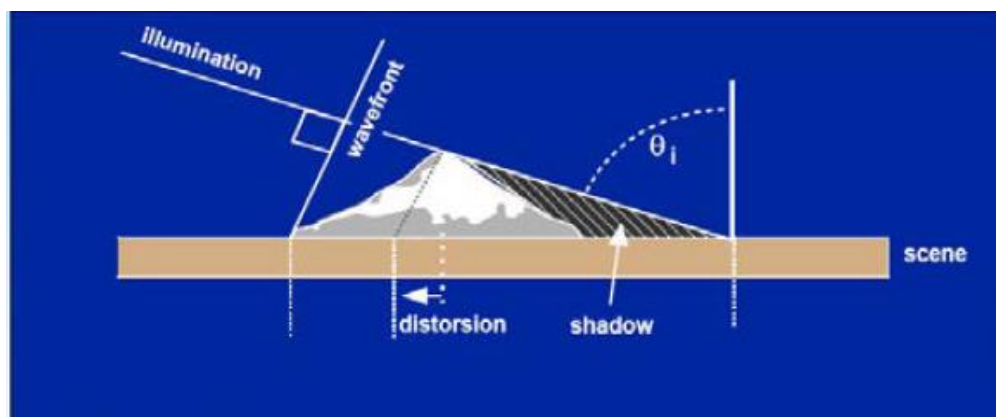


Fig. 8 - Ejemplo de sombra.

Layover es una distorsión que ocurre cuando el pulso de la parte superior del objeto retorna mucho antes que las de la base, en este caso la porción de arriba va a desplazarse en dirección del radar tal como se observa en la Fig. 9.

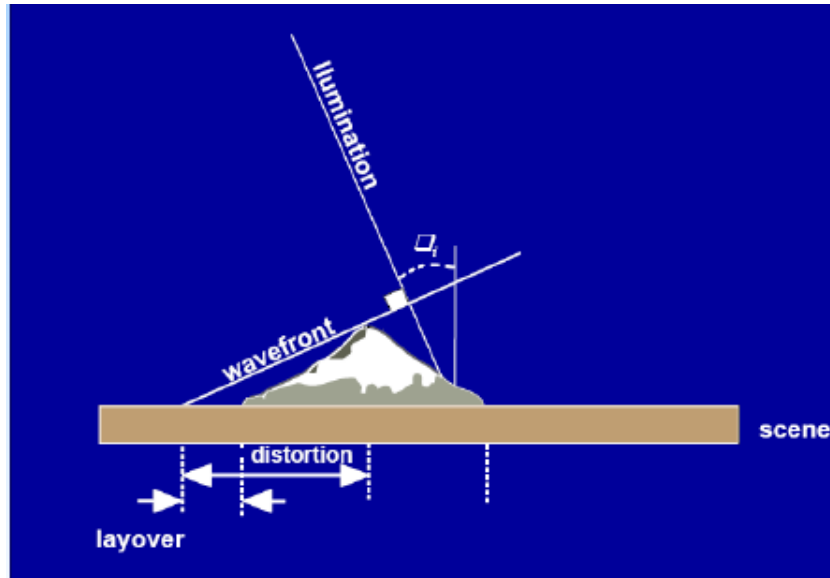


Fig. 9 - Ejemplo de layover. Fuente: Raney (1998).

5.4 Principios de funcionamiento SAR

El funcionamiento de un sistema radar formador de imágenes, en pocas palabras, se basa en calcular el tiempo transcurrido entre el pulso transmitido por el sensor (antena) y las respuestas (ecos) provenientes de las interacciones del pulso con los objetos en la superficie terrestre.

En la teoría, el área de la huella de la imagen radar es proporcional al tamaño de la antena y la anchura del pulso emitido, así que, la resolución de la imagen está estrictamente ligada con estos parámetros. Siendo la resolución azimutal R_a definida como ecuación (3):

$$R_a = \frac{\lambda R}{L} \quad (3)$$

Donde λ es la longitud de la onda de la señal emitida, R es la distancia recorrida por la señal desde la antena hasta el objeto y L es la longitud de la antena. Utilizando como ejemplo el satélite ERS-1 que tiene como resolución azimutal aproximadamente 5 m, una longitud de onda de 5.66 cm y a una distancia R de alrededor de 850 km, tendríamos que disponer de una antena de aproximadamente 9.6 km de longitud. Este

cálculo se refiere a un radar de apertura real (RAR), sin embargo, sería inviable tener una antena en órbita de esta longitud.

La resolución en la dirección de alcance (perpendicular a la dirección de la trayectoria) viene dada de la siguiente forma (ecuación (4)):

$$R_r = c \frac{\tau}{2}, \quad (4)$$

donde,

$$\tau = \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

Queda claro que la única dependencia de la resolución en la dirección de alcance es la anchura del haz. Cuanto mayor es la anchura, mejor es la resolución en la dirección de alcance, sin embargo, un ángulo demasiado grande puede ocasionar respuestas muy débiles, debido a que la dispersión puede tener una dirección contraria al radar.

Utilizando la técnica de apertura sintética (SAR) conseguimos una resolución azimutal similar a la del rango utilizando una antena de unos 10 m.

El éxito de la apertura sintética reside en simular la longitud de una antena de gran dimensión por medio del desplazamiento del satélite en su órbita, durante un intervalo de tiempo Δt y usando el efecto Doppler. Este intervalo representa el desplazamiento entre una posición s_1 hasta s_2 en la órbita de la plataforma o trayectoria de vuelo, como demuestra la Fig. 10.

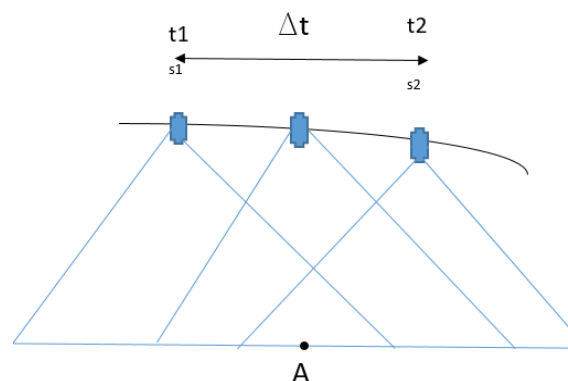


Fig. 10 - Desplazamiento de la plataforma en una órbita cualquiera.

Así, las distintas posiciones del satélite entre ambos puntos forman una única gran antena. Este hecho se puede explicar con la ayuda de dos técnicas. La primera es el efecto Doppler y, la segunda, es el principio de la combinación coherente, que es la unión de una colección de antenas de baja resolución, con el objetivo de proporcionar una de mayor resolución, que para este caso en concreto, tienen la misma amplitud inicial y fase de onda.

Sabiendo que la plataforma está en continuo movimiento dentro de su órbita y además que es un movimiento conocido, podemos utilizar este efecto para localizar del regreso del haz y su eco correspondiente, así logramos la capacidad de discriminar los objetos a partir de sus ecos de retorno. Los ecos que retornan de la parte frontal de la onda tienen una frecuencia mayor, mientras que los ecos de la parte trasera tienen sus frecuencias más bajas. Para el caso en el que la plataforma se encuentra en una posición paralela a la posición del objeto, no hay alteraciones de las frecuencias, este efecto es conocido como efecto Doppler cero. Es decir, un eco tiene una frecuencia f en la posición x_0 . A partir de este, se produce el retorno de un eco $f(x_0)$. Pasado un instante t_i , la plataforma cambia de posición y recibe esta frecuencia $f(x_i)$ distinta que es comparada electrónicamente.

5.5 Imagen detectada

La mayoría de los radares registran las ondas codificándolas de acuerdo con la ecuación (6):

$$f(t) = A \cos\left(\omega_0 t + \frac{Br t^2}{2\tau p}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{\tau p}\right) \quad (6)$$

Esta onda es transmitida con un periodo de 1000 veces por segundo. A partir de un punto en la superficie terrestre la respuesta se genera como (Simons y Rosen, 2015):

$$r(t, R) = p(R)g(R) \cos\left(\omega_0 \left(t - \frac{2R}{c}\right) + \frac{Br}{2\tau p} \left(t - \frac{2R}{c}\right)^2\right) \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{\tau p}\right) \quad (7)$$

Donde $p(R)$ y $g(R)$ son las funciones genéricas para representar $1/R^2$ pérdida de fuerza y dispersión en R , respectivamente. Si tenemos numerosas respuestas entonces:

$$(t) = \int_R p(R)g(R) \cos\left(\omega o\left(t - \frac{2R}{c}\right) + \frac{Br}{2\tau p}\left(t - \frac{2R}{c}\right)^2\right) rect\left(\frac{t - \frac{2R}{c}}{\tau p}\right) dR \quad (8)$$

La ecuación (8) demuestra que la señal recibida es la convolución de la dispersión que depende del decaimiento de la intensidad de la señal emitida y la distancia entre la plataforma y el objeto.

En la geometría de adquisición de una imagen detectada por radar, el terreno es iluminado por la huella (swath) de forma continua (Fig. 11), formada por una secuencia de pulsos provenientes de una antena direccionada al slant-range y con su inclinación fija como es el caso de los satélites ERS-1/2. Sin embargo, el satélite Sentinel-1 y otros satélites más modernos poseen distintas swaths dentro de una misma huella.

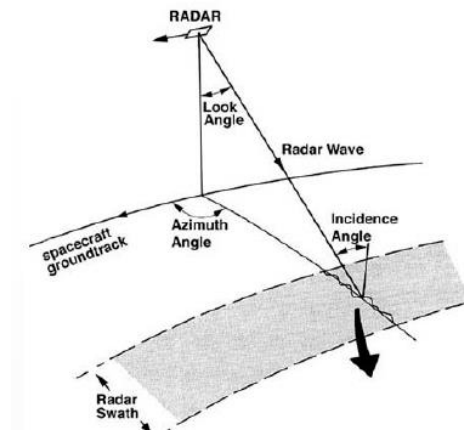


Fig. 11 - Geometría de la adquisición y huella del radar.

El modo Sentinel-1 IW adquiere datos de un amplio swath (compuesto de 3 sub-swath), utilizando la técnica TOPSAR de escaneado de la imagen, tal y como se aprecia en la Fig. 12.

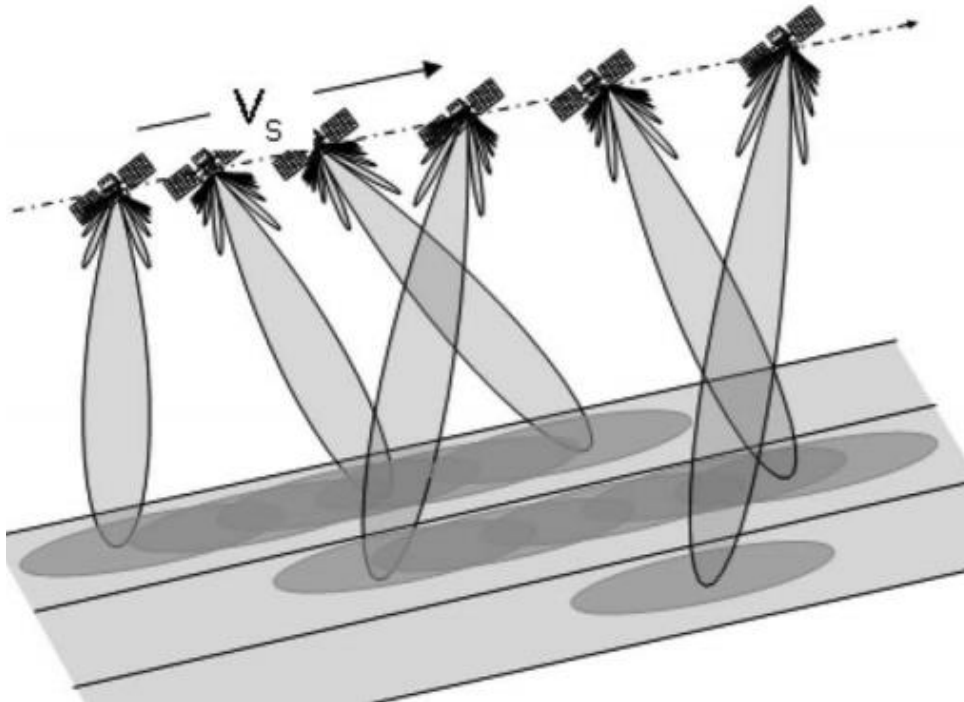


Fig. 12 – Modo de escaneado TOPSAR. Fuente: Sentinel Product Definition.

Esta configuración es posible debido al uso de distintos ángulos de incidencia provistos por la técnica TOPSAR. Los tres sub-swaths (IW1 – IW2 – IW3) se caracterizan de acuerdo con la Tabla 1.

Beam	IW1	IW2	IW3
Off Nadir Angle [°]	27.53 – 32.48	32.38 – 36.96	36.87 – 40.40
Incidence Angles [°]	30.86 – 36.59	36.47 – 41.85	41.75 – 46.00
Off Nadir Angle [°]	26.00 – 30.96	30.86 – 35.43	35.35 – 38.88
Incidence Angles [°]	29.16 – 34.89	34.77 – 40.15	40.04 – 44.28

Tabla 1 – Ángulos de incidencia de la técnica TOPSAR. Fuente: Sentinel Product Definition

5.6 Imagen SAR compleja

Una imagen SAR puede ser visualizada como un mosaico de píxeles o una matriz de filas y columnas, donde cada elemento o pixel representa una pequeña área de la superficie terrestre asociada. En comparación con los sensores ópticos, la visualización de los datos SAR sin el procesamiento no brinda ninguna información

útil sobre la escena. Solamente después del procesamiento de las señales radar es cuando se obtiene una imagen.

Cada pixel de una imagen SAR se representa por un número complejo con dos componentes, la amplitud y la fase. Estos contienen las informaciones de las microondas retro-dispersadas provenientes de la superficie terrestre. Esta información puede ser guardada como uno número complejo ($Ae^{i\Phi}$) siendo A la amplitud del eco dispersado que retorna hacia el sensor en la plataforma y Φ representando su fase.

Teniendo en cuenta que un número complejo se representa por la ecuación (9):

$$Ae^{i\Phi} = A \cos\Phi + iA \sin\Phi \quad (9)$$

ambas partes, tanto la real como la imaginaria, son capturadas por separado por el sensor y guardadas dentro del número complejo correspondiente. Inicialmente, con las dos partes por separado, la imagen SAR está desenfocada, sin embargo por medio de algoritmos de procesamiento se obtiene la imagen compleja bidimensional y enfocada, conocida por Single Look Complex (SLC).

La retrodispersión de la señal tiene una gran dependencia de la rugosidad de la superficie con la cual interactúa. Por ejemplo, en zonas urbanizadas como las ciudades o zonas rocosas, las respuestas son más intensas que en zonas de vegetación o superficies hidrográficas. En una imagen SAR (Fig. 13), el brillo o intensidad de cada pixel es proporcional a la potencia de la señal de retorno recibido por el sensor, este parámetro va a variar de acuerdo con la interacción del haz con el objeto y las características del sensor.



Fig. 13 - Imagen de Intensidad de la zona de interés.

5.7 La fase SAR

El pulso transmitido por el radar alcanza los objetos en la superficie terrestre provocando las retrodispersiones de la señal que retornan hacia el radar con uno cierto retraso entre la transmisión activa y la recepción de la radiación. Debido a la naturaleza sinusoidal de la señal transmitida, este retraso es equivalente al cambio de fase entre el pulso transmitido y recibido. La Fig.14 muestra las relaciones entre fase, amplitud y longitud.

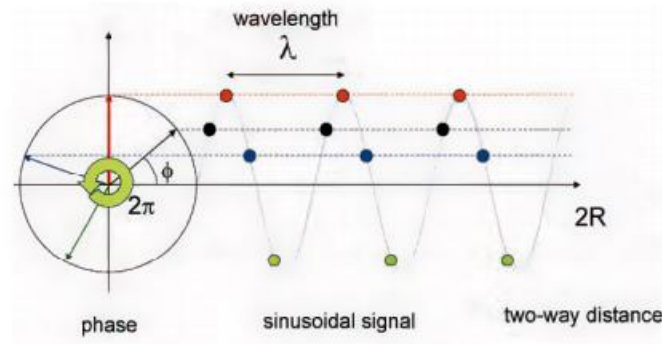


Fig. 14 - La relación entre amplitud, fase y longitud de onda de una señal de radar. Fuente: ESA

donde,

$$\Phi = \frac{2}{\lambda} \pi 2R = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (10)$$

Cuando la señal se recibe en la antena, la fase que se registra es apenas una fracción de la distancia de viaje de ida y vuelta. Sin embargo, la fase adquirida por los sensores SAR no tiene un valor continuo, sino que está enrollada (wrapping) con un módulo 2π , es decir, números enteros múltiplos de 2π .

5.8 Interacción con los objetos (Scattering)

Como se ha mencionado anteriormente, las dispersiones son el resultado de la interacción del pulso con los objetos en la superficie terrestre o en su caso más simple cuando únicamente retorna una dispersión en un pixel. Una vez que la señal choca y retorna al sensor, tenemos las medidas complejas de amplitud y fase referente a esta dispersión. La amplitud de esta depende de las propiedades del objeto en el cual rebotó la señal y la fase depende de la distancia entre el radar y el objeto, como se puede observar en la Fig. 15.

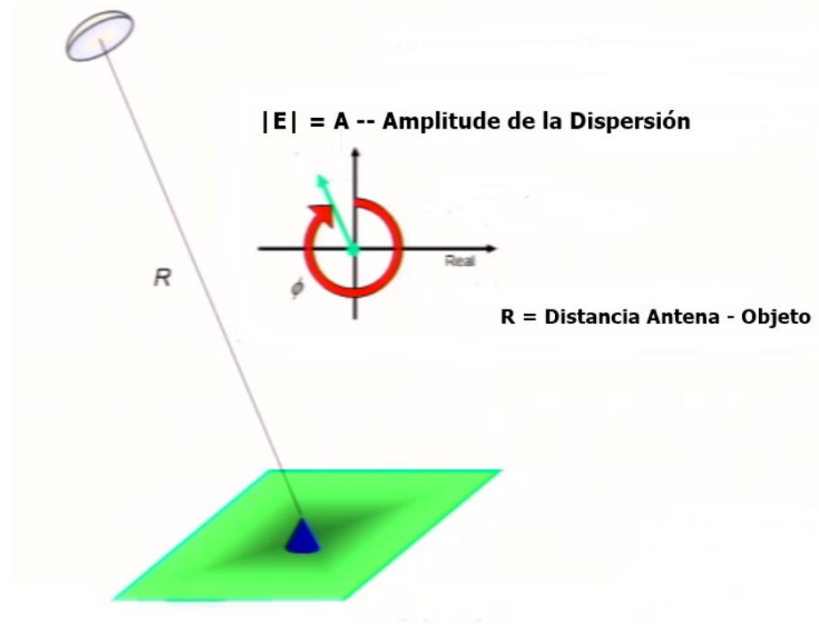


Fig. 15 - Esquema de la interacción del haz con el objeto.

Una vez que el objeto cambia de posición en relación al radar, es posible identificar el cambio en la respuesta relativa a la fase, provocada por el cambio de la distancia R y el nuevo ángulo de la orientación de la dispersión provocada por el cambio del ángulo de incidencia en el objeto, sin embargo, la intensidad de respuesta es igual, debido a que la propiedad del objeto debe ser considerada uniforme.

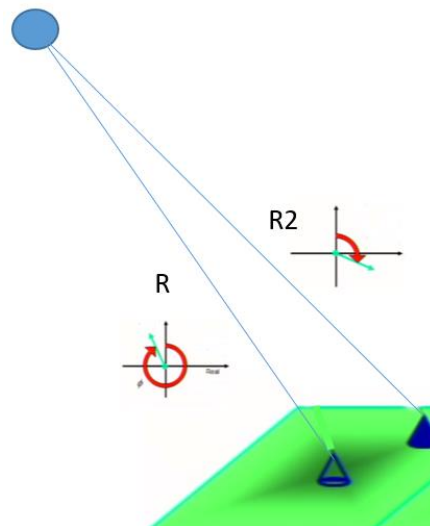


Fig. 16 - Doble respuesta en una única celda de resolución.

Por otro lado, empezamos a tener situaciones un poco más complejas, como en la superficie terrestre. Para este caso, hay más de una respuesta por celda, es decir, más de un retorno de la señal por pixel, esta situación es conocida como dispersión distribuida o dispersión incoherente tal como se observa en la Fig. 16.

La señal recibida es la suma vectorial de todas las respuestas comprendidas en la resolución del pixel (Fig. 17). El vector viene dado por la ecuación (11):

$$E = \sum_m A_m \times e^{i\phi_m} \quad (11)$$

donde, m representa el número de dispersiones involucradas en la resolución del pixel.

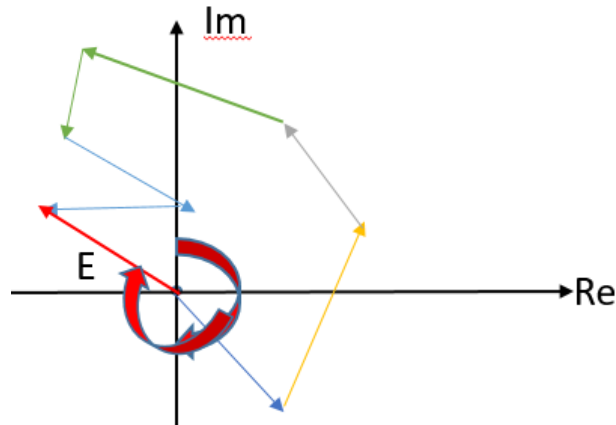


Fig. 17 - Suma vectorial de todas las respuestas de la reflexión sobre la celda de resolución.

Para la dispersión distribuida el efecto del movimiento de un objeto en la zona es mucho más significativo e imprevisible cuando se compara con el conjunto anterior.

5.9 Speckle

La presencia de distintas dispersiones distribuidas en un único pixel de resolución genera el efecto que llamamos de speckle, que se asemeja con el ruido conocido como sal y pimienta (salt and pepper). El speckle es el resultado de la interferencia entre los ecos coherentes de las dispersiones individuales dentro de una celda de resolución (Woodhouse, 2015).

El speckle no se considera como un ruido, una vez que es un fenómeno repetitivo. Es un efecto común en las imágenes SAR, sin embargo, no está presente en las imágenes de origen óptico. Para reducir el efecto es necesario tomar más imágenes de la misma área con distintos ángulos o posiciones.

5.10 Polarimetría en los radares

La polarimetría en los radares está ligada a una propiedad presente en las ondas electromagnéticas, caracterizadas por oscilaciones transversales (Fig. 18). Una onda transversal tiene una propiedad adicional, que es la dirección en la que se producen las oscilaciones. El filtro de información basado en la dirección de oscilación se conoce como polarización.

La polarización es una de las ventajas de trabajar con los datos radar. Una vez que la onda sufre la dispersión, la polaridad puede cambiar de acuerdo con la propiedad del objeto en contacto.

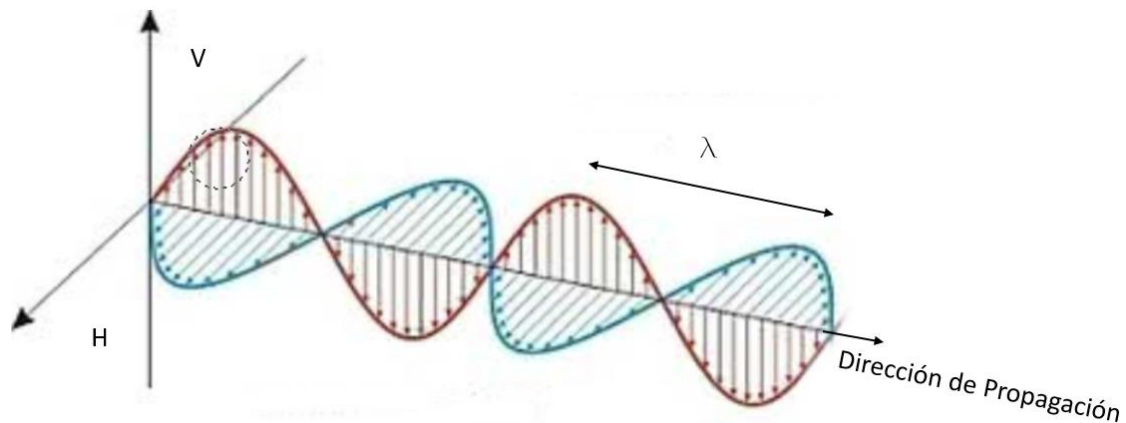


Fig. 18 - Detalles de una onda electromagnética.

La polarización puede ser, en general, H (horizontal) y V (vertical), donde se representa por 2 letras, la primera indica el sentido de envío y la segunda indica el sentido retorno.

HH: Transmisión Horizontal y retorno Horizontal

HV: Transmisión Horizontal y retorno Vertical

VH: Transmisión Vertical y retorno Horizontal

VV: Transmisión Vertical y retorno Vertical

Este control se realiza mediante un filtro presente en el sensor, como demuestra la Fig. 19.

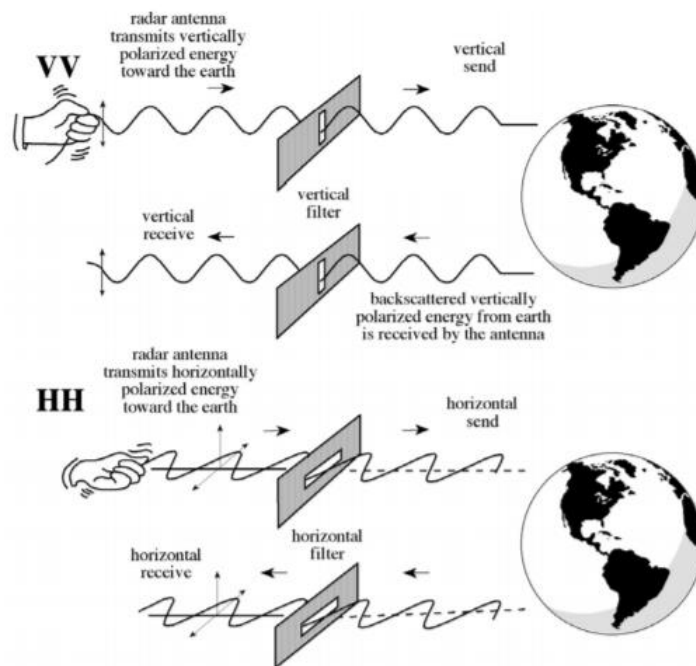


Fig. 19 – Polarización de las microondas (Jensen, 2000).

