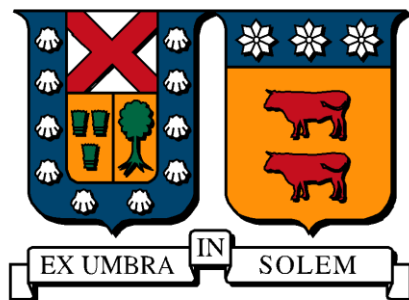




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
ACADEMIA DE CIENCIAS AERONÁUTICAS

INTERFEROMETRÍA RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (InSAR)
APLICADA AL ESTUDIO DEL MOVIMIENTO EN LADERAS ALEDAÑAS AL
VOLCAN CALBUCO CON AYUDA DE IMÁGENES SENTINEL-1A

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EN AVIACIÓN
COMERCIAL

AUTOR
DAVID EMMANUEL HERMOSILLA DIAZ

PROFESOR GUÍA: ROXANA TRUJILLO
PROFESOR CORREFERENTE: RODRIGO SUAREZ
PROFESOR CORREFERENTE: MARCELO DURAN

SANTIAGO, 2016

AGRADECIMIENTOS

“¡Oh Dios, Señor nuestro, cuán glorioso es tu nombre en toda la tierra! Has puesto tu gloria sobre los cielos... Cuando veo los cielos, obra de tus dedos, la luna y las estrellas que tú formaste, digo: ¿Qué es el hombre, para que tengas de él memoria, y el hijo del hombre para que lo visites?”

(Salmo 8)

Agradecido de Dios, por concederme la sabiduría y el entendimiento a lo largo de todo este tiempo.

A mis padres, hermanos y mi novia, por el apoyo incondicional brindado durante todo el proceso universitario.

A mis amigos en la universidad, por hacer de todos estos años una experiencia grata e inolvidable.

A mi profesora guía, por introducirme en el asombroso mundo de los sensores remotos y sus innumerables aplicaciones. A mis profesores correferentes por su apoyo e interés en la investigación.

RESUMEN EJECUTIVO

Las aplicaciones que los científicos han podido desarrollar mediante el uso de Sensores Remotos para el beneficio de la humanidad y su comprensión del mundo en el que habita, son cada vez mayores. En los últimos 50 años, gran cantidad de este conocimiento ha provenido directamente de sensores que orbitan el planeta a cientos de kilómetros, respondiendo interrogantes que en otras épocas hubiese sido imposible atender. Dentro de estos sensores, los llamados Satélites de Radar destacan del resto, al poseer la gran característica de poder obtener datos de la Tierra independientemente de las buenas condiciones meteorológicas o de la luz del día (hora de observación) en que se capturen los datos, razón por la cual sus imágenes gozan de una mayor disponibilidad e independencia que aquellos que dependen directamente de los factores mencionados.

Los Satélites de Radar poseen múltiples aplicaciones en diversas áreas temáticas, entre ellas una muy interesante y de gran potencial de desarrollo es la Vulcanología, en ella estos Sensores han ofrecido respuesta a uno de sus mayores desafíos, y que respecta al análisis y estudio del movimiento de la superficie del terreno en áreas cercanas a los volcanes; movimiento cuya razón se debe comúnmente a los flujos de lava subterráneos que anteceden y preceden un evento eruptivo.

En el presente trabajo de investigación, dos imágenes capturadas por el Satélite Radar Sentinel-1A serán procesadas y analizadas mediante la técnica de Interferometría Radar Diferencial (DInSAR) a través de un Software especializado (S1TBX), para describir y calcular, con precisión sub-métrica, el movimiento superficial descrito en las laderas del Volcán Calbuco durante el episodio eruptivo que tuvo lugar los días 22 y 23 de Abril del 2015 en la región de Los Lagos.

Finalmente el trabajo será concluido al diseñar una propuesta general de implementación de la técnica estudiada (DInSAR) en las redes de monitoreo nacional que realiza el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en conformidad de que ésta pueda ser integrada en un futuro a corto plazo a su flujo de trabajo preventivo como un aporte de la Teledetección Aeroespacial a la Seguridad y Desarrollo del País.

Palabras claves: SAR, DInSAR, Sentinel-1A, Erupciones volcánicas, Volcán Calbuco.

**Synthetic Aperture Radar (InSAR) applied to the study of movement
described by the hillsides of the Calbuco Volcano using Sentinel-1A images**

ABSTRACT

The applications that the scientists have developed through the use of Remotes Sensors to the benefit of humanity and its comprehension of the world where we live are greater. The last 50 years, most of this knowledge has come directly from de sensors orbiting it the planet to hundred kilometers. Through this knowledge has been possible to answer questions that in other decades would be impossible to get. Among these sensors, the Radar Sensors highlights in compared to the rest because have the unique characteristic of getting data from the Earth without depend on good weather or daylight (time of observation). For this reason its images could be used in terms of availability and independency than those that depend directly on mentioned factors.

Radar Satellites own so many applications in different areas; among them a very interested and potential one in terms of developing is the Volcanology. Through these Sensors have given answers to one of the main challenge bases on analysis and study of movements of the surface of lands in areas close to the volcanoes; movement which started mostly by fluids of underground lava that goes before and after an erupted event. In this research, two images captured by the Sentinel-1A Radar Satellite will be processed and analyzed through the Interferometry Differential Radar technique (DInSAR) using a specific software (S1TBX), in order to describe and calculate with sub-metric accuracy, the superficial movement described in the borders of Calbuco Volcano whose eruption took place on 22nd and 23rd of April in 2015 in Los Lagos City.

Finally the work will be conclude by the general proposal of implementation of the studied technique (DInSAR) in the monitoring national nets which are developed the National Geology and Mining Service (SERNAGEOMIN) in order that this could be include in the close future inside the prevented work as part of the Aerospace Teledetection to the Security and Developing of the country.

Key Words: SAR, DInSAR, 1A Sentinel, volcanic Eruptions, Calbuco Volcano.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación del tema	1
1.2 Área de estudio	3
1.3 Objetivos de tesis.....	5
1.4 Estructura de la tesis	6
1.5 Estado del arte	7
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 Radar de Apertura Sintética “Synthetic Aperture Radar-SAR”	9
2.1.1 Historia de SAR.....	9
2.1.2 Principios teóricos de SAR.....	11
2.1.3 Conceptos iniciales	13
2.1.4 Tipos de radiación.....	16
2.1.5 Resolución del Radar de Apertura Real y Apertura Sintética	17
2.1.6 Modos de Operación del Sentinel-1A.....	20
2.2 La imagen SAR	21
2.2.1 Componente Amplitud.....	22
2.2.2 Componente Fase.....	23
2.3 Interferometría Radar de Apertura Sintética (In-SAR)	24
2.3.1 Introducción a InSAR.....	24
2.3.2 Medición de Altitud de Superficie mediante Fase Interferométrica..	25
2.3.3 “Aplanamiento” del Interferograma	27
2.3.4 Altitud de Ambigüedad.....	27
2.3.5 Medición de Movimiento de Superficie: Interferometría	28
Diferencial (DInSAR)	
2.3.6 Imágenes de Deformación InSAR y su Interpretación	30
2.4 Naturaleza de los Volcanes.....	33
2.4.1 Volcanes y la Litósfera	33
2.4.2 Distribución de la actividad volcánica.....	33
2.4.3 Clasificación de las erupciones volcánicas.....	34
2.4.4 Peligros volcánicos asociados a una erupción	38

2.4.5	Peligros volcánicos registrados en Erupción del Calbuco 2015	39
2.4.6	Actividad volcánica previa registrada en la Erupción del Calbuco 2015	39
3.	METODOLOGÍA	40
4.	DESARROLLO	41
4.1	Localización del Volcán Calbuco.....	41
4.2	Descarga de par Interferométrico SAR	41
4.3	Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) y apertura de imágenes SAR	43
4.4	Corregistro	44
4.5	Deburst y Merge	45
4.6	Subset y fase interferométrica	46
4.7	Remoción de fase topográfica	47
4.8	Filtro de Goldstein	48
4.9	Corrección geométrica.....	49
4.10	Visualización en Google Earth.....	50
5.	INTEGRACIÓN DE DATOS Y RESULTADO	51
6.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	52
7.	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN	56
7.1	Lanzamiento del Sentinel-1B	60
8.	CONCLUSIONES FINALES.....	61
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
10.	ANEXOS	71
9.1	Modos de Adquisición del satélite Sentinel-1A	71
9.2	Información técnica-operacional del satélite Sentinel-1A.....	72
9.3	Nomenclatura de los productos Sentinel-1A	72
9.4	Ceniza volcánica desde vista satelital-óptica del volcán Calbuco.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista del volcán Calbuco en sentido Nor-Este. Fuente: Google Earth.....	3
Figura 2: Mapa base de área de estudio. Volcán ubicado en la provincia de Llanquihue, en la región de Los Lagos. Fuente: Google Maps	4
Figura 3: Red de Vigilancia Volcán Calbuco. Fuente: SERNAGEOMIN	8
Figura 4: Seasat 1, primer satélite con tecnología SAR. Fuente: NASA.....	10
Figura 5: Ilustración del viaje Ascendente y Descendente que el satélite describe en su órbita polar. Fuente: TRE, Sensing the Planet.	11
Figura 6: Pulso electromagnético emitido, retro-dispersado y capturado por la antena SAR. Fuente: Centre for Remote Imagin, Sensing & Processing (CRISP)	12
Figura 7: Cono de observación en expansión sintetizado. Fuente: Christian Wolff.....	13
Figura 8: Direcciones del movimiento del sensor y direcciones del haz emitido. Fuente: Traducido desde tesis de Felipe Geremia Nievinski.....	14
Figura 9: Ángulos de trabajo. Fuente: Traducido desde tesis de Felipe Geremia Nievinski	15
Figura 10: Comparación de profundidad de penetración entre bandas X, C y L en vegetación. Fuente: DLR	16
Figura 11: Ilustración de Longitud de antena Sintetizada, longitud física de antena, distancia sensor-objetivo y ancho de haz. Fuente: Elaboración propia desde trabajo de Carlos López, 2015.	19
Figura 12: Modos de operación de Sentinel-1A. Fuente: ESA.....	21
Figura 13: Imagen de alta resolución SAR tomada por el satélite TerraSAR-X. Fuente: Universität Siegen.....	22
Figura 14: Función sinusoidal $\sin \phi$ de la señal transmitida con periodo 2π radianes. Fuente: ESA	23
Figura 15: Representación de variación de fase interferométrica entre dos pixeles Vecinos. Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes.....	25
Figura 16: Diferencias de interferogramas generados por ALOS PALSAR y Envisat SAR en el volcán Kilauea. Fuente: Zhong Lu, USGS.....	31
Figura 17: Representación visual de interferograma y su interpretación. Fuente: Zhong Lu, Daniel Dzurisin.	32

Figura 18: Cinturón de fuego del Pacífico. Fuente: Infobae	.34
Figura 19: Tipos de erupciones volcánicas. Fuente: García Mora, 2014.....	.39
Figura 20: Diagrama de flujo con metodología a seguir. Fuente: Elaboración propia ..	.40
Figura 21: Localización del Volcán. Fuente: Sentinel Hub, ESA.....	.41
Figura 22: Ingreso de parámetros de búsqueda. Fuente: Sentinel Hub, ESA.	.42
Figura 23: Búsqueda y descarga de par interferométrico. Fuente: Sentinel Hub, ESA .	.42
Figura 24: Interfaz S1TBX que muestra imagen SAR contenedora de las laderas del V.Calbuco IW1. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX	.43
Figura 25: Corregistro de imágenes SAR sub-swath 1 de 14 Abril 2015. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.	.44
Figura 26: Deburst aplicado a subswath IW1 del 14 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.	.45
Figura 27: Unión Merge aplicado a subswaths IW1 e IW2 del 14 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.	.45
Figura 28: Fase interferométrica en bruto entre 14 y 26 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX	.46
Figura 29: Fase interferométrica con fase topográfica removida. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX	.47
Figura 30: Filtro de Goldstein aplicado a interferograma. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX	.48
Figura 31: Interferograma georreferenciado en UTM GWS84. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX	.49
Figura 32: Interferograma visualizado en Google Earth. Fuente: Elaboración propia desde Google Earth	.50
Figura 33: Interferograma realizado por CEOS Project de la erupción del Calbuco en Abril de 2015. Fuente: CEOS Pilot Project	.55
Figura 34: Diagrama de implementación de Interferometría en monitoreo Volcánico. Fuente: Elaboración propia	.59
Figura 35: Esquema de nomenclatura de imágenes Sentinel-1A. Fuente: Elaboración propia.....	.72
Figura 36: Vista satelital desplazamiento ceniza volcánica de Calbuco. Fuente: C13..	.73

ÍNDICE DE TABLAS

-Tabla 1: Principales bandas del espectro de Microondas

Fuente: Elaboración propia..... .16

-Tabla 2: Índice Explosivo Volcánico (VEI)

Fuente: Siebert, Simkin & Kimberly, 2010 35

-Tabla 3: Principales diferencias entre sistemas InSAR, GPS e Inclínómetros.

Fuente: Elaboración propia desde GSI 53

-Tabla 4: Modos de Adquisición del satélite Sentinel-1A

Fuente: ESA..... .71

-Tabla 5: Información técnica-operacional del satélite Sentinel-1A

Fuente: ESA..... .72

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del Tema

La historia del primer satélite espacial artificial girando a cientos de kilómetros de la superficie terrestre nació en pleno periodo de Guerra Fría, en los países donde la ciencia y la tecnología fueron cruciales para sostenerse en pie de guerra, y aunque en un principio lo único que justificaba la invención de estos artefactos era evidenciar una superioridad armamentística, es imposible negar que la humanidad entera se vio beneficiada con estas creaciones, las cuales no solo significaron un gran avance tecnológico en la historia humana, sino también la conquista de un lugar en el espacio exterior sin precedentes. Gran parte de esta maquinaria fue desarrollada en una frenética competencia bajo el alero de las llamadas Inteligencias de Combate, el cual dio inicio al mundo de los Sensores Remotos.

Por definición, se puede decir que los Sensores Remotos encierran un conjunto de técnicas, que elaboradas por los científicos y llevadas a cabo por instrumentos, son utilizadas para la adquisición de datos e informaciones del mundo físico a partir de la detección y medición de señales en forma de radiación, partículas y campos emanados de objetos localizados en el rango de visión de un sensor (Short, 2009). Estos sensores se pueden dividir en dos clases: pasivos y activos. Los primeros son aquellos que reciben su energía irradiada proveniente de una fuente externa, como el Sol, mientras que los activos son aquellos que son capaces de generar su propia energía irradiándola hacia el exterior, captando y midiendo posteriormente una fracción de esta señal; capacidad que les permite trabajar aun en la oscuridad de la noche. Estos últimos pertenecen a la familia de los sensores Radar (Radio Detection and Ranging), desarrollada a tal grado en las últimas dos décadas, que se desprendió toda una nueva línea de Radares, conocida bajo el nombre de “Radares de Apertura Sintética” (SAR - Synthetic Aperture Radar), la cual gracias a su configuración particular, permite la creación de imágenes tridimensionales que detallan la superficie terrestre con un alto nivel de resolución, prescindiendo de antenas de gran tamaño. Esta tecnología también se destaca por la gran capacidad que posee para atravesar nubes y toda clase de condiciones meteorológicas,

haciéndola inmune a las lluvias, nevadas, cenizas y vientos, al trabajar con radiaciones pertenecientes al espectro electromagnético de las microondas.

En el presente trabajo se trata con una de las más recientes técnicas que se vale de la tecnología SAR, la llamada Interferometría SAR (o InSAR), capaz de medir diferencias de altura en el mismo pixel entre dos imágenes distintas capturadas en distintas fechas y desde posiciones cercanas, generando un sinnúmero de aplicaciones en beneficio de toda la humanidad. Una de estas aplicaciones, se relaciona con el estudio del movimiento de masas en laderas volcánicas provocados por actividades magmáticas debajo del volcán. En este sentido, al ser Chile el país con la mayor actividad volcánica en el continente, abarcando cerca de tres mil volcanes a lo largo de toda la Cordillera de los Andes, con quinientos de ellos considerados geológicamente activos y sesenta con registro eruptivo histórico dentro de los últimos cuatrocientos cincuenta años (EMOL), se requiere con suma urgencia la implementación de esta tecnología.

Bajo este panorama, los estudios capaces de analizar el comportamiento superficial que describe una actividad volcánica, resultan cada vez más atingentes a la realidad que Chile experimenta y muy probablemente, lo seguirá haciendo. El SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), siendo actualmente el principal organismo estatal encargado de estudiar el comportamiento de los volcanes en Chile, se haya al debe con este tipo de tecnologías, mostrando una clara desventaja al compararse con países desarrollados que se han visto beneficiados con las imágenes proporcionadas en forma remota mediante Radares en plataformas espaciales y su debido procesamiento.

La presente investigación se limita a las laderas del volcán Calbuco, ubicado en la región de Los Lagos en la provincia de Llanquihue, el cual presentó su última actividad volcánica en Abril del 2015. Los datos espaciales pre- y post-erupción de este volcán se encuentran almacenados en la base de datos de la ESA (European Space Agency) y fueron capturados por el satélite lanzado en Abril del 2014 llamado Sentinel-1A.

1.2 Área de Estudio

El estudio se focaliza en las laderas y proximidades del volcán Calbuco ($41^{\circ}20'S - 72^{\circ}37'W$). Éste se encuentra ubicado en la provincia de Llanquihue perteneciente a la región de Los Lagos, en la comuna de Puerto Varas y Puerto Montt (Figura 1 y 2). El macizo se encuentra localizado dentro de las estribaciones más australes de la cordillera de Los Andes, acompañado a pocos kilómetros de otros prominentes volcanes como lo es el volcán Osorno, el Puntagudo y el Puyehue, en donde los pueblos más cercanos son Ensenada, Correntoso y Alerce (SERNAGEOMIN, 2016). El volcán se ubica en cuarto lugar de acuerdo al Índice de Riesgo Específico, antecedido por el Villarrica, el Llaima y el Chaitén, los cuales registraron recientes episodios volcánicos en la última década.



Figura 1: Vista del volcán Calbuco en sentido Nor-Este. Fuente: Google Earth.

El edificio volcánico del macizo ha sido descrito como un cono truncado de perfil irregular, cuya cima presenta glaciares pequeños la mayor parte del año que se pronuncian aún más durante la etapa invernal. Los estudios indican que la formación del volcán ha tomado lugar durante los últimos 300 mil años, en donde hacia fines del último periodo glacial (14.500 años), parte del edificio colapsó hacia el Norte. Su historia durante la última era incluye numerosas erupciones del tipo Plinianas y Subplinianas, en donde se desprendieron flujos piroclásticos que se extendieron más de 40 Km al Oeste (SERNAGEOMIN).

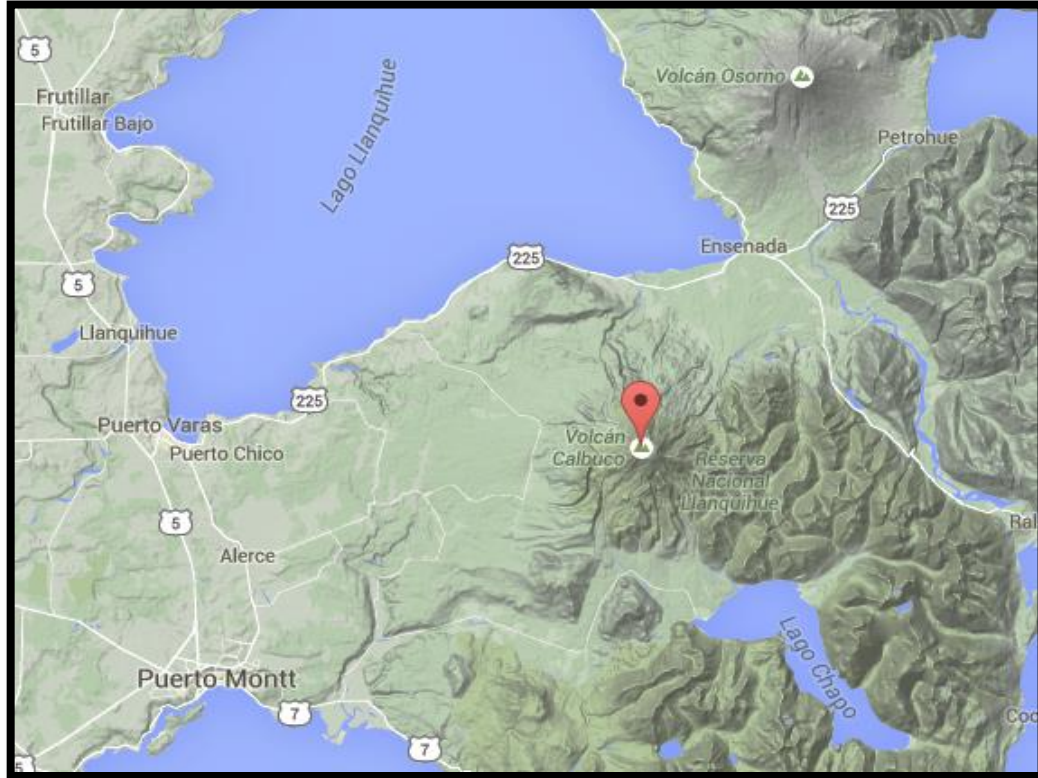


Figura 2: Mapa base de área de estudio. Volcán ubicado en la provincia de Llanquihue, en la Región de Los Lagos. Fuente: Google Maps.

La última erupción importante del Calbuco previa a la investigada en el presente trabajo, tuvo lugar en el año 1961, catalogada en su época como una erupción Sub-Planiana, que generó flujos piroclásticos, lahares voluminosos y depósitos de ceniza que alcanzaron la población de Bariloche en Argentina. Esta erupción, según datos recolectados mostró actividad premonitoria días antes con sismos sensibles, ruidos y actividad fumarólica (Valderrama & Cardona, 2016).

1.3 Objetivos de Tesis

- **Objetivo General**

Utilizar técnica de Interferometría de Síntesis de Apertura Sintética (InSAR) en las proximidades del volcán Calbuco con la ayuda del procesamiento de imágenes provenientes del satélite Sentinel-1A, para determinar la deformación asociada al suceso eruptivo que tuvo lugar durante el mes de Abril del 2015 en la región de Los Lagos.

- **Objetivos Específicos**

-Estudiar la teoría física-matemática que existe por detrás de la tecnología InSAR para poder aplicarla al estudio y entendimiento de la deformación en superficies terrestres.

-Emplear las herramientas y softwares especializados que proporciona la tecnología satelital mediante el uso y aplicación directa de ellos sobre imágenes satelitales con el propósito de poder estimar efectos de subsidencia o levantamiento en el área en estudio.

-Comparar los datos obtenidos mediante tecnología InSAR con datos provenientes de otras instituciones como el SERNAGEOMIN con el fin de validar la veracidad de los resultados.

-Idear una propuesta de implementación que integre la técnica de Interferometría Radar Diferencial a la red de monitoreo volcánico del SERNAGEOMIN, reforzando así, la observación de la actividad volcánica en Chile.

1.4 Estructura de la Tesis

La presente investigación es introducida con la historia de la tecnología SAR nacida en la primera mitad del siglo XX y sus principales aplicaciones en el mundo científico, para comenzar así con una explicación de los principios teóricos que rigen la teledetección mediante este tipo de tecnología.

Comprendiendo esto, se da paso a explicar en qué consiste la técnica de Interferometría Radar (InSAR), y cómo es manipulada para medir hundimientos o levantamientos en los terrenos observados, a niveles sub-métricos de precisión.

Posteriormente, la investigación confluye en el estudio de los eventos de naturaleza volcánica, en términos de sus orígenes, productos expulsados e impactos derivados de este tipo de fenómenos, clasificándolos de acuerdo a su envergadura y potencial destructivo.

Finalmente la investigación desemboca en el estudio empírico del uso de la tecnología SAR y en específico de la técnica DInSAR, para poder describir en forma cualitativa y cuantitativa el movimiento de subsidencia o levantamiento en el área de estudio ya definida. Este estudio será realizado con ayuda del Software de licencia liberada Sentinel-1 Toolbox mediante imágenes que fueron obtenidas por el satélite europeo Sentinel-1A, y que se encuentran disponibles por la ESA.

Es importante acotar que gran parte del estudio empírico de la investigación será efectuada en recintos del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN), cuya sede se encuentra ubicada en Av. Manuel Montt 1164; uno de los pocos emplazamientos en donde se encuentran los softwares y el equipamiento apto para llevar a cabo el estudio. En las oficinas del instituto se comparará al detalle la situación del relieve aledaño al volcán Calbuco en condiciones anteriores y posteriores a las erupciones que acontecieron durante la última semana de Abril del 2015.

