



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis para obtener el grado académico de
Geofísico

**INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL SAR PARA DETECTAR
DEFORMACIÓN CORTICAL POR ACTIVIDAD SÍSMICA**

Agustín Calvet

Director: Dr. Sebastián Balbarani

Codirector: Dr. Mauricio Gende

Firma y aclaración del Director:

Sebastián Balbarani

Firma y aclaración del Jurado:

María Laura Rosa

LA PLATA, ARGENTINA

- MARZO DE 2022 -

Prefacio

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para obtener el grado académico de *Geofísico* de la Universidad Nacional de La Plata. La misma contiene los resultados de los estudios desarrollados bajo la dirección del *Dr. Sebastián Balbarani* en colaboración con el *Dr. Mauricio Gende*. Este trabajo formó parte de una Beca de grado del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) entre el 1/8/2020 y el 31/7/2021.

Agustín Calvet.
correo electrónico: acalvet@fcaglp.unlp.edu.ar
La Plata, noviembre de 2021.

Resumen

Los principios de los radares se remontan al año 1930, su principal impulso y desarrollo estuvo asociado a fines bélicos antes y durante la segunda guerra mundial. En la actualidad las técnicas asociadas a radares tienen una extensa variedad de usos civiles que poseen un profundo impacto económico, productivo y social. Siendo además los radares una herramienta fundamental en una importante cantidad de investigaciones científicas.

El desarrollo del principio de apertura sintética en los años 50s y 60s amplió vastamente el horizonte de aplicaciones, de manera que junto a los avances tecnológicos en las últimas décadas, la técnica de Interferometría con datos SAR se convirtió en una de las más poderosas para el sensado remoto, de calidad y de amplia cobertura espacial.

En el presente trabajo se apuntó al desarrollo de capacidades y comprensión de la técnica de interferometría diferencial SAR por medio de una aplicación. Esta aplicación consiste en el mapeo y caracterización de la deformación superficial que tuvo lugar en la región cercana al epicentro del terremoto de Illapel del 16 de septiembre 2015. Para cumplir estos objetivos se escogió un par de imágenes SAR adecuadas, las cuales se procesaron utilizando el software GMTSAR de acceso libre y gratuito. Sobre el mismo se realizó un análisis y descripción de la cadena de procesos que lo componen, como así también de las consideraciones a tener en cuenta para que los resultados obtenidos sean óptimos. Se analizaron los productos intermedios y finales del procesamiento.

La caracterización del resultado obtenido mediante el procesamiento de imágenes SAR tuvo en cuenta la tectónica de la región y del mecanismo focal que dio origen al terremoto. Además se añadió una validación de los resultados obtenidos a partir de series temporales de coordenadas derivadas de observaciones GNSS.

Este tipo de aplicación nos permite demostrar la potencialidad de la técnica de interferometría diferencial SAR para el monitoreo de deformaciones corticales a gran escala producto de eventos sísmicos, incluso en las regiones más cercanas al epicentro, donde por lo general, instrumentos *in situ* se ven saturados. Sumado a esto, la amplia disponibilidad de imágenes SAR gratuitas y de calidad, con cobertura global y corto período de revisita transforman a la técnica DInSAR en una herramienta accesible y poderosa, de utilidad por sí misma y que también funciona como complemento de otras técnicas de monitoreo de deformaciones de la superficie terrestre.

Originalidad

Las ideas, desarrollos, y resultados obtenidos son originales del autor, salvo explícita mención. Los resultados fueron presentados en la XXIX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG) y en el Simposio SIRGAS 2021. El trabajo de esta tesis estuvo directamente vinculado a una beca del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) entre los años 2020 y 2021.

Índice general

Prefacio	iii
Resumen	v
Originalidad	vii
1. Interferometría SAR	1
1.1. Breve historia del radar	1
1.2. Introducción a la Interferometría de Radar	2
1.3. Radar de Apertura Sintética (SAR)	2
1.4. Resolución en acimut	4
1.5. Resolución en rango	5
1.6. Sistemas de adquisición	6
1.7. Formación de la imagen	8
1.8. Interferometría	9
1.8.1. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)	10
1.8.2. Interferometría Across-Track	11
1.8.3. Interferometría Diferencial SAR (DInSAR)	14
2. Evento estudiado	17
2.1. Zona de estudio	17
2.2. Antecedentes en el uso de la técnica DINSAR para estudiar eventos sismológicos en la zona	18
3. Metodología	21
3.1. Selección de las imágenes	21
3.2. Cadena de procesamiento	26
3.2.1. Preprocesamiento	27
3.2.2. Corregistración	27
3.2.3. Formación de los interferogramas	28
3.2.4. Filtrado	29
3.2.5. Desenrollado de fase	30

3.2.6. Geocodificación	32
4. Resultados	35
4.1. Productos intermedios	35
4.2. Productos finales	45
4.2.1. Desplazamiento en dirección de vista del radar	45
4.2.2. Deformación cortical	47
5. Validación	51
5.1. Análisis a partir de datos GNSS	51
6. Conclusiones	57
A. Agradecimientos	59
A.1. Software utilizado	59
A.2. Imágenes Sentinel-1	59

Índice de figuras

1.1. Geometría básica de adquisición.	3
1.2. Geometría y sistemas de referencia. Los ecos del radar se registran entre los segmentos de círculos concéntricos. Δ_r indica la celda de resolución en rango. Las coordenadas de radar se proyectan sobre el elipsoide de referencia. (Imagen extraída de [19])	4
1.3. Geometría de adquisición. (Imagen extraída de [22])	5
1.4. Modo de transmisión y recepción de pulsos de un sistema SAR. Para ERS-1/2, un pulso emitido en la posición 1 es recibido entre la 10 y la 11. El intervalo temporal entra transmisión y recepción es la inversa de la PRF. (Imagen extraída de [19])	6
1.5. A medida que aumenta la longitud de onda, aumenta la penetración de la señal de radar a través, en este caso, de la vegetación	7
1.6. Ilustración de los diferentes modos de operación SAR. (Imagen extraída de [22])	8
1.7. Resumen del proceso SAR donde se realiza la compresión en rango y en acimut. (Imagen extraída de [22])	9
1.8. Esquema de la geometría across-track para medir topografía. Los caminos de vuelo del satélite están saliendo del plano de la hoja. (Imagen modificada de [19])	12
1.9. Interferogramas SAR y modelo digital de elevaciones (DEM) del desierto de Atacama (Chile). Datos interferométricos adquiridos con el satélite radar TanDEM-X de pasada simple. (a) Previo a la substracción de la fase de tierra plana. (b) Posterior a la substracción de la fase de tierra plana. (c) Fase desenrollada convertida a valores de altura. (Imagen extraída de [22])	13
1.10. Esquema de medición con la técnica de interferometría diferencial SAR. A la izquierda se ve el panorama general. A la derecha un acercamiento del punto afectado por un desplazamiento del terreno donde se mide.	15
2.1. Área de estudio. Con rojo se indica el epicentro del terremoto de Illapel. La línea azul marca la zona de subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana. La flecha apunta en el sentido del movimiento relativo entre las placas tectónicas. El rectángulo amarillo es la región en donde se disponen de datos SAR.	19

3.1. Diagrama de la geometría de adquisición TOPS. Cada subswath es de 80km de ancho y cada burst cubre una distancia de 20km a lo largo de la dirección de movimiento del satélite. Existe cierto solapamiento entre los subswaths y bursts que sirven para refinar el alineamiento. (Imagen extraída de [26]) . . .	22
3.2. Vista rápida de la imagen SLC del 24/08/2015 adquirida por el satélite Sentinel-1A	24
3.3. Vista rápida de la imagen SLC del 17/09/2015 adquirida por el satélite Sentinel-1A	25
3.4. Diagrama de flujo de la cadena de procesamiento interferométrico	27
3.5. Convolución de dos espectros con distintas componentes de señal y de ruido. S_1, S_2 son las componentes de señal y N_1, N_2 son las componentes de ruido. (Imagen extraída de [19])	29
3.6. Definición de un residuo. Cada círculo representa el centro de un píxel. La suma se realiza en el sentido de las flechas. Imagen extraída de [19]	31
4.1. Región de estudio reducida	36
4.2. Interferogramas. A la izquierda sin filtrar, a la derecha filtrados.	37
4.3. Interferogramas. A la izquierda sin filtrar, a la derecha filtrados.	38
4.4. Gráficos de coherencia para los distintos filtros Gaussianos aplicados.	40
4.5. Gráficos de la fase desenrollada en coordenadas de latitud y longitud para distintos valores del parámetro umbral del código Snaphu.	41
4.6. Mapa de la fase interferométrica enrollada en coordenadas longitud y latitud. La estrella roja marca la ubicación del epicentro del sismo de Illapel de 2015.	43
4.7. Mapa topográfico de la zona de estudio	44
4.8. Mapa de la fase desenrollada en radianes	45
4.9. Mapa del desplazamiento en dirección de vista del radar en centímetros. La estrella indica el epicentro del terremoto.	46
4.10. Mecanismo focal del evento principal	48
4.11. Mecanismos focales de las réplicas principales. (Figura extraída de Barrientos S., 2015) [4]	49
5.1. Mediciones con GNSS en la estación Salamanca durante el día en que ocurrió el terremoto. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.	52
5.2. Mediciones con GNSS en la estación Coquimbo. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.	53
5.3. Mediciones con GNSS en la estación Ovalle. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.	53
5.4. Componente este en las tres estaciones GNSS	54
5.5. Deformaciones medidas con DInSAR y con GNSS. Las flechas indican la magnitud del desplazamiento.	55

Índice de tablas

1.1. Frecuencias de trabajo existentes	7
5.1. Movimientos medidos con GNSS	52

Capítulo 1

Interferometría SAR

En el presente capítulo se detallan los fundamentos del principio de radar de apertura sintética como así también del funcionamiento de los sistemas de adquisición de imágenes SAR que son el principal dato con el que se trabajó en esta tesis. Además se describen las técnicas clásicas de interferometría SAR, entre ellas incluida la interferometría diferencial SAR.

1.1. Breve historia del radar

Radar (Radio Detection And Ranging) se refiere tanto a una técnica como a un instrumento. El instrumento emite pulsos electromagnéticos en el espectro de las ondas de radio y microondas y luego detecta las reflexiones de estos pulsos sobre objetos en su línea de vista. La técnica de radar, usa el tiempo de viaje de ida y vuelta para determinar la distancia al objeto detectado y la energía o intensidad con la que el pulso es retrodispersado, para inferir propiedades físicas como tamaño o rugosidad de la superficie. Dos importantes avances científicos que contribuyeron para el desarrollo del radar fueron: las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo en 1873, y los experimentos de Hertz de 1886. Hertz detectó y generó las primeras ondas de radio conocidas, y descubrió que estas se veían reflejadas y dispersadas.

Los primeros sistemas de radar se desarrollaron en 1903 para el seguimiento de barcos y evitar colisiones, no obstante, desarrollos militares previos a la Segunda Guerra Mundial impulsaron fuertemente su avance en los años 1930 y 1940 [10]. A pesar de esto, las aplicaciones civiles y científicas del radar adquirieron relevancia temprana luego de estos eventos. En particular, la radioastronomía se benefició de los avances tecnológicos, haciendo posible estudiar objetos celestes como la Luna, Marte, Venus y el Sol a partir de radares terrestres. El primer eco de radar de la Luna fue recibido en enero de 1946. Algunos resultados importantes de estas mediciones fueron la rotación retrógrada de Venus y mejoras en la Unidad Astronómica.

Los primeros intentos y pruebas de llevar los radares al espacio comenzaron con los esfuerzos del JPL (Jet Propulsion Laboratory) en 1962, y las primeras observaciones de radar de la Luna desde el Apollo 17 fueron exitosas en 1972.

1.2. Introducción a la Interferometría de Radar

Es posible caracterizar los avances en la geodesia de las últimas décadas con una serie de eventos y/o desarrollos importantes. En primer lugar, el uso de satélites artificiales impulsó la definición y utilización de sistemas de referencia globales, permitiendo el mapeo de grandes áreas de la Tierra donde, además, el posicionamiento de puntos entró en una nueva era mediante los sistemas satelitales de navegación global (GNSS).

Un segundo desarrollo tiene que ver con el reconocimiento de la dinámica de la Tierra. A escala global, la teoría de la tectónica de placas indica que todas las mediciones son dependientes del tiempo. A escala más local existe un interés por monitorear deformaciones inducidas por terremotos, volcanes, glaciares y por actividades antropogénicas como la explotación de recursos naturales u obras de ingeniería civil. Para entender estos procesos es fundamental contar con mediciones que se repitan regularmente, de alta precisión y resolución espacial. Motivo por el cual, las mediciones geodésicas se volvieron una fuente de información crucial para la interpretación geofísica.

En tercer lugar, un importante desarrollo tiene que ver con una mejora en la precisión de las observaciones geodésicas. Surgieron diferentes técnicas alternativas, cada una con un objetivo específico definido, como por ejemplo: VLBI (Very Long Baseline Interferometry), y GNSS.

La interferometría de radar encaja perfectamente en esta línea de desarrollos geodésicos, combinando las características de obtención de imágenes a gran escala y observaciones cuantitativas de distancias y ángulos. Cuando están montados en naves espaciales, son capaces de obtener información distribuida en toda la Tierra. A diferencia de los sensores ópticos, son capaces de medir durante la noche y con cobertura nubosa.

La más espectacular aplicación de interferometría de radar es la de monitoreo de procesos dinámicos [19], utilizando una configuración de pasadas repetidas, donde se obtienen dos imágenes con la misma antena revisitando el área luego de un dado tiempo. Esto permite observar la deformación coherente de la superficie de la Tierra como una fracción de la longitud de onda del radar, llegando a precisiones subcentimétricas en la dirección de vista del radar.

1.3. Radar de Apertura Sintética (SAR)

Una clase específica de sistemas de radares son los radares de imágenes, como por ejemplo el SLR (Side Looking Radar) y posteriormente el radar de apertura sintética (SAR por Synthetic Aperture Radar). Los primeros sistemas SLR eran “incoherentes” significando que la información de la fase de las ondas emitidas y recibidas no era retenida, así es que la resolución buscada para estos sistemas se obtenía utilizando una antena física muy larga, de allí el nombre de radar de apertura real (RAR). No obstante, las limitaciones prácticas de la construcción de una antena muy grande resultaron en una pobre resolución en la dirección de vuelo, la cual se degradaba mientras mayor fuera la altitud de vuelo de la nave sobre la que estaba montado el radar. El concepto de usar la información de la fase de la señal del radar es atribuido generalmente a Carl Wiley en 1951 [30], [10]. Sin embargo, desarrollos posteriores en los años 60, en las universidades de Michigan e Illinois son los que culminaron en el concepto de radar de apertura sintética.

El concepto clave es el de radar **coherente**, donde se preserva tanto amplitud como fase de la señal recibida para su posterior proceso. El radar se monta en una plataforma en movi-

miento, por este motivo, el tiempo que transcurre entre transmisión y recepción se traduce en un cambio de la posición del radar, y durante este período el comportamiento de la fase debe ser estable. Como resultado, se puede crear sintéticamente una antena artificial muy larga a partir de una antena física pequeña que se desplaza en una determinada dirección; esto se logra combinando la información de los pulsos recibidos dentro de la longitud sintética de la antena. Así la apertura sintética es la longitud del camino durante la cual el radar recibe el eco de las señales de un punto objetivo. Esta metodología conduce a un incremento sustancial de la resolución en acimut, que es la resolución en la dirección de vuelo del satélite. Por otro lado, la línea de visión del radar o LOS por sus siglas en inglés (Line Of Sight) se identifica como dirección de rango (Figura 1.1). El marco de referencia de una imagen SAR es entonces presentado en coordenadas de rango y acimut.

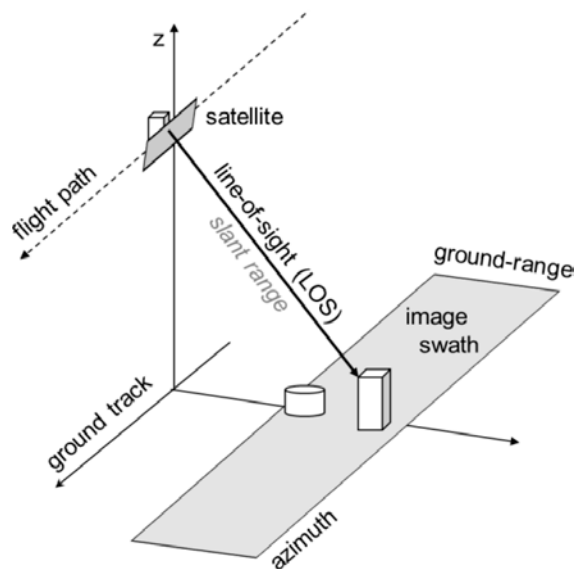


Figura 1.1. Geometría básica de adquisición.

Dado que el radar observa con cierto ángulo de inclinación, las elevaciones del terreno resultarán en distorsiones geométricas de la imagen SAR. Estos efectos son:

- Acortamiento (o Foreshortening): Las laderas orientadas hacia el SAR se ven comprimidas (o elongadas si se orientan de manera opuesta). Lo cual conduce a una pérdida de la resolución.
- Inversión (o Layover): En el plano de la imagen aparecen invertidas las posiciones del pico y base de los cerros.
- Sombra (o Shadow): Las pendientes pronunciadas orientadas en dirección opuesta del SAR regresan sin señal.

Estos efectos se ilustran en la figura (1.2)

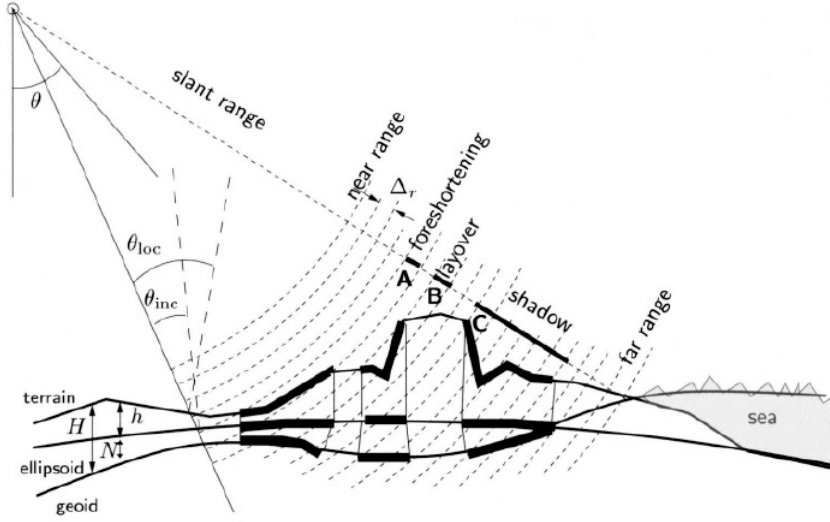


Figura 1.2. Geometría y sistemas de referencia. Los ecos del radar se registran entre los segmentos de círculos concéntricos. Δ_r indica la celda de resolución en rango. Las coordenadas de radar se proyectan sobre el elipsoide de referencia. (Imagen extraída de [19])

1.4. Resolución en acimut

Si consideramos una antena física de longitud d_a podemos aproximar el ancho de iluminación por:

$$\Theta_a = \frac{\lambda}{d_a}, \quad (1.1)$$

donde λ es la longitud de onda de la señal emitida por el radar. A partir de la geometría de adquisición representada en la figura (1.3) puede verse que la longitud de apertura sintética (Synthetic Aperture) correspondiente estará dada por:

$$L_{sa} = \Theta_a r_0 = \frac{\lambda}{d_a} r_0, \quad (1.2)$$

donde r_0 es la distancia en la dirección de vista del radar a lo largo de una dirección de inclinación entre dos puntos que no están en el mismo nivel, relativo a un datum específico. En otras palabras, r_0 es la hipotenusa del triángulo representado por la altura de la plataforma y la distancia entre el punto de observación y el punto de la superficie terrestre exactamente debajo del radar de apertura sintética.

Luego, análogamente al caso de la antena física visto en la ecuación (1.1), el ancho virtual de iluminación queda dado por:

$$\Theta_{sa} = \frac{\lambda}{2L_{sa}}, \quad (1.3)$$

donde el factor 2 aparece de considerar el camino de ida y vuelta del rayo. Finalmente podemos calcular la **resolución en acimut** como:

$$\delta_a = \Theta_{sa} r_0 = \frac{\lambda}{2L_{sa}} r_0 = \frac{d_a}{2}. \quad (1.4)$$

Esta ecuación sugiere que una menor longitud de antena conduce a una mejor resolución, en el sentido de que al ser más pequeña permitirá distinguir objetivos diferentes que estén a menores distancias entre sí. El hecho de que una menor antena conduzca a una mejor resolución a primera vista parece contradictorio, sin embargo, es un resultado razonable si se considera que una antena más corta conseguirá iluminar un dado punto durante un tiempo mayor, lo que es equivalente a una antena virtual más larga y por consiguiente mejor resolución en acimut.