5.11 Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

5.11.1 Principios de la Interferometría SAR

La Interferometría radar de apertura sintética es una extensión de la técnica clásica radar que gracias al lanzamiento del satélite ESR-1 en 1991, se revela con resultados inéditos midiendo movimientos sobre glaciares y la deformación causada por el terremoto de Landers (Massonnet, 1995). La técnica se basa en la determinación de la diferencia de fase entre píxeles homólogos de dos imágenes complejas de una misma área, que sobre condiciones de iluminación geométrica similares se obtiene como resultado un interferograma. De estas imágenes, una se denomina master y la otra slave.

5.11.2 Geometría InSAR

En cuanto a la geometría de adquisición, dos métodos, el mono-estático y el bi-estático. El primero fue el modo empleado en la misión Shuttle Radar Topography misión - (SRTM) bajo la responsabilidad de la National Imagery and Mapping Agency

(NIMA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) que tuvo como objetivo el cartografiado de toda la superficie terrestre. Por otro lado, el modo bi-estático es el empleado con más frecuencia y utilizado para monitorizar distintos fenómenos. (Klees y Massonnet, 1999).

La geometría bi-estática de adquisición está representada de acuerdo con la Fig. 20.

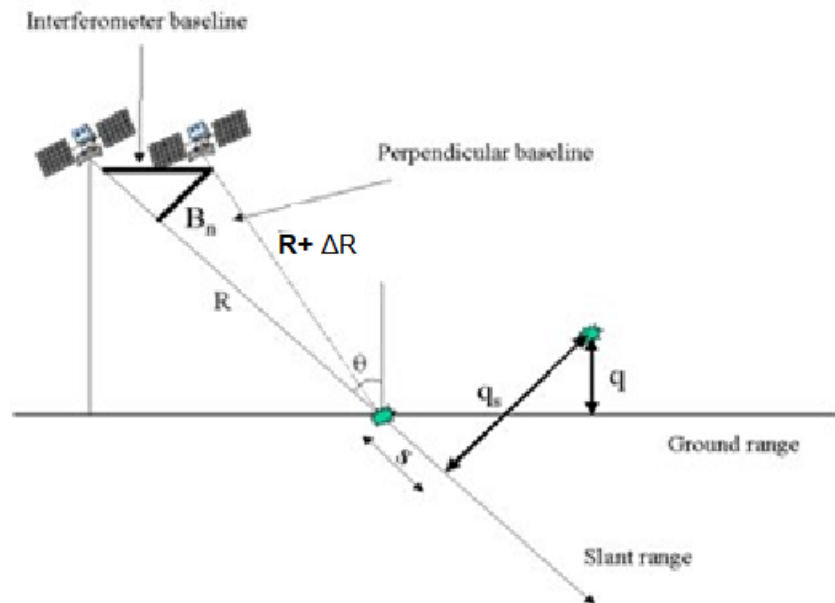


Fig. 20 - Parámetros geométricos de un sistema de Interferometría SAR satelital (ESA, 2007).

Los nuevos elementos representados en la Fig. 21 son ΔR representan la diferencia entre las distancias entre sensor y objeto, cuyo valor es dado por $-2 \frac{B_n Q_s}{R}$, donde, B se define como la base interferométrica, representada por la distancia entre las dos posiciones del sensor o de las plataformas. A su vez, B_n se define como la línea base perpendicular, que corresponde a la distancia efectiva entre dos posiciones de los sensores en el instante de la adquisición y Q_s es el desplazamiento en la celda de resolución en la dirección de alcance o across-track.

Otro parámetro que no es visible pero muy importante en el momento de analizar la geometría de un par o pares de imágenes adquiridas, es la línea de base temporal, que es el tiempo de revisita o de toma entre las imágenes. Grandes líneas de base temporales pueden influenciar demasiado en los resultados de los interferogramas,

hasta imposibilitar su formación debido a la gran distinción entre las imágenes master y slave de una misma zona.

5.11.3 Fase Interferométrica

La fase Interferométrica está relacionada con dos conceptos, que son la elevación del terreno y la imagen compleja resultante de la diferencia de fase entre dos imágenes SAR (ecuación (12)).

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (12)$$

La única distinción, es que cada fase va a depender del camino recorrido entre el sensor hasta objeto. La variación es proporcional a la diferencia de la distancia recorrida (R) sobre la longitud de onda. El esquema se puede observar en la Fig. 21.

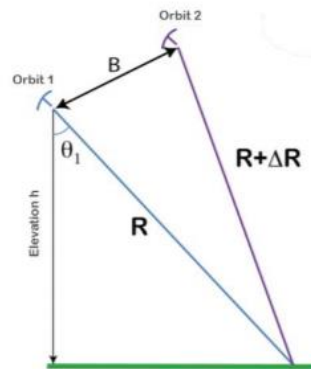


Fig. 21 - Imagen adaptada del Sentinel-1 Toolbox 2016.

Dentro del interferograma, hay diversas fuentes de ruido, como los debidos a la separación de línea de base, la de correlación temporal, ruido térmico y errores del enfocado de los datos brutos.

En el proceso de formación del interferograma la diferencia de fase puede tener distintas contribuciones (ecuación (13) y ecuación (14)) como, por ejemplo, el flat que es la contribución de la curvatura de la tierra, la elevación que es la contribución topográfica, el desplazamiento que es la contribución de la deformación en la superficie terrestre, la atmósfera que es la contribución de la atmósfera por donde pasan las señales y los ruidos mencionados anteriormente.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{elev} + \Delta\phi_{displ} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise} \quad (13)$$

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{BnS}{R \tan\theta} - \frac{\Delta q}{\sin\theta} \frac{4\pi Bn}{R\lambda} + \frac{4\pi}{\lambda} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise} \quad (14)$$

Uno de los objetivos del proceso Interferométrico es eliminar las fuentes de error para que solamente quede como contribución las fases de elevación y desplazamiento. Para modelizar estas contribuciones de la fase necesitamos agregar información en la forma de filtros u observaciones.

Para remover la fase de la curvatura terrestre utilizamos las órbitas precisas de los satélites y sus metadatos, pues estos son informaciones conocidas y disponibles en un corto periodo de días. En el momento que se realiza esta corrección se genera un mapa de fase proporcional a la altura relativa del terreno.

Cuando dos imágenes SAR no se toman de forma simultánea, cada una de las fases de retorno está afectada por una atmósfera distinta. Este efecto, en general, está involucrado en el ciclo 2π del interferograma y puede afectar tanto en los dos tipos de fases resultantes, que son la de desplazamiento y de elevación.

Para restar la componente de la contribución atmosférica tendremos que usar algoritmos que van a simular su composición en el momento de la captura. Estos retrasos en la señal son causados en general por la falta de homogeneidad en la troposfera debido a las partículas de agua, temperatura, presión y debido también a la concentración de electrones en la ionosfera que se miden en una columna de metro cuadrado definido como TECU.

En relación a la fase correspondiente a la elevación utilizamos un modelo digital de elevación (DEM) que va a representar la topografía del terreno donde esta se realizando el estudio.

5.11.4 Coherencia Interferométrica (γ)

La coherencia Interferométrica o coeficiente de correlación compleja (γ) cuantifica la correlación de fase entre los pixeles de una imagen maestra (referencia) con una o más esclavas (slaves) dentro del procesamiento interferométrico. Según Hassen (2001), la coherencia puede ser utilizada para medir la precisión de la fase Interferométrica o como una herramienta de para clasificación de imagen, además, la

viabilidad de los procesados interferométricos son dependientes de los niveles de coherencia.

Una escena formada por valores absolutos de coherencia se conoce como mapa de coherencia, en donde los valores del rango varían de 0 (característica de datos totalmente decorrelacionados) a 1 (completa ausencia de ruido y correlación próxima altamente similar). La coherencia se calcula mediante el coeficiente de correlación de la fase interferométrica, de acuerdo con la ecuación (16).

En el caso de la interferometría de dos imágenes, donde la amplitud de cada pixel es proporcional al producto de las amplitudes $|u_1|$ y $|u_2|$ de las dos imágenes iniciales y la fase resultante es la diferencia de fase entre las dos, tenemos que el coeficiente de correlación compleja de dos imágenes es:

$$\gamma = \frac{E[u_1, u_1^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} \quad (15)$$

Utilizando n -independientes imágenes el estimador viene dado por:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N [u_1, u_1^*]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |u_1|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |u_2|^2}} \quad \text{donde } 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (16)$$

Las imágenes de coherencia son fácilmente interpretables, son representadas en niveles de gris, teniendo valores de alta coherencia cercas al blanco, es decir, presentan gran correlación entre las tomas. Por otro lado, las bajas coherencias representadas por tonos más oscuros, en general están afectadas por ruidos y factores de decorrelación. Estas zonas son impropias para el procesamiento interferométrico.

Como ejemplo de este tipo de imagen de coherencia tenemos la Fig. 22 que representa un mapa de coherencia, donde el área más blanca que representa valores de coherencia tiene morfología caracterizada por estructuras antrópicas o rocas expuestas. Por otro lado, la zona cubierta de agua es totalmente negra, por no presentar ninguna correlación entre las tomas.



Fig. 22 – Mapa de coherencia del norte de la Sicilia- Italia (ESA, 2007).

5.11.5 Desenrollado de la fase (Phase Unwrapping)

El desenrollado de la fase es la reconstrucción de la fase interferométrica original, una vez que el interferograma complejo contiene la información en valores proporcionales a 2π , valor este que no representa el total de ciclos completos de la longitud de onda. La diferencia entre la fase enrollada o comprimida y la fase desenrollada de representación es mostrada en Fig. 23.

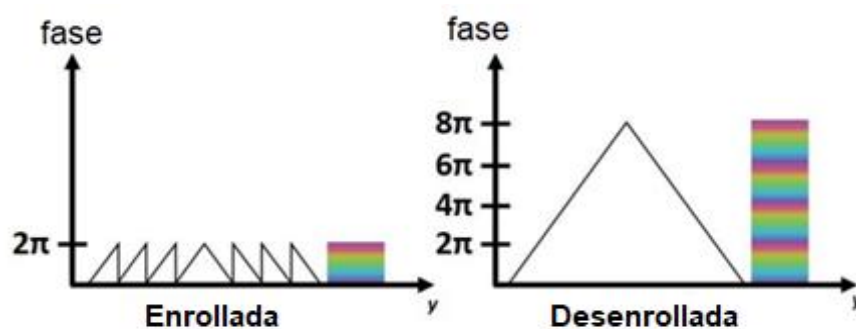


Fig. 23 – Representación del desenrollado de la fase. Fuente: TOPS Interferometry Tutorial (ESA)

En general, para obtener resultados óptimos en el proceso de desenrollado de fase se recomienda usar algoritmos locales, que presentan menores errores, basándose éstos en métodos de integración (Huang y otros, 1996). Uno de los grandes existentes se basa en la técnica de caminos de integración, que utiliza la diversidad de caminos de integración para alcanzar los valores a nivel de píxel absolutos. Son muy robustos frente a discontinuidades, pero requieren cierta calidad de fase para ser efectivos (Peña Izquierdo, 1998).

Para optimizar el desenrollado de la fase, Goldstein y Werner (1998) propusieron un algoritmo de filtrado adaptativo que mejora significativamente la visibilidad de la franja interferométrica y reduce el ruido de la fase relacionado con la decorrelación del sistema.

La calidad y confiabilidad del desenrollado de la fase depende mucho de los valores de coherencia de los datos de entrada. Las áreas con mayor coherencia, en general, ofrecen mejores resultados, y a pesar de que no se define un umbral, suele seleccionarse valores de coherencias de 0.3.

Los problemas comunes en el proceso de desenrollado de la fase son generados cuando el interferograma tiene discontinuidades o grandes influencias de decorrelación. La solución para el desenrollado de fase constituye la cuestión más compleja del procesado InSAR.

5.11.6 Contribución de ruidos en la fase (Decorrelación)

Hay otro tipo de ruido adicional al efecto atmosférico en el momento que la señal es retrodispersada en dirección al sensor; esta otra fuente ruido se conoce como fases de decorrelación. Según Hassen (2001), definimos la decorrelación como el ruido causado por las fuentes de error que tienen una longitud de correlación menor que una ventana de estimación de coherencia regular.

Las contribuciones principales de esta fase de ruido que influyen en el procesado interferométrico son:

Decorrelación temporal: Está causada por cambios físicos en el área de exposición de la dispersión. Por ejemplo, en áreas con vegetación densa, un intervalo

de miles de segundos es suficiente para que haya cambios de respuesta de la dispersión.

Decorrelación volumétrica: Está causada por la penetración de la onda radar en el medio de dispersión, siendo dependiente directamente de la superficie del objeto y de la longitud de onda (Hoen y Zebker, 2000). Además, asumiendo que la dispersión en la dirección vertical y horizontal sean similares y la geometría adoptada en la Fig. 20, cuantifica la decorrelación, si asumimos que la variación percibida de la dispersión en cada elemento varía solamente en función de la profundidad, entonces la decorrelación volumétrica ρ_{vol} se puede definir mediante la ecuación (17):

$$\int \sigma^o(z) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda \sin \theta} \sqrt{\epsilon_z} \delta \theta r \right] dz \quad (17)$$

donde:

- $\sigma^o(z)$ es la variación en función de la profundidad.

$$- \delta \theta r = \frac{B_n}{R}$$

- ϵ es la constante dieléctrica real adoptada como 1.9. Más detalles en Hoen y Zebker (2000).

Decorrelación térmica: influencia del ruido termal en la fase interferométrica que se puede derivar en función de la relación señal – ruido (SNR) del sistema del satélite específico (Hanssen, 2001). $\rho_{thermal}$ se puede determinar mediante la ecuación (18):

$$\rho_{thermal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (18)$$

Más detalles de la contribución termal en el desenrollado de la fase y de los parámetros utilizados en el cálculo de la SNR para el sistema ERS-1/2 se puede ver en Zebker y otros, (1994c), Zebker y Villasenor (1992), y Hanssen (2001).

Decorrelación Geométrica: es el resultado de la diferencia del ángulo de incidencia entre dos imágenes en relación a la superficie terrestre. Esta es función de

Bn_{crit} (línea de base crítica) del sistema y Bn (línea de base perpendicular). La decorrelación geométrica se define de acuerdo con la ecuación (19).

$$geométrica = \frac{Bn_{crit} - Bn}{Bn_{crit}}, \text{ para } |Bn| \leq Bn_{crit} \quad y \quad (19)$$

$$geométrica = 0, \text{ para } |Bn| \geq Bn_{crit}$$

5.12 Interferometría SAR diferencial

La técnica de interferometría diferencial con radar de apertura sintética (DInSAR) explora la información involucrada en la diferencia de fase entre los píxeles de por lo menos dos imágenes SAR complejas de la superficie terrestre, tomadas bien en épocas diferentes. La configuración más básica para obtener un resultado diferencial está compuesta por uno par resultante de la adquisición repetida de imágenes sobre una zona común que son usualmente capturada con el mismo sensor o con sensores de características similares (Crosetto y otros, 2015)

Considerando un pixel (p) que representa una huella en el terreno, el sensor obtiene la primera imagen desde una posición orbital P, teniendo como respuesta la fase ϕ_P (ecuación (20)):

$$\phi_P = \frac{4\pi R}{\lambda} + \phi_{DispersiónP} \quad (20)$$

Donde:

- R es la distancia entre sensor y objeto.
- $\phi_{DispersiónP}$ es la dispersión de la fase resultante de la interacción del pulso con el objeto.
- 4π está relacionado con el recorrido de ida y vuelta del haz.
- λ es la longitud de onda del radar.

Asumiendo que este radar revise este objeto, que este se haya movido desde P a P' y el sensor haga la toma de la imagen sobre el mismo pixel en una posición T', como se puede ver en la Fig. 24, entonces:

$$\phi_{P'} = \frac{4\pi R'}{\lambda} + \phi_{\text{Dispersión}P'} \quad (21)$$

La diferencia entre las fases $\phi_P - \phi_{P'}$:

$$\Delta\phi_{\text{int}} = \phi_{P'} - \phi_P = \frac{R' - R}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{\text{dispersión}P} - \phi_{\text{dispersión}P'}$$

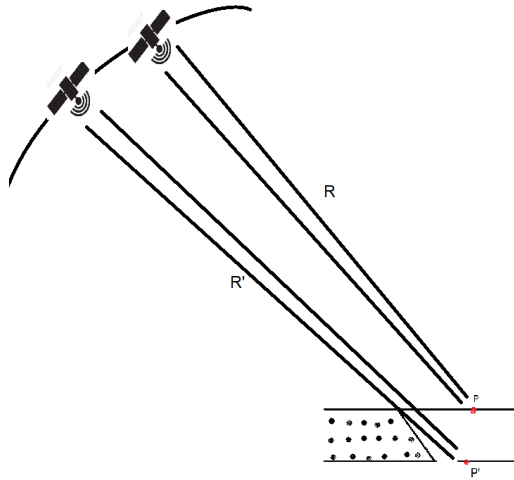


Fig. 24 - Geometría del DInSAR

Conociendo las posiciones de las órbitas y la topografía de la superficie simulada por uno modelo digital de elevaciones (MDE), es posible restar la componente de la fase topográfica obteniendo:

$$D\phi_{\text{int}} = \Delta\phi_{\text{int}} - \phi_{\text{MDE}} = \phi_{\text{desplazamiento}} \quad (22)$$

La ecuación (22) demuestra el principio de la técnica DInSAR, con lo cual permite conocer las contribuciones del desplazamiento del punto entre las adquisiciones de dos imágenes SAR. No obstante, la fase del MDE (ϕ_{MDE}) incorpora un error residual de la topografía (RTE), representado por $\phi_{\text{topo}_{\text{res}}}$ que debe ser tenido en consideración en los resultados. Así, representamos la ecuación DInSAR (ecuación (23)), incluyendo todas las contribuciones de la fase diferencial:

$$D\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{desplazamiento}} + \phi_{\text{topo}_{\text{res}}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{ruido}} \quad (23)$$

Algunos autores, como por ejemplo Crosetto y otros (2015) aún incluyen un término $2\pi k$, donde k representa un valor entero llamado ambigüedad de la fase.

Así, El objetivo final del DInSAR es separar la $\phi_{desplazamiento}$ de las otras componentes de fase en la ecuación (23), posibilitando la determinación de la deformación del terreno para pares de imágenes con gran coherencia entre sí con el paso del tiempo, bien sea por fuertes respuestas de la señal retrodispersada debido a las características de algún objeto presente en el pixel o por respuestas constantes debido a la resultante de distintos objetos que producen menor intensidad de respuesta.

Es importante señalar las limitaciones del DInSAR:

- Una de las consideraciones es el tiempo, es decir, los cambios que pueden ocurrir entre la primera y segunda toma de los datos. La decorrelación temporal influye directamente en la componente de fase del ruido. Además, la distinción entre la atmósfera en cada toma agrega efectos de retardos en la velocidad de propagación de la señal, que no son deseables en el proceso.
- Los interferogramas diferenciales proporcionan como resultado directo la medición del desplazamiento del objeto en relación a la línea de visión del satélite (LOS). Para superar esta limitación, es necesario procesar ambos sentidos de adquisición del satélite (ascendente y descendiente) y con sus resultados, descomponer los vectores para encontrar el desplazamiento real en la dirección vertical. Para este estudio solamente tuvimos acceso a imágenes descendentes.

5.13 Interferometría multitemporal mediante Persistent Scatterers (PSI)

La interferometría multitemporal utilizando dispersores permanentes (PSInSAR o PSI) es una técnica derivada del DInSAR. Fue desarrollada en el Instituto Politécnico de Milano (POLIMI) con la finalidad de detectar desplazamientos en la superficie terrestre utilizando series temporales con varias imágenes de la misma zona (Ferreti y otros, 2001).

El requisito clave para el funcionamiento de la técnica es la continua respuesta de los dispersores dominantes, generada por la interacción con objetos en una celda específica de resolución. Las características de los píxeles con respuestas continuas a menudo corresponden a dispersores puntuales u objetos hechos por el hombre en la superficie de la tierra (edificio, objetos metálicos, rocas expuestas, etc.) en donde predomina la dispersión de fondo y se mantienen las características reflectantes a lo largo de la serie de imágenes SAR (Ruiz-Constán y otros, 2016). Esta técnica permite los estudios interferométricos en zonas urbanas, y de vegetación densa o costeras donde hay la presencia de estructuras reflectantes.

El PSInSAR se basa en el cálculo de una serie de interferogramas diferenciales, con los cuales se busca identificar dispersiones que tengan mínima variación con el paso del tiempo. Esta situación permite un análisis preciso del desplazamiento de las respuestas persistentes y/o de los píxeles vecinos. Para la determinación de las dispersiones de interés dentro de una celda de resolución es necesario conocer las dispersiones de los otros objetos que forman parte del pixel. Como se ha citado y demostrado anteriormente en apartado 5.7, las respuestas por pixel dependen de los objetos presentes en la celda, de tal modo que la relación entre la señal dominante y las señales restantes (SCR), indica la fuerza del dispersor persistente en el pixel. Para altos valores SCR (>8), los píxeles exhiben baja variación de fase interferométrica (<0.25 rad) y viceversa (Ruiz-Constán y otros, 2016). La Fig. 25 presenta las típicas respuestas de dispersores persistentes.

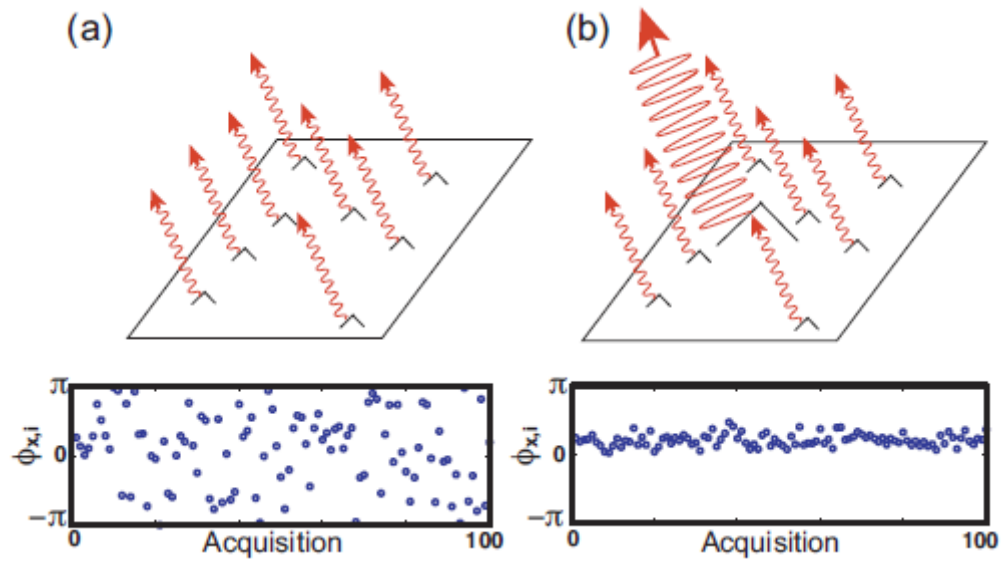


Fig. 25 - Simulaciones de fase para (a) un píxel de dispersores distribuidos y (b) un píxel con un dispersor persistente. Los gráficos superiores representan los dispersores que contribuyen a la fase de un píxel en una imagen y las inferiores simulaciones de la fase para 100 iteraciones.

Para identificar las respuestas estables, es decir, los píxeles seleccionados como persistent scatterers, es necesario seleccionar previamente los candidatos conocidos como PSC (Persistent Scatterers Candidates). De los distintos métodos que se pueden emplear para identificar los píxeles estables, la correlación basada en los valores de coherencia tiene algunos inconvenientes:

- La determinación del umbral de coherencia.
- La ventana de estimación en el área de interés.

Otro método utilizado que garantiza mejores resultados es la solución demostrada por Ferretti y otros (2001), que es la de analizar temporalmente los valores de amplitud para cada píxel en la zona de interés. La relación estadística entre estabilidad de amplitud e estabilidad de fase es definida como índice de dispersión de la amplitud (D_A), definido como:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} = \sigma_\phi \quad (24)$$

Donde, σ_A y μ_A son respectivamente la desviación típica y la media de los valores de la serie de amplitudes. El índice de dispersión es una medida de la estabilidad de la fase para valores de alto SNR (Ferretti, 2001).

Una vez definidos los PSC, se chequea cada pixel candidato en relación a su estabilidad de amplitud, siendo además necesario estimar y restar la influencia de la fase atmosférica por medio de una interpolación tipo Kriging (Wackermagel, 1998).

5.14 Material

5.14.1 Imágenes SAR – Sentinel-1A SLC IW

Los datos de este trabajo están basados en un conjunto de imágenes del satélite Sentinel-1A en formato SLC (Single Look Complex), compuesto por 74 imágenes y adquirido con trayectoria descendente. Corresponden al track orbital 09, con un ángulo de incidencia entre $27.53 - 32.58^\circ$, cubriendo un periodo de diciembre de 2016 a noviembre de 2019.

Las imágenes SLC son proporcionadas por la ESA por medio del portal Copernicus Open Access Hub¹. Los datos en formato SLC son imágenes en el plano complejo, a las cuales se les realizó un preprocesamiento, enfocando los datos en acimut y rango para formar una imagen “enfocada”. El procesado toma como entrada los datos de la señal recibida, incluyendo la información de las órbitas y los polinomios de estimación del centroide Doppler. Luego, se procesa en la dirección de rango y azimut, tal como se puede observar en la Fig. 26.