1.5 Estado del arte

La tecnología InSAR aplicada a la observación de movimientos superficiales en laderas volcánicas es una de las técnicas más apreciadas y explotadas en el viejo continente, esto debido a su gran precisión, capacidad espacial y su habilidad que posee en forma remota. Es así como en Italia, por ejemplo, esta técnica se ha vuelto imprescindible a la hora de estudiar el comportamiento del volcán Etna, con ayuda de imágenes provistas por los satélites ERS-1 y ERS-2; de la misma forma y en el mundo entero los países más desarrollados en materia tecnológica se han visto ampliamente beneficiados por este tipo de tecnologías. Hoy en día los volcanes más activos en la corteza terrestre están continuamente siendo monitoreados y estudiados con InSAR por divisiones de centros de investigación completas destinadas al estudio y desarrollo de estos productos; estos centros no sólo son de naturaleza estatal, como lo es la German Aerospace Center o la USGS en Estados Unidos, sino también privada, como lo es la Univesidad de Saint Louis con su Centro por la Sustentabilidad, o la unidad de Geofísica en Alaska.

En Chile, el desarrollo y explotación de la interferometría aún se encuentra en pañales; la ausencia de una agencia espacial estatal que incentive la investigación y aplicación de estas materias, hace que Chile sea uno de los pocos países en América del Sur en donde el estado no invierte en materia aeroespacial; situación preocupante al considerarlo como uno de los países con mayor riesgo volcánico en el planeta tierra. Hoy en día el SERNAGEOMIN, presentándose como el organismo encargado de monitorear los más de quinientos volcanes activos en el territorio chileno, sólo lo hace en 43 de ellos, y lo hace utilizando sismómetros, GPS's, inclinómetros y cámaras IP, todos ellos considerados equipos "in situ". Uno de estos inclinómetros ha sido destinado para tomar mediciones en la ladera Oeste del Calbuco a 4,5 Km del cráter, además de 6 estaciones sísmicas instaladas en el campo cercano. El suceso eruptivo en esta ocasión fue evidenciado únicamente por una cámara IP. Aunque el organismo sí obtuvo un análisis interferométrico de la erupción, éste estudio fue recibido desde el extranjero días posteriores a la erupción. Actualmente, el organismo no posee un departamento destinado a generar productos interferométricos periódicamente que dé cuenta de la evolución superficial del movimiento en los volcanes en observación. Más bien estos

productos son externos, y recibidos sólo una vez que ya presentada una actividad volcánica.

Paralelamente, las enormes inversiones que se requieren para la adquisición de las estaciones de monitoreo in situ, sumadas al complicado acceso que deben enfrentar los especialistas al momento de transportarlos e instalarlos en los distintos puntos específicos en las laderas de cada volcán en estudio, hace que la tarea de un monitoreo acabado de los macizos activos en el territorio chileno, se encuentre actualmente en déficit.

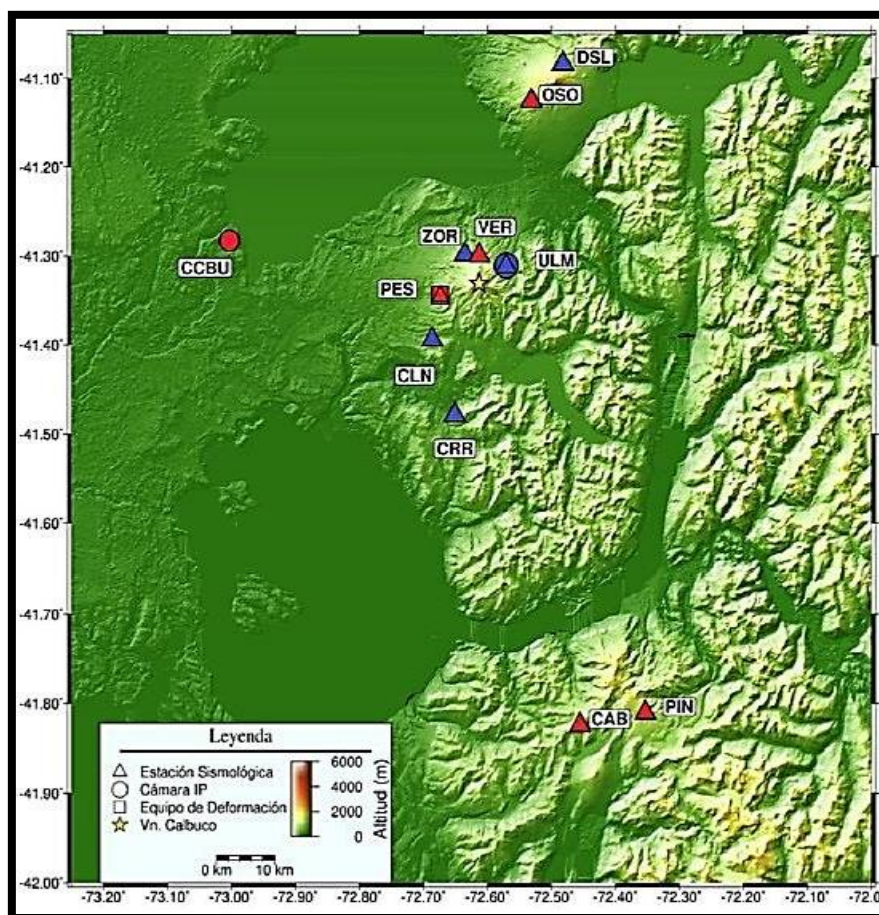


Figura 3: Red de Vigilancia Volcán Calbuco. Fuente: SERNAGEOMIN.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Radar de Apertura Sintética “Synthetic Aperture Radar – SAR”

2.1.1 Historia de SAR

La historia de la teledetección siempre ha estado muy ligada del desarrollo tecnológico existente, ya que corresponde a una interacción de técnicas aplicadas, como lo son la óptica, sensores remotos (pasivos y activos), sistemas del vehículo que lo transporta, sistemas de transmisión, etc. Su crecimiento en este sentido por lo tanto ha sido muy acelerado, no solo en la calidad, sino también en la cantidad y variedad con que la información se dispone en distintas plataformas.

El Radar de Apertura Sintética, conocido en el mundo como SAR y desarrollado en los años 50' como una herramienta de reconocimiento militar, fue en realidad ideado en a finales de la década del 40 por el ejército de los Estados Unidos, el cual por mucho tiempo intentó diseñar una herramienta de reconocimiento aéreo que pudiese penetrar las nubes y que no dependiera de la luz natural del día. En ese entonces, el Radar fue la opción más lógica. El único inconveniente era que, con el fin de lograr una resolución lo suficientemente útil, precisaba de una antena del tamaño de un campo de futbol y por lo tanto demasiado grande para ser transportado por un avión de reconocimiento.

Con esta problemática, fue Carl Wiley, trabajador de Goodyear en Arizona, (que más tarde llegaría a ser Lockheed Martin Corporation) que en 1951 propuso el principio de que, ya que cada objeto observado por el radar describe distintas velocidades respecto a la antena, entonces cada objeto también poseerá su propio desplazamiento Doppler y por lo tanto un análisis preciso de la frecuencia de las reflexiones del radar permitirían la construcción de imágenes detalladas. De esta manera, un radar con una antena de un metro de ancho puede ser suficiente para adquirir una imagen que de otro modo requeriría una mucho más grande. Durante el verano de 1953 la Universidad de Michigan, bajo el desarrollo del llamado “Proyecto Wolverine” intentó crear un prototipo SAR, el cual en 1957 comenzó a entregar los resultados que se esperaban.

En Junio de 1978 el lanzamiento del Seasat fue la primera aplicación civil de SAR, y para los científicos significó una poderosa y nueva herramienta para el estudio de la

tierra. Antes del Seasat, las imágenes civiles utilizadas para el estudio de la tierra provenían de cámaras ópticas del sensor Landsat, que utilizaban luz visible con una resolución en decenas de metros. El Seasat operó hasta Octubre de 1978 cuando se tornó inoperativo debido a un cortocircuito en su sistema de energía.



Figura 4: Seasat 1, primer satélite con tecnología SAR.
Fuente: NASA.

Desde ese entonces hasta el presente, el Radar de Apertura Sintética ha llegado a ser uno de las herramientas más valiosas para monitoreo de la tierra y el medioambiente. Mediante las altas resoluciones que dispone, esta tecnología se utiliza para la observación de los mares y hielos, midiendo el comportamiento de los glaciares, recolectando patrones eólicos, de lluvias, midiendo la erosión, generando alertas de tormentas, ayudando en la gestión de desastres, identificando potenciales deslizamientos de tierras o prediciendo sequías. En este sentido, la tecnología SAR también ha contribuido de manera importante en la predicción de eventos volcánicos, los cuales generalmente son precedidos por deformaciones en el cono volcánico, causadas a su vez, por diferenciales de presión que genera el magma bajo el volcán. La tecnología SAR es capaz de detectar hasta las más mínimas variaciones de este tipo, presentándose en los últimos años como una de las herramientas más útiles en cuanto a vigilancia volcánica se trata y mitigación de riesgos posteriores a la erupción (ETHW, 2015).

2.1.2 Principios teóricos de SAR

En esta sección se describen los principios básicos de los sensores SAR, comenzando por una descripción de las órbitas por las que transitan y cómo es que se obtienen las imágenes de este tipo.

En general, todos los satélites equipados con tecnología SAR rodean la tierra en órbitas polares cercanas, a una altitud que oscila entre los 500 y 800 Km sobre la superficie dependiendo de la plataforma portadora del sensor. El tiempo que tarda un satélite para volver a pasar sobre la misma área en la tierra es llamado Tiempo de Re-visita, o Resolución Temporal del satélite.

El ángulo que se forma entre Norte-Sur y la órbita que describe el sensor varía ligeramente dependiendo del satélite, pero en general lo hace en el rango de los 10°. La órbita polar de los satélites SAR permite que durante la mitad de su trayectoria hayan viajado desde el polo Norte hasta el polo Sur, cada vez que así lo hace se dice que el va en Descenso, y cada vez que el satélite recorre del polo Sur al polo Norte se dice que va en Ascenso (TRE, 2016).

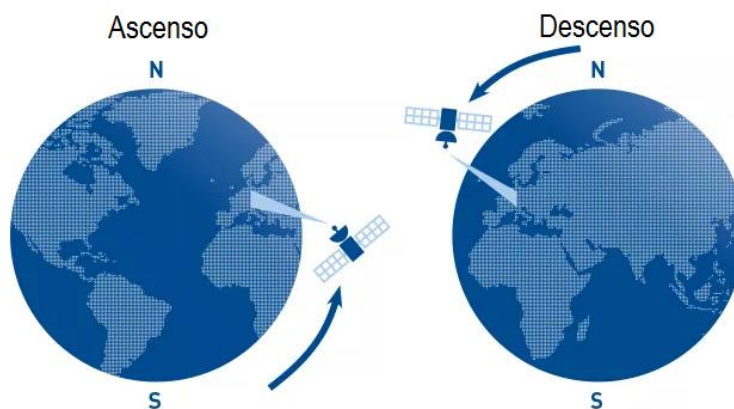


Figura 5: Ilustración del viaje Ascendente y Descendente que el satélite describe en su órbita polar. Fuente: TRE, Sensing the Planet.

Más que un tipo de tecnología, el Radar de Apertura Sintética (de aquí en adelante SAR) se define como una técnica de teledetección activa, lo que significa que es capaz de ofrecer su propia iluminación para la toma de imágenes, y funcionando por lo tanto de día como en la noche, de forma independiente a la luz solar. Este tipo de iluminación es efectuada al utilizar radiación con microondas, cuyo ancho de banda tiene la particularidad que le permite atravesar nubes y todo tipo de tempestades, funcionando

por lo tanto de manera independiente también de las condiciones atmosféricas. Además, la radiación utilizada por este tipo de radares es *coherente*, es decir, se constituye de componentes con la misma longitud de onda, mismo plano de vibración (polarización) y diferencia de fase constante (Nievinski, Interferometría por Radar de Abertura Sintética InSAR, 2004).

El funcionamiento de un SAR se constituye básicamente de la siguiente secuencia (Figura 6):

- 1.- La antena emite un pulso de energía (microondas) hacia el suelo.
- 2.- Una vez que el pulso toca el suelo es esparcido en todas las direcciones.
- 3.- Parte de este pulso retorna en dirección de la antena receptora del radar, proceso conocido como *Retro-dispersión* (o *backscatter* en inglés).
- 4.- Este pulso recibido es captado en función de su amplitud, fase, polarización y tiempo de retorno.
- 5.- Estos parámetros son posteriormente procesados en conjunto, para formar una imagen de la superficie capturada.

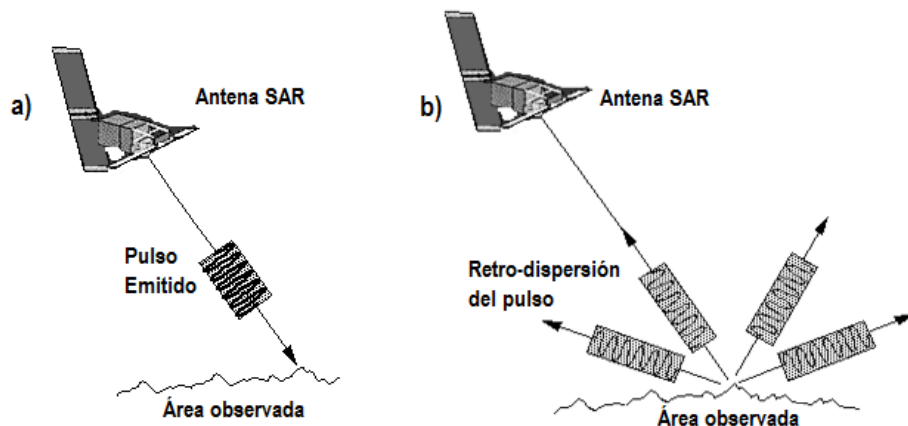


Figura 6: En a) El pulso SAR se emite desde la antena al suelo, en b) El pulso SAR Retro-dispersado es capturado por la antena. Fuente: Centre for Remote Imagin, Sensing & Processing (CRISP).

Su nombre –Radar de Apertura Sintética- lo recibe debido a que durante su vuelo sobre la superficie terrestre a una velocidad constante, el SAR se encuentra continuamente almacenando los parámetros de los ecos que son recibidos cada vez, desde una posición distinta. Se dice que la suma *coherente* de estos ecos permite “sintetizar” en forma virtual la apertura de una antena más grande a la real (Zozaya, 2015).

Como intenta ilustrar Christian Wolff en la Figura 7, un sistema SAR también puede concebirse como un proceso en donde se almacenan todas las señales retornadas, con sus respectivas amplitudes y fases durante el tiempo T , desde la posición A a la D. Así es posible “reconstruir” la señal que una antena de ancho $T \times V$ (Distancia) hubiese obtenido, en donde V es la velocidad del sensor. Como el cono de observación cambia a lo largo de la trayectoria del sensor, una apertura sintética es generada por esta señal que posee el efecto “alargador” de la antena. Cuando T es grande, la apertura de la antena también lo es, logrando una resolución mayor, como se explicará en los siguientes capítulos.

Cuando un objeto (Como un barco en la Figura 7) entra al cono de observación del sensor, los ecos retro-dispersados comienzan a ser grabados. A medida que el sensor continúa moviéndose hacia adelante, todos los ecos reflejados son registrados durante el tiempo que el objetivo permanece en el cono. El punto en el cual el objeto sale del cono tiempo después, determina la longitud de la antena sintetizada (Wolff, 2008).



Figura 7: Cono de observación en expansión sintetizado.
Fuente: Christian Wolff.

2.1.3 Conceptos Iniciales

Antes de entrar en el detalle de lo comentado en el punto 2.1.2, es necesario primeramente definir algunos conceptos iniciales que servirán para entender el funcionamiento del SAR. Para ello esta sección se basará en las Figuras 8 y 9¹ mostradas en las siguientes páginas, relacionadas a la dirección del movimiento del sensor y sus ángulos respectivamente.

¹ Estas ilustraciones fueron obtenidas y traducidas del trabajo previo de Felipe Geremia Nievinski (Nievinski, InSAR, 2004). La traducción de los términos se realizó desde el portugués al español equivalente.

El sensor viaja sobre una plataforma cuya trayectoria es orbital sobre la superficie de la Tierra, esta trayectoria que forma el sensor es llamada *línea de vuelo* (*flight track* en inglés), y describe una *proyección de línea de vuelo* en la tierra (*ground track* en inglés).

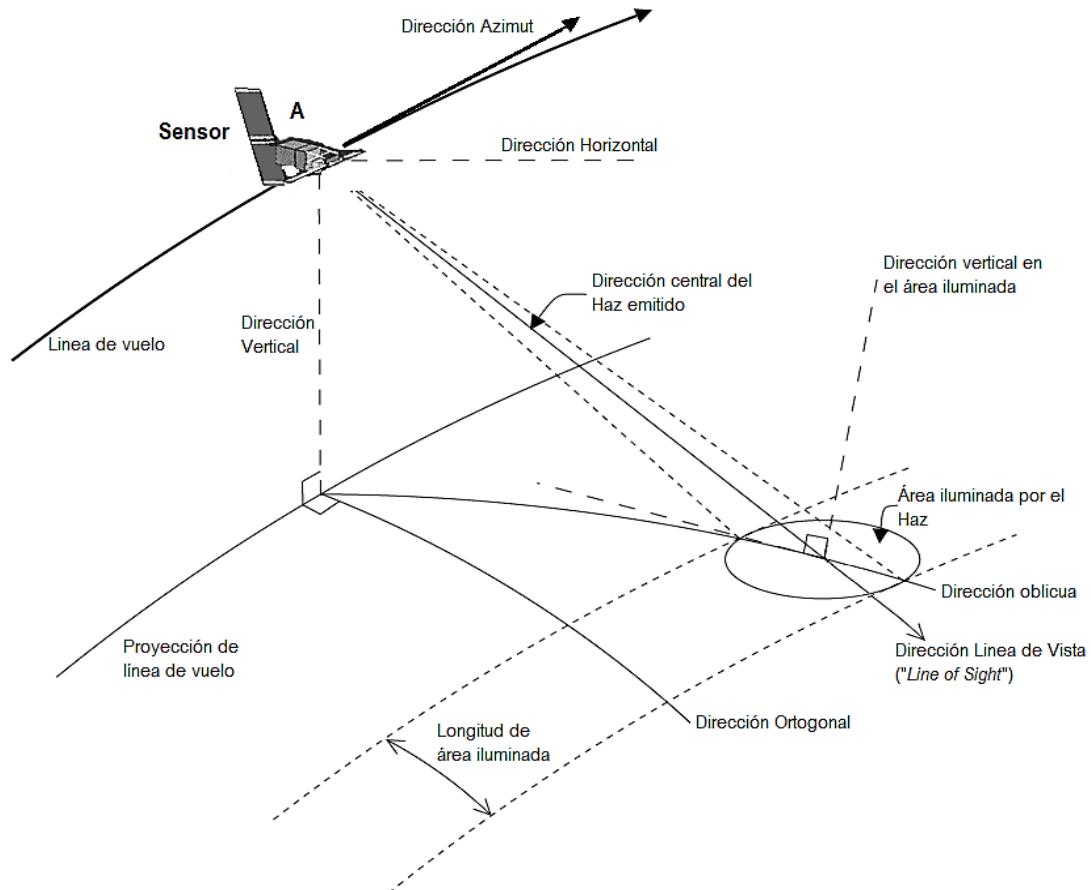


Figura 8: Direcciones del movimiento del sensor y direcciones del haz emitido.
Fuente: Traducido desde tesis de Felipe Geremia Nievinski.

Suponiendo a la tierra como un esferoide sin relieves, se constituye una *dirección vertical* normal a la superficie que une al sensor con la proyección de la línea de vuelo. De la misma forma el sensor describe una *dirección ortogonal* perpendicular a la línea de vuelo sobre la tierra.

Como se dijo, el sensor emite un haz de radiación. Este haz posee una *dirección central* que está determinado por dos ángulos: un ángulo horizontal en relación a la dirección perpendicular a la proyección de la línea de vuelo, llamado *ángulo de oblicuidad* (*squint angle* en inglés) y un ángulo vertical llamado *ángulo de elevación* (*look angle* en inglés). Estos dos ángulos son complementados por dos más: el *ángulo de depresión* y el *ángulo*

de Azimut. El haz emitido también es definido por dos ángulos que describen el área “barrida”, estos ángulos son el ángulo de abertura vertical θ_V , en el plano que contiene las direcciones central del haz y vertical, y un ángulo horizontal θ_H , en el ángulo que contiene la dirección central al haz y es perpendicular al plano anterior.

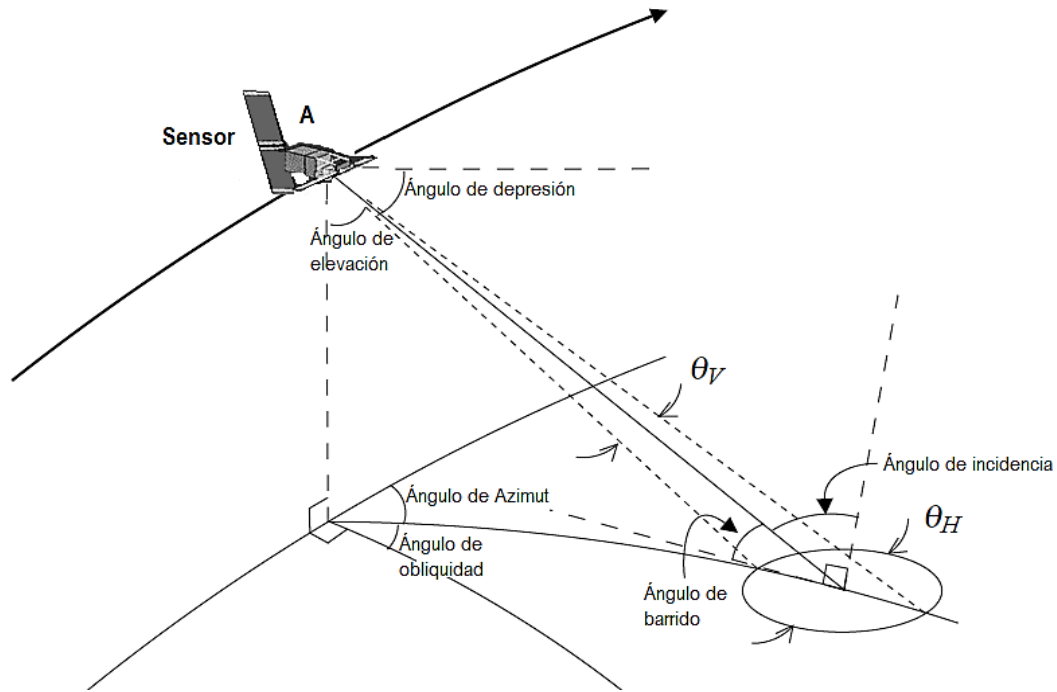


Figura 9: Ángulos de trabajo. Fuente: Traducido desde tesis de Felipe Geremia Nievinski.

Es necesario notar que, debido a que la superficie en donde se proyecta el haz de radiación está ideado como una esferoide, resulta erróneo suponer que la dirección vertical del área iluminada es paralela con la dirección vertical descrita por el sensor. El ángulo formado entre la dirección del haz emitido y la dirección vertical del área iluminada es llamado *ángulo de incidencia* (*incidence angle* en inglés), y su complemento *ángulo de barrido* (*grazing angle* en inglés).

Se puede decir también, que cualquier objetivo iluminado por el haz de microondas está definido por una *dirección de rango* o *alcance directo* (*slant range* o *across-track direction* en inglés), que en conjunto con la dirección de Azimut ya descrita, corresponden a las dos dimensiones (separadas en filas y columnas) utilizadas por el radar para generar una imagen.

2.1.4 Tipos de radiación

Los radares trabajan con impulsos de radiación electromagnética que recorren generalmente el espectro de las microondas, que va desde los 225MHz hasta los 36GHz. A su vez este espectro se sub-divide en distintas secciones que abarcan distintos anchos de banda (Tabla 1), las agencias utilizan estas bandas para distintos propósitos.

Nombre Banda	Ancho de banda λ (cm)	Frecuencia f (GHz)
K	0,83-2,75	36-10,9
X	2,75-5,21	10,9-5,75
C	5,21-7,69	5,75-3,9
S	7,69-19,4	3,9-1,55
L	19,4-76,9	1,55-0,39
P	76,9-133	0,39-0,225

Tabla 1: Principales bandas del espectro de Microondas. Fuente: Elaboración propia.

El satélite Sentinel-1A, lanzado en Abril del 2014 por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), utiliza la banda-C con 5,405GHz que corresponden a un ancho de banda de 5,55cm (SpaceFlight101, 2015).