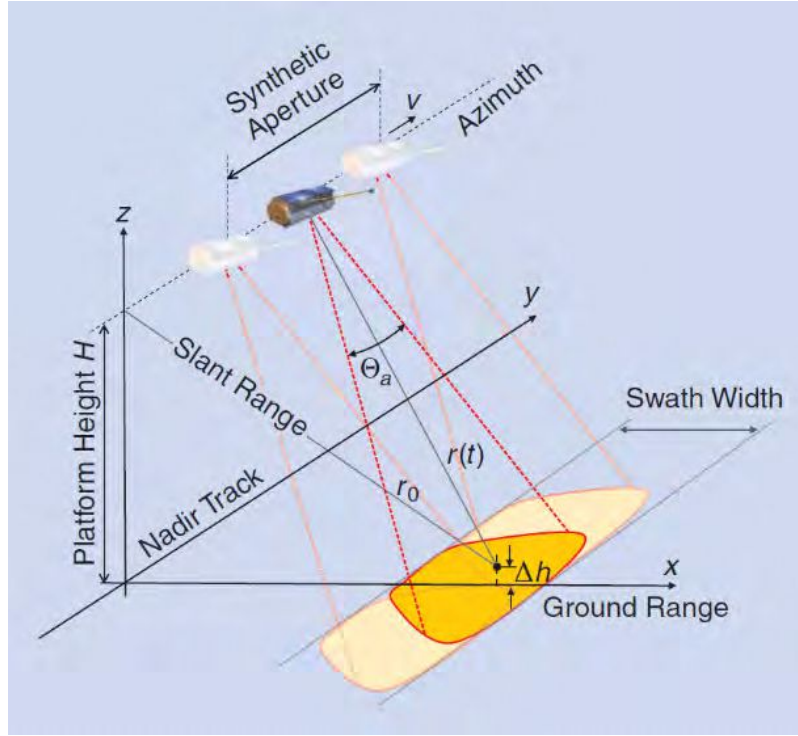


Figura 1.3. Geometría de adquisición. (Imagen extraída de [22])

No obstante, aunque pueda parecer que una reducción ilimitada del tamaño de la antena es capaz de conducir a una resolución infinita, hay que tener en cuenta que la ganancia efectiva de la antena es proporcional al cuadrado de su apertura [19], es decir, que reducir el tamaño de la antena empeora la relación señal-ruido. La elección del tamaño de la antena es una relación de compromiso entre resolución y relación señal-ruido [20].

1.5. Resolución en rango

Como se muestra en la figura (1.4) el radar transmite y recibe pulsos de alta energía en el espectro de las microondas que viajan hacia la superficie de la Tierra, y luego registra los ecos de cada pulso. Se define la frecuencia de repetición del pulso (PRF) a partir de la tasa de transmisión de pulsos. La forma de onda del pulso puede escribirse como [2]

$$s(t) = g(t)e^{j2\pi f_0 t}, \quad (1.5)$$

donde $g(t)$ es la envolvente compleja del pulso y f_0 es la frecuencia portadora. La **resolución en rango** Δ_r es la diferencia en la dirección del rango más pequeña a la cual dos objetos

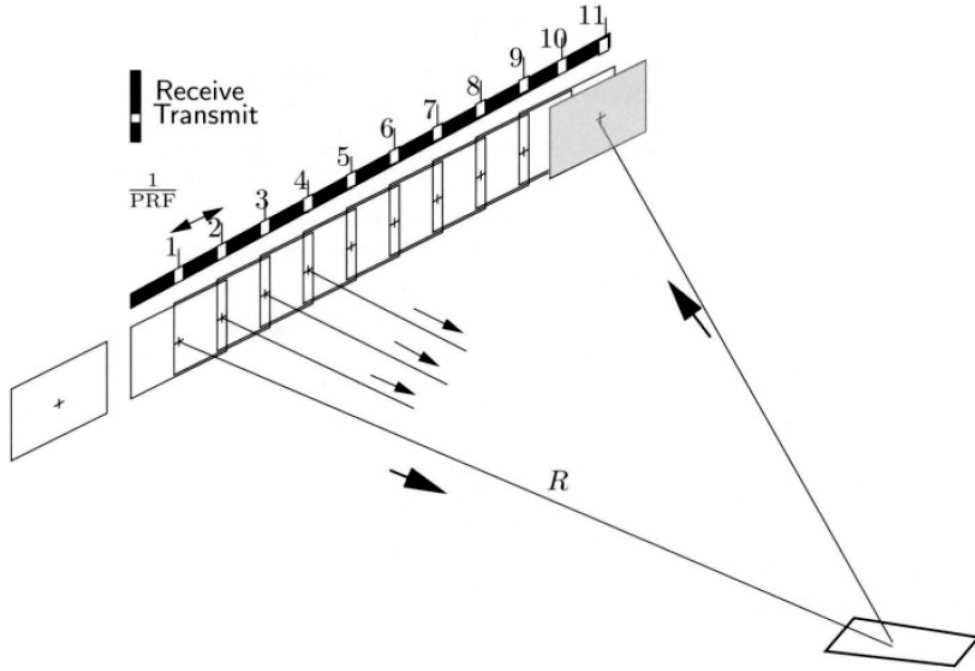


Figura 1.4. Modo de transmisión y recepción de pulsos de un sistema SAR. Para ERS-1/2, un pulso emitido en la posición 1 es recibido entre la 10 y la 11. El intervalo temporal entra transmisión y recepción es la inversa de la PRF. (Imagen extraída de [19])

pueden ser discriminados. Para una envolvente rectangular, Δ_r depende de la longitud del pulso τ , o su período de repetición, como:

$$\Delta_r = \frac{c\tau}{2}, \quad (1.6)$$

donde c es la velocidad de la luz. Esta ecuación implica que un pulso más corto resultará en una mejor resolución en la dirección del rango.

Por otro lado, para obtener una alta relación señal-ruido en la imagen de radar, es importante contar con picos de alta energía, esto se debe a que la energía del eco recibido es 10^{-11} órdenes de magnitud más chica que la del pulso transmitido. Estas dos consideraciones, pulso corto versus pico de alta energía, son conflictivas ya que la energía que puede emitir el instrumento en un dado intervalo temporal es limitada, y por lo tanto existe un límite en lo que respecta a la reducción de la longitud del pulso.

Más adelante, la técnica de compresión del Chirp (o pulso) sobre la señal recibida permitirá mejorar la resolución en rango.

1.6. Sistemas de adquisición

El sistema de adquisición consiste de una plataforma, montada en un satélite que se mueve en una determinada dirección y de un radar instalado en ella, el cual emite pulsos hacia uno

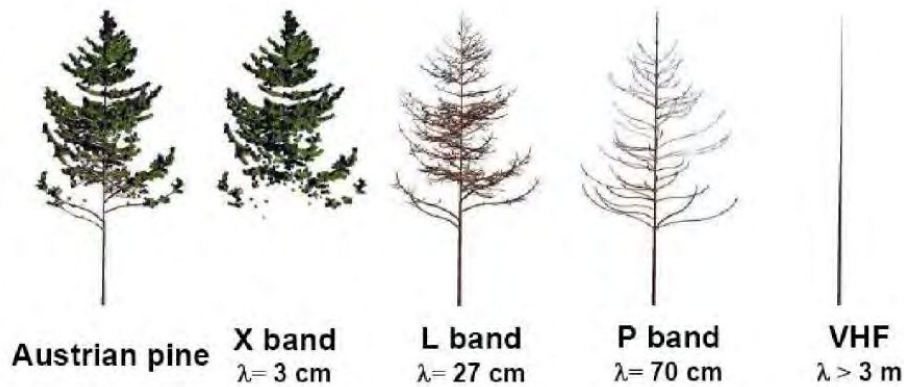


Figura 1.5. A medida que aumenta la longitud de onda, aumenta la penetración de la señal de radar a través, en este caso, de la vegetación

de los lados. Los pulsos electromagnéticos de alta energía emitidos viajan hacia la superficie de la Tierra, interactúan con ella y solo una porción de su energía es luego reflejada y captada por una antena receptora en el satélite (que puede ser la misma que la emisora).

La amplitud y fase recibida dependerá de las propiedades físicas y eléctricas del objeto a medir, como puede ser su geometría, rugosidad o permitividad eléctrica. La penetración de la señal en el medio dependerá de la banda de frecuencia en la que sea emitida, o de su longitud de onda. Aquellos sistemas SAR que emitan a mayor longitud de onda (frecuencia menor) tendrán mayor penetración (Figura 1.5). En la Tabla 1.1 se muestran algunas bandas de frecuencia típicas con las que se trabaja.

Los sistemas SAR son capaces de operar con diferentes modos de obtención de la imagen controlando el patrón de radiación de la antena. El modo tradicional es el de StripMap, donde el patrón es ajustado a un barrido, obteniéndose la imagen de una sola tira continua, como se aprecia en la figura 1.6a).

Si se requiere un barrido más ancho, el sistema puede ser operado en modo ScanSar. En este modo la antena es redireccionada sucesivamente durante el transcurso de un mismo barrido, es decir que se redirecciona con diferentes ángulos de elevación correspondientes a múltiples sub-barridos, como se ve en la figura 1.6b). Cada sub-barrido es iluminado por múltiples pulsos, pero durante un tiempo menor que para el caso de StripMap. Luego de un adecuado proceso se obtiene una imagen SAR con un barrido más ancho o wide-swath. No obstante, la resolución en acimut se ve deteriorada en comparación con la de StripMap.

Si es necesario contar con una buena resolución en acimut se utiliza el modo Spotlight. En este caso el patrón de la antena es dirigido en acimut hacia un punto fijo para iluminar una dada región, como se observa en la figura 1.6c).

Existen también modos de iluminación larga, como TOPS mode (Terrain Observation

Nombre	Ka	Ku	X	C	S	L	P	VHF
Frecuencia [GHz]	40-25	17.6-12	12-7.5	7.5-3.5	3.75-2	2-1	0.5-0.25	0.02-0.09
Longitud de onda [cm]	0.75-1.2	1.75-2.5	2.5-4	4-8	8-15	15-30	60-120	>300

Tabla 1.1. Frecuencias de trabajo existentes

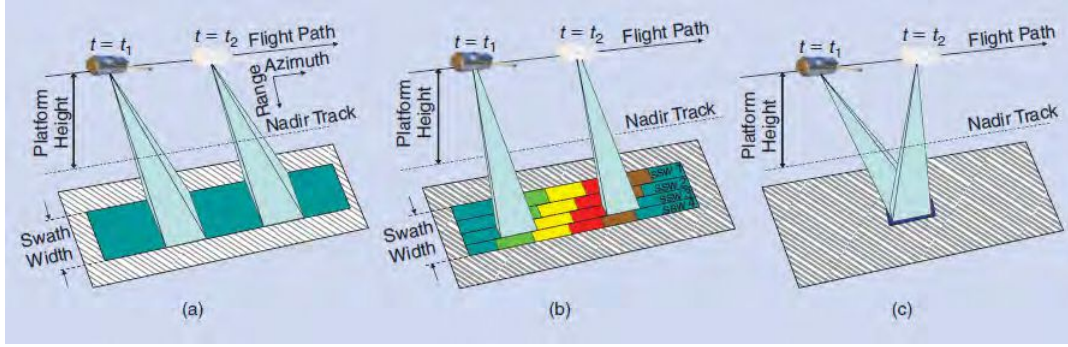


Figura 1.6. Ilustración de los diferentes modos de operación SAR. (Imagen extraída de [22])

of Progressive Scans), cada uno mejorando algún parámetro de la performance, pero a la expensa de algún otro, ya que existen límites fundamentales en la adquisición SAR de un solo canal, como por ejemplo que al mejorar la resolución en acimut resultará en un deterioro del ancho del swath, y viceversa. Estas limitaciones pueden ser superadas con técnicas digitales de canales múltiples.

1.7. Formación de la imagen

Visualizar los datos SAR crudos no nos aporta información útil sobre la escena, motivo por el cual la señal debe ser procesada para obtener la imagen.

En forma resumida, la cadena de proceso puede ser entendida como dos operaciones con filtros separadas, una en la dimensión del acimut y otra en la del rango. Como se muestra en la Figura (1.7).

El primer paso consiste en comprimir la señal chirp (o modulada) transmitida a un pulso corto. En lugar de convolucionar en el dominio del tiempo se busca multiplicar en el dominio de las frecuencias por su menor costo computacional. Es decir que cada línea de rango es multiplicada en el dominio de las frecuencias por el complejo conjugado del espectro del chirp transmitido. El resultado es una imagen comprimida en rango, que solo nos revela información de la distancia relativa entre el radar y cualquier punto sobre la superficie de la Tierra.

El segundo paso es la compresión en acimut y sigue el mismo razonamiento. La señal es convolucionada con el complejo conjugado de la respuesta esperada de un punto objetivo en la superficie, asociada a la señal transmitida. Si consideramos un dispersor elemental como punto objetivo para el rango $r(t)$ representado en la figura (1.3), podemos modelar la señal en acimut como

$$S_a(t) = A\sqrt{\sigma_0}e^{i\varphi_{scatt}}e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}r(t)}, \quad (1.7)$$

donde A representa la dependencia de la señal recibida con los parámetros del sistema como su poder de transmisión y las pérdidas de energía. σ_0 es la sección transversal del radar, φ_{scatt} es la componente de la fase correspondiente a la dispersión y $\frac{4\pi}{\lambda}r(t)$ describe las variaciones de la fase en acimut debidas a los cambios en distancia o rango $r(t)$.

Si calculamos la distancia en rango $r(t)$ haciendo uso del teorema de Pitágoras en la figura (1.3) obtenemos que:

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (vt)^2}, \quad (1.8)$$

donde para casos en que $\frac{vt}{r_0} \ll 1$, la anterior ecuación se puede aproximar mediante un desarrollo en series de Taylor por:

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (vt)^2} \approx r_0 + \frac{(vt)^2}{2r_0}. \quad (1.9)$$

Si reemplazamos esta aproximación en (1.7) y calculamos la frecuencia instantánea en acimut como la derivada temporal de la fase (1.10), podremos ver que variará linealmente en el tiempo a una tasa inversamente proporcional al rango r_0 :

$$f_D = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \frac{4\pi}{\lambda} r(t) = -\frac{2v^2}{\lambda r_0} t, \quad (1.10)$$

resultado por el cuál la frecuencia en acimut es también llamada Frecuencia Doppler, en analogía al bien conocido Efecto Doppler [22].

Comúnmente la imagen SAR es presentada en término de valores de intensidad de modo tal que cada píxel de la imagen indica la reflectividad correspondiente a un punto en superficie. Esto involucra dos pasos adicionales: Calibración y Geocodificación. La calibración nos asegura que cada valor de intensidad representa el valor de la reflectividad, es decir, la sección transversal del radar normalizada sobre el área. Sin embargo, no es una tarea trivial ya que requiere de una calibración interna del instrumento y de una calibración externa SAR usando objetivos cuya reflectividad sea conocida de antemano. La Geocodificación por otro

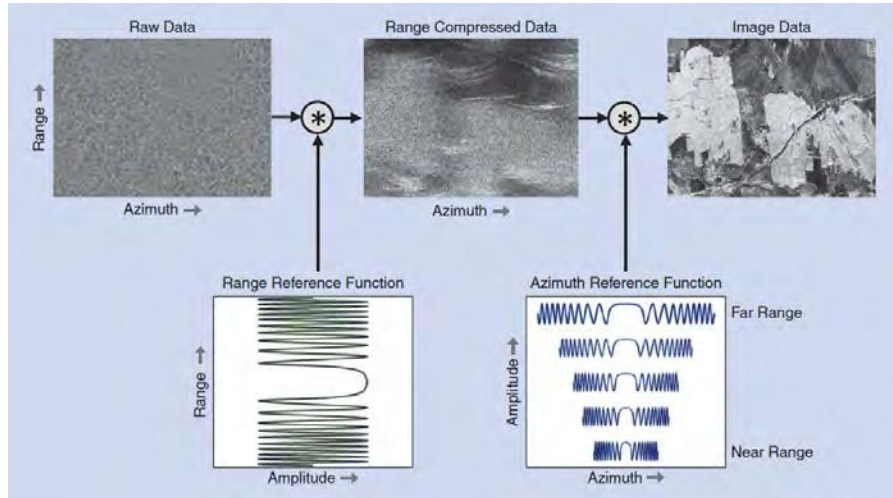


Figura 1.7. Resumen del proceso SAR donde se realiza la compresión en rango y en acimut. (Imagen extraída de [22])

lado nos asegura que la ubicación de cada píxel en la imagen SAR está directamente asociado a alguna posición sobre la superficie de la Tierra.

1.8. Interferometría

Christiaan Huygens desarrolló el concepto del frente de ondas en el año 1690 en su *Tra-tado sobre la luz*. Observó que dos rayos de luz que se intersectaban no se deflectaban unos con otros como se esperaba si estuviesen compuestos por partículas, y que una esfera de luz que se expande se comporta como si cada punto del frente de ondas fuese una nueva

fuelle de radiación de la misma frecuencia y fase. La interferometría de luz y de otras ondas electromagnéticas se basa en el concepto del frente de ondas.

La interferometría hace uso del principio de superposición para combinar ondas de manera tal que el resultado de la combinación presente una propiedad significativa o de interés sobre las ondas originales. Si ambas ondas se encuentran en fase, la interferencia será constructiva, en cambio si se encuentran en completo desfase, será destructiva. En casos intermedios se contará con un patrón de intensidad que permitirá determinar la diferencia de fase.

Se distinguen dos tipos de interferometría, la interferometría aditiva y la interferometría multiplicativa. En la aditiva se realiza una suma incoherente de las amplitudes de las dos señales de entrada. En la multiplicativa se mide la fase interferométrica a partir de la multiplicación coherente de las dos señales de entrada. La precisión de la aditiva es escasa, ya que ésta depende de la precisión en la determinación de la amplitud, la cual no suele ser muy alta. En cambio, la determinación del ciclo de fase, para la interferometría multiplicativa es mucho más sencilla de realizar con precisión. [19]

1.8.1. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La interferometría SAR es una técnica poderosa de sensado remoto que permite medir parámetros geofísicos importantes con gran precisión. La idea clave de la interferometría SAR es la de comparar para una dada escena, la fase de dos o más imágenes de radar complejas que han sido adquiridas en posiciones ligeramente diferentes o a diferentes tiempos. Dos imágenes SAR conforman un par interferométrico. Dado que la fase de cada pixel en la imagen SAR contiene información del rango que es precisa al nivel de una pequeña fracción de la longitud de onda del radar, es posible detectar y medir pequeñas diferencias en la longitud del camino del rayo con precisión centimétrica e incluso milimétrica, que, además, es independiente de la distancia entre el sensor y el objetivo, es decir que la precisión no se ve a priori deteriorada por más que el sensor se aleje del objetivo. Esto hace que la técnica sea relevante tanto para sensado remoto aéreo o espacial.

Las aplicaciones al inicio de InSAR tenían como objetivo probar sus capacidades desde un punto de vista tecnológico. Solo cerca de los años 2000, es que el enfoque cambió hacia aplicaciones prácticas, con la intención de mejorar los resultados obtenidos. Sin embargo, la decisión de utilizar o no InSAR para una dada aplicación no siempre es directa o sencilla, existen varios factores que deben considerarse:

Relación señal-ruido: No siempre se conoce la relación señal-ruido entre los parámetros con los que se trabaja. Por lo general se busca aplicar InSAR en regiones donde se espere una deformación de la topografía cuyos valores sean dominantes respecto a los valores correspondientes a las fuentes de errores. En regiones donde la relación señal-ruido se vuelve más crítica, es importante identificar y modelar las fuentes de errores, lo cuál no es una tarea sencilla y sobre la cual hay cada vez más demanda. Más adelante detallaremos las principales fuentes de errores.

Disponibilidad del dato: La adquisición regular de datos SAR se ve influenciada por aspectos técnicos como por ejemplo la capacidad de almacenamiento de datos. Más aún, existen problemas de compatibilidad entre los pares interferométricos, ya sea por la polarización, los ángulos de incidencia o la frecuencia del radar, lo cual restringe la cantidad de datos SAR utilizables.

