

**Estudio de erupciones volcánicas
a través de imágenes satelitales
caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile.**

Por Juan Isaú Piedra Vilches

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

**MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Agosto, 2016

©IG - CONAE/UNC 2016

© FAMAFA - UNC 2016

Director: Dr. Maria Fabrizia Buongiorno

Co-Director: Agrim. Gabriel Platzeck



Este trabajo se distribuye bajo licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/>

Agradecimientos

El primer lugar quisiera agradecer a mis padres, por su ejemplo de vida que me ha llevado a ser persistente y trabajar duro para lograr mis objetivos y sin duda por su infinito apoyo de forma incondicional.

Agradecer a CONAE y al Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”, quien nos ha entregado la oportunidad de cursar esta maestría, incorporando a profesionales latinoamericanos, logrando de esta manera el desarrollo de un equipo técnico especializado de alto nivel en la región, fortalecimiento la integración de nuestros pueblos hermanos. Mencionar especialmente a Gabriel Platzcek que desde el año 2006 comenzamos a trabajar vinculados a la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes CHARTER, siendo mi primer vínculo con la Agencia Espacial Argentina y actual Co-director de Tesis, y a Marcelo Scavuzzo, por su rol como Director dentro de la Maestría en el periodo que curse.

A la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior de Chile, ONEMI, que me permitió hacer una pausa en mi vida laboral, para poder especializarme, cuyo fin actualmente lo estoy ejerciendo, que corresponde al aplicar los conocimientos adquiridos en función a la coordinación del trabajo de diferentes organismos que pertenecen al Sistema Nacional de Protección Civil en la alerta temprana como en la respuesta frente a situaciones de emergencia.

Al equipo de sensores remotos del Istituto Nazionale de Geofisica e Vulcanologia de Italia INGV, especialmente a Fabrizia Buongiorno, jefa de la Unidad de Sensores Remotos y Directora de mi Tesis, Christian Bignami y Maria Ilaria Pannaccione, quienes entre otros, me introdujeron en el mundo de la interferometría de RADAR aplicada en volcanes.

Finalmente a mi familia adoptiva durante el tiempo que viví en Argentina e Italia, a mis compañeros y amigos, sin excepción, por su generosidad en compartir conocimientos y momentos del día a día, sin duda representan una de mis mayores satisfacciones en esta etapa de mi vida, a Fany, Arielo, Lili, Tete, Gonza, Manu, Naza, Carlos, Erith, Fer, Andrés, Laura y Ely.

Resumen

El presente trabajo muestra el monitoreo de la erupción del volcán Puyehue en el sur de Chile registrada el año 2011, a través de la utilización de sensores satelitales pasivos (imágenes ópticas) y activos (imágenes SAR). Los resultados obtenidos permitieron observar la evolución del proceso eruptivo, a través de la aplicación de la técnica de interferometría SAR se detectaron deformaciones del edificio volcánico antes y posterior a la erupción, se aplicó también la técnica de detección de cambios e interpretación visual de imágenes para identificar la localización y extensión del flujo de lava, y depósitos de cenizas, entre otras variables. En la técnica de Interferometría SAR fueron utilizados datos ENVISAT-ASAR permitiendo la estimación de la deformación registrada justo antes del comienzo de la erupción del mes de junio del 2011, y la deflación posterior, analizando meses consecutivos. Con los interferogramas es posible medir movimientos desde tan solo 1mm hasta varios metros, información relevante para estudios de Riesgos.

Por otra parte, con el uso de imágenes COSMO-SkyMed, ENVISAT-ASAR y ópticas, fue posible identificar los depósitos de lava durante el proceso eruptivo. Además, la utilización de imágenes SAR, permitió la detección de cenizas, particularmente en condiciones atmosféricas desfavorables para el monitoreo, que son condiciones meteorológicas típicas de la zona del volcán para esa época del año.

Finalmente, la información recogida por los diferentes tipos de sensores, incluyendo las imágenes adquiridas por el CHARTER, permitió analizar la evolución del fenómeno de forma integral, enfocados este tipo de resultados para ser analizados en futuras emergencias volcánicas en las etapas de prevención (monitoreo) y respuesta.

Palabras Claves: Imágenes ópticas, imágenes SAR, Interferometría, ENVISAT-ASAR, COSMO-SkyMed.

Abstract

This paper presents the monitoring the Puyehue's volcano eruption, in southern Chile registered in 2011, through the use of satellite passive sensors (optical images) and satellite active sensors (SAR images). The obtained results let us observe the eruptive process evolution, through the application of SAR interferometry technique to determinate the volcanic building deformations before and after the eruption, visual interpretation and changes detection technique was also applied for the detection and visual interpretation of images to identify the location and extent of lava flows and ash deposits, among other variables. In the SAR interferometry technique, ENVISAT-ASAR data were used to estimate the recorded deformation just before to the start of the eruption of June, 2011, and subsequent deflation, analyzing the consecutive months. With the interferograms is possible to measure movements from just 1 mm to several meters, relevant information to risk studies.

Furthermore, with the use of COSMO-SkyMed, ENVISAT-ASAR and optical images, it were possible to identified lava deposits during the eruption process. Moreover, the use of SAR images let us the detection of ash, particularly in unfavorable weather conditions for monitoring, which are typical weather conditions in the volcano area on that time of year.

Finally, the gathered information by different types of sensors, including images acquired by CHARTER, let us analyze comprehensively the phenomenon evolution, focusing this type of results to be analyzed in prevention (monitoring) and response stages of future volcanic emergencies.

Key words: Optical images, SAR images, Interferometry, ENVISAT-ASAR, COSMO-SkyMed.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Tabla de contenidos.....	5
Acrónimos	8
Lista de símbolos	9
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas.....	14
CAPÍTULO 1	15
1.1 Estructura de la tesis	15
1.2 Introducción	16
1.3 Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Aplicaciones de sensores remotos en erupciones volcánicas.....	19
1.5. Área de estudio: complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle, región de Los Ríos.	21
1.6. Actividad complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle.....	25
1.6.1 Erupciones históricas del complejo volcánico	25
1.6.2 Proceso eruptivo año 2011	26
Cronología (ONEMI., 2011).....	26
CAPÍTULO 2	30
2. Teledetección	30
2.1. Espectro electromagnético	31
2.1.1 Concepto de longitud de onda y frecuencia	32
2.1.2 Reflexión, Absorción y Transmisión	32
2.2. Imágenes multiespectrales e hiperspectrales.	34
2.3 Imágenes de radar	34
2.3.1 Radar de apertura sintética (SAR).....	37
2.3.2. Imágenes complejas SAR: amplitud y fase.....	38
2.4 Técnicas aplicadas para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales.....	40
2.4.1 Interpretación visual de imágenes.....	40
2.4.2 Detección de cambios	41
2.4.2.1 Diferencia entre imágenes.....	41
2.4.3 Interferometría de radar.....	42
2.4.3.1 Técnicas de interferometría - modos de adquisición de imágenes SAR.....	44
2.4.3.2 Pasada doble del sensor.....	44
2.4.3.3 Generación del interferograma.....	45
CAPÍTULO 3	47
3. Plataformas satelitales (sensores) y técnicas utilizadas para este estudio.....	47
3.1.1 Imágenes ENVISAT	47
3.1.1.1 Envisat ASAR	48

3.1.2 Método utilizado con las imágenes ENVISAT- ASAR.....	49
3.1.2.1 Elaboración de interferogramas	50
3.1.2.1.1 Corregistración.....	51
3.1.2.1.2 Multilooking.....	51
3.1.2.1.3 Filtrado espectral.....	53
3.1.2.1.4 Combinación de la imagen y obtención del interferograma	53
3.1.2.1.5 Interferograma aplanado “Flattening”	54
3.1.2.1.6 Filtro.....	55
3.1.2.1.7 Coherencia.....	56
3.1.2.1.8 Desenrollado de la fase “Unwrapping”	56
3.1.2.1.9 Corrección orbital “Refinement Re-Flattening”	57
3.1.2.1.10 Desplazamiento y georreferenciación	58
3.1.2.1.11 Desplazamiento (deformación)	58
3.1.3 Método utilizado interpretación visual imágenes ENVISAT- ASAR.	59
3.2.1 Constelación satélites radar Cosmo-SkyMed	59
3.2.1.1 Objetivos de la misión.....	59
3.2.1.2 Principales características	60
3.2.2 Método utilizado con las imágenes COSMO-SkyMed.....	61
3.2.2.1 Multilooking.....	62
3.2.2.2 Corregistración de las imágenes.....	62
3.2.2.3 Detección de cambios	62
3.3.1 Imágenes MODIS.....	63
3.3.2 Técnica interpretación visual	63
3.4.1 Imágenes obtenidas por la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes CHARTER.	63
3.4.1.1 Landsat 5 TM y 7 ETM.....	64
3.4.1.2 SPOT 4 Image	65
3.4.1.3 TerraSAR-X	65
3.4.1.4 RADARSAT 1 y 2	66
3.4.2 Técnica interpretación visual	66
3.5 Los software utilizados	66
3.5.1 ENVI	66
3.5.2 ArcGis	67
CAPÍTULO 4	68
4 Análisis e interpretación de resultados.....	68
4.1.1 Interferogramas y mapas de deformación - imágenes ENVISAT	68
4.1.2 Mapa de detección de cambios - imágenes ENVISAT	73
4.2 Mapas de detección de cambios - imágenes COSMO-SkyMed	75
4.3 Interpretación visual – imagen MODIS	80
4.4 Interpretación visual – imágenes CHARTER.....	80
4.4.1 Interpretación visual – imagen TerraSAR-X	81
4.4.2 Interpretación visual – imagen ENVISAT ASAR	84
4.4.3 Interpretación visual – imagen RADARSAT	84
4.4.4 Interpretación visual – imagen Spot.....	85
4.4.4 Interpretación visual – imagen Landsat	87

CAPÍTULO 5	88
5. Conclusiones	88
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXO A.....	97
A.1 Listado de cartografías elaboradas	97
A.2 Descripción de modo general los principales procedimientos desarrollados para la elaboración de las cartografías.	99

Acrónimos

ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CCRS	Canada Centre for Remote Sensing
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
CSA	Canadian Space Agency
DEM	Digital Elevation Model
DINSAR	Differential INterferometry Synthetic Aperture Radar
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
DORIS	Delft Object-oriented Radar Interferometric Software
ERS	European Remote Sensing Satellite
ERTS	Earth Resources Tecnology Satellite
ESA	European Space Agency
GCP	Ground Control Point
GPS	Global Positioning System
GVP	Global Volcanism Program
INE	Instituto Nacional de Estadística
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
INSAR	Interferometry Synthetic Aperture Radar
IR	InfraRed
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Near InfraRed
ONEMI	Oficina nacional de Emergencia del Ministerio del Interior
OVDAS	Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAR	Real Aperture Radar
SAR	Synthetic Aperture Radar
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SLC	Single Look Complex
SPOT	Sistema Probatorio de Observación de la Tierra
SPIDER	SPace based Information for Disaster management and Emergency Response
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVZ	South Volcanic Zone
TIR	Thermal InfraRed
TM	Tematic Maper
UN	United Nations
VHR	Very High Resolution

Lista de símbolos

μm	Micrón
λ	Longitud de onda
ρ_λ	Reflectancia espectral
σ°	Coefficiente de retrodispersión o backscattering
β°	Brillantez radar
$ER(\lambda)$	Energía reflejada desde el objeto en la longitud de onda
$EI(\lambda)$	Energía incidente en el objeto en la longitud de onda
P_r	Potencia retrodispersada
P_t	Potencia transmitida por el sensor
G	Factor de ganancia de la antena
R	Distancia entre el sensor y la superficie
σ	Sección eficaz de retrodispersión
γ	Ángulo de observación
B	Línea base entre las dos antenas
B_\perp	Línea base perpendicular
α	Ángulo de inclinación base
BT	Base de tiempo
H	Altitud orbital de la antena relativa a la superficie de referencia
$B \parallel$	Base paralela
Ψ	Amplitud
$\Delta\phi$	Diferencia de fase
ϕ	Fase
ϕ_M	Valores de la fase de la imagen Master
ϕ_S	Valores de la fase de la imagen Slave
π	Pi
R	Distancias de alcance oblicuo
ΔR	Diferencia distancia de alcance oblicuo (Diferencia de la trayectoria entre las imágenes)
RM	Distancia de alcance oblicuo, entre la antena y el objetivo de la imagen Master
RS	Distancia de alcance oblicuo, entre la antena y el objetivo de la imagen Slave
M	Imagen Master
S	Imagen Slave
I	Interferograma

ϕ_{rect}	Desplazamiento de fase causado por las señales reflejadas por el objeto
ϕ_{atm}	Desplazamiento de fase causado por el retraso de la propagación de la señal debido a la atmosfera o ionosfera
ϕ_R	Desplazamiento de fase causado por el ruido
2π	Ciclo de fase completa
i	Reflexión
ii	Emisión
iii	Reflexión-emisión

Índice de figuras

<i>Figura 1.1: perfil topográfico 41° latitud sur. Fuente: geografía de Chile, 2014.</i>	21
<i>Figura 1.2: mapa ubicación volcán Puyehue.</i>	22
<i>Figura 1.3: volcán Puyehue, Cordón Caulle. Fuente: imagen base de google earth, 2015.</i>	23
<i>Figura 1.4: mapa de emanación de lava de erupciones históricas. Fuente: Lara et al., 2006.</i>	24
<i>Figura 1.5: erupción volcán Puyehue año 1960. Fuente: González – Ferrán, volcanes de Chile y Programa Nacional de Riesgos y Prevención de Catástrofes, 1983.</i>	26
<i>Figura 1.6: zona de actividad sísmica. Fuente: O. González – Ferrán. Fisuras históricas Cordón Caulle – ONEMI.</i>	27
<i>Figura 1.7: erupción volcán Puyehue año 2011. Fuente: sobrevuelo ONEMI – SERNAGEOMIN.</i>	28
<i>Figura 2.1: flujo energético (i: reflexión, ii: emisión, iii: emisión-reflexión). Fuente: REDIAM, 2015.</i>	30
<i>Figura 2.2: espectro electromagnético e interacción de los tipos de frecuencias con los diferentes componentes de la atmósfera. Fuente: J. Richards, 2009.</i>	31
<i>Figura 2.3: concepto de frecuencia y longitud de onda.</i>	32
<i>Figura 2.4: energía Incidente (E_i), reflejada (E_r), absorbida (E_a), transmitida (E_t). ...</i>	33
<i>Figura 2.5: espectro electromagnético microondas.</i>	35
<i>Figura 2.6: funcionamiento de los sistemas de radar. Ecuación fundamental del radar. Fuente: RADARSAT, 1997.</i>	35
<i>Figura 2.7: espectro electromagnético. Dominio de frecuencias de las microondas y bandas. Fuente: Marchionni et al., 2014.</i>	36
<i>Figura 2.8: imágenes SAR de RADARSAT-2 del sur de la provincia de Buenos Aires adquiridas con distintas configuraciones de polarización paralela y cruzada (Proyecto SOAR). Fuente: Marchionni et al., 2014.</i>	37
<i>Figura 2.9: geometría de la observación de un sistema de radar (modificado Raney, 1992). Fuente: CCRS, 2014.</i>	37
<i>Figura 2.10: RAR y SAR. Fuente: De Ruyt, 2013.</i>	38
<i>Figura 2.11: definición de amplitud y fase de un número complejo. Fuente: C. Rebelo, 2007.</i>	39
<i>Figura 2.12: geometría de un satélite técnica interferometría SAR. Fuente: CCRS, 2014.</i>	42
<i>Figura 2.13: configuración geométrica de la interferometría. Fuente: C. Rebelo 2007.</i>	43
<i>Figura 2.14: componentes de la base vertical y horizontal. Fuente: C. Rebelo 2007.</i>	44
<i>Figura 3.1: modos operativos Envisat. Fuente: ESA, 2007.</i>	49
<i>Figura 3.2: imagen SLC.</i>	53
<i>Figura 3.3: imagen multilooking.</i>	53

<i>Figura 3.4: interferograma (Base). Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	54
<i>Figura 3.5: interferograma aplanado “flattening”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	54
<i>Figura 3.6: interferograma filtrado “flattened”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	55
<i>Figura 3.7: imagen de coherencia. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	56
<i>Figura 3.8: fase absoluta y desenrollado de la fase.</i>	57
<i>Figura 3.9: desenrollado de la fase “unwrapping”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	57
<i>Figura 3.10: imagen de deformación. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.</i>	59
<i>Figura 3.11: modo de adquisición imagen COSMO- SkyMed. Fuente: E-GEOS, 2015.</i>	61
<i>Figura 4.1: imágenes InSar abril y mayo 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.</i>	69
<i>Figura 4.2: imágenes InSar mayo y junio 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.</i>	70
<i>Figura 4.3: imágenes InSar junio y julio 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.</i>	71
<i>Figura 4.4: imágenes InSar octubre y diciembre 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.</i>	72
<i>Figura 4.5: imagen ENVISAT (a) 08/05/2011, (b) 07/06/2011, (c) 07/07/2011, (d) 04/12/2011, (e) imagen óptica google earth 26/02/2015. (d) imagen de detección de cambios.</i>	73
<i>Figura 4.6: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) Imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.</i>	75
<i>Figura 4.7: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.</i>	77
<i>Figura 4.8: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.</i>	79
<i>Figura 4.9: imagen MODIS sensor Terra (a) 06/06/2011 hora: 02:23 UTM (b) 07/06/2011 hora: 14:25 UTM.</i>	80
<i>Figura 4.10: imagen TerraSAR-X, izquierda 06/06/2011, derecha 08/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por ZKI (DLR).</i>	81
<i>Figura 4.11: imagen TerraSAR-X , izquierda 14/06/2010, derecha 07/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por ZKI (DLR).</i>	82
<i>Figura 4.12: imagen TerraSAR-X, izquierda 14/06/2010, derecha 12/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por CONAE.</i>	83
<i>Figura 4.13: imagen ENVISAT, izquierda 07/02/2011, derecha 07/06/2011. Copyright: European Space Agency (ESA). Mapa elaborado por CONAE.</i>	84

<i>Figura 4.14: izquierda imagen Radarsat 1 01/05/2004, derecha imagen Radarsat 2 08/06/2011. Copyright: RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald. Mapa elaborado por CONAE.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.15: imagen Spot 4, izquierda 25/12/2007, derecha 25/06/2011. Composición falso color. Copyright: SPOT Image 2011. Mapa elaborado por CONAE.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.16: imagen SPOT 4 25/06/2011, pixel 10 m. Copyright: SPOT Image 2011. Mapa elaborado por CONAE.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.17: imagen nocturna Landsat 5 26/06/2011, banda térmica pixel 30 m. Copyright: USGS 2011. Mapa elaborado por CONAE.</i>	<i>87</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1: ficha técnica volcán Puyehue. Fuente: SERNAGEOMIN 2014.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3.1: imágenes SLC utilizadas para la elaboración de interferogramas.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 3.2: imágenes master y slave para elaboración de interferogramas.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 3.4: especificaciones de las ASAR Image Mode Swaths. Fuente: ESA, 2007.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 3.5: características de COSMO- SkyMed. Fuente: COSMO-SkyMed, 2015.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3.6: Agencias Espaciales CHARTER volcán Puyehue.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.1: resumen resultados del procesamiento de interferograma pares de imágenes ENVISAT ASAR. Fuente: C. Bignami et al., 2014.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.2: imágenes satelitales CHARTER volcán Puyehue erupción 2011.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla A.1: listado de cartografías elaboradas.</i>	<i>98</i>

1.1 Estructura de la tesis

Capítulo 1: Introducción, objetivos, antecedentes generales sensores remotos aplicados en erupciones volcánicas, ubicación y características generales del área de estudio y actividad volcánica del Puyehue.

Capítulo 2: Contiene el fundamento teórico sobre las imágenes satelitales tanto ópticas como de radar, además de señalar de manera general técnicas disponibles para el procesamiento en erupciones volcánicas.

Capítulo 3: Detalla el tipo y características de las imágenes satelitales que estuvieron disponible para el procesamiento y posterior análisis del proceso eruptivo del volcán Puyehue, y de las técnicas y parámetros específicos aplicados en el presente estudio.

Capítulo 4: Muestra los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes ENVISAT, CosmoSkymed, MODIS y su respectivo análisis.

Capítulo 5: Contiene las conclusiones.

1.2 Introducción

Los sensores remotos “teledetección” a través de satélites espaciales, nos permiten hacer monitoreo, ver el estado eruptivo, y evaluar los daños provocados por una erupción volcánica, siendo en la actualidad instrumentos consolidados, especialmente en zonas remotas, donde la ausencia de equipos técnicos en terreno no permiten monitorear adecuadamente ni seguir la evolución de una erupción volcánica. Procesos volcánicos que conducen a una erupción pueden ser monitoreados mediante el análisis permanente de ciertas variables, como por ejemplo la actividad sísmica, el levantamiento debido a la acumulación de magma, los cambios de calor y emisiones de ceniza y gas (F. Sigmundsson et al., 2010).

En general, mientras más fuentes de datos de vigilancia disponibles, mejores serán las posibilidades de entender correctamente cómo actúan los procesos volcánicos. Para tales fines, tanto los sensores ópticos como los SAR, nos pueden proporcionar información útil para la comprensión del dinamismo de las erupciones volcánicas. Con el fin de medir las deformaciones en terreno, la inflación y la deflación del edificio volcánico, Interferometría SAR (InSAR) es una adecuada técnica como se ha demostrado desde sus primeras aplicaciones (D. Massonnet et al., 1993).

InSAR también ha permitido la investigación de la deformación a gran escala de las zonas volcánicas debido a los movimientos de magma y fluidos hidrotermales (M. Pritchard et al., 2002), proporcionando algunas pistas sobre las complejas relaciones entre la deformación y el comportamiento eruptivo en estratovolcanes (J. Dvorak et al., 1997). Más recientemente, innovadoras técnicas InSAR multitemporales explotan una enorme cantidad de datos SAR, proporcionando mapas de deformación de la superficie en largos períodos de tiempo, haciendo posible el análisis de deformación de movimientos lentos superficiales del edificio volcánico. Además, permiten monitorear diferentes momentos del proceso eruptivo como se demostrará en capítulos posteriores de esta tesis. Estudios de casos recientes han procesado grandes conjuntos de datos de imágenes SAR, adquiridos de diferentes satélites y en diferentes frecuencias de tiempo, como ejemplo podemos mencionar estudios en los volcanes Santorini en Grecia, Eyjafjallajökull en Islandia y Campos Flégreos en Italia.

Adicionalmente a la detección de deformación de la superficie, los datos SAR pueden ser utilizados para obtener información sobre otros elementos, tales como flujos de lava o depósitos piroclásticos a través del método de detección de cambios (C. Bignami et al., 2013).

Los procesamientos de imágenes ópticas se utilizan generalmente para identificar la pluma volcánica. La información de cenizas y SO₂ de origen volcánico en la atmósfera es importante debido a los efectos sobre el clima (A. Robock., 2000) y su rol en los procesos para el manejo de la erupción (P. Allard et al., 1994; M. Edmonds et al., 2010). Por otra parte, la ceniza representa una grave amenaza para la seguridad aérea (T. Miller et al., 2000) y para las infraestructuras humanas y la salud debido al polvo en suspensión (C. Horwelle et al., 2006).

En este trabajo se reportan las observaciones y análisis basadas en aplicaciones de la teleobservación por satélite, en relación con la erupción volcánica del año 2011 del

Complejo Volcánico Cordón Caulle - Puyehue. Este complejo volcánico en la fecha de la erupción no era monitoreado por estaciones en terreno, de este modo la teledetección por satélite fue la única manera de capturar información sobre los procesos ocurridos. Además, fue aplicada la técnica interferometría SAR (InSAR) para detectar y medir los movimientos del terreno, y el método de detección de cambio para identificar los flujos de lava y de cenizas.

Adicionalmente, a las imágenes de radar, se utilizaron imágenes ópticas, e imágenes proporcionadas por la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes CHARTER, con el objeto de complementar los análisis realizados.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Análisis de los efectos de una erupción volcánica a través de imágenes satelitales. Caso de estudio: erupción volcán Puyehue registrada desde el año 2011.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar técnicas para el procesamiento de imágenes ópticas y de radar aplicadas en erupciones volcánicas.
- Aplicar aquellas técnicas de procesamiento de imágenes satelitales que entreguen mejores resultados, en la identificación de cambios y afectación frente a erupciones volcánicas.
- Generar cartografías con los resultados obtenidos, identificando los cambios ocurridos por la erupción volcánica desde el año 2011.

1.4. Aplicaciones de sensores remotos en erupciones volcánicas

Hay gran heterogeneidad en el comportamiento de las erupciones volcánicas, y cualquier volcán dado puede cambiar sus características con el tiempo o incluso durante una misma erupción. Casi todos los esfuerzos científicos en este terreno se han orientado hacia el desarrollo de métodos de alertamiento y predicción de las erupciones, a efecto de evacuar oportunamente a las poblaciones en peligro, y hacia métodos destinados a aminorar los daños (J. Seaman et al., 1984).

Debido a la fertilidad del terreno volcánico, las zonas que rodean a los conos están densamente pobladas y dentro de éstas áreas los peligros pueden ser extraordinarios (UN, 1977).

Los volcanes pueden afectar la salud de las poblaciones de dos maneras: de forma directa a causa de las explosiones, las corrientes de lava, cenizas, y otros efectos, y de forma indirecta al causar desplazamientos poblacionales, efectos adversos en la agricultura (H. Falk et al., 1980).

Los sensores remotos, especialmente datos ópticos y de radar, nos permiten hacer monitoreo, ver el estado eruptivo, y evaluar los daños respecto a una erupción volcánica. En términos generales, podemos señalar algunas aplicaciones, como por ejemplo las imágenes de satélites ópticas nos permiten visualizar la forma y dirección de la pluma volcánica, así como también aquellas zonas afectadas, ya sea por las cenizas, por el recorrido de lava, o por lahares, entre otras. Las imágenes en el infrarrojo cercanos (NIR) e imágenes del infrarrojo térmico (TIR), son utilizados para medir la temperatura de los cráteres activos, así como para el seguimiento de cenizas (CONAE, 2002).

Diversas técnicas de teledetección pueden ser aplicadas para mejorar nuestra comprensión de los procesos volcánicos, en la detección de la actividad precursora y para proporcionar datos clave en el monitoreo durante la erupción. De hecho, la teledetección está cambiando el campo de la vulcanología en base a los avances tecnológicos (A. Hopper et al., 2012).

Las imágenes satelitales, en las bandas visibles o en otras frecuencias, registran la radiación emitida y reflejada desde la superficie de la tierra y atmosfera. Los datos son adquiridos por radiómetros abordo de satélites, muchos de los cuales operan en una amplia banda de frecuencia. Ellos proporcionan observaciones de precursores peligros volcánicos, y una vez de ocurrida, ellos nos permiten monitorear casi en tiempo real, a veces de manera continua. Numerosos satélites pueden ser utilizados, todos los cuales proporcionan información sobre la erupción. Algunos ofrecen mejor resolución espacial, espectral o temporal.

Hooper, señala que hay cuatro áreas principales de la vulcanología donde el uso de mediciones de la radiación reflejada y emitida a través de sensores remotos ha tenido un mayor impacto, mapas de flujos y depósitos, el monitoreo de la erupción volcánica a través de la detección de puntos calientes, las mediciones de flujo de calor para monitorear las erupciones efusivas, y el monitoreo y cuantificación de la ceniza y SO₂ emitida por volcanes a la atmósfera.

Radar de apertura sintética (SAR) es una técnica que permite imágenes de radar de alta resolución que se forman a partir de los datos adquiridos por instrumentos de radar de visión lateral, transportado en avión o satélite espacial (J. Curlander et al., 1991).

En relación a la utilización de las imágenes de radar, especialmente en erupciones volcánicas, éstas nos presentan dos grandes ventajas, la primera es que para este tipo de imágenes no es un inconveniente que exista nubosidad, la onda de radar traspasa las nubes, posibilitando la obtención de una imagen. Una serie de imágenes SAR adquiridos por un avión de la Guardia Costera de Islandia reveló la evolución de calderas y cráteres de hielo eruptivos durante la etapa inicial de la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia en 2010, en condiciones de cielos totalmente nublados (E. Magnússon et al., 2012). La segunda ventaja corresponde a la utilización de una técnica, con la cual es posible obtener mediciones de deformación del terreno, conocida como interferometría. Movimientos pequeños pueden ser detectados mediante la medición del cambio de nivel desde el suelo al satélite utilizando interferometría de radar. Es el proceso de la multiplicación de una imagen SAR por el complejo conjugado de una segunda imagen SAR, resultando un interferograma, siendo la diferencia de fase entre las imágenes (P. Rosen et al., 2000).

Particularmente la interferometría de radar (InSAR), permite medir desde el espacio el desplazamiento de terreno del orden de algunos centímetros. Es posible así monitorear el “inflamamiento” de un volcán previamente a su erupción, esta misma tecnología nos permite monitorear el desplazamiento del manto de lava (CONAE, 2002).

Han habido muchos estudios InSAR exitosos, que utilizan varios satélites de radar, de la acumulación de magma en el subsuelo del volcán, a veces este tipo de eventos han precedido erupciones y en otros casos no ha ocurrido ninguna erupción (D. Dzurisin., 2006).

En la actualidad, una de las instancias de acceso y de utilización de imágenes satelitales para estos casos corresponde a la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes, que tiene como objetivo proporcionar, a través de Usuarios Autorizados, un sistema unificado de adquisición y entrega de datos espaciales (CHARTER, 2014).

1.5. Área de estudio: complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle, región de Los Ríos.

La Región de Los Ríos se enmarca entre los 39° 16' y 40° 41' de latitud sur y desde los 71° 35' de longitud oeste hasta el océano Pacífico. Desde el punto de vista geográfico, es una región con fuerte presencia de cauces fluviales que en su curso inferior interactúa con la ciudad de Valdivia que es la capital regional y el principal centro poblado.

En esta región predominan formas de relieve en función de la importancia que asumen las formas glaciales heredadas, la frecuencia de cuerpos lacustres y los relieves de construcción volcánica, teniendo presente que la actividad sísmica, ha jugado un importante papel. Pueden distinguirse cuatro unidades morfológicas: planicies litorales, cordillera de la Costa, depresión intermedia, cordillera andina volcánica (Figura 1.1).

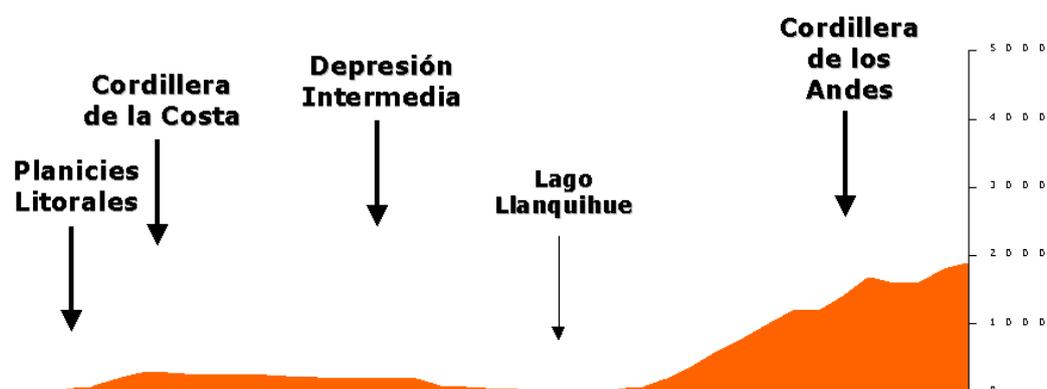


Figura 1.1: perfil topográfico 41° latitud sur. Fuente: geografía de Chile, 2014.

Las características morfológicas de la región influyen directamente en el comportamiento de las temperaturas, la cordillera de Los Andes presenta elevaciones inferiores a los 3.500 m., esta cordillera a su vez se ve interrumpida por valles de origen glaciar dando la formación a un gran número de lagos.

La zona se caracteriza por un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, donde la temperatura media solo alcanza a 11° C, lo que ya no corresponde a los climas cálidos. La homogeneidad del relieve, también produce valores reducidos en las amplitudes térmicas, así como similitud en las características térmicas generales de la región. Si bien las variaciones de relieve no son suficientes para producir variaciones significativas en la distribución de las temperaturas, sí generan diferencias en los montos de las precipitaciones, las que además se ven influenciadas por la altura y la latitud (DMC, 2014).

Las precipitaciones son producidas por frecuentes sistemas frontales que cruzan la zona, los que a su vez producen abundante nubosidad y poca cantidad de días despejados. El régimen pluviométrico anual presenta valores altos en toda la región, los que van en directa proporción a medida que aumentamos de latitud, o sea a mayor latitud mayor precipitación y de oeste a este.

Con respecto a la vegetación se presenta una cubierta vegetal de bosques higromórfica (formas adaptadas a la humedad), de gran variedad de especies, agrupadas en formaciones puras o mixtas. Entre las primeras se encuentran los bosques de alerce y lenga; entre las segundas, varias comunidades cuya composición varía con la posición topográfica, el suelo y el clima. Las excepciones a este cuadro aparecen en áreas discontinuas aledañas a la frontera, donde se desarrollan formaciones semidesérticas andinas de gramíneas. Estas formaciones han sido, en parte, intervenidas por el hombre para la extracción de productos forestales y habilitación de terrenos para el uso agropecuario, siendo eliminados prácticamente de la depresión intermedia y sectores de la cordillera de la Costa (INE. 2007).

Particularmente el complejo volcánico Cordón Caulle – Puyehue se encuentra ubicado en la comuna de Lago Ranco, región de Los Ríos (Figura 1.2) correspondiente a la zona volcánica sur (SVZ) de los Andes, y consiste en una serie de centros volcánicos alineados dirección noreste-suroeste, con una superficie de 15 x 4 km. (B. Singer et al., 2008). En la esquina noroeste del complejo, se encuentra el volcán Cordillera Nevada, en la sección central es el Cordón Caulle, corresponde a un sistema de fisuras que ha emitido grandes cantidades de diferentes tipos de lava, y en el sur se encuentra el volcán Puyehue que alcanzan 2.236 m. de altitud, con un cráter principal de 2,5 km. en su cima (Figura 1.3). Las erupciones más importantes en los últimos años ocurrieron en 1921-1922, y en el año 1960, horas después del más grande terremoto registrado con 9,5 grados de magnitud correspondiente al terremoto de Valdivia Chile (L. Lara, 2004).

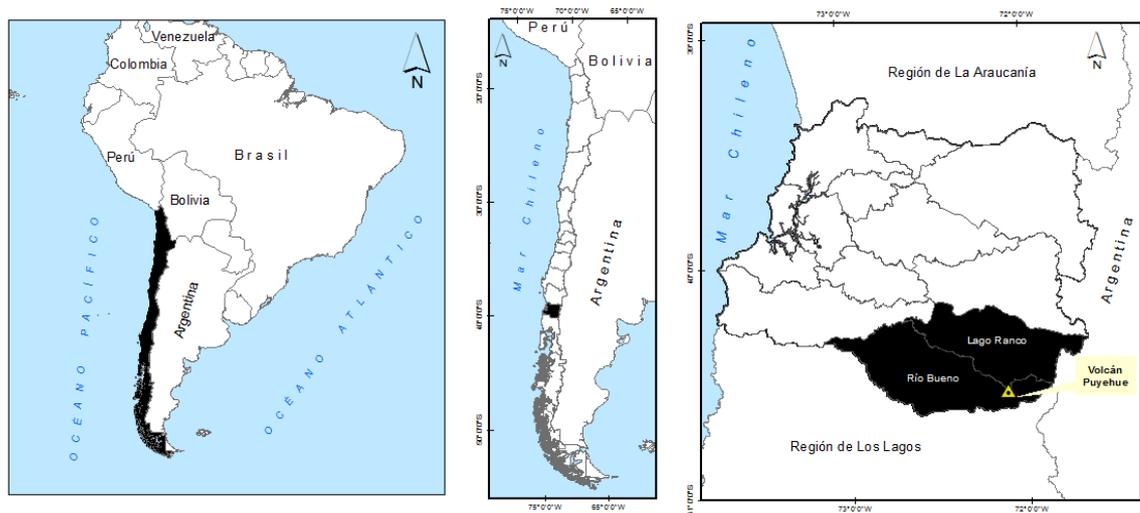


Figura 1.2: mapa ubicación volcán Puyehue.



Figura 1.3: volcán Puyehue, Cordón Caulle. Fuente: imagen base de google earth, 2015.

De acuerdo a la ficha técnica del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, el complejo volcánico tiene las siguientes características:

Coordenadas:	40,59° S – 72,11° W
Altura:	2200 msnm
Diámetro basal:	17 km
Área basal:	1200 km ²
Volumen estimado:	200 km ³
Última erupción mayor:	06/2011
Poblados más cercanos:	Anticura, Ñilque, Riñinahue
Ranking de riesgo específico:	8 (Muy Alto)

Tabla 1.1: ficha técnica volcán Puyehue. Fuente: SERNAGEOMIN 2014.

La zona presenta una importante actividad volcánica histórica. En ella se encuentran además el grupo volcánico Carrán-Los Venados, en donde se distinguen los volcanes Carrán, Mirador, Los Guindos y Riñinahue, además, de numerosos conos volcánicos menores.

Es importante señalar que el área descrita se encuentra alineada a una zona de fractura o falla geológica de orientación general nor-este, que intercepta a trazas principales del sistema de falla Liquiñe – Ofqui (Figura 1.4).

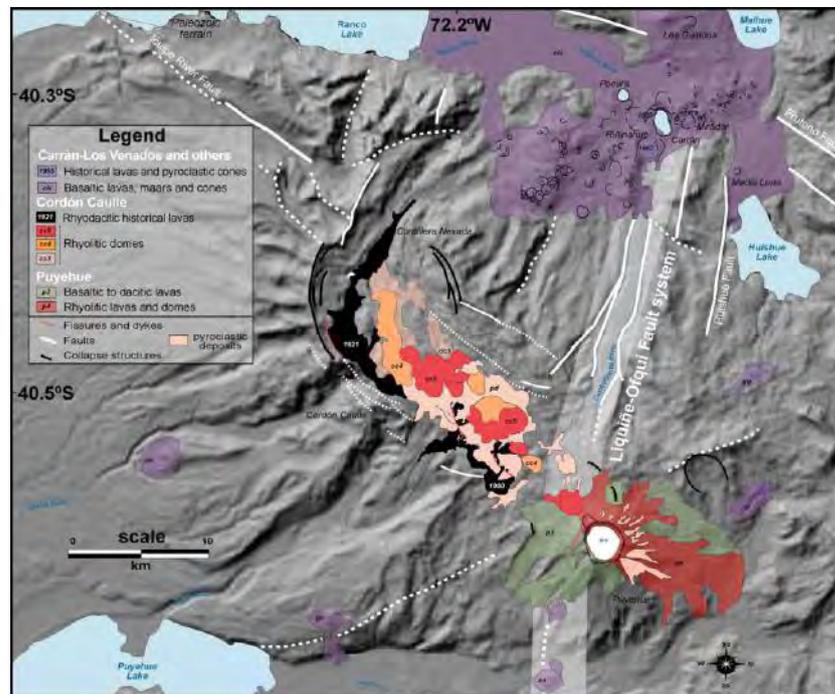


Figura 1.4: mapa de emanación de lava de erupciones históricas. Fuente: Lara et al., 2006.

Como se mencionó anteriormente, el área en la cual se encuentra el complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle pertenece a la comuna de Lago Ranco, sin embargo, una posible afectación por un erupción volcánica es mayor, involucrando en primera instancia a las comunas de Lago Ranco, Río Bueno y Futrono en la región antes señalada y a la comuna de Puyehue en la región de Los Lagos.

El área estimada para gestión preventiva por actividad del volcán Caldera Cordillera Nevada – Cordón Caulle, comprende las comunas antes señaladas. La población en un radio de 30 Km. alrededor del volcán alcanza 13.712 habitantes de acuerdo al Censo del año 2002, los cuales se distribuyen en 190 localidades aproximadamente. La localidad que presenta mayor número de población corresponde a la capital comunal Lago Ranco con 2.205 habitantes (ONEMI, 2011).

Gran parte de la población vulnerable frente a una erupción volcánica, se encuentra en zonas rurales por lo que las actividades económicas principales son la agropecuaria, forestal, turismo y servicios.

Dentro del área de gestión preventiva señalada anteriormente, se encuentra el área silvestre Parque Nacional Puyehue, donde se destaca la protección de las especies de fauna como el puma, el zorro gris, el quique y el coipo. En lo que a vegetación se refiere, la formación dominante es el bosque húmedo siempre verde, compuesto por varios estratos y una rica composición de especies.

1.6. Actividad complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle

Según el Servicio Nacional de Minería y Geología de Chile, SERNAGEOMIN, Chile tiene más de 2.000 volcanes, 500 de ellos considerados geológicamente activos, y 60 con registros de erupciones históricas en los últimos 450 años, dentro de los que se encuentra el volcán Puyehue.

El 4 de junio de 2011, el volcán Puyehue comenzó una nueva erupción volcánica. Esta nueva e intensa erupción duró varios meses y se caracterizó por presentar actividades efusivas y explosivas. Antes a la erupción, la sismicidad aumentó en un promedio de 230 sismos por hora, a una profundidad de 1 a 4 km., el 4 de junio unos 12 sismos fueron con magnitudes superiores a 4, y 50 casos fueron de magnitudes superiores a 3. El nivel de alerta volcánica se elevó a 5 y la explosión del volcán produjo una gran nube de cenizas y de gas de 5 km. de diámetro que se elevó a una altitud de 12,2 km. Desde los días 4 y 5 de junio se registró caída de cenizas de varios centímetros de espesor en áreas circundantes (GVP, 2014).

1.6.1 Erupciones históricas del complejo volcánico

Actividad reciente (menor a 1.000 años) ha tenido lugar en el Cordón Caulle, en forma de extrusión de domos y coladas de lava.

La actividad histórica es poco conocida, sin embargo, existen reportes de actividad en los años 1759, 1893, 1905, 1914, 1919-20, 1921-22, 1929 y 1960 (ONEMI 2011).

Entre los procesos eruptivos de mayor importancia se pueden mencionar:

Erupción año 1921 - 1922 Cordón Caulle:

La primera fase eruptiva comenzó el 13 de diciembre del año 1921, con una serie de violentas explosiones y emisión de grandes cantidades de material piroclástico y que continuó hasta el día 19 de diciembre. Esta erupción se localizó en el extremo noroeste del Cordón Caulle (localización similar a la actividad sísmica de abril de 2011). En enero de 1922 se generaron diversas corrientes de lava avanzando especialmente hacia el norte por el valle del río Riñinahue, dentro de la glaciada depresión de la cordillera Nevada.

Erupción año 1960 Cordón Caulle - Puyehue:

El ciclo eruptivo del año 1960 ocurrió 38 horas después del sismo de Valdivia del 24 de mayo de 1960 (el sismo mayor registrado instrumentalmente en la historia, con una magnitud 9.5 Richter), cuyo epicentro se localizó 240 km. al noroeste del volcán. La fase explosiva inicial de esta erupción generó una columna de unos 8 km. de altura (Figura 1.5) que se dispersó hacia el sureste, y cubriendo la zona con un depósito de pómez que a 40 km. tiene un espesor de 10 cm, en las zonas de Panguipulli y Ensenada. Vientos predominantes del oeste y noroeste transportaron las cenizas y fragmentos de pómez hacia territorio argentino. Durante la fase efusiva posterior escurrieron coladas de lava desde 21 centros de emisión a lo largo del cordón. La erupción tuvo una

duración de dos meses, durante los cuales se expulsó un volumen de 0,25 km³ de lava (O. González – Ferrán, 1995).

Desde el 22 de julio de 1960 comienza fase de descenso de la actividad eruptiva.



Figura 1.5: erupción volcán Puyehue año 1960. Fuente: González – Ferrán, volcanes de Chile y Programa Nacional de Riesgos y Prevención de Catástrofes, 1983.

Durante el año 2007, el sector presentó un aumento en la actividad sísmica, específicamente a partir del día 6 de mayo, lo cual fue percibido en la localidad de Lago Ranco, y valles de los ríos Nilahue y Riñinahue. La actividad sísmica (enjambre) se desarrolló en las cercanías de la cordillera Nevada.

1.6.2 Proceso eruptivo año 2011

Cronología (ONEMI., 2011)

19 de Abril de 2011

Se detectó sismo asociado al fracturamiento de roca (volcano-tectónico), ubicado en cercanías a la caldera de la cordillera Nevada y del Cordón Caulle. ONEMI declaró **ALERTA TEMPRANA PREVENTIVA** para las comunas Futrono, Lago Ranco y Río Bueno.

27 de Abril de 2011

Se registró enjambre sísmico asociados a fracturamiento de roca (Figura 1.6) y procesos de dinámica de fluidos combinados. Esto indicó un patrón de actividad asociado con un rol activo de los fluidos dentro de los conductos volcánicos del sistema, con mayor relación a la estructura del Cordón Caulle. ONEMI declaró **ALERTA AMARILLA** para las comunas Futrono, Lago Ranco y Río Bueno, en la región de Los Ríos y

ALERTA TEMPRANA PREVENTIVA para la comuna de Puyehue en la región de Los Lagos.

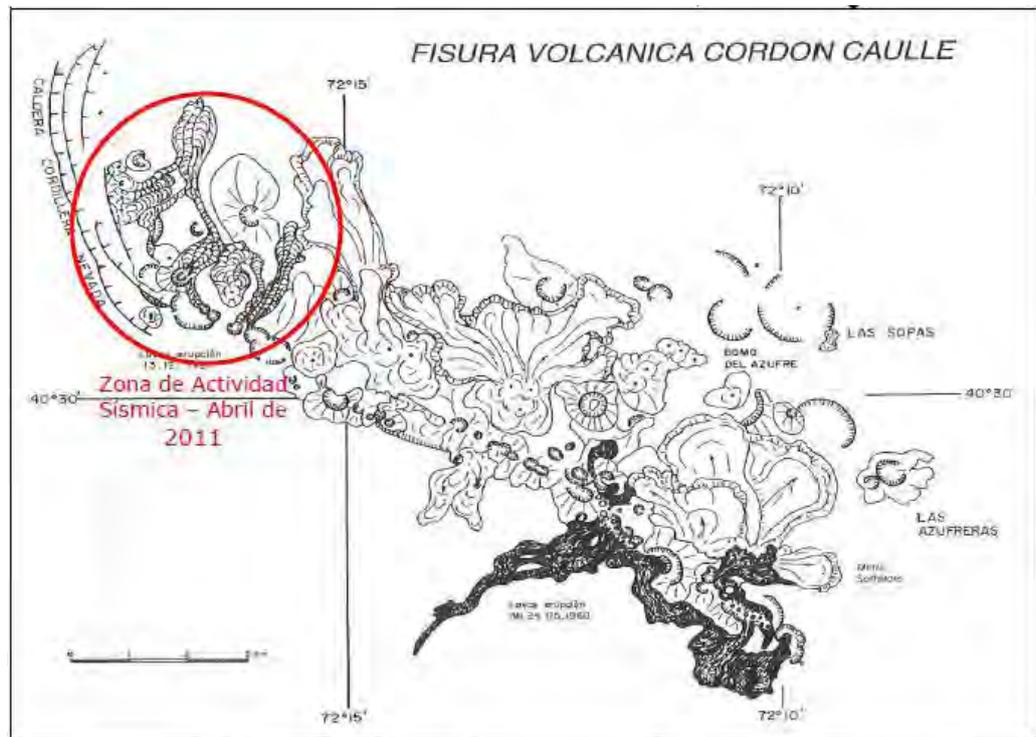


Figura 1.6: zona de actividad sísmica. Fuente: O. González – Ferrán. Fisuras históricas Cordón Caulle – ONEMI.

04 de Junio de 2011

Se registró una explosión y como producto de ello se generó una columna de gases con una altura aproximada de 10 km. y un ancho de 5 km. (Figura 1.7). ONEMI declaró **ALERTA ROJA** en las comunas Futrono, Río Bueno, Lago Ranco, región de Los Ríos y comuna de Puyehue, región de Los Lagos.

ONEMI en coordinación con los integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil de Chile, procedieron a evacuar a la población localizadas en las cercanías del Complejo Volcánico, para lo cual se dispuso de albergues.

18 de junio de 2011

SERNAGEOMIN informa que de acuerdo a las condiciones eruptivas, las áreas susceptibles de ser afectadas por lahares (aluviones volcánicos) se reducen al cauce mismo del río Nilahue en su tramo medio y superior. Además se recomendó la restricción de acceso a la parte alta de los valles que descienden del complejo volcánico y al sector correspondiente del Parque Nacional Puyehue. El día 18, las cenizas llegaron a la ciudad de Coyhaique, luego de haber dado la vuelta al mundo.

Durante los meses de julio, agosto y septiembre, el comportamiento de la evolución del proceso eruptivo fue disminuyendo paulatinamente en su intensidad, lo que fue consignado en el reporte del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) del mes de octubre.

20 de Octubre de 2011

El Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) informa de la actividad del Cordón Caulle en las últimas 24 horas. El nivel de la alerta volcánica es ROJO: Proceso eruptivo se encuentra de baja intensidad y tendencia estable. Los peligros indicados en el nivel de alerta volcánica actual, se reducen a caídas de cenizas finas que pueden causar algunos problemas en el tráfico aéreo, dependiendo de la circulación atmosférica y posibles lahares secundarios, con la ocurrencia de lluvias y/o procesos de deshielo.

El análisis de la actividad sísmica revela que el proceso eruptivo del Cordón Caulle continúa con baja intensidad y con poca emisión de material particulado. Las posibilidades de eventos explosivos menores aún permanecen, debido a posibles obstrucciones del conducto por la lava emitida y/o a cambios en la dinámica de la erupción.

Por parte de ONEMI, Se mantiene la Alerta Roja para las comunas de Futrono, Lago Ranco y Río Bueno en la Región de Los Ríos y para la comuna de Puyehue en la Región de Los Lagos por actividad complejo volcánico Puyehue -Cordón Caulle, establecida desde el mes de junio de 2011.



Figura 1.7: erupción volcán Puyehue año 2011. Fuente: sobrevuelo ONEMI – SERNAGEOMIN.

El 23 de Abril del año 2012, la sismicidad registrada en el volcán continuaba con tendencia a la disminución, permaneciendo con un bajo nivel de actividad y energía comparado con los meses anteriores. Esta condición demostraba una cierta estabilidad

en el sistema volcánico, por lo cual ONEMI determinó levantar la Alerta Roja y establecer Alerta Amarilla.

Durante el mes de agosto y principios de septiembre del año 2012, el volcán Puyehue presentó un muy bajo nivel de la sismicidad registrada tanto en ocurrencia como en energía, la ausencia de señal de tremor, así como de procesos de desgasificación, todo ello asociado con la declinación de la dinámica del cuerpo de lava observada por medio de las imágenes de radar, indicaban que el sistema volcánico del Cordón Caulle había retornado a un estado de estabilidad. Por lo anterior el 13 de septiembre de 2012 se levanta Alerta Amarilla y fue declarada Alerta Verde en el volcán Puyehue.

De acuerdo al reporte de SERNAGEOMIN de diciembre del año 2013, señala la actividad sísmica asociada al complejo volcánico, continuaba con un comportamiento estable, por lo cual se mantenía la alerta volcánica en nivel verde.

Desde el inicio de la erupción y por más de cinco meses el volcán estuvo emitiendo cenizas desde su cráter, desde el 4 de Junio manifestándose con una densa columna de cenizas de cerca de 9 kilómetros sobre el volcán, debilitándose paulatinamente, manifestándose entre los meses de octubre y noviembre con caídas de cenizas finas.

El Departamento de Geología de la Universidad de Chile, señaló que alrededor de cien millones de toneladas de cenizas, arena y piedra pómez fueron expulsadas aproximadamente desde el cordón, y los efectos sobre los poblados afectados fueron numerosos. Sin embargo, la consecuencia más importante de esta erupción, fue la gran cantidad de material particulado emitido.

2. Teledetección

La percepción remota (teledetección) corresponde a la técnica empleada la cual permite obtener información a distancia sobre elementos localizados en la superficie terrestre.

Chuvienco (2006), indica que existen tres elementos principales en cualquier sistema de teledetección, que corresponde al sensor, al objeto observado y al flujo energético que los pone en relación, existiendo tres formas de adquirir información a través de los sensores remotos que corresponde a la reflexión, emisión, emisión-reflexión (Figura 2.1).

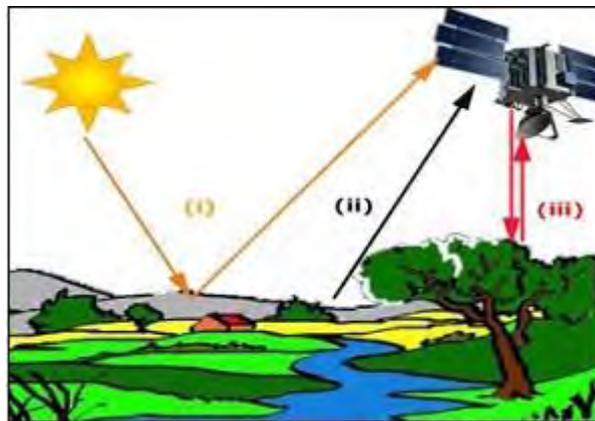


Figura 2.1: flujo energético (i: reflexión, ii: emisión, iii: emisión-reflexión). Fuente: REDIAM, 2015.

La primera, que corresponde a la reflexión (i), es una de las más importantes en la teledetección, dado que se deriva directamente de la luz solar, el sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella, siendo este flujo reflejado capturado por el sensor.

Los otros flujos energéticos, correspondiente a: emisión (ii) relacionado a la radiación terrestre emitida por los objetos y capturada por el sensor y finalmente la emisión-reflexión (iii) corresponde a la radiación emitida por el sensor denominado activo y reflejada por los objetos para posteriormente registrar su eco sobre la superficie terrestre.

Existen muchos tipos de teledetección, las cuales pueden ser clasificadas por el dominio espectral en el cual operan, o sea el rango de longitudes de onda en el cual está activo el sensor.

2.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es una representación de la energía en función de la frecuencia o número de onda. La energía viaja a la velocidad de la luz en forma de ondas y se puede detectar a través de su interacción con el medio ambiente (C. Rebelo, 2007).

En los sensores remotos, es común categorizar las ondas por la ubicación de su longitud de onda en el espectro electromagnético, que se mide en micrómetros que corresponde a 1×10^{-6} m. (T. Lillesan et al., 1994). No hay una división exacta entre una región espectral nominal y la siguiente; las divisiones del espectro han crecido, principalmente debido a los diferentes métodos de sensado para cada tipo de radiación. Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que puede ser la longitud de onda o la frecuencia. La sensibilidad espectral del ojo humano se extiende desde 0.4 a los 0.7 μm .

La mayoría de los sistemas de sensado operan en una o varias de las porciones visibles, en el infrarrojo o microondas del espectro. Solo la energía del infrarrojo termal está relacionada directamente con la sensación de calor (Figura 2.2).

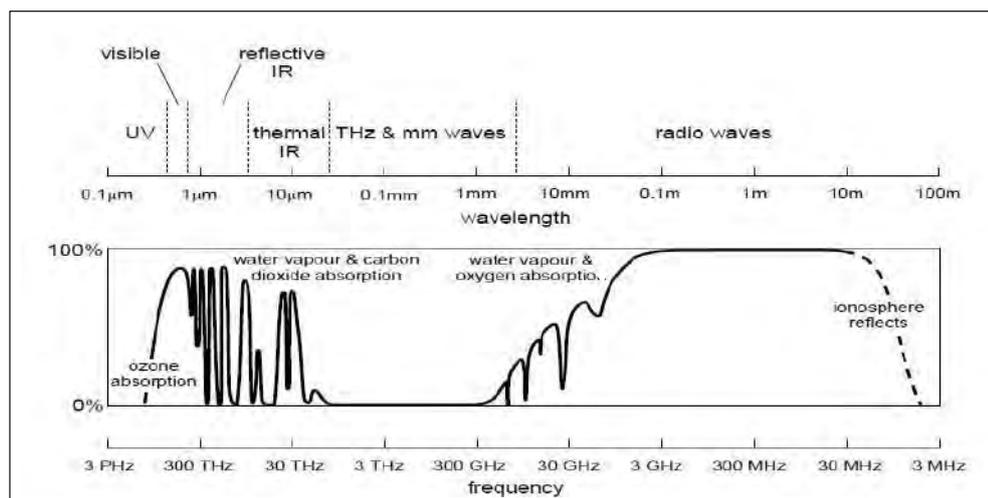


Figura 2.2: espectro electromagnético e interacción de los tipos de frecuencias con los diferentes componentes de la atmósfera. Fuente: J. Richards, 2009.

Resumiendo podemos señalar que el dominio óptico se refiere a las longitudes de onda emitidas por el sol reflejadas por la superficie terrestre correspondiente a longitudes de onda entre 0.4 μm a 2,8 μm , incluyendo los dominios del visible (subdividido en azul de 0.4 a 0.5, verde de 0.5 a 0.6, rojo 0.6 a 0.7 μm), e infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm), y del infrarrojo medio (1.1 a 2.8 μm). El dominio térmico comprende las longitudes de onda entre 2.8 μm y 14 μm para la observación de la tierra se refiere a la medición de la energía emitida por las superficies terrestres en estas longitudes de onda. El dominio de microondas comprende longitudes de onda entre 0.1 cm a 1 metro.

Se pueden también categorizar los sistemas de teledetección entre pasivos y activos, según si el sensor es la fuente de energía, como es el caso de los radares (en el dominio de las microondas) o de los que miden la energía que existe independiente de él, por ejemplo la luz del sol reflejada sobre la superficie terrestre, o la energía emitida por la tierra (N. Beaulieu et al., 2006).

A continuación se mencionará algunas características de la energía electromagnética relacionada con la frecuencia y longitud de onda (inversamente proporcional a la frecuencia).

2.1.1 Concepto de longitud de onda y frecuencia

La luz es una de las muchas formas de energía electromagnética, otros tipos de onda son las de radio, calor, rayos X, ultravioletas, etc. La energía electromagnética se describe como una onda sinusoidal armónica, que viaja a la velocidad de la luz. Las ondas obedecen a la ecuación general (C. Sanz, 2002):

$$c = v \lambda$$

Donde: λ es la longitud de onda y V corresponde a la frecuencia (Figura 2.3)

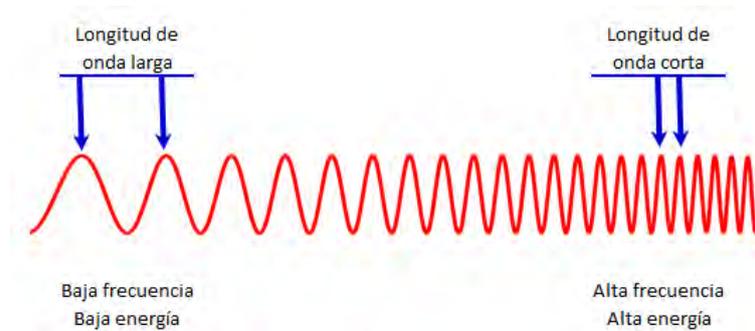


Figura 2.3: concepto de frecuencia y longitud de onda.

2.1.2 Reflexión, Absorción y Transmisión

La fuente principal de energía usada para iluminar distintos objetos es el sol. Los rayos solares pasan a través de la atmósfera y una fracción de la energía al interactuar con los materiales de la superficie de la Tierra, es absorbida o reflejada, mientras que el resto es transmitida o refractada (Figura 2.4). Si el cuerpo con el que choca la luz es opaco, una parte de la energía es reflejada y el resto absorbida, si es transparente, una parte será absorbida y el resto atravesará el cuerpo transmitiéndose. Entonces se pueden mencionar los siguientes tipos de interacción de la energía electromagnética con los materiales: reflexión, absorción y transmisión o refracción.

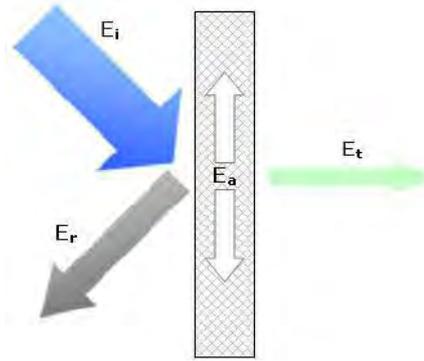


Figura 2.4: energía Incidente (E_i), reflejada (E_r), absorbida (E_a), transmitida (E_t).

La cantidad de energía que es reflejada, transmitida o absorbida varía de acuerdo a la longitud de onda y al tipo de material. Esta propiedad de la materia es importante porque permite identificar y separar diferentes clases o sustancias por sus curvas espectrales. Dentro de la porción visible del espectro, estas variaciones resultan en el efecto visual que se conoce como color.

De acuerdo a lo que señala C. Sanz (2002) en su tesis doctoral, los tipos de interacción de la energía electromagnética con los materiales se manifiestan de la siguiente manera:

Reflexión: es el fenómeno que se produce cuando la luz incide contra una superficie ya sean gases como la atmósfera, líquidos como el agua o sólidos, la dirección en que sale la luz reflejada estará determinada por el tipo de superficie. Si es una superficie brillante o pulida se produce la reflexión regular en que toda la luz sale en una única dirección. Si es mate y la luz sale desperdigada en todas las direcciones se llama reflexión difusa, y por último, está el caso intermedio, reflexión mixta, en que predomina una dirección sobre las demás. Esto se da en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel brillante, etc. Las características de reflectancia de los rasgos de la superficie terrestre pueden ser cuantificados midiendo la porción de energía incidente que es reflejada. La medición se realiza como una función de la longitud de onda, llamada reflectancia espectral, ρ_λ

$$\text{Reflectancia espectral } \rho_\lambda = ER(\lambda) / EI(\lambda)$$

Donde, $ER(\lambda)$: es la energía reflejada desde el objeto en la longitud de onda λ

$EI(\lambda)$: es la energía incidente en el objeto en la longitud de onda λ

ρ_λ se expresa como porcentaje

En principio, varios tipos de materiales de la superficie pueden ser reconocidos o distinguidos unos de otros por las diferencias en la reflectancia espectral.

Refracción: se produce cuando un rayo de luz es desviado de su trayectoria al atravesar una superficie de separación entre medios de diferentes densidades. Esto se debe a que la velocidad de la luz en cada uno de ellos es diferente.

Transmisión: se puede considerar una doble refracción. Si pensamos en un cristal, la luz sufre una primera refracción al pasar del aire al vidrio, sigue su camino y vuelve a

refractarse al pasar del vidrio al aire. Si después de este proceso el rayo de luz no es desviado de su trayectoria se dice que es una transmisión regular como pasa en los vidrios transparentes. Si se difunde en todas direcciones tenemos la transmisión difusa como ocurre con los vidrios translúcidos, y si predomina una dirección sobre las demás tenemos la mixta como ocurre en los vidrios orgánicos o en los cristales de superficie labrada.

Absorción: es un proceso muy ligado al color. El ojo humano es sensible a las radiaciones de un pequeño intervalo del espectro electromagnético. Las componentes reflejadas son las que determinan el color que percibimos, el resto son absorbidas. Si refleja todas es blanco y si absorbe todas es negro. Estrictamente, las medidas espectrales involucran interacciones entre las radiaciones de iluminación y las estructuras atómicas o moleculares de cualquier material.

2.2. Imágenes multiespectrales e hiperespectrales.

Las imágenes multiespectrales son aquellas obtenidas usualmente de longitudes de onda usualmente entre 0.4 a 12.0 μm . Las cámaras electrónicas que capturan dichas imágenes pueden obtener muchas imágenes al mismo tiempo en diferentes partes del espectro (C. Sanz, 2002).

En los rangos del espectro electromagnético que capturan este tipo de imágenes podemos ver regiones amplias que incluyen las longitudes de onda ultravioleta (0.3 - 0.4 μm), visible (0.4 a 0.7 μm), infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm), infrarrojo medio (1.3 a 3 μm), y el infrarrojo termal (a partir de 3 μm). Estas son generalmente las bandas obtenidas por un escáner multiespectral. Los satélites Landsat introdujeron la tecnología multiespectral en los años 60', y transmiten los valores reflejados para 6 bandas en el espectro visible y 1 banda infrarroja termal.

Los sensores de imágenes espectrales continuaron mejorando en cuanto a resolución espacial y espectral. Actualmente, los sistemas hiperespectrales proveen cientos de bandas, lo que hace que estas imágenes sean usadas para una variedad de aplicaciones.

El producto o salida de estos sensores es una gran cantidad de imágenes de la misma escena, adquirida en bandas continuas sobre un rango espectral, y se denomina a menudo como cubo de imagen. Estas imágenes son referidas como hiperespectrales, debido a su alta resolución espectral y a la gran cantidad de canales.

2.3 Imágenes de radar

Radar es el acrónimo del inglés de detección y localización por radio. El Centro de Sensores Remotos de Canadá (CCRS), indica que un sistema de radar tiene tres funciones primordiales:

- Transmitir señales de microondas (radio) hacia una escena.
- Recibir la porción de la energía transmitida, que se refleja hacia el sensor desde la escena iluminada.
- Observar la potencia de la señal reflejada y el tiempo necesario para que la señal regrese al sensor.

La percepción remota mediante radares emplea la porción del espectro electromagnético en donde se presentan las microondas, que tienen frecuencias entre 0.3 y 300 GHz y longitudes de onda entre 1mm y 1m. (Figura 2.5).

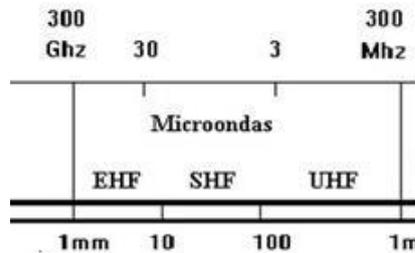
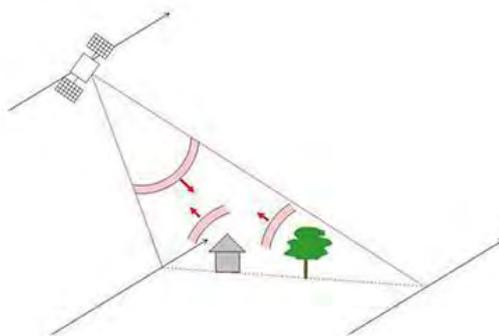


Figura 2.5: espectro electromagnético microondas.

El radar es un sensor activo de microondas que se desplaza a bordo de una plataforma explorando la tierra, emitiendo pulsos de energía hacia la superficie terrestre y almacenando las señales de retorno. Por trabajar con haces de energía emitidos artificialmente, los sistemas de radar permiten controlar las condiciones de la adquisición como frecuencia, polarización y geometría de la observación y pueden coleccionar datos tanto de día como de noche (D. Marchionni et al., 2014). Un sistema de teledetección por RADAR (Radio Detection And Ranging) transmite pulsos de microondas que van barriendo la superficie terrestre y recibe la porción de energía que es reflejada (retrodispersada) de vuelta hacia el sensor (Figura 2.6). El sistema registra la intensidad de la señal de retorno (radiación retrodispersada) y el retardo en tiempo entre la transmisión y recepción de cada pulso de energía, el cual se relaciona con la distancia de los objetos observados (CCRS, 1995).



$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma$$

- P_r Potencia retrodispersada
- P_t Potencia transmitida por el sensor
- G Factor de ganancia de la antena
- R Distancia entre el sensor y la superficie
- σ Sección eficaz de retrodispersión

Figura 2.6: funcionamiento de los sistemas de radar. Ecuación fundamental del radar. Fuente: RADARSAT, 1997.

La relación fundamental entre las características del radar, el objeto observado y la señal recibida está definida en la ecuación del radar, que expresa la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida por el sensor (Figura 2.6). La magnitud física medida directamente por el sensor es la intensidad de la radiación retrodispersada, la cual depende del coeficiente de retrodispersión o *backscattering* (σ^0) de cada superficie. Este coeficiente relaciona la energía retrodispersada con la recibida por unidad de área en la

dirección del alcance terrestre. Cada tipo de cubierta tiene un coeficiente de retrodispersión o reflectividad radar promedio que depende principalmente de su conductividad o constante dieléctrica. Hay una serie de factores que introducen una variabilidad en torno a ese valor medio, condicionando la señal final que será recibida por el sensor. Algunos de ellos están directamente relacionados a las propiedades del haz de radar emitido como la polarización y el ángulo de incidencia, mientras que otros son dependientes de las características de las superficies observadas como el contenido de humedad, la rugosidad superficial y la morfología del terreno o de sus relaciones con el haz de radar como la pendiente y orientación del terreno respecto del haz emitido. (D. Marchionni et al., 2014). Cada píxel de una imagen radar tendrá asociado un valor numérico que codifica digitalmente la intensidad de la señal recibida por el sensor y que queda expresado en la brillantez radar (β^0), la cual se manifiesta en la imagen en forma proporcional a una escala de grises de intensidad creciente.

Como hemos visto en párrafos anteriores, los sistemas de teledetección por radar operan en longitudes de onda más largas que las de los sistemas ópticos. A los distintos intervalos de frecuencias de las microondas se han asignado bandas identificadas por letras K, X, C, S, L. (Figura 2.7).

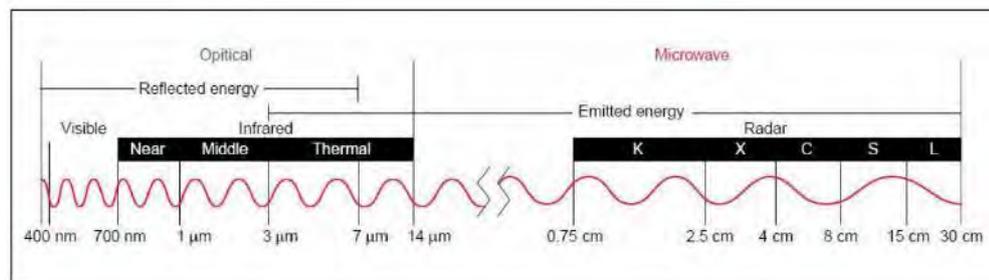


Figura 2.7: espectro electromagnético. Dominio de frecuencias de las microondas y bandas. Fuente: Marchionni et al., 2014.

Los sistemas de radar están diseñados para transmitir y recibir radiación polarizada plana en distintas direcciones (Figura 2.8). La dirección con la que la señal esté polarizada influirá en sus interacciones con el medio y en el flujo de retorno que registrará el radar (F. Ulaby et al., 1990). Los primeros radares satelitales solo podían recibir radiación de igual polarización a la transmitida señalada como polarización paralela, en la actualidad además de funcionar con polarización paralela, hay sensores que pueden recibir radiación en una polarización opuesta a la de la radiación transmitida descrita como polarización cruzada, existiendo distintas combinaciones de polarizaciones para una misma imagen: *Single Pol* formada por una escena HH o VV, *Dual Pol* formada por dos escenas HH+HV o VV+VH, y *Quad Pol* (polarimétrica) formada por cuatro escenas, una para cada una de las polarizaciones posibles: HH+HV+VH+VV.

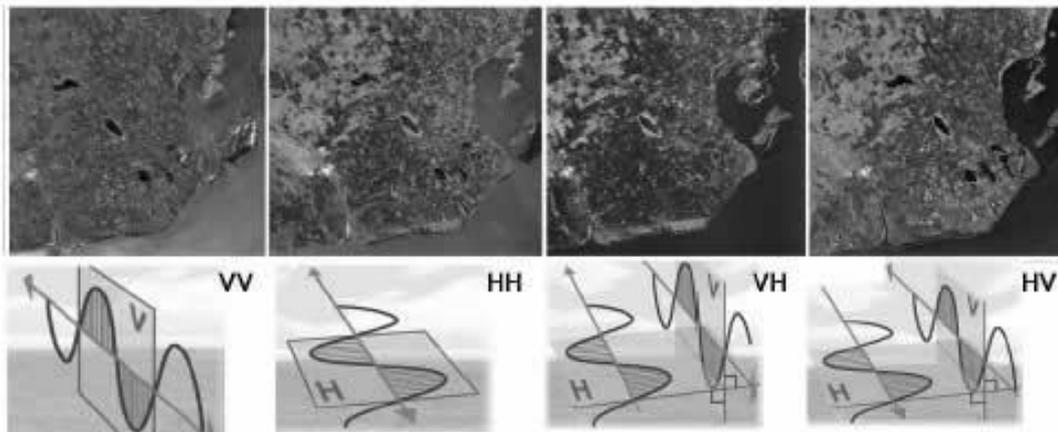


Figura 2.8: imágenes SAR de RADARSAT-2 del sur de la provincia de Buenos Aires adquiridas con distintas configuraciones de polarización paralela y cruzada (Proyecto SOAR). Fuente: Marchionni et al., 2014.

2.3.1 Radar de apertura sintética (SAR)

Es un sistema de radar de iluminación lateral que produce una imagen de resolución fina de la superficie bajo observación.

Al moverse a lo largo de su trayectoria, el radar ilumina hacia un lado de la dirección de vuelo franjas continuas y paralelas entre sí, de la superficie en estudio y acumula la información de las microondas que se reflejan. La señal que se graba a bordo, se procesa apropiadamente para formar una imagen digital.

La distancia entre el radar y el objetivo en la superficie en la dirección perpendicular al vuelo, se le llama alcance. Se le conoce como acimut a la distancia a lo largo de la trayectoria en un sistema de radar, la resolución tiene dos dimensiones, una en la dirección del alcance y otra en la del acimut (Figura 2.9).

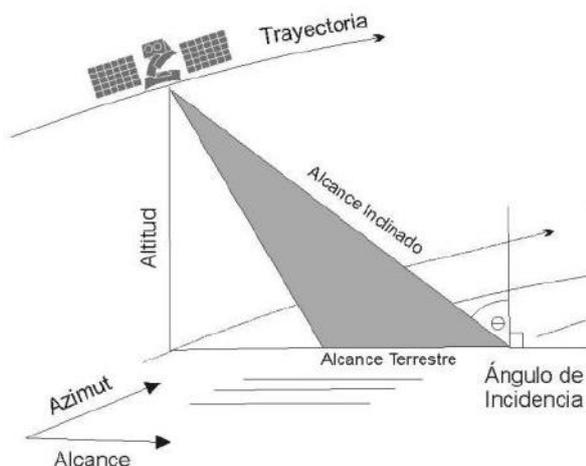


Figura 2.9: geometría de la observación de un sistema de radar (modificado Raney, 1992). Fuente: CCRS, 2014.

Mediante un procesamiento digital de la señal, la imagen puede enfocarse y obtenerse así, una resolución mejor que la de un radar convencional (CCRS, 2014). El Radar de Apertura Sintética (SAR), que por definición genera una antena artificial usando el movimiento de la plataforma (Figura 2.10), combinando la información de muchos pulsos recibidos que retornan en un tiempo determinado (R. De Ruyt 2013). Este método mejora la resolución en acimut de la plataforma en cerca de tres órdenes de magnitud (R. Hanssen, 2001; J. Richards, 2009). Para llevar a cabo este proceso, la característica funcional más importante de un SAR es que corresponde a un sistema coherente, lo que significa que conserva la información de fase tanto de la señal enviada como del eco recibido (R. Hanssen, 2001).

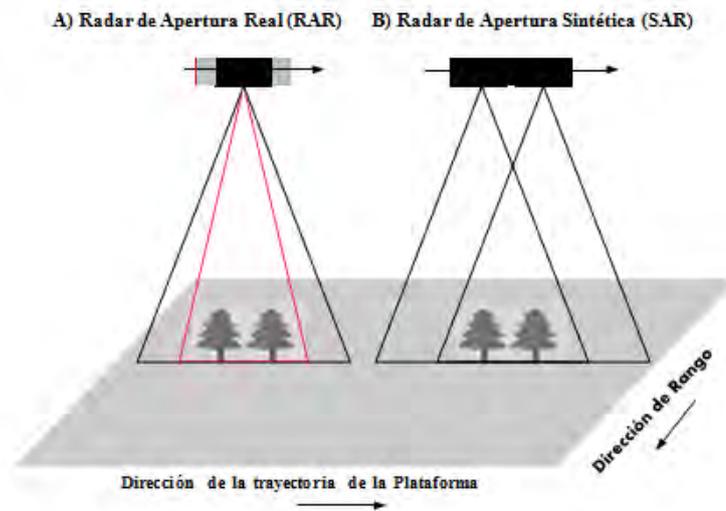


Figura 2.10: RAR y SAR. Fuente: De Ruyt, 2013.

Esto no solo determina la generación finalmente de una matriz ordenada con los ecos recibidos, sino que se transforma en el factor explicativo de la posibilidad de poder desarrollar una de las aplicaciones más características de este tipo de plataformas que corresponde específicamente a la interferometría, que dentro de sus diversas aplicaciones se utiliza para el monitoreo, así como para la evaluación de cambios e impactos en el terreno, como por ejemplo en caso de terremotos, deslizamiento de tierra y erupciones volcánicas, aspectos generales que detallaremos a continuación.

2.3.2. Imágenes complejas SAR: amplitud y fase

Un sistema SAR permite obtener imágenes complejas en que la información de la fase es preservada, así como la amplitud de la señal reflejada. La fase muestra la posición relativa entre la onda transmitida y recibida de un objeto, o el desplazamiento relativo entre dos o más ondas (C. Rebelo, 2007).

La construcción del interferograma basado en este tipo de imágenes complejas permite que la fase de la señal sea procesada con una alta resolución. Por lo tanto, en la técnica InSAR es conveniente que la información de fase y amplitud sean adquiridas simultáneamente a través de una señal compleja (P. Mather, 2004).

La representación matemática de esta señal compleja se descompone en la suma de dos términos, uno que depende del tiempo de propagación de la onda de radar (fase) y otro asociado con las propiedades de retroreflexión del objeto (amplitud), que implicará cálculos más complejos para generar interferograma.

Rebelo, señala que una imagen SAR compleja (SLC), cada pixel o elemento de la imagen corresponderá a un valor complejo representado por las dos componentes, la parte real (a) y la imaginaria (b), quedando de manera simplificada de la siguiente forma $a + ib$.

Adaptar el número complejo en la imagen significa que cada píxel está representado por una función $g(x, y)$:

$$g(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$$

Donde $u(x, y)$ corresponde a la parte real del valor complejo y $v(x, y)$ a la parte imaginaria.

Cada parte de la imagen SAR compleja $g(x, y)$ es determinada por el valor de amplitud (Ψ) y fase (ϕ), representado en la Figura 2.11, correspondiente a la siguiente expresión (Hanssen, 2001):

$$g(x, y) = \Psi e^{i\phi}$$

Siendo importante señalar que el valor de píxel se obtiene mediante la suma de cientos de señales recibidas.

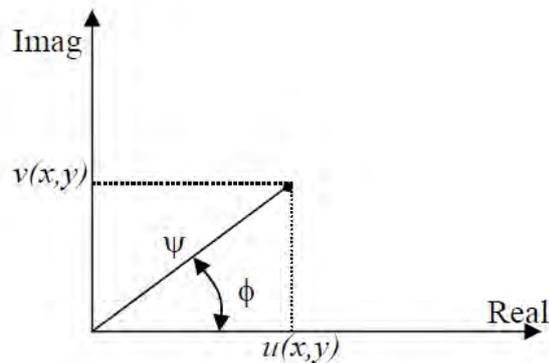


Figura 2.11: definición de amplitud y fase de un número complejo. Fuente: C. Rebelo, 2007.

2.4 Técnicas aplicadas para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales

2.4.1 Interpretación visual de imágenes

Hasta hace unos años atrás, la interpretación visual de imágenes se limitaba exclusivamente a las fotografías aéreas mediante los procesos clásicos de fotointerpretación y restitución fotogramétrica. El primero consistía en realizar una interpretación visual a partir de pares estereoscópicos y con ayuda de instrumentos de lentes o estereoscopios, ampliar las imágenes y darles una mirada tridimensional para identificar los objetos, seleccionarlos, para posteriormente clasificarlos. El segundo realiza el mismo procedimiento con estaciones análogas más avanzadas que permiten la manipulación mecánica de los pares estereoscópicos, con fines de corrección de posición, vectorización de los objetos y áreas para la producción cartográfica. En la actualidad, la restitución fotogramétrica se realiza también de forma digital (IGAC, 2009).

En este sentido, el análisis visual es un procedimiento vigente que se realiza sobre productos análogos como fotografías e imágenes de satélite, o directamente sobre el monitor o pantalla de cualquier computador. Estos productos sin excepción alguna requerirán de información auxiliar que soporte la consistencia temática y apoye tanto a las clasificaciones como a la información extraída a partir de los datos visuales.

Aspectos temporales a considerar para la interpretación visual:

Los aspectos temporales relacionados con los fenómenos naturales son de gran importancia en la interpretación porque factores como el crecimiento vegetativo y el contenido en humedad del suelo varían durante el año. Por otra parte estos aspectos también son importantes para interpretar los cambios ocurridos en un período de tiempo determinado en cuanto a usos del suelo y repercusiones de las actividades humanas sobre el medio. En los estudios multitemporales se debe tener en cuenta que los tonos, colores y texturas, (que están relacionados con las condiciones medio ambientales y de adquisición), podrán variar de una imagen a otra de la misma zona, por lo que habrán de considerarse individualmente para cada imagen (E. García-Meléndez, 2007).

Tras la introducción de estos criterios o elementos de interpretación se ha obtenido una relación de la extensión espacial de las características a las que se refieren: el tono y color se pueden definir para un único píxel, la textura se define con respecto a un grupo de píxeles. Los otros elementos o criterios se refieren a objetos individuales o a grupos de objetos. El uso simultáneo y a menudo implícito de estos criterios constituye la fuerza de la interpretación visual de las imágenes. En la clasificación digital de las imágenes solo se tiene en cuenta la respuesta espectral, lo cual explica la limitación de los métodos automatizados en comparación con la interpretación visual.

Esta técnica en el presente estudio fue aplicada para imágenes ópticas y de radar, lo que permitió tener un primer análisis de la erupción, y que sirvió de modo complementario para el análisis de las otras técnicas implementadas.

2.4.2 Detección de cambios

Cuando se utilizan datos de percepción remota para la detección de cambios se parte del supuesto que las alteraciones en el fenómeno estudiado producen cambios proporcionales en los valores numéricos de las imágenes. A la vez que un aspecto fundamental es que estos cambios son mayores que los producidos por otros factores sin importancia. Estos otros factores incluyen diferencias en las condiciones atmosféricas, ángulo de inclinación solar y humedad del suelo entre muchos otros (F. Maldonado et al., 2005). El efecto de algunos de estos factores puede ser minimizado seleccionando las imágenes adecuadas. Por ejemplo, el uso de imágenes de la misma época reduce las diferencias en el ángulo de iluminación y además elimina las diferencias estacionales en áreas con vegetación.

Como señala Más (1999), varios investigadores se han esforzado para resolver los problemas de la detección de cambios usando métodos como los de comparación pos-clasificación y clasificaciones de imágenes multitemporales, aunque en estos han encontrado otro tipo de problemas como la propagación de incertezas en el cruzamiento entre mapas y rotulado complejo como señalaron Congalton y Green (1999). Otras técnicas utilizan operaciones algebraicas simples y de estas las más importantes son la diferencia y la razón entre imágenes, diferencia entre índices de vegetación. Entre las operaciones algebraicamente más complejas, pueden mencionarse el análisis por Componentes Principales (F. Maldonado et al., 2002). En aplicaciones como el mapeo del uso y cobertura de tierras todas las informaciones contenidas en las imágenes son potencialmente significativas. Algunas de estas se refieren con la alta correlación que existe entre dos imágenes de un canal del mismo rango espectral obtenidas en diferentes fechas. En partes de la escena habrá ausencias de correlación y estas son interpretadas como las áreas que cambian. Aquí hay un propósito adicional en identificar redundancia y separarla de los ruidos. Siempre que se use esta forma de análisis el problema de las diferencias atmosféricas entre datos puede minimizarse. Para esto debe aceptarse la presunción sobre la uniformidad de la atmósfera en toda la imagen.

2.4.2.1 Diferencia entre imágenes

De acuerdo a lo señalado por Riaño, 2002, una simple resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogenizadas radiométrica y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras que las que hayan experimentado cambios tendrán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos).

Lo señalado anteriormente se visualiza en la siguiente expresión:

$$C = A - B$$

Donde C corresponderá a la imagen de cambios, A y B las imágenes de la primera y segunda fecha, respectivamente.

En imágenes de radar como resultado de este cálculo se obtiene una imagen de cambios, que presentará tonos oscuros para aquellas áreas que han aumentado su señal reflejada en la segunda fecha de adquisición, y áreas más claras para aquellos píxeles que hayan reducido su señal reflejada en la segunda fecha de adquisición, los tonos intermedios corresponderán para las zonas estables sin cambios significativos.

Para las imágenes ópticas puede realizarse sobre los Niveles Digitales ND de alguna de las bandas originales, aunque es más frecuente aplicar esta operación sobre índices de vegetación. En este caso, el valor de la diferencia nos permite señalar las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal (O. Viedma, 1993; P. Coppin et al., 1994). El histograma de esa imagen de cambios suele revelar un perfil gaussiano, con las máximas frecuencias para las zonas estables (en el centro del histograma) y las dinámicas ocupando las colas de la distribución.

2.4.3 Interferometría de radar

Es posible señalar que un satélite SAR, puede observar la misma área, desde dos ángulos diferentes (Figura 2.12). Por lo cual la geometría de la técnica InSar utilizada para la generación de interferogramas corresponde a dos antenas SAR con trayectorias paralelas que visualizan la superficie terrestre con ángulos de observación ligeramente diferentes (C. Rebelo, 2007).

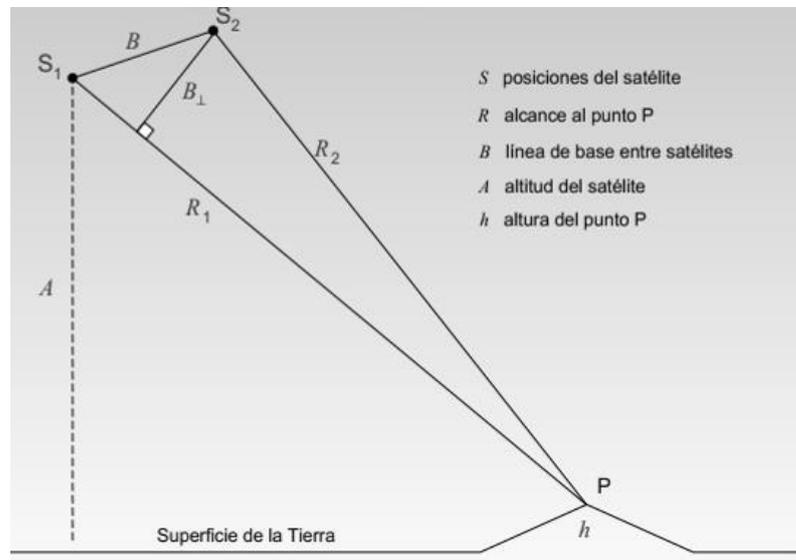


Figura 2.12: geometría de un satélite técnica interferometría SAR. Fuente: CCRS, 2014.

El interferograma se crea a partir del cálculo de los valores de diferencia de fase entre píxeles homólogos de dos imágenes SAR (Master y Slave) Figura 2.13.

Los parámetros asociados a la interferometría que permiten determinar la altitud de un objeto en la superficie terrestre son las distancias oblicuas R_M y R_S entre la antena y el

objeto, el ángulo de observación (γ), línea base entre las dos antenas (B), línea base perpendicular (B_{\perp}), la altitud orbital de la antena relativa a la superficie de referencia (H), y el ángulo de inclinación base (α). Además de estos parámetros hay una base de tiempo (B_T) para el intervalo de tiempo entre la adquisición de las dos imágenes.

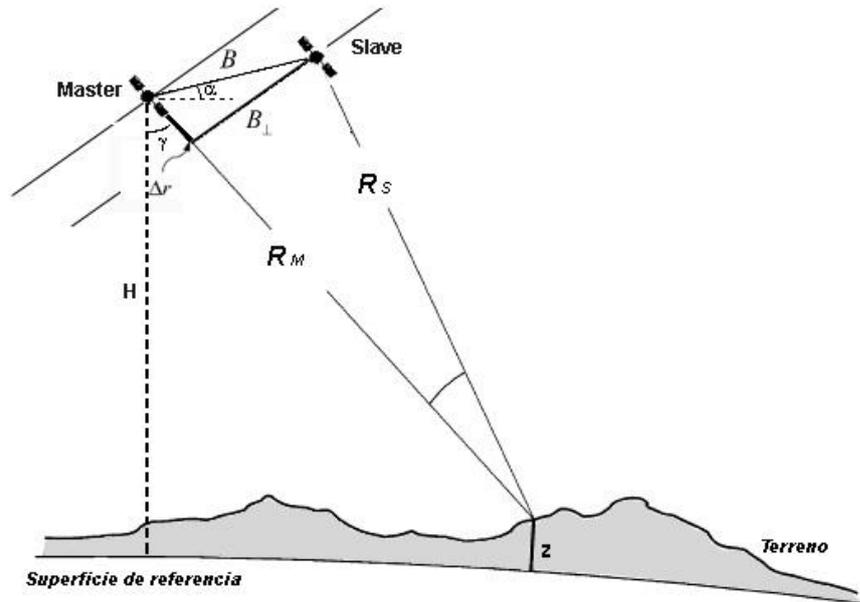


Figura 2.13: configuración geométrica de la interferometría. Fuente: C. Rebelo 2007.

El interferograma SAR es generado por la multiplicación cruzada, píxel por píxel, de la primera imagen con el complejo conjugado de la segunda. La amplitud del interferograma, corresponde a la amplitud de la primera imagen multiplicada por la segunda, mientras que la fase, es la diferencia de fases entre interferogramas. (ESA, 2007).

Suponiendo que las condiciones geométricas son similares para la adquisición de las dos imágenes, es decir, las trayectorias son aproximadamente paralelas, se podría decir que la diferencia entre la distancia oblicua (ΔR) es igual a la base paralela (B_{\parallel}).

Por lo tanto, la distancia entre los sensores puede ser definida geoméricamente respecto a la dirección observada por los dos componentes B_{\perp} y B_{\parallel} , con la siguiente expresión: (B. Kampes, 2005):

$$B = \sqrt{(B_{\parallel})^2 + (B_{\perp})^2}$$

La inclinación de la base, a su vez, puede ser dada por la relación:

$$\alpha = \gamma - \arctg(B_{\parallel} / B_{\perp})$$

Generalmente, los valores de la base y de la base paralela en el procesamiento InSAR son conocidos a través de las órbitas precisas. De este modo la base perpendicular (B_{\perp}) puede ser determinada también a través de la siguiente fórmula: (B. Kampes, 2005):

$$B_{\perp} = B_h \cos \gamma + B_v \sin \gamma$$

Donde $B_v = B \sin \alpha$ corresponde a la base vertical y $B_h = B \cos \alpha$ correspondiente a la base horizontal. Estas componentes de base son relativas a la superficie de referencia (Figura 2.14).

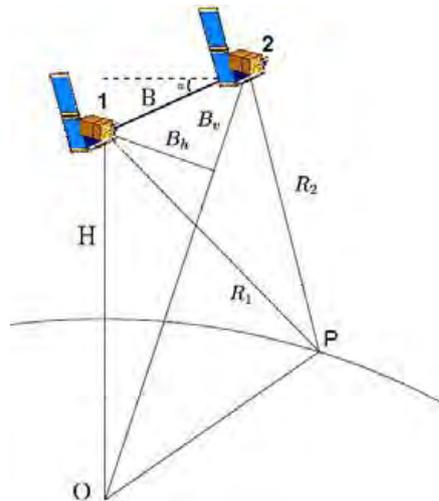


Figura 2.14: componentes de la base vertical y horizontal. Fuente: C. Rebelo 2007.

Las señales reflejadas de un objeto son recibidas por dos antenas SAR, con ángulos de observación ligeramente diferentes (γ) y separadas por una distancia dada (base). Cada una de estas señales corresponde a un píxel en cada una de las imágenes SAR de un cierto valor de fase (ϕ) y de amplitud.

2.4.3.1 Técnicas de interferometría - modos de adquisición de imágenes SAR

Es posible obtener imágenes satelitales para interferometría a través de dos mecanismos, el primero es a través de una misma pasada donde el sensor obtiene dos imágenes de la misma área, y la segunda es en pasadas consecutivas del sensor (dos periodos distintos). Las imágenes ENVISAT utilizadas en este trabajo, corresponden al segundo mecanismo que se detallará a continuación.

2.4.3.2 Pasada doble del sensor

Pasada doble del sensor, corresponde a la adquisición de dos imágenes de la misma zona a partir del mismo sensor en dos épocas distintas, por lo cual es definida una base

temporal. La imagen adquirida en la primera pasada del sensor es llamada Master y la imagen obtenida en una segunda pasada es llamada Slave (Figura 2.13).

Las imágenes SAR adquiridas por varios sistemas de radar, en la generalidad son obtenidas en épocas diferentes a través de dos pasadas del satélite por la misma zona.

2.4.3.3 Generación del interferograma

El objetivo de aplicar InSAR, es producir un interferograma que permita estimar valores de altura y medir deformaciones en el terreno.

Los valores de la ϕ_M y ϕ_S correspondiente a las dos señales reflejadas del mismo punto en el terreno (Figura 2.11), sin tener en cuenta la amplitud, depende de la posición de la antena en el instante de la adquisición de la señal y la longitud de onda (λ), que está dada por la siguiente expresión (R. Bamler, 1997):

$$\phi_M = \frac{4\pi}{\lambda} R_M \quad \text{y} \quad \phi_S = \frac{4\pi}{\lambda} R_S$$

Donde R_M y R_S corresponden a las distancias de alcance oblicuo, entre la antena y el objetivo, en cada una de las posiciones *Master* (M) y *Slave* (S) siendo ligeramente diferentes debido a la trayectoria orbital.

Para la generación del interferograma se procede a la multiplicación de las dos imágenes complejas Master(M) y Slave(S). El interferograma complejo (I) resultará de la multiplicación de los valores complejos de la imagen Master [$g_M(x,y)$] por los valores conjugados de la imagen Slave [$g_S^*(x,y)$], siendo representado por la siguiente expresión (Hanssen, 2001):

$$I = M \cdot S^* = g_M(x,y) \cdot g_S^*(x,y) = |g_M(x,y)| \cdot |g_S(x,y)| \cdot e^{i(\Delta\phi)}$$

De este modo, para cada pixel del interferograma tenemos los valores absolutos de amplitud en que $|g_M(x,y)| \cong |g_S(x,y)|$ y el valor de diferencia de fase ($\Delta\phi$) que corresponderá a la diferencia de fase entre dos pixeles homólogos. El valor de diferencia de fase es proporcional a la diferencia de la trayectoria (ΔR) entre las imágenes mostrado en la siguiente expresión: (Bamler, 1997):

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_S = \frac{4\pi (R_M - R_S)}{\lambda} = \frac{4\pi \Delta R}{\lambda}$$

A este valor de fase es posible adicionar el desplazamiento de fase causado por las señales reflejadas por el objeto (ϕ_{rect}), el retraso de la propagación de la señal debido a la atmosfera o ionosfera (ϕ_{atm}) y por el ruido (ϕ_R), como se ve en la siguiente expresión definida por (R. Rabus et al., 2003):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi \Delta R}{\lambda} + \phi_{rect} + \phi_{atm} + \phi_R$$

Generalmente, el valor de la diferencia de fase está siempre asociado a un grado de incertidumbre inherente al propio procesamiento de las imágenes y a la topografía, lo que afecta a la estimación de los valores de altitud (C. Rebelo, 2007). Por otro lado, el valor de diferencia de fase también es afectada por errores de posicionamiento, específicamente por las variaciones asociadas con la órbita y altitud de la plataforma.

Para medir deformaciones de terreno, consideramos que tenemos conocimiento de la topografía, y simulamos una componente de fase relacionada con dicha topografía. Ello nos permite calcular la fase interferométrica diferencial que se basa en la fase interferométrica a la cual le sustraemos la componente topográfica.

Una de las grandes ventajas que tienen las imágenes satelitales, corresponde a que podemos hacer estudios con información anterior, correspondiente a fechas que existan registro (imágenes de archivo), sin embargo para el desarrollo de interferogramas con imágenes SAR, se deberá considerar el dato de coherencia entre las imágenes, información que será descrita en el próximo capítulo.

3. Plataformas satelitales (sensores) y técnicas utilizadas para este estudio

Se analizaron principalmente imágenes de radar, considerando las complicaciones de nubosidad de la zona de estudio, de igual manera se realizó una interpretación visual de algunas imágenes ópticas para profundizar el análisis del proceso eruptivo del volcán Puyehue.

A continuación se detallarán las imágenes satelitales utilizadas:

3.1.1 Imágenes ENVISAT

Envisat de la ESA fue el sucesor de la ERS. Este satélite fue lanzado el año 2002, con 10 instrumentos a bordo y con sus ocho toneladas correspondió a la mayor misión civil de observación de la Tierra.

Más avanzadas imágenes de radar, radar de altímetro y de medición de temperatura con instrumentos radiómetros ampliaron los datos ERS. Este se complementaba con nuevos instrumentos, incluyendo un espectrómetro de resolución media sensible a las características de la tierra y al color del océano. Envisat también presentaba dos sensores atmosféricos que monitoreaban la traza de los gases (ESA, 2007).

En el mes de mayo del año 2012, ESA declaró oficialmente el fin de la misión, el cual se había mantenido durante 10 años operativo, el doble de tiempo de lo previsto.

Con sus sofisticados instrumentos, Envisat observó y monitoreó la superficie de la tierra, la atmósfera, los océanos y los campos de hielo durante sus diez años en servicio, generando más de mil terabytes de datos.

Envisat volaba en una órbita polar sincronizada con el sol de unos 800 km. de altitud. El ciclo de repetición de la órbita de referencia era de 35 días, sin embargo, para la mayoría de los sensores ofrecía una cobertura global de cada dos o tres días (ESA, 2007).

Gracias a su SAR, Envisat fue capaz de monitorear deformaciones del terreno desencadenados por terremotos y erupciones volcánicas (ESA, 2015), ayudando a comprender mejor la tectónica de placas y los mecanismos volcánicos.

3.1.1.1 Envisat ASAR

Datos entregados por la Agencia Espacial Europea, (ESA), indican que el Radar de Apertura Sintética Avanzado (ASAR), que operó en banda C, fue el mayor de los instrumentos del Envisat.

Correspondió a un radar de generación de imágenes de franja amplia y alta resolución, que se ha utilizado para la investigación en lugares específicos y también para la supervisión y vigilancia de tierras y océanos a escala global.

Su principal objetivo fue observar el medioambiente, recopilando información sobre:

- Características del oleaje marino
- Extensión y movimiento de hielos marinos
- Topografía superficial
- Propiedades de la superficie terrestre
- Humedad del terreno superficial y extensión de los humedales
- Deforestación y extensión de zonas desérticas
- Observación de desastres, como inundaciones y terremotos

La principal ventaja de la utilización de un instrumento SAR, es la capacidad para captar imágenes con independencia de las condiciones climáticas.

El ASAR es un instrumento muy avanzado que utiliza diversos y novedosos avances tecnológicos. Entre las mejoras que ofrece están la capacidad de suministrar una franja de cobertura de más de 400 km. y la función de polarización alterna, que permite captar a la vez imágenes en polarización vertical (V) y horizontal (H).

El ASAR está diseñado para trabajar en los siguientes modos operativos (Figura 3.1).

- Imagen
- Franja ancha
- Olas
- Polarización alterna
- Monitoreo global

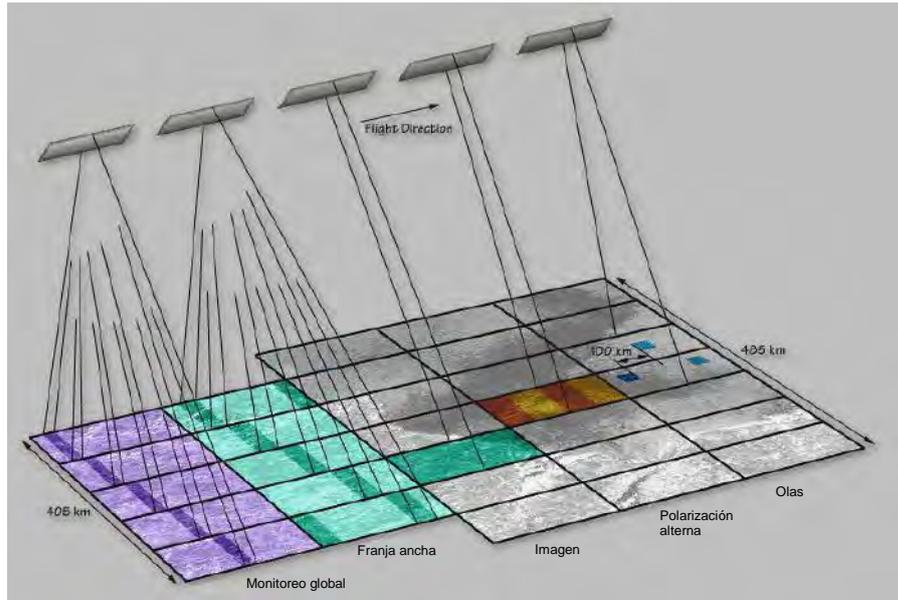


Figura 3.1: modos operativos Envisat. Fuente: ESA, 2007.

En el modo de imagen, el ASAR recopila datos de franjas relativamente estrechas (de 100 km. dentro de un área de visión de unos 485 km.) con una resolución espacial de 30 m., mientras que en modo de franja ancha se capta una banda mucho más amplia (400 km.) con una resolución espacial de 150 m.

En el modo olas, el ASAR mide los cambios en retrodispersión de radar de la superficie marina ocasionados por el oleaje. En ese modo se captan imágenes sobre el océano de 5 km. × 5 km., a una distancia de 100 km. El modo de polarización alterna ofrece imágenes de una escena con polarización alterna durante la transmisión y la recepción. La resolución espacial es igual a la del modo de imagen. En el modo de monitoreo global se capta una franja ancha (400 km.) con 1.000 m. de resolución espacial.

3.1.2 Método utilizado con las imágenes ENVISAT- ASAR.

Para medir la deformación en el área del volcán Puyehue, se realizó mediante el procesamiento y análisis de imágenes ENVISAT-ASAR

Una serie de imágenes SAR adquiridos por la plataforma Envisat, entre enero y diciembre de 2011, alrededor de una imagen por mes, las cuales fueron procesadas para identificar la deformación registrada durante la erupción. Se utilizó el software ENVI, específicamente el módulo SARscape con el cual se aplicó el método de procesamiento de interferometría diferencial (DInSAR) a imágenes con polarización HH, obtenidas en swath IS6, es decir, los datos fueron adquiridos con un ángulo de incidencia de aproximadamente 40° en el centro de franja. Con el objetivo de reducir el ruido de moteado (speckle), fue aplicado un factor de multilooking de 6 x 2 píxeles en acimut y rango, dejando una resolución del píxel de 25 m. aproximadamente; el componente de la fase topográfica fue eliminado mediante el procedimiento de aplanamiento “Flattening” para lo cual fue necesario utilizar un modelo de elevación digital, en este caso fue el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución de 30 m.

Imágenes de la zona de estudio. Imágenes ENVISAT en modo SLC (Single Look Complex)

Archivo Single Look Complex	Fecha de adquisición
20110207.slc	07/02/2011
20110309.slc	09/03/2011
20110408.slc	08/04/2011
20110508.slc	08/05/2011
20110607.slc	07/06/2011
20110707.slc	07/07/2011
20110806.slc	06/08/2011
20110905.slc	05/09/2011
20111005.slc	05/10/2011
20111204.slc	04/12/2011

Tabla 3.1: imágenes SLC utilizadas para la elaboración de interferogramas.

Imágenes utilizadas como master y slave para la generación de interferograma:

Master	Slave	Normal línea de base
20110207.slc	20110309.slc	89.870 metros
20110309.slc	20110408.slc	251.860 metros
20110408.slc	20110508.slc	242.830 metros
20110508.slc	20110607.slc	98.046 metros
20110607.slc	20110707.slc	153.529 metros
20110707.slc	20110806.slc	50.381 metros
20110806.slc	20110905.slc	205.755 metros
20110905.slc	20111005.slc	92.082 metros
20111005.slc	20111204.slc	187.557 metros

Tabla 3.2: imágenes master y slave para elaboración de interferogramas.

3.1.2.1 Elaboración de interferogramas

Se elaboraron un variado número de interferogramas de diversas fechas, de los cuales en relación a los resultados entregados, fueron seleccionados aquellos que permitían visualizar deformaciones asociadas a la erupción volcánica y no presentaban grandes errores debido a la atmosfera o al ruido.

Una vez obtenidas las imágenes en radar en modo Single Look Complex (SLC), se inicia el proceso interferométrico con la generación del interferograma.

Antes de comenzar con el procedimiento específico, haremos un breve comentario sobre la imagen Master y Slave, adoptándose para este estudio “Master” a la fecha de la primera adquisición y “Slave” la fecha de la segunda adquisición.

En esta etapa, es necesario realizar distintos procesamientos a las imágenes (Master y Slave), de los cuales la mayoría se realizan antes de combinarlas.

Los procesos son los siguientes:

- Corregistración
- Multilooking
- Filtrado espectral
- Combinación de la imagen (interferograma)

Los procesos anteriores, el software SarScape de ENVI, los realiza de forma automática, por lo cual a continuación se dará una breve descripción de cada uno de ellos:

3.1.2.1.1 Corregistración

Las dos imágenes deben ser de la misma área, superponibles, para lo cual el sistema de coordenadas de referencia para las dos escenas debe ser el mismo, solo de ese modo será posible calcular la diferencia de fase entre los dos píxeles referida a la misma celda de resolución a tierra (por lo menos en este tipo de procedimiento que no se utiliza DEM)

Las imágenes están en geometría range-doppler (o range-azimuth), es decir los píxeles tienen coordenadas en relación a la dirección del vuelo (acimut) y en alcance (range), ortogonales entre si e inclinadas respecto a la superficie terrestre.

Durante la corrección, la superposición de la imagen Slave sobre la imagen Master se realiza a través de un coeficiente de desplazamiento inicial que se calcula considerando los parámetros orbitales de las dos adquisiciones, si estos parámetros no presentan una suficiente precisión, se considera una ventana central en las dos imágenes en la que se hace una correlación cruzada (cross-correlation) (D. Torlai, 2009).

3.1.2.1.2 Multilooking

El propósito principal del Multilook es la reducción del ruido presente en los datos SAR. Las imágenes seleccionadas se encuentran en el formato Single Look Complex (SLC), las cuales tienen diferentes resoluciones espaciales en dirección del acimut como en alcance (Figura 2.9), lo que implica un espaciado diferente del píxel en la tierra, como ejemplo podemos señalar que la imagen SLC ENVISAT, del 08 de Mayo de 2011, presenta los siguientes valores:

Alcance (Range Spacing) = 7.8039
Acimut (Azimuth Spacing) = 3.8743

Además, para el proceso multilooking, se debe considerar el ángulo de incidencia correspondiente a la toma de la imagen, que afecta directamente la dirección en alcance (ground resolution). Para esta imagen el ángulo de incidencia es de 40,8042, lo que refleja que las imágenes que trabajaremos para esta ocasión corresponden al tipo IS6.

A continuación se muestra una tabla con los diferentes ángulos de incidencia según las especificaciones de las ASAR Image Mode Swaths:

Image Swath	Swath Width(km)	Ground, position from nadir (km)	Incidence Angle Range	Worst Case Noise Equivalent Sigma Zero
IS1	105	187 - 292	15.0 - 22.9	-20.4
IS2	105	242 - 347	19.2 - 26.7	-20.6
IS3	82	337 - 419	26.0 - 31.4	-20.6
IS4	88	412 - 500	31.0 - 36.3	-19.4
IS5	64	490 - 555	35.8 - 39.4	-20.2
IS6	70	550 - 620	39.1 - 42.8	-22.0
IS7	56	615 - 671	42.5 - 45.2	-21.9

Tabla 3.4: especificaciones de las ASAR Image Mode Swaths. Fuente: ESA, 2007.

El tamaño del píxel en dirección al acimut corresponde al Azimuth Spacing (3,87 m.). Ahora para el cálculo del tamaño del píxel en dirección de alcance (range) se realiza considerando el Range Spacing y el ángulo de incidencia.

Dirección en alcance (Ground Resolution) = Range Spacing/SENO(ángulo de incidencia)

$$\text{Dirección en alcance} = 7,80 / \text{seno}(40,8)$$

$$\text{Dirección en alcance} = 11,94 \text{ m.}$$

Datos:

$$\text{Dirección en alcance (Ground Resolution)} = 11,94 \text{ m.}$$

$$\text{Dirección en acimut (Azimuth Spacing)} = 3,87 \text{ m.}$$

Por lo cual el multilooking además de reducir el ruido presente en los datos SAR, entregará una geometría más cercana a la realidad del terreno. Para lo anterior se debe intervenir en las medidas de los pixeles en alcance (range) y en acimut.

Al aplicar el comando Looks de SarScape nos sugiere automáticamente la siguiente transformación:

$$\text{Azimuth} = 6$$

$$\text{Range} = 2$$

Los valores anteriores se multiplican con el Azimuth Spacing y el Ground Resolution, obteniendo finalmente los siguientes resultados:

$$\text{Acimut (Azimuth)} : 3,87 * 6 = 23,22 \text{ m.}$$

$$\text{Alcance (Range)} : 11,94 * 2 = 23,88 \text{ m.}$$

El paso anterior, realiza la siguiente transformación a la imagen SLC (figura 3.2), en acimut seis pixeles se transformaron en un píxel con un valor de 23,22 m. y en alcance 2 pixeles se transforman en un píxel con un valor de 23,88 m., con lo anterior se obtiene una imagen Multilooking como se muestra en la Figura 3.3

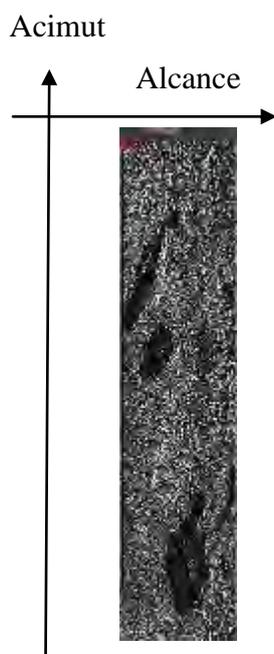


Figura 3.2: imagen SLC

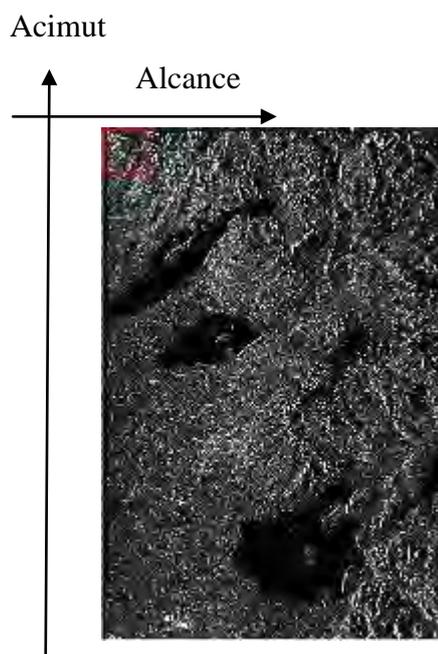


Figura 3.3: imagen multilooking

3.1.2.1.3 Filtrado espectral

Se realiza una segunda corrección de las imágenes, en esta ocasión espectral. Los píxeles de las imágenes Master y Slave, aunque ahora se superponen, tienen un espectro de frecuencia de respuesta retrodispersada proveniente de diversos dispersores de la tierra a causa de la diferente geometría de la adquisición. Tal proceso necesita de un doble filtrado específico, de acuerdo a la dirección: uno en alcance y uno en acimut (D. Torlai, 2009).

3.1.2.1.4 Combinación de la imagen y obtención del interferograma

En el sistema SAR permite obtener imágenes complejas en las que la información de fase es preservada así como la amplitud de la señal reflejada. La fase refleja la posición relativa entre la onda transmitida y recibida a partir de un objetivo o el desplazamiento relativo entre dos o más ondas (C. Rebelo, 2007).

La construcción del interferograma basado en este tipo de imágenes complejas permite que la fase de la señal sea procesada en una alta resolución. Así, en la técnica InSAR es conveniente que la amplitud y fase de información se adquieren simultáneamente por una señal compleja (P. Mather, 2004).

La representación matemática de la señal compleja se descompone en una suma de dos términos, un término dependiente del tiempo de propagación del radar de onda (fase) y otro término asociado con las propiedades de retroreflexión del objeto (amplitud), que implican cálculos más complejos para generar interferograma (C. Rebelo, 2007).

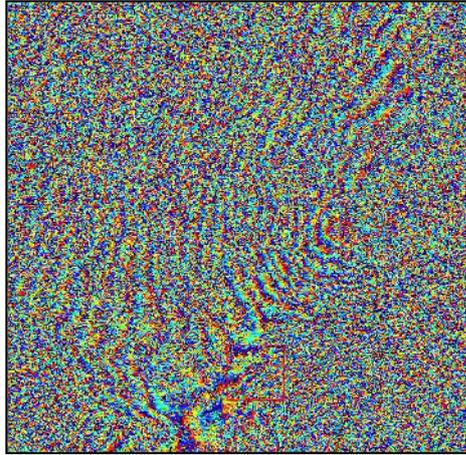


Figura 3.4: interferograma (Base). Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

3.1.2.1.5 Interferograma aplanado “Flattening”

El resultado de este proceso corresponderá a un interferograma suavizado (Figura 3.5), tomando como referencia el interferograma obtenido en el paso anterior (Figura 3.4), en el cual la frecuencia de variación de las franjas es disminuida considerablemente, siendo una función directa de los residuos altimétricos que se presentan, dependiendo del DEM y del desplazamiento.

Este proceso nos ayuda a simplificar el proceso de desenrollado de la fase (unwrapping) que se realizará en pasos posteriores. Donde los resultados de los valores de fase interferométricos, viene restada la fase conocida, es decir, los valores determinados a partir de los datos de elevación de un DEM.

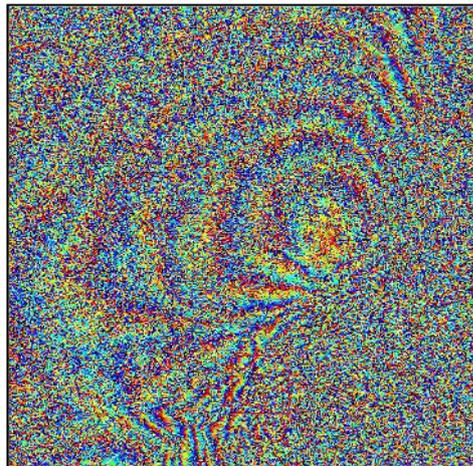


Figura 3.5: interferograma aplanado “flattening”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

Con este procedimiento se incluye el DEM (topografía). El número de franjas que indican los saltos de fase se reducen considerablemente en comparación con la Fig. 3.4, lo que facilita las mediciones de movimientos de la tierra.

Sacando la topografía, la diferencia en la forma de las franjas podría representar cambios de elevación del terreno, o efectos o errores por el terreno, el cual se debe verificar posteriormente.

3.1.2.1.6 Filtro

Con respecto a este proceso es posible aplicar diferentes tipos de filtros, como por ejemplo:

- Adaptative window
- Boxcar window
- Goldstein

A continuación se explicará en forma general el filtro Goldstein, el cual se utiliza para este tipo de estudios (D. Torlai, 2008):

El filtro Goldstein, utiliza un sistema que se adapta a la imagen, en zonas de alta concentración de franjas el sistema tiende a uniformar los valores de los pixeles, haciendo cambios más graduales, mientras que las áreas donde las franjas son inexistentes el filtro tiene menos influencia. El factor “alfa” mide la influencia de este filtro, cuando mayor sea este factor, mayor es la influencia, suavizando las zonas con altas densidad de franjas en la imagen.

Este filtro es utilizado en imágenes con mucho rumor, con fuerte presencia de speckle, en casos de gran diferencia espacio temporal y de topografía compleja.

Al igual que el filtro Boxcar, el filtro Goldstein permite generar mapas de coherencia antes o después del filtrado. Para este caso se generaron mapas de coherencia después de aplicar el filtro Goldstein, aunque se corre el riesgo de crear pixeles con valores diferentes a la realidad.

A continuación se muestra un ejemplo del interferograma filtrado (Figura 3.6)

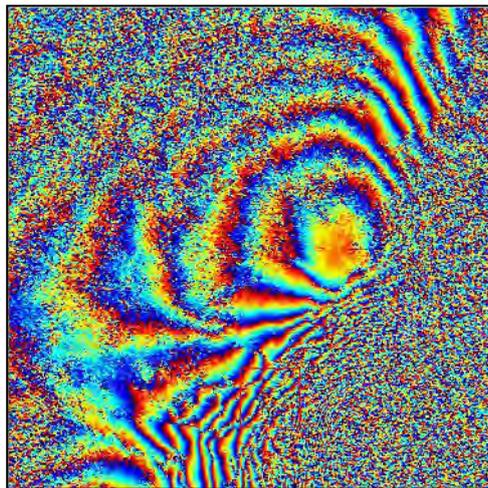


Figura 3.6: interferograma filtrado “flattened”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

3.1.2.1.7 Coherencia

La Coherencia es un importante indicador para detectar la conveniencia de la escena de los datos obtenidos por los sistemas de teledetección para posteriormente ser procesados y resolver un problema. El factor de coherencia es calculado como el valor absoluto del coeficiente de correlación entre las muestras de imágenes de radar complejas (single look complex SLC) en una ventana local. (A. Sosnovsky et al., 2015.).

EL objetivo es comparar las dos imágenes para detectar los porcentajes de similitud entre píxel y píxel. Este proceso entrega valores de pixeles que van desde el 0 (color negro) donde no hay coherencia, hasta el 1 (color blanco) donde los pixeles son completamente coherentes.

A continuación se muestra una imagen de coherencia (Figura 3.7), correspondiente a las fechas de mayo y junio del año 2011.

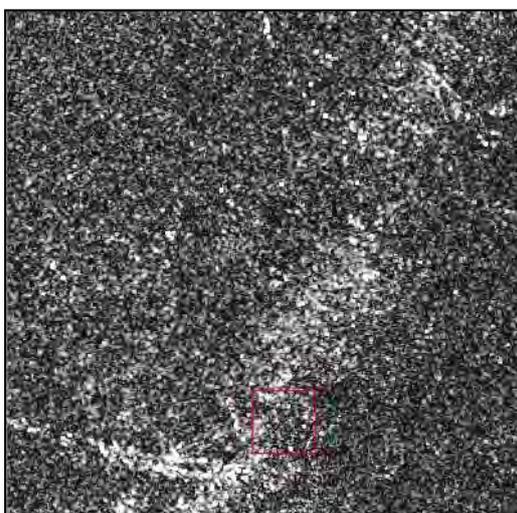


Figura 3.7: imagen de coherencia. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

3.1.2.1.8 Desenrollado de la fase “Unwrapping”

El interferograma “flattened” obtenido con anterioridad, nos proporciona una medida ambigua de la altitud relativa del terreno debido a la naturaleza cíclica de la fase interferométrica de 2π (ESA, 2007).

Los valores de diferencia de fase presentes en este interferograma no representan el número total de ciclos completos 2π de la longitud de onda, es decir, cada franja tiene un alcance angular de 2π radianes (C. Rebelo, 2007), presentándose discontinuidades. Con este proceso las discontinuidades de fase 2π son eliminadas añadiendo o restando un múltiplo entero de 2π a cada píxel de la imagen con las fases interferométricas originales (ESA, 2007), a lo que llamaremos desenrollado de la fase (Figura 3.8).

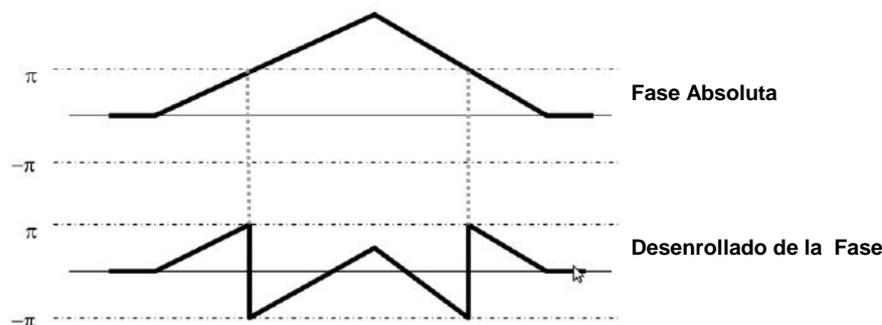


Figura 3.8: fase absoluta y desenrollado de la fase.

En algunas ocasiones la estimación de la fase absoluta enfrenta algunas dificultades debido al ruido, generalmente presentes en los valores de fase del interferograma. Las causas de este ruido (o errores en el interferograma) están generalmente asociadas con áreas de pendientes pronunciadas, superficies rugosas y las zonas con los valores de amplitud baja (sombras y el agua).

A continuación se muestra un ejemplo del desenrollado de la fase “*unwrapping*” (Figura 3.9), correspondiente a las fechas de mayo y junio del año 2011. Donde es posible observar que se eliminaron las discontinuidades por los cambios de fase del sistema radar.

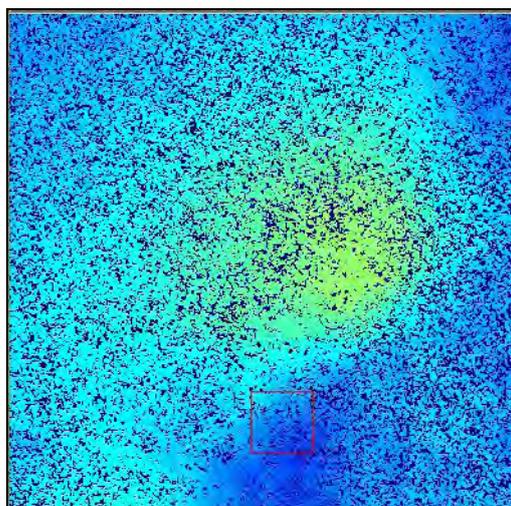


Figura 3.9: desenrollado de la fase “*unwrapping*”. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

3.1.2.1.9 Corrección orbital “Refinement Re-Flattening”

Una vez que la fase ha sido “desenrollada” (ejecutado el proceso *unwrapping*) puede ser convertida en el dato de altura, como en este caso, en el desplazamiento. Antes de hacer esta operación, sin embargo, es aconsejable para la generación de un mapa de deformación operar con un refinamiento adicional de los parámetros orbitales disponibles.

Para el satélite Envisat, las órbitas actualizadas con sistema DORIS tiene una precisión de 1 a 2 cm. de ancho y largo de la pista, y menos de 1 cm. en la dirección radial.

Para refinar aún más la geometría de adquisición, se utilizan puntos de referencia en tierra, estos puntos de amarre o de control en tierra son denominados GCP. La ubicación de estos puntos en un sistema cartográfico puede ser determinado con sistemas GPS o de nivelación geométrica, es recomendable que estos puntos sean seleccionados en zonas con ciertas características (por ejemplo, puentes, intersecciones de calles, casas, etc) que son fácilmente identificables en la imagen, así como para crear una correspondencia entre las coordenadas de la imagen y la geográfica, y desde allí realizar el seguimiento de las imprecisiones orbitales (D. Torlai, 2009).

En nuestro estudio, sin embargo, este tipo de medición no es factible (sector del volcán), por lo cual será necesario determinar puntos GCP directamente en los interferogramas.

Finalmente se debe realizar nuevamente el aplanado “flattening”, para ver visualmente la calidad del refinamiento orbital

3.1.2.1.10 Desplazamiento y georreferenciación

Luego de haber desenrollado la fase y de realizar las calibraciones respectivas, los valores son convertidos en datos de altura, en este caso en datos de deformación georreferenciados en una proyección cartográfica. Este paso considera el enfoque Rango-Doppler y las transformaciones geodésicas y cartográficas. Las ecuaciones Range-Doppler son aplicadas simultáneamente a las dos antenas, por lo que es posible obtener no solo la altura de cada píxel, sino también su localización (x, y, h) en una proyección cartográfica y sistema geodésico de referencia (ESA, 2007).

3.1.2.1.11 Desplazamiento (deformación)

La separación temporal en la interferometría, comparación de imágenes entre distintos días, meses o años, se puede utilizar con ventaja para el seguimiento a largo plazo de los fenómenos geodinámicos, identificando a través de esta técnica cambios, en éste caso relacionado con movimiento del terreno asociada a la actividad volcánica (ESA, 2007)

En la siguiente Figura 3.10, es posible apreciar la diferencia de altura (deflación o elevación) en centímetros de una fecha con respecto a la otra.

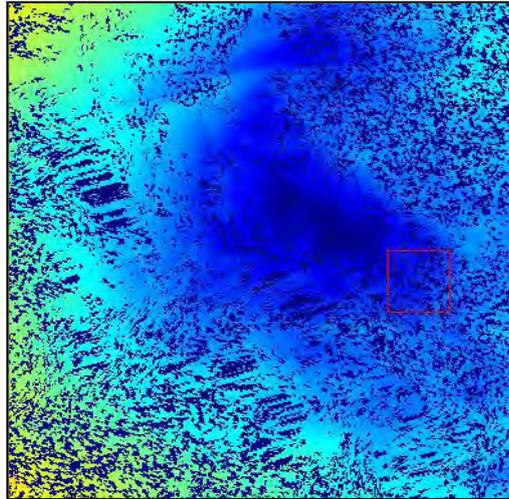


Figura 3.10: imagen de deformación. Área de ejemplo de una superficie aproximada de 9 x 9 km.

3.1.3 Método utilizado interpretación visual imágenes ENVISAT-ASAR.

De forma complementaria se analizó a través de la interpretación visual la evolución de la cobertura de lava en distintos tiempos, con el fin de ver los estados de avances, con lo cual se pudo demarcar las zonas y posteriormente cuantificar el tamaño del área afectada en diferentes fechas.

3.2.1 Constelación satélites radar Cosmo-SkyMed

De acuerdo a información oficial de COSMO-SkyMed (COSMO-SkyMed sitio web), corresponde a una constelación de cuatro satélites equipados con radar de apertura sintética que opera en banda X. El primer satélite de esta constelación fue lanzado en junio del año 2007.

3.2.1.1 Objetivos de la misión

COSMO-SkyMed es un sistema de observación de la Tierra, tanto para fines civiles como para fines militares y tiene como objetivo proporcionar productos y servicios para:

- Las aplicaciones de seguimiento y vigilancia ambiental para gestionar los riesgos exógenos, endógenos y antropogénicos;
- Suministro de productos y servicios comerciales.

Los principales requisitos que guiaron el desarrollo de la misión fueron:

- Capacidad para servir al mismo tiempo de los usuarios civiles y militares mediante un enfoque integrado (Use System Dual);
- Asegurar un considerable número de imágenes capturadas diariamente;
- Capacidad para adquirir imágenes tanto de día como de noche, independientemente de las condiciones meteorológicas;

- Muy corto intervalo entre la aceptación de la solicitud de adquisición por parte del usuario y la entrega de productos de detección remota;
- Alta calidad de imagen (resolución espacial y radiométrica);
- Capacidad intrínseca para ser una instancia de cooperación, interoperable, abrirse a otras misiones de observación de la Tierra, para proporcionar una gran comunidad de usuarios y servicios globalmente integrados (conceptos de capacidad de expansión, interoperabilidad y multisensorial).

3.2.1.2 Principales características

Las principales características de COSMO-SkyMed señalada por la Agencia Espacial Italiana ASI, son las siguientes:

Integración con otras misiones.

- Dos satélites de banda L SAOCOM
- COSMO-SkyMed segunda generación es desarrollado por ASI y el Ministerio italiano de Defensa.

Mejor resolución geométrica

- 400 MHz chirp bandwidth.
- Resolución de 1 m. con 25 ° a 59 ° ángulo de incidencia.
- Tamaño de la imagen 10 x 10 Km., resolución 1m.

Mejor tiempo de revisita con 4 satélites

- En Ecuador 4 imágenes por día.
- A los 40° de latitud, cada 7 horas (promedio).

Rápido tiempo de respuesta

Una imagen se pondrá a disposición 24 a 48 horas después de que la solicitud ha sido aprobada.

Capacidad de recogida grande

Con 4 satélites hasta 1800 imágenes por día.

Escenario de ejemplo diario (Figura 3.11):

- 300 Spotlight-2 = 30 000 km² a una resolución de 1 m.
- 1500 StripMap = 2.400.000 km² a una resolución de 3m.

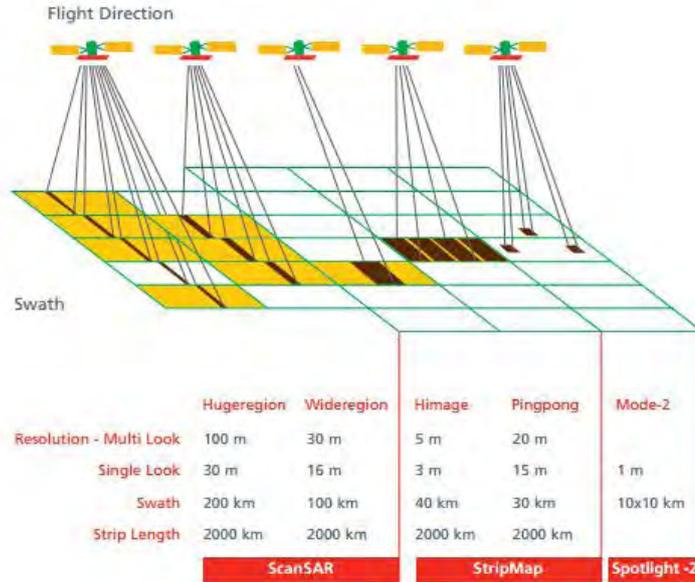


Figura 3.11: modo de adquisición imagen COSMO- SkyMed. Fuente: E-GEOS, 2015.

Las características de las imágenes COSMO- SkyMed se indican en la tabla 3.5:

Modo	Spotlight	Stripmap		ScanSAR	
		HIMAGE	Ping Pong	Wide Region	Huge Region
Polarización	Single	Single	Dual	Single	Single
Ancho de Barrido (Swath width) [kmxkm]	10X10	40X40	30X30	100X100	200X200
Accesibilidad de Barrido (accessible swath)	~620 km				
Resolución Geométrica [m]	1	3	15	30	100

Tabla 3.5: características de COSMO- SkyMed. Fuente: COSMO-SkyMed, 2015.

3.2.2 Método utilizado con las imágenes COSMO-SkyMed.

Para la detección de cambios en el área del volcán Puyehue, se utilizaron imágenes de la constelación COSMO-SkyMed. Se adquirieron imágenes de alta resolución durante los primeros 20 días de la erupción. Las imágenes de resolución VHR de COSMO-SkyMed obtenidas el 19 y 26 de junio, en modo stripmap, con un ángulo de incidencia de aproximadamente 39°, y con polarización HH, lograron identificar principalmente las nuevas zonas afectadas por la emisión de lava, así como la contaminación de lagos y lagunas por la caída de cenizas volcánicas.

3.2.2.1 Multilooking

Como se había señalado en capítulos anteriores, el propósito principal de Multilook es la reducción del ruido presente en los datos de las imágenes SAR, por lo cual las imágenes COSMO-SkyMed Single Look Complex (SLC), deben ser pasadas a Multilooking.

3.2.2.2 Corrección de las imágenes

Para realizar los procesos de las imágenes COSMO-SkyMed, las imágenes deben estar corregidas, así como se explicó en el capítulo referente a la elaboración del interferograma, estas deben ser de la misma área, superponibles, para lo cual el sistema de coordenadas de referencia para las dos escenas debe ser el mismo, solo de esta manera será posible calcular los cambios ocurridos en un determinado tiempo.

El registro es un procedimiento en el que a partir de una imagen de referencia, otras imágenes son rotadas, movidas y re-escaladas para coincidir geométrica y espacialmente con ésta (S. Enrique, 2014). En el software SarScape de ENVI empleado, la corrección se hace de manera automatizada a partir de un conjunto de puntos de amarre que se obtienen mediante algoritmos que maximizan la correlación entre imágenes iterativamente hasta lograr un nivel de ajuste en los puntos generados, acorde con tolerancias definidas.

Durante la corrección, la superposición de la imagen Slave sobre la imagen Master se realiza a través de un coeficiente de desplazamiento inicial que se calcula considerando los parámetros orbitales de las dos adquisiciones, si estos parámetros no presentan una suficiente precisión, se considera una ventana central en las dos imágenes en la que se hace una correlación cruzada (cross-correlation) (Torlai, 2009).

3.2.2.3 Detección de cambios

Las dos imágenes COSMO-SkyMed, se les aplicó el multilooking, fueron calibradas (corregidas y geocodificadas), en el programa ENVI, posterior a ello se les aplicó una sustracción para detectar las zonas que habían experimentado cambios entre esas fechas a través de la siguiente ecuación:

$$(B1 - B2)$$

Donde, B1 corresponde a la imagen de la primera fecha (19 de Junio 2011), y B2 corresponde a la imagen de la segunda fecha (26 de Junio de 2011).

Para normalizar los resultados y que los valores obtenidos se encuentren en un rango de -1 a $+1$, la ecuación fue complementada con la siguiente división:

$$((B1 - B2) / (B1 + B2))$$

3.3.1 Imágenes MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento que viaja a bordo de los satélites de Terra (EOS a.m.) y del Aqua (EOS p.m.). La órbita de Terra alrededor de la tierra viaja de norte a sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el Aqua viaja de sur a norte cruzando el Ecuador por la tarde.

En diciembre de 1999, la NASA lanzó el satélite TERRA que tiene a bordo MODIS. Este sensor tiene varias aplicaciones enfocada principalmente en la cobertura de la Tierra y estudios meteorológicos (NASA, 2015)

El satélite Terra, que fue de donde se obtuvieron las imágenes para este estudio, gira alrededor de la Tierra pasando sobre los polos, en una órbita que permite al sensor obtener diariamente imágenes de la mayor parte de la superficie de nuestro planeta. La órbita polar mantiene al Terra constantemente alineado con el Sol, de tal manera que todos los días pasa sobre cada lugar casi a la misma hora local.

MODIS tiene también la capacidad para ver todo el mundo cada día en tres resoluciones diferentes (250m, 500m, y 1000m) con 36 bandas espectrales. Los sensores MODIS captan tanto la luz visible como la radiación infrarroja térmica (IR) emitida por los objetos calientes.

La resolución espacial de MODIS es mucho mejor que AVHRR, es decir que las bandas MODIS de 250m (visible e infrarroja) ofrecen datos 16 veces más alta resolución que su antecesor.

Los datos de MODIS también sirven para estudiar los aerosoles, vapor de agua y nubes para un mejor análisis de los ecosistemas, atmósfera y clima (NASA, 2015).

MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados y globales capaces de predecir el cambio global que está sufriendo el planeta Tierra y así tomar decisiones sanas referentes a la protección de nuestro ambiente.

3.3.2 Técnica interpretación visual

El objetivo de la interpretación visual de las dos imágenes MODIS del satélite Terra que fueron escogidas para este estudio por su cercanía con la fecha y horario de adquisición de una de las imágenes SAR ENVISAT del 07 de junio, correspondiente al periodo más intenso de la erupción, estuvo enfocado en identificar la dirección de la pluma volcánica en dos tiempos diferentes, cuyo fin era realizar un análisis más profundo del efecto de las emanaciones de cenizas volcánicas de ambas imágenes y su posible impacto en los interferogramas de deformación del terreno obtenidos.

3.4.1 Imágenes obtenidas por la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes CHARTER.

Corresponde a una instancia de cooperación voluntaria a escala mundial entre agencias espaciales, a través de la cual se hacen accesibles productos e información obtenidos mediante satélites para contribuir a la respuesta en caso de desastres. La Carta ha estado

operando desde noviembre del año 2000 y actualmente participan en el mecanismo 15 agencias espaciales que se detallan en la siguiente tabla:

AGENCIA ESPACIAL	
ESA	Agencia Espacial Europea
CNES	Centro Nacional de Estudios Espaciales (Francia)
CSA	Agencia Espacial Canadiense
ISRO	Organización de Investigación Espacial de la India
NOAA	Administración Nacional de Océanos y Atmósfera
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina
JAXA	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
DMCii	Agencia Espacial del Reino Unido / Disaster Monitoring Constellation
CNSA	Administración Nacional Espacial de China
DLR	Centro Aeroespacial de Alemania
KARI	Instituto Coreano de Investigación Aeroespacial
INPE	Instituto Nacional de Investigación del Espacio
EUMETSAT	Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos
ROSCOSMOS	Agencia Espacial Federal Rusa

Tabla 3.6: Agencias Espaciales CHARTER volcán Puyehue.

Para la emergencia producto de la erupción del volcán Puyehue en junio del 2011, se activó CNES con imágenes SPOT, USGS con imágenes Landsat 5 TM, DLR con imágenes TerraSAR-X, CSA con imágenes RADARSAT 1 y 2 y ESA con imágenes ENVISAT.

A continuación se describirán algunas características técnicas de las imágenes antes descritas, excluyendo ENVISAT, la que fue mencionada al comienzo de este capítulo.

3.4.1.1 Landsat 5 TM y 7 ETM

LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite) fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT. La constelación LANDSAT está formada por 7 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos Nimbus. Llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle, de ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales. (INEGI, 2015).

Actualmente solo se encuentran activos el LANDSAT 5 y 7, los cuales son administrados por la NASA (National Space and Space Administration), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para

aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

El sensor TM (Landsat 5) es un avanzado sensor de barrido multiespectral, opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal.

Landsat 7, fue el último satélite lanzado en abril de 1999 con un nuevo sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). compuesto por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Entre las principales mejoras técnicas respecto del satélite Landsat 5, se destaca la adición de una banda espectral (Banda Pancromática) con resolución de 15 metros. También, cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60 m. (GSP, 2016). De la serie Landsat, el ETM+ es el único instrumento que apunta al nadir (CONAE, 2016).

3.4.1.2 SPOT 4 Image

La constelación Spot (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra) se conforma por una serie de satélites civiles de observación de la Tierra, que entraron en operación desde el año 1986. SPOT 4 se unió a la órbita en marzo de 1998. El programa Spot aprobado en 1978 por Francia, ha sido desarrollado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES) en colaboración con Bélgica y Suecia.

La constelación SPOT ofrece imágenes por satélite óptico que combinan una alta resolución con un barrido amplio (AIRBUS, 2015).

Gracias a la combinación de los datos emitidos por los satélites Spot 4 y 5, resulta posible generar datos a 4 niveles de resolución (20 m., 10 m., 5 m. y 2,5 m.), en modo blanco y negro, y color, para un campo de observación de 60 km. en el suelo.

Este enfoque multiresolución permite responder a las expectativas de múltiples escalas por parte de los usuarios para una mejor gestión de los territorios (AIRBUS, 2015).

3.4.1.3 TerraSAR-X

TerraSAR-X es un satélite alemán de observación de la tierra, con un sensor de radar en banda X con una gama de diferentes modos de operación, lo que le permite grabar imágenes con diferentes anchos de franja, resoluciones y polarizaciones. TerraSAR-X ofrece así la capacidad de observación basadas en el espacio que antes no estaban disponibles. El objetivo de la misión es proporcionar imágenes SAR con valor agregado, con fines de investigación y desarrollo, así como las aplicaciones científicas y comerciales (DLR, 2015).

3.4.1.4 RADARSAT 1 y 2

RADARSAT 1 y RADARSAT 2 recogen imágenes radar en banda C desde 1995 y 2007 respectivamente. Sus principales aplicaciones las encontramos en exploración minera y petrolera, elaboración de cartografía, gestión de riesgos, agricultura y forestación, como en vigilancia marítima.

RADARSAT 1 provee un sistema de satélites de radar operativo capaz de entregar de forma oportuna grandes cantidades de datos. Equipado con un potente radar de apertura sintética (SAR), que adquiere imágenes de la Tierra de día como noche, en todo tiempo y a través de cobertura de nubes, el humo y la neblina. (CSA, 2015). Este proyecto fue dirigido por Canadá que participó el Gobierno federal canadiense, las provincias canadienses, los Estados Unidos, y el sector privado.

RADARSAT 2, correspondiente a la nueva generación comercial de satélites de radar de Canadá la cual ofrece potentes avances técnicos que mejoran la vigilancia marítima, la vigilancia de hielo, gestión de desastres, la vigilancia ambiental, la gestión de recursos y la cartografía. Este proyecto representa una colaboración única entre el gobierno y la industria.

3.4.2 Técnica interpretación visual

Todos los productos con valor agregado obtenidos de las imágenes proporcionadas por el CHARTER, se enfocaron en la interpretación visual de estas, logrando identificar rápidamente en las primeras imágenes disponibles (de radar), el nuevo cráter que se había formado, y con la entrega en días posteriores de imágenes ópticas, permitieron visualizar el comportamiento de la pluma volcánica y coberturas de cenizas, especialmente en cuerpos de aguas, como lagos. Todos estos análisis se describirán en detalle en el próximo capítulo.

3.5 Los software utilizados

Los procesamientos de las imágenes satelitales y cartografía se realizaron a través del programa ENVI y ArcGis.

3.5.1 ENVI

ENVI es el software que permite la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes digitales. Con herramientas tan avanzadas como fáciles de usar para análisis espectral, corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, gestión de información SIG, soporte de múltiples formatos y mucho más. ENVI es la primera solución de software para la extracción de información rápida, fácil y precisa de imágenes geoespaciales (ESRI OF, 2015).

Se utilizó el módulo para ENVI de SARscape, el cual ofrece una amplia gama de herramientas específicas para trabajo con datos de radar de apertura sintética (SAR).

A través de módulos básicos que provee múltiples funcionalidades que incluyen foco, multilooking, co-registro, filtros, calibración radiométrica, mosaicos, segmentación y clasificación. Por su parte, el módulo de interferometría permite procesar datos de interferometría SAR y de interferometría diferencial para la generación de DEMs, mapas de coherencia y de desplazamiento de la tierra (ESRI Chile, 2015).

3.5.2 ArcGis

Para la generación de cartografía finales de deformación y detección de cambios producto de la erupción volcánica, se utilizó el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica, dentro de las que se encuentra la elaboración de mapas.

Esta completa plataforma de información permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y globos en 3D, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según sus necesidades (ESRI España, 2015).

4 Análisis e interpretación de resultados

4.1.1 Interferogramas y mapas de deformación - imágenes ENVISAT

Debido a la baja coherencia y efectos atmosféricos, las mediciones de deformación se han obtenido solo para 4 pares InSAR (Tabla 4.1). Suponemos que la pérdida de la coherencia de los otros pares InSAR, de los cuales no fue posible realizar interferogramas se debe probablemente por una parte a la acumulación de cenizas en el suelo y a cambios relacionados a la cobertura de nieve relacionado a las estaciones del año.

Master date	Slave date	Baseline \perp [m]	Notes
07/02/2011	09/03/2011	89	strong atmo effects
09/03/2011	08/04/2011	251	strong atmo effects
08/04/2011	08/05/2011	244	good coherence
08/05/2011	07/06/2011	98	good coherence
07/06/2011	07/07/2011	153	good coherence
07/07/2011	06/08/2011	50	no coherence
06/08/2011	05/09/2011	206	no coherence
05/09/2011	05/10/2011	92	no coherence
05/10/2011	04/12/2011	187	good coherence

Tabla 4.1: resumen resultados del procesamiento de interferograma pares de imágenes ENVISAT ASAR. Fuente: C. Bignami et al., 2014.

De acuerdo a la tabla anterior, solo se obtuvieron interferogramas y mapas de deformación de los pares de imágenes siguientes: abril – mayo, mayo – junio, junio – julio, y octubre – diciembre.

Para un mejor análisis e interpretación de los resultados, se colocó en los mapas un triángulo de color rojo, el que da como referencia la ubicación del nuevo cráter producto de la erupción de junio del año 2011.

Las cartografías que se elaboraron para los interferogramas y mapas de deformación, las primeras correspondientes a los interferogramas “wrapped” (fase enrollada), fueron elaborados con una superposición de imágenes, SAR, modelo de elevación digital y sobre las anteriores el interferograma wrapped (fase enrollada), que permite diferenciar los saltos de fase según una gama de colores. Para los mapas de deformación, como base se utilizó el modelo de elevación digital y sobre este la imagen de deformación, determinando el valor de deformación en relación a una gama de colores. Para el diseño y elaboración de las cartografías fue necesario aplicar porcentajes de transparencia a

ciertas coberturas como la del interferograma y la imagen de deformación, para poder visualizar en la misma imagen el relieve y la imagen SAR, con el objeto de hacer un análisis con la mayor información disponible, combinando las coberturas descritas anteriormente.

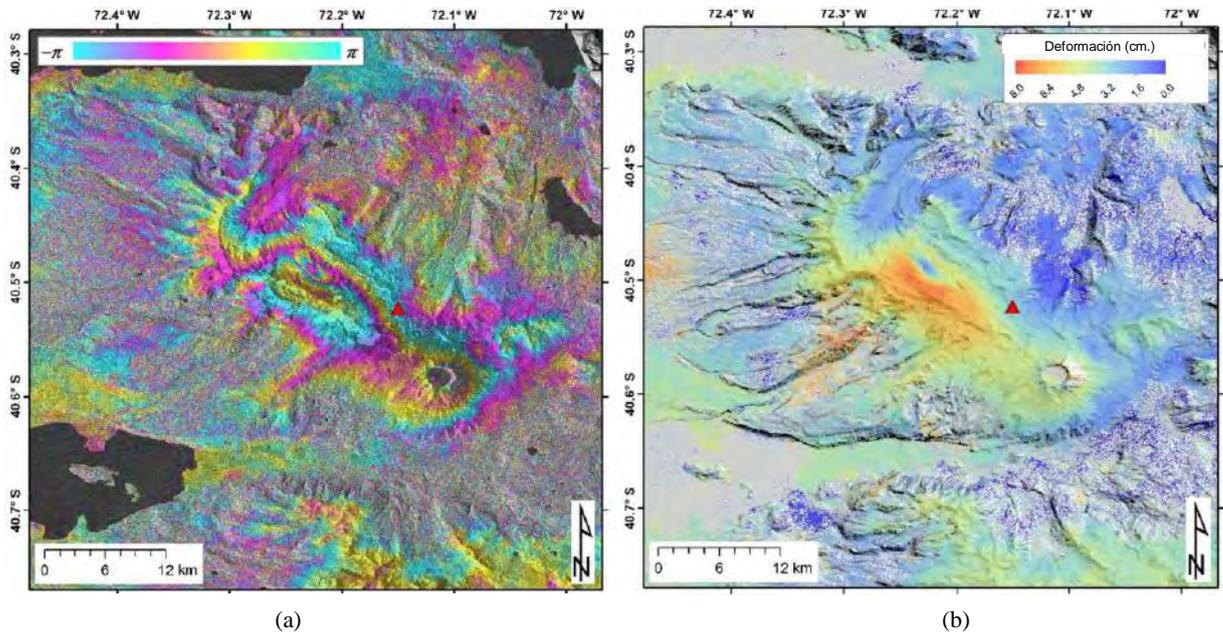


Figura 4.1: imágenes InSar abril y mayo 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.

En la Figura 4.1 (a) interferograma Wrapped, (b) mapa de deformación, correspondiente a la pareja de imágenes InSAR de las fechas 08/04/2011 y 08/05/2011. En la primera figura se observa la última etapa de presión en la superficie antes de la erupción del mes de junio, donde fue posible identificar pocos saltos de fase con franjas poco definidas, pero que estarían mostrando antecedentes de cambios en el área, los que arrojaron como resultado un mapa con pocos centímetros de deformación, con un valor máximo de levantamiento del terreno de 8 cm, el cual correspondería a movimientos precursores de la gran actividad eruptiva que comenzó el mes de junio. Los saltos de fases registrados, apreciados en el mapa de deformación, corresponde principalmente al lugar donde se encuentra el Cordón Caulle, con orientación noroeste desde el cráter principal del volcán Puyehue, este comportamiento eruptivo ha sido habitual considerando los registros de erupciones históricas, lo que es posible observar en la Figura 1.4, en el capítulo 1, registrándose en gran parte del cordón, emanaciones de lava en erupciones históricas desde diferentes cráteres.

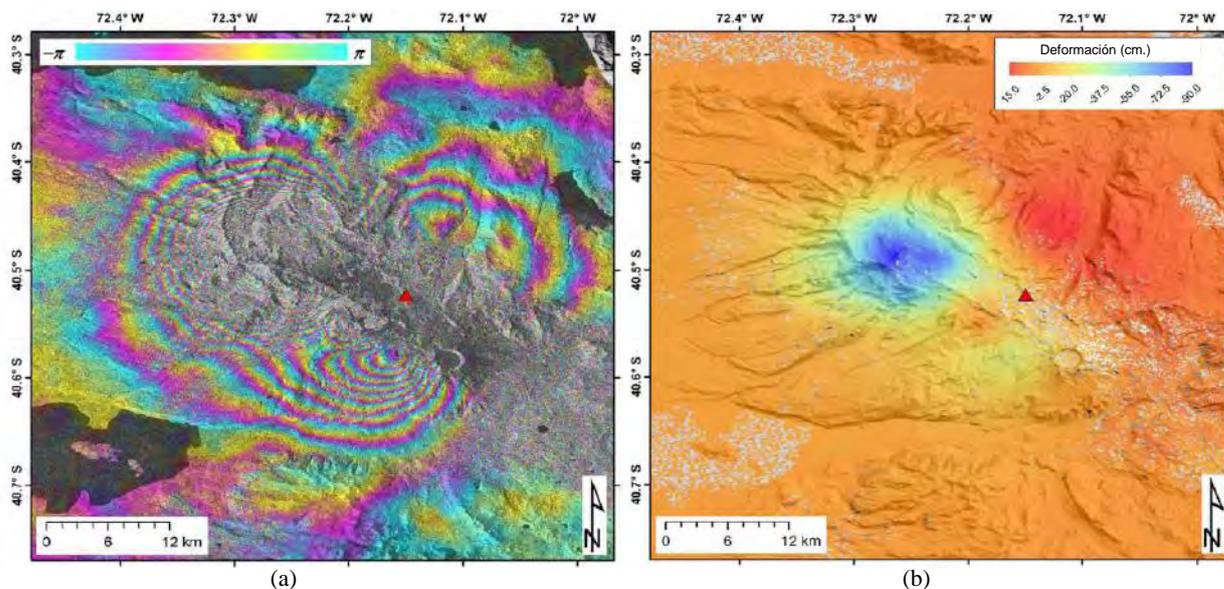


Figura 4.2: imágenes InSar mayo y junio 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.

La Figura 4.2 corresponde al interferograma Wrapped y de deformación, de las fechas 08/05/2011 y 07/06/2011. En la primera (a), es posible observar un complejo patrón de franjas de toda la secuencia, que registra los movimientos de la primera etapa de la erupción, ocurrida el 4 de junio de 2011, con una explosión, que generó una columna de gases y cenizas que superó los 10 Km. de altura. En esta imagen se aprecia muy nítidamente los saltos de fase, particularmente en sectores próximos al sur y noroeste del nuevo cráter identificado por un triángulo rojo, localizado en el Cordón Cauille afectado históricamente por emanaciones de lava (Figura 1.4), con franjas concéntricas más delgadas en el sector céntrico de la imagen (dirección noroeste desde el cráter antiguo) que no es posible apreciar muy nítidamente por la escala del mapa, lo que representa que en un área más pequeña existen mayor cantidad de saltos de fase por consiguiente mayor deformación a diferencia de los sectores más extremos donde es posible apreciar franjas más gruesas y con menos deformación. Con lo descrito anteriormente es posible conocer la magnitud de cambios relacionado a la deformación del terreno, pero hasta el momento no es posible saber si las deformaciones han sido por elevación o deflación del terreno, aspecto que conoceremos en detalle con los mapas de deformación.

En la segunda imagen (b) es posible visualizar grandes áreas de deflación del volcán (dirección noroeste del nuevo cráter) alcanzando un valor de -90 cm., que coincide con la zona donde se levantó el terreno antes de la erupción identificada en la figura 4.1, lo observado anteriormente correspondería a un comportamiento normal de una erupción volcánica, donde antes de la erupción existe presión por la lava, gases y otros materiales volcánicos por salir a la superficie lo que provoca un levantamiento del terreno, y luego del comienzo de la erupción la misma área desciende debido a que todo el material piroclástico y lava es emitida al exterior desde el cráter, dejando de presionar dicho sector. También es posible observar deflación menor a la descrita anteriormente en el flanco sur del nuevo cráter, bien identificado por la fase enrollada “wrapped” figura (a). Además, el mapa de deformación muestra en dirección noreste del nuevo cráter un área de elevación del terreno con un máximo de 15 cm., dicha área podría indicar que el magma siguió un conducto lateral, con dirección noreste, antes de

llegar al nuevo cráter u otra hipótesis sería que la imagen SAR podría haber sido afectada por la interacción con pluma de cenizas volcánicas lo que habría implicado diferencias de fases en el interferograma.

Cabe señalar que los datos entregados tanto por el interferograma como por el mapa de deformación no permiten identificar visualmente la existencia del nuevo cráter, situación que podría haber sido reflejada por saltos de fase y en la deformación, pero considerando el tamaño del nuevo cráter, la resolución espacial de las imágenes y la escala de los mapas, entre otras variables, habrían influido en no poder apreciar dicho fenómeno.