Generalmente, dependiendo del ancho de banda y la polarización de las ondas, se obtienen distintos niveles de penetración por el pulso electromagnético, definiendo las distintas funcionalidades con que los fabricantes definen el trabajo del satélite. Así, mientras mayor sea el ancho de banda λ más fuerte es la penetración en los objetos.

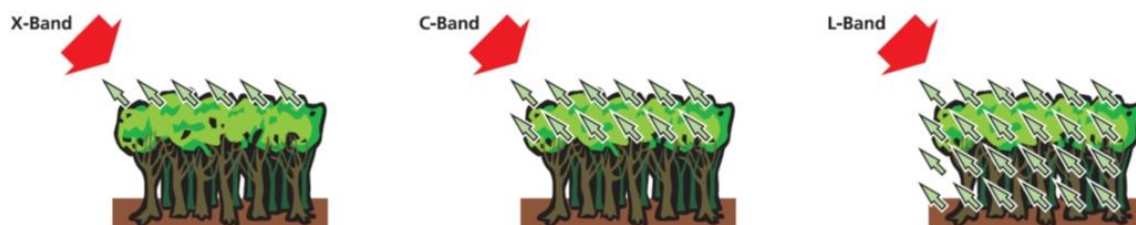


Figura 10: Comparación de profundidad de penetración entre bandas X, C y L en vegetación. Fuente: DLR.

De esto se puede inferir también que los niveles de retro-dispersión guardan una proporción directa al grado de rugosidad que posea la superficie. Un bosque observado por un haz en la banda X ($2,5\text{cm} < \lambda < 5,5\text{cm}$) será sensible a las hojas, mientras que si es observado por la banda L ($19\text{cm} < \lambda < 77\text{cm}$) podrá discriminar sólo los troncos bajo

las hojas. De la misma forma, si un área con agua calma es capturada por el sensor y al mismo tiempo el ángulo de incidencia es alto, la radiación será casi nulumamente retro-dispersada hacia la antena receptora, observándose una imagen oscura. Si por el contrario, el agua está agitada y el ángulo de incidencia es cerrado, la radiación que retorna a la antena será muy alta, mostrándose una región clara.

2.1.5 Resolución del Radar de Apertura Real y de Apertura Sintética

En esta sección se intentará explicar una de las propiedades más particulares de la tecnología SAR con la cual se diferencia de un sistema Radar estándar, y que tiene que ver con el tipo de resolución que presenta en su dirección Azimut. Para llegar a esto, se verá primeramente la resolución que ambos tipos de radar (de apertura real y sintética) poseen en la dirección de Alcance o Rango. Este estudio no pretende ser uno acabado en la materia, sino más bien uno que sea capaz de dejar en claro los principios físico-matemáticos más elementales que sostienen este tipo de tecnología.

- Resolución en dirección de Rango:

La resolución de un radar en la dirección de Rango se define como la habilidad que posee para distinguir entre dos o más objetivos en el mismo rumbo pero a distintas distancias. El nivel de esta resolución dependerá en primer lugar del ancho del pulso emitido, y en segundo lugar del tipo y tamaño de los objetivos. De esta manera, se define la resolución en Rango como:

$$\rho_A = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo c la velocidad de la luz y τ la duración del pulso electromagnético. En la práctica, para aumentar la resolución en Rango, el sensor envía pulsos modulados linealmente en frecuencia llamados “*chirps*”. De esta forma, se logra que la resolución no dependa de la duración del pulso, sino de la longitud de la banda, quedando expresada la resolución como:

$$\rho_A \approx \frac{c}{2B} \quad (\text{Ec. 2})$$

Con B como la longitud de la banda utilizada en la modulación de la frecuencia.

- Resolución en dirección Azimut:

-Apertura Real (Real Aperture Radar-RAR):

Para este tipo de radares, la resolución en Azimut está en función directa con el ancho del haz proyectado, el cual se define como:

$$\theta_H \approx \frac{\lambda}{La} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde La es la longitud física de la antena. En esta dirección, dos blancos son distinguibles entre sí en el caso de que no estuviesen ambos sobre el mismo haz simultáneamente. De esta forma, se define la resolución en Azimut como el producto entre el ancho del haz y la distancia sensor-objetivo, expresándose como:

$$\rho_{Az} = \frac{R\lambda}{La} \quad (\text{Ec. 4})$$

Con R como la distancia sensor-objetivo. De la Ecuación 4 se desprenden variadas conclusiones que apuntan a la cantidad de limitaciones que posee este tipo de configuración. En primer lugar se infiere que, para cierto valor de longitud de onda, la resolución ρ_{Az} se ve degradada a medida que la distancia aumenta y la antena se acorta, requiriendo grandes antenas para alcanzar resoluciones aceptables; y aun teniendo una gran antena, se vuelve muy difícil obtener resoluciones óptimas sobre una plataforma orbital con este tipo de aperturas considerando la altura no menor en la que orbitan los satélites (693 Km en el caso de Sentinel-1). A esto se le suma el inconveniente de obtener una resolución dispareja en el área iluminada por el haz en la dirección de Rango, alcanzando las mejores resoluciones en las zonas más cercanas y las peores en las zonas más lejanas a la antena.

-Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar-SAR):

Esta resolución viene siendo expresada inicialmente, en forma análoga a la resolución en Azimut con RAR, como el producto entre la distancia sensor-objetivo R con el ancho del haz (esta vez, por definición sintetizada) $\theta_{H,s}$:

$$\rho_{Az} = R\theta_{H,s} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde $\theta_{H,s}$ a su vez, también es expresado de manera análoga con la Ecuación 3 por:

$$\theta_{H,s} \approx \frac{\lambda}{2D} \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo D la longitud sintética de la antena (recordando la definición de SAR). Esta longitud viene siendo descrita como:

$$D = R\theta_H \quad (\text{Ec. 7})$$

Recordando que $\theta_H \approx \lambda/La$, corresponde a la longitud del haz proyectado en la dirección Azimut. Finalmente, la expresión que resulta al reemplazar la Ecuación 7 en la 6, y ésta a su vez en la 5, es igual a la resolución en Azimut del SAR:

$$\rho_{Az} = \frac{La}{2} \quad (\text{Ec. 8})$$

Esta expresión final sugiere la característica llamativa de que la resolución no se encuentra en función de la distancia sensor-objetivo, ni tampoco de la longitud de onda con la que trabaje, sino únicamente del ancho de la antena. También, como se intentó explicar al inicio de la sección 2.1.2, del procedimiento recién efectuado se deduce que los objetos que se encuentran a mayor distancia del sensor no son capturados con menor resolución, ya que tales objetivos son iluminados por mayor tiempo y por lo tanto con mayores aperturas sintéticas (Nievinski, InSAR, 2004).

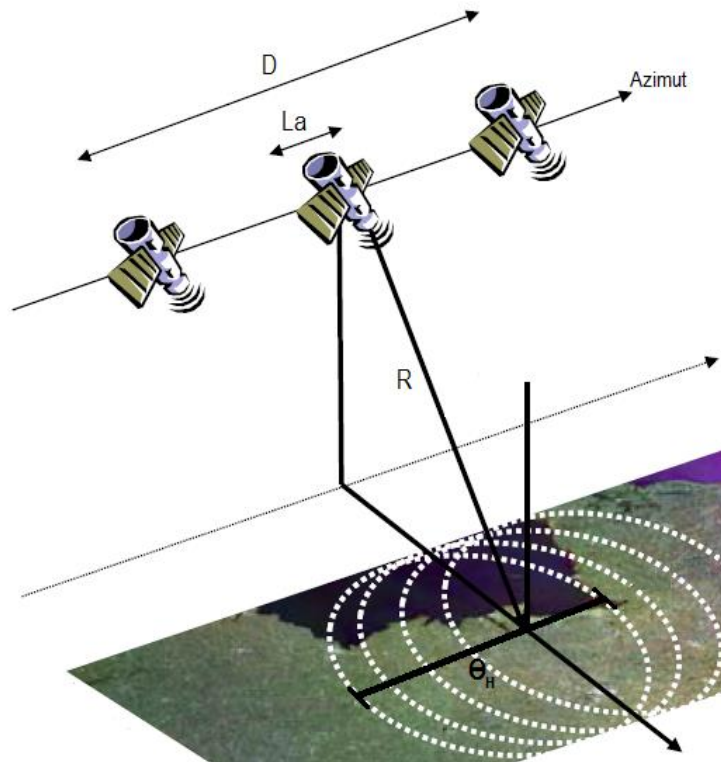


Figura 11: Ilustración de Longitud de la antena Sintetizada (D), la Longitud física de la antena (La), distancia sensor-objetivo (R) y ancho del Haz (θ_H). Fuente: Alterado de Carlos López, 2015.

2.1.6 Modos de Operación del Sentinel-1A

El trabajo de la ESA ha contemplado cuatro modos de operación del satélite tipo SAR enviado a inicios del 2014 con el nombre Sentinel-1A, lanzado al espacio a bordo del cohete espacial Soyuz bajo el alero del programa Copernicus.

Estos cuatro modos operativos a bordo del mismo satélite (Para más detalles ver Anexo 1), son un intento por satisfacer en primer lugar los requerimientos estipulados por el programa Copernicus, y en segundo lugar también para los requerimientos de los usuarios interesados en utilizar tecnología Radar de Sentinel-1(ESA). Estos modos son (Figura 12):

Wave Mode (WM): Este método de escaneo se caracteriza por el pequeño tamaño de sus imágenes de 20 Km² en intervalos de 100 Km a lo largo de la órbita. Estas imágenes poseen una resolución en Rango de 5 mts. y de 20 mts. en Azimut y son obtenidas a partir de ángulos de elevación medios de 23° y de 37° en forma alternada.

StripMap Mode (SM): En este modo el haz del radar cubre una longitud de 80 Km en la dirección en Rango. En ésta misma dirección provee imágenes con una resolución de 5 mts. cuadrados, utilizando ángulos de incidencia entre los 20° y 47°. Este método también permite seleccionar una de seis sub-franjas que componen un largo de 375 Km, cambiando el ángulo de incidencia y el ancho del haz de elevación.

Extra-Wide Mode (EW): Cubre una longitud de 410 Km en la dirección de Rango con una baja resolución de 30 mts. en Rango y 40 mts. en Azimut. Al igual que el anterior, opera con ángulos de incidencia entre los 20° y 47°.

Interferometric Wide-Swath (IW): Este modo permite combinar una larga longitud de 250 Km en dirección de Rango con una resolución moderada de 5 mts. por 20 mts. en Rango y Azimut respectivamente, y lo hace con ángulos incidentes de entre 31° y 46°. El IW se caracteriza por separarse en tres sub-franjas (IW1, IW2, IW3) adquiridas mediante la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), la cual, además de dirigir el haz de microondas en dirección de Rango, también lo hace en la dirección de Azimut desde adelante hacia atrás en forma electrónica con cada ráfaga, entregando una mejor calidad de imagen. Las imágenes de este modo son entregadas con suficiente traslape en Azimut y en Rango.

El IW es también el modo de adquisición por defecto.

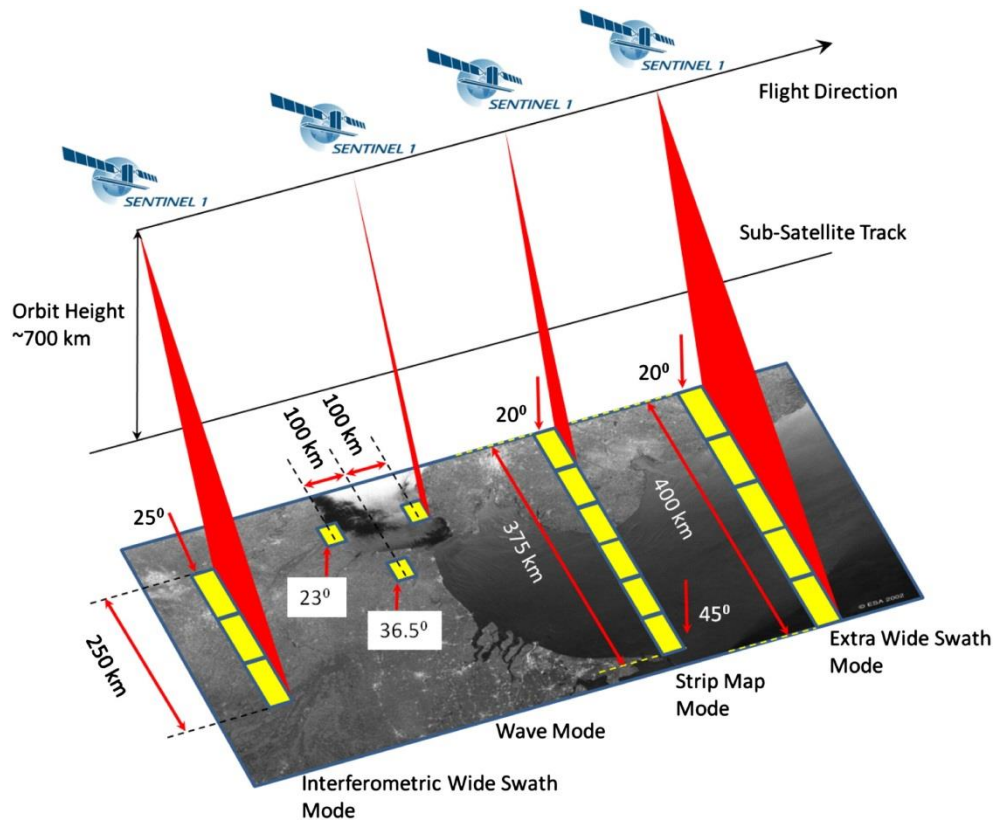


Figura 12: Modos de operación de Sentinel-1A. Fuente: ESA.

En el Anexo 2 se encuentran disponibles las características del satélite Sentinel-1A; para entender la nomenclatura de sus productos dirigirse al Anexo 3.

2.2 La imagen SAR

Una imagen del tipo SAR puede ser considerada como un mosaico, esto es, como una matriz compuesta de filas y columnas de pequeños elementos o píxeles. Cada píxel se corresponde con una pequeña área de la superficie observada y está asociado a un número complejo que describe una *Amplitud* y una *Fase* a la vez (A diferencia de RAR, en donde la imagen es generada sólo a partir de la amplitud de cada eco recibido (Torres, 2011)). Estos parámetros entregan información acerca del campo de microondas retro-dispersadas de cada uno de los puntos dispersores, que pueden tratarse de rocas, vegetación, construcciones, etc. En la imagen las columnas se corresponden con la dirección en Rango y las filas con la dirección en Azimut.

En el caso de Sentinel-1A, las dimensiones de los píxeles son las descritas en la sección anterior como las resoluciones de los distintos modos de operación. (5m en Rango y 20m en Azimut para el caso de IW).

2.2.1 Componente Amplitud

Cuando se observa una imagen generada a partir de SAR, se dice que ésta viene constituida por mediciones de amplitud de la radiación retro-dispersada hacia el radar por los objetos dispersores. Esta amplitud depende en primer lugar de la rugosidad (como se mencionó en la sección 2.2.2.) y en segundo lugar de la composición química y propiedades dieléctricas del terreno. Así, las rocas expuestas y áreas urbanas muestran grandes amplitudes, mientras que las superficies planas muestran pequeñas amplitudes que se deben a que la radiación es reflejada lejos del radar.

Es por este motivo que las imágenes SAR son generalmente observadas en una escala de grises, como se ve en la Figura 13. Los píxeles más brillantes corresponden a áreas de fuerte retro-dispersión, como casas, edificios o rocas, mientras que las áreas más oscuras corresponden a bajos niveles de retro-dispersión, como el agua.



Figura 13: Imagen de alta resolución SAR tomada por el satélite TerraSAR-X. Fuente: Universität Siegen.

2.2.2 Componente Fase

Respecto a la componente de fase en la señal transmitida, ésta es crucial para la información que atañe a las diferencias de relieve con la cual se hace la interferometría.

Al tratarse de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, es legítimo afirmar que estas ondas están compuestas por partículas (debido a la naturaleza dual de la luz) que describen un movimiento sinusoidal, en donde cada vez que la partícula recorre una distancia igual a la longitud de onda λ , se dice que recorrió un ciclo igual a 2π . Es así como se llega a la primera definición de fase, representada por la letra ϕ :

$$\phi = -\frac{2R}{\lambda} 2\pi = -\frac{4R\pi}{\lambda} \quad (\text{Ec. 9})$$

Y es ilustrado en la siguiente figura:

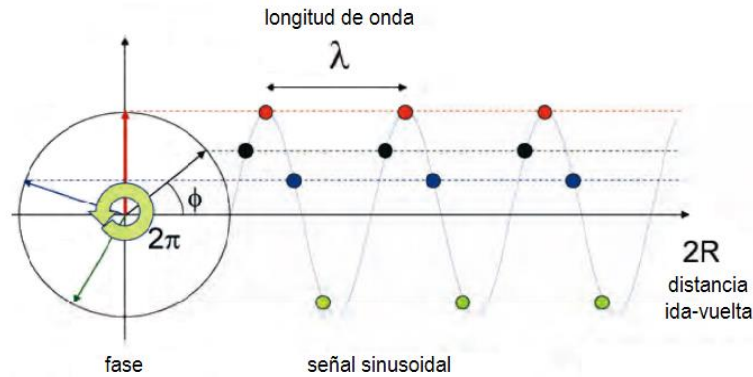


Figura 14: Función sinusoidal $\sin \phi$ de la señal transmitida con periodo 2π radianes. Fuente: ESA.

La Ecuación 9 comienza con un signo negativo según la convención de Rosen (Rosen & Hensley, Synthetic Aperture Radar Interferometry, 2000), la fracción que le precede resulta en la distancia recorrida en unidades de longitud de onda y el factor 2π convierte tal medida adimensional, en radianes. Sugiere también, que cada vez que la partícula transita la distancia equivalente a 2π , la fase vuelve a ser la misma completado un ciclo, infiriendo de esto que la fase ϕ corresponde a la medida de la última fracción del recorrido ida-vuelta, que a su vez es más pequeña que la longitud de onda (ESA, 2007). Esto es muy significativo, porque dependiendo de la longitud de onda con la que trabaje cada sensor, implica que la sensibilidad del SAR puede llegar a ser del orden sub-métrico. Así, una diferencia de 2,8cm en la elevación del terreno para un sensor que trabaje con una longitud de onda de 5,6cm (Como es el caso de Sentinel-1A) representará un cambio de fase equivalente a sólo π radianes.

2.3 Interferometría Radar de Apertura Sintética (In-SAR)

En esta sección se intentará presentar una breve pero elemental explicación de los principios que sostienen la técnica de Interferometría SAR, evitando la pretensión de abordar en detalle cada una de las ecuaciones físicas-matemáticas de esta importante técnica. Si el lector se interesa por conocer de manera más profunda los principios que se explicarán a continuación, puede acudir a autores que abordan la materia de manera mucho más acuciosa como lo son Jakob van Zyl y Yunjin Kim, Zhong Lu y Daniel Dzurisin, Kurt Katzenstein, Carlos López Martínez, o el libro publicado por la ESA bajo el nombre InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation y que consiste en tres partes: Parte A, un estudio inicial del proceso interferométrico; Parte B, un acercamiento práctico y técnico al procedimiento InSAR basándose en casos del ERS; y una Parte C, con material más matemático y que provee un entendimiento mucho más detallado del proceso InSAR.

2.3.1 Introducción a InSAR

Hasta ahora, se ha dicho que una pequeña antena radar, aerotransportada en una plataforma satelital es capaz de sintetizar una antena de grandes proporciones y ser usada para la formación de imágenes de alta resolución espacial. ¿Cómo es posible medir a escala sub-métrica las pequeñas deformaciones de la superficie terrestre utilizando este sistema? Para ello, se requiere de la Interferometría. Las imágenes InSAR son generadas a partir de la combinación o *interferencia* de dos imágenes provenientes de radares SAR, espacial o temporalmente separadas. Así, la palabra “interferometría” alude a los términos de *interferencia* y *medición*, y por lo tanto la técnica que estudia la interferencia de ondas electromagnéticas que son transmitidas y recibidas por un SAR es llamada Interferometría de Radar de Apertura Sintética (*InSAR*, por sus siglas en inglés). Esta técnica envuelve el uso de dos imágenes SAR de la misma área, escogiendo una imagen principal (*master image* en inglés) y otra imagen adicional secundaria (*slave image* en inglés) para extraer tanto la topografía terrestre superficial y patrones de deformación (Lu & Dzurisin, 2014).

Un interferograma SAR, por lo tanto, resulta al cruzar dos imágenes SAR. Este “cruzamiento” equivale a la multiplicación pixel a pixel, de la primera imagen SAR con

el conjugado complejo de la segunda. De esta manera, en el interferograma la Amplitud resultante corresponde a la amplitud de la primera imagen multiplicada por el de la segunda, mientras que la Fase interferométrica corresponderá a la diferencia de fase entre ambas imágenes (ESA, 2007), como se explicará a continuación.

2.3.2 Medición de Altitud de Superficie mediante Fase Interferométrica

Para entender de manera simplificada esta compleja técnica, esta sección se basará en la suposición de sólo un punto dispersor en cada celda de resolución, el cual no cambia en el tiempo. Este punto es observado por dos SAR's desde distintos ángulos relativamente cercanos (Figura 15). Bajo este supuesto, la fase interferométrica de cada pixel de la imagen SAR dependerá sólo de la diferencia en las posiciones del recorrido de cada uno de los dos SARs ($r_1 - r_2$), como lo representa la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (\text{Ec. 10})$$

En donde ε representa las características naturales dispersoras del pixel en estudio. De esta manera y para que la ecuación 10 pueda ser simplificada sólo en términos de altitud, resulta fundamental asumir que para repetidas observaciones SAR, los valores de ε no cambian en el intervalo de tiempo durante ambas adquisiciones (El grado en que cambian las características de los dispersores puede ser cuantificado mediante un parámetro llamado *coherencia interferométrica*) (Lu & Dzurisin, 2014). Al asumir esto ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$), se dice que el pixel en estudio conserva *coherencia* entre una observación y otra, y por lo tanto cualquier contribución a la fase que sea inducida por la naturaleza dispersora de estos puntos no afectará la fase interferométrica, anulando el último término de la ecuación y obteniendo la siguiente expresión:

$$\phi = -\frac{4\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} \quad (\text{Ec. 11})$$

Es crucial notar que los parámetros que definen esta fase provienen de una imagen singular, en donde los valores típicos de la diferencia de rango ($r_1 - r_2$) varían desde unos pocos metros hasta varios cientos de metros; análogamente la longitud de onda λ es del orden de varios centímetros y por lo tanto, por sí mismos no pueden ser considerados parámetros pertinentes para medir diferencias de fase con el nivel de precisión que se

busca. Es por esto que la técnica de interferometría va más lejos e intenta medir con la ayuda de dos imágenes, las diferencias de fase entre dos pixeles vecinos $\Delta(r_1 - r_2)$, alcanzando diferencias de fase $\Delta\phi$ muy inferiores a la longitud de la onda en sí misma.

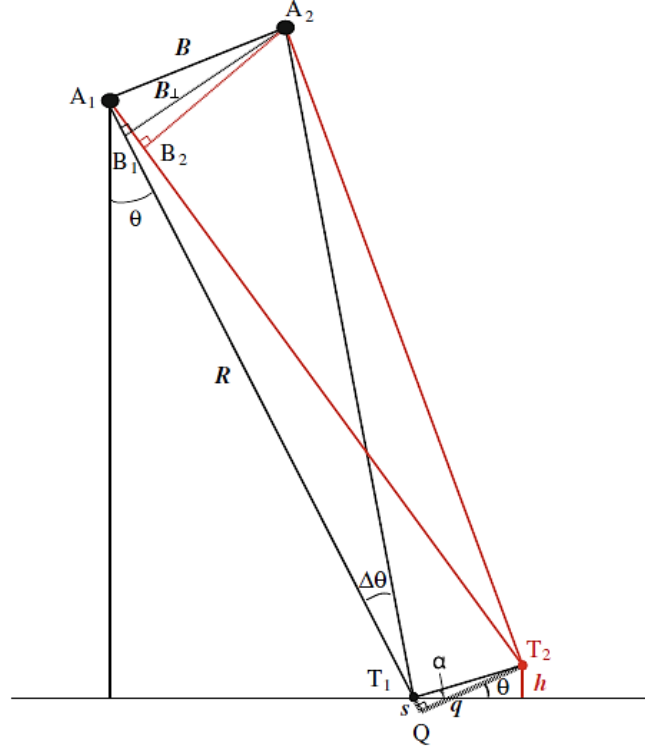


Figura 15: Representación de la variación de Fase Interferométrica entre dos pixeles vecinos (T_1 y T_2) con una diferencia de altura h . La distancia espacial entre los sensores A_1 y A_2 es llamada Línea de Base, donde $B_{\perp}$ representa la componente perpendicular en la dirección de alcance. q y s son las distancias entre T_1 y T_2 que son perpendiculares y paralelas a la dirección de alcance respectivamente. Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.