Consideraciones generales: La aplicación de InSAR frente a otra técnica geodésica siempre será pesada en base a características como la extensión espacial de la señal bajo es-

tudio, la accesibilidad del terreno, la precisión y calidad deseada, la repetibilidad, la velocidad de proceso, unicidad de la interpretación y la relación entre el costo y la efectividad.

Todos estos factores deben analizarse previamente a la aplicación de InSAR.

La principal desventaja o desafío de la interferometría SAR es que la diferencia en rango medida es ambigua. Esta ambigüedad es generalmente resuelta combinando información externa y suposiciones de regularización apropiadas para la escena en cuestión. El proceso es comúnmente conocido como Desenrollado de fase.

Cuando las imágenes de radar para interferometría SAR son adquiridas con caminos de vuelo mutuamente desplazados (línea base distinta de cero), el proceso se conoce como interferometría SAR across-track, lo cual permite, entre muchas otras aplicaciones, medir con gran precisión la deformación topográfica. En cambio, cuando las imágenes son adquiridas con el mismo camino de vuelo, se conoce como interferometría SAR along-track, o interferometría diferencial.

1.8.2. Interferometría Across-Track

El uso convencional de SAR implica la proyección de un objeto tridimensional en el espacio a una imagen de radar 2D plana donde cada píxel contiene los ecos de radar enfocados de cada dispersor elemental que está contenido en un anillo circular centrado en el camino de la plataforma. El radio del anillo está dado por el rango y su longitud y ancho, por las resoluciones en rango y acimut. Como resultado, una imagen SAR en solitario no contiene información sobre ángulos de elevación y por consiguiente, tampoco de la altura de la región donde se obtuvo la imagen.

El objetivo de la interferometría across-track es, como ya anticipamos, el de superar esta limitación y encontrar el ángulo de elevación con alta precisión. Para conseguir esto, la escena es observada o mapeada por una segunda antena que se mueve a lo largo de un camino de vuelo desplazado lateralmente respecto al de la primera antena, como se muestra en la figura (1.8). Así este desplazamiento genera que para cada dispersor de la escena exista una diferencia en rango que puede ser evaluada para obtener la altura de la superficie. Con un solo sistema de radar resulta imposible distinguir entre dos puntos que estén a la misma distancia en rango pero a diferentes distancias sobre la superficie del terreno, como ocurre con los puntos P y P' de la figura (1.8) respecto a la órbita 1. Este problema puede ser resuelto observando diferencias angulares entre el punto P' sobre una superficie de referencia y el punto P a una dada altura H_p sobre dicha superficie [19]. La distancia efectiva entre los dos sensores, medida perpendicularmente a la dirección de vista del radar se conoce como *Línea de base perpendicular* $B_\perp$. Dado que el instrumento no puede medir las diferencias angulares pequeñas $\partial\theta$, esta información debe ser obtenida a partir de las mediciones de distancias entre ambos sensores, haciendo uso de la fase interferométrica y aplicando trigonometría simple con la geometría de la figura (1.8). A partir de las cuales, haciendo uso de H_{sat} y R_1 es posible obtener H_p .

Para largas distancias R_1 y cortas líneas de base $B_\perp$ podemos expresar la proporcionalidad entre la diferencia de altura H_p y la diferencia en rango ΔR como:

$$\Delta R = \frac{B_\perp}{R_1 \sin(\theta)} H_p. \quad (1.11)$$

En un radar coherente esta diferencia de rango se corresponde a una diferencia de fase

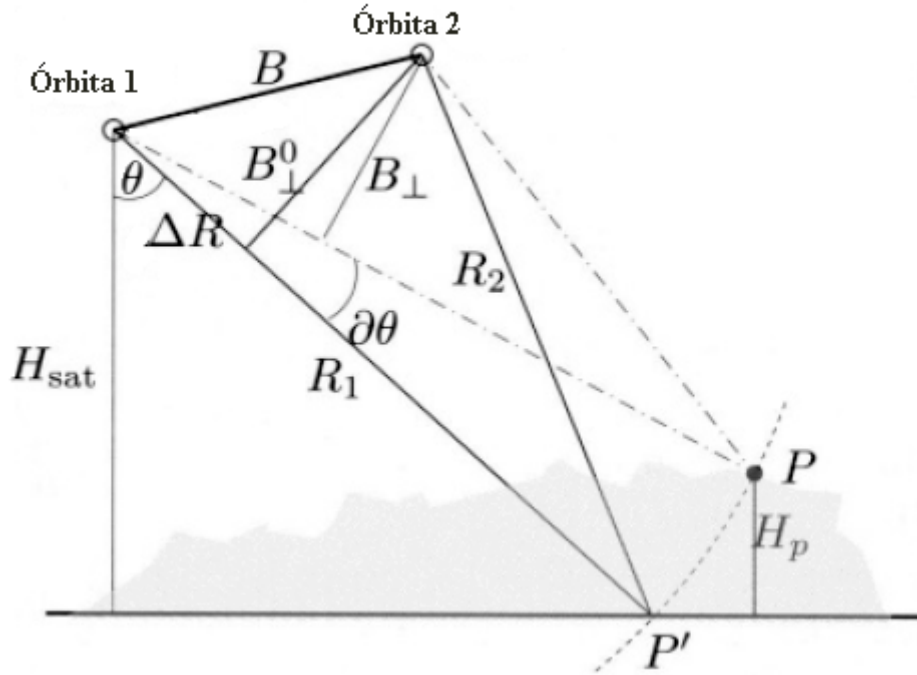


Figura 1.8. Esquema de la geometría across-track para medir topografía. Los caminos de vuelo del satélite están saliendo del plano de la hoja. (Imagen modificada de [19])

$$\Delta\varphi = m \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R, \quad (1.12)$$

donde m es un factor que tiene en cuenta si la diferencia en rango es solo debida al camino de ida o a ambos, es decir, camino de ida y camino de vuelta. Por lo tanto valdrá 1 o 2 según sea el sistema SAR [22].

En la figura (1.9) se muestra un ejemplo de las diferencias de fase obtenidas a partir de un par de imágenes SAR adquiridas con el satélite TanDEM-X. La fase se observa a la izquierda de manera cíclica, la dirección de rango está en el eje horizontal mientras que la de acimut en el eje vertical.

A partir de las dos ecuaciones anteriores, podemos obtener (dividiendo por $H_p = \Delta h$) la siguiente ecuación, que describe la sensibilidad del radar de interferometría frente a pequeños cambios en la altura Δh .

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta h} = \frac{2m\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin(\theta)}. \quad (1.13)$$

Es claro que la sensibilidad puede incrementarse al aumentar la longitud de la línea base perpendicular $B_{\perp}$. Sin embargo, el valor máximo para la línea base se ve limitado por dos factores. El primer factor es la decorrelación, esto se refiere a que a medida que incrementamos la línea de base la contribución a la fase de los dispersores elementales en cada celda de resolución será cada vez más diferente entre las dos imágenes SAR. Esto se ve simplemente si consideramos un grupo de dispersores fijos sobre la superficie y variamos el ángulo con

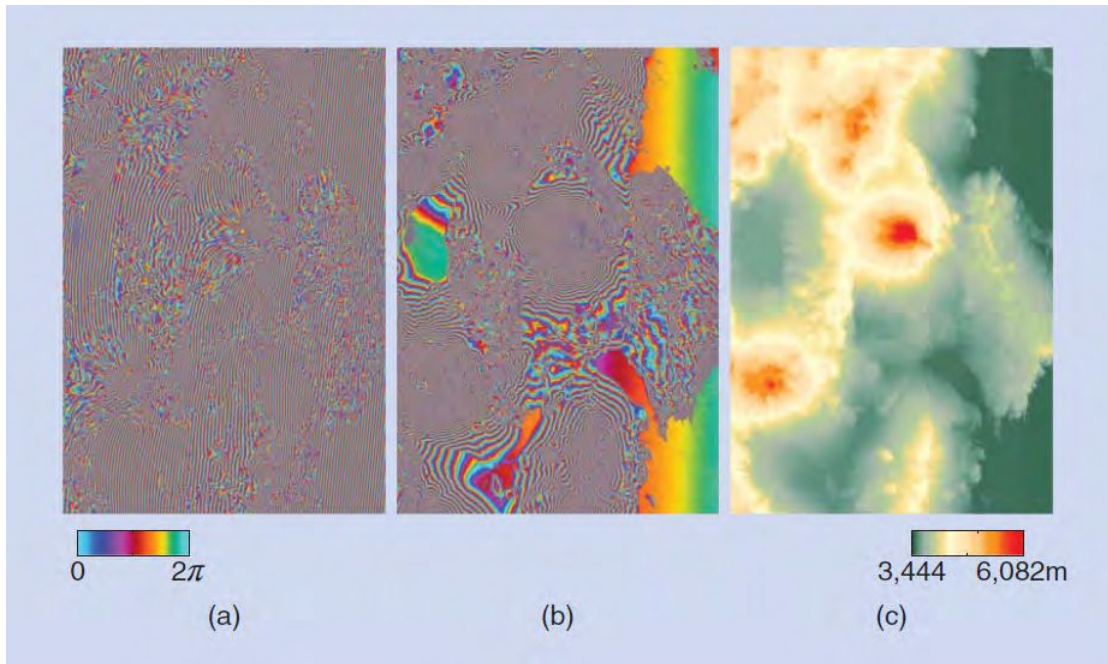


Figura 1.9. Interferogramas SAR y modelo digital de elevaciones (DEM) del desierto de Atacama (Chile). Datos interferométricos adquiridos con el satélite radar TanDEM-X de pasada simple. (a) Previo a la substracción de la fase de tierra plana. (b) Posterior a la substracción de la fase de tierra plana. (c) Fase desenrollada convertida a valores de altura. (Imagen extraída de [22])

el cuál el satélite apunta a ellos (debido al cambio en la línea de base), sencillamente la contribución de los ecos de radar comenzará a cambiar. Como resultado, la correlación entre las dos imágenes SAR a medida que se incrementa la línea base comenzará a disminuir hasta desaparecer completamente, la línea de base a partir de la cuál la decorrelación es total se denomina línea de base crítica y para superficies planas se expresa como [22]:

$$B_{\perp}^{crit} = \frac{\lambda R_1 \tan(\theta)}{m \Delta R}. \quad (1.14)$$

Para líneas de base más cortas que la crítica, esta decorrelación puede ser removida por un proceso llamado filtrado en rango, lo cuál no es un problema para los sistemas SAR modernos.

La segunda limitación se debe a ambigüedades en el proceso de conversión de fase a altura, vinculadas con la determinación del número entero de ciclos emitidos y recibidos por el radar, el cuál a priori es desconocido. La ambigüedad, por lo general se ven resueltas en el proceso conocido como desenrollado de fase, el cuál detallaremos más adelante.

A partir de la ecuación (1.13) y recordando que la medición interferométrica solo provee valores de fase que son ambiguos por múltiplos enteros de 2π , obtenemos una ambigüedad en la altura de:

$$h_{amb} = \frac{\lambda m R_1 \sin(\theta)}{B_{\perp}}. \quad (1.15)$$

La figura 1.9(c) muestra la fase desenrollada del interferograma de atacama, escalado a la altura del terreno según la ecuación (1.13)

1.8.3. Interferometría Diferencial SAR (DInSAR)

La alta sensibilidad del instrumento SAR para medir la distancia de propagación (Line Of Sight o LOS) es explotada para detectar desplazamientos de la superficie de la Tierra en la escala de la longitud de onda emitida.

Consideremos dos imágenes SAR adquiridas con una dada separación temporal entre ellas, que luego son combinadas para generar un interferograma. Idealmente, se busca una configuración de línea base nula (o zero-baseline), de manera tal que la fase observada en el interferograma resultante contenga únicamente información relacionada con el desplazamiento LOS de la escena, ΔR_d en la figura (1.10). Sin embargo, en la práctica siempre hay presente una determinada línea base no nula $B_\perp$ (Figura 1.10), y esto hace que el interferograma se vuelva sensible también a la topografía de la escena, como es en el caso de Interferometría SAR across-track. Este problema demanda el uso de un Modelo Digital de Elevaciones externo (DEM), de forma tal que podamos substraer la información topográfica del interferograma a partir del mismo.

Una vez que la información de la fase topográfica del interferograma es removida, obtenemos un interferograma diferencial, donde los sutiles cambios en la distancia en rango para las distintas adquisiciones pueden ser detectadas, por ejemplo: por subsidencia del terreno (Fig. 1.10). La fase del interferograma diferencial (sin la componente topográfica) puede expresarse como:

$$\varphi_{desp} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{desp}, \quad (1.16)$$

donde φ_{desp} es la fase del interferograma, λ la longitud de onda del sistema SAR y Δr_{desp} es el desplazamiento LOS buscado [22]. Es decir que podemos obtener el desplazamiento en dirección de vista del radar asociado al movimiento del terreno a partir de medir la fase diferencial, solo conociendo la longitud de onda del sistema utilizado.

Al igual que para InSAR, la fase diferencial necesita ser desenrollada y calibrada para obtener resultados de carácter absolutos en el desplazamiento. Sin embargo, múltiples aspectos empobrecen la calidad de los resultados obtenidos. Primero, la precisión del DEM externo debe ser del mismo orden de magnitud o mejor que la sensibilidad en fase de la línea base interferométrica. Pero más importante es considerar ruido en la fase debido a decorrelación temporal y variaciones en el medio en que se propaga la señal. Este último es consecuencia del retraso atmosférico, que es principalmente debido al contenido de vapor de agua en la tropósfera. El retraso es del orden de 2-4 metros, pero su gradiente a escala local puede llegar a ser del orden de 1cm/km o más, es decir limitando la precisión de la interferometría diferencial SAR convencional, haciendo que solo sea de interés para casos donde los desplazamientos esperados sean mayores que este valor.

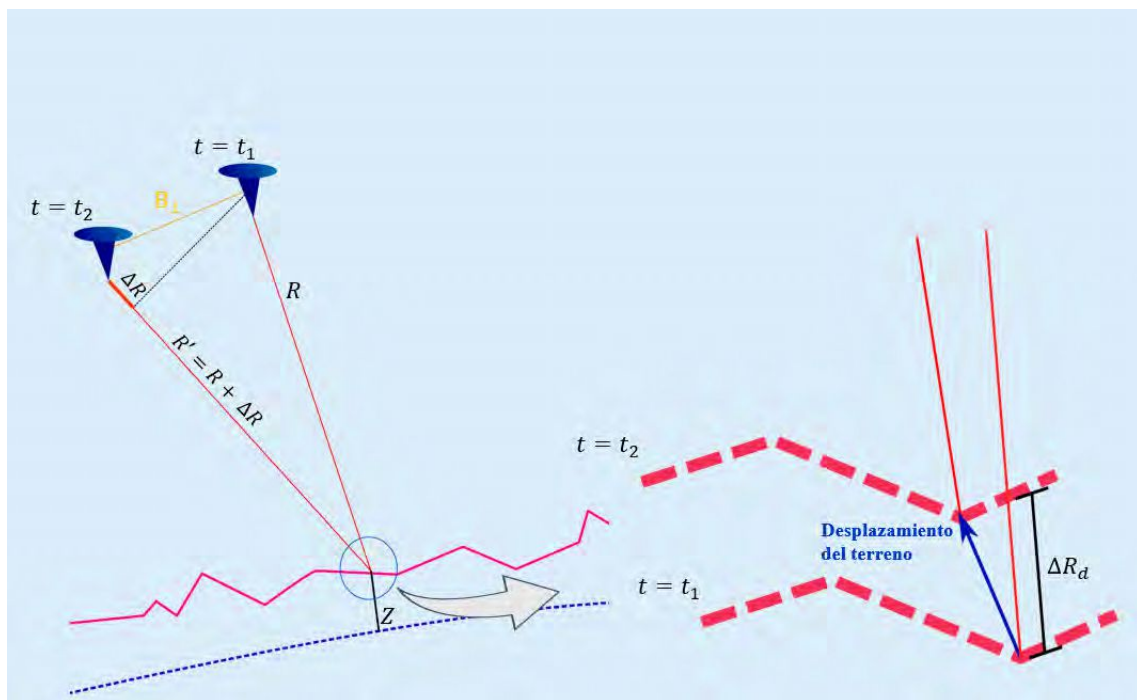


Figura 1.10. Esquema de medición con la técnica de interferometría diferencial SAR. A la izquierda se ve el panorama general. A la derecha un acercamiento del punto afectado por un desplazamiento del terreno donde se mide.

Capítulo 2

Evento estudiado

En este capítulo se detallan las características principales del terremoto de Illapel del 16 de septiembre de 2015, como así también de la región tectónica circundante.

2.1. Zona de estudio

El 16 de septiembre de 2015 a las 19:54:31 hora local (UTC-3) se produjo un evento sísmico en la región de Coquimbo en el norte de Chile. El sismo tuvo una magnitud de Mw 8,4 con epicentro ubicado en $31,573^\circ$ de latitud sur y $71,674^\circ$ de longitud oeste (Figura 2.1). Aproximadamente 37 kilómetros al noroeste de Los Vilos y 37 kilómetros al suroeste de Canela Baja, percibiéndose no solo en Chile sino también en algunas zonas de Argentina, Uruguay y Brasil. La profundidad del evento se estimó en 23,3 Km. Los datos fueron calculados por el USGS.

La tectónica de la región abarca la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. La placa de Nazca es una placa tectónica oceánica que se encuentra en el océano Pacífico oriental frente a la costa norte y centro de Chile y a la totalidad del litoral de Perú, Ecuador y Colombia. El borde oriental de la placa se encuentra dentro de una zona de subducción bajo la placa Sudamericana, lo que ha dado origen a la cordillera de los Andes y a la fosa Peruano-Chilena y que también forma parte del llamado cinturón de fuego del pacífico, provocando que esta área sea sísmica y volcánicamente activa.

La placa Sudamericana es una placa tectónica que abarca dicho subcontinente y la porción del océano Atlántico Sur comprendida entre la costa Sudamericana y la dorsal atlántica. Dicha placa se mueve hacia el oeste, alejándose de la dorsal.

El terremoto de Illapel tuvo lugar a lo largo de la zona de colisión entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, que convergen a una tasa de 8 cm/año en dirección N78°E [1]. Su disposición tectónica está caracterizada por una convergencia dextral ligeramente oblicua entre los bordes de la placa de Nazca y la Sudamericana, que han sido un borde de subducción por los últimos 20 Ma.

El área de estudio estará definida sobre la porción del continente cercana al epicentro del terremoto como se muestra en la figura (2.1)

2.2. Antecedentes en el uso de la técnica DINSAR para estudiar eventos sísmológicos en la zona

En las latitudes cercanas a donde tuvo lugar el sismo de Illapel, el borde de placas se caracteriza por un gran número de fallas inversas que dan origen a terremotos destructivos, y que desencadenan tsunamis en la zona de subducción [3], [9], [29]. Este contexto es el que dio origen al terremoto de Valdivia del 23 de mayo de 1960, con magnitud Mw 9,5 [3]; y más recientemente en el año 2010, el 27 de febrero, tuvo lugar el sismo del Maule de magnitud Mw 8,8 [28], siendo este el último de gran magnitud ocurrido previo a nuestro caso de estudio. La gran magnitud de los movimientos telúricos que históricamente tienen lugar en esta región tectónica la convierten en una región de interés para la aplicación de técnicas de interferometría diferencial SAR.

Varios trabajos se han realizado en los últimos años con el fin de caracterizar la deformación producida por el terremoto de Illapel del 2015. En particular, es posible citar el trabajo de Grandin et al., [18] que utiliza imágenes de Sentinel-1 cubriendo el terremoto de Illapel 2015, para obtener el campo de desplazamientos en las tres dimensiones, el cual es luego validado con una densa red de sensores GPS, con el fin de probar la eficiencia de la metodología denominada “Burst overlap interferometry”. También en el trabajo de Zhang et al., [31] obtienen la deformación superficial completa del terremoto de Illapel de 2015 a partir de interferogramas SAR con órbitas Sentinel-1 ascendentes y descendentes.

La existencia y disponibilidad de tantos trabajos se debe al creciente interés por la técnica y a la disponibilidad de imágenes SAR de calidad, de acceso libre y cobertura global; que frente a la ocurrencia de un terremoto de tal magnitud, despertó un claro interés por su uso en este tipo de aplicaciones.