¹<https://scihub.copernicus.eu/>

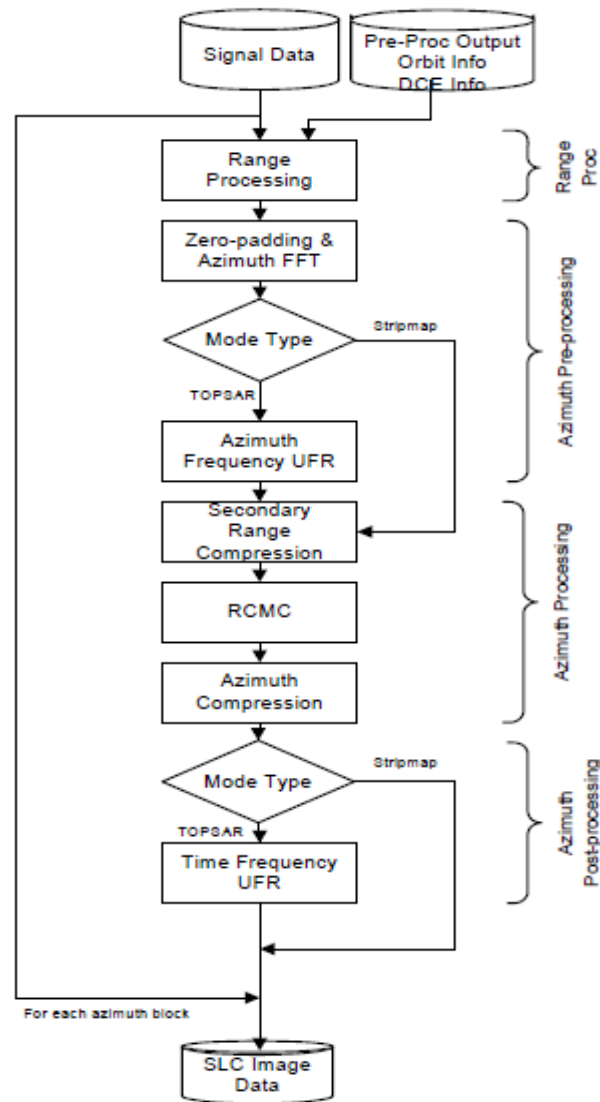


Fig. 26 – Procesado para formar la imagen SLC. Fuente: ESA Technical Guides.

El modo IW es el modo de adquisición principal sobre tierra y satisface la mayoría de los requisitos de servicio. El sensor adquiere datos con una franja de 250 km a una resolución espacial de 5 m por 20 m (en un solo look). El modo IW captura tres sub-franjas utilizando la observación de terreno con escaneos progresivos SAR (TOPSAR). Los productos IW SLC contienen una imagen por sub-banda y una por canal de polarización, para un total de tres (polarización simple) o seis (polarización dual) en cada producto (Ferretti y otros, 2007). La Tabla 2 muestra las características principales del modo IW y sus ángulos de incidencia.

Características	Valor
Anchura del swath	250 km
Rango del ángulo de incidencia	30.86 – 36.59
Sub swaths	3
Variación de ángulo del azimut	+/- 0.6°
Opciones de polaridad	Dual: HH+HV, VV+VH / Single: HH, VV
Ruido Máximo Equivalente a Sigma Zero (NESZ)	-22 dB

Tabla 2 - Características del modo IW. Fuente: ESA user Guides adaptado al Castellano.

5.14.2 Modelo digital de elevaciones preciso

Los datos de la elevación utilizados en este proyecto para la compensación de la fase topográfica tienen una resolución de 1 segundo de arco (30 metros), provenientes de la misión SRTM. Este modelo se generó a partir de un vuelo orbital de 11 días del transbordador espacial Endeavour del 11 al 22 de febrero de 2000.

5.14.3 Órbitas precisas

Las órbitas precisas son las informaciones del posicionamiento de los satélites en el momento de la obtención de las imágenes SAR. Estos archivos conforman parte del metadato del producto Sentinel-1, pudiendo ser descargado automáticamente por el software de procesamiento.

Los archivos de órbita precisa ofrecen vectores de posición a cada 10s durante todo el día, sin embargo, estas informaciones son procesadas y disponibles 20 días después de la fecha de adquisición de los datos.

5.14.4 Datos atmosféricos

Los datos atmosféricos utilizados durante el procesamiento de las imágenes son descargados para la fecha de cada imagen de una plataforma conocida como DarkSky, que ofrece una colección completa de las condiciones meteorológicas aplicada a la zona de interés.

5.14.5 Datos CPRM

Los datos descargados de CPRM (Compañía del Servicio Geológico Brasileño) se utilizaron para las comparaciones y análisis de los resultados. Consisten en:

- Shapefile de los inmuebles afectados por la subsidencia. Se registraron un total de 54 inmuebles, teniendo como atributo el grado del daño observado.
- Shapefile de la localización de los pozos de extracción de sal gema que están cercanos a la zona afectada, teniendo como atributos su profundidad y estado operacional.
- Shapefile de las grietas visibles en la calle, con informaciones de su tamaño y orientación.

Los datos provenientes de la CPRM son datos oficiales que están disponibles al público mediante un portal web².

5.14.6 Software empleado

El software empleado en el procesamiento de las imágenes del proyecto está compuesto por:

- SNAP: Arquitectura para procesamiento de datos de observaciones terrestres. Utilizado para la generación de los interferogramas y ajustes pre-StaMPS.
- StaMPS: Software para extraer los desplazamientos del terreno y generar las series temporales de la deformación.
- QGIS: Software con código abierto, multiplataforma, de Sistemas de Información Geográfica que permite la visualización, edición y análisis de datos geográficos.

5.15 Metodología del procesamiento

5.15.1 Procesamiento de las imágenes SLC

En este punto se presenta el procesamiento de las imágenes SLC que forman el dataset, en donde estarán descritos los métodos utilizados para la creación de los interferogramas entre la imagen master y las slaves.

Para el procesamiento de las imágenes SLC utilizamos el software SNAP y posteriormente una colección de scripts de Python editables y ejecutados en paralelo

² <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21630>

para exportar los interferogramas generados e importarlos en StaMPS. (Foumelis y otros, 2018).

5.15.2 Selección del dataset

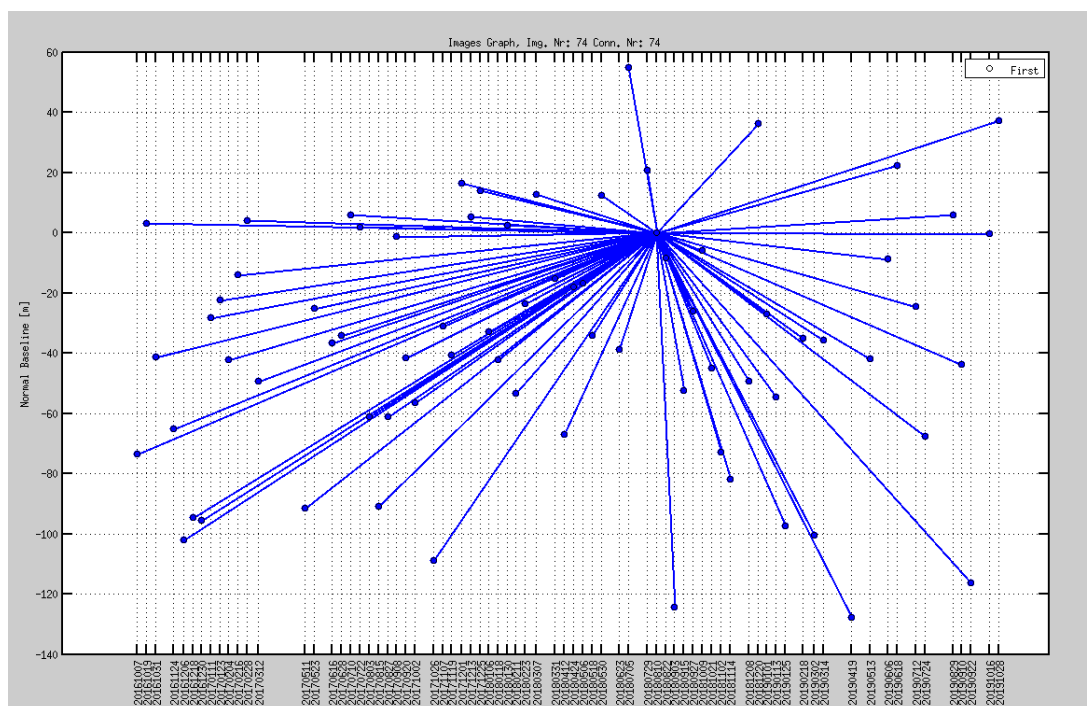
Los datos utilizados en este proyecto están compuestos por 91 imágenes adquiridas por satélite Sentinel-1A de la banda C que cubre el periodo entre Julio de 2016 hasta noviembre de 2019. Sin embargo, se realizó una limpieza en los datos excluyendo imágenes que presentaban algunos problemas como la falta de cobertura del total de la zona de interés, falta de coherencia con relación a los otros datos y problemas en la formación de los interferogramas con la imagen master. Al finalizar, tras el proceso de filtrado se utilizaron 74 imágenes, que forman con la imagen master un total de 73 pares interferométricos como se observa en la Tabla 3.

Nº	Fecha de adquisición	B _n (m)	B _{temp} (días)	Swatch	Polarización
1	07-Oct-2016	84	-660	1	VV
2	19-Oct-2016	17	-648	1	VV
3	31-Oct-2016	71	-636	1	VV
4	24-Nov-2016	101	-612	1	VV
5	06-Dec-2016	140	-600	1	VV
6	18-Dec-2016	133	-588	1	VV
7	30-Dec-2016	131	-576	1	VV
8	11-Jan-2017	63	-564	1	VV
9	23-Jan-2017	61	-552	1	VV
10	04-Feb-2017	75	-540	1	VV
11	16-Feb-2017	53	-528	1	VV
12	28-Feb-2017	35	-516	1	VV
13	12-Mar-2017	88	-504	1	VV
14	11-May-2017	87	-456	1	VV
15	23-May-2017	43	-444	1	VV
16	16-Jun-2017	48	-420	1	VV
17	28-Jun-2017	40	-408	1	VV
18	10-Jul-2017	4	-396	1	VV
19	22-Jul-2017	-7	-384	1	VV
20	03-Aug-2017	65	-372	1	VV
21	15-Aug-2017	107	-360	1	VV
22	27-Aug-2017	55	-348	1	VV
23	08-Sep-2017	-3	-336	1	VV
24	20-Sep-2017	55	-324	1	VV
25	02-Oct-2017	75	-312	1	VV
26	26-Oct-2017	133	-288	1	VV
27	07-Nov-2017	64	-276	1	VV

28	19-Nov-2017	73	-264	1	VV
29	01-Dec-2017	15	-252	1	VV
30	13-Dec-2017	22	-240	1	VV
31	25-Dec-2017	13	-228	1	VV
32	06-Jan-2018	68	-216	1	VV
33	18-Jan-2018	76	-204	1	VV
34	30-Jan-2018	29	-192	1	VV
35	11-Feb-2018	90	-180	1	VV
36	23-Feb-2018	66	-168	1	VV
37	07-Mar-2018	27	-156	1	VV
38	31-Mar-2018	56	-132	1	VV
39	12-Apr-2018	74	-120	1	VV
40	24-Apr-2018	29	-108	1	VV
41	06-May-2018	32	-96	1	VV
42	18-May-2018	45	-84	1	VV
43	30-May-2018	-11	-72	1	VV
44	23-Jun-2018	35	-48	1	VV
45	05-Jul-2018	-55	-36	1	VV
46	29-Jul-2018	-10	-12	1	VV
47	10-Aug-2018	0	0	1	VV
48	22-Aug-2018	29	12	1	VV
49	03-Sep-2018	140	11	1	VV
50	15-Sep-2018	59	23	1	VV
51	27-Sep-2018	30	35	1	VV
52	09-Oct-2018	14	47	1	VV
53	21-Oct-2018	61	59	1	VV
54	02-Nov-2018	98	71	1	VV
55	14-Nov-2018	116	83	1	VV
56	08-Dec-2018	81	107	1	VV
57	20-Dec-2018	-6	119	1	VV
58	01-Jan-2019	70	131	1	VV
59	13-Jan-2019	87	143	1	VV
60	25-Jan-2019	131	155	1	VV
61	18-Feb-2019	74	179	1	VV
62	02-Mar-2019	144	191	1	VV
63	14-Mar-2019	84	203	1	VV
64	19-Apr-2019	125	239	1	VV
65	13-May-2019	53	263	1	VV
66	06-Jun-2019	33	287	1	VV
67	18-Jun-2019	-15	299	1	VV
68	12-Jul-2019	18	323	1	VV
69	24-Jul-2019	78	335	1	VV
70	29-Aug-2019	-7	371	1	VV
71	10-Sep-2019	56	383	1	VV
72	22-Sep-2019	113	395	1	VV
73	16-Oct-2019	5	419	1	VV
74	28-Oct-2019	-17	431	1	VV

Tabla 3 - Características del dataset de Sentinel-1A utilizado.

La imagen nº 47 fue elegida como imagen master, y a partir de esta se generaron un total de 73 interferogramas. Esta imagen fue elegida automáticamente por el software por presentar líneas de base temporales y líneas de base perpendiculares con valores óptimos para el análisis utilizando la metodología PSI. La Fig. 27 muestra las líneas bases perpendiculares y la Fig. 28 los valores del centroide doppler entre las imágenes master e imágenes slaves.

**Fig. 27 - Líneas de base de las imágenes slaves en relación a imagen master.**

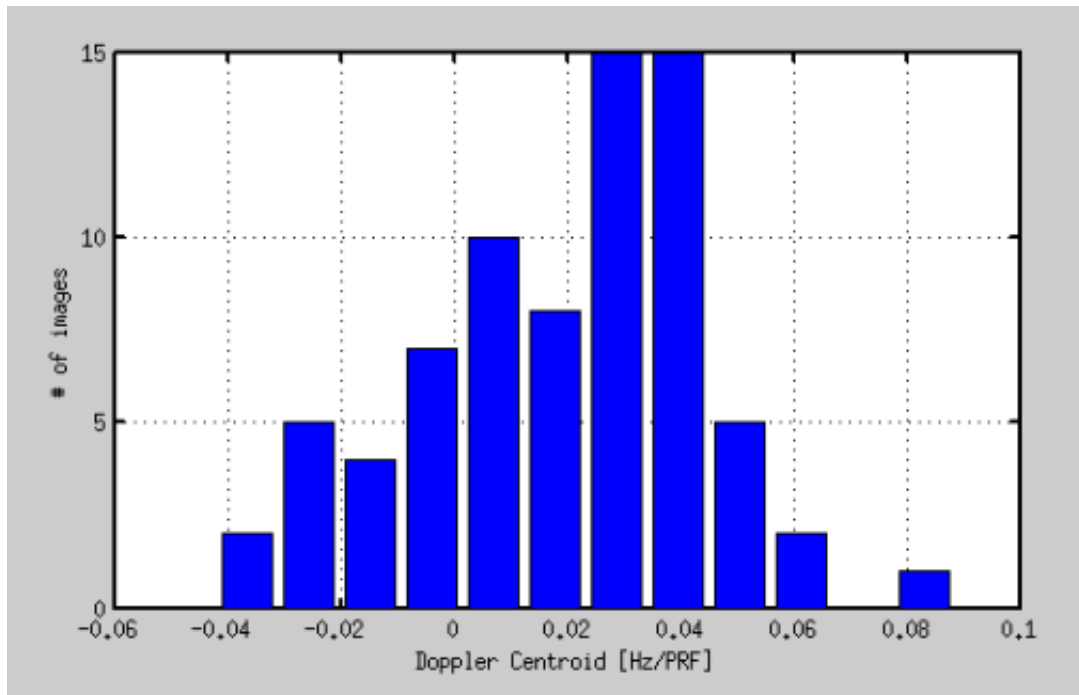


Fig. 28 - Cantidad del número de imagen por valor del centroid Doppler.

5.15.3 Selección de la subpasada y polarización

Como se ha descrito anteriormente en las características del satélite Sentinel, su huella se subdivide en tres partes (IW1, IW2 y IW3) cada una con su correspondiente ángulo de incidencia. Además, en este paso elegimos también con qué polarización vamos a trabajar. Para este procedimiento elegimos la VV como se puede observar en la Fig. 29, para el análisis utilizamos la subpasada (subswath IW1).

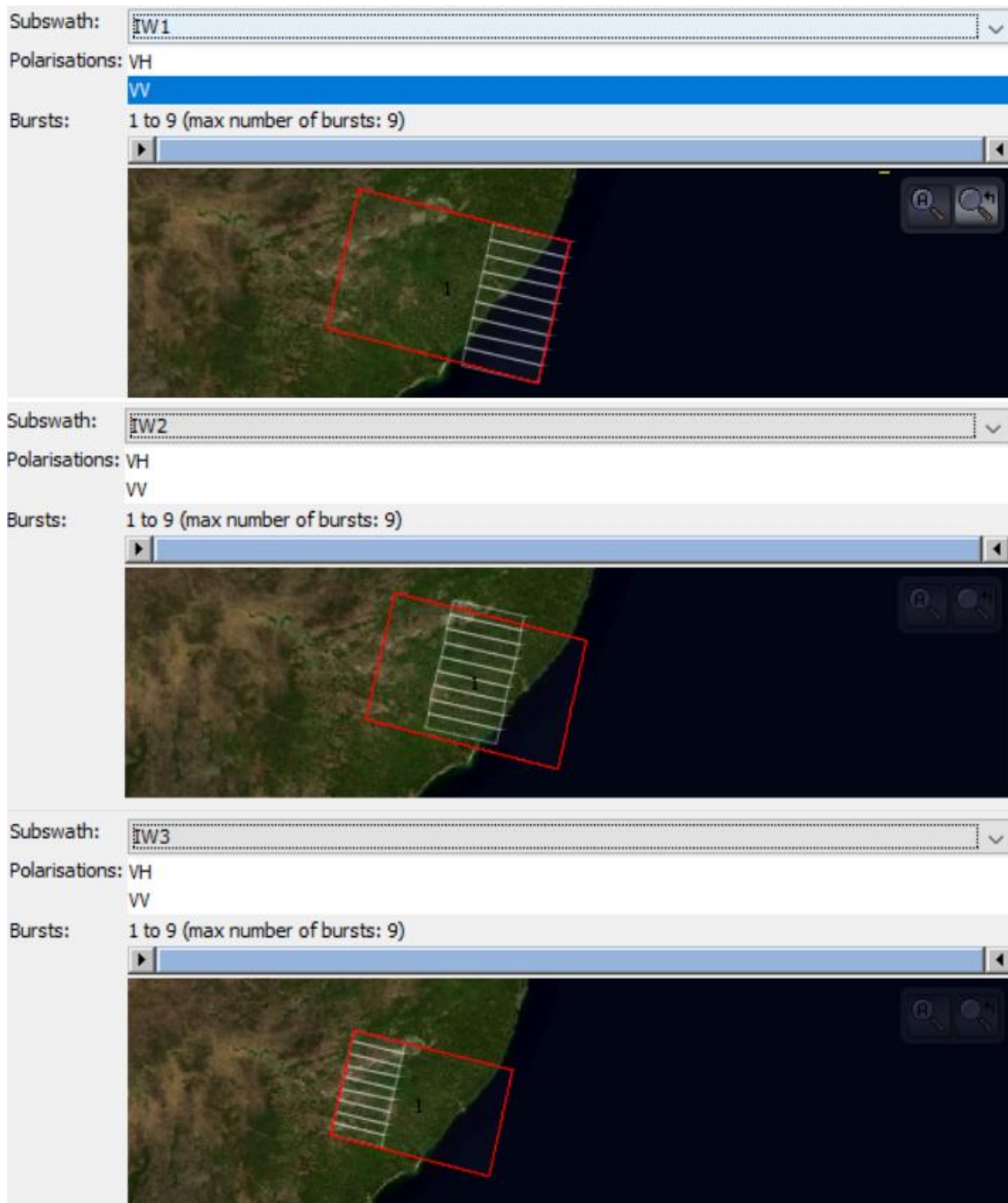


Fig. 29 - Selección del Subswath y polarización de la imagen master en el entorno SNAP.

Una vez determinada la subpasada a utilizar, primero se aplica la selección en la imagen master y consecuentemente se aplican los mismos parámetros a las imágenes slaves, generando un subdataset, formado por el IW1 de cada imagen SLC como se puede observar por medio de la Fig.29.

La selección de un sub swath se considera la manera más eficiente para realizar el procesamiento, dado que se ahorra en capacidad de procesado del procesador, sin

embargo, en casos donde es necesario el procesamiento del AOI en multi-subswaths es necesario aplicar preprocesados o scripts específicos para esta tarea.

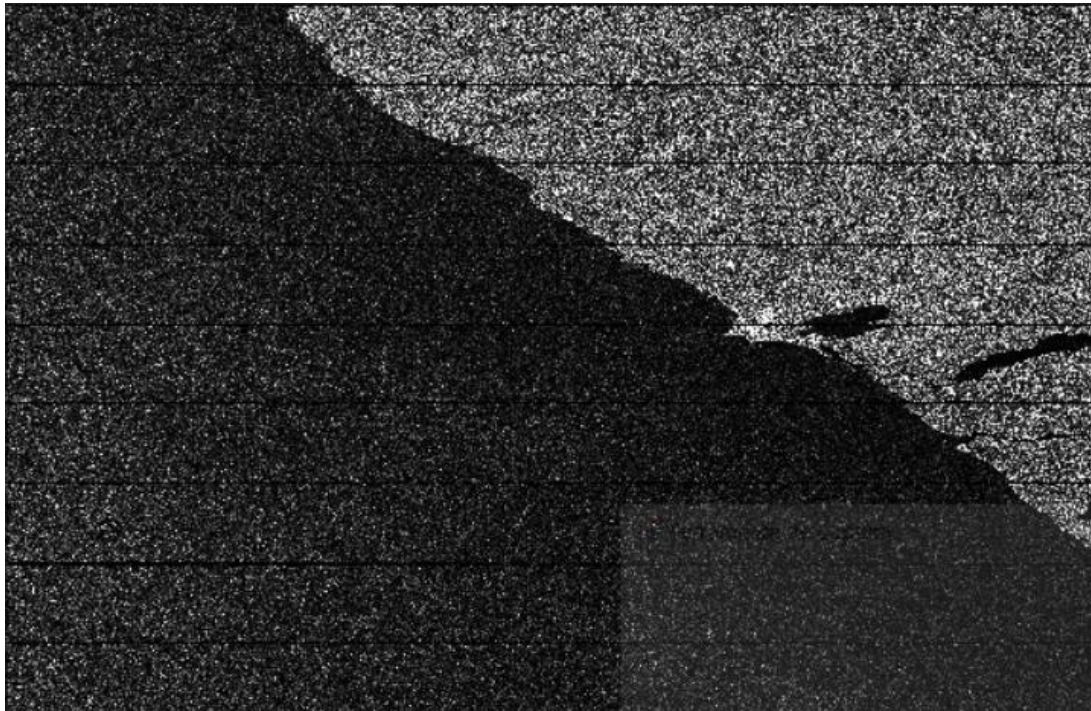


Fig. 30 - Subdataset con las características determinadas (IW1-VV).

5.15.4 Aplicación de las órbitas satelitales.

En el momento en que elegimos el sub-swath a procesar, aplicamos la corrección orbital utilizando las órbitas precisas que son descargadas automáticamente por el software empleado, una vez que la imagen haya sido adquirida por los menos 20 días con anterioridad.

El archivo de las órbitas proporciona información precisa de posición y velocidad del satélite en el sistema WGS84. En base a esta información, se actualizan los vectores de estado de órbita en los metadatos abstractos del producto. Para la interpolación se hace uso de splines cúbicos naturales. El grado del ajuste de la curva polinómica es de 3, mediante los llamados RCP's.

5.15.5 Selección de la zona de Interés (Cropping)

En este paso se lleva a cabo la selección de la zona de interés requerida (AOI) dentro de las dimensiones del subswath elegido en las imágenes. Para este punto es necesario considerar la zona que si sospecha tener desplazamiento, además,

identificar una zona que sea considerable estable, una vez que los valores referentes al movimiento son relativos.

Primero se identifica dónde está localizada la AOI en las imágenes SLC descargadas en uno geovisualizador. En la Fig. 31 se puede observar la huella máxima del solape de las imágenes.

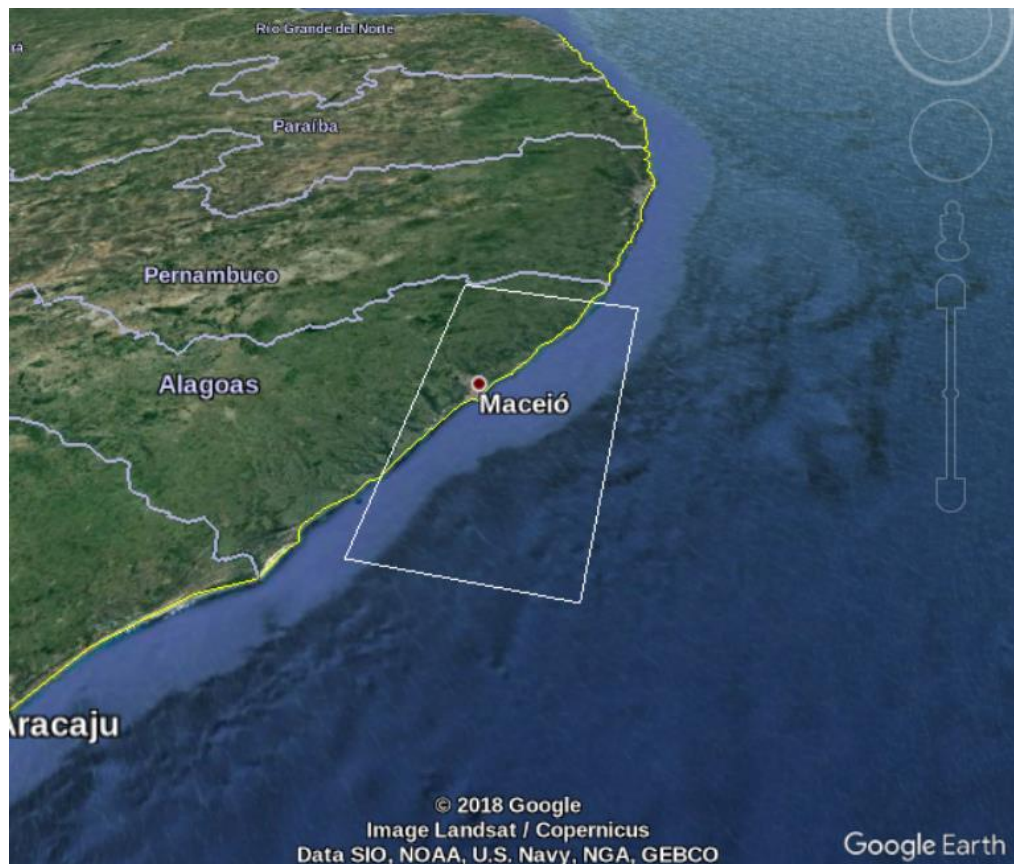


Fig. 31 - Área máxima basada en las imágenes SLC.