De esta manera y utilizando la Figura 15, la diferencia entre dos pixeles vecinos T_1 y T_2 puede ser expresada como:

$$\Delta r \approx -\frac{B_{\perp} q}{\lambda} \quad (\text{Ec. 12})$$

Siendo $B_{\perp}$ la línea de base perpendicular (*perpendicular baseline* en inglés) entre ambos sensores, y q la distancia entre T_1 y T_2 que es perpendicular a la dirección de alcance. Al sustituir esta expresión en la Ecuación 11, se obtiene:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi B_{\perp} q}{\lambda R} \quad (\text{Ec. 13})$$

2.3.3 “Aplanamiento” del Interferograma

A su vez, el término q de la Ecuación 13 puede ser representado en dos partes:

- 1.- La variación de la fase proporcional a la diferencia de altitud h entre ambos puntos referenciados a un plano horizontal ($\frac{h}{\sin\theta}$).
- 2.- La variación de la fase proporcional a la dirección de alcance oblicua s entre ambos puntos ($\frac{s}{\tan\theta}$).

Obteniendo una de las principales ecuaciones utilizadas en interferometría radar:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi B_{\perp} s}{\lambda R \tan\theta} - \frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \sin\theta} \quad (\text{Ec. 14})$$

Para efectos prácticos, la línea de base puede ser calculada en base a los datos orbitales de cada satélite, mientras que el primer término al lado derecho de la ecuación se trata de la “fase de tierra plana” (ϕ_{flat}), el cual debe ser calculado y restado de la fase interferométrica; operación que es conocida como “*aplanamiento*” del Interferograma, y definida por la fórmula matemática:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda R \sin\theta} \quad (\text{Ec. 15})$$

Este nuevo interferograma genera un mapa con franjas semejantes a curvas de nivel, que proporcionan la altitud del terreno; explicando de paso, la capacidad intrínseca que posee esta técnica para generar Modelos de Elevación Digital (*DEM* por sus siglas en inglés) a gran resolución y para grandes regiones (Lu & Dzurisin, 2014), siempre y cuando el movimiento superficial entre ambas observaciones sea despreciable. La separación entre cada una de estas franjas representa una altitud llamada *altitud de ambigüedad* h_a .

2.3.4 Altitud de Ambigüedad

La altitud de ambigüedad h_a se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase interferométrica equivalente a 2π , posterior al proceso de aplanamiento del interferograma, y que está representada en la separación entre dos franjas.

Si la altitud de ambigüedad se trata de la altura representada en un cambio de 2π en la fase interferométrica, entonces esta altura se puede inferir al aislar el término h tras haber reemplazado el cambio de fase $\Delta\phi$ por 2π , obteniendo la siguiente expresión:

$$h_a = -\frac{\lambda R \sin\theta}{2 B_\perp} = -\frac{\lambda H \tan\theta}{2 B_\perp} \quad (\text{Ec. 16})$$

En el caso del Sentinel-1, con $\lambda = 5,6 \text{ cm}$, $\theta = 30^\circ$ (En modo IW) y una altura vertical $H = 693 \text{ Km}$. La altura de ambigüedad viene definida por:

$$h_a \approx -\frac{11200}{B_\perp} \quad (\text{Ec. 17})$$

Lo que indica que, suponiendo una línea de base perpendicular de 100 m entre cada observación, un cambio de fase equivalente a 2π correspondería a una diferencia de altitud de 112 m entre cada franja representada en el interferograma aplanado.

Es pertinente notar en la ecuación final, que la altura de ambigüedad posee una relación inversamente proporcional a la longitud de la línea de base $B_\perp$, lo que a priori, indica que los pares interferométricos distanciados por una gran línea de base ($B_\perp \gg 0$) son buenas opciones para la generación de DEMs, en cambio los pares interferométricos distanciados por una pequeña línea de base entre sí ($B_\perp \approx 0$) están mejor situados para un análisis de deformación superficial (Lu & Dzurisin, 2014), como se explicará a continuación.

2.3.5 Medición de Movimiento de Superficie: Interferometría Diferencial (DInSAR)

Para esta sección, se supondrá un ligero desplazamiento del elemento dispersor durante el intervalo entre ambas observaciones SAR. Este desplazamiento puede tratarse de cualquier evento de hundimiento vertical (subsistencia), levantamiento vertical, deslizamientos de tierra o terremotos (ESA, 2007). En tales casos corresponde adicionar un segundo término al interferograma aplanado de la Ecuación 15, que corresponde a la nueva fase inducida por el movimiento, resultando una fase total igual a:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi B_\perp h}{\lambda R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde d corresponde al desplazamiento relativo proyectado en la dirección de alcance (Line of Sight en inglés). Esta nueva fase se compone, por lo tanto, no sólo de la altura superficial o topográfica h , sino también de cualquier deformación superficial posible. Con el fin de aislar y calcular sólo la deformación de la imagen, toda contribución topográfica debe ser removida del interferograma original. Para ello, el procedimiento más común es la utilización de un DEM, y de la geometría de la imagen InSAR para producir un interferograma sintético, el cual es sustraído del interferograma para luego ser estudiado (Rosen, Hensley, & Joughin, 2000). Esta técnica, que calcula la diferencia entre la fase interferométrica total $\Delta\phi$ y la topografía del terreno se conoce como *Interferometría Diferencial* (o método de las 2 pasadas InSAR), y puede entenderse mejor de la siguiente manera:

$$\underbrace{\Delta\phi_{DinSAR}}_{Mov} = \Delta\phi_{total} - \underbrace{\phi_{topografia}}_{DEM} \quad (Ec. 19)$$

Naturalmente, para estos cálculos se desprecia la componente atmosférica que, al igual que el ruido de la señal, puede ser muy importante en algunos casos (Arbiol, 2001).

A modo de resumen, se posee la siguiente ecuación propuesta por R. Arbiol en “Aplicaciones de la tecnología InSAR a la Cartografía”:

$$\Delta\phi_{total} = \phi_{topografia} + \phi_{Movimiento} + \phi_{atm} + \phi_{ruido} \quad (Ec. 20)$$

De donde es posible plantear las siguientes suposiciones:

- Si no existe movimiento entre ambas observaciones: No sólo la fase provocada por el movimiento se anula ($\phi_{Movimiento} = 0$), sino también la fase inducida por la atmósfera y el ruido (debido a que provienen de la misma fuente). Obteniendo una fase interferométrica igual a la topografía superficial, a partir del cual es posible generar un DEM cuya sensibilidad dependerá de la separación de la línea de base entre ambas observaciones.
- Si existe movimiento entre ambas observaciones: Se realiza la diferencia entre la fase interferométrica total y la altura topográfica proporcionada con la ayuda de un DEM, obteniendo la fase interferométrica diferencial equivalente al movimiento superficial.

Para terminar este t3pico, un an3lisis detallado de la Ecuaci3n 18 revelar3 que la t3cnica de interferometr3a describe un nivel de exactitud mucho mayor frente a los cambios en la topograf3a (deformaci3n superficial) que a la topograf3a en s3 misma (altura superficial). Para demostrarlo, la ecuaci3n estar3 en funci3n de los par3metros del Sentinel-1, en donde H bordea los 693 Km, con $\lambda = 5,6cm$, $\theta = 30^\circ$ (En modo IW), se tiene:

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{22640} B_{\perp} h + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (\text{Ec. 21})$$

En este caso, para un interferograma con una l3nea de base perpendicular de $B_{\perp} = 100m$ y en ausencia de movimiento ($d = 0$), $1m$ de topograf3a produce un valor de fase cercano a los $3,2^\circ$. Sin embargo, para producir la misma fase se requieren apenas $0,2mm$ de deformaci3n en la superficie. Lo que explica c3mo la t3cnica de interferometr3a diferencial DInSAR es capaz de medir deformaciones de superficie con una precisi3n te3rica de tan solo unos pocos mil3metros.

2.3.6 Im3genes de Deformaci3n InSAR y su Interpretaci3n

A diferencia de las im3genes SAR por s3 solas, una imagen de deformaci3n InSAR se deriva de los componentes de fase entre las dos im3genes SAR superpuestas. Debido a que los sensores SAR poseen un 3ngulo de visi3n lateral, las im3genes de deformaci3n InSAR representan desplazamientos en la direcci3n de l3nea de visada, que incluye componentes verticales y horizontales. Al igual que el Sentinel-1, la mayor3a de los sensores de este tipo utilizan 3ngulos de elevaci3n menores a los 45° desde la vertical, y por lo tanto las im3genes InSAR enfocadas a estudiar las deformaciones de superficie son mucho m3s sensibles a desplazamientos verticales (levantamientos/subsidencias) que a los desplazamientos horizontales (Lu & Dzurisin, 2014).

Un interferograma en donde se muestra la deformaci3n superficial casi siempre es visualizado como un mapa con pseudo-colores (Fig. 16). En la imagen, cada franja representada por un espectro de colores que recorre desde el azul al violeta, al rojo, amarillo y verde, o viceversa, puede corresponder a un cambio de fase a trav3s de un cierto rango (casi siempre el equivalente a una fase 2π) o a una deformaci3n en la superficie del suelo en direcci3n de alcance con cierta magnitud (casi siempre la mitad del ancho de banda del SAR).

En la mayoría de los casos los colores por sí mismos no representan nada, sino los cambios entre ellos son los que representan una cierta cantidad de cambio de fase relativa de deformación.

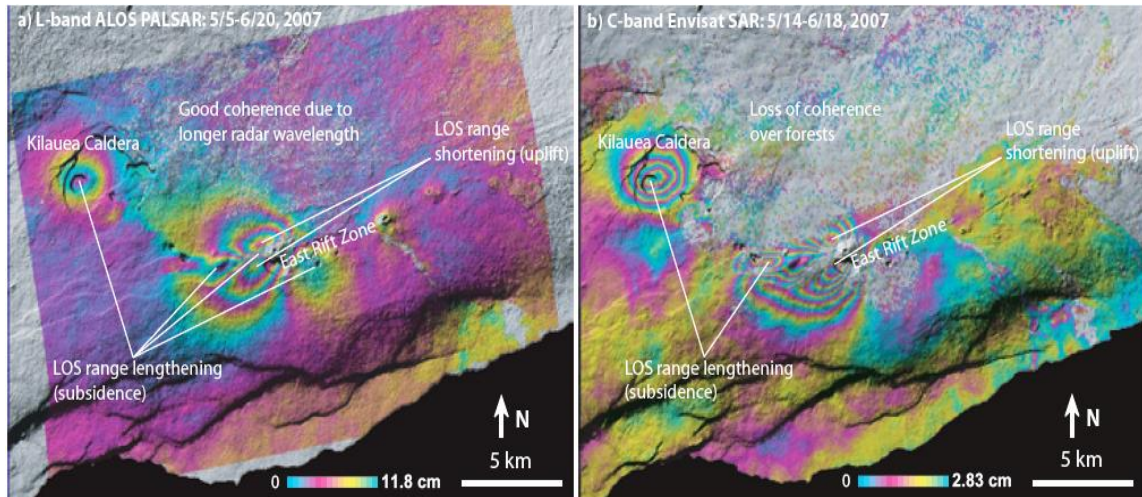


Figura 16: Muestra dos interferogramas generados a partir de datos PALSAR y SAR utilizando la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR) asociados a la erupción del Volcán Kilauea en Junio del 2007. La imagen a) fue generada a partir de 46 días de diferencia (5 de Mayo y 20 de Junio, 2007) utilizando una banda-L por imágenes ALOS PALSAR. La imagen b) fue generada a partir de 35 días de diferencia (14 de Mayo y 18 de Junio, 2007) utilizando una banda-C por imágenes Envisat SAR. Las líneas de base perpendiculares $B_{\perp}$ son de 320m y 36m para los interferogramas PALSAR y Envisat respectivamente. En ambas imágenes es posible observar una subsidencia tanto en la Caldera del volcán como en sus alrededores, mientras que en la zona Este del mismo se desarrolló un levantamiento de la superficie. Así también, es posible apreciar que en a) las franjas son menores en cantidad y abarcan mayor superficie cada una debido a la longitud de onda con que trabaja PALSAR (23,6cm), donde un ciclo representa un movimiento de 11,8cm de levantamiento o subsidencia en la dirección de alcance. Mientras que en b) la cantidad de franjas son mayores en número y cada una abarca menor superficie debido a la longitud de onda de SAR (5,6cm). Aun así, ambos interferogramas evidencian el mismo grado y carácter del movimiento volcánico en la superficie. FUENTE: Zhong Lu, USGS. "ALOS PALSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)", 2007.

Es imprescindible para la interpretación de un interferograma de movimiento, observar la progresión de los colores para poder discriminar entre un movimiento ascendente (levantamiento) o descendente (subsidencia); progresión que es completamente opuesta para ambos casos (Fig. 17). También, es posible inferir que la superficie en donde la deformación es más agresiva estará representada por una mayor concentración de franjas, mientras que aquellas superficies cuya área esté representada por colores uniformes indican que no hubo cambios relativos en la dirección de alcance (Lu & Dzurisin, 2014).

Por último, para simplificar la interpretación del interferograma, es recomendado observar el patrón de cambio de los colores desde el anillo más externo hacia el más interno; si el patrón se mueve en dirección opuesta al cambio de fase (Esto es, se acorta la fase, $2\pi \rightarrow 0$) entonces puede decirse que la superficie se *acerca hacia* el sensor, revelando un levantamiento de la zona, mientras que si los colores se mueven en la misma dirección que el cambio de fase (Esto es, se alarga la fase $0 \rightarrow 2\pi$), se infiere que la superficie se *aleja del* sensor, revelando un hundimiento de la zona o subsidencia.

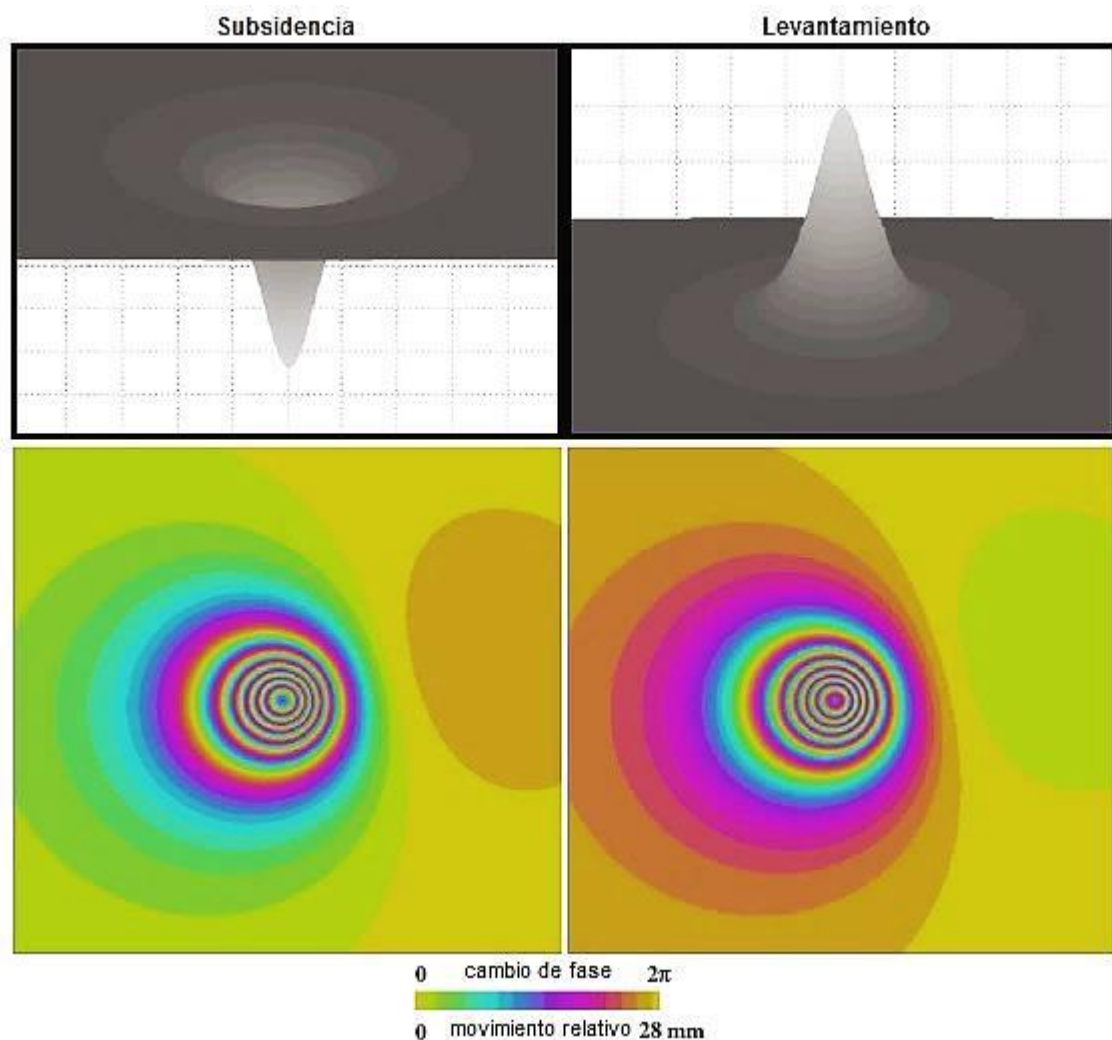


Figura 17: Representación y visualización de imagen InSAR. Cada franja representada por un ciclo de colores (amarillo, rojo, púrpura, cian, verde al amarillo) corresponde a 28mm de cambio en dirección de alcance, que corresponde a la mitad de la longitud de onda con que trabaja el ERS de Envisat. Notar que la progresión de color para movimientos de subsidencia (columna izquierda) es opuesta al movimiento de levantamiento (columna derecha). FUENTE: Zhong Lu, Daniel Dzurisin. "InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes".

2.4 Naturaleza de los Volcanes

2.4.1 Volcanes y la litósfera

En rigor, se puede decir que la actividad volcánica se ha estado pronunciando desde los inicios de la formación del planeta tierra, alterando y definiendo continuamente la misma forma y textura de la corteza terrestre. Y por lo tanto, no resulta exagerado declarar que el mismo ecosistema característico de cada región ha sido definido por los acontecimientos vulcanológicos propios de ese lugar.

Las erupciones volcánicas han tenido un efecto determinante en la historia geológica de la tierra, afectando no sólo la composición de la atmósfera, sino también al clima y la geoquímica de la superficie. Se cree que algunas de las erupciones más antiguas pueden haber tenido efectos significativos en la evolución biológica mediante la creación de condiciones invernales y extinciones masivas, como la conocida erupción en Yellowstone hace 640.000 años, o en Toba (Indonesia) hace 73.000 que provocó un invierno volcánico global que duró entre 6 y 7 años, o sin ir más lejos la conocida historia del volcán Krakatoa (Indonesia), que en Mayo de 1883 comenzó una serie de explosiones que se cubrió más del 10% del globo terráqueo con su nube volcánica, provocó tsunamis de más de 40 mts. de altura y mató a 36.417 personas (AON, 2008).

2.4.2 Distribución de la actividad volcánica

La actividad volcánica en la tierra está fuertemente relacionada al comportamiento de las placas tectónicas. La permanente interacción entre las placas de la corteza produce que la mayoría de los eventos volcánicos ocurran próximos a los límites de estas placas. Un ejemplo de esto es el “Cinturón de Fuego” (Figura 18), en donde están incluidas las costas que rodean el océano en ambos extremos del océano Pacífico, dibujando una línea en forma de herradura, que comienza en Chile, acompaña a la Cordillera de los Andes hasta Colombia y continúa subiendo hasta Estados Unidos y parte de Canadá, pasando por Centro América. A la altura de las islas Aleutianas dobla y comienza su descenso por las costas de Rusia, Japón, Indonesia hasta llegar a Nueva Zelanda. Sobre éste “cinturón” que recorre más de 40.000 Km se ha registrado la mayor actividad sísmica y volcánica del mundo (D.C, 2014). El movimiento de estas placas puede ser considerado

como la manera que posee la tierra para enfriarse y transmitir la energía y el calor interno a la superficie terrestre (Francis & Oppenheimer, 2004).

Como se aprecia en la siguiente figura, la corteza terrestre está conformada por numerosas placas que la cubren, en cuyos márgenes -como ya se explicó- se producen todo tipo de interacciones sísmicas y volcánicas. Además, existen los llamados “núcleos de actividad volcánica” causados por verdaderas recámaras calientes ubicadas al interior del manto terrestre, y conducidos durante millones de años por penachos aislados que funcionan como compuertas de transferencia magmática desde el manto terrestre.

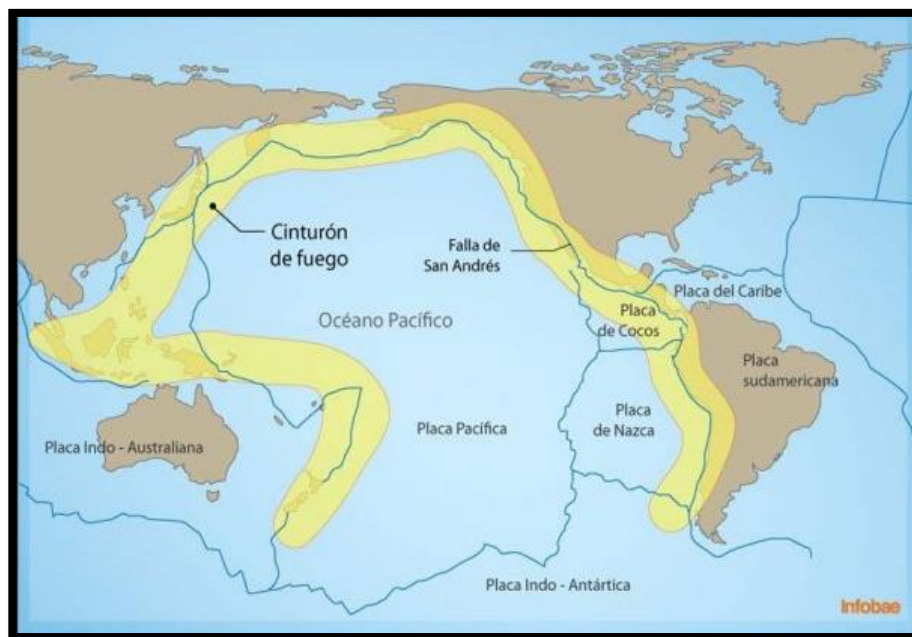


Figura 18: Cinturón de fuego del Pacífico. Fuente: Infobae.

2.4.3 Clasificación de las erupciones volcánicas

Los volcanes activos ubicados en los bordes de las placas tectónicas representan más del 94% de todas las erupciones, y como es de esperar, cada erupción varía en energía e impacto. Es por eso que en 1952 los vulcanólogos Christofer G. Newhall y Stephen Self desarrollaron y propusieron un índice capaz de categorizar la magnitud de las erupciones de acuerdo al volumen total de los productos explosivos que participan en cada actividad volcánica, como la lava, piroclastos y la ceniza volcánica; es el llamado VEI (Volcanic Explosivity Index). La escala recorre los números del 0 al 8, en donde cada unidad en aumento indica una erupción 10 veces más potente (Newhall & Self, 1982). A modo de

ejemplo, el volcán Krakatoa (1883) fue catalogado como VEI=6 ($>10 \text{ Km}^3$ de material piroclástico), el Tambora (1815) como VEI=7 ($>100 \text{ Km}^3$) y la reciente erupción del volcán Calbuco como VEI=5 en base al material expulsado ($> 1 \text{ Km}^3$).

En la tabla 2, se muestra cómo la magnitud de una erupción volcánica definida por la altura de la pluma y el volumen del material volcánico, posee una relación inversa a la frecuencia con que el fenómeno acontece, denotando un comportamiento semejante al que sucede con los terremotos. De esta forma se comienza con el volcán Kilauea, de tipo Hawaiano, con una frecuencia diaria o continua y se termina con erupciones descritas como Apocalípticas como lo fue la erupción en Yellowstone hace aprox. 640.000 años.