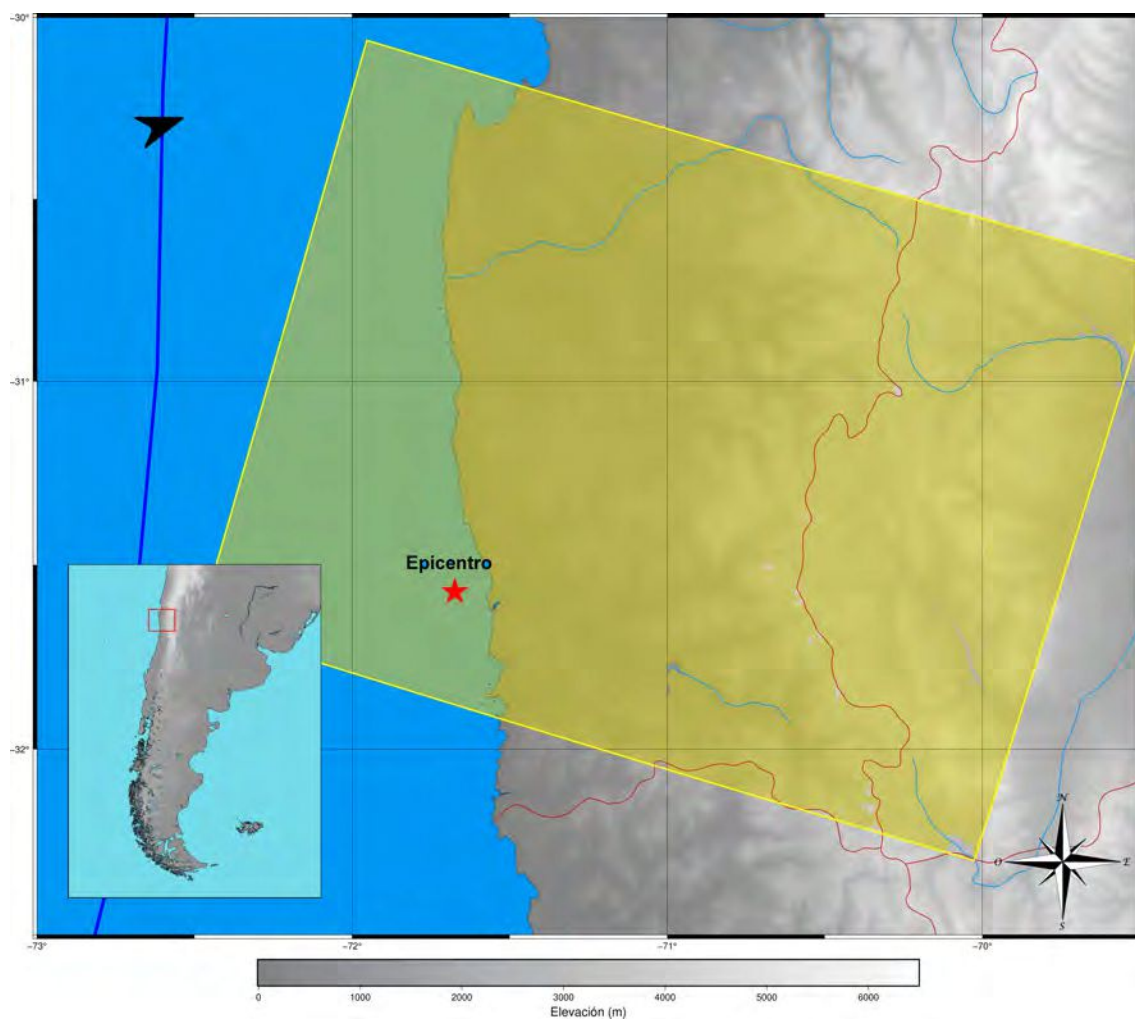


Figura 2.1. Área de estudio. Con rojo se indica el epicentro del terremoto de Illapel. La línea azul marca la zona de subducción entre la placa de Nazca y la Sudamericana. La flecha apunta en el sentido del movimiento relativo entre las placas tectónicas. El rectángulo amarillo es la región en donde se disponen de datos SAR.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se detalla cada paso del desarrollo del trabajo, haciendo hincapié en la selección del par interferométrico, el software de procesamiento y las etapas más importantes que lo componen, con el fin de profundizar en el conocimiento de la técnica y en el caso de estudio.

3.1. Selección de las imágenes

La definición del par o los pares interferométricos adecuados para una dada aplicación, es una de las decisiones más importantes, y depende de varios factores, entre los cuales podemos mencionar: Las características de la aplicación o del fenómeno a medir, y en base a éstas, la cobertura espacial y temporal de las imágenes.

La disponibilidad del dato es analizable tanto desde un punto de vista económico como desde un punto de vista técnico. Económicamente, es importante saber si se cuenta con imágenes de acceso libre o pago. Técnicamente, nos interesa que el área de estudio sea iluminada con geometrías que permitan describir el fenómeno que se busca, por ejemplo, contar con pasadas ascendentes y/o descendentes.

Las características del sensor incluyen parámetros como la longitud de onda, ancho de banda, relación señal-ruido y período de revisita.

En base a esto, se decidió que para nuestro caso de estudio los datos medidos por la misión satelital Sentinel-1 serían los más adecuados. Esta misión correspondiente a la Agencia Espacial Europea (ESA) cuenta con dos satélites cuyas órbitas son polares y están a una altura de 693km. Entre el Sentinel-1A lanzado en el año 2014 y el Sentinel-1B lanzado en el 2016, hay un desfase en sus órbitas de 180°. Por si solos cada uno tiene un período de revisita de 12 días, es decir que en ese tiempo dan toda una vuelta al globo. Trabajando ambos satélites en conjunto, el período de revisita puede reducirse a 6 días. Esto es independientemente de las condiciones climáticas.

En cuanto a lo técnico, Sentinel-1 cuenta con un radar de apertura sintética que opera en banda C (Tabla 1.1) con cuatro modos de adquisición, con diferente resolución (hasta 5m) y cobertura (hasta 400km). Estos modos son:

- **Strip Map Mode (SM):** Barrido de 80 km y 5 x 5 m de resolución espacial
- **Interferometric Wide Swath (IW):** Barrido de 250 km, y 5 x 20 m de resolución espacial.

- **Extra-Wide Swath Mode (EW):** Barrido de 400 km, y 20 x 40 m de resolución espacial.
- **Wave-Mode (WM):** 20 x 20 km, 5 x 5 m de resolución espacial.

El corto período de revisita de los satélites de la misión Sentinel, hace que sea necesario que operen en modo Wide Swath (barrido ancho) para así poder conseguir cobertura total del planeta. Una forma de incrementar el tamaño del barrido es operando con ScanSar como se vio en la sección 1.6. Sin embargo, un problema de operar en ScanSar es que la amplitud de la imagen creada puede no ser uniforme entre cada grabado (burst). La solución es el modo TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans). En éste, el radar escanea 3 subswaths en sucesión, de abajo hacia arriba en el sentido de vuelo del radar a medida que el mismo avanza, como se observa en la Figura (3.1).

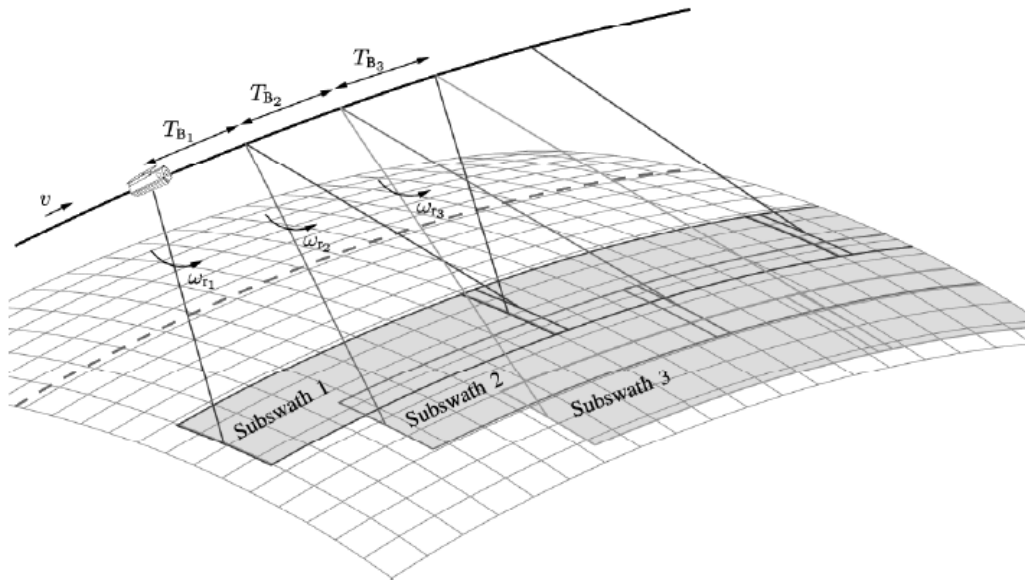


Figura 3.1. Diagrama de la geometría de adquisición TOPS. Cada subswath es de 80km de ancho y cada burst cubre una distancia de 20km a lo largo de la dirección de movimiento del satélite. Existe cierto solapamiento entre los subswaths y bursts que sirven para refinar el alineamiento. (Imagen extraída de [26])

Los productos SAR pueden ser generados en distintos niveles de procesamiento. Estos productos obtenidos a partir de datos Sentinel-1 están disponibles periódicamente (en general cada 24hs) y libre de cargos para todo tipo de usuarios, ya sean comerciales, científicos o público general. Los productos disponibles son de:

- * **Nivel-0:** Datos SAR crudos. Comprimidos y no enfocados.
- * **Nivel-1:** Se producen en dos tipos, SLC y GRD:
 - a) Single Look Complex (SLC): Consisten en datos SAR enfocados con datos de órbitas y altitud del satélite. Consta de muestras o píxeles complejos que preservan la información de la fase.
 - b) Ground Range Detected (GRD): Consisten de datos SAR enfocados, con Multi-Look aplicado y proyectado a rango horizontal utilizando un modelo de tierra elipsoidal. Se pierde la información de la fase.
- * **Nivel-2:** Productos OCN (Ocean products), son productos geofísicos geolocalizados derivados de los productos de N1.

En el presente trabajo se usaron imágenes adquiridas en modo Interferometric Wide Swath (IW) y con procesamiento de Nivel-1 Single Look Complex (SLC). Se escogieron de manera tal que cubrieran el área de interés, siendo ésta el área circundante al epicentro del terremoto entre las latitudes 30° y 32° sur y longitudes 70° y 72° oeste, cubriendo un total de 20000 km^2 , aproximadamente (Figura 2.1). En cuanto a la cobertura temporal se buscó que una de las imágenes tuviera fecha de adquisición previa al evento principal y que la otra imagen tuviera fecha de adquisición posterior al mismo. No obstante, varias réplicas de magnitud considerable tuvieron lugar entre los cinco minutos y las tres horas de ocurrido el evento principal, haciendo imposible de separar el efecto de tales réplicas de los desplazamientos asociados al terremoto de magnitud 8.4 Mw con esta técnica.

La fecha de la primera adquisición fue el 24/08/2015 (Figura 3.2) y de la segunda fue el 17/09/2015 (Figura 3.3), entre ambas hay una línea base temporal de 24 días, y una línea base perpendicular de 118 metros. Ambas pasadas descendentes. En las figuras se puede observar el formato en que el satélite adquiere las imágenes y diferenciar los tres barridos, notar que estas se encuentran deformadas y espejadas respecto al mapa geográfico tradicional, resaltando el hecho de que la órbita de adquisición fue descendente.



Figura 3.2. Vista rápida de la imagen SLC del 24/08/2015 adquirida por el satélite Sentinel-1A

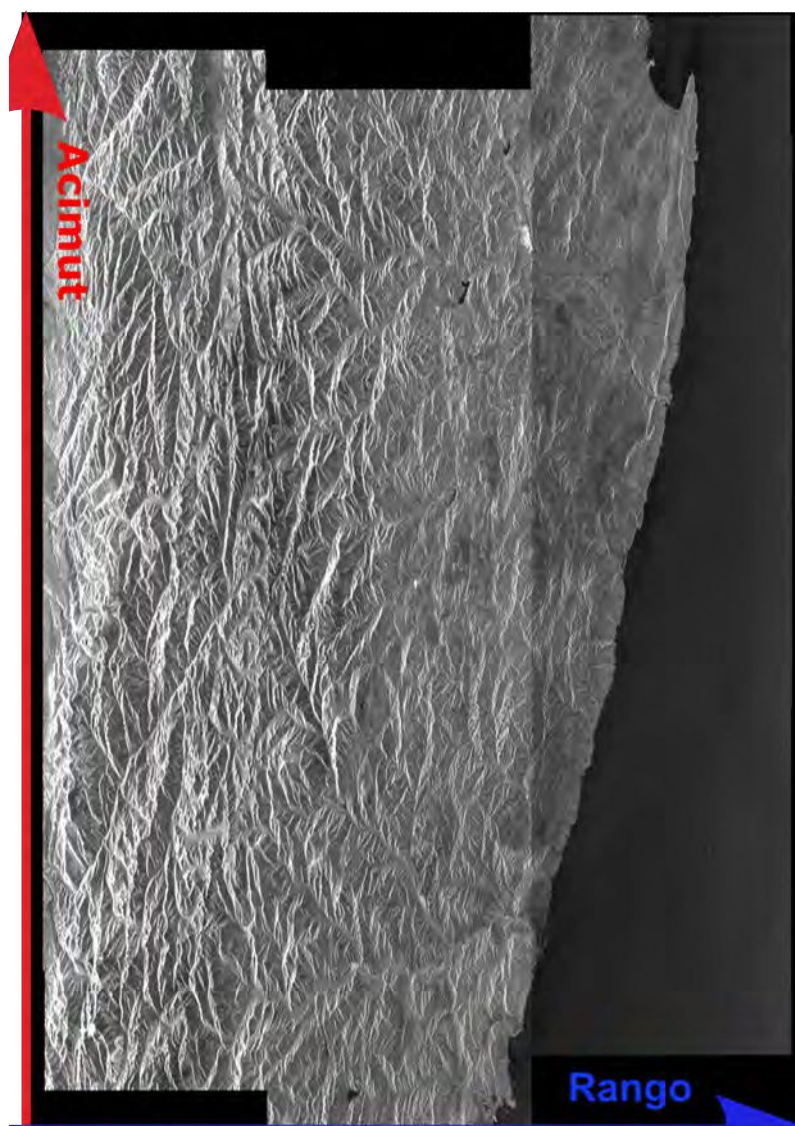


Figura 3.3. Vista rápida de la imagen SLC del 17/09/2015 adquirida por el satélite Sentinel-1A

3.2. Cadena de procesamiento

El software utilizado para implementar la cadena de procesamiento, denominado **GMTSAR**, es un sistema de procesamiento InSAR de código abierto (GNU general public license) diseñado para usuarios familiarizados con **GMT** (Generic Mapping Tools). El mismo fue descargado de manera gratuita del sitio oficial de la Universidad de California, San Diego, el cual se instaló en una máquina virtual con Linux como su sistema operativo.

GMTSAR está formado por tres componentes principales [26]:

1. Cuenta con un preprocesador para cada tipo de dato de cada satélite; que se encarga de convertir el formato nativo y la información orbital en un formato genérico.
2. Un procesador InSAR que se encarga de enfocar y alinear las imágenes, mapear la fase topográfica y formar los interferogramas complejos.
3. Un postprocesador, principalmente basado en GMT, encargado de filtrar los interferogramas y construir los productos interferométricos como mapas de fase, coherencia, entre otros, tanto en coordenadas de radar como geográficas.

La principal diferencia entre GMTSAR respecto a otros software de procesamiento InSAR como pueden ser, **ROI-PAC**, **Gamma** y **DORIS**, es que GMTSAR depende de determinaciones precisas de la órbita del satélite, de orden submétrico [26]; lo cual permite simplificar los algoritmos de procesamiento. La desventaja de esta dependencia es que satélites SAR con órbitas poco precisas serán difíciles de trabajar con GMTSAR, por ejemplo RADARSAT-1 que tiene una precisión del orden de los 10 metros.

La información precisa de las órbitas se utiliza en 4 aspectos fundamentales:

En primer lugar, para el enfoque correcto de las imágenes SAR, el cuál involucra la suma coherente de los ecos alineados en la dirección del rango, a lo largo del ancho de apertura sintética.

El segundo uso es para mapear cada punto sobre la superficie de la Tierra (longitud, latitud y altura) en las coordenadas de radar (rango y azimuth).

En tercer lugar, se utiliza para alinear la imagen de referencia (Maestra) con la imagen de la segunda pasada (Esclava), con una precisión del nivel del sub-píxel para luego poder formar el interferograma.

En cuarto y último lugar, se usa en el cálculo de las componentes paralelas y perpendicular de la línea de base interferométrica, que son necesarias para remover la fase interferométrica debida a las diferencias en rango que ocasiona la forma elipsoidal de la Tierra.

En la Figura (3.4) se puede observar el diagrama de flujo de la cadena de procesamiento con GMTSAR, y a continuación se detallan algunas de las etapas más importantes del mismo.



Figura 3.4. Diagrama de flujo de la cadena de procesamiento interferométrico

3.2.1. Preprocesamiento

Si el procesamiento comienza desde los datos SAR crudos, entonces es necesario revisar inconsistencias previo al enfocado de las imágenes. En casos como el de este trabajo, en el que partimos de datos pre-procesados SLC (Single Look Complex), lo anterior no es necesario.

3.2.2. Corregistración

Para extraer la información de la interferencia en la fase de un mismo punto en el terreno, tanto la técnica InSAR como DInSAR requieren que las imágenes se encuentren alineadas con precisión al nivel del sub-píxel. Debido a distorsiones en las geometrías de adquisición, un mismo punto sobre la superficie puede ser mapeado en dos lugares diferentes sobre ambas imágenes. Si no se logra un alineamiento correcto de las imágenes SAR enfocadas, habrán importantes pérdidas de coherencia que se manifestarán como errores en el producto final.

El procedimiento típico se basa en la elección de una de las imágenes SAR como la imagen maestra y la otra como la esclava. El alineamiento se consigue mediante la correlación cruzada bidimensional de cientos de pequeños sub-parches (por ejemplo de 64x64 píxeles) tomados de las imágenes master y esclava. El script que hace esto en GMTSAR se denomina *xcorr*. Luego se ajusta una transformación afín de 6 parámetros bidimensional a los datos (*trend2d* en GMT), y por último se utiliza una función seno bidimensional para interpolar y remuestrear la imagen esclava en las coordenadas de la maestra. La precisión del alineamiento dependerá

de la correlación entre ambas imágenes, dado por el coeficiente de coherencia. Cuando la coherencia es elevada ($>0,7$) se pueden obtener precisiones en el alineamiento del orden de 0.1 píxel. Cuando la coherencia es baja (entre 0,3 y 0,7) la precisión puede ser peor que 1 píxel. Y en casos donde la coherencia es extremadamente pobre ($<0,3$) este método falla.

Para el caso de Sentinel-1, en la sección 3.1 fue mencionado que opera en modo TOPS, lo cual presenta ciertos inconvenientes. El problema con el modo TOPS es que el alineamiento tradicional mencionado previamente falla porque es necesario un alineamiento de un orden mayor, es decir, de 0.01 píxel. Esto tiene que ver con el cambio sucesivo en el ángulo de inclinación del satélite en cada subswath (Figura 3.1), lo cuál introduce un cambio significativo en la frecuencia Doppler ($\pm 2250 Hz$), mientras que los sistemas típicos trabajan con frecuencia Doppler cercana a cero, por lo que se requiere un alineamiento más preciso para evitar saltos de fase importantes.

3.2.3. Formación de los interferogramas

Para formar los interferogramas complejos se multiplican las dos imágenes SLC. Cada píxel de una imagen SLC tendrá un valor complejo que podemos llamar $C(\vec{x})$ y podrá ser descompuesta en amplitud y fase [26]:

$$C(\vec{x}) = A(\vec{x})e^{i\phi(\vec{x})}, \quad (3.1)$$

donde el vector $\vec{x} = (\rho, a)$ es el vector con la posición del píxel en coordenadas de rango y azimut.

Luego el producto de las dos imágenes SLC es

$$C_2 C_1^* = A_1 A_2 e^{i(\phi_2 - \phi_1)} = Re[\vec{x}] + iIm[\vec{x}], \quad (3.2)$$

de donde la fase puede extraerse de la manera usual,

$$(\phi_2 - \phi_1) = \tan^{-1} \left(\frac{Im}{Re} \right). \quad (3.3)$$

A continuación se detallan las distintas componentes que contribuyen a la fase del interferograma, muchas de las cuales ya hemos mencionado a lo largo del texto.