Es necesario definir un área que se encuadre al objetivo del trabajo. Esta selección más detallada del área de estudio es fundamental para el desarrollo del procesado, una vez que disminuye el número de píxeles para el análisis, incrementando el poder de procesado del ordenador. Sin embargo, es necesario que esta tenga una densidad de píxeles suficiente, dado que estamos aplicando un método sobre dispersores persistentes (PS) presentes en la zona.

Es necesario entonces elegir los valores del recorte detallado como se puede observar en la Fig.32.

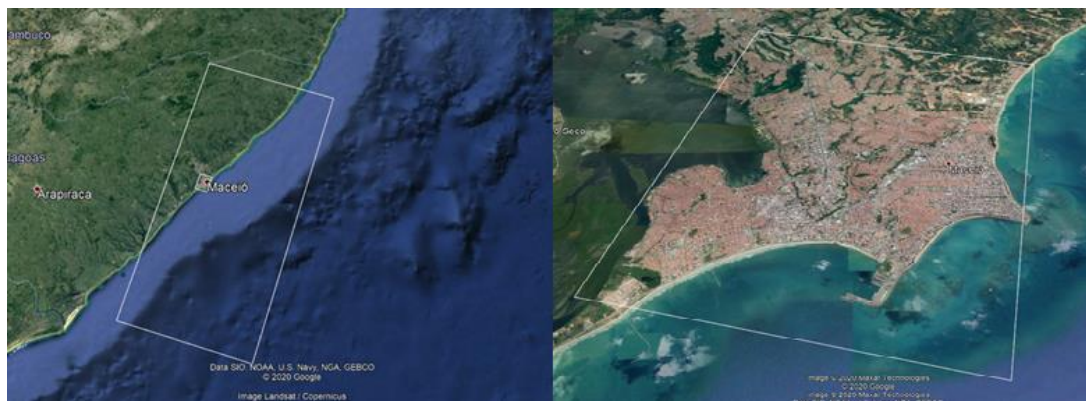


Fig. 32 - Recorte de la zona de interés.

Un previo análisis que se puede realizar ateniéndonos a la selección del AOI, es que aproximadamente un 25% de la zona está cubierta de agua, así solamente se analizará el 75% restante.

5.15.6 Extracción de la master y slaves

Cuando se han definido los parámetros del AOI, la polarización y las órbitas aplicadas para la master y las slaves, aplicamos estos parámetros extrayendo cada imagen y definiendo el paquete de datos a utilizar. Tras este primer procesado, se muestra en la Tabla 4 el resultado del dataset que se ha formado para proseguir con el procesado.

Dataset	Cantidad	Sub-Swath	Polarización	AOI	Órbita
Master	1	IW1	VV	Master_área	Precisa
Slave	74	IW1	VV	Master_área	Precisa

Tabla 4 - Características del dataset

El recorte de la imagen slave debe ser mayor que la del master, lo que permite una mejor búsqueda del área correspondiente. Esto se logra dando un "Delta" en píxeles al AOI definido para la master.

5.15.7 Coregistro

Una vez definido el conjunto de imágenes recortadas a la zona de interés, tanto de la master como las slaves, hay que coregistrar cada pareja de imágenes utilizando las estadísticas de los datos de las imágenes para alinear los productos con precisión

subpixel. Las imágenes se observan desde puntos de vista diferentes, por este motivo se deben coregistrar de tal manera que un punto P de coordenadas línea y pixel en la imagen master se corresponda a su homólogo en la imagen slave. El objetivo final del coregistro es desplazar la slave en relación a la master seleccionada.

Para realizar el coregistro se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Datos orbitales
- Altitudes del sensor en cada toma
- Repetición de la frecuencia del pulso

Los tres parámetros se encuentran en los metadatos de las imágenes, que son registrados en el momento de la lectura de los datos. El archivo de metadatos está compuesto por información de la plataforma, los parámetros en la dirección azimutal y en la dirección del rango, datos Doppler y los vectores orbitales.

El coregistro se realiza en dos pasos, el primero es el proceso en el que se calcula un desplazamiento inicial entre las imágenes master y slaves en función de la información orbital. Este desplazamiento inicial se llama co-registro aproximado, o primera alineación entre imágenes. Luego, el valor resultante del co-registro inicial se calcula con mayor precisión buscando la correlación máxima entre las imágenes de amplitud (Bamler, 1998).

Los datos SAR de Sentinel-1 poseen las velocidades orbitales del sensor y altitudes más estables, con lo cual la diferencia entre master-slave se puede aproximar bien mediante un modelo de transformación real (polinomio 2D) con 8 coeficientes. Véase también (Samson (1996) y ESA (2004)).

5.15.8 Cálculo de la fase topográfica

A partir de un modelo digital de elevaciones (DEM) se puede simular la fase del terreno y luego eliminar esta componente de la fase interferométrica. La fase fue restada usando el DEM SRTM 1 arcsec de la zona que equivale a 30 m de resolución sobre el ecuador.

La fase de referencia del DEM se calcula en dos pasos:

- En el primer paso, el DEM se codifica en el sistema de coordenadas de la imagen master. Por cada pixel del DEM, se guarda la coordenada master y la fase de referencia.
- En el segundo, la fase de referencia se interpola al grid completo de las coordenadas de la imagen master.

5.15.9 Creación de los interferogramas

Los pasos definidos en este punto tienen como objetivo principal la confección de los interferogramas entre master y slaves definidos anteriormente. Estos son la representación de la diferencia entre sus fases Interferométricas, formadas por multiplicación de la imagen master con el complejo conjugado de la slave STEP (2020). Sin embargo, necesitamos dejar únicamente la fase referente al desplazamiento en la dirección de visión del satélite (LOS). Para ello, es necesario restar las otras componentes de fase, como se muestra en la ecuación (23).

- Eliminación de la fase de tierra plana

Como se ha descrito en el apartado 6.1, la fase de tierra plana está presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de la tierra. La fase se estima utilizando las informaciones presentes en los metadatos generados en los procesos anteriores, dentro de estas se usa los valores de posición y velocidad de las órbitas involucradas.

Para restar la fase de tierra plana por la plataforma SNAP, se utiliza la opción Subtract flat earth phase dentro de los parámetros de formación del interferograma. Para un determinado punto en la master, se calculan las coordenadas (X, Y, Z) del satélite master, del satélite slave y del punto en el elipsoide de referencia. A partir de esto, se calcula la línea-base paralela y la fase.

La fase de tierra plana se calcula en varios puntos distribuidos sobre la imagen total, después de lo cual se estima un polinomio 2d (usando mínimos cuadrados) que se ajusta a estas observaciones. (SNAP software, help section)

Un polinomio de grado 5 normalmente es suficiente para modelar la fase de referencia para una escena SAR completa, mientras que se puede seleccionar un

grado más bajo para imágenes más pequeñas. La ventana con las opciones se puede observar en la Fig. 33.

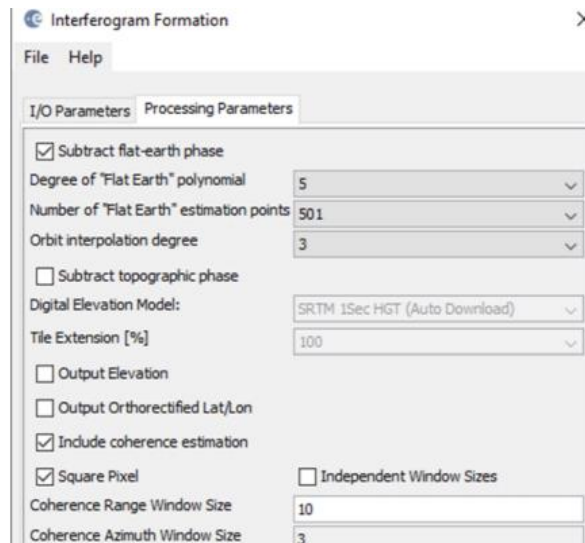


Fig. 33 - Ventana de creación del interferograma.

A continuación, se muestra uno de los resultados del proceso de formación de los interferogramas en la Fig. 34. Junto con las imágenes de cada par diferencial se crean los archivos que contienen los metadatos de cada resultado.

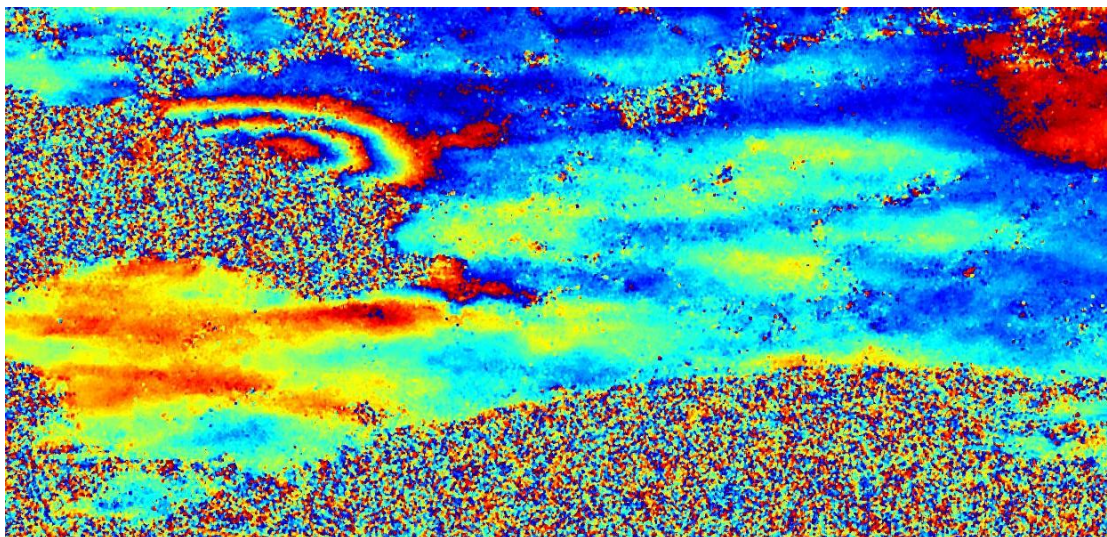


Fig. 34 - Interferograma formado en el proceso.

5.15.10 Geocodificación

La geocodificación se refiere a la transformación de coordenadas radar (rango / azimut / altura) a coordenadas en el sistema geodésico de referencia, como por ejemplo WGS84. Como resultado se obtienen las coordenadas de latitud y longitud para cada pixel de la imagen. Para esta operación utilizamos los parámetros orbitales y el modelo digital de elevación.

Según Hassen (2001), el procedimiento se basa en las siguientes condiciones:

- Para cada pixel en la imagen, es necesario conocer la magnitud del vector de rango $|R|$, que es la distancia de la celda a la órbita de referencia;
- La posición en el rango azimutal es conocida a través del número de la línea, la hora de inicio del azimut en referencia a la órbita y la frecuencia de repetición del pulso (PRF);
- Los parámetros del centroide Doppler y la dirección del vector de velocidad de la plataforma;
- Radio local terrestre (ρ), definido por el elipsoide y la altura de la topografía (H_p).

Estas condiciones definen el vector de posición en el sistema de referencia cartesiano geocéntrico. La latitud y la longitud pueden derivarse mediante una transformación Helmert inversa tridimensional.

El operador utilizado para esta operación en la plataforma SNAP es el back geocoding. Para más informaciones sobre geocoding ver Bamler y Schattler (1993).

5.15.11 Exportación del SNAP a StaMPS

Una vez que las imágenes master y slave están coregistradas y los interferogramas debidamente generados, es necesario exportar los resultados utilizando el operador StaMPS export. Ésta es la parte del procesamiento DInSAR, que convierte los resultados de procesamiento anterior en archivos raster binarios compatibles con StaMPS.

Estos son exportados a una carpeta, nombrados por la fecha de la imagen master seleccionada y divididos por los siguientes productos:

- Resampled SLC folder: Conjunto de las imágenes slaves re-muestreadas en relación al frame de la master.
- Diff0: Conjunto de los interferograma diferenciales generados.
- Geo: Conjunto de coordenadas latitud, longitud (φ_i , λ_i) referentes con el frame
- DEM: Modelo de elevación referente a la AOI

El resultado logrado con este paso es la estructuración de los archivos y sub-carpetas de acuerdo con las necesidades específicas para la integración en StaMPS.

El paso de la integración utiliza un script específico llamado `mt_prep_snap` que además detecta el número inicial de candidatos PS e extrae informaciones necesarias de cada PSC.

Durante la generación de los archivos ráster en formato binario complejo en SNAP se debe garantizar un manejo adecuado durante la integración en StaMPS (Foumelis y otros, 2018). Esto se debe a que una vez que el script en ejecución acuse un error en un interferograma, no se van a generar todos los otros subsecuentes.

Posteriormente, la cadena de procesamiento de StaMPS PSI se ejecuta desde el paso 1 al 7 como se describe en el Manual del usuario de StaMPS.

5.15.12 Definición de los PSC

El script `mt_prep_snap` lleva a cabo la selección de los PSC, estos deben poseer un comportamiento de fase estable durante el tiempo. Como se ha descrito en el punto 6.8, una opción es utilizar el índice de dispersión de la amplitud (D_a) definido por Ferreti et al. (2001).

Dentro de los parámetros que definen el script `mt_prep_snap` es importante definir dos de ellos:

- Amplitud de dispersión (0.4): Es recomendado elegir valores entre 0.4-0.42, sin embargo, para situaciones donde la cantidad de los

PSCs son bajas, si puede disminuye el valor para aumentar la cantidad de resultados. Es importante tener en cuenta que cuanto menor es el valor del filtro, mayor es la posibilidad de presentar falsos positivos.

- Número de PATCH en azimuth / range (3x2): La cantidad de PATCH va depender del tamaño del área y del potencial de procesamiento del ordenador. Hooper (2018) recomienda que un PATCH contenga un máximo de 5 millones de píxeles.

La zona de trabajo se divide en 6 (3x2) PATCHs con sus resultados mostrados en la tabla 5. En cada uno de ellos se encuentran y almacenan una cantidad de PSC.:

PATCH	PSC
#1	39206
#2	32317
#3	37539
#4	35628
#5	6182
#6	15008

Tabla 5 - Divisiones de los PATCHs y sus candidatos de PSC calculados

Los resultados de este paso son archivos en cada PATCH conteniendo las coordenadas ij de cada PSC.

5.15.13 Procesado PSI

El procesado PSI se realiza en el software StaMPS. Los archivos preparados en los pasos anteriores son procesados en el entorno MATLAB, siguiendo una secuencia lógica de definiciones de parámetros y chequeo de los resultados.

Entre los apartados a seguir se mencionarán solamente los principales parámetros en cada paso del procesamiento en StaMPS; todos los parámetros usados como entrada están disponible en el anexo-A.

5.15.14 Carga de los datos

En este paso se convierten los datos a los formatos requeridos para el procesamiento PSI y los almacena en los espacios de trabajo de MATLAB.

5.15.15 Estimación del ruido de la fase

Se trata de un paso iterativo que se encarga de estimar el valor del ruido de la fase para cada pixel candidato (PS) en cada interferograma. Se estima el ruido de la fase para cada uno de ellos, utilizando el análisis de la fase. Para una fase enrollada $\varphi_{x,i}$ de un pixel x_{th} pixel en un interferograma i_{th} se puede escribir como se indica en la ecuación (25):

$$\varphi = W\{\varphi_{D,x,i} + \varphi_{A,x,i} + \Delta\varphi_{S,x,i} + \Delta\varphi_{\theta,x,i} + \varphi_{N,x,i}\}, \quad (25)$$

donde:

- $\varphi_{D,x,i}$ es la fase referente al movimiento del pixel en la dirección LOS,
- $\varphi_{A,x,i}$ es la fase que representa la diferencia atmosférica entre las observaciones.
- $\Delta\varphi_{S,x,i}$ es la fase residual debido a la órbita satelital.
- $\Delta\varphi_{\theta,x,i}$ es la fase residual debido al error del ángulo de vista.
- $\varphi_{N,x,i}$ es el término del ruido que se compone por las decorrelaciones volumétricas, térmicas y geométrica citadas en el apartado 6.6.

Véase también Hooper y otros, (2007).

Los parámetros de más importancia en este paso son:

- Filter_weighting (p-square): Los candidatos son valorados utilizando P-squared.
- Clap_low_pass_wavelength(800): El filtro de paso bajo CLAP filtran basándose en la longitud de onda (m).

5.15.16 Selección de PS

Los píxeles son seleccionados en base a las características de sus ruidos, este paso va estimar el porcentaje de píxeles aleatorios (Non-PS) en el frame. A partir de ahí, se puede obtener su densidad por Km^2 .

El método de selección elegido fue el DENSITY con un porcentaje de píxeles aleatorios de hasta un 20%.

5.15.17 PS weeding

Los píxeles seleccionados en el paso anterior son cribados, eliminando así los que se consideran demasiado ruidosos o los que tengan demasiada contribución de la señal del vecino.

Este procedimiento se controla por los siguientes parámetros:

- weed_standard_dev (0.7): Umbral de la desviación estándar. Para cada píxel, se calcula la desviación estándar del ruido de fase para todos los pares de píxeles. Si la desviación estándar mínima es mayor que el umbral, el píxel es retirado. Si se establece en 1, no se realiza el cribado basado en ruido.
- weed_max_noise (2.5): Umbral para el ruido máximo permitido para un píxel. Para cada píxel, el ruido mínimo de un par de píxeles se estima por el interferograma. Los píxeles cuyo valor máximo de ruido de interferograma es mayor que el umbral indicado se eliminan. Finalmente, los píxeles se pueden clasificar según su ruido.

Este paso fue realizado dos veces seguidamente, en la primera se utilizó para conocer el comportamiento de los píxeles en relación a los parámetros mencionados en el párrafo anterior, para ello utilizamos los valores de weed_standard_dev como 1 y weed_max_noise como infinito. En resumen, no aplicamos ninguno tipo de umbral para los dos parámetros.

Después del análisis del comportamiento de los datos en los 6 PATCHs, se puede observar en la Fig. 35, que fue posible establecer y reprocesar con un umbral adecuado, haciendo con que los píxeles con respuestas atípicas fuesen excluidos.

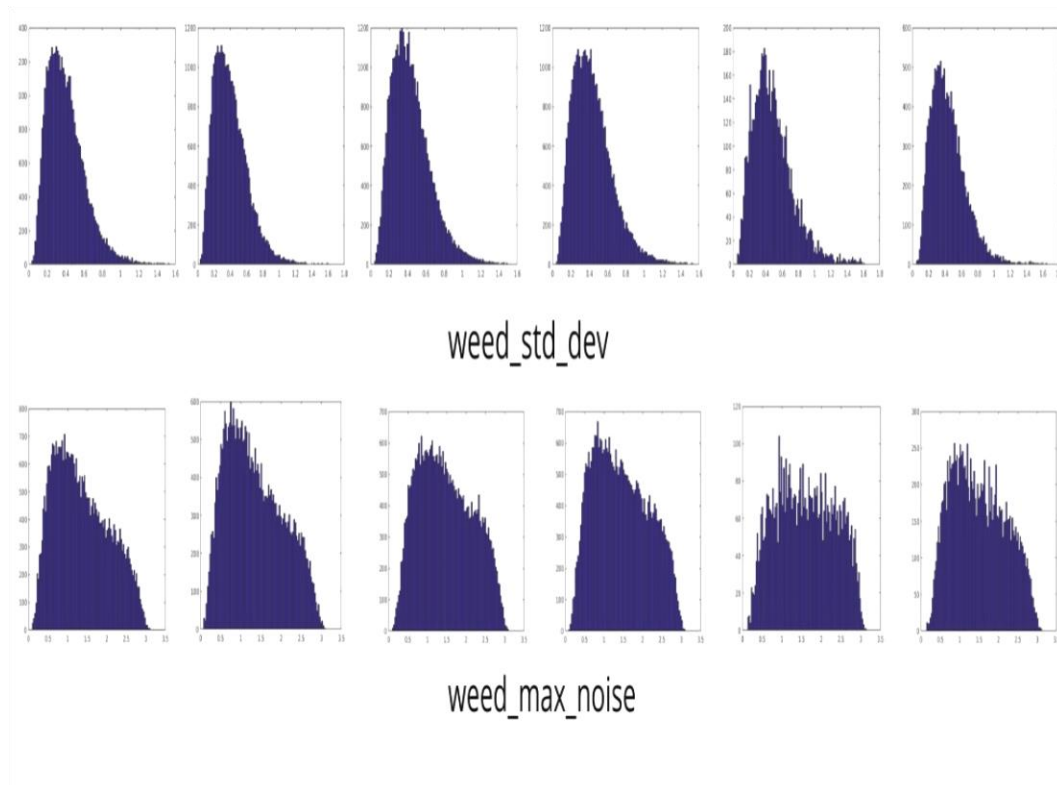


Fig. 35 - Gráficos de la desviación y ruido del proceso de weeding en cada uno de los 6 PATCH.

5.15.18 Corrección de fase

La fase enrollada de los píxeles seleccionados se corrige por el error del “look-angle” (DEM) no correlado espacialmente. Luego, se ha de verificar la fase enrollada de los píxeles seleccionados en los interferogramas. Utilizamos el comando `ps_plot(w)` en el entorno matlab para plotear los interferogramas envueltos (wrapped) como se puede observar en la Fig. 36. En la Fig. 37 tenemos tres de estos pares separados para facilitar la observación de este subproducto.

El primer aspecto a considerar es la cantidad de píxeles y si estos cubren las zonas de interés y la zona de referencia de manera satisfactoria. Este parámetro puede ser acotado por los umbrales definidos en el paso anterior, sin embargo, se debe tener en cuenta que en la escena existe la falta de píxeles, al aumentar el umbral de la desviación estándar, aumentando así el riesgo de falso positivos. Igualmente se puede aumentar la cantidad de PSC en el parámetro de la dispersión de amplitud.

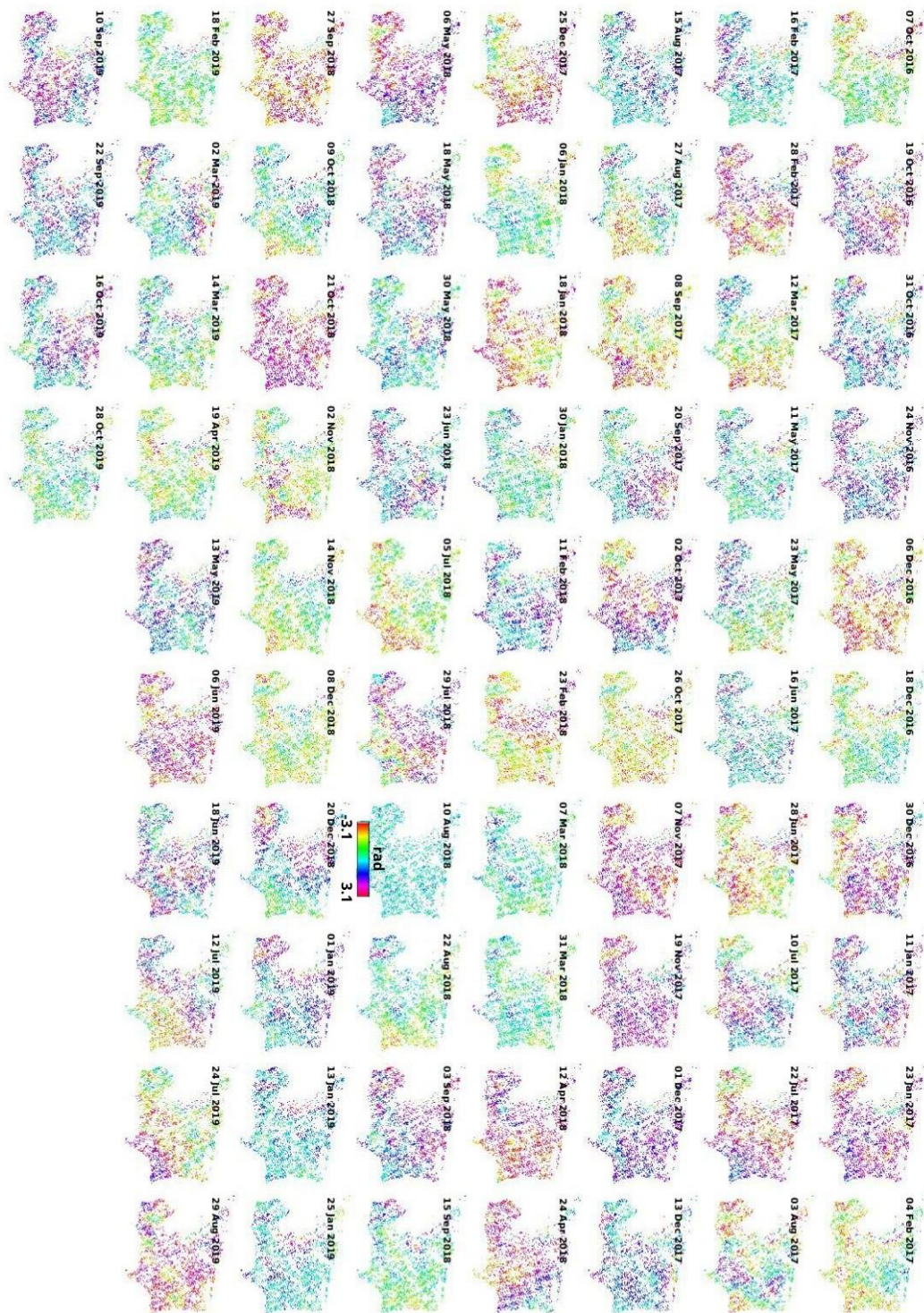


Fig. 36 - Imagen de todos los interferogramas enrollados.