Índice de Explosividad Volcánica (VEI)						
VEI	Clasificación	Descripción	Altura Pluma	Volumen material volcánico	Frecuencia	Ejemplo
0	Hawaiano	No-Explosiva	<100 mts.	$>1.000 \text{ m}^3$	Diariamente	1983 Kilauea, HAW
1	Hawaiano/ Estromboliano	Ligera	100-1000 mts.	$>10.000 \text{ m}^3$	Diariamente	2002 Nyiarongongo, CON
2	Estramboliano / Vulcaniano	Explosiva	1 – 5 Km	$>1.000.000 \text{ m}^3$	Semanalmente	2015 Villarrica, CHI
3	Vulcaniano	Violenta	3 – 15 Km	$>10.000.000 \text{ m}^3$	Anualmente	1985 Nev del Ruiz, COL
4	Vulcaniano/ Pliniano	Cataclísmica	10 – 25 Km	$>100.000.000 \text{ m}^3$	Cada 10 años	1982 Galunggung, IND
5	Pliniano	Paroxística	>25 Km	$>1 \text{ km}^3$	Cada 100 años	2015 Calbuco, CHI
6	Pliniano/ Ultra-Pliniano	Colosal	>25 Km	$>10 \text{ km}^3$	Cada 100 años	1883 Krakatoa, IND
7	Ultra-Pliniano	Mega-Colosal	>25 Km	$>100 \text{ km}^3$	Cada 1.000 años	1815 Mont Tambora, IND
8	Ultra-Pliniano	Apocalíptica	>25 Km	$>1000 \text{ km}^3$	Cada 10.000 años	640.000 AP Yellowstone EEUU

Tabla 2: Índice Explosivo Volcánico (VEI). Fuente: (Siebert, Simkin, & Kimberly, 2010).

En su libro “Volcanoes as Landscape forms” (“Volcanes como formas de paisaje”) publicado en 1952, el autor Charles Andrew Cotton define cuatro tipos de erupción volcánica: Hawaiana, Stromboliana, Vulcaniana y Plinianas, mencionando que la actividad de un solo volcán es capaz -con bastante frecuencia- de cambiar de un tipo a otro, combinando incluso características de más de un tipo (fenómenos mixtos). Las cuatro clasificaciones se describen a continuación (Ver figura 19):

- **Hawaiana:** Describe una gran cantidad de líquido efusivo (en contraste con el explosivo), es derramada lava basáltica durante tiempos prolongados. Cuando estos

trozos caen pueden generar flujos en forma líquida, o en otros casos construir colinas llamadas “conos de salpicadura”. Si la lava fluye con suficiente rapidez puede viajar varios kilómetros antes de endurecerse por enfriamiento. No suele producir cenizas volcánicas. El origen de su nombre se lo debe al volcán activo en Hawai, el Kilauea

- **Stromboliana:** Corresponde a la actividad descrita por el volcán Villarrica en Febrero del 2015. La lava que surge del cráter es de naturaleza basáltica pero algo más viscosa que la emitida por la erupción Hawaiana, y es escupida por explosiones o fuentes de gas, resultando en acumulaciones alrededor del cráter, como salpicaduras, escoria y bombas volcánicas. Generalmente es acompañada por una nube oscura.
- **Vulcaniana:** A diferencia de las dos anteriores, la lava es altamente viscosa y no alcanza a permanecer mucho tiempo en contacto con la atmosfera porque se consolida en el cráter. El fenómeno eruptivo puede llegar a ser tan extremadamente explosivo que es capaz de expulsar el material a velocidades superiores a los 800 Km/hr. Se emiten grandes corrientes piroclásticas, mezclas de roca, gas, ceniza caliente y grandes nubes que alcanzan varios kilómetros de altura distribuidas extensamente por los vientos.
- **Plinianas:** La lava es descrita por una viscosidad extrema y se forman enormes cantidades de material piroclástico. Existen nubes brillantes que resultan de la mezcla de cenizas sumamente finas y fragmentos más gruesos de rocas incandescentes impregnadas por los gases calientes cuyo comportamiento es conocido como “emulsión” – un fluido extremadamente móvil – que es altamente denso y actúa con gran velocidad en pendientes, manteniendo contacto con el suelo. La columna eruptiva contenedora de ceniza y gas podría elevarse hasta 40 Km a velocidades muy altas. Debido a la altitud de la ceniza, podría terminar a varios miles de kilómetros de distancia desde el cráter. Este tipo de erupción es comparada con una explosión nuclear, debido a la forma que adquiere la columna volcánica en forma de hongo.
- **Ultraplinianas:** Semejante comportamiento con las erupciones Plinianas variando en su magnitud, elevando una columna de cenizas por sobre los 40 Km. En Chile no hay registro científico de este tipo de erupciones, pero se cree que el volcán Maipo tuvo una erupción de esta envergadura hace 450.000 años aprox. Alcanzando un índice VEI igual a 7 y expulsando más de 350 Km³ de material piroclástico a la atmósfera.

Como se explica, la viscosidad del magma es un factor que contribuye directamente en la magnitud explosiva de los volcanes, esto debido a que el magma de alta viscosidad retiene los gases provenientes de la cámara magmática incrementando la presión, lo cual aumenta el potencial de una emisión explosiva. Por último, también se definen las erupciones del tipo **Freatomagmáticas**, o de **Surtseyan** que ocurren cuando el material magmático entra en contacto con aguas subterráneas. Este contacto produce la expansión automática del agua y su conversión a vapor de manera explosiva, creando nubes de ceniza y vapor de agua. Este tipo de erupciones se dan cuando los movimientos generados por el volcán logran romper la superficie. Generalmente su VEI varía de 2 a 4. Un ejemplo de ello, fue la erupción del volcán Copahue en la región del Bio-Bio en 1992.



Figura 19: Tipos de erupciones volcánicas. Fuente:(García Mora, 2014).

Considerando el trabajo de Cotton, se puede clasificar la crisis volcánica del Calbuco en Abril del 2015 dentro de la categoría Pliniana, por describir una columna de ceniza que alcanzó más de 15 Km de altura e inyectar 240 millones de metros cúbicos de material particulado a la atmósfera.

2.4.4 Peligros volcánicos asociados a una erupción

Los peligros volcánicos están asociados a distintos elementos provenientes de la actividad volcánica y pueden significar potenciales amenazas para la vida del hombre y sus quehaceres, afectando las regiones más próximas al volcán. Entre estos peligros se encuentran cuatro claramente definidos (The COMET Program, NASA, 2011):

- **Tefra:** Alude a todo fragmento de lava o roca volcánica de cualquier tamaño arrojado al aire por las explosiones de gases calientes de una erupción. Esta categoría abarca desde las grandes bombas y bloques, hasta los escombros más pequeños y livianos como la ceniza. A diferencia de la tefra más grande que cae a poca distancia, el viento transporta los fragmentos más pequeños lejos del volcán (Ver anexo 4).
- **Flujos piroclásticos:** Se define como el colapso gravitacional de cenizas, piedra pómez, fragmentos de roca y gases volcánicos calientes que descienden junto al suelo por las laderas de un volcán en forma de avalanchas a velocidades capaces de alcanzar los 100 Km/h. La temperatura de estos flujos puede variar entre los 200°C y 700°C, temperatura más que suficiente como para fundir la nieve y el hielo y convertirse en lahares, además de quemar y carbonizar todo tipo de vegetación.
- **Lahares:** Se refiere a una mezcla de materiales volcánicos sólidos, que mezclados con agua caen por efecto de la gravedad, descendiendo a gran velocidad por su naturaleza líquida. Según las propiedades del flujo (velocidad, densidad, cantidad y temperatura) variará su capacidad de destrucción.
- **Lava:** Son masas de roca fundida que se desparraman por la superficie terrestre. Estos flujos amenazan a todo lo que se encuentre en su camino inmediato, no sólo por su intenso calor, sino porque puede cubrir cualquier cosa y derretir la nieve o el hielo que encuentre y provocar lahares. Su poder destructivo dependerá de su composición química, viscosidad, cantidad y velocidad de descarga, así como de la disposición topográfica del terreno y el ángulo de pendiente. Solidificada ésta, puede transformar por completo un paisaje y alterar por siempre el ecosistema cercano al volcán.

2.4.5 Peligros volcánicos registrados en Erupción del Calbuco 2015

En este contexto, además de identificar la erupción del Calbuco el 2015 dentro de la categoría Sub-Pliniana, los peligros registrados por el SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería) del volcán Calbuco durante su pulso eruptivo fueron: Una columna eruptiva que alcanzó los 15 Km de altura dispersada hacia el Norte, NorEste y Este alcanzando territorio argentino. Esta columna estuvo acompañada de una continua emisión de fragmentos de material incandescente, que no superaron los 5 kilómetros en torno al edificio volcánico. El volcán también acumuló material piroclástico del tipo ceniza y pómez cuyo espesor varió desde decenas de centímetros en la Región de Los Lagos hasta algunos milímetros en las regiones de La Araucanía y Los Ríos. La ONEMI también informó del desborde del Rio Blanco que afectó a un puente y viviendas aledañas. La institución también detectó lahares que viajaron hasta una distancia cercana a los 15 kilómetros por cauces que descienden del volcán y logró determinar cambios morfológicos en las laderas del volcán que consistieron en al menos seis centros de emisión localizados sobre el domo antiguo en los costados Oeste, SurOeste y Sur de éste (ONEMI, 2015).

2.4.6 Actividad volcánica previa registrada en la Erupción del Calbuco 2015

Desde Febrero del 2015, el macizo del Calbuco mostró un ligero aumento de su actividad, con eventos sísmicos tipo VT (Vulcano-Tectónicos)², registrándose un total de 53 eventos sísmicos durante el periodo entre el 01 de Enero y 21 de Abril del mismo año, de los cuales 48 fueron catalogados del tipo VT, con tasas de ocurrencia de <1 evento por día a principios de 2015 y 1-2 eventos por día en los días previos a la erupción. También, un interferograma realizado por la Universidad de Cornell, utilizando imágenes Sentinel-1 del 28 de Marzo y 21 de Abril, sugieren que días antes de la erupción no existieron señales evidentes de algún tipo de proceso de deformación relacionadas con la dinámica del sistema volcánico, lo cual fue corroborado con las mediciones obtenidas por el inclinómetro ubicado a 4,5 Km al Oeste del Volcán (Valderrama & Cardona, 2016).

² Este tipo de sismos resultan del quebrantamiento abrupto de las rocas que conforman la estructura del volcán. Esta fractura se produce por procesos de origen magmático, como por ejemplo la intrusión o llegada de magma desde el interior del volcán hasta niveles más cercanos a la superficie (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, 2013).

3. METODOLOGÍA

Con el fin de alcanzar los objetivos ya estipulados, la presente investigación se compone de sucesivos procedimientos a seguir. Casi la totalidad de ellos son de índole informáticos y por lo tanto requerirán del uso de un software especializado en la manipulación de imágenes satelitales con el nivel de complejidad que implica. A continuación el diagrama de flujo a seguir, que inicia con la adquisición de las imágenes SAR, y culmina con la generación y visualización de un interferograma.

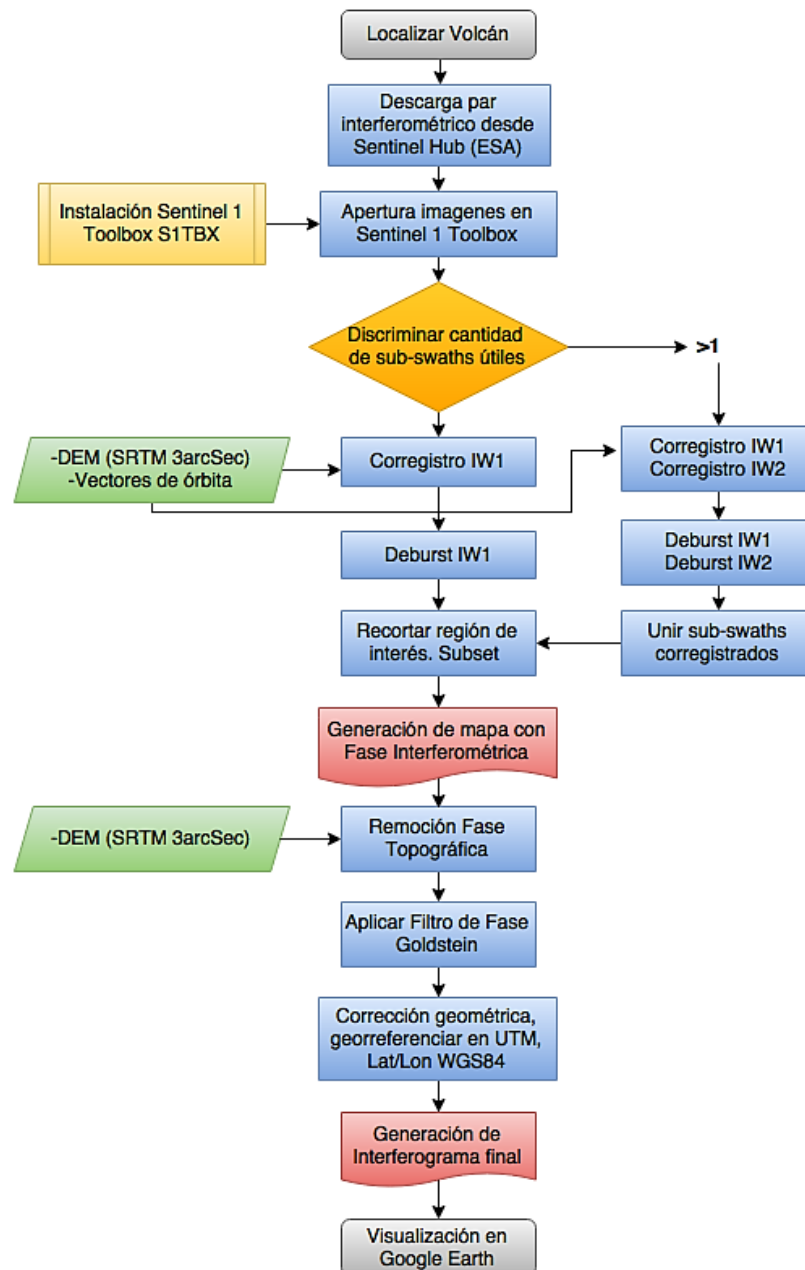


Figura 20: Diagrama de flujo con metodología a seguir. Fuente: Elaboración propia.

4. DESARROLLO

4.1 Localización del Volcán Calbuco

Para comenzar, se localiza el volcán en estudio ubicándolo dentro del mapa. Esta localización se puede llevar a cabo en la misma plataforma desarrollada por la ESA bajo el nombre de Sentinel Scientific Data Hub³, donde se encuentran gratuitamente disponibles los productos Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3.

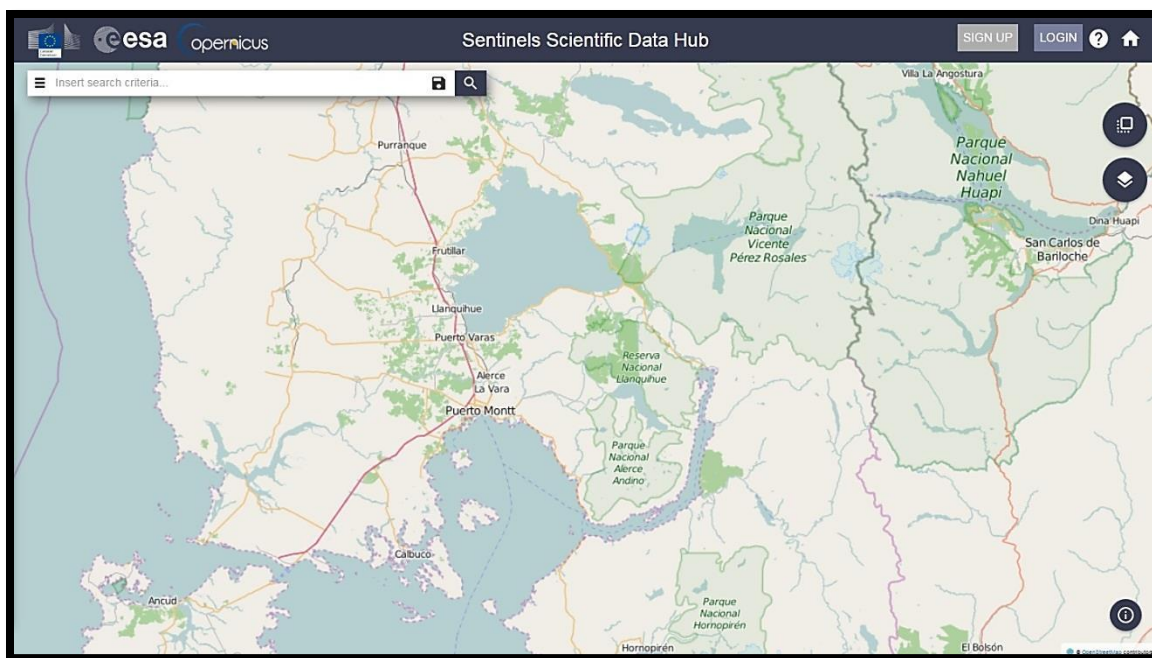


Figura 21: Localización del Volcán. Fuente: Sentinel Hub, ESA.

4.2 Descarga de par Interferométrico SAR

Para la descarga de imágenes, es necesario registrarse y obtener un perfil con usuario y contraseña. Para encontrar las imágenes de trabajo, se necesita ingresar los criterios de búsqueda y delimitar la región de interés. En este caso, se encierra la región que rodea al V. Calbuco, se marca la opción para Sentinel-1 y se ingresa el periodo de captura e ingestión de imágenes en Abril de 2015, se especifican el tipo de producto Single Look Complex, el modo de adquisición Interferometric Wide swath y la polarización deseada (VV o VV+VH). La interfaz de búsqueda luce como en la figura 22.

³ La plataforma se abre directamente desde <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

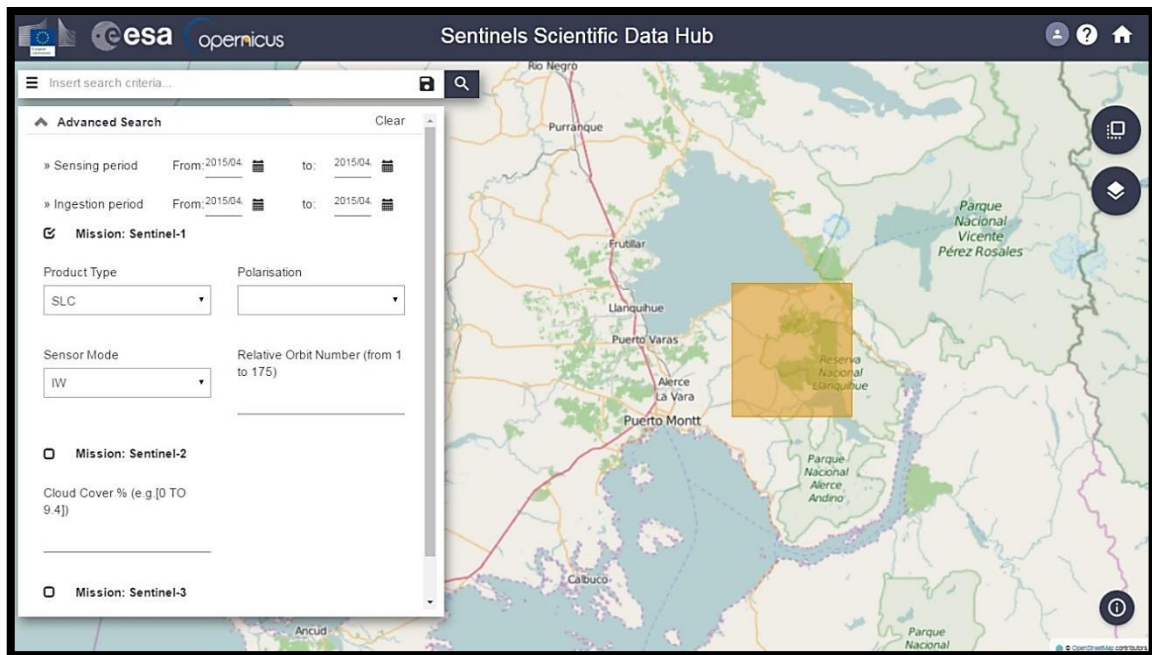


Figura 22: Ingreso de parámetros de búsqueda. Fuente: Sentinel Hub, ESA.

Automáticamente el buscador despliega todas las imágenes capturadas por el sensor y disponibles en la plataforma bajo las especificaciones ya ingresadas. Para elegir un par de imágenes SAR interferométricamente hablando compatibles, se debe tener especial cuidado tanto en la polarización

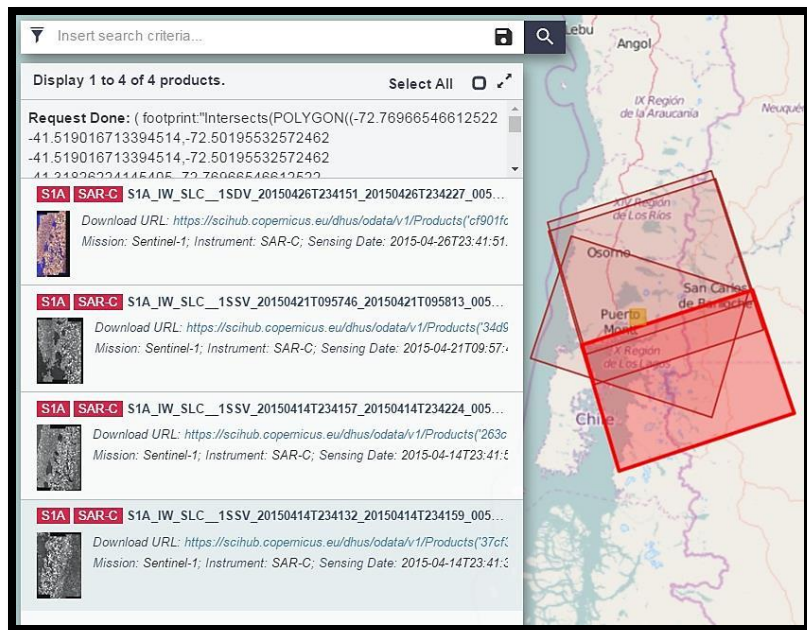


Figura 22: Búsqueda y descarga de par interferométrico. Fuente: Sentinel Hub, ESA.

como en la captura ascendente o descendente de las imágenes. Para la descarga, se debe considerar que cada imagen Sentinel-1 pesa aproximadamente entre 2 a 3 Gb si posee un solo sentido de polarización (VV o HH) y entre 5 a 6 Gb si posee doble polarización (VV+VH o HH+HV). Las imágenes descargadas para la obtención del interferograma son las correspondientes al 14 y 26 de Abril (Pre y Post erupción).

4.3 Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) y apertura de imágenes SAR

Los procedimientos que continúan serán efectuados en el software Sentinel-1 Toolbox, desarrollado y distribuido por la Agencia Europea Espacial ESA. Este programa abarca una colección de herramientas de procesamiento y análisis capaz de soportar los formatos de misiones SAR de la ESA. Estas misiones incluyen Sentinel-1, ERS-1&2 y ENVISAT. S1TBX permite la ejecución simultánea de múltiples procesos de forma independiente; incluye herramientas de calibración, filtros de speckle, corrección, ortorectificación, mosaikado, polarimetría e interferometría (ESA).

Tras la descarga de las imágenes SAR, éstas se abren directamente desde S1TBX. La visualización de la imagen se obtiene tras desplegar las bandas y seleccionar la de Intensidad (físicamente hablando, componente de Amplitud). La interfaz de S1TBX con la imagen SAR visualizada se ve de la siguiente forma:

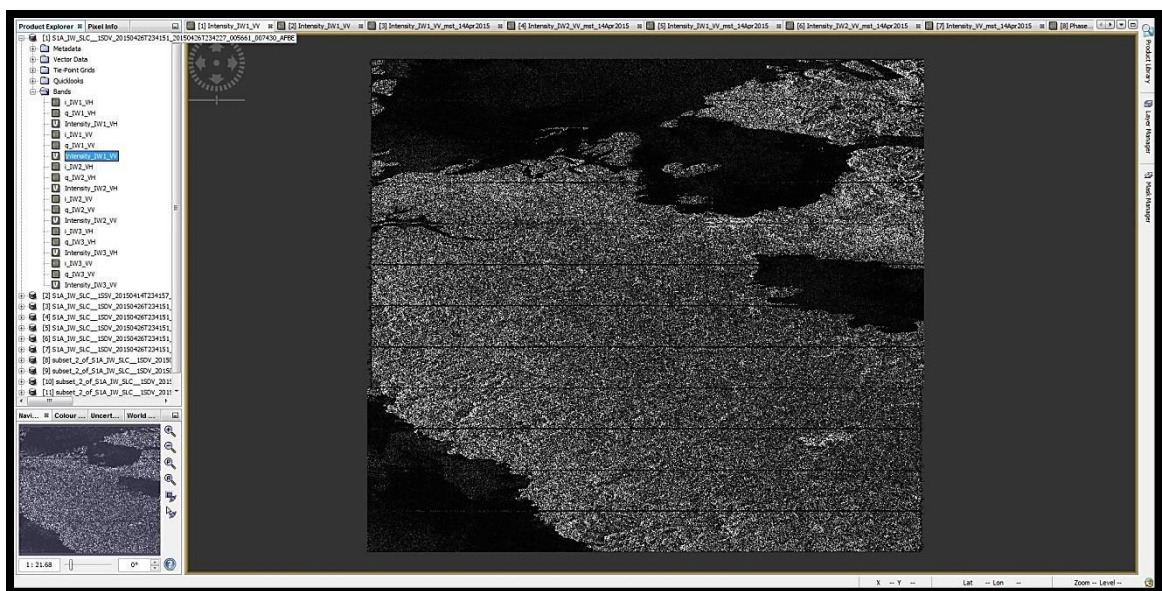


Figura 23: Interfaz S1TBX que muestra imagen SAR contenedora de las laderas del V.Calbucu IW1.

Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

Como se comentó en la sección 2.1.6, las imágenes adquiridas en modo IW se componen de 3 escenas o subswath (Fig. 12), llamadas IW1 (Interferometric Wide swath 1), IW2 e IW3, que abarcan desde la escena más cercana al sensor hasta la más lejana respectivamente. A su vez, cada subswath se subdivide en franjas llamadas Burst, como lo muestra la figura. El edificio volcánico junto con sus laderas más próximas a estudiar, se encuentran comprometidos en el IW1 e IW2. Notar que las imágenes SAR aún no se encuentran georreferenciadas, por ello el orden desorientado del sector geográfico.

4.4 Corregistro

Este paso es esencial antes de comenzar con el proceso interferométrico. Para comenzar, se asigna la imagen del 14 de Abril como la principal (master image) y la del 26 de Abril como secundaria (slave image), y se selecciona el subswath IW1 para comenzar. Este proceso permite que los pixeles de la imagen secundaria sean “removidos” con el fin de ser alineados con la imagen maestra. Conceptualmente, este procedimiento asegura que cada punto en tierra se corresponda con la misma coordenada (rango, azimuth) de pixel tanto en la imagen maestra como en la secundaria, representando cada punto de la superficie en el mismo pixel. Para tal efecto es imprescindible contar con un DEM de la zona (SRTM 3sec) y los datos orbitales para cada imagen (estos datos contienen información acerca de la posición y velocidad del satélite durante la adquisición de cada imagen), ambos automáticamente descargados por el software.

El corregistro de las imágenes SAR correspondiente al subswath IW1 del 14 de Abril luce de la siguiente forma:

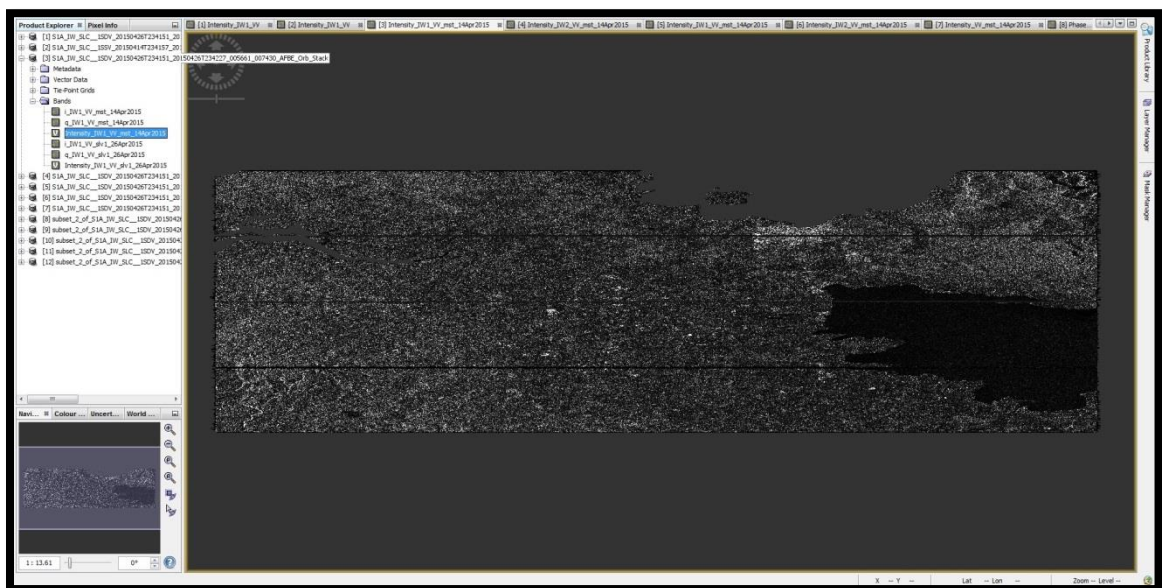


Figura 24: Corregistro de imágenes SAR sub-swath1 14 de Abril 2015. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

De la misma manera este procedimiento se repite con el subswath IW2.

4.5 Deburst y Merge

La operación Deburst es utilizada para juntar cada franja Burst de cada subswath ya corregistrado en una sola imagen. La diferencia es clara y permite trabajar el producto de forma más compacta. Esta operación aplicada a la imagen SAR subswath IW1 del 14 de Abril luce de la siguiente forma:

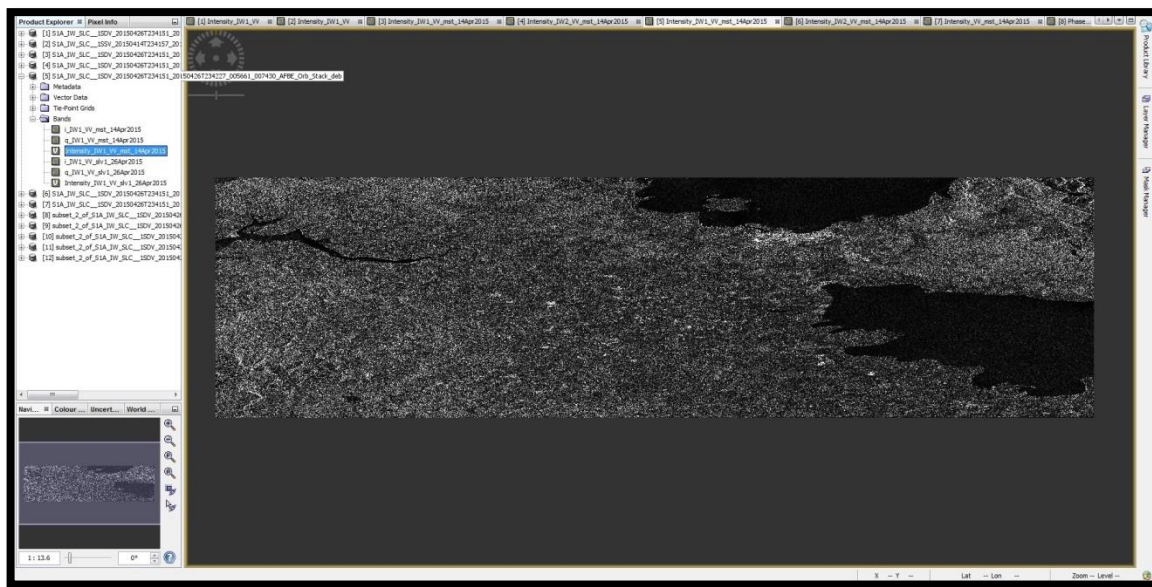


Figura 25: Deburst aplicado a subswath IW1 del 14 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

Posteriormente la operación Merge es utilizada para ensamblar dos subswaths distintos siempre que éstos se encuentren uno al lado del otro, ésta aplicada a los subswaths IW1 e IW2 correspondientes al 14 de Abril se ve así:

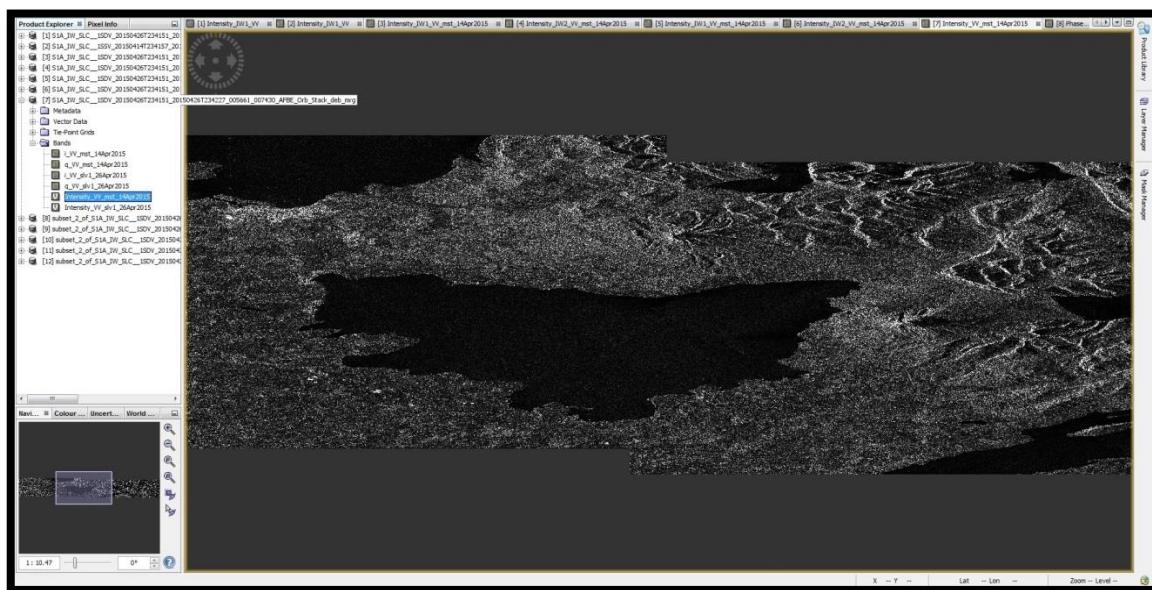


Figura 26: Unión Merge aplicado a subswaths IW1 e IW2 del 14 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

4.6 Subset y fase interferométrica

La función Subset incluida en S1TBX resulta de gran utilidad cuando se trata de pequeñas regiones de interés en medio de grandes regiones que son abarcadas por la imagen SAR. Esta función permite limitar el área de estudio por medio del recorte de la imagen y de paso acortar así los tiempos de procesamiento en las siguientes operaciones. La región de interés recortada abarca desde el volcán Osorno hasta la ciudad de Pto. Montt, pasando por el volcán Calbuco y sus laderas más próximas.

Una vez recortada la imagen SAR, los pasos a seguir son netamente interferométricos. Para comenzar con la generación de la fase interferométrica, se explicó en la sección 2.3.1 que ésta es formada mediante la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la secundaria. La amplitud de ambas imágenes es multiplicada mientras que la fase queda representada por la diferencia de fase entre las dos imágenes. Este complejo procedimiento matemático es realizado automáticamente por S1TBX mediante la función “Interferogram Formation”, en esta función también se extrae la fase de tierra plana ϕ_{flat} descrita en la sección 2.3.3. La fase interferométrica resultante de la región de interés, se ve de la siguiente manera:

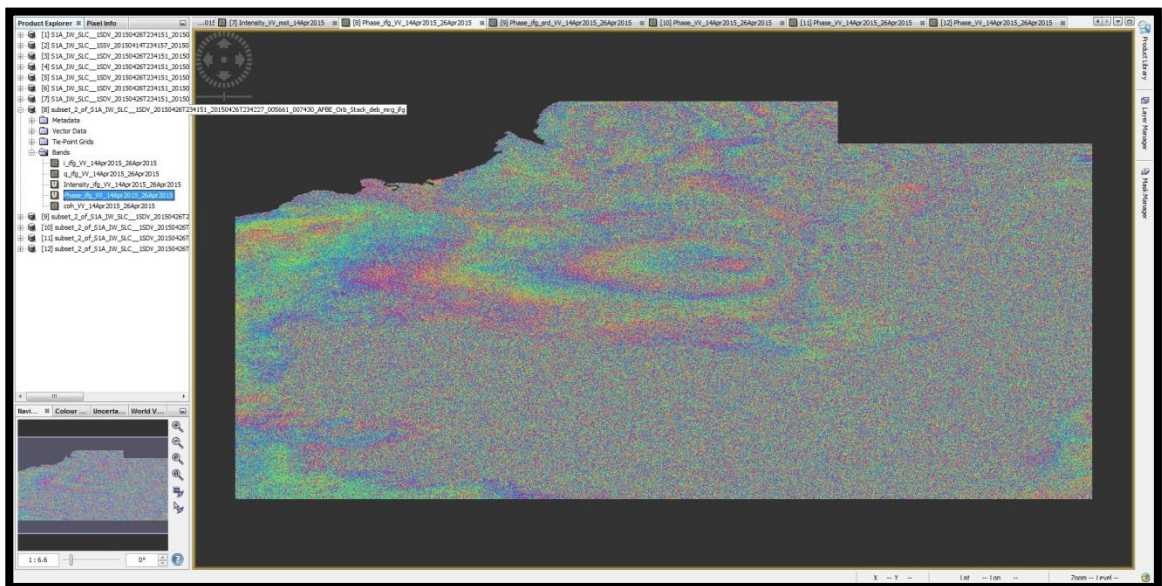


Figura 27: Fase interferométrica en bruto entre 14 y 26 de Abril. Fuente: Elaboración propia desde S1TBX.

4.8 Filtro de Goldstein

La fase interferométrica observada en la figura 29 continúa visualmente distorsionada. Los principales factores que contribuyen en ésta distorsión son provenientes de ruidos termales⁴, cambios temporales, o errores aleatorios en los procesos previos. El algoritmo de filtrado ideado por Goldstein y Werner el año 1998, mejora significativamente la visibilidad de los anillos en un interferograma y reduce el ruido inducido por factores externos decorrelacionados (Goldstein & Werner, 1998). Este filtro alcanza sus mejores resultados al suavizar la fase en regiones con altas correlaciones, mientras que resulta inútil en zonas donde la correlación es nula, como en el lago Llanquihue o la ladera Nor-Este del volcán, en donde se evidenció la mayor cantidad de ceniza volcánica caída durante la crisis.

El filtro de Goldstein aplicado al interferograma luce de la siguiente manera:

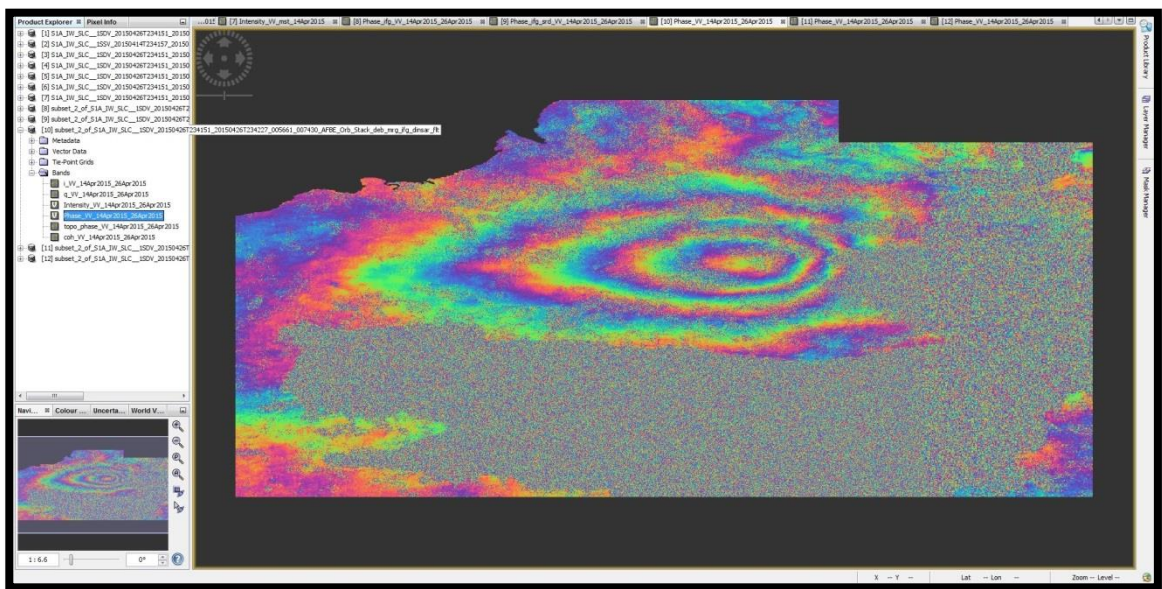


Figura 30: Filtro de Goldstein aplicado a interferograma. Fuente: Elaboración propia de S1TBX.

⁴ Los ruidos termales son introducidos a causa de que el radar, que opera a temperaturas distintas de cero °C, observa objetos con temperaturas calientes, lo cual induce movimientos térmicos de los electrones en el sistema radar (Bürgmann, Rosen, & Fielding, 2000)

4.9 Corrección geométrica

Para poder visualizar correctamente el interferograma obtenido, éste debe encontrarse debidamente posicionado en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas con un Datum específico, este posicionamiento es llamado georreferenciación de la imagen. En este caso, el Datum a utilizar corresponde al WGS84 (World Geodetic System 84), localizando al volcán en el Huso 19 del sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), estos parámetros son nuevamente ajustados en el S1TBX.

El interferograma georreferenciado luce de la siguiente manera:

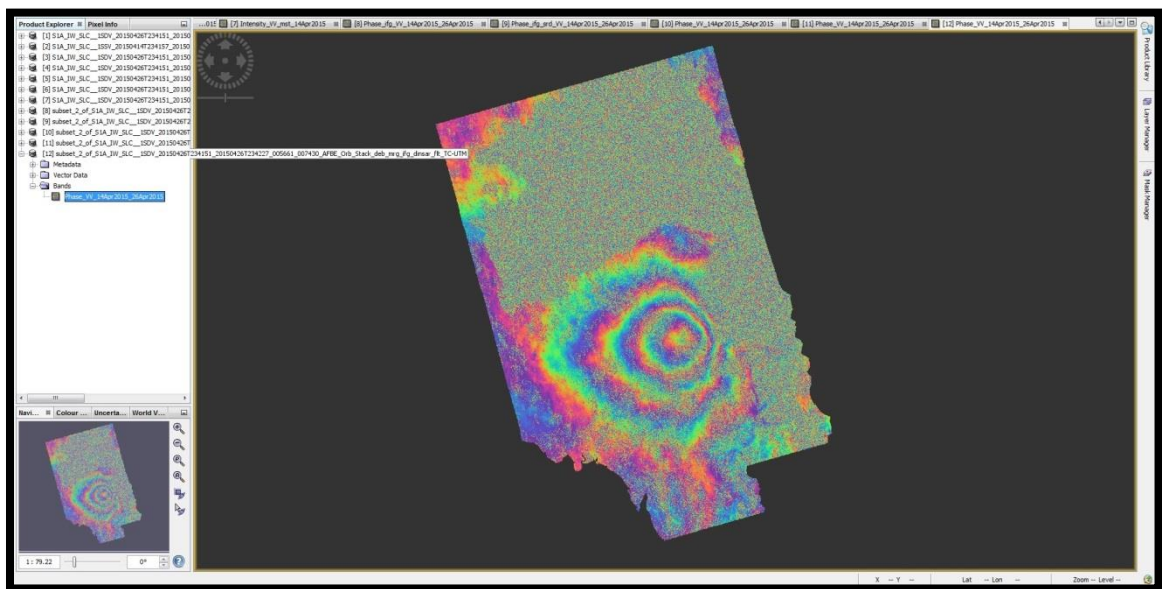


Figura 31: Interferograma georreferenciado en UTM WGS84. Fuente: Elaboración propia de S1TBX.

En la nueva imagen ya es posible discriminar la ubicación del lago Llanquihue en el sector superior o la comuna de Pto. Montt en la parte inferior izquierda, pero aún no se logra localizar a ciencia cierta la ubicación del volcán Calbuco dentro del mismo interferograma. Para ello resulta ventajoso contar con el software de visualización gráfica del globo completo provisto de mapas tridimensionales, Google Earth.

4.10 Visualización en Google Earth

Para montar una imagen externa en Google Earth se requiere una georreferenciación en el sistema de coordenadas Lat/Lon WGS84, el cual también se encuentra disponible en las herramientas de S1TBX. Tras georreferenciar el interferograma en este nuevo sistema de coordenadas y montarlo en Google Earth, la nueva imagen se ve como sigue:

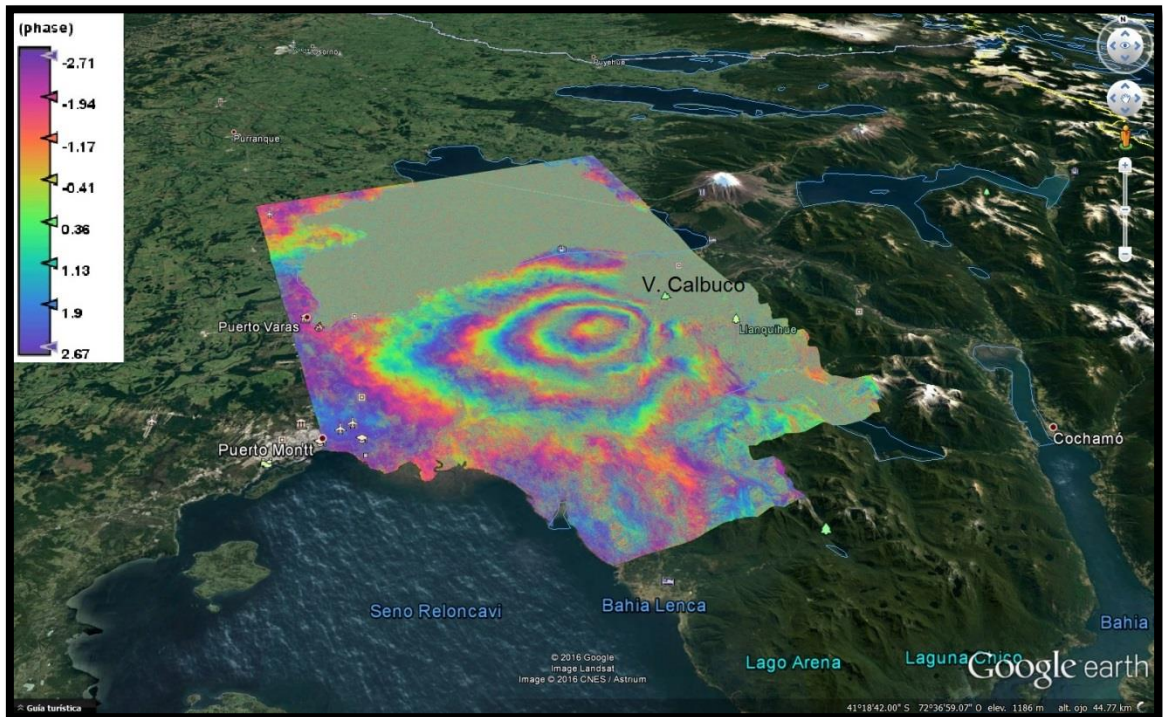


Figura 32: Interferograma visualizado en Google Earth. Fuente: Elaboración propia desde Google Earth.

Como logra verse de forma más clara, el volcán Calbuco se encuentra ubicado al borde Este de los anillos interferométricos que revelan un notable patrón de deformación según la regla de interpretación InSAR estudiada en el capítulo 2.3.6. A estas alturas ya es posible dar cuenta de la ubicación real del volcán y la peligrosa cercanía que hay entre la deformación asociada al último episodio volcánico con las comunas de Puerto Varas y Puerto Montt.

5. INTEGRACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

Al observar detenidamente el interferograma obtenido mediante el proceso de interferometría diferencial en el capítulo anterior, la escala de Fase desplegada automáticamente al costado izquierdo de Google Earth permite analizar tanto la cantidad como la cualidad del movimiento que tuvo lugar en las laderas aledañas al volcán Calbuco durante su última actividad eruptiva del tipo Pliniana en Abril del 2015.

La secuencia con que se mueven los colores dentro de un interferograma resulta un factor clave al intentar discriminar entre un movimiento ascendente o descendente del terreno en cuestión. Según la regla interpretativa descrita en 2.3.6: si al observar el color de los anillos comenzando desde el más externo hasta el más interno, el valor de la fase se dirige desde los valores positivos hacia los negativos ($2,67 \rightarrow -2,71$), entonces el orden sugiere un *acercamiento* de la superficie al sensor, es decir, esta superficie describe un *levantamiento*; en cambio, si la secuencia de los colores se dirige desde los negativos a los positivos ($-2,71 \rightarrow 2,67$), como es el caso en observación, entonces el orden sugiere un *alejamiento* relativo de la superficie al sensor, y por lo tanto un **movimiento de subsidencia o hundimiento**; esto se debe a que la fase interferométrica representa una medida de *distancia* entre el Sensor que captura la imagen y la superficie observada, la cual puede verse disminuida (se acorta distancia) como amplificada (se incrementa la distancia). Considerando que por cada ciclo completado se tiene la mitad de la longitud de onda con que trabaja el satélite radar, es decir, $\sim 2,8\text{cm}$ para Sentinel-1A, resulta correcto estimar que **el flanco Sur-Oeste del V. Calbuco se hundió aprox. 12cm en la dirección Línea de Visada (Line of Sight)**, ya que la cantidad de anillos observados en el interferograma son cuatro.

6. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La deformación superficial estudiada y calculada mediante la técnica de interferometría diferencial DInSAR, se considera una de las más precisas que haya podido desarrollar la humanidad; su precisión sub-métrica y hasta milimétrica, sumado a la vasta cobertura espacial que ofrece, hace que esta tecnología marque un antes y un después en el estudio de eventos con naturaleza sísmica o volcánica. Siendo una técnica muy joven y desconocida en el país, la Interferometría con Radar de Apertura Sintética tiene mucho que decir frente a la realidad que Chile enfrenta cada año, como lo sería un estudio asociado a terremotos, inundaciones, relaves mineros, impactos superficiales producidos por minas subterráneas, aluviones o socavones en ciudades costeras.

Las imágenes SAR destinadas a levantar modelamientos de deformación superficial, poseen una clara ventaja frente a los puntos de observación adquiridos por estaciones GPS o inclinómetros. Esto debido principalmente a que las imágenes SAR proveen una cobertura espacial que ni una densa red de sensores in situ podría superar. Sin embargo, por otra parte se debe considerar que tanto las estaciones GPS como los inclinómetros poseen una resolución temporal que es imposible para InSAR debido a que el ciclo orbital que utiliza éste, generalmente toma varios días o semanas. En situaciones peligrosas, InSAR ofrece la ventaja adicional, que consiste en prescindir de observadores en terreno, evitando no sólo poner en riesgo la integridad física de los profesionales sino también de los instrumentos (Lu & Dzurisin, 2014). Por lo tanto, se deduce que para realizar un estudio en donde grandes riesgos y peligros se ven inmersos, como lo es en la actividad volcánica, la combinación de observaciones InSAR periódicas y datos continuos proporcionados por sensores in situ (GPS, inclinómetros, etc.) es considerado el más adecuado y preciso.

Otra ventaja que destaca de la tecnología InSAR, es el fácil acceso que hoy en día las grandes compañías y agencias espaciales como la ESA están dispuestas a proveer en forma completamente liberada. Los datos y productos obtenidos por el satélite Sentinel-1A bajo el alero del programa espacial y medioambiental europeo Copernicus, están abiertamente disponibles y libres de costo para todo tipo de usuarios, incluidas las instituciones de la Unión Europea, instituciones Estatales, sector privado y la comunidad

científica en su totalidad; de la misma forma, también el software S1TBX se encuentra liberado para todo aquél interesado en manipular imágenes Sentinel-1, haciendo de esta poderosa técnica una herramienta accesible a cualquier interesado. Considerando las altas inversiones que significa la adquisición, implementación y mantenimiento de una red de monitoreo basado en tecnología puramente in-situ, como lo son los inclinómetros, las estaciones GPS o DGPS (Differential GPS), esta ventaja resulta sumamente llamativa al enmarcarla dentro de un análisis geodésico (movimiento de la tierra).

Las principales diferencias entre la interferometría SAR y las mediciones realizadas por los equipos in-situ (GPS e Inclinómetros) de monitoreo utilizadas por el SERNAGEOMIN en la observación de la deformación superficial se resumen en la siguiente tabla:

	InSAR	GPS	Inclinómetros
a) Instalaciones en terreno	Innecesaria	Necesaria	Necesaria
b) Información en masa	Posible	Imposible	Incompleta
c) Observación continua	Imposible	Posible	Posible
d) Medición de deformación acumulada	Indirectamente	Observable	Observable
e) Detección del movimiento	1 Dimensión	3 Dimensión	1 Dimensión
f) Tiempo de observación	Cada 12 días	Continua	Continua

Tabla 3: Principales diferencias entre sistemas InSAR, GPS e Inclinómetros. Fuente: Elaboración propia desde GSI.

a) Tanto las estaciones GPS como los Inclinómetros trabajan en el lugar en donde son instalados, en cambio InSAR no necesita instalaciones en terreno.

b) InSAR permite observar amplias zonas a la vez y obtener alta densidad de información. Si el radar es instalado en el satélite, es capaz de medir decenas de kilómetros cuadrados en pocos segundos. En cambio, la tecnología GPS sólo aporta datos desde una posición puntual (la cual se mueve en 3 direcciones), mientras que el Inclinómetro entrega información del cambio de pendiente que describe la superficie en la que se encuentre instalado, el cual no discrimina entre cambios de pendiente delantero o trasero al mismo sensor.

- c) Para InSAR la observación continua es imposible. Crear una imagen SAR basta con una observación en la misma superficie, pero para crear un interferograma, dos imágenes SAR son necesarias, las cuales para el caso de Sentinel-1A, son obtenidas tras 12 días de diferencia. No así los equipos en terreno, que ofrecen una observación sin interrupciones del lugar en donde se encuentren ubicados.
- d) El par interferométrico sólo es capaz de proporcionar información del movimiento total entre dos observaciones, pero no la posición absoluta de la superficie, es decir, entrega una deformación relativa. En cambio, los equipos GPS e Inclínómetros, al aportar información continua del cambio superficial, son capaces de recopilar datos que en conjunto entregan la deformación total de la superficie en estudio.
- e) InSAR sólo puede medir deformación superficial en la dirección Satélite-Superficie, o LOS (Line of Sight). Las mediciones realizadas por GPS son capaces de desmenuzar un desplazamiento en sus tres dimensiones debido a la observación simultánea de diferentes direcciones por varios satélites GPS. Por otro lado, la observación SAR multidireccional resulta prácticamente imposible debido al limitado número de satélites SAR. InSAR no sólo requiere dos observaciones bajo la misma longitud de onda, sino también en la misma dirección de captura (ascendente o descendente) y en posiciones orbitales muy próximas.
- f) Las mediciones entregadas por equipamiento GPS trabaja las 24 Hrs. del día, mientras que una observación SAR sólo es posible mientras el satélite se encuentre localizado sobre el área objetivo. Si sólo un satélite SAR es el que circunda el globo terráqueo, entonces el intervalo en el cual el satélite observa el mismo punto es comúnmente una docena de días (12 días para Sentinel-1A).

La correcta manipulación de los datos obtenidos por las imágenes provistas por el satélite radar Sentinel-1A entre los días 14 y 26 de Abril del 2015, adquiridas en la región de los Lagos sobre el volcán Calbuco, permitieron mediante la metodología sintetizada en la sección 4, encontrar los patrones de deformación que se buscaban. Estos patrones, observados en los anillos concéntricos de colores en la Figura 32, dan cuenta del proceso de subsidencia que tomó lugar en la región Nor-Oeste del cráter, alcanzando un hundimiento observado de aproximadamente 12cm en la dirección Sensor-Superficie o Línea de Visada del Sentinel-1. Estos datos fueron a su vez

corroborados por la Coordinadora del Área de Geodesia Volcánica en el Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) ubicado en la Región de la Araucanía; la Srta. Loreto Córdova, quién además de confirmar los datos obtenidos, envió un interferograma desarrollado en un proyecto piloto de CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), en donde participaron profesionales provenientes de la USGS, Universidad de Bristol, Universidad Cornell, la Agencia Espacial de Italia (ASI) y el OVDAS. Al interferograma que se obtuvo se le aplicó un des-enrollamiento de fase, en donde ésta no se observa en franjas de colores repetidos, sino en colores decrecientes que denotan el hundimiento en la zona.

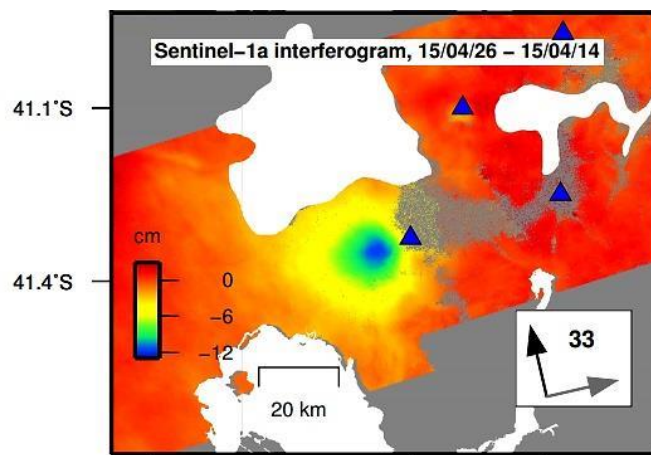


Figura 33: Interferograma realizado por CEOS project de la erupción del Calbuco en Abril de 2015. Fuente: CEOS Pilot Project.

Una observación importante, y muy inesperada que resalta al interpretar el interferograma de la figura 32, es que el centro de la deformación no fue observado en las laderas del volcán Calbuco, ni centrado en el mismo cráter, sino que a 5 Km del cráter, en el flanco Sur-Oeste. Aunque este campo de estudio se encuentra muy alejado de los objetivos inmediatos de la investigación y que es responsabilidad de los vulcanólogos y geólogos dilucidar las causas de este fenómeno, las conclusiones más inmediatas suponen una cámara magmática desplazada o alargada desde el centro geográfico del volcán a unos cuantos kilómetros por debajo de la superficie y que probablemente se abrió camino entre la corteza terrestre a lo largo de los últimos miles de años para poder expulsar el material volcánico por medio de lo que ahora se conoce como el cráter del Calbuco.

A priori, y por los datos obtenidos desde el interferograma, es imposible dilucidar en qué momento se dio lugar a esta subsidencia del terreno que tuvo su origen a pocos kilómetros de la comuna de Puerto Montt; si ocurrió antes, durante o después de la erupción principal el 23 de Abril, o incluso si la superficie experimentó un hundimiento aún mayor de lo revelado por el interferograma entre ambos días comparados, son datos que sólo los equipos terrestres instalados in-situ tienen la facultad de revelar. Sin embargo, más allá del cuándo; la forma y el lugar en que se presentó el hundimiento superficial medida por el procesamiento interferométrico, marcan sin lugar a dudas, factores que deben ser considerados para un eventual monitoreo del volcán Calbuco por parte de las autoridades a cargo.

7. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

En Chile una de las pocas industrias que ha implementado la tecnología InSAR en forma metódica ha sido la minera, mientras se estudiaba la viabilidad técnica del proyecto denominado Rajo Sur durante el 2012, y que hizo necesario el estudio de planes para la instrumentación y monitorización geomecánica debido a la subsidencia que generó la explotación subterránea de la División El Teniente de Codelco, ubicada en la región de O'Higgins. El proyecto permitió obtener registros de desplazamientos en un horizonte de 5 meses y hacer estimaciones para la velocidad de descenso y evolución del borde del punto de subsidencia (Minería Chilena, 2012).

Actualmente son múltiples los países e instituciones que se han visto beneficiados por la tecnología SAR a bordo del satélite Sentinel-1A, y que han implementado sistemas de monitoreo íntegramente basados en su tecnología. El gran interés y preocupación que posee la Agencia Espacial Europea de incentivar la gestión por parte de los organismos públicos y estatales en el marco del cuidado medioambiental, ha permitido no sólo la disposición completamente liberada de las imágenes obtenidas por Sentinel-1A y el software S1TBX para su debido procesamiento, sino también de tutoriales PDF destinados a fomentar el aprendizaje de toda persona interesada. Todo esto, sumado a sus ventajas comparativas frente a los equipos terrestres, la habilidad que posee para trabajar tanto de noche como de día, y de forma independiente de las condiciones

meteorológicas, hacen que hoy en día la implementación de esta tecnología sea una de las mejores opciones en cuanto a monitoreo de deformación superficial terrena se trata.

La carencia de un sistema de monitoreo volcánico basado en tecnología InSAR en uno de los países con mayor actividad volcánica en el mundo como lo es Chile, hace de la metodología propuesta en la sección 3 y desarrollada en la sección 4, un mecanismo que al ser ejecutado a perpetuidad en forma constante, podría presentarse como un pertinente y muy oportuno sistema de monitoreo sobre cualquier volcán que se encuentre en el territorio nacional, ofreciendo observaciones periódicas cada 12 días incluso sobre aquellos macizos que aún no cuenten con instalaciones de mediciones in-situ.

El mecanismo para implementar la tecnología InSAR al proceso de monitoreo volcánico en la red nacional de Chile contempla en primer lugar la descarga del par interferométrico (que considera la incorporación del nuevo satélite Sentinel-1B descrito en la siguiente sección), esta descarga se realizará directamente desde la plataforma virtual de la ESA⁵ y descrita en la sección 4.1, posteriormente será un ingeniero quien realice el proceso interferométrico hasta obtener el producto final del interferograma. Los resultados obtenidos pasarán a manos de un equipo de geólogos y vulcanólogos que, en conjunto con los datos proporcionados por las estaciones GPS e Inclínómetros del área en observación, será interpretado y analizado con el fin de hallar eventuales indicios de deformación superficial. Si la integración de los datos no revela una deformación, el organismo podría emitir una alerta verde respecto al volcán observado, esta alerta indica que si bien se encuentra en estado activo, el volcán describe un comportamiento estable; en este caso los datos recopilados serán almacenados en una base de datos para un posterior análisis temporal que podría abarcar periodos de entre tres y cuatro meses. Si por el contrario, la integración de los datos arroja una deformación superficial, podría ser signo de un pulso volcánico que deberá ser comunicado mediante la emisión de una alerta, cuyo nivel de emergencia (amarilla, naranja o roja) dependerá de la agresividad de la deformación y la periodicidad e intensidad de los sismos cercanos al volcán, entre otros parámetros determinados por la institución. Una vez descubierta y calculada la

⁵ Actualmente las imágenes obtenidas por Sentinel-1A en modo IW pueden demorar hasta un periodo de 24 horas en subirse a la plataforma de Sentinel Hub desde que son adquiridas por el sensor, esto debido a que según la ESA el monitoreo sobre tierra no representa una urgencia para los usuarios.

deformación, otro organismo que debe ingresar al procedimiento es la ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior), la cual, en coordinación con el SERNAGEOMIN, estiman los posibles daños y amenazas que el volcán represente para la población e infraestructura que se encuentre en la zona de riesgo previamente estipulada. Si la alerta emitida es roja y efectivamente el volcán hace erupción, la ONEMI a su vez podrá activar la Carta Internacional (International Charter "Space and Major Disasters") y notificará al CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales) para el posterior análisis óptico-satelital del impacto causado por los desechos volcánicos en la zona afectada. Los datos obtenidos durante y post-erupción serán almacenados en la base de datos mencionada.

A priori, la implementación de la metodología debería ser efectuada dentro un organismo que se desenvuelva en el estudio de la actividad volcánica y que esté facultado a la vez por la autoridad otorgada por el Estado, como lo es el SERNAGEOMIN. En general, el mecanismo presenta un mediano nivel de complejidad y podría ser ejecutado por profesionales con conocimientos mínimos en teledetección e informática. La mayor barrera que implica la implementación de este sistema, es la plataforma en hardware a utilizar, la cual debiese soportar no sólo una gran cantidad de imágenes Sentinel-1 (3 Gb aprox. cada una) en su disco duro, sino también los exigentes procesamientos que implica la interferometría, haciéndose pertinente una fuerte inversión en el tipo de procesador y tarjeta gráfica.

La automatización del monitoreo podría eventualmente construirse a partir de una plataforma virtual de programación a través de código Python. Las funciones elementales se encuentran desarrolladas e incluidas en la librería GDAL (Geospatial Data Abstraction Library); una librería creada para automatizar procesos cuyos datos geoespaciales sean de categoría liberada como lo son las imágenes Sentinel.

La implementación de la tecnología InSAR al actual monitoreo volcánico en Chile se resume en el siguiente diagrama:

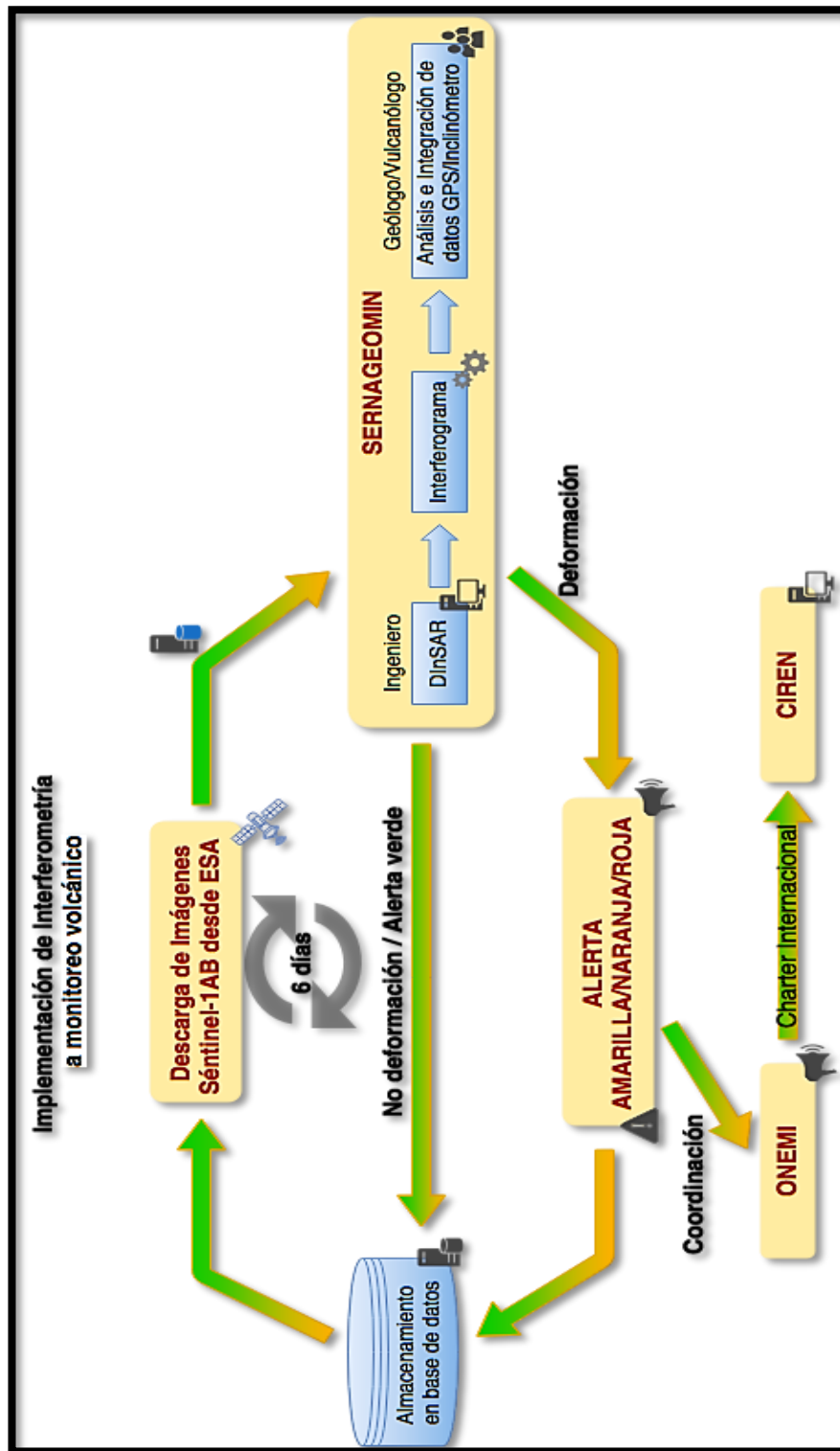


Figura 34: Diagrama de implementación de Interferometría en monitoreo Volcánico. Fuente: Elaboración propia.

7.1 Lanzamiento de Sentinel-1B

Una supuesta implementación de monitoreo volcánico basado en la tecnología InSAR se torna mucho más efectiva y llamativa al considerar el reciente lanzamiento del segundo satélite de la constelación Sentinel-1 denominado Sentinel-1B, enviado a la atmósfera el 25 de Abril de 2016 con el fin de proveer mayor “visión radar”; todo esto en el contexto del cuidado y el mejoramiento de gestión medioambiental provisto por Europa bajo el programa Copernicus.

Sentinel-1B fue lanzado a bordo del cohete Soyuz desde la plataforma espacial europea en Kourou, Guyana Francesa, a las 21:02 GMT, separándose del cohete 23 minutos tras el lanzamiento.

El nuevo satélite viene a unirse a su idéntico, Sentinel-1A, en su misión por observar la tierra con su tecnología SAR a bordo. Orbitando a una distancia de 180° con su gemelo, los dos satélites trabajando juntos serán capaces dentro de pocos meses, de optimizar la cobertura y la entrega de productos que están proporcionando los pasos para adoptar cambios importantes en el manejo del cuidado medioambiental (ESA, 2016). Las primeras imágenes aportadas por el nuevo sensor estarán disponibles en forma liberada en la plataforma de Sentinel Hub desde mediados de Septiembre de 2016.

En hechos concretos y para los objetivos planteados en la investigación, una separación de 180° entre ambos satélites permitirá una cobertura global en sólo seis días, acortando el tiempo de un eventual monitoreo realizado por datos Sentinel-1 a la mitad, lo cual significaría la generación de interferogramas capaces de revelar el movimiento superficial terreno cada 6 días. Esta frecuencia de monitoreo aportada por tecnología radar y complementada con los datos continuos recopilados por equipos de monitoreo remoto del SERNAGEOMIN, crearían un mecanismo sinérgico con la facultad de entregar información pertinente y extensa acerca de los movimientos que podrían anteceder una posible erupción en toda el área aledaña al volcán.

8. CONCLUSIONES FINALES

Las materias abordadas en el trabajo fueron concatenadas por un único objetivo en común, que trata con la observación del movimiento superficial de las regiones cercanas al cono volcánico del V. Calbuco en Abril del 2015, movimiento que intentó ser calculado y caracterizado mediante la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR) utilizando imágenes del tipo Radar.

Para alcanzar tal objetivo se consideró que el instrumento más idóneo para obtener una observación amplia, detallada y oportuna de las zonas que rodeasen el volcán en estudio, es el Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR), el cual, como su nombre indica, es capaz de sintetizar automáticamente la longitud de su antena en la dirección de vuelo. La implementación de este tipo de radar a bordo de un sensor espacial, sumado a la capacidad de amplificar el tamaño de su antena en forma virtual, le otorga a esta tecnología la habilidad única y sin precedentes, de proporcionar imágenes de alta resolución del terreno. Utilizando longitudes de onda en el rango de las microondas, SAR proporciona observaciones terrenas capaces de atravesar nubes, cenizas en suspensión, e incluso el follaje arbóreo si se utiliza la banda-L. Este tipo de satélites son considerados “activos” debido a que son generadores de la misma energía que capturan (lo que les permite trabajar incluso de la noche), emitiendo pulsos de onda electromagnética, que una vez retro-dispersados por la superficie son parcialmente capturados por el sensor. La señal recibida se constituye de dos partes: Amplitud, que corresponde a la intensidad de la señal capturada; y la Fase, asociada a la distancia entre el sensor y la superficie, y por lo tanto un factor clave para los objetivos planteados.

Estas imágenes fueron obtenidas por el satélite Sentinel-1A y procesadas mediante la técnica de Interferometría Diferencial DInSAR. Esta técnica representa una potente herramienta para la medición de deformaciones superficiales como hundimientos o levantamientos, y se basa en datos proporcionados por SAR. Para la medición del movimiento, DInSAR explota la fase de SAR que es sensible a la topografía del terreno y a los cambios de elevación que ocurren entre dos observaciones del satélite sobre la misma área y separadas por un periodo de tiempo. Para ello, la topografía del terreno proporcionada desde un Modelo de Elevación Digital (DEM), debe ser sustraída de la

fase interferométrica, aislando la componente relacionada a la deformación del terreno. Al trabajar con mediciones de fase proporcionales a la longitud de onda, se hace posible la detección de sutiles y sub-métricos cambios en la superficie terrestre. Las diferencias de fase obtenidas, son visualizadas en un Interferograma, interpretado según el orden y secuencia de los colores observados, revelando movimientos en la línea de visada.

Entender la naturaleza y comportamiento de los volcanes fue también un trabajo crucial para los requerimientos de la investigación. La mayor parte de los volcanes se encuentran ubicados en zonas donde las placas tectónicas convergen, y por lo tanto se entienden como un mecanismo que posee la tierra para liberar la energía que subyace en su corteza; para el volcán en estudio, el Calbuco se encuentra contenido en el Cinturón de Fuego que rodea toda la costa del Pacífico. Las actividades volcánicas han sido separadas mediante un Índice de Explosividad Volcánica (VEI en inglés), el cual las categoriza en 8 niveles de magnitud tomando en cuenta el volumen total de los productos explosivos, como la lava, piroclastos y la ceniza volcánica. La erupción del Calbuco en Abril del 2015 fue catalogada con un VEI igual a 8, en la categoría Sub-Planiana por el SERNAGEOMIN, al describir una columna eruptiva que alcanzó los 15Km de altura, acompañada de la emisión de material incandescente y piroclástico, también se detectaron lahares y cambios morfológicos en las laderas del volcán. No se detectaron movimientos superficiales previos sino sólo eventos sísmicos menores.