- **Curvatura de la Tierra:** Se la puede considerar casi plana, es conocida.
- **Fase topográfica:** Determinada a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). En este trabajo fue generado un Modelo Digital de Elevaciones para la región de estudio utilizando el mismo sitio web del que se descargó el software GMTSAR. Los requisitos para el MDE son que sea más grande que el área cubierta por las adquisiciones y de una resolución espacial comparable con la del sistema SAR. Bajo estos lineamientos el MDE utilizado fue el SRTM-1 de 30m de resolución, abarcando el área comprendida entre los $29,25^\circ$ y $32,5^\circ$ de Latitud sur; y los 70° y $73,5^\circ$ de Longitud oeste, comprendiendo un área total de $250000 km^2$ aproximadamente.
- **Deformación superficial:** Desconocida, y en nuestro caso particular es lo que buscamos determinar.
- **Error orbital:** Esta información es conocida y viene junto a la de la órbita precisa.

- **Retraso ionosférico:** Depende de la carga de electrones de la ionósfera e introduce una longitud de onda del orden de los 40km, casi plana a los efectos prácticos.
- **Retraso troposférico:** Desconocido, es la principal fuente de error ya que es difícil de predecir o modelar.
- **Ruido en la fase:** Ruido blanco. Aleatorio y desconocido.

3.2.4. Filtrado

El filtrado puede subdividirse en dos tipos, filtrado a priori y a posteriori. En el filtrado a priori, nos referimos a los filtros aplicados previo a la generación de los interferogramas. Mientras que a posteriori se refiere a los filtros aplicados luego de la formación de los interferogramas.

El filtrado a priori busca eliminar las fuentes de errores, valiéndose de la separación de la señal y el ruido en el dominio espectral.

Consideremos dos imágenes que contienen en su dominio espectral diferentes componentes de señal y de ruido, como se muestra en la figura (3.5). La multiplicación compleja de ambas imágenes (para formar el interferograma posteriormente) se corresponde con la convolución de ambos espectros. Al convolucionarlos el ruido de ambas imágenes se mezclará con el contenido de señal en todo el espectro de frecuencias del interferograma resultante, el cuál no podrá ser removido o reducido con filtros a posteriori.

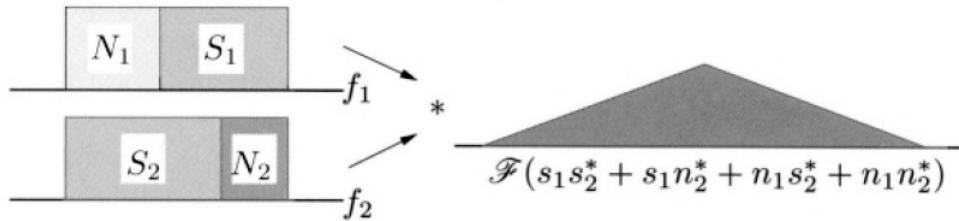


Figura 3.5. Convolución de dos espectros con distintas componentes de señal y de ruido. S_1, S_2 son las componentes de señal y N_1, N_2 son las componentes de ruido. (Imagen extraída de [19])

Uno de los filtros a priori es denominado compensación por cambio espectral (Spectral shift compensation) y busca incrementar la relación señal-ruido del dato y eliminar las componentes de ruido de ambas imágenes previamente a la generación de los interferogramas. Esto mejora la coherencia y reduce los problemas durante el desenrollado de fase.

Respecto al filtrado a posteriori, se diseñan filtros con el objetivo de mejorar la calidad de los interferogramas. Entre ellos están los filtros isotrópicos como el filtro caja o boxcar, el cuál funciona bien en regiones donde el gradiente de la fase no sea elevado. Los filtros no isotrópicos en cambio tienen en cuenta que la fase puede tener una dirección predominante de variación y se ajustan acorde a ello.

Schwaebisch([27]) utiliza un filtro dependiente de la dirección que hace uso de la frecuencia local de las crestas de fase para determinar la orientación. La forma de este filtro en el dominio del espacio es el de una Gaussiana bidimensional, y dado que la transformada de Fourier de una Gaussiana es otra Gaussiana, esa será su forma también en el dominio de las frecuencias.

El resultado que se obtiene de aplicar este filtrado es una versión suavizada de la imagen original, ya que en el dominio del espacio realiza un promedio pesado respecto a los píxeles vecinos, y en el dominio de las frecuencias actúa como un pasa bajos que elimina el ruido de alta frecuencia.

Goldstein y Werner ([16]) proponen un filtro adaptativo basado en el suavizado del espectro del interferograma por parches, utilizando la amplitud del espectro. Este método asegura que si el espectro de la señal tiene buena amplitud entonces se verá realizada respecto al ruido, que se asume de menor amplitud.

3.2.5. Desenrollado de fase

El dato de mayor importancia con el que se trabaja en interferometría es la fase relativa de la señal, la cuál se repite de manera cíclica cada 2π radianes y contiene la información de la fase absoluta; incógnita que buscamos determinar.

El problema directo de mapear la fase absoluta al intervalo $[-\pi, \pi)$ o en otras palabras, enrollar la fase, es simple de resolver. El problema inverso es el que presenta la mayor dificultad para la interferometría de radar, esencialmente por su ambigüedad y no linealidad. El problema inverso es el que denominamos **Desenrollado de fase**. El hecho de que la fase esté contaminada con ruido, o los problemas geométricos de la sección 1.3 que pueden afectar la medición, como acortamiento, inversión y sombra; hacen que muchas de las técnicas propuestas no sean capaces de resolver el problema y por lo general se requiere de información externa, o de suposiciones sobre el dato para determinar si los resultados obtenidos con el desenrollado de fase son válidos.

Desarrollaremos brevemente los algoritmos y métodos más convencionales.

Denotemos con ϕ^w a la fase enrollada observada, la cuál será función de la fase verdadera (incógnita) ϕ , luego

$$\phi^w = W \{ \phi \} = \text{mod} \{ \phi + \pi, 2\pi \} - \pi, \quad (3.4)$$

donde W es el operador de enrollado y mod es la operación módulo que obtiene el resto de la división de un número entre otro [19]. Por otro lado, tenemos que

$$\phi = \frac{-4\pi\Delta R}{\lambda} + \phi_N = 2\pi k + \phi_N, \quad (3.5)$$

con $\Delta R = R_1 - R_2$ la diferencia en rango a las dos posiciones de los satélites, $\phi_N \in [-\pi, \pi)$ expresa el ruido aditivo en la fase, y k es la ambigüedad entera, es decir, el número entero de ciclos que se desconoce asociado al pulso electromagnético emitido y recibido por el radar.

Se asume suavidad, es decir, basándonos en información previa del terreno podemos suponer que el gradiente de la fase entre píxeles adyacentes está limitado al intervalo $[-\pi, \pi)$. Por este motivo si el gradiente de la fase observada es mayor que π , se resta un ciclo. Mientras que si es menor que $-\pi$ se suma un ciclo. Otra hipótesis importante es que el gradiente de la fase enrollada es igual al gradiente de la fase verdadera, lo cuál será válido siempre y cuando el gradiente de la fase verdadera sea pequeño (menor que medio ciclo) y no sea afectado por el ruido. El desenrollado de fase se realiza integrando los gradientes de la fase, simplemente por medio de la suma de los gradientes unidimensionalmente, comenzando desde una posición arbitraria. Sin embargo, si uno de los gradientes se estima de manera errónea, el error se propagará a todos los píxeles siguientes, pudiendo afectar a toda la imagen.

El criterio de suavidad implica que el campo vectorial del gradiente de fase verdadero se comporta como un campo conservativo [21], [1], es decir que:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \phi = 0. \quad (3.6)$$

El gradiente $\vec{\nabla} \phi$ es desconocido, y debe ser estimado a partir del gradiente de la fase enrollada que llamaremos $\vec{\nabla} \phi^w$. Si tomamos un píxel específico de coordenadas (i,j), el mejor estimador es generalmente denotado por:

$$\hat{\nabla} \phi_{i,j}^w = E \left\{ \begin{bmatrix} W \{ \phi_{i+1,j}^w - \phi_{i,j}^w \} \\ W \{ \phi_{i,j+1}^w - \phi_{i,j}^w \} \end{bmatrix} \right\}. \quad (3.7)$$

Omitimos la flecha de vector para simplificar la notación. Debido a que el ruido en la fase conducirá a errores, en general $\hat{\nabla} \phi_{i,j}^w$ no coincidirá con $\nabla \phi_{i,j}^w$, resultando en errores globales luego de la integración.

La evaluación más sencilla del criterio de suavidad sobre una imagen digital es en una grilla de 2 x 2 píxeles como se muestra en la Figura (3.6):

$$r = W \{ (\phi_{i+1,j}^w - \phi_{i,j}^w) \} + W \{ (\phi_{i+1,j+1}^w - \phi_{i+1,j}^w) \} + \\ W \{ (\phi_{i,j+1}^w - \phi_{i+1,j+1}^w) \} + W \{ (\phi_{i,j}^w - \phi_{i,j+1}^w) \}, \quad (3.8)$$

donde el residuo r puede ser cero, positivo o negativo. La existencia de residuos en la fase enrollada es un indicativo de la presencia de ruido o de un muestreo escaso o inconsistente con el criterio de suavidad. Estos residuos pueden ser descartados al conectar residuos positivos y negativos cercanos unos con otros a lo largo de todo el interferograma.

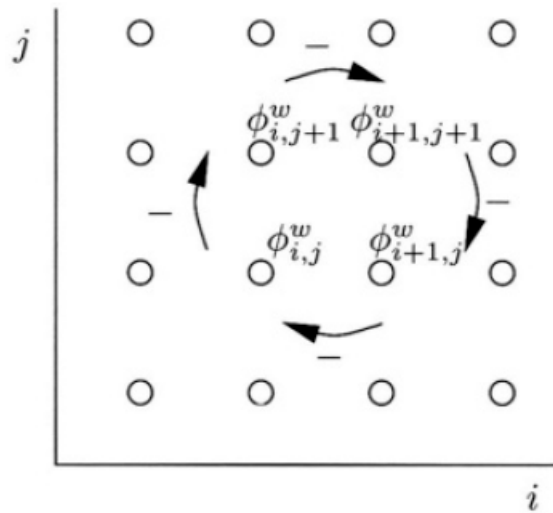


Figura 3.6. Definición de un residuo. Cada círculo representa el centro de un píxel. La suma se realiza en el sentido de las flechas. Imagen extraída de [19]

Algunos de los algoritmos más populares de resolución del problema del desenrollado de fase son:

- **Branch Cuts:** En este método todos los residuos se conectan por medio de ramas, bajo la condición de que la longitud total de ellas sea mínima. El algoritmo comienza en un residuo y busca en una ventana de 3×3 por otro residuo. Si se encuentra un residuo con diferente signo se conectan y el algoritmo continúa hacia el siguiente residuo. Si en cambio el residuo es del mismo signo, el algoritmo continúa desde esa nueva posición. Cuando todos los residuos positivos y negativos se ven conectados, formando un “árbol”, el algoritmo se detiene. [17]
- **Mínimos Cuadrados:** Se basan en minimizar la suma de los errores al cuadrado entre los gradientes de la fase desenrollada y los gradientes de fase estimados en forma global. Este problema puede ser formulado matemáticamente como mínimos cuadrados pesados, o no pesados. Se pueden aplicar técnicas de filtrado FFT para resolver el problema de forma eficiente [14]. A diferencia del método Branch Cuts (y métodos similares) que sigue un camino específico, mínimos cuadrados no lidia con los residuos de forma directa, lo cual conduce a soluciones globalmente más suaves. No obstante, si las restricciones o pesos no ayudan a que los residuos se distribuyan de forma conveniente, los resultados pueden ser erróneos.
- **Minimal cost flow methods (MCF):** También llamados Network Flow methods consideran el problema del desenrollado de fase como un problema de minimización global con variables enteras. Comparan la diferencia entre el valor estimado del gradiente de fase y el valor desconocido de la fase desenrollada, lo cual conduce a diferencias de $2k\pi$ con $k \in \mathbb{Z}$. Finalmente aplica el método de Branch Cuts hasta arribar a la solución óptima, cuando la función objetivo propuesta se ve minimizada. [7], [8], [12], [6].
- **Norma L_p mínima:** Se busca minimizar la norma L_p . El caso $p = 2$ es equivalente al de mínimos cuadrados. Las soluciones al problema matemático de la norma L_p generalizada son relativamente sencillas. Los algoritmos computacionales se basan en la solución del problema de mínimos cuadrados pesados, donde la principal diferencia es que los métodos de norma L_p generan sus propios pesos a partir de los datos de entrada [15].
- **Guiados por la coherencia:** Consisten en seguir un camino para el desenrollado de fase el cual prioriza operar primero sobre aquellos píxeles que presenten mejor calidad. Se adopta algún criterio para construir un mapa de calidad, a partir de la coherencia de los interferogramas, del cuál dependerá la calidad de los resultados obtenidos.

El software GMTSAR empleado en este trabajo hace uso del código **Snaphu** para el desenrollado de fase, escrito por Chen y Zebker ([6]), el cual se basa en los algoritmos MCF [26].

3.2.6. Geocodificación

Las imágenes SAR utilizadas son las de nivel 1, estas imágenes contienen información en el marco de referencia WGS84 y sus coordenadas geodésicas utilizan los parámetros del elipsoide WGS84.

Los metadatos de las imágenes son lo suficientemente claros para que la mayoría de los SIG (Sistemas de Información Geográfica) las desplieguen visualmente, aunque esta visualización

podría no ser correcta en el sentido de que la imagen puede aparecer invertida, rotada, alargada o encogida y el norte podría no apuntar hacia arriba como es la convención usual.

Pasar de la geometría SAR a la geometría proyectiva de un determinado programa es lo que se denomina geocodificación. La geocodificación garantiza que la visualización de la imagen sea la correcta en cuanto a que no esté deformada, mal orientada o invertida.

Notar que la geocodificación no es una corrección de terreno, ya que se refiere a la conversión de coordenadas de radar en la terna rango, azimuth, altura a coordenadas geodésicas longitud, latitud y altura que toman como elipsoide de referencia al WGS84.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presenta un análisis de algunos de los productos preliminares obtenidos, el cual servirá de base para la construcción de los interferogramas finales y su interpretación en el sentido de la deformación cortical que se busca mapear, tema que se discutirá hacia el final de este capítulo.

4.1. Productos intermedios

En la sección anterior se desarrollaron dos etapas importantes del procesamiento interferométrico, el filtrado y el desenrollado de fase. Sobre ellas, en el caso de GMTSAR, el usuario tiene la posibilidad de escoger/modificar los valores de parámetros que controlan la manera en la que los filtros o algoritmos se aplican sobre el dato.

En el caso del filtrado es posible modificar el tipo de filtro aplicado y las dimensiones del mismo, de manera tal de mejorar la calidad del interferograma, y por esto último nos referimos a filtrar aquellas regiones que presentan ruido o valores bajos de la coherencia en el interferograma. De esta forma, escogiendo el filtro óptimo es posible reducir el tiempo de cómputo en las etapas posteriores, principalmente en el desenrollado de fase, y mejorar la performance de este algoritmo.

Para reducir el tiempo de cómputo a la hora de evaluar el desempeño de los diferentes parámetros, se aplicó un corte sobre los interferogramas como se muestra en la figura (4.1). Esto pudo ser realizado bajo la consideración de que el área de estudio no presenta regiones con propiedades físicas o geométricas muy diferentes, de esta manera estudiar el desempeño del filtrado y desenrollado de fase en una región reducida será representativo de toda el área de interés. Es importante remarcar que esta consideración no es válida en toda la extensión de las imágenes SAR, como se mostrará más adelante, la región hacia el este presenta valores de correlación muy bajos vinculados posiblemente a distorsiones geométricas por la presencia de la cordillera de los Andes, o por cobertura de nieve. No obstante no consideramos esta región como área de interés para el estudio de la deformación sísmica producto del terremoto de Illapel de 2015, por su lejanía al epicentro.

El software GMTSAR aplica un filtro Gaussiano pasa bajos como el discutido en la sección 3.2.4, cuyo efecto sobre la imagen es el de suavizar el dato, promediando en el dominio espacial o filtrando las frecuencias altas en el dominio espectral. En este trabajo se propusieron diferentes longitudes de onda del filtro con dos objetivos diferentes, en primer lugar para encontrar el filtro que mejor se adecuaba a los datos con los que trabajamos y en segundo lugar para analizar los efectos del filtrado en cuestión sobre el interferograma.

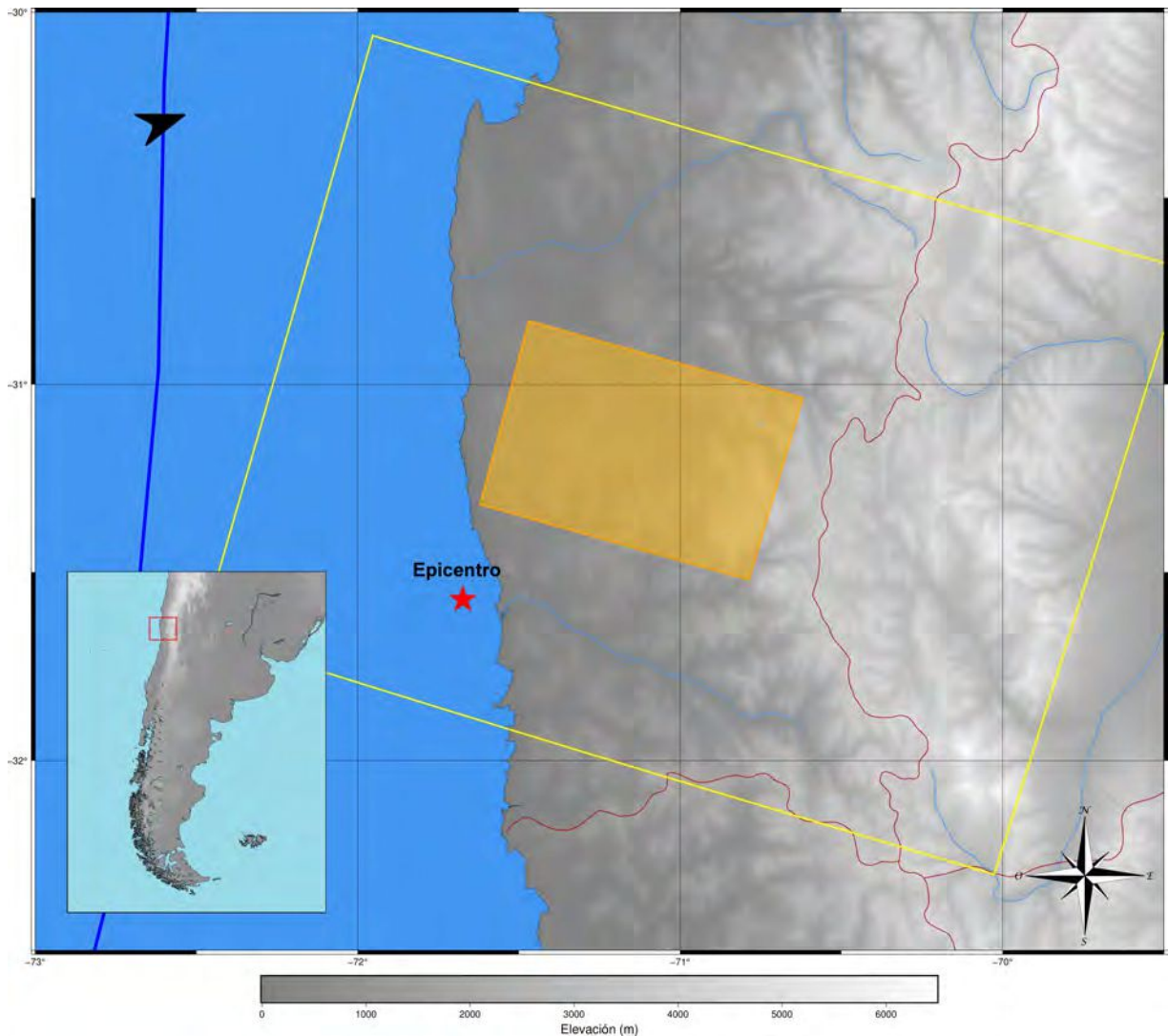


Figura 4.1. Región de estudio reducida

Se escogieron las longitudes de onda 5, 100, 200, 500, 1000 y 5000, todas en metros. Dicha longitud de onda equivale a la inversa de la frecuencia espacial a partir de la cual la ganancia del filtro es de $1/2$.

En las imágenes de las Figuras 4.2 y 4.3 se muestra la fase del interferograma previa y posteriormente al filtrado, para cada longitud de onda. Notar que no solo cambia la fase del interferograma filtrado, sino también la fase sin filtrar, esto es porque para realizar el filtrado, es necesario realizar un muestreo de la imagen a $1/4$ de la longitud de onda escogida o menor. Las imágenes se muestran en coordenadas de rango y acimut, con el corte aplicado de 0 a 5000 píxeles en rango y de 0 a 4000 píxeles en acimut, y se analiza solo uno de los tres subswaths.