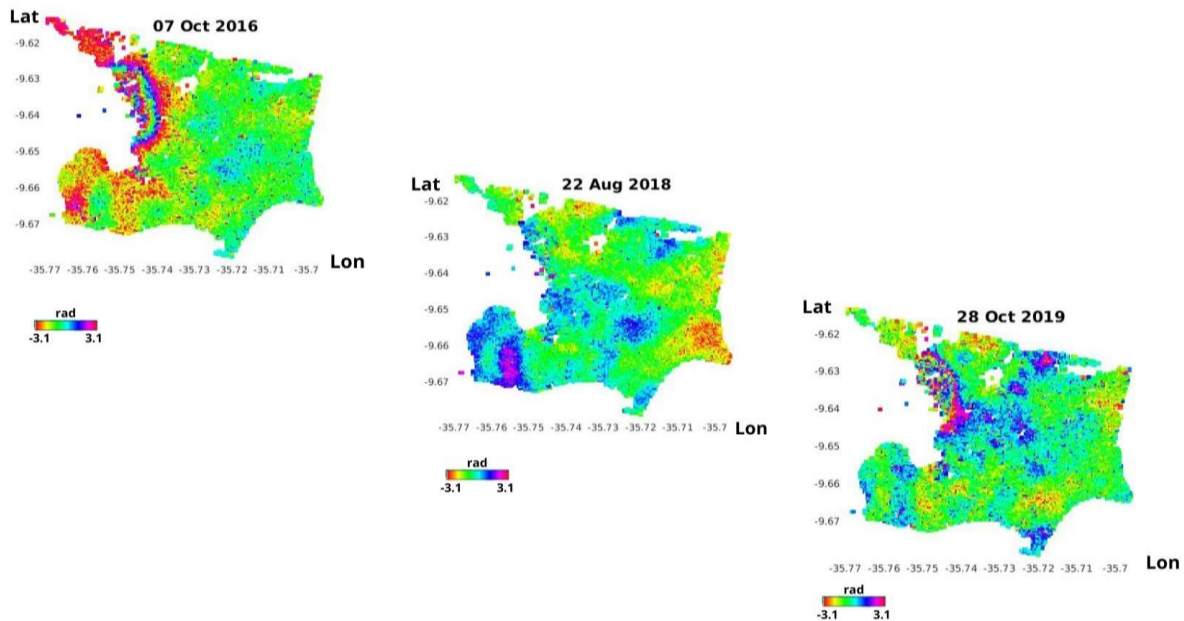


Fig. 37 - Imágenes de los interferogramas envueltos. Tres ejemplos de los 74 pares.

5.15.19 Desenrollado de la fase (Phase unwrapping)

El desenrollado de la fase es el proceso de recuperar los valores de fase ambigua de la fase, valores que solo se conocen en el módulo 2π (datos enrollados). Es el proceso clave en la extracción de la señal de deformación precisa.

El software utilizado para la obtención del interferograma desenrollado en este trabajo fue Snaphu. Snaphu implementa los algoritmos Statistical-cost y Network-flow para desenrollar la fase los cuáles fueron propuestos por Chen y Zebker (2000, 2001, 2002). Aún más, este algoritmo plantea el desenrollado de fase como un problema de estimación de probabilidad máxima a posteriori (MAP), cuyo objetivo es calcular la solución desenrollada más probable dados los datos de entrada observables.

Snaphu incorpora tres modelos estadísticos para datos de topografía, datos de deformación y datos genéricos uniformes (Chen y Zebker, 2000, 2001, 2002). El software está escrito en C y puede ejecutarse en la mayoría de las plataformas Unix / Linux.

Este proceso sufre gran influencia de los siguientes parámetros:

- `unwrap_method` (3D_new): Los PS pueden ser desenrollados por soluciones en 2 dimensiones. Sin embargo, los PS utilizados en la metodología MT-InSAR son 3D de facto, donde la tercera dimensión es el tiempo. Hooper (2007) describe los fundamentos de los algoritmos 3D y 3D_new utilizados en la plataforma StaMPS. El método 3D_new mejora considerablemente la precisión del procedimiento de desenrollado de fase.
- `unwrap_gold_alpha` (0.8) y `unwrap_gold_n_win` (32): Son valores utilizados en el filtro Goldstein. Para los valores de alpha, cuanto mayor sea el valor, más fuerte será el filtrado. Y el otro parámetro es el tamaño en días de la ventana para el filtro Goldstein. (Goldstein y Werner, 1998).

Como resultado de este paso tenemos los interferogramas desenrollados (Fig. 38). Sobre ellos, es necesario identificar si hay errores en el proceso de desenrollado de fase, es decir, saltos de fase bruscos en el espacio que no se correrán con el paso del tiempo. La adecuación de la escala de color ayuda en el proceso de identificación de errores. Estos son más probables que ocurran en interferogramas con líneas-base perpendiculares más largas por dos razones, en primer lugar, porque hay más ruido asociado con cada pixel PS y, en segundo lugar, porque la fase como consecuencia de cualquier error “look-angle” espacialmente correlado (SCLA) es mayor, ya que es proporcional a la línea-base perpendicular (Hooper y otros, 2018).

El ruido se reduce realizando un filtrado espacial antes de desenrollar la fase, pero también es posible estimarlo ejecutando el paso siguiente de estimación del error SCLA (8.2.7). Para ello utilizamos los interferogramas ya desenrollados y sin errores en el proceso de creación. A partir de ahí, se vuelve a ejecutar de nuevo el paso de desenrollado (8.2.6), generando entonces interferogramas desenrollados sin los errores de proceso ni ruidos espaciales.

Además, la precisión en el desenrollado se mejora aún más restando también temporalmente la fase (contribución) de la atmósfera y del error orbital (AOE) de la imagen master, presente en todos los interferogramas, que puede ser estimado también en el siguiente paso.

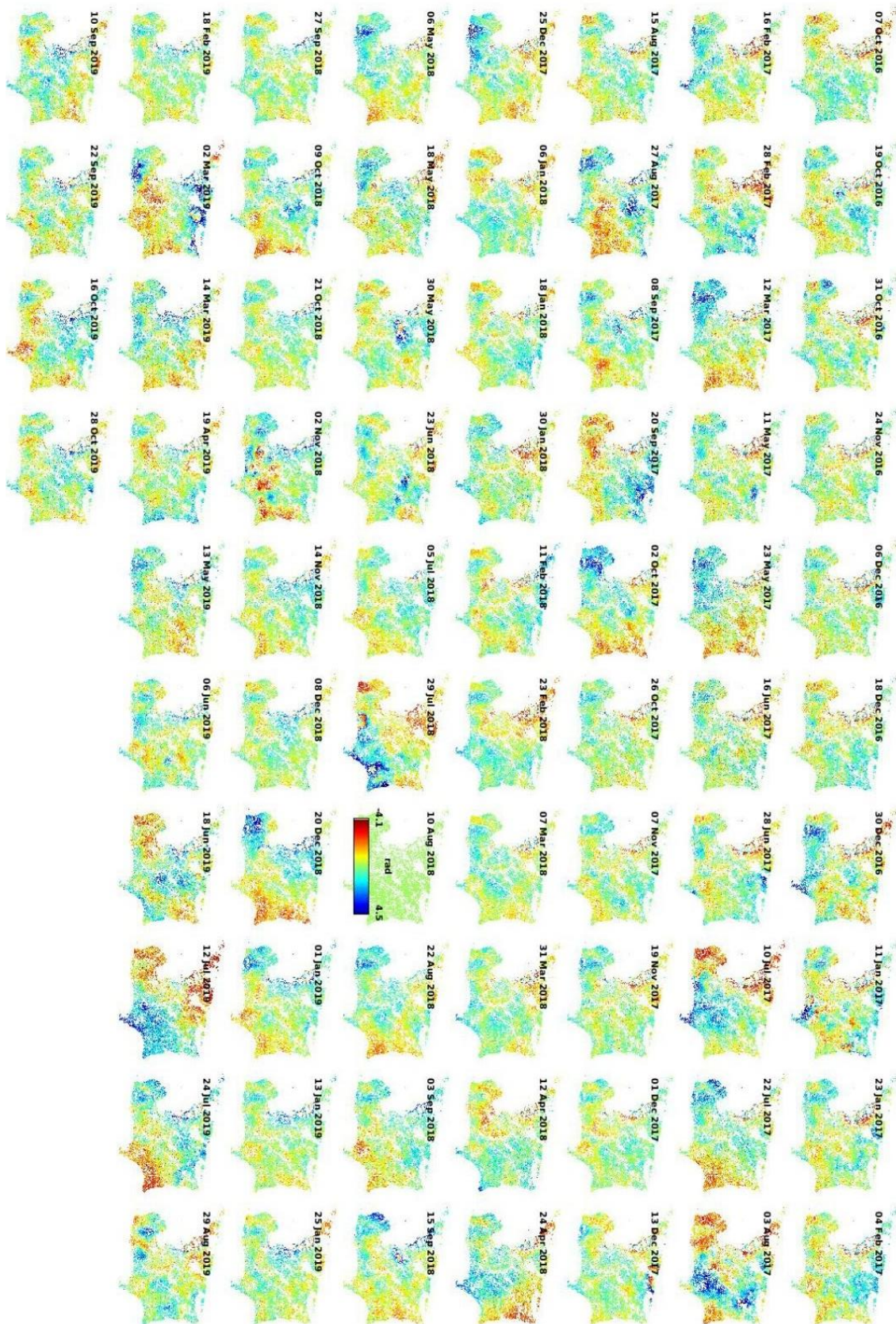


Fig. 38 - Interferogramas desenrollados (resultado del phase unwrapping).

5.15.20 Estimación del error espacialmente correlado (SCLA) y del error atmosférico y orbital de la imagen master (AOE)

Después de desenrollar las fases, en este paso del procesado, se calcula el error del ángulo de vista (look angle) espacialmente correlado (SCLA). Este error se debe casi exclusivamente al error correlado espacialmente del DEM (incluye el error en el mismo DEM y la incorrecta asignación de coordenadas radar de éste). Una vez separada la contribución del correlado espacial (Fig. 39), nos queda entonces la contribución atmosférica y el error orbital de la master. Para sistemas ERS y Envisat que tienen características similares al Sentinel-1, el error de 0.01 rad/m (radianes por m de línea de base) puede llegar aproximadamente a 12 m de error, representado por el comando `ps_plot('d')`.

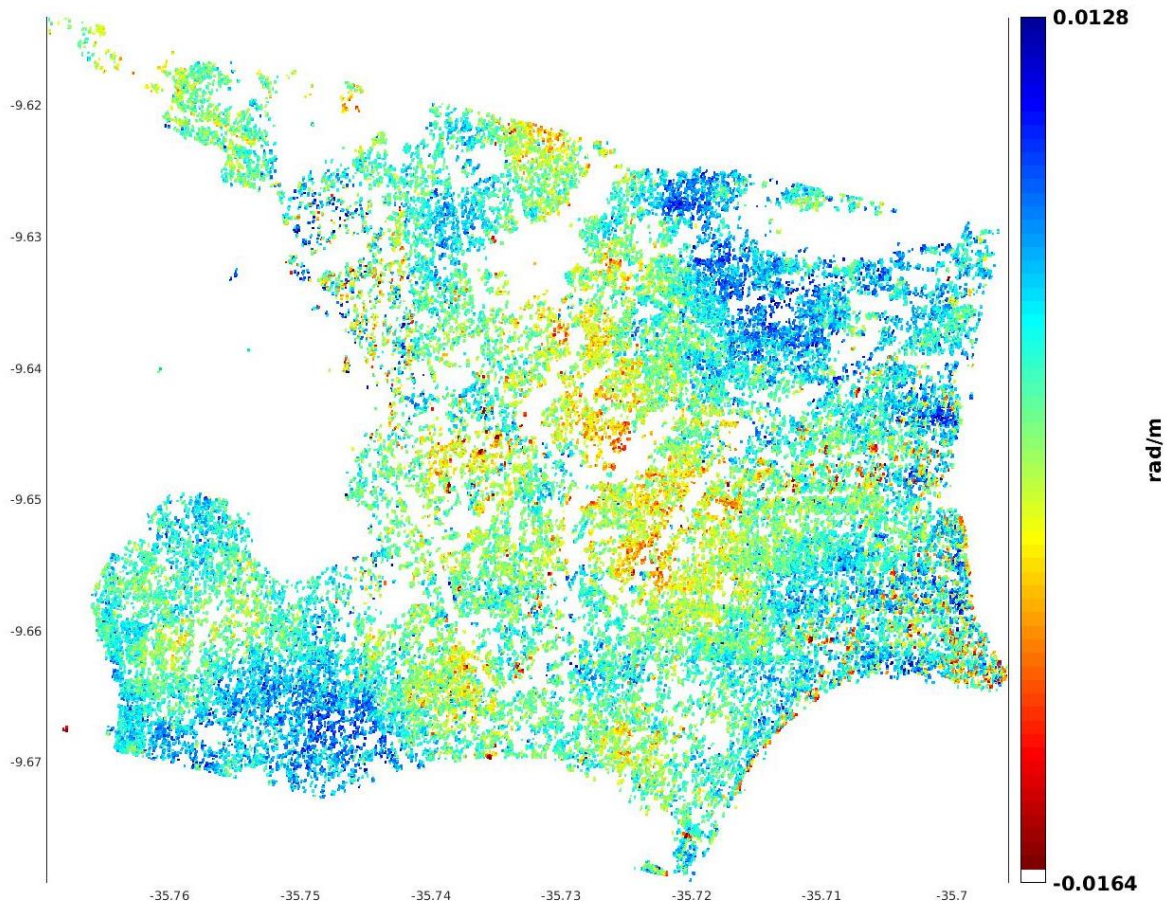


Fig. 39 - Imagen del error espacialmente correlado (SCLA).

En la Fig. 40 es posible observar la fase de la atmósfera de la imagen master y su error orbital correspondiente, representado por el comando `ps_plot('m')`.

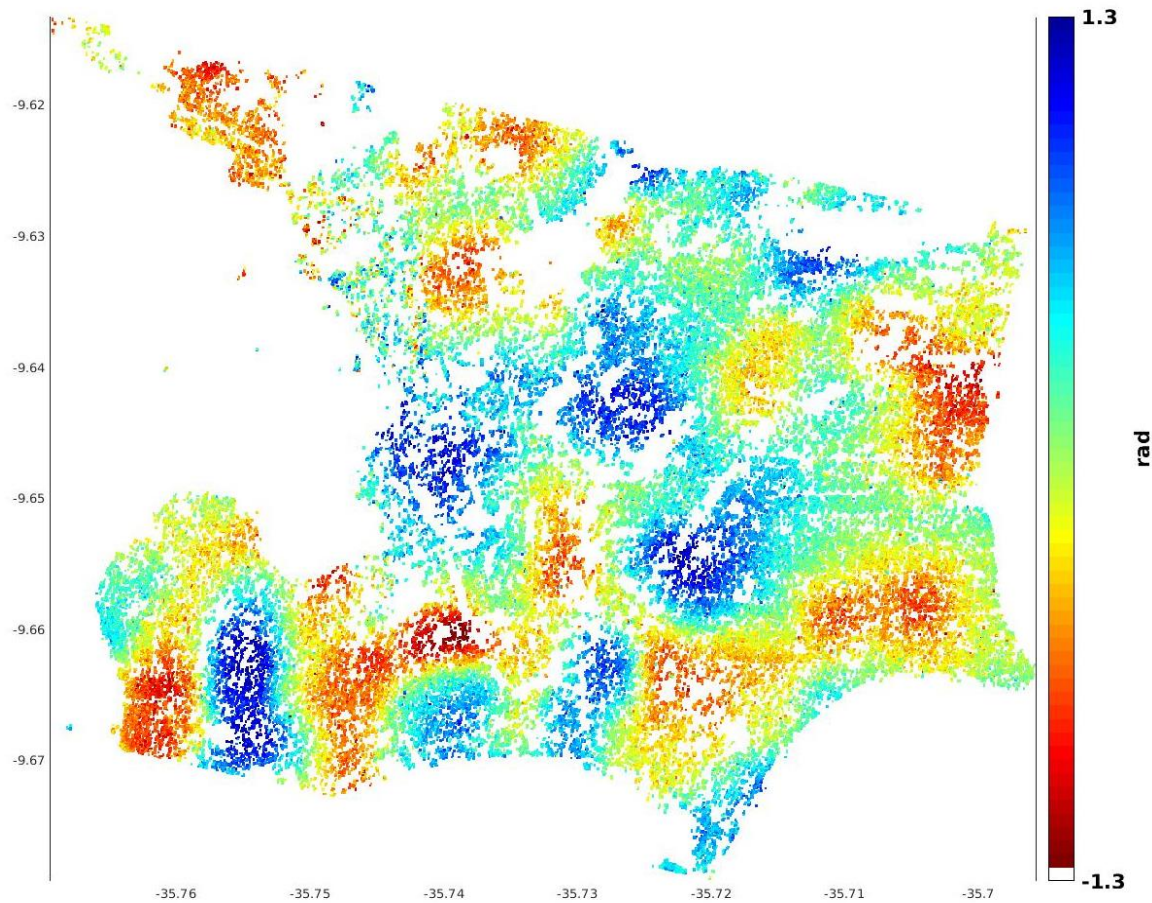


Fig. 40 - Plot de la estimación atmosférica de la imagen master y del error orbital.

En la Fig. 41 se representa la componente orbital de la fase (rampas orbitales) para cada uno de los interferogramas, utilizando el comando `ps_plot('o')`. Puede ser interesante observar la fase sin enrollar con una rampa de fase lineal sustraída, especialmente si solo interesan las señales locales.

Con estos productos podemos hacer combinaciones con la fase desenrollada, utilizando una aritmética sencilla como, por ejemplo: 'u-d', 'u-m', 'u-o', 'u-dm', 'u-do' o 'u-dmo'. Es importante comprobar si hay errores en el proceso de desenrollado, es decir saltos de inconsistencia en la fase. Este es más probable que ocurra en interferogramas con líneas de base perpendiculares más largas. Esto ocurre por dos razones, en primer lugar, hay más ruido asociado con cada PS y, en segundo lugar,

la fase debida a un error del DEM espacialmente correlado es mayor, ya que es proporcional a la línea de base perpendicular. Para el caso de los datos Sentinel-1, como ya se ha citado anteriormente, las líneas de base son pequeñas, resultando en pequeñas influencias debido este error.

Después de ejecutar este paso, se comprueba que las estimaciones parecen razonables, es decir, la fase desenrollada menos las estimaciones SCLA, AOE y rampas orbitales (Fig. 41) se observa más “suave” que la fase desenrollada (Fig. 37).

En la Fig. 41 y en la Fig. 42 es posible observar el plot de la fase desarrollada menos las contribuciones del SCLA atmosférica, el error orbital de la master y la componente orbital de la fase de las slaves, este es representado por ‘u-dmo’. La Fig. 41 tiene como referencia la imagen master (10/08/2018) y la Fig. 42 la primera imagen de la serie (07/10/2016).

En la Fig. 43, es posible observar la variación de la deformación acumulada (mm) en relación al año 2016 de los distintos periodos del dataset. En las Fig. 44-45-46 tenemos el comportamiento anual de la deformación, es decir, la variación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) de cada año.

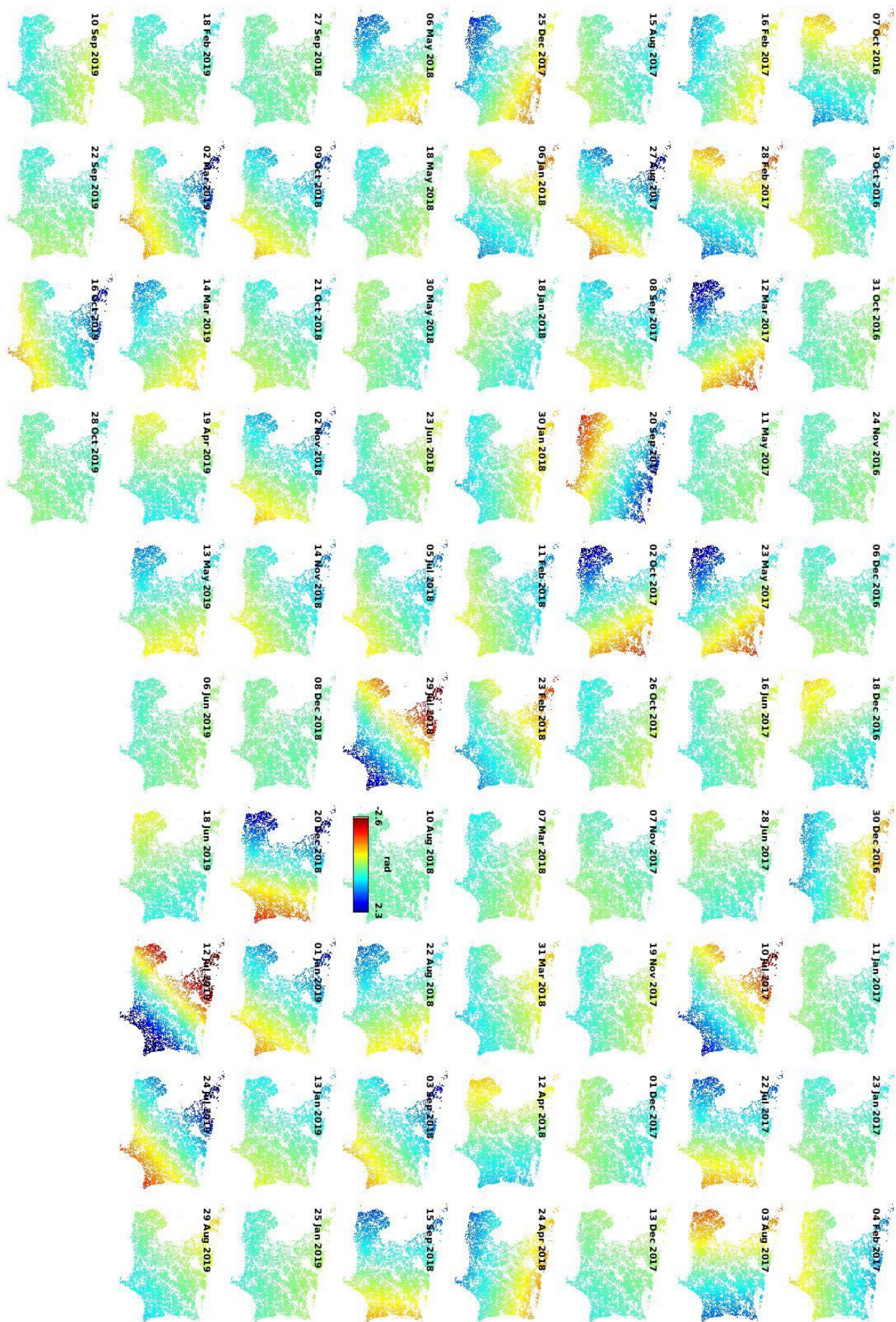


Fig. 41 - PSI. Fase desenrollada (rad) menos SCLA, master AOE, órbitas y slave AOE, en radianes.

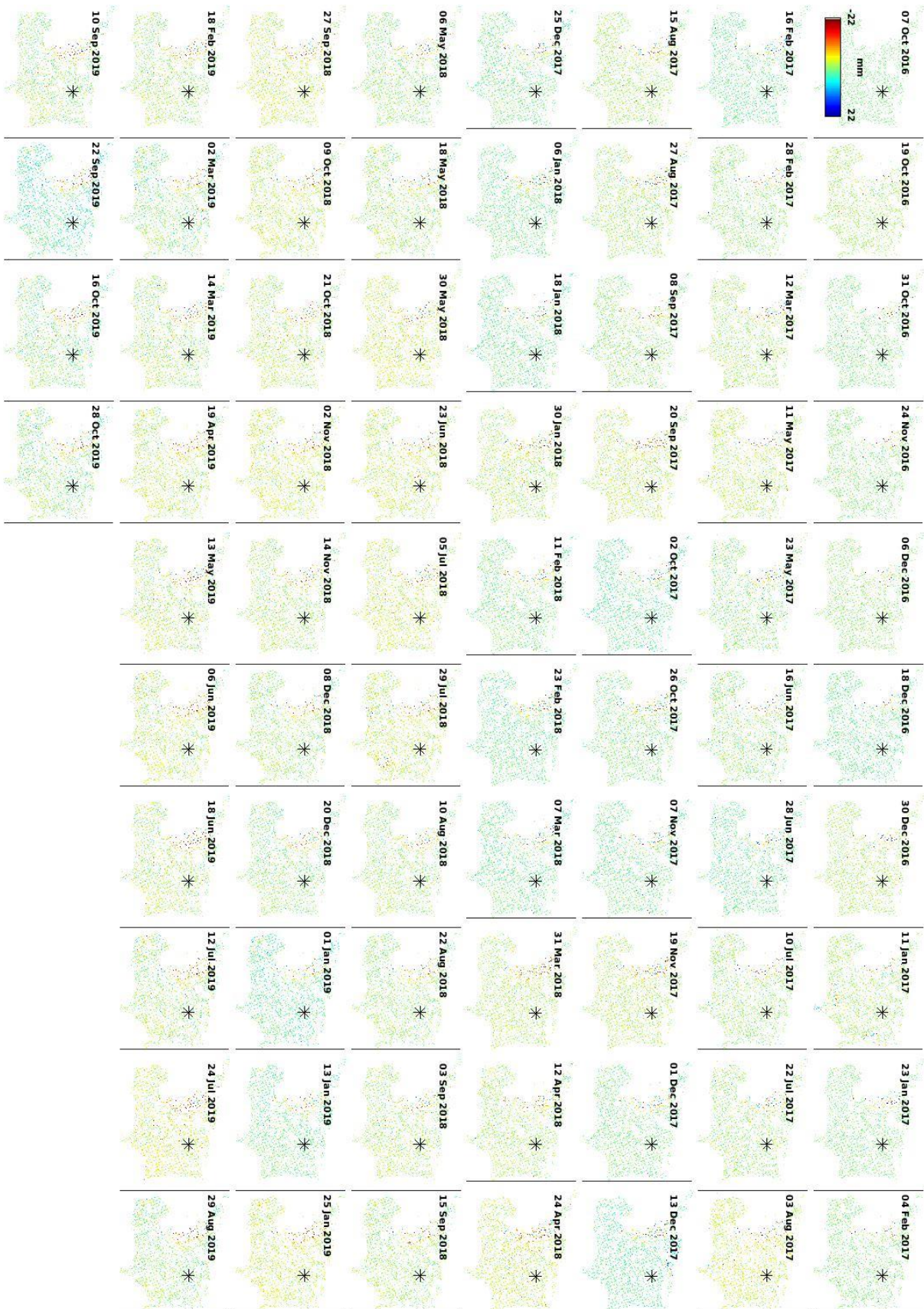


Fig. 42 - PSI. Fase desenrollada menos SCLA, master AOE, órbitas y slave AOE. En milímetros.

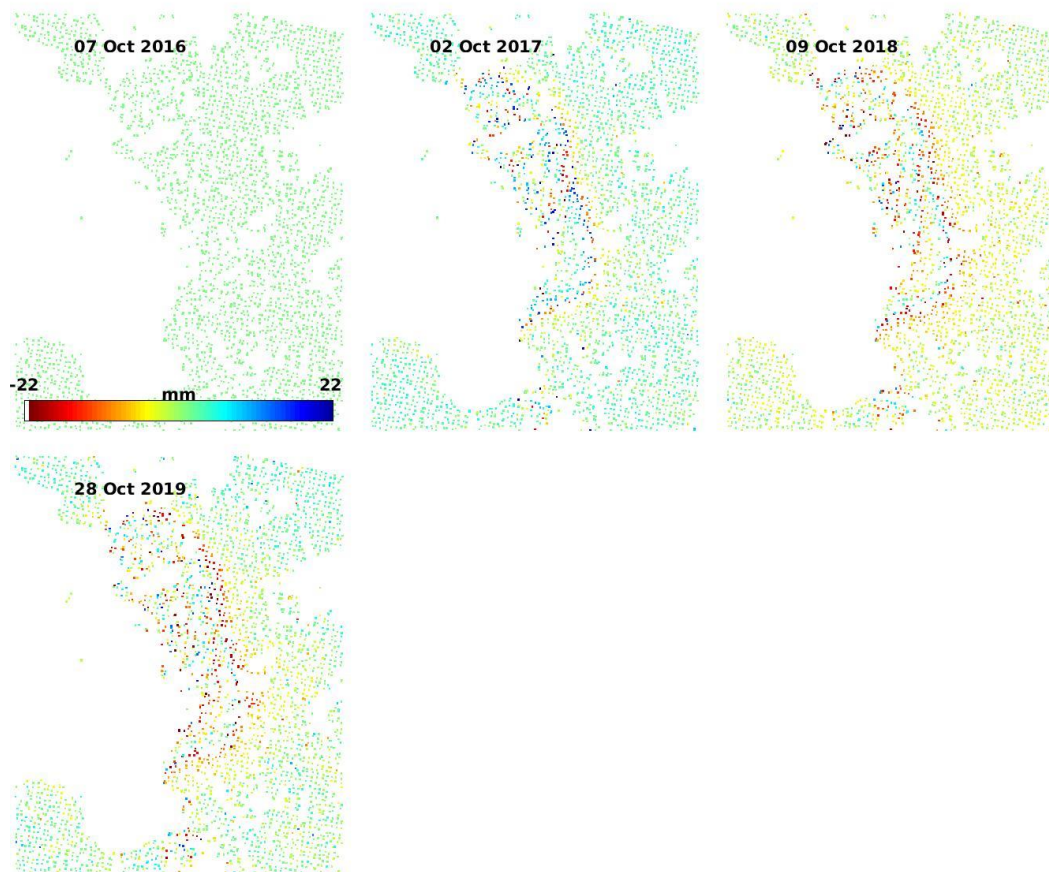


Fig. 43 - La variación de la deformación acumulada (mm) en relación al año de 2016.

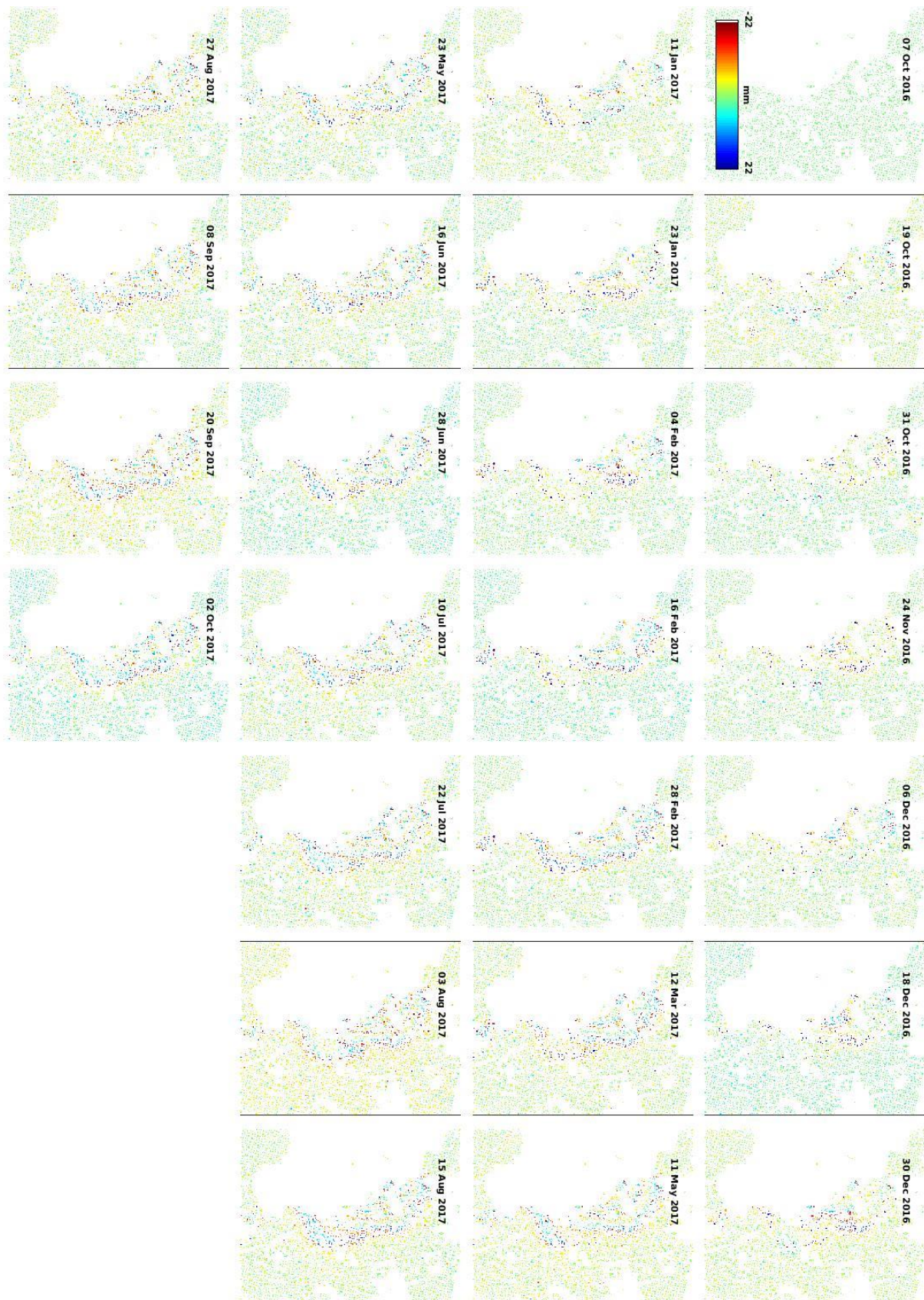


Fig. 44 – Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2016-2017.

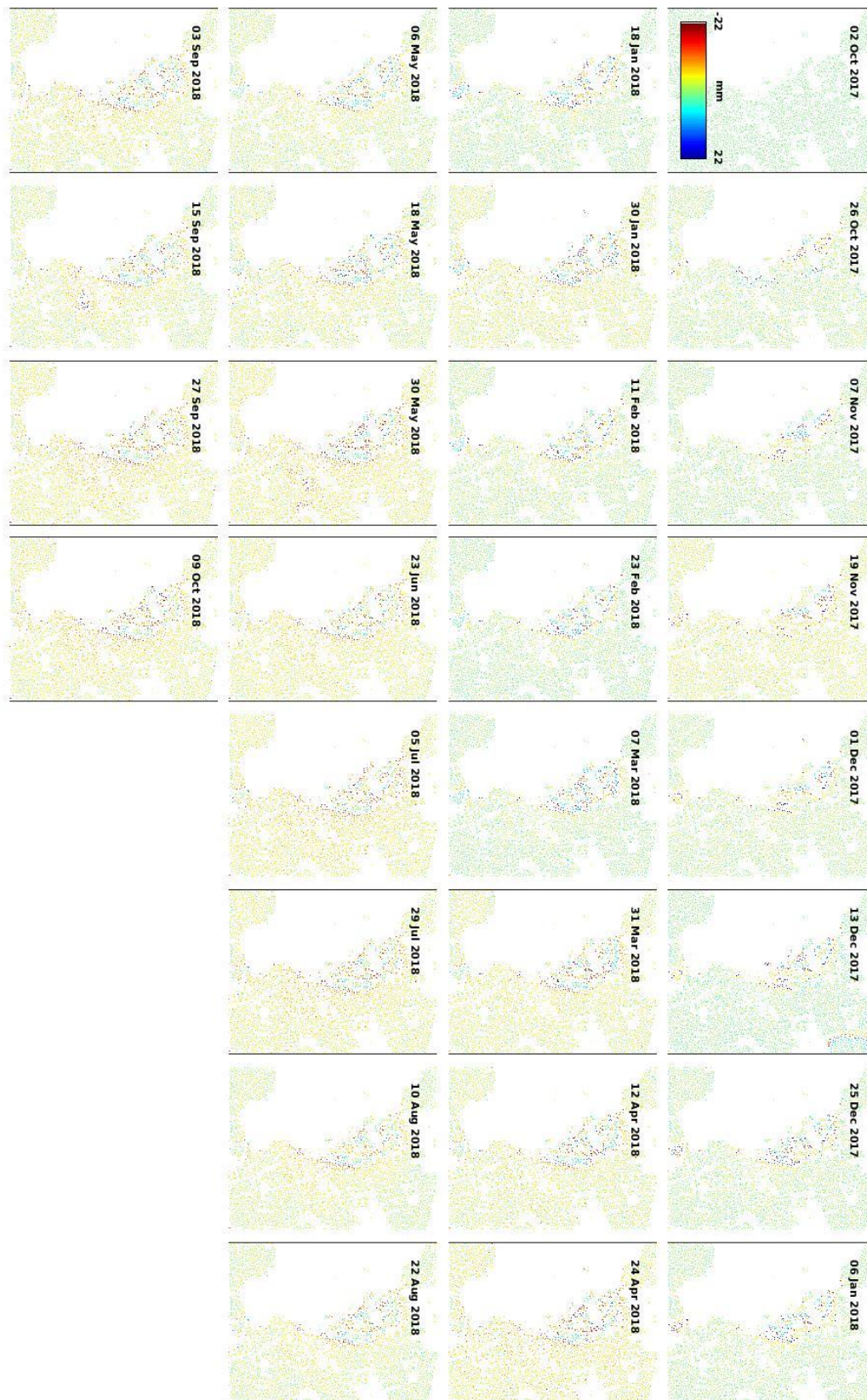


Fig. 45- Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2017-2018.

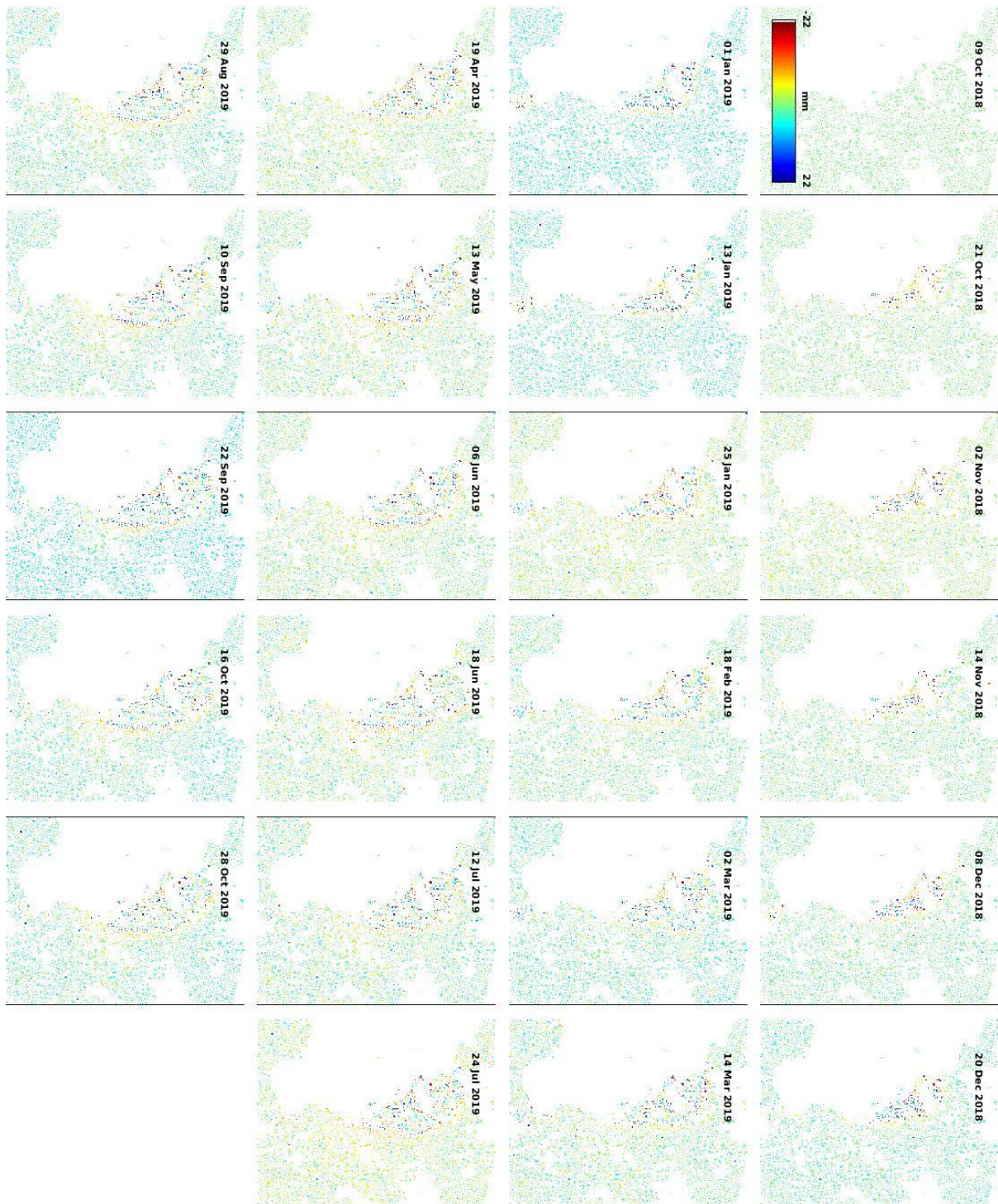


Fig. 46 - Variación de la deformación entre la primera y la última imagen (presente en el dataset) entre los años 2018-2019.

5.15.21 Filtrado de los artefactos atmosféricos

En este paso se filtra la influencia de los artefactos atmosféricos presentes en el AOI. Para llevar a cabo esta operación se utiliza la herramienta TRAIN (Bekaert y

otros, 2015), que permite la corrección troposférica dentro del procesamiento InSAR. La corrección troposférica aplicada es de carácter lineal, utilizando las técnicas de retardo hidrostático y retardo de humedad. Resultados

Los resultados que se muestran a continuación muestran en el mapa de velocidad total del AOI, cuantifican los valores de la deformación, el análisis de microzonas dentro del área de interés, de la evolución temporal y de los parámetros involucrados en el procesamiento y resultados.

Debido a la limitación de disponer solamente de imágenes procedentes de Sentinel-1, es inviable descomponer los vectores de desplazamientos para obtener la velocidad de desplazamiento vertical.

6 Resultados y Discusión

6.1 Mapa de velocidad media

En la Fig. 47 es posible observar la velocidad media en la dirección LOS (VLOS) en mm por año, derivadas del procesado del dataset con 74 imágenes de 2016 hasta 2019, utilizando el método PSI con los software SNAP y StaMPS. La velocidad VLOS se representa restando las componentes de ruido y la componente troposférica calculada en el paso anterior.

Cada píxel resultante contiene como información el valor medio de la velocidad LOS por año y su valor de desviación estándar (Fig. 48). Esta tiene como objetivo el análisis a posteriori, el tipo y magnitud de las deformaciones durante el periodo de la serie.

Como se ha citado en la referencia teórica, la velocidad, así como su desviación típica, son relativos a una zona de referencia que se considera estable y al nivel del suelo. La zona de referencia se puede elegir basada en distintos análisis y con distintos datos, sin embargo, es necesario analizar algunos aspectos importantes durante el procesado. Uno de ellos son los valores de velocidad y altitud de los píxeles cercanos al elegido como referencia, la estadística de los valores de desviación típica de los píxeles alrededor de la referencia debe tener comportamiento normal y valores cercanos a cero. El centro de la referencia se eligió por medio de un análisis previo

del comportamiento de la fase, utilizando visualizaciones mediante Google Earth para elegir un punto más cerca al suelo posible. El punto está representado con una estrella y posee coordenadas [Lat, Long] [-9.637717 -35.717918] y con uno radio de 50 m.

El área está localizada en el barrio del Jacitinho, en la zona norte de la ciudad de Maceió, a aproximadamente 3 km al este de la zona afectada por la deformación. Igual que el barrio del Pinheiro, es una zona residencial con gran tasa de ocupación del suelo. En la Fig. 49 se puede observar las zonas citadas y la totalidad de píxeles representados con una graduación de colores entre -10 y 10 mm/año.

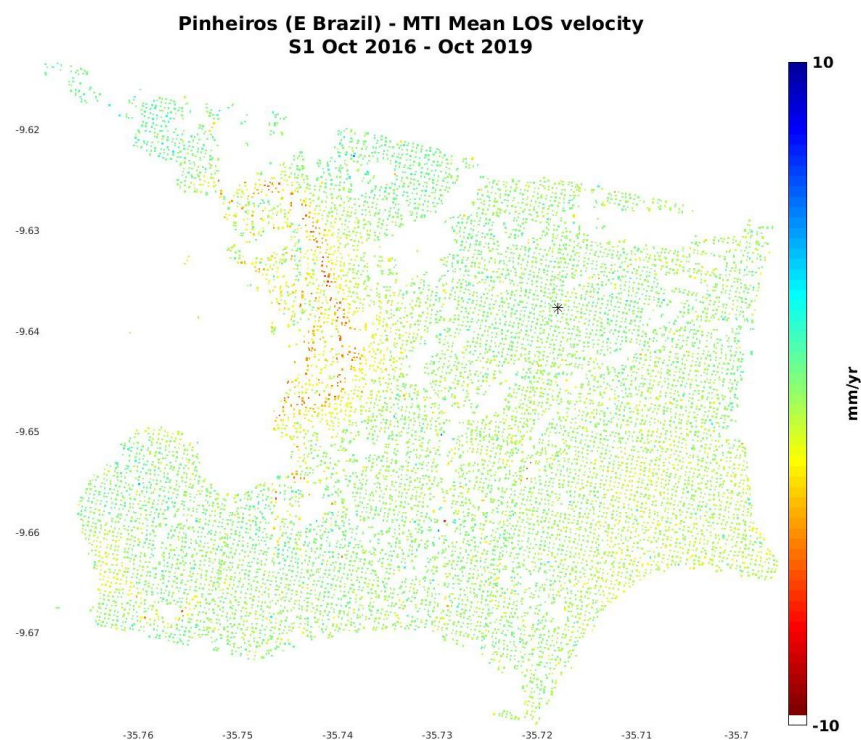


Fig. 47 - Velocidad media (mm/año) en dirección de la LOS.

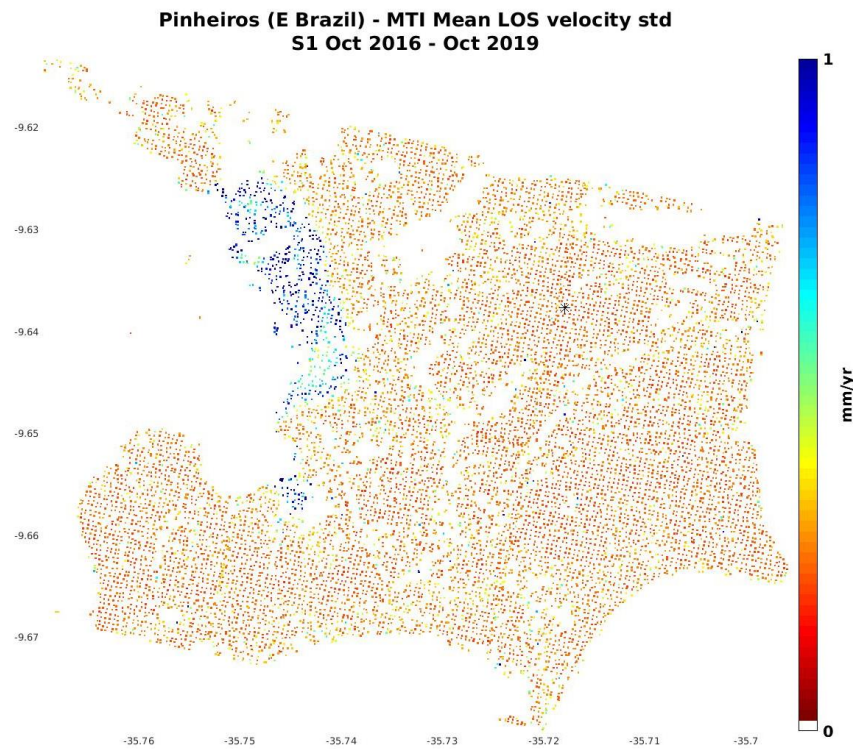


Fig. 48 - Desviación estándar (mm/año) de la velocidad media en la dirección LOS.

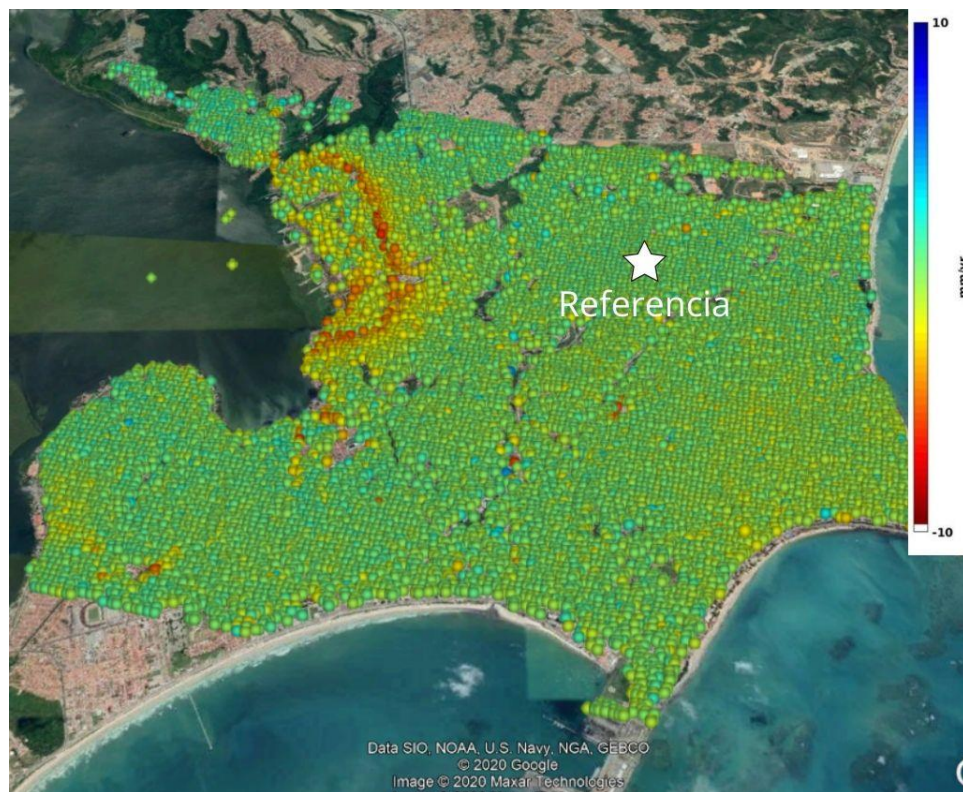


Fig. 49 - velocidad media (mm/año) en dirección LOS superpuestas en imagen de Google Earth. Zona de referencia indicada mediante una estrella.

Con el objetivo de analizar el frame en su totalidad y el comportamiento de los píxeles dentro de la zona afectada por la deformación se eligió una muestra de 15 puntos, que representan el resultado de la media de los valores de todos los píxeles en un radio de unos 50 m alrededor de ellos. Los puntos están representados en la Fig. 50 y están divididos en tres grupos, el grupo a (1) que está ubicado en la zona de referencia, el grupo b (2-5) que representa una zona más cercana del barrio de Pinheiro y el grupo c (6-15) que es exactamente la zona de interés.

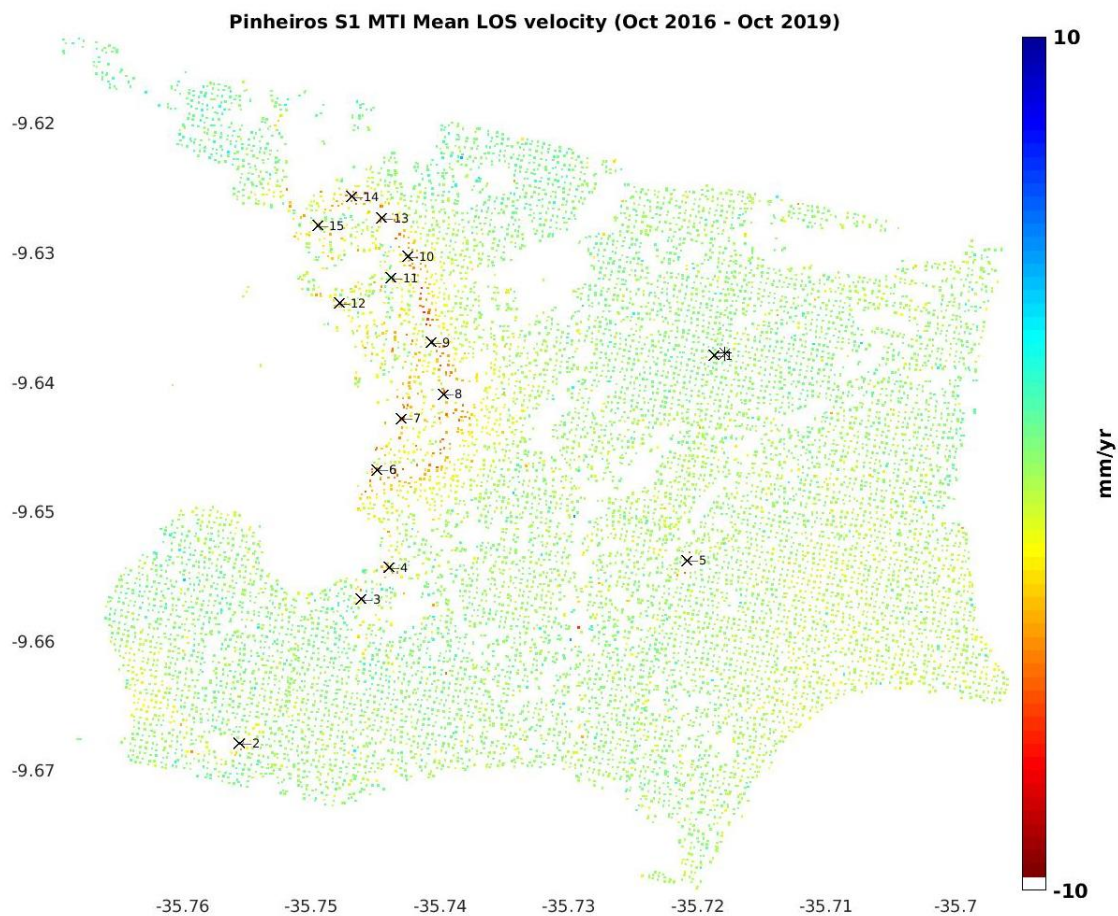


Fig. 50 - Puntos amuestras sobre la velocidad media (mm/año) en dirección LOS.

En el grupo a, tenemos la muestra número 1, con velocidad media en la dirección LOS entre los años observados de -0.2 mm/año (Fig. 51), este valor de la serie temporal es exactamente el comportamiento esperado para un punto dentro de la zona de estable.

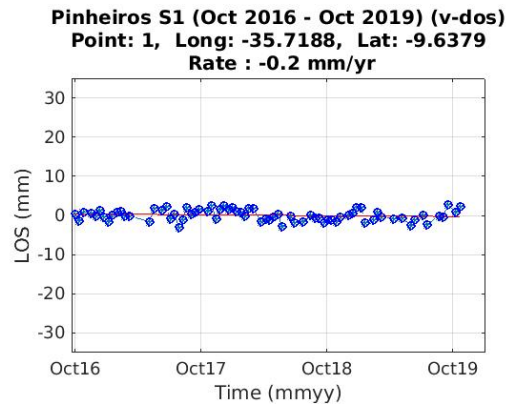


Fig. 51 - Series temporales de la deformación producida (mm) para el punto-muestra 1.

Para los puntos del grupo *b*, son puntos que representan valores de velocidad media-baja en comparación con los restantes. Son parte de una zona en la que no hubo casos visibles de daños, sin embargo, está siendo también afectada por hundimientos con velocidades considerables, en especial en la zona de los puntos 3 y 4 con velocidades media en la dirección LOS de -4.3 mm/año y -2.8 mm/año respectivamente; sus series temporales son representadas en la Fig. 52. El máximo valor de la velocidad LOS media en esta zona es de -6.5 mm/año. Con respecto a la zona de referencia, esta zona también tiene gran cantidad de ocupación del suelo basada en casas residenciales.

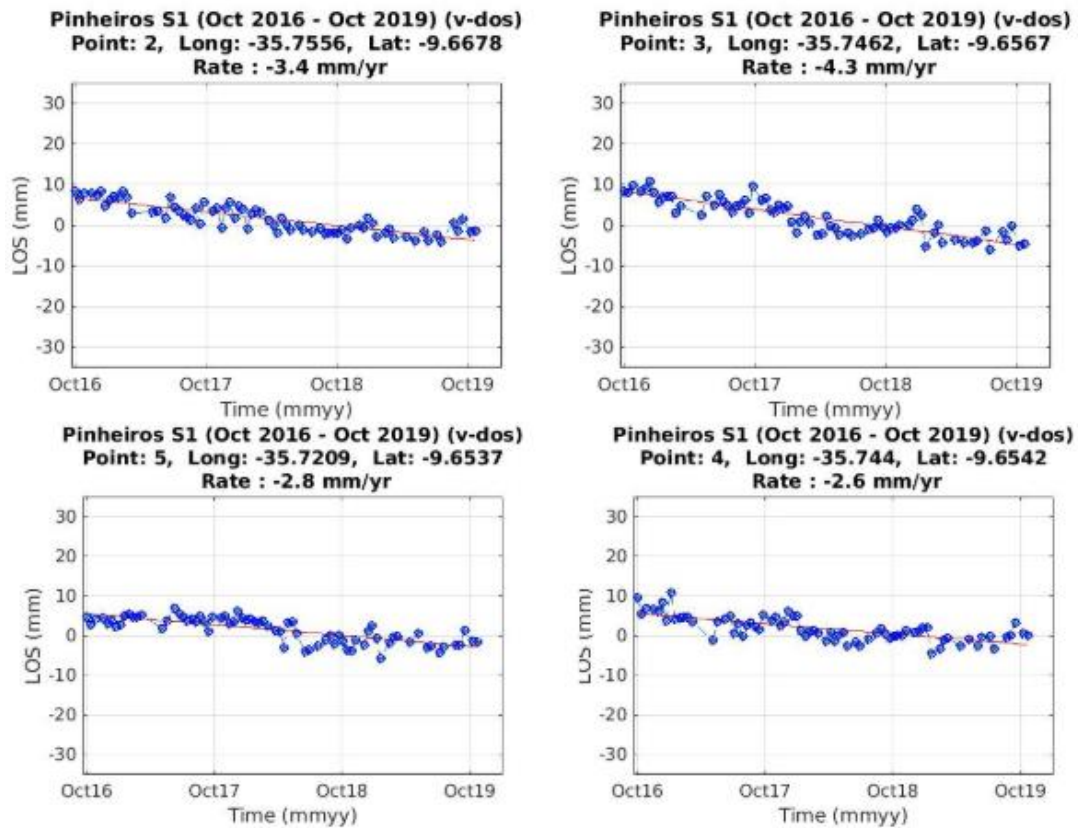


Fig. 52 - Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra de 2 hasta 5.

Finalmente, el grupo de puntos c se encuentra en la zona más afectada por la subsidencia y, consecuentemente, donde se produjeron los mayores daños. Es una zona casi en su totalidad residencial con pocas áreas de espacio verde entre las casas. En esta zona la máxima velocidad media en la dirección LOS fue de -7.1 mm/año. La serie temporal de los puntos 6-15 están representados en la Fig. 53.

Es importante el análisis del comportamiento de estas zonas con el paso del tiempo, por ejemplo, las zonas referentes a los puntos 11, 12, 13 y 15 presentan una variación un poco atípica en la serie. Estas variaciones pueden estar correlacionadas con los valores de coherencia de estos puntos en la serie temporal. Estos valores pueden ser afectados por factores de decorrelación de fase causados por aspectos físicos a que estos puntos están sujetos.

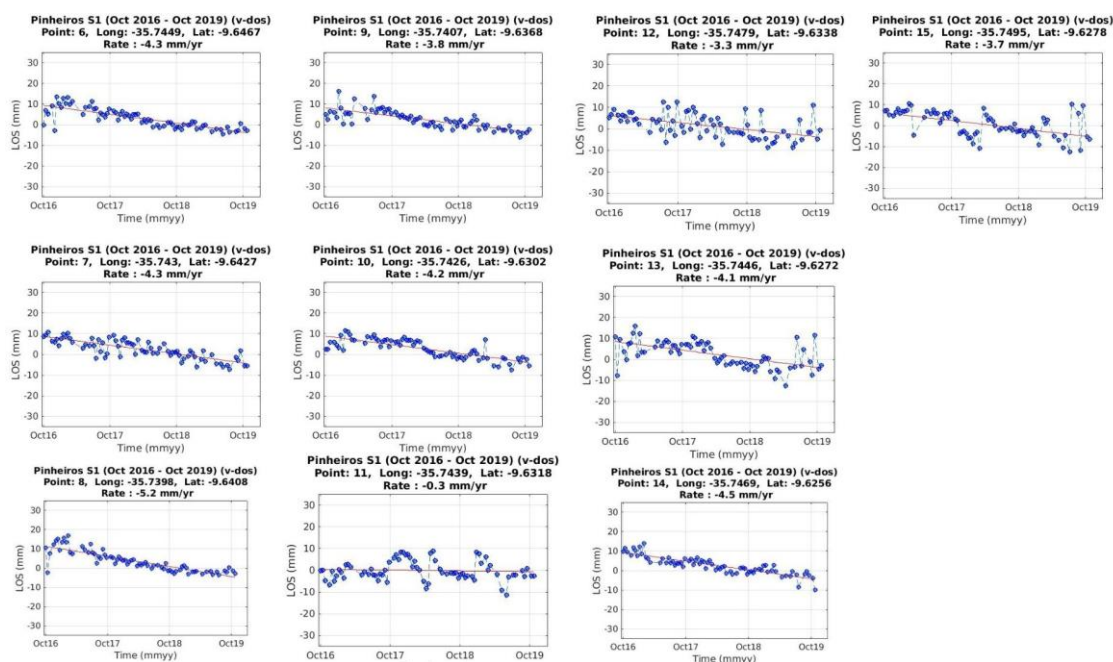


Fig. 53 -Series temporales de la deformación producida (mm) para los puntos-muestra de 7 hasta 15.

6.2 Correlaciones con los datos observados por la CPRM

En este apartado se analiza la correlación espacial de los inmuebles afectados por la subsidencia de las grietas visibles en la calle y de la localización de los pozos de extracción de sal gema con las subsidencias detectadas con interferometría radar. Este análisis se ha realizado en un entorno SIG (QGIS), donde fue necesario hacer algunas transformaciones de la información disponible.

El primer paso fue transformar el archivo kml de las velocidades medias en la dirección LOS a formato shapefile, donde cada píxel fue transformado en un punto, conservando su coordenada original y transformando las velocidades en atributos descritas anteriormente. Para estructurar de manera más organizada la tabla de atributos, se elaboró un identificador único para cada punto y, además, fue realizada una limpieza y conversión para los valores numéricos de las descripciones.

Una vez que se ha asociado la velocidad VLOS a cada punto es posible utilizar esta capa de información para análisis espaciales. A partir de estos datos fue posible establecer la correlación espacial representada en la Fig. 54 que representa la correlación entre grietas y daños observados en la calle con los píxeles clasificados por la velocidad LOS de subsidencia. Estos datos sirven para delimitar claramente el

área afecta y como y ponderar las respuestas de emergencias basada en la información geográfica.

Aún más, se realizó un filtrado para dejar solamente los puntos con VLOS superior a -3.0 mm/año, con que se extrajeron 351 puntos de los 11169 totales (Fig. 55). Es posible identificar con este dato un umbral de riesgo, es decir, cuando en la zona el VLOS pasa por el umbral de -3.0 mm/año, es probable la identificación de su efecto en la superficie.

CORRELACIÓN ENTRE RESULTADO INSAR Y LOS EFECTOS CAUSADOS POR LA SUBSIDENCIA

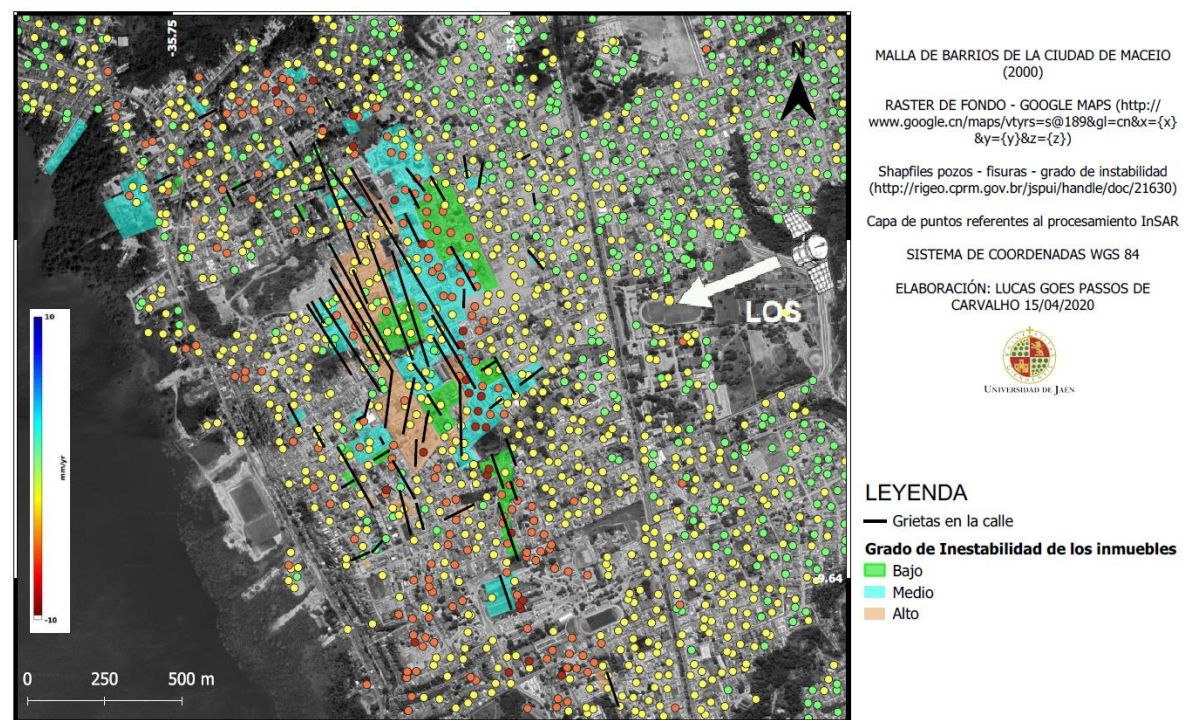


Fig. 54 - Correlación entre resultado del procesado InSAR y los efectos causados en la zona por la subsidencia.

CORRELACIÓN ENTRE VLOS MAYORES DE -3.0 mm/yr Y LOS EFECTOS CAUSADOS POR LA SUBSIDENCIA

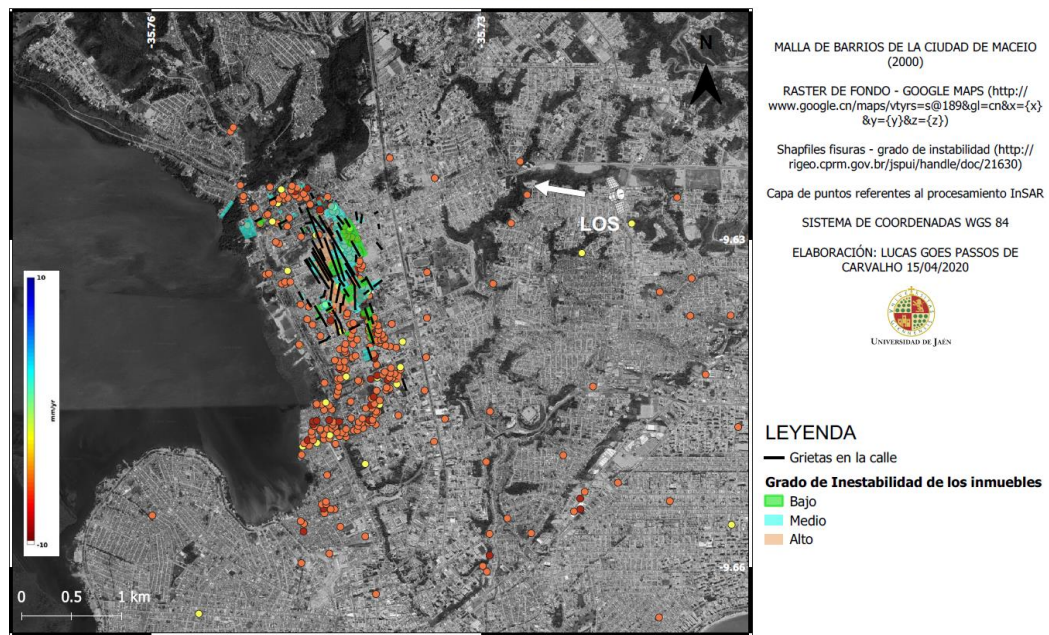


Fig 55 - Correlación entre VLOS mayores de -3.0 mm/año y los efectos causados por la subsidencia.

El siguiente paso fue generar un mapa de calor (hotspot) correlando dos variables, la distancia de 50 m desde cada PS y el valor de la VLOS superpuesto sobre los daños observados. El mapa resultante (Fig. 56) muestra la correlación entre los valores del desplazamiento de los puntos vecinos, es decir, posee valores similares y están espacialmente correlacionados. Para altas correlaciones y semejanza del atributo la zona es representada de color rojo, dando ahora un sentido cobertura espacial para los píxeles del resultado interferométrico. Con el mapa de calor es posible construir escenas que muestran las áreas con más tendencia de deformación y daño de la zona.

Es importante citar que el daño causado no solamente es dependiente del factor de subsidencia observada, para este análisis sería necesario un estudio multidisciplinar más profundo de la estructura civil envuelta de la zona, geomorfología local y su geología, por ejemplo. Además, deberíamos entender otros contextos que van desde antropología hasta desarrollo de la urbanización local en un país que carece de catastro urbano a ejemplo de la ciudad de Maceió.

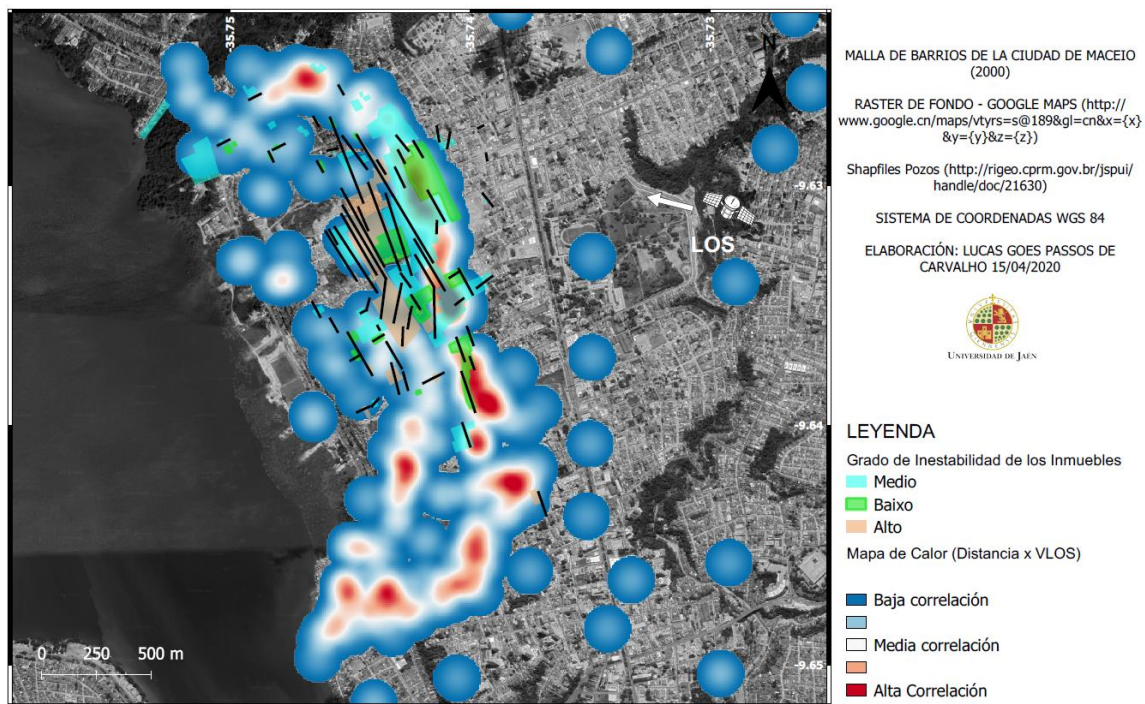
CORRELACIÓN ENTRE INMUEBLES AFECTADOS Y MAPA DE CALOR DE LA VLOS MEDIA

Fig. 56 - Correlación entre inmuebles afectados y el mapa de calor con las velocidades medias.

También se ha generado un mapa donde se representan los pozos de extracción de sal gema y los puntos con VLOS media (Fig. 57). El análisis global de los datos interferométricos sugiere un desequilibrio en la estabilidad geomecánica de la zona que podría ser causado por la extracción de la sal allí insertada. Así, los efectos de extracción se extienden radialmente (Fig. 58) y los mayores valores del VLOS estarían cerca del borde, donde presenta valores más altos de desplazamientos que se alejan de la plataforma. La otra parte de la forma circular estaría por debajo de la laguna Mandú, con lo cual necesitaríamos uno estudio batimétrico para corroborar la idea.

MAPA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS POZOS Y LA VLOS MEDIA

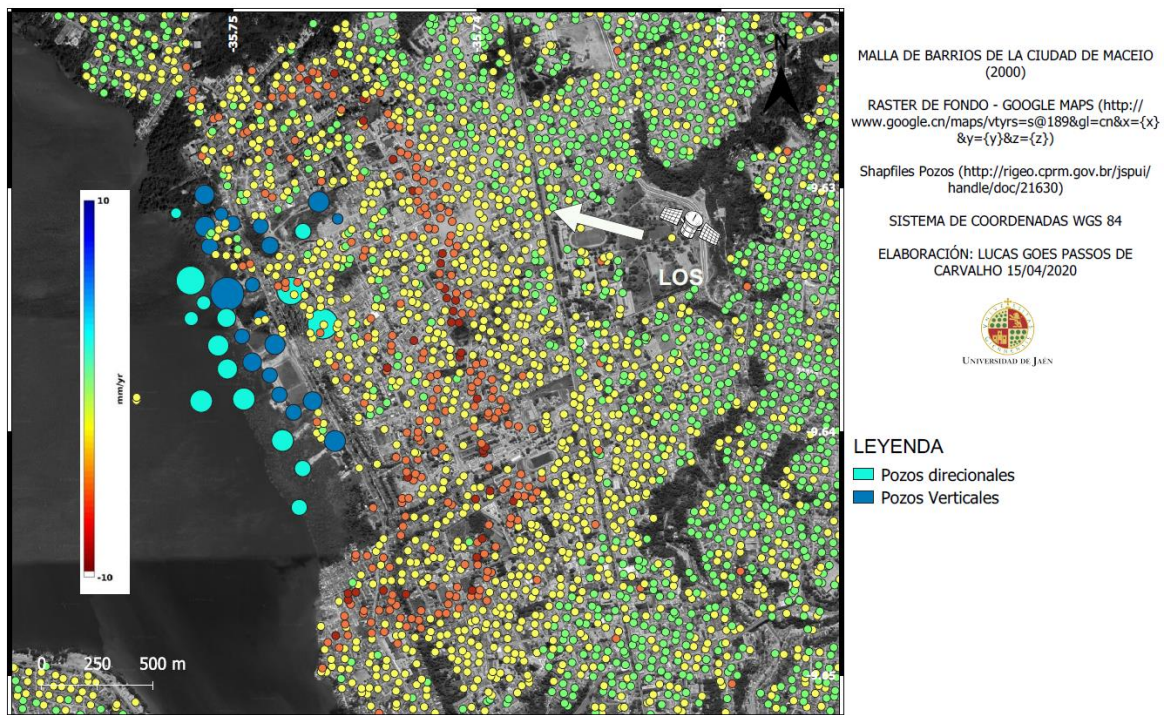


Fig. 57 - Mapa de la disposición de los pozos y la VLOS media.

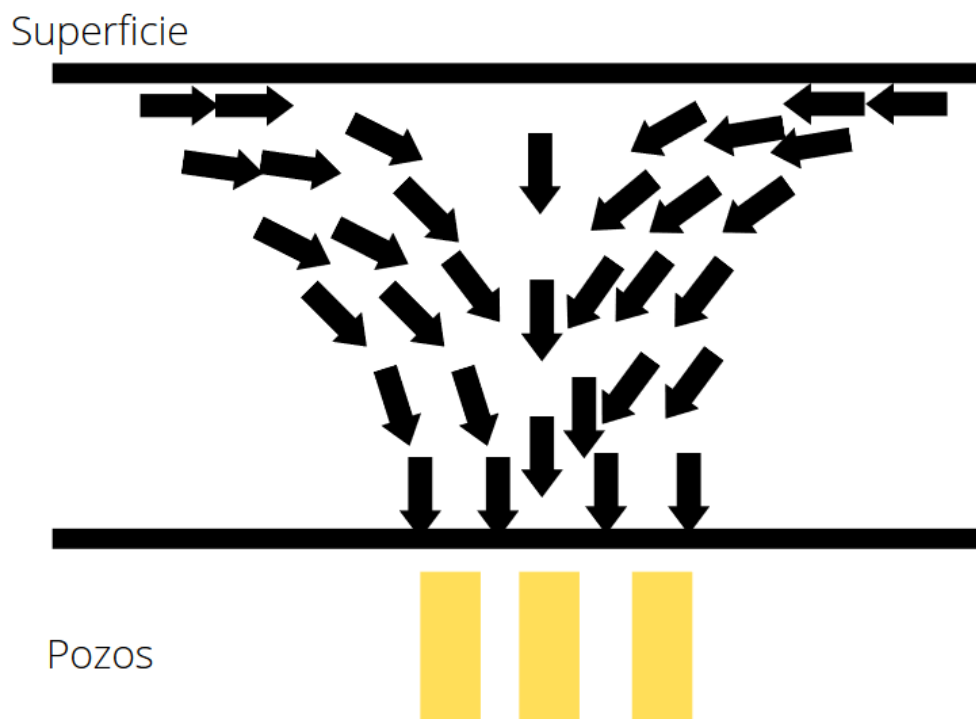


Fig. 58 - Probable vector de fuerzas del hundimiento

7 Conclusiones

A lo largo del trabajo se ha demostrado el potencial de la técnica utilizando datos de interferometría radar de satélite aplicado a estudios de subsidencia, lo que permite cuantificar el movimiento y comportamiento del objeto en cuestión.

La aplicación de la técnica DInSAR proporciona mediciones cuantitativas de deformación con alta precisión (mm), con una alta densidad de mediciones (alta resolución espacial), que cubre grandes áreas, donde no es necesario instalar equipos de campo, ni hacer intervenciones dentro del área a ser levantada. A través del enfoque PSI, fue posible extraer información de deformación en LOS de manera precisa y confiable sobre el área de interés, proporcionando una visión temporal cuantitativa del ocurrido.

Según la validación estadística, se demostró que los análisis SAR proporcionaron datos compatibles con las técnicas de monitoreo de medición de campo, consideradas precisas, teniendo su desviación estándar dentro del rango del 1 mm.

Los resultados muestran la importancia del monitoreo en las grandes ciudades y en las áreas cercanas donde existe algún tipo de explotación de los recursos naturales disponibles. Además, hay metodologías accesibles de código abierto que utilizan datos públicos y gratuitos, que se pueden utilizar para obtener resultados satisfactorios de monitoreo en distintas áreas del planeta. Este tipo de metodología puede establecerse en el entorno público como una herramienta para anticipar situaciones indeseables (herramientas de detección temprana) y/o describir el desarrollo temporal de un desplazamiento. Usando el potencial de la tecnología junto con su gran capacidad de datos para ser explotada, la interferometría radar de satélite se consolida como una herramienta de fuerte afirmación dentro de las técnicas de monitoreo geodésico y estudio para tomar decisiones.

La deformación presentada el área que circunda el barrio del Pinheiro llega a una velocidad media máxima en la dirección (LOS) de hasta -7.1 mm/año, indicando estar aumentando con el tiempo, como lo revela la evolución del patrón de hundimiento durante el periodo estudiado. Además, es posible identificar un pequeño

hundimiento ubicado en los barrios adyacentes, como del barrio Mutange y el Bebedouro.

Un trabajo futuro, con el objetivo de completar la investigación, nos permitirá una mejor comprensión de las fuentes de este hundimiento. Un estudio multidisciplinario compuesto por sismología, estudios geológicos, estudios batimétricos, gravimetría y sonar sería de gran ayuda para sacar una conclusión del origen, la naturaleza y la evolución de las deformaciones detectadas.

8 Bibliografía

- Abidin, H., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. and Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*. 59. 10.1007/s11069-011-9866-9.
- Arai, M., Uesugui, N., Rossetti, F., Goes, A. (1988). Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará. *Congresso Brasileiro De Geologia*. 35. 738-752.
- Arai, M., Truckenbrodt, W., Nogueira, A., Goes, A., Rossetti, D. (1994). Novos dados sobre estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. *Simpósio De Geologia da Amazônia - boletim de resumos expandidos*. 4. 185-187.
- Bamler, R., Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 14. 1–54.
- Batuhan, O., Timothy, H., Shimon, W., Cabral-Cano, E., Yan, J. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13. 1-12. ISSN 0303-2434.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40. 2375–2383. 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Catalão, J., Conde, V., Lollino, P., Lorusso, G., Silva, C. (2015). Integration of InSAR Analysis and Numerical Modeling for the Assessment of Ground Subsidence in the City of Lisbon, Portugal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 9. 1663–1673. 10.1109/JSTARS.2015.2428615.
- Chen, W., Zebker, H. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*. 18. 338-351. 10.1364/JOSAA.17.000401.
- Chen, W., Zebker, H. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A*. 18. 338-351. 10.1364/JOSAA.18.000338.
- Chen, W., Zebker, H. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40. 1709-1719. 10.1109/TGRS.2002.802453.
- E. Hoen., Zebker, H. (2000). Penetration Depths Inferred from Interferometric Volume Decorrelation Observed over the Greenland Ice Sheet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 38. 2571-2583. 10.1109/36.885204.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 39. 8–20. 10.1109/36.898661.

- Foumelis, M., B., J. M., Desnos, Y.L., Engdahl, M., Fernandez, D., Veci, L., Lu, J., Wong, Cecilia. (2018). ESA SNAP – StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. 1364-1367. 10.1109/IGARSS.2018.8519545.
- Goldstein, R., Zebker, H., Werner, C. (1988). Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*. 23. 713-720. 10.1029/RS023i004p00713.
- Hanssen, R. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Hastenrath, S., Heller, L., (1977). Dynamics of climatic hazards innortheast Brazil. *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society*. 103. 79–92.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*. 35. L16302. 10.1029/2008GL034654.
- Hooper, A., Segall, P., Zebker, H. (2007). Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal Geophysical Research*. 112. B07407. 10.1029/2006JB004763.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications.
- Klees, R., Massonnet, D. (1999). Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations. *Geologie en Mijnbouw*. 77. 161- 176. 10.1023/A:1003594502801.
- Massonnet, D., Feigl, K. (1995). Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*. 22. 1537-1540. 10.1029/95GL00711.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., Crippa B. (2015). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 115. 78-89. 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
- Mohriak, W., (2003). Rifted sedimentary basins of the South Atlantic: turbidite reservoir, sedimentation and tectonic processes. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. 87-165
- Mendes, V. (2016). *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Alagoas SC.24-X-D. Escala 1:250.000. Estado de Alagoas. CPRM - Serviço Geológico do Brasil*.
- Izquierdo, R. (1998). *Algoritmos de Crecimiento para Desenrolado de Fase en Interferometria SAR*. Proyecto final de carrera. ETSETB-UPC.
- Poland, J. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal Prepared for the International Hydrological Programme. United Nations. Book Crafters*.
- Ruiz-Constán, A., Ruiz-Armenteros, A. M., Lamas, F., Martos-Rosillo, S., Delgado, J. M., Bekaert, D., Sousa, J., Gil, A.J., Caro Cuenca, M., Hanssen, R., Galindo-Zaldivar, J., Sanz de Galdeano, C. (2016). Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced by groundwater withdrawal: the Montellano aquifer (SW Spain). *Environmental Earth Sciences*. 75. 1-16. 10.1007/s12665-015-5051-x.

Ruiz-Armenteros, A.M., Lazecky, M., Ruiz-Constán, A., Bakon, M., Delgado, J.M., Sousa, J.J., Galinzo-Zaldívar, J., Sanz de Galdeano, C., Caro-Cuenca, M., Martos-Rosillo, S., Jiménez-Gavilán, P., Perissin, D. (2018). Monitoring continuous subsidence in the Costa del Sol (Málaga province, southern Spanish coast) using ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/B SAR interferometry. *Procedia Computer Science*. 138. 354-361. 10.1016/j.procs.2018.10.050.

Santos, E. (2003). Geologia, Evolução Tectônica e Recursos Minerais da Província Borborema. Disciplina do Curso de Doutorado do Departamento de Geologia da UFPE.

Samson, J. (1996). Coregistration in SAR interferometry. Master's thesis, Faculty of Geodetic Engineering, Delft University of Technology.

Wackernagel, H. (1998). *Multivariate Geostatistics*, 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag.

Woodhouse, I. (2015). *Introduction to Microwave Remote sensing*. Speckled Press.

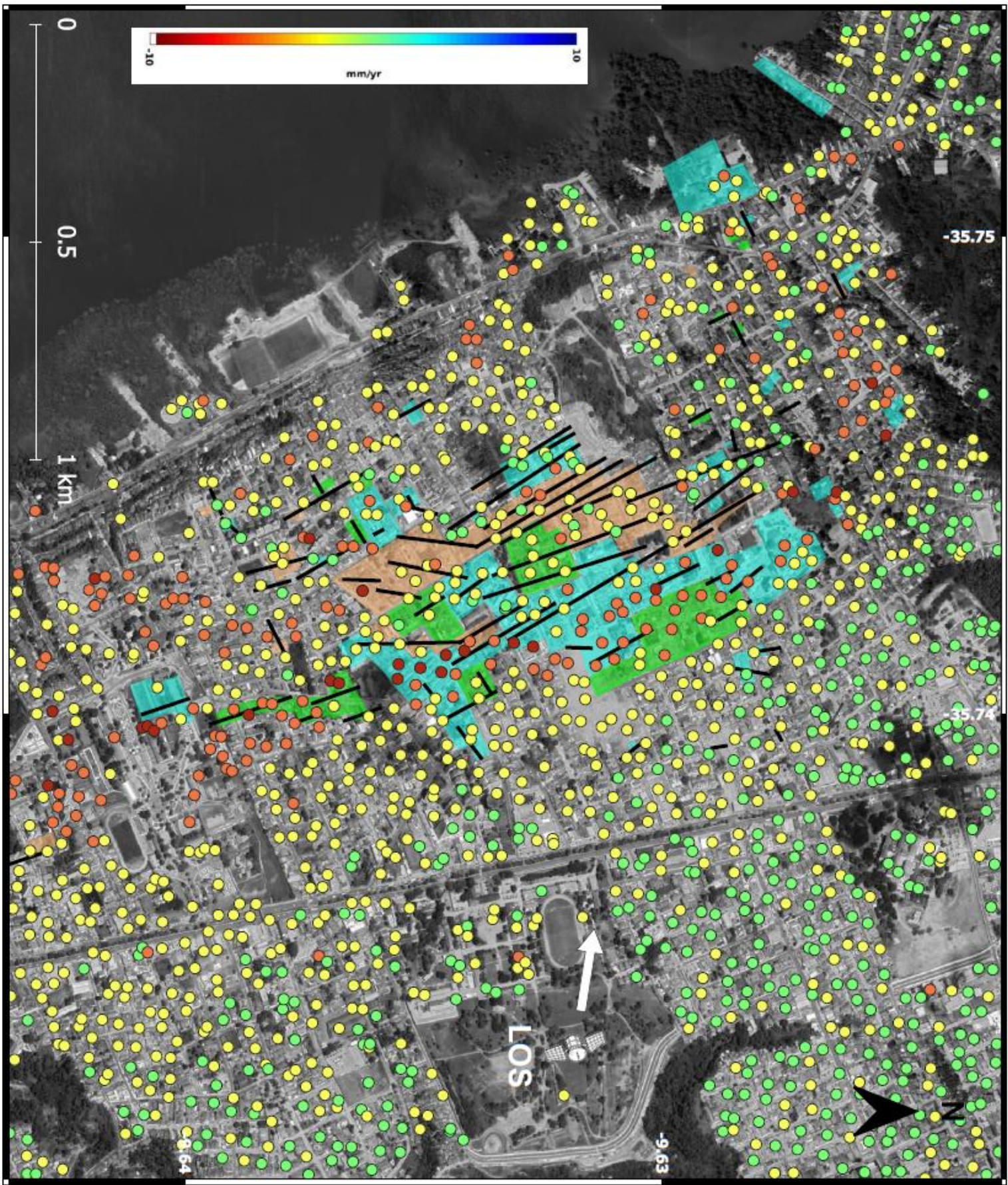
Zbigniew, P., Hanssen, R., Wojcik, A., Wojciechowski, T. (2009). InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine. Poland - *Engineering Geology*. 106. 58–67.

Zebker, H., Werner, C., Rosen, P., Hensley, S. (1994c), Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32. 823-836. 10.1109/36.298010.

Zebker, H., Villasenor, J. (1992), Decorrelation in interferometric radar echos. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 30. 950-959. 10.1109/36.175330.

9 Anejos

9.1 Anejo 1. Mapa de correlación entre resultado del procesado InSAR y los efectos causados en la zona por la subsidencia.



CORRELACIÓN ENTRE RESULTADO DEL PROCESADO INSAR Y LOS EFECTOS CAUSADOS EN LA ZONA POR LA SUBSIDENCIA

MALLA DE BARRIOS DE LA CIUDAD DE MACEIO (2000)

RASTER DE FONDO - GOOGLE MAPS (<http://www.google.cn/maps/vt?rs=s@189&gl=cn&x={x}&y={y}&z={z}>)

Shapfiles fisuras - grado de inestabilidad (<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21630>)

Capa de puntos referentes al procesamiento InSAR

SISTEMA DE COORDENADAS WGS 84

ELABORACIÓN: LUCAS GOES PASSOS DE CARVALHO 15/04/2020



UNIVERSIDAD DE JAÉN

LEYENDA

— Grietas en la calle

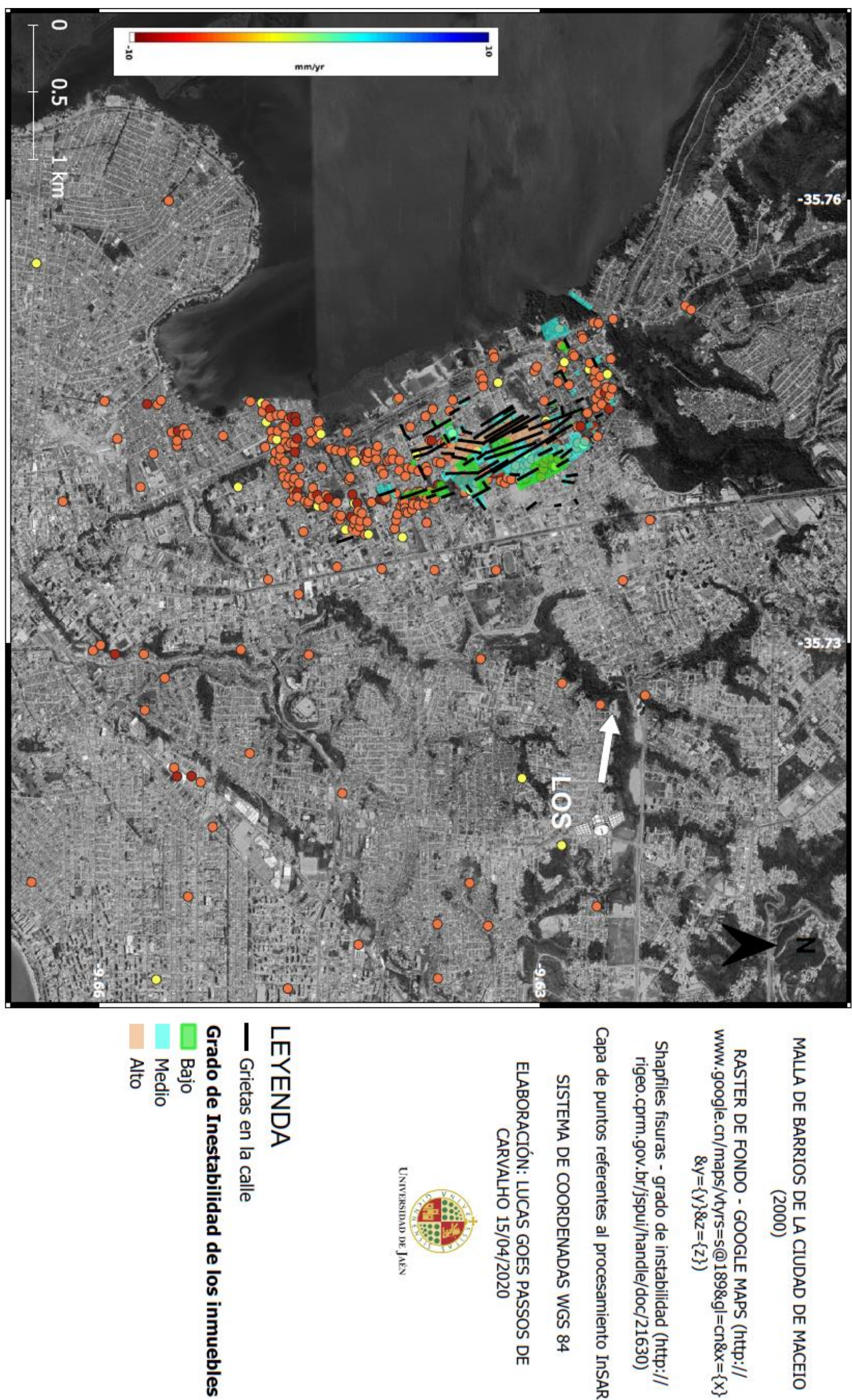
Grado de Inestabilidad de los inmuebles

Bajo

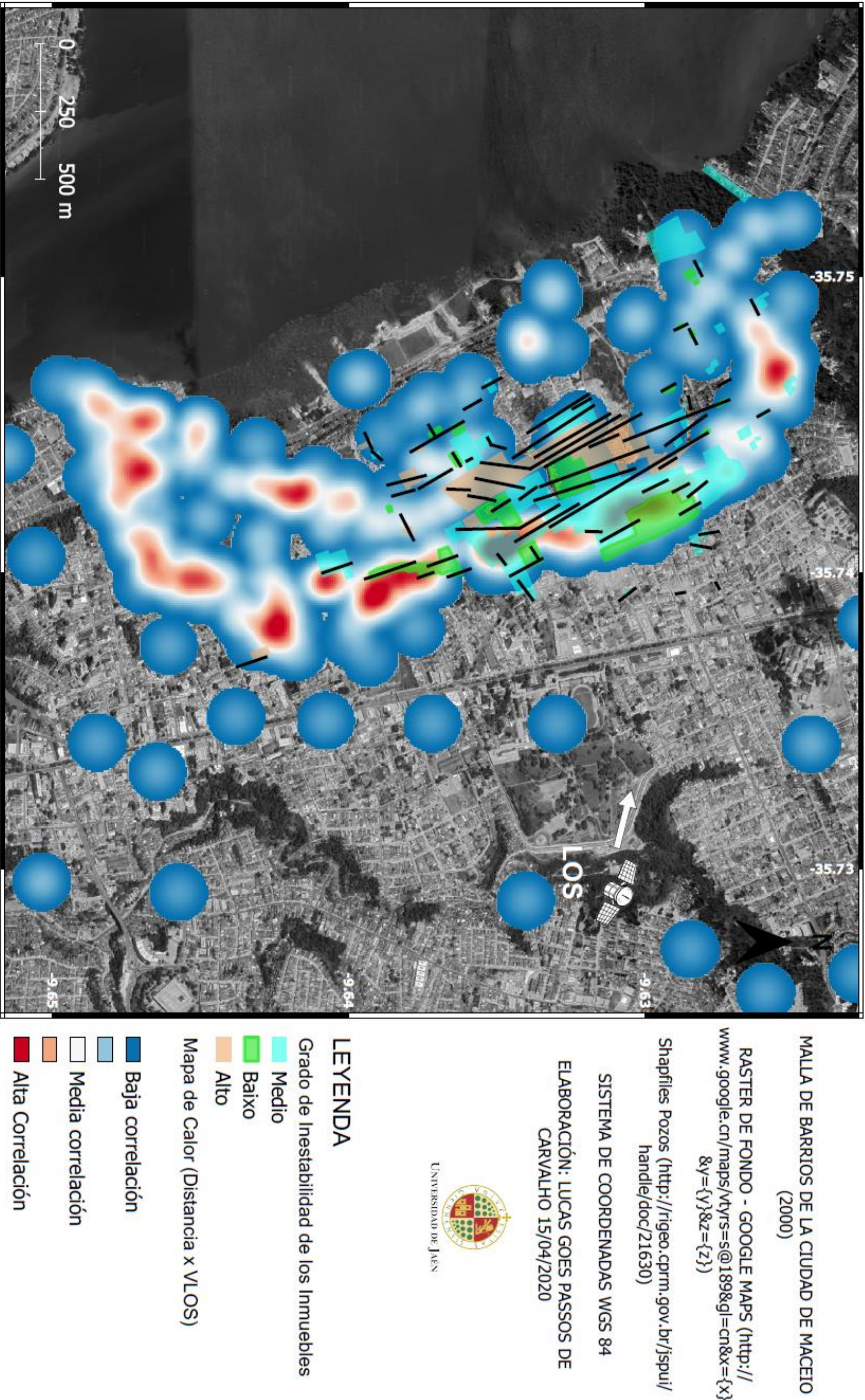
Medio

Alto

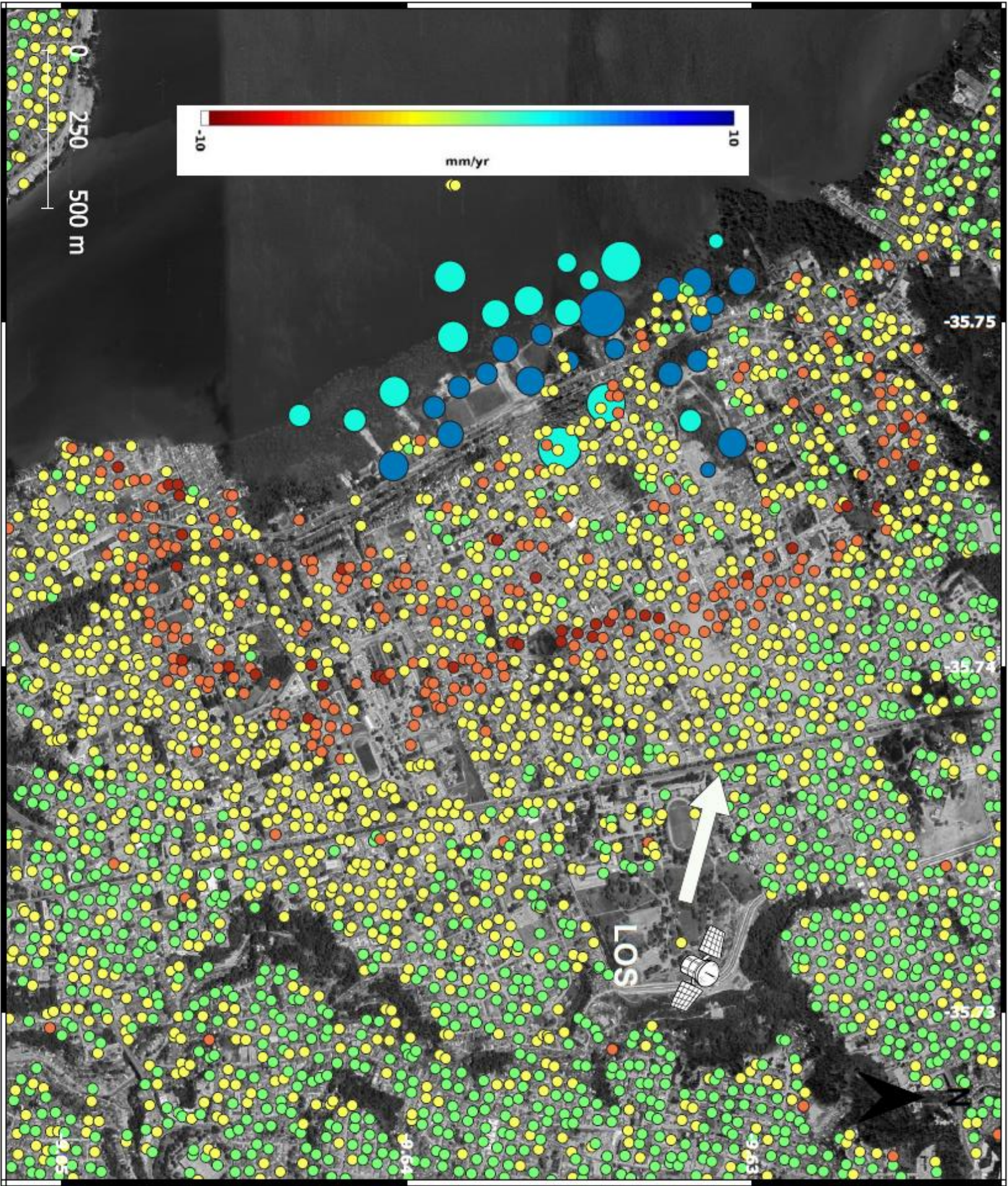
9.2 Mapa de correlación entrer VLOS mayores de -3.0 mm/año y los efectos causados por la subsidencia.



9.3 Mapa de la correlación entre inmuebles afectados y el mapa de calor con las velocidades medias.



9.4 Mapa de la disposición de los pozos y la VLOS media.



MAPA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS POZOS Y LA VLOS MEDIA

MALLA DE BARRIOS DE LA CIUDAD DE MACEIO (2000)

RASTER DE FONDO - GOOGLE MAPS (<http://www.google.cn/maps/vt?rs=s@189&gl=cn&x={x}&y={y}&z={z}>)

Shapfiles Pozos (<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21630>)

SISTEMA DE COORDENADAS WGS 84

ELABORACIÓN: LUCAS GOES PASSOS DE CARVALHO 15/04/2020



UNIVERSIDAD DE JAÉN

LEYENDA

- Pozos direccionales
- Pozos Verticales