Se elaboró una metodología basada en el procesamiento de imágenes Sentinel-1A, correspondientes al 14 y 26 de Abril con el software S1TBX, que reveló una subsidencia de Aprox. 12cm en la dirección Line of Sight del satélite, a 5 Km en el flanco Sur-Oeste del cráter. Los datos fueron corroborados por el SERNAGEOMIN. Aunque con esta tecnología no es posible dilucidar el día exacto del movimiento, ofrece datos importantes que sugieren un desplazamiento del núcleo magmático, y que dan pie para calcular no sólo su tamaño teórico, sino también la profundidad en que se encuentra.

La metodología fue incluida en una propuesta de implementación que eventualmente permitiría, en conjunto con los equipos terrestres del SERNAGEOMIN, reforzar los mecanismos de observación en las redes de monitoreo volcánico en Chile, anticipándose y previniendo riesgos asociados a las actividades volcánicas propias del país.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(s.f.).

A.Lizcano, M. y. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 167-168.

Agencia EFE. (28 de Abril de 2015). Afecta a los animales cenizas de volcán Calbuco en Chile. *El Nuevo Día*.

AIRBUS D&S. (11 de Enero de 2011). *Airbus Defense & Space*. Obtenido de <http://www.space-airbusds.com/es/noticias-articulos/medio-ambiente-el-espacio-al-servicio-de-nuestra-tierra-k5w.html>

Ambher. (15 de Septiembre de 2014). Obtenido de <http://www.ambher.com/infraestructura/p52qqq34tk3ejunasje7sl6w6yxkp9>

AON. (2008). Krakatoa Eruption, 1883. *AON*, 2-3.

Arbiol, R. (2001). Aplicaciones de la tecnología InSAR a la cartografía. En R. Arbiol, V. Palá, F. Pérez, M. Castillo, & M. Crosetto. Barcelona.

Atzori, S., & Salvi, S. (2014). SAR Data Analysis in Solid Earth Geophysics: From Science to Risk Management. En D. D. Closson, *Earth and Planetary Sciences "Land Applications of Radar Remote Sensing"* (pág. 2).

BBC. (8 de Octubre de 2012). *BBC News, Science & Environment*. Obtenido de <http://www.bbc.com/news/science-environment-19826963>

BBC. (24 de Abril de 2015). *BBC Mundo*. Obtenido de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150424_calbuco_erupcion_tormenta_electrica_lp

Bio-Bio Chile. (22 de Abril de 2015). *Radio Bio-Bio*. Obtenido de <http://www.biobiochile.cl/2015/04/22/definen-vias-de-evacuacion-y-suspenden-vuelos-por-erupcion-del-calbuco.shtml>

Bio-Bio Chile. (27 de Abril de 2015). *Radio Bio-Bio*. Obtenido de <http://www.biobiochile.cl/2015/04/27/sernageomin-confirma-tendencia-a-la-baja-en-sismicidad-del-volcan-calbuco.shtml>

Brayam Aguilar, C. B. (s.f.). *Tecnologías de la Comunicación y Sociedad*. Obtenido de <http://www.razonypalabra.org.mx/libros/libros/satelites.pdf>

Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to measure Earth's Surface Topography and its deformation.

- Cárdenas, E. G. (2006). Peligros y riesgos volcánicos en biogeografía: efectos sobre la vegetación. Ciudad Real.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. En E. Chuvieco. Madrid: RIALP, S.A.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. En E. Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección Espacial* (págs. 41-42). Madrid: RALP, S.A.
- Cruz, C. (27 de Noviembre de 2015).
- D.C, P. (6 de Abril de 2014). *Geografía de América*. Obtenido de <http://geoamerica1.blogspot.cl/2014/04/cinturon-de-fuego-del-pacifico-informe.html>
- Diario 7 Lagos. (29 de Abril de 2015). *Diario 7 Lagos*. Obtenido de <http://www.diario7lagos.com.ar/volcan-calbuco-las-cenizas-no-afectan-la-calidad-del-agua/>
- Diario La Tercera. (30 de Mayo de 2014). El lento despegue de la carrera espacial chilena. *La Tercera*.
- Diario La Tercera. (22 de Abril de 2015). *La Tercera*. Obtenido de <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2015/04/680-626646-9-minsal-entrega-recomendaciones-ante-erupcion-del-volcan-calbuco.shtml>
- DIGITAL. (2010). *Historia de los Satélites*. Recuperado el Mayo de 2015, de <http://www.digitalmantenimientos.com/servicios/antenas-parabolicas/la-historia-de-los-satelites-de-telecomunicaciones/>
- Drewes, L. (12 de Agosto de 2014). El sector espacial argentino. Instituciones, empresas y desafíos. Argentina.
- Emol. (28 de Abril de 2015). *Emol*. Obtenido de <http://www.emol.com/noticias/economia/2015/04/28/714662/invermar-informa-de-cuantiosas-perdidas-por-erupcion-del-volcan-calbuco.html>
- EMOL. (s.f.). *Volcanes en Chile*. Obtenido de http://www.emol.com/especiales/volcanes/chile_1.htm
- ESA. (Febrero de 2007). *Guidelines for SAR Interferometry, Processing and Interpretation*. Obtenido de http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf
- ESA. (2007). InSAR principles. En A. F. Al. Toulouse, France.
- ESA. (2007). InSAR Principles. Toulouse: ESA.
- ESA. (2007). InSAR Principles. Toulouse.

- ESA. (2007). *InSAR principles Guideline*. Toulouse: ESA Publications.
- ESA. (25 de Abril de 2016). Obtenido de http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1B_launched_to_complete_radar_pair
- ESA. (s.f.). *ESA, Sentinel Online*. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>
- ESA. (s.f.). *Sentinel ESA*. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>
- ETHW. (28 de Sep de 2015). *Engineering and Technology History Wiki*. Obtenido de http://ethw.org/Synthetic_Aperture_Radar
- European Space Agency. (s.f.). *European Space Agency*. Obtenido de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_ES/SEMH6PD1XOG_0.html
- European Space Agency. (s.f.). *European Space Agency*. Obtenido de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_ES/SEMH6PD1XOG_0.html
- FACH. (2011). FASat-Chile El satélite chileno. *Fuerza Aérea de Chile*, 5-10.
- Fernández, F. M. (8 de Mayo de 2005). *FASat-Alfa*. Obtenido de <http://www.fasat.aviacion.cl/mision.htm>
- Francis, P., & Oppenheimer, C. (2004). *Volcanoes*. New York: Oxford University Press Inc.
- García Mora, R. (Enero de 2014). *Doméstika*. Obtenido de <http://www.domestika.org/es/projects/136468-volcanes-de-mexico-quo-enero-2014>
- Geological & Nuclear Sciences. (1994). *Ashfall-A computer program for estimating volcanic ash fallout*. New Zeland: Institute of Geological & Nuclear Sciences.
- Globovisión. (22 de Abril de 2015). *Globovisión Información Responsable y Veraz*. Obtenido de <http://globovision.com/mas-de-4-000-evacuados-por-erupcion-de-volcan-calbuco-en-chile/>
- Gob. de Chile. (23 de Abril de 2015). *Gobierno de Chile*. Obtenido de <http://www.gob.cl/2015/04/23/ministerio-de-obras-publicas-monitorea-estado-de-infraestructura-y-agua-en-zona-del-volcan-calbuco/>
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. California: California Institute of Technology.

- Grosfeld, J. (s.f.). *Centro Regional Universitario Bariloche*. Obtenido de http://crubweb.uncoma.edu.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=13%3Aacnizas&catid=30%3Anovedades&Itemid=11
- Grosfeld, J., & Puntieri, J. (21 de Junio de 2011). *DiarioAndino*. Obtenido de http://www.diarioandino.com.ar/diario/wp-content/uploads/2011/06/Efectos-en-la-vegetacion_FINAL.pdf
- HistoriaGeneral. (s.f.). *Teoría de la gran catastrofe de Toba*. Obtenido de <http://historiageneral.com/2012/06/01/teoria-de-la-gran-catastrofe-de-toba/>
- History Staff. (2009). *History*. Obtenido de <http://www.history.com/this-day-in-history/volcanic-eruption-kills-80000>
- Huidobro, J. M. (Julio de 2002). *Historia de los Satelites de Comunicación*. Obtenido de http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/historia_de_los_satelites_de_comunicaciones._bit_134._5c6c417a.pdf
- Intenational Charter SPACE & MAJOR DISASTERS. (s.f.). *International Charter*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2015, de <https://www.disasterscharter.org/web/guest/activating-the-charter>
- International Charter. (12 de Marzo de 2011). *International Charter SPACE & MAJOR DISASTERS*. Obtenido de https://www.disasterscharter.org/image/journal/article.jpg?img_id=42977&t=1411454590049
- International Charter. (11 de Marzo de 2014). *International Charter SPACE & MAJOR DISASTERS*. Obtenido de <https://www.disasterscharter.org/web/guest/-/article-id/ACT-482>
- International Charter. (9 de Octubre de 2014). *International Charter SPACE & MAJOR DISASTERS*. Obtenido de https://www.disasterscharter.org/web/guest/activations/-/asset_publisher/fmpRVvSW3UIw/content/other-in-sierra-leone?redirect=https%3A%2F%2Fwww.disasterscharter.org%2Fweb%2Fguest%2Factivations%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_fmpRVvSW3UIw%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_
- International Charter. (24 de Abril de 2015). *International Charter SPACE & MAJOR DISASTERS*. Obtenido de https://www.disasterscharter.org/image/journal/article.jpg?img_id=152175&t=1430467937099
- International Charter. (23 de Abril de 2015). *International Charter SPACE & MAYOR DISASTERS*. Obtenido de <https://www.disasterscharter.org/web/guest/-/volcano-in-ch-20>

- International Charter. (s.f.). *International Charter SPACE & MAJOR DISASTERS*. Obtenido de <https://www.disasterscharter.org/web/guest/about-the-charter>
- Johnston, D., & Stewart, C. (2004). *Impacts of volcanic ash on water supplies in Auckland: part 1*. Institute of Geological and Nuclear Sciences.
- La Tercera. (26 de Noviembre de 2012). ONU:Chile es el noveno país del mundo en gastos por desastres naturales en los últimos 20 años. *La Tercera*.
- La Tercera. (23 de Abril de 2015). *Diario La Tercera*. Obtenido de <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2015/04/680-626669-9-capade-cenizas-tras-erupcion-se-registra-en-sectores-de-chile-y-argentina.shtml>
- La Tercera. (5 de Mayo de 2015). *Diario La Tercera*. Obtenido de <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2015/05/680-628237-9-estiman-en-30-mil-millones-danos-por-erupcion-del-calbuco.shtml>
- Langbein, J. e. (1993). The mechanics of unrest at Long Valley caldera, California. En M. Battaglia, P. Segall, J. Murray, P. Cervelli, & J. Langbein, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (pág. 127).
- Lisowski, M., & Dzurisin, D. (2006). *Analytical volcano deformation source models*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). En *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space* (pág. 14). Springer.
- Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes*. Springer.
- Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space*. Springer.
- Min. Agricultura Chile. (25 de Abril de 2015). *SEREMI, Región de los Lagos*. Obtenido de <http://loslagos.minagri.gob.cl/2015/04/25/ministerio-de-agricultura-decreta-emergencia-agricola-en-4-comunas-de-la-region-de-los-lagos-por-act/>
- Min. Interior Chile. (22 de Abril de 2015). *Ministerio del Interior y Seguridad Pública*. Obtenido de <http://www.interior.gob.cl/noticias/2015/04/22/gobierno-ordena-evacuacion-preventiva-por-erupcion-de-volcan-calbuco/>
- Minería Chilena. (2 de Marzo de 2012). *Minería Chilena, Información confiable y Oportuna*. Obtenido de <http://www.mch.cl/reportajes/tecnologias-insar-en-mina-rajo-sur-de-el-teniente/>
- Newhall, C. C., & Self, S. (1982). *The volcanic explosivity index (VEI) and estimate of explosive magnitude for historical volcanism*.
- Newhall, C. G., & Hoblitt, R. P. (2002). Constructing event trees for volcanic crises.

Nievinski, F. G. (2004). InSAR. Rio Grande do Sul.

Nievinski, F. G. (2004). InSAR.

Nievinski, F. G. (2004). Interferometría por Radar de Abertura Sintética InSAR. En F. G. Nievinski, *Interferometría por Radar de Abertura Sintética InSAR* (pág. 19). Porto Alegre.

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales. (18 de Abril de 2013). *Servicio Geológico Colombiano*.

ONEMI. (Abril de 2015). Obtenido de <http://www.onemi.cl/alerta/se-declara-alerta-roja-para-las-comunas-de-puerto-montt-y-puerto-varas-por-erupcion-del-volcan-calbuco/>

ONEMI. (21 de Agosto de 2015). *Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior*. Obtenido de <http://www.onemi.cl/alerta/se-declara-alerta-roja-para-las-comunas-de-puerto-montt-y-puerto-varas-por-erupcion-del-volcan-calbuco/>

Papale, P., & Shroder, J. F. (2014). *Volcanic Hazards*. Amsterdam: Elsevier.

Pinochet, D. D. (Mayo de 2015). (P. Segovia, Entrevistador)

Rosen, P. A., & Hensley, S. (2000). *Synthetic Aperture Radar Interferometry*.

Rosen, P. A., Hensley, S., & Joughin, I. R. (2000). *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Procediente de la IEEE.

SERNAGEOMIN. (24 de Abril de 2015). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/detalle-noticia.php?ildNoticia=213>

SERNAGEOMIN. (2016). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/volcan.php?ild=3>

SERNAGEOMIN. (s.f.). *Volcán Calbuco*. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/archivosVolcanes/20120613111604955FichaVnCalbuco.pdf>

Short, D. N. (2009). *Remote Sensing Tutorial*. Obtenido de <http://fas.org/irp/imint/docs/rst/Front/overview.html>

Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the World*. Berkeley: Berkeley: University of California Press.

Smithsonian Institution. (2000). Copahue. En *Bulletin of the Global Volcanism Network* (págs. 7-10).

SpaceFlight101. (2015). Obtenido de <http://spaceflight101.com/copernicus/sentinel-1/>

- Stewart, C., & D.M. Johnston. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall. Elsevier.
- Stewart, C., & Johnston, D. (2006). *Journal of Vulcanology*. Elsevier.
- The COMET Program, NASA. (2011). *VULCANISMO*. Obtenido de http://www.goes-r.gov/users/comet/volcanic_ash/volcanism_es/print.htm
- Thiers, D. O. (Mayo de 2015). (P. Segovia, Entrevistador)
- Torres, T. M. (2011). Uso de InSAR en ladera occidental de Cerro Iguazo, Ecuador. Córdoba.
- Torres, T. M. (2011). Uso de interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) en ladera occidental de Cerro Iguazo, Ecuador. Córdoba.
- TRE. (2016). *TRE, Sensing the Planet*. Obtenido de <http://treuropa.com/technique/sar-imagery/>
- UACH. (Mayo de 2015). Obtenido de <http://www.forestal.uach.cl/noticias/post.php?s=2015-05-11-posibles-efectos-de-la-ceniza-volcanica-en-el-suelo-y-en-la-vegetacion>
- UACH. (15 de Mayo de 2015). *Facultad de Ciencias Agrarias UACH*. Obtenido de <http://www.agrarias.uach.cl/2015/05/11/posibles-efectos-de-la-ceniza-volcanica-en-el-suelo-y-en-la-vegetacion/>
- United Nations Spider. (s.f.). *UN-SPIDER, Knowledge Portal*. Obtenido de <http://www.un-spider.org/es/aplicacion-espacial/mecanismos-de-emergencia/la-carta-internacional-espacio-y-los-grandes-desastres>
- Universidad de Islandia. (2013). The influence of Volcanic Tephra on Ecosystems. Islandia: Elsevier Inc.
- USGS. (30 de Diciembre de 2009). *USGS, Science for a changing World*. Obtenido de <http://volcanoes.usgs.gov/vhp/>
- USGS. (15 de 12 de 2015). *Volcanic Ashfall Impacts*. Obtenido de https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/water_supply.html
- Valderrama, O. A., & Cardona, C. (2016). *Erupción Sub-planiana del Volcán Calbuco (Chile), Abril de 2015, un ejemplo de erupciones itepestivas con pocos premonitorios*.
- Valle, D. S. (Mayo de 2015). (P. Segovia, Entrevistador)
- Velez, M. L. (2011). Análisis de la deformación asociada al comportamiento de sistemas volcánicos activos: Volcán Copahue. Buenos Aires.

Ward, C. (Marzo de 2012). *Astrium in the UK*. Recuperado el Mayo de 2015, de [http://www.strath.ac.uk/media/faculties/engineering/advancedspaceconceptslab/scottishspacesymposia/\[8\]_-_Chris_Ward_-_Astrium.pdf](http://www.strath.ac.uk/media/faculties/engineering/advancedspaceconceptslab/scottishspacesymposia/[8]_-_Chris_Ward_-_Astrium.pdf)

WHO. (2004). *Guidelines for drinking-water quality*. Switzerland: Geneva.

Witham, C., & Oppenheimer, C. (2005). Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods.

Wolff, C. (2008). *Radar Tutorial*. Obtenido de <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.en.html>

Zozaya, A. J. (2015). *Simulador básico de un radar de apertura sintética*. Cotopaxi, Ecuador: Instituto Espacial Ecuatoriano.

Zyl, J. v., & Kim, Y. (2010). *Synthetic Aperture Radar Polarimetry*. Wiley.

10. ANEXOS

10.1 Modos de Adquisición del satélite Sentinel-1A:

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

Tabla 4: Información técnica de Modos de Adquisición Sentinel-1A. Fuente: ESA.

10.2 Información técnica-operacional del satélite Sentinel-1A:

Lifetime	7 years (consumables for 12 years)
Orbit	Near-polar Sun-synchronous orbit at 693 km altitude; 12-day repeat cycle; 175 orbits per cycle
Mean local solar time	18:00 at ascending node
Orbital period	98.6 min
Maximum eclipse duration	19 min
Attitude stabilisation	3-axis stabilised
Attitude accuracy	0.01° (each axis)
Instrument	Right looking with respect to the flight direction
Steering	Zero Doppler yaw steering and roll steering (−0.8° to +0.8°)
Attitude profile	Geocentric and geodetic
Orbit knowledge	10 m (each axis, 3 σ) using GPS
Operative autonomy	96 h
Launch mass	2300 kg (including 130 kg mono-propellant fuel)
Dimensions (stowed)	3900 × 2600 × 2500 mm
Solar array average power	5900 W (end-of-life)
Battery capacity	324 Ah
Satellite availability	0.998
S-band TT&C data rates	64 kbit/s telecommand; 128 kbit/s – 2 Mbit/s telemetry (programmable)
X-band downlink data rate	2 × 260 Mbit/s
Launcher	Soyuz from Kourou

Tabla 5: Información técnica de la operación Sentinel-1A. Fuente: ESA.

10.3 Nomenclatura de los productos Sentinel-1A:

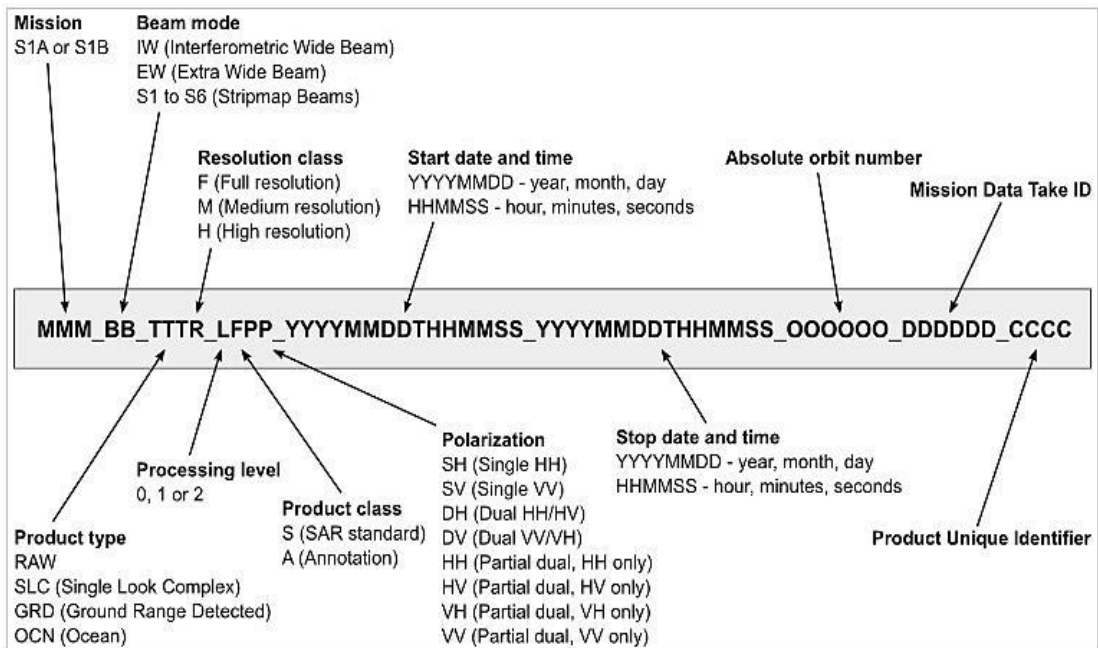


Figura 35: Esquema de nomenclatura de productos Sentinel-1A. Fuente: UAF Alaska Satellite Facility.

10.4 Ceniza volcánica desde vista satelital-óptica del volcán Calbuco.

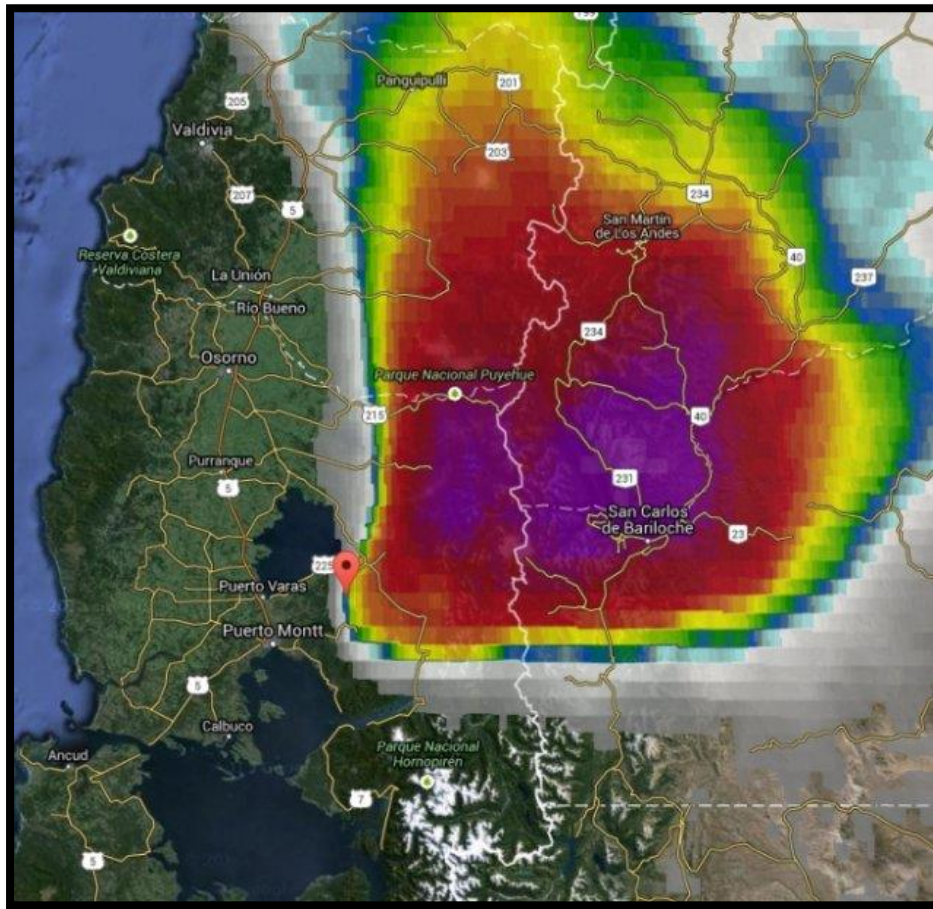


Figura 29: Imagen satelital del desplazamiento de ceniza volcánica desde el volcán Calbuco.
Fuente: C13.