Los interferogramas en esta etapa del procesamiento se encuentran enrollados, por ese motivo es que se observa en todas las imágenes por igual el patrón cíclico en la fase del cual ya hemos hablado y que se repite cada 2π . Volveremos sobre el análisis del interferograma en este estadio más adelante, en esta parte nos enfocaremos solamente en el filtrado.

Se puede observar cómo a medida que aumenta la longitud de onda, o en otras palabras, conforme el tamaño de la función Gaussiana a partir de la cual se realiza el promediado se

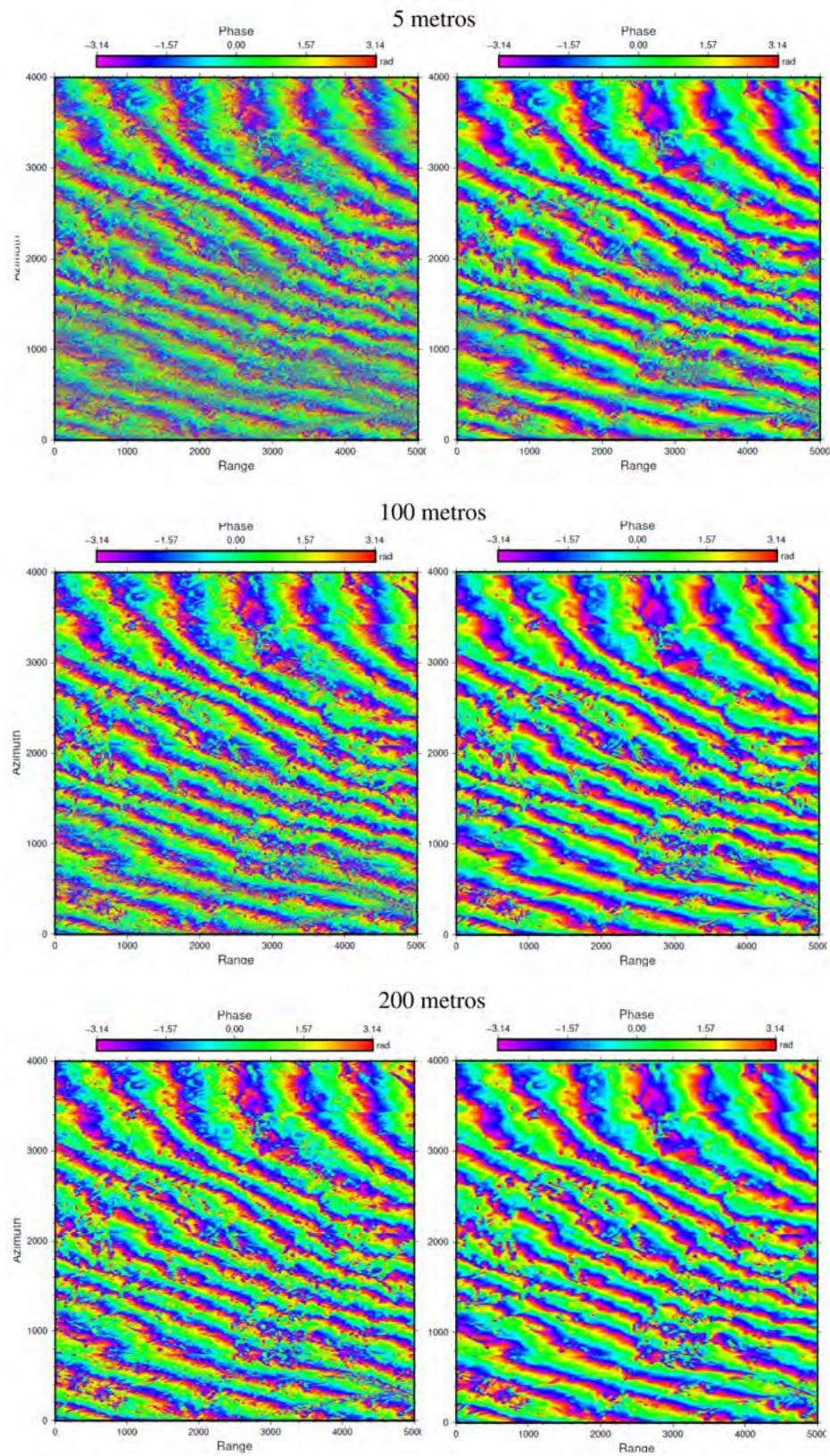


Figura 4.2. Interferogramas. A la izquierda sin filtrar, a la derecha filtrados.

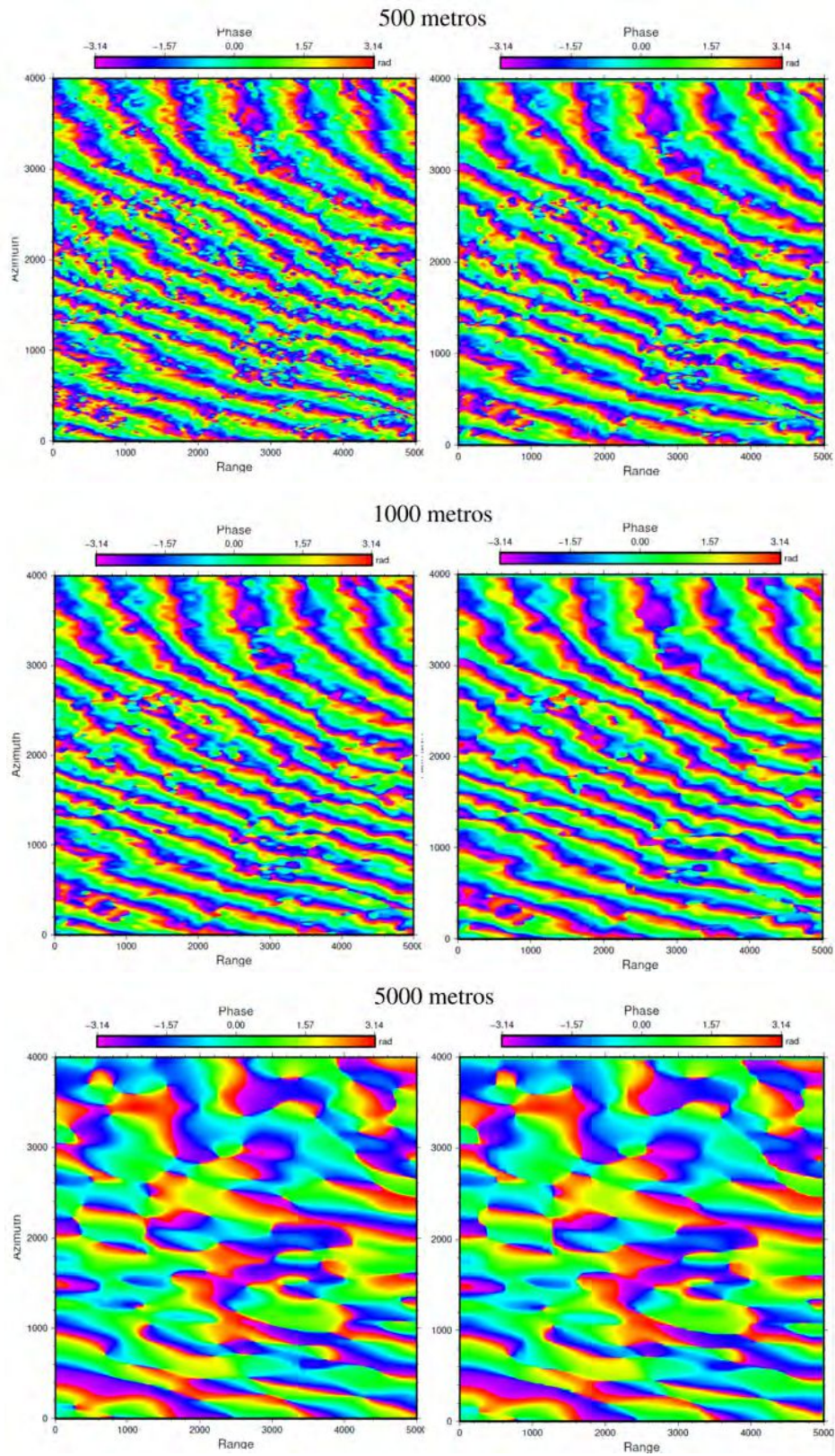


Figura 4.3. Interferogramas. A la izquierda sin filtrar, a la derecha filtrados.

incrementa, los interferogramas se vuelven mucho más suaves y el ruido de frecuencia alta desaparece. Deshacernos del ruido de alta frecuencia es ideal para que las estrategias de desenrollado de fase funcionen de manera óptima, no obstante debemos tener cuidado de no excedernos con el suavizado como ocurre en el caso de 5000 metros, que es un caso extremo donde el área de píxeles promediados es tan grande que se pierde la información de interés.

De los otros 5 casos, a simple vista cualquiera de ellos podría ser utilizado, ya que en mayor o menor medida todos preservan la dirección y el patrón de las franjas cíclicas y reducen la cantidad de ruido de alta frecuencia. Sin embargo, si analizamos los gráficos de *Correlación* de cada uno de ellos (Figura 4.4), que nos hablan del grado de coherencia de cada píxel de una imagen SAR respecto a la otra, podremos notar que no todos los filtros realizaron un buen trabajo preservando la coherencia de los interferogramas.

A partir de los gráficos de coherencia puede observarse que para longitudes de onda del filtro mayor a 500 metros, el valor de la coherencia comienza a deteriorarse significativamente (mayor cantidad de píxeles oscuros) hasta un caso de pérdida total de la coherencia en el caso de 5000 metros.

Si evaluamos solamente la coherencia, el caso de 5 metros es el que mejores resultados arrojaría, no obstante puede observarse en el interferograma filtrado que la cantidad de ruido de alta frecuencia que se introduce por el sobremuestreado previo a la aplicación del filtro es muy elevado, lo cual traerá problemas en la etapa posterior del desenrollado de fase.

Por todos estos motivos la elección del filtro queda restringida a dos casos, 100 o 200 metros. En este trabajo aplicaremos a la totalidad del área un filtro de longitud de onda de 200 metros.

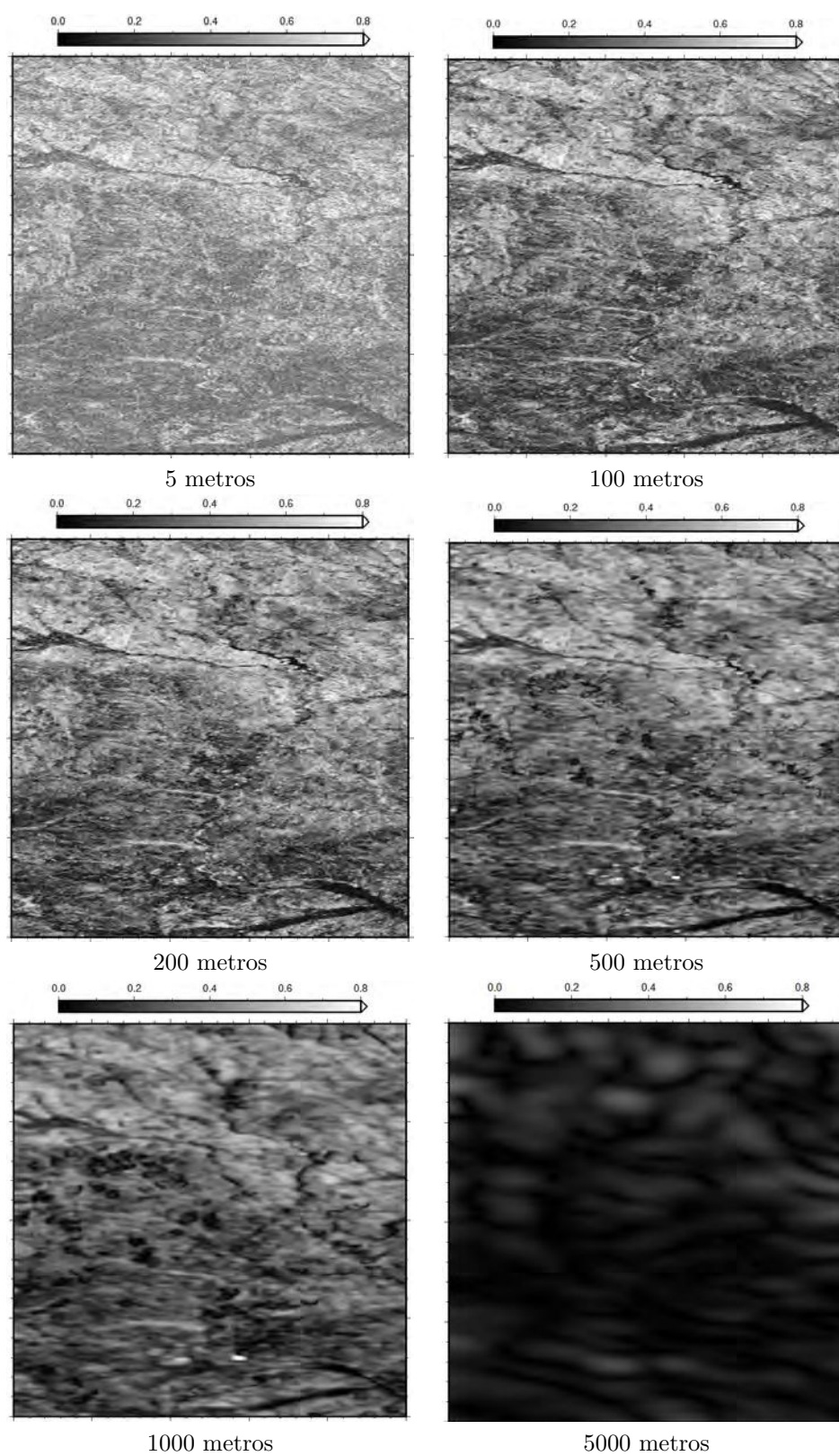


Figura 4.4. Gráficos de coherencia para los distintos filtros Gaussianos aplicados.

Una vez que el interferograma se encuentra filtrado adecuadamente, es posible avanzar hacia la etapa del desenrollado de fase donde se busca resolver la ambigüedad en la fase y convertir la fase cíclica con el patrón de crestas que se observa en las Figuras 4.2 y 4.3 en la fase verdadera.

Como fue discutido en la sección 3.2.5 el software GMTSAR hace uso del código **Snaphu** escrito por Chen y Zebker, el cuál es un algoritmo de flujo de redes (Network Flow).

En este caso el parámetro que modifica el resultado del desenrollado de fase es denominado Threshold Snaphu. Este parámetro marca un umbral para el valor de coherencia de los píxeles que serán tenidos en cuenta por el algoritmo. En las imágenes de la figura 4.5 se muestran los resultados del desenrollado de fase para valores de umbral de 0.25, 0.5 y 0.75.

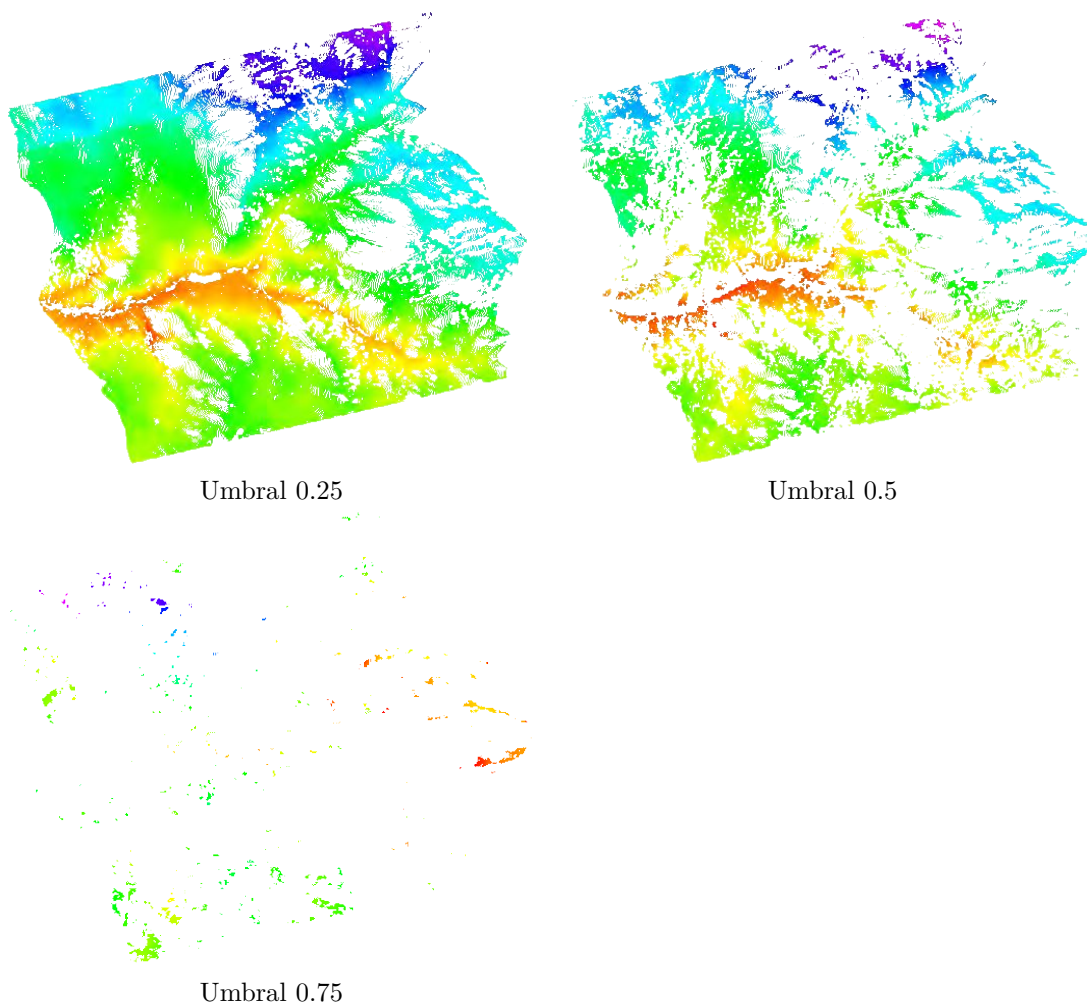


Figura 4.5. Gráficos de la fase desenrollada en coordenadas de latitud y longitud para distintos valores del parámetro umbral del código Snaphu.

De allí se puede observar claramente cómo a medida que el valor umbral se incrementa son cada vez menos la cantidad de píxeles que cumplen la condición de poseer un valor de coherencia superior al umbral establecido, y por lo tanto, son más grandes las regiones donde el algoritmo de desenrollado de fase no trabaja. Esto no es lo que buscamos ya que el objetivo de este trabajo es mapear la deformación superficial en la región afectada por el terremoto.

No obstante, reducir demasiado el valor del parámetro umbral tampoco es óptimo ya que en primer lugar, incrementará considerablemente el tiempo de cómputo; porque es mayor la cantidad de píxeles; y en segundo lugar porque entrarán al algoritmo valores de la fase con muy pobre coherencia, es decir, que no aportarán información confiable sobre la deformación sísmica, sino que serán ruido. Para este trabajo se consideró que el valor 0.25 es el más adecuado.

Una vez determinados los valores óptimos para el filtrado y desenrollado de fase, fue posible realizar el procesamiento sobre la totalidad de las imágenes SAR, es decir, sin aplicar ningún corte.

En la figura (4.6) se muestra la fase cíclica filtrada con un pasa-bajos Gaussiano de longitud de onda de 200 metros. Este interferograma se muestra en coordenadas geodésicas, es decir que ya ha sido Geocodificado. Allí se puede apreciar el patrón mencionado anteriormente que se repite cada 2π y que, además, nos permite estimar de manera aproximada el valor de la deformación esperada. Para hacer esto, es fundamental conocer la banda en la que trabaja el satélite y, por ende, la longitud de onda del pulso emitido. En nuestro caso, utilizamos datos del satélite Sentinel-1A, que trabaja en banda C y posee una longitud de onda de aproximadamente 5.6cm. De esta manera, contando la cantidad de crestas presentes y multiplicando dicha cantidad por la longitud de onda, es posible obtener un estimativo del desplazamiento. De oeste a este se contabilizan alrededor de 35 crestas (siguiendo el color azul) lo cual representaría un valor de desplazamiento de 196 cm en tal dirección. Notar que no es posible con esta técnica, determinar con certeza la dirección.

En el interferograma enrollado se pueden apreciar dos cualidades más: Hacia el oeste en la región donde las imágenes abarcan parte del océano pacífico, el resultado del interferograma es un conjunto de píxeles incoherentes, esto se debe a que el radar no penetra en el agua, y por ende estaremos observando la superficie del agua del océano que será altamente variable, motivo por el cual no hay correlación alguna entre la superficie del océano medida durante la adquisición del 24 de agosto y la del 17 de septiembre. Esta región puramente ruidosa no debe ser considerada posteriormente en el desenrollado de fase, para lo cual se aplica una máscara. Hacia el este se observa otra región de ruido, se puede notar que no se encuentra absolutamente decorrelacionado como el caso del océano, pero si presenta un nivel de correlación mucho más pobre que la zona central. Esta decorrelación la atribuimos a dos factores, la topografía y la posible cobertura de nieve presente al momento de las adquisiciones. Si en la figura (4.7) seguimos cualitativamente el mapa topográfico graficado a partir del mismo Modelo Digital de Elevaciones utilizado para la construcción del interferograma, en escala de grises los colores más oscuros son valores de altura menores y los blancos son alturas mayores. En la región donde el interferograma presenta poca correlación es donde se intersecta con los valores de altura más elevados presentes en el área, y como fue discutido en la sección 1.3 las elevaciones del terreno producen distorsiones geométricas según el ángulo con el que observe el satélite, por este motivo entre las dos adquisiciones es posible que se observe un mismo punto de maneras diferentes por los efectos de acortamiento, inversión o sombra.

En tanto a la cobertura de nieve, es ampliamente conocido el hecho de que frente a la presencia de nieve el albedo se incrementa considerablemente, es decir, que la porción de

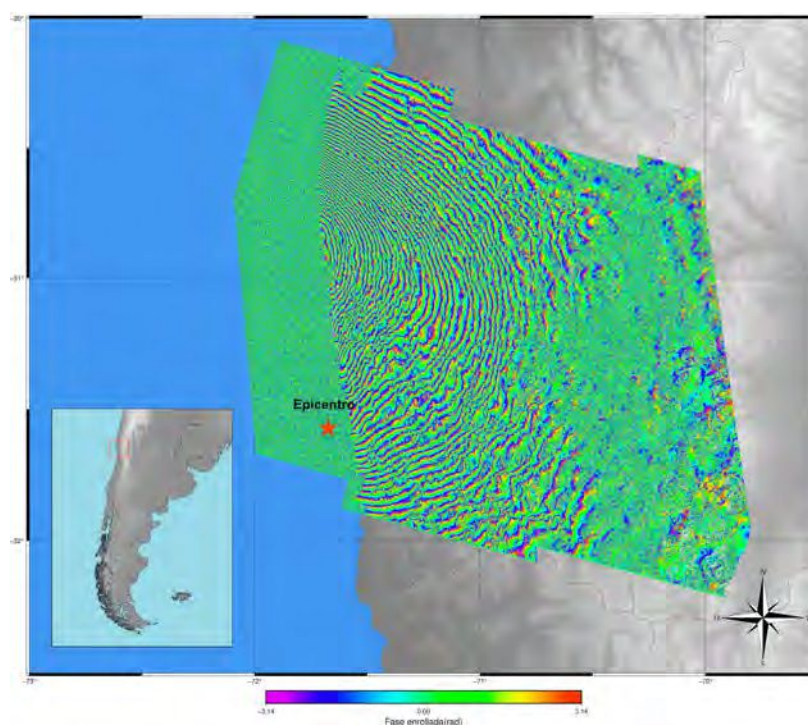


Figura 4.6. Mapa de la fase interferométrica enrollada en coordenadas longitud y latitud. La estrella roja marca la ubicación del epicentro del sismo de Illapel de 2015

energía del pulso electromagnético que se refleja al llegar a la superficie es mayor que cuando no hay nieve. Por este motivo es que si entre las dos adquisiciones del 24 de agosto y 17 de septiembre hubo un cambio considerable en la cantidad de nieve presente en las cumbres, esto se verá reflejado en un elevado grado de decorrelación de los puntos observados en la zona.

Cabe mencionar que existen otros efectos que pueden ocasionar este grado de decorrelación, no obstante, los dos mencionados son los que se consideraron como los más probables de explicar lo observado en este caso particular.

El filtro aplicado no ha hecho un buen trabajo en promediar los píxeles de esta región, lo cual era de esperarse ya que la longitud de onda fue escogida a partir de un corte sobre el área más cercana al epicentro del terremoto de aproximadamente 4600 km^2 (Figura 4.1), donde nos interesa medir la deformación sísmica.

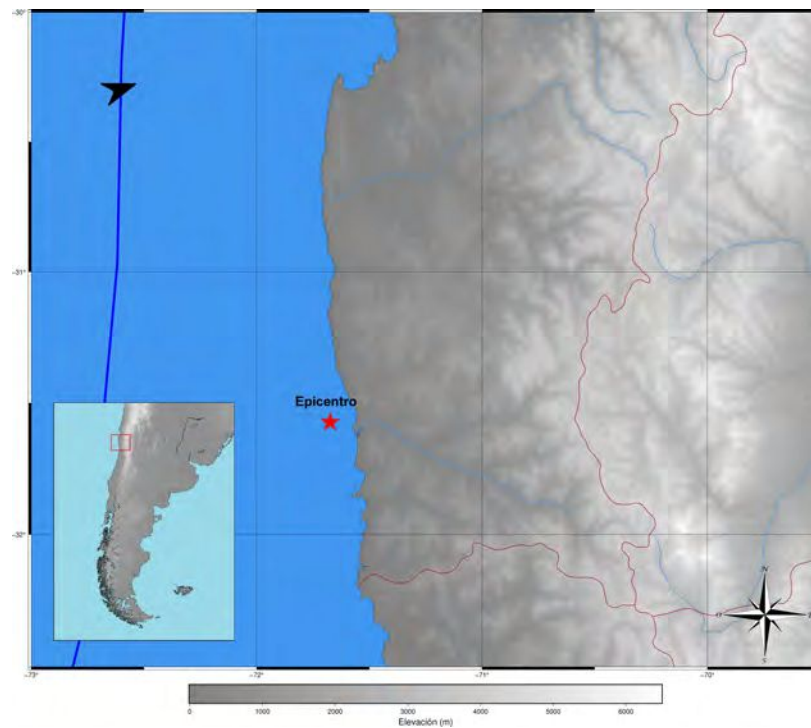


Figura 4.7. Mapa topográfico de la zona de estudio

El siguiente paso es el de realizar el desenrollado de fase. Esta es la etapa del procesamiento que más tiempo y recursos consume y que es fundamental realizar de forma correcta, ya que de no resolver el problema de la ambigüedad adecuadamente, los resultados obtenidos no aportarán información de interés al caso de estudio. Como ya fue mencionado el parámetro umbral para el código Snaphu utilizado fue de 0.25. En la figura (4.8) se muestra la fase desenrollada para toda la cobertura de las imágenes SAR en aquellos píxeles donde la coherencia es más elevada que 0.25.

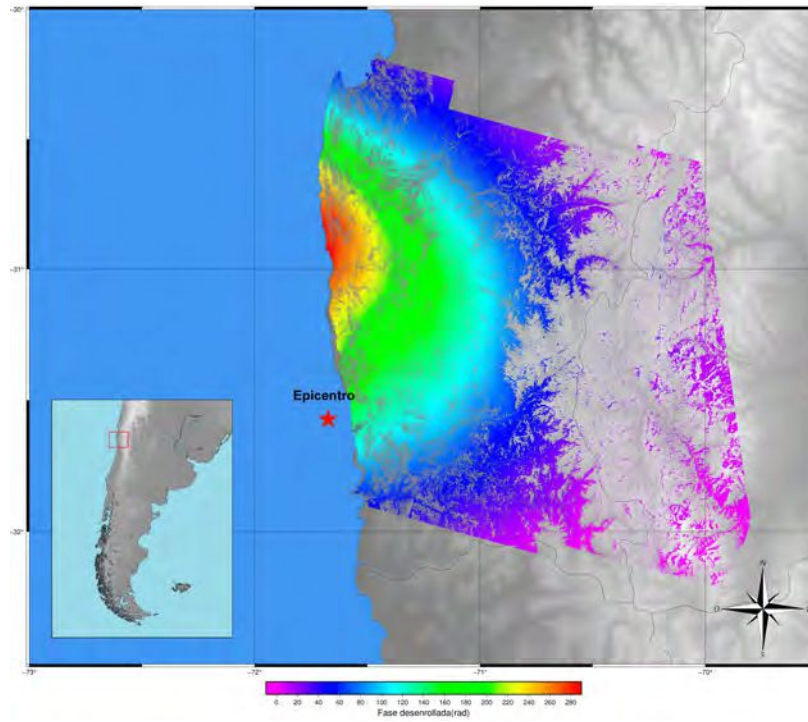


Figura 4.8. Mapa de la fase desenrollada en radianes

4.2. Productos finales

En esta sección se expondrán los productos finales del procesamiento interferométrico desarrollado a lo largo de todo el trabajo.

4.2.1. Desplazamiento en dirección de vista del radar

En la sección (1.8.3) hemos desarrollado el vínculo entre la fase de un interferograma con el desplazamiento del terreno en la dirección del rango, lo cual hemos denominado **Desplazamiento en dirección de vista del radar** o **Line Of Sight (LOS) displacement**. Dicho vínculo está dado por la siguiente ecuación:

$$\varphi_{desp} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{desp}, \quad (4.1)$$

donde φ_{desp} es la componente de la fase asociada al desplazamiento del terreno, λ es la longitud de onda del sistema SAR y Δr_{desp} es lo que queremos determinar, es decir, el desplazamiento en dirección de vista del radar. Si el procesamiento interferométrico se realizó de manera adecuada, es decir que fue posible resolver la ambigüedad entera en la fase, que la componente topográfica de la fase se removi6 del dato y que el ruido troposférico e ionosférico contribuye con magnitudes poco significativas respecto a la contribución de la deformación producida por el terremoto, entonces podemos decir que la fase desenrollada de la figura (4.8) se corresponde en su totalidad a la fase interferométrica producto del desplazamiento del terreno, es decir a φ_{desp} en la ecuación 1.16. Por lo tanto, a partir de un conjunto de sentencias del programa Generic Mapping Tools (GMT) y utilizando la ya conocida longitud de onda de Sentinel-1A ($\lambda = 5,6cm$) fue posible obtener el mapa del desplazamiento en

dirección de vista del radar como se muestra en la figura (4.9).

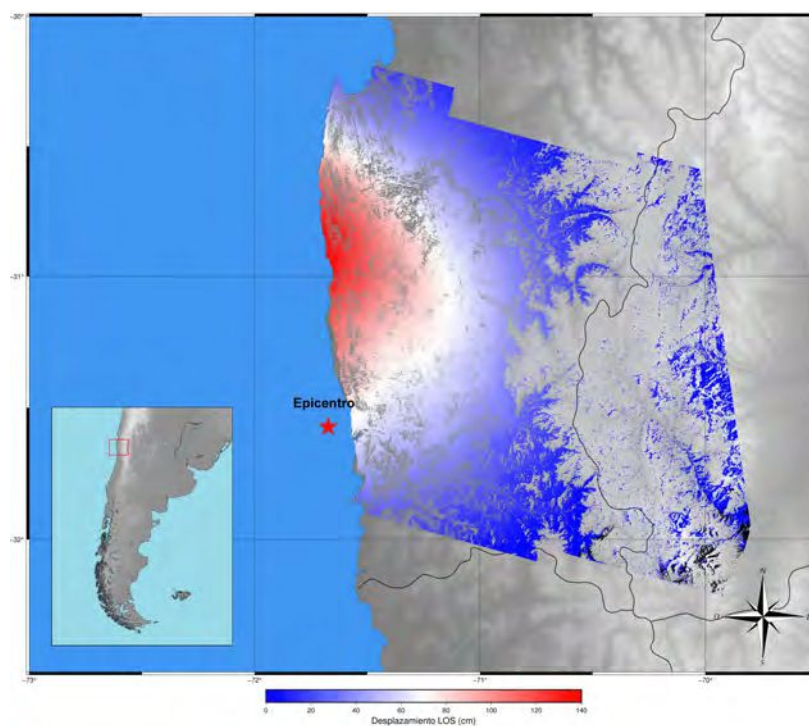


Figura 4.9. Mapa del desplazamiento en dirección de vista del radar en centímetros. La estrella indica el epicentro del terremoto.

En la figura (4.9) se observa a grandes rasgos un patrón de deformación semicircular, este patrón es característico de los terremotos de subducción en Chile [23]. Los desplazamientos medidos son en su mayoría positivos, midiéndose un máximo de 138.5 cm y un valor mínimo de -4.5 cm. Los valores positivos indican un incremento de la distancia en la dirección del rango, lo que se traduce en un apartamiento de la superficie respecto al camino del satélite, mientras que los negativos indican un decrecimiento en la distancia, por lo tanto, un acercamiento. No obstante, es importante destacar que solo con esta información no es posible determinar con certeza la dirección exacta de los desplazamientos, y por lo tanto no podemos descomponer la deformación cortical sísmica en las tres componentes que generalmente se estudian: norte, este y vertical. Para lograr este último objetivo es necesario incluir más información, y para ello existen varias opciones:

- Incluir información externa sobre el terremoto y la deformación asociada.
- Disponer de otros pares interferométricos de la zona con otras geometrías de adquisición. Por ejemplo pares ascendentes y descendentes.
- Utilizar mediciones de la deformación obtenidas con otra técnica geodésica.
- Conocer con exactitud la geometría de adquisición sobre cada punto de la imagen y resolver el problema inverso.

Algunas de ellas brindarán resultados más exactos que otras a expensas de incrementarse la complejidad de su aplicación.

4.2.2. Deformación cortical

Para cumplir con el objetivo de mapear la deformación en este trabajo comenzamos analizando información externa respecto al sismo, sus réplicas, orientación, la geometría de la falla y el mecanismo focal que le dio origen. Acorde a lo determinado por el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) el terremoto de Illapel de 2015 fue generado por una falla inversa sub-horizontal de rumbo 6° norte. El mecanismo focal del evento principal se muestra en la figura (4.10). Además, los mecanismos de foco del sismo principal y sus réplicas más importantes son consistentes con el desplazamiento de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana [4]. Sobre la falla en sí, estimaciones preliminares indicaron que la longitud de ruptura alcanzó unos 200-250 km con un desplazamiento máximo de alrededor de 8 m.

Cuatro réplicas importantes tuvieron lugar entre los 5 minutos y 3 horas de ocurrido el evento principal, siendo la más importante de magnitud 7.1 Mw, es decir que sucedieron dentro del intervalo temporal de adquisición de las imágenes SAR utilizadas en el procesamiento interferométrico. En la figura (4.11) se muestran los mecanismos focales de las réplicas principales asociadas a nuestro caso de estudio, se puede observar que todos son consistentes con la geometría de falla del sismo principal y con la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Conocer esta información de antemano es fundamental en este tipo de estudios, porque si bien no nos permite descomponer el mapa de la figura (4.9) en sus componentes este, norte y vertical, sí nos da una idea de la deformación que esperamos encontrar con interferometría. En nuestro caso, por ejemplo, las características de la falla que originaron el terremoto, sumado al conocimiento previo sobre el marco tectónico, nos permite asumir que la mayor componente de la deformación será en dirección de este a oeste.

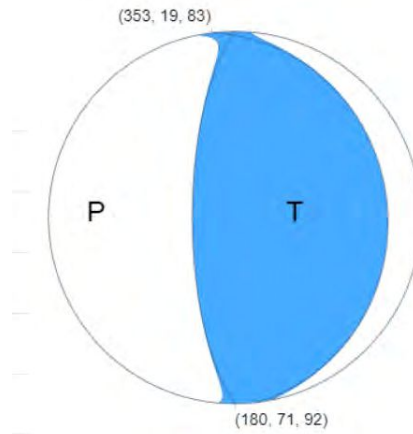


Figura 4.10. Mecanismo focal del evento principal

La segunda estrategia consiste en combinar datos obtenidos con distintas geometrías de adquisición, definidas por el ángulo de incidencia y la orientación de la dirección de vuelo del satélite, que por lo general, para la mayoría de los sistemas SAR es de -15° (dirección de vuelo NNW) para pasadas ascendentes y de -165° (dirección de vuelo SSW) para pasadas descendentes [13]. Una combinación adecuada de los interferogramas construidos usando pasadas ascendentes y descendentes permite descomponer el desplazamiento unidimensional (LOS) en sus componentes de deformación horizontal y vertical.

Los resultados mostrados hasta el momento en la figura (4.9) fueron contruidos a partir de pasadas descendentes. Siguiendo el mismo procedimiento se planteó la construcción del interferograma a partir de dos adquisiciones con pasadas ascendentes del satélite Sentinel-1A. Siendo la primera adquisición tomada el 26 de agosto de 2015 y la segunda el 19 de septiembre de 2015. No obstante, los resultados obtenidos con tal interferograma no fueron satisfactorios. Los valores del desplazamiento en la dirección de vista del radar obtenidos, no fueron representativos de los desplazamientos que se esperaban encontrar, sobre todo al compararlo con otros trabajos realizados sobre la zona, como por ejemplo el trabajo de [18]. Por este motivo se optó por no utilizar este par interferométrico y en su lugar, hacer uso de información de estaciones GNSS distribuidas en la región de estudio, de manera tal que nos permita obtener resultados más concluyentes sobre las componentes de la deformación superficial.

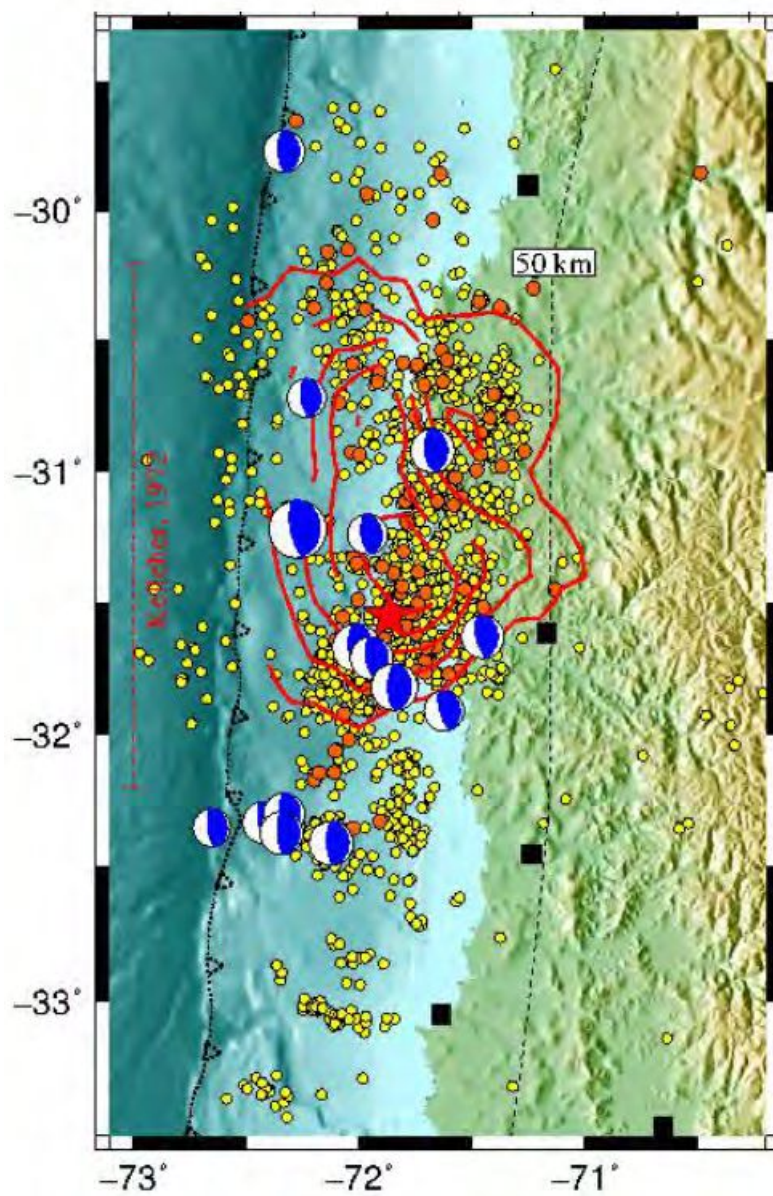


Figura 4.11. Mecanismos focales de las réplicas principales. (Figura extraída de Barrientos S., 2015) [\[4\]](#)

Capítulo 5

Validación

En el presente capítulo se incluyen datos de estaciones GNSS para validar de manera externa los resultados obtenidos con Interferometría Diferencial SAR.

5.1. Análisis a partir de datos GNSS

Se realizó un análisis de la deformación cortical sísmica a partir de las variaciones temporales de las coordenadas de tres estaciones GNSS distribuidas en la zona de estudio. Si bien los datos obtenidos con esta técnica son de un solo punto (o en nuestro caso tres, uno por cada estación), las mediciones se realizan con un intervalo de muestreo diario y por lo tanto mucho menor al tiempo entre dos adquisiciones del sistema SAR, que fue de 24 días.

Las tres estaciones de las que se obtuvieron coordenadas fueron de la estación Salamanca (SLMC), estación Coquimbo (PFRJ) y estación Ovalle (BN17). Los datos GNSS crudos fueron procesados por el NGL (Nevada Geodetic Laboratory) mediante la estrategia PPP (Precise Point Positioning) utilizando los mejores modelos (de troposfera, de carga, etc.) y los productos geodésicos (efemérides, correcciones de relojes de satélite, etc.) para obtener un resultado muy preciso [5]. Estos datos se encuentran referenciados al marco IGS14.

En las siguientes Figuras 5.1 a 5.3 se muestran las series temporales de las tres componentes en coordenadas locales norte, este y vertical para cada una de las estaciones, para el período donde ocurrió el terremoto de Illapel 2015. De esta manera podemos observar los desplazamientos que causó el evento principal sobre cada una de ellas.

La estación de Coquimbo (PFRJ) de coordenadas $30^{\circ},675$ sur y $71^{\circ},635$ oeste, es la más cercana al epicentro del terremoto y por lo tanto en ella se observaron mayores desplazamientos, llegando a un máximo de -132 cm en su componente este.

En la Tabla (5.1) se muestran los desplazamientos medidos en cada componente para cada estación, en el momento en que tuvo lugar el evento sísmico.

Estación	Este [cm]	Norte [cm]	Vertical [cm]
SLMC	-41.6	16.3	-10
PFRJ	-132	-27.4	-33.1
BN17	-75.26	-27.7	-27.56

Tabla 5.1. Movimientos medidos con GNSS

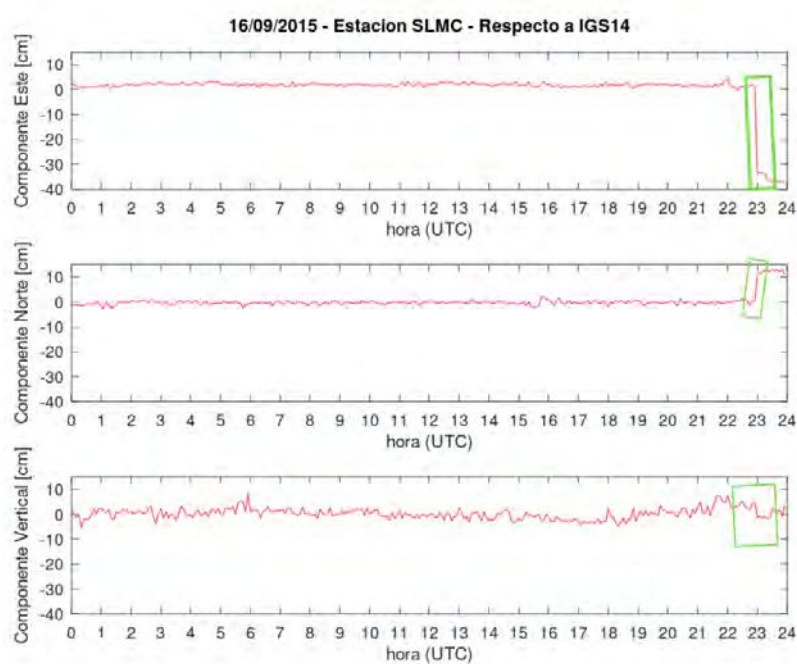


Figura 5.1. Mediciones con GNSS en la estación Salamanca durante el día en que ocurrió el terremoto. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.

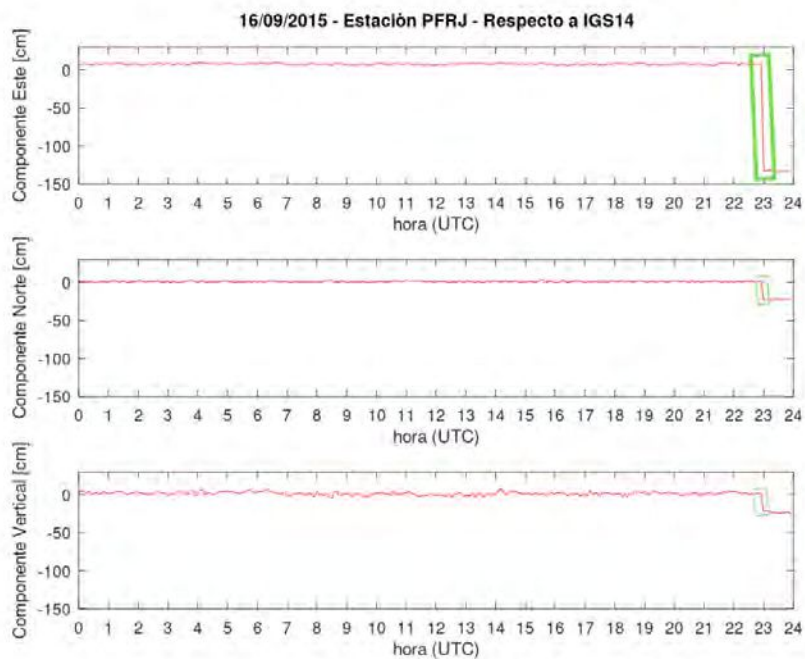


Figura 5.2. Mediciones con GNSS en la estación Coquimbo. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.

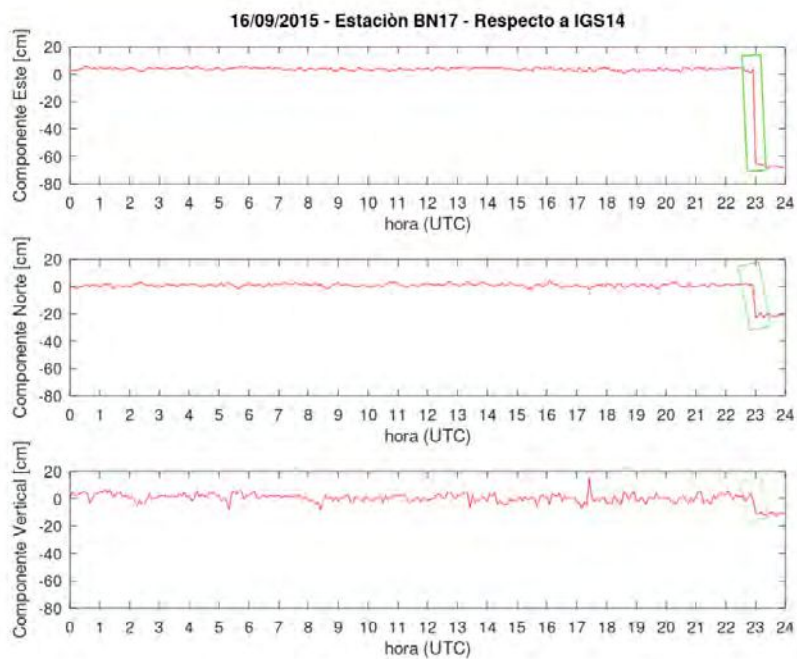


Figura 5.3. Mediciones con GNSS en la estación Ovalle. Con verde se indican los desplazamientos que generó el evento principal en cada componente.

Se observa una gran similitud entre los resultados obtenidos con DInSAR y con GNSS. Nótese que las dos técnicas son absolutamente independientes y por lo tanto los resultados obtenidos mediante GNSS nos sirven para validar lo obtenido previamente con las imágenes SAR. En la sección anterior, habíamos supuesto que la mayor componente de la deformación estaría contenida en el plano horizontal y sería en dirección de este a oeste, con los resultados de GNSS podemos estar seguros de que esto es cierto y limitar nuestro estudio a esa componente de la deformación.

La figura (5.4) muestra conjuntamente las deformaciones en la componente este de las tres estaciones.

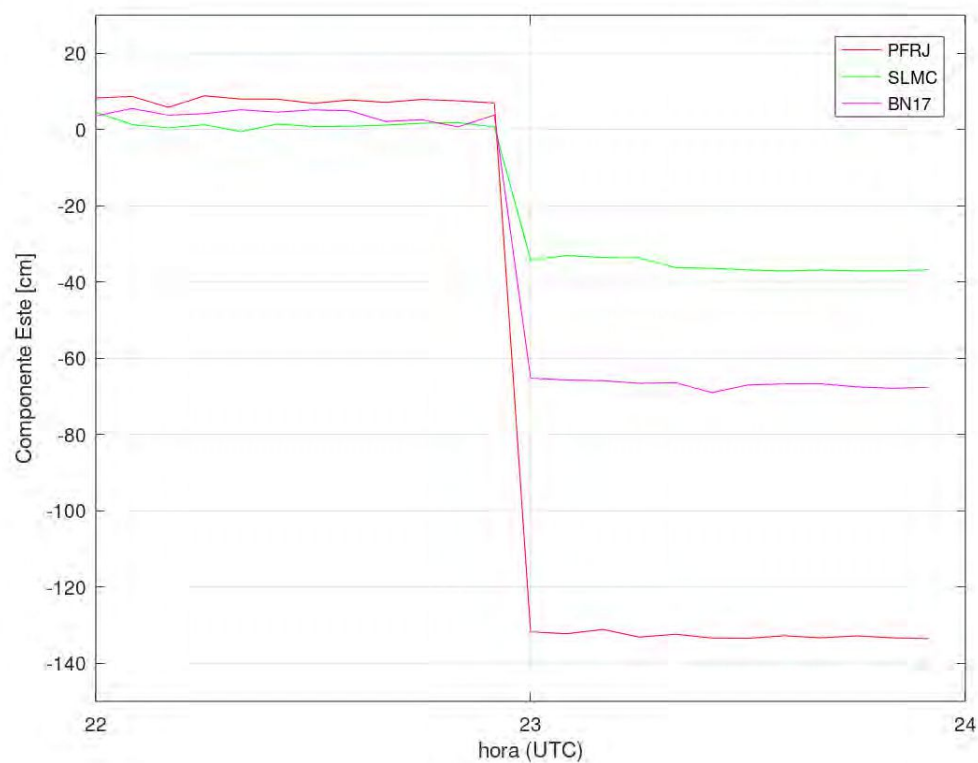


Figura 5.4. Componente este en las tres estaciones GNSS

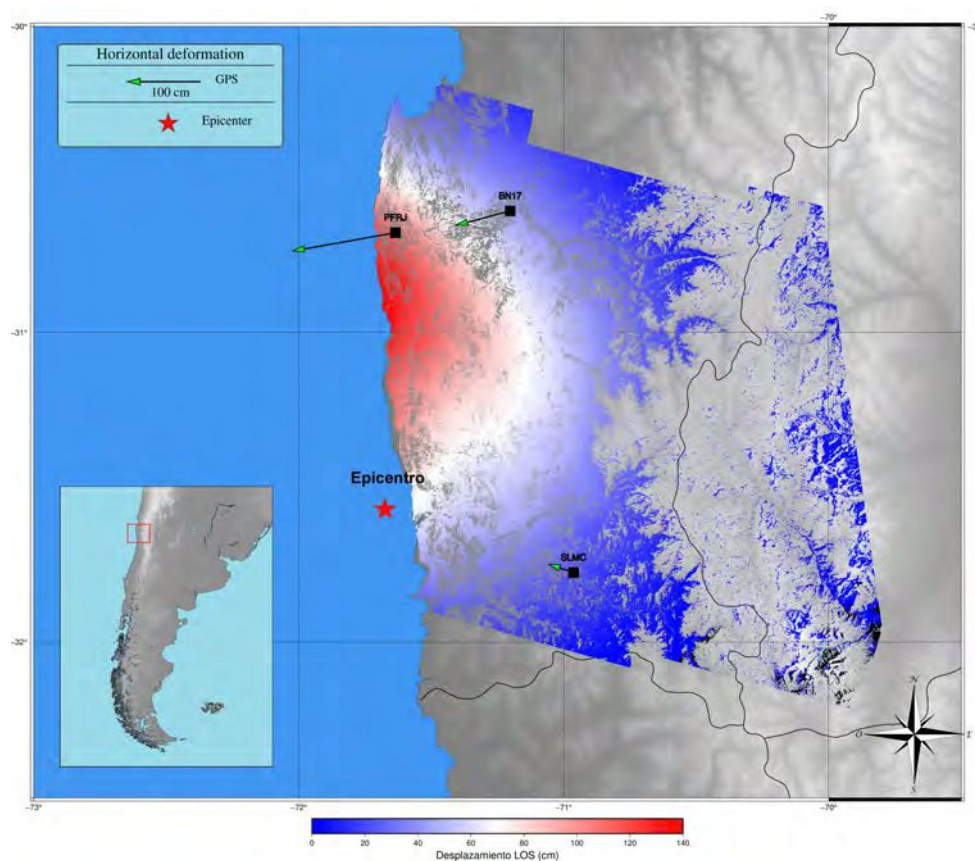


Figura 5.5. Deformaciones medidas con DInSAR y con GNSS. Las flechas indican la magnitud del desplazamiento.

A partir del análisis realizado, podemos afirmar que los desplazamientos observados en la figura (5.5) son predominantemente en dirección oeste, de manera tal que este mapa es un buen estimativo de las deformaciones corticales superficiales causadas por el terremoto de Illapel de 2015 de magnitud 8.3 Mw.

La figura (5.5) muestra ambos resultados en conjunto, con DInSAR y con GNSS, donde las flechas indican el desplazamiento horizontal medido en cada estación.

Capítulo 6

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se ha probado la utilidad del procesamiento interferométrico para la observación y análisis de la deformación superficial instantánea causada por la liberación de esfuerzos del terremoto de Illapel de 2015 en las regiones circundantes al epicentro del evento principal.

La técnica DInSAR mostró ser una herramienta eficiente para detectar deformaciones superficiales arrojando resultados con buena densidad y resolución en una región de aproximadamente 20000 km^2 . Si se quisiera tener observaciones *in-situ* para determinar dicha deformación con la técnica GNSS se debería instalar y mantener permanentemente un denso conjunto de receptores de medición continua; con las dificultades logísticas y económicas que esto implica.

El fácil acceso a los datos del satélite Sentinel-1A, gracias al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), sumado a la amplia cobertura espacial y al veloz período de revisita del satélite la convierten en una herramienta con gran potencialidad para el monitoreo y control de fenómenos naturales y humanos.

La técnica GNSS es una herramienta independiente y robusta que permite la validación externa de los resultados interferométricos, convirtiéndola en el complemento ideal para la técnica de interferometría diferencial SAR en aplicaciones de monitoreo de deformaciones superficiales.

Se probó la utilidad de GMTSAR para el procesamiento de datos Sentinel en una aplicación de análisis de deformación sísmica.

La vinculación GMTSAR con GMT facilita la visualización y el posterior análisis, así como la presentación gráfica final de los resultados en forma de mapas.

Este trabajo se circunscribió a un caso puntual de deformación cortical debido a causas sísmológicas. Sin embargo la técnica podría ser aplicada en otras situaciones como el monitoreo de la deformación de la superficie terrestre asociado a causas naturales como los fenómenos volcánicos, glaciológicos o geotérmicos, así como también a deformaciones producidas por causas antropogénicas como deslizamiento de grandes volúmenes de tierra o subsidencias por extracción de aguas subterráneas o hidrocarburos.

Apéndice A

Agradecimientos

- A mis directores, Sebastián Balbarani y Mauricio Gende, por su paciencia y constante guía.
- Al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) por permitir el gratuito y fácil acceso a los datos SAR utilizados en este trabajo.
- A la Beca de grado del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN).

A.1. Software utilizado

- GMT 6: Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- GMTSAR - Sandwell, D. ., R. . Mellors, X. Tong, M. Wei, and P. Wessel (2011), Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *Eos Trans. AGU*, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.
Sandwell, David, Mellors, Rob, Tong, Xiaopeng, Wei, Matt, Wessel, Paul. (2011). GM-TSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/8zq2c02m>

A.2. Imágenes Sentinel-1

- Copernicus Sentinel data 2015. Retrieved from ASF DAAC, processed by ESA.

Bibliografía

- [1] Bamler, R. & Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. (IOP Publishing,1998,8), <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
- [2] Bamler, R. & Schättler, B. SAR Data Acquisition and Image Formation. *Geocoding: ERS-1 SAR Data And Systems*, Wichmann-Verlag. pp. 53-102 (1993), <https://elib.dlr.de/23584/>, LIDO-Berichtsjahr=1993, pages=50
- [3] Barrientos, S. & Ward, S. The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation. (Oxford University Press (OUP),1990,12)
- [4] Barrientos, S. Informe técnico Terremoto Illapel 16 de septiembre 2015.. (2015)
- [5] Blewitt, G., Hammond, W. & Kreemer, C. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. (American Geophysical Union (AGU),2018,9)
- [6] Chen, C. & Zebker, H. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. (The Optical Society,2000,3)
- [7] Costantini, M. A phase unwrapping method based on network programming. *ERS SAR Interferometry*. **406** pp. 261 (1997)
- [8] Costantini, M. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. **36**, 813-821 (1998)
- [9] Cisternas, M., Atwater, B., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T. & Others Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*. **437**, 404-407 (2005)
- [10] Curlander, J. & McDonough, R. Synthetic aperture radar. (Wiley, New York,1991)
- [11] DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S. Current plate motions. *Oxford University Press (OUP)*. p. 425-478 (1990)
- [12] Flynn, T. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *JOSA A*. **14**, 2692-2701 (1997)
- [13] Fuhrmann, T.; Garthwaite, M.C. Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. *Remote Sens.* 2019, 11, 241. <https://doi.org/10.3390/rs11030241>
- [14] Ghiglia, D. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *J. Opt. Soc. Am., A*. **13**, 1999-2013 (1996)
- [15] Ghiglia, D., Romero, L. Minimum L_p -Norm two-dimensional phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am., A*. **13** (1996)

- [16] Goldstein, R. & Werner, C. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*. **25**, 4035-4038 (1998)
- [17] Goldstein, R., Zebker, H. & Werner, C. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. **23**, 713-720 (1988)
- [18] Grandin, R., Klein, E., Métois, M. & Vigny, C. Three-dimensional displacement field of the 2015Mw8.3 Illapel earthquake (Chile) from across- and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. (American Geophysical Union (AGU),2016,3)
- [19] Hanssen, R. Radar interferometry : data interpretation and error analysis. (2001)
- [20] Henderson, F. & Lewis, A. Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing: Third edition, Volume 2. (1998,12), <https://www.osti.gov/biblio/293027>
- [21] Kellogg, O. Foundations of potential theory, frederick ungar publ. Co., New York. pp. 121 (1929)
- [22] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. & Papathanassiou, K. A tutorial on synthetic aperture radar. (Institute of Electrical,2013,3)
- [23] Pritchard, M., Ji, C. Simons, M. Distribution of slip from 11Mw 6 earthquakes in the northern Chile subduction zone. (American Geophysical Union (AGU),2006,10)
- [24] Pritt, M. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. **34**, 728-738 (1996)
- [25] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. & Wessel, P. Open radar interferometry software for mapping surface Deformation. (American Geophysical Union (AGU),2011,7)
- [26] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. & Wessel, P. Gmtsar: An insar processing system based on generic mapping tools. (2011)
- [27] Schwfibisch, M. & Die, S. Interferometrie zur Erzeugung Digitaler Gelaendemodelle. *DLR-Forschungsbericht, Oberpf-faffenhofen, Germany*. (1995)
- [28] Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., Ruegg, J., Métois, M., Madariaga, R., Morvan, S., Lancieri, M., Lacassin, R., Campos, J. & Others The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of central Chile, monitored by GPS. *Science*. **332**, 1417-1421 (2011)
- [29] Watt, S., Pyle, D. & Mather, T. The influence of great earthquakes on volcanic eruption rate along the Chilean subduction zone. *Earth And Planetary Science Letters*. **277**, 399-407 (2009)
- [30] Wiley, C. Pulsed Doppler radar methods and apparatus. *US. Patent*. **3** (1954)
- [31] Zhang, Y., Zhang, G., Hetland, E., Shan, X., Wen, S. & Zuo, R. Coseismic Fault Slip of the September 16, 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake Estimated from InSAR Data. (Springer Science,2016,3)
- [32] Zhou, X., Chang, N. & Li, S. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. (MDPI AG,2009,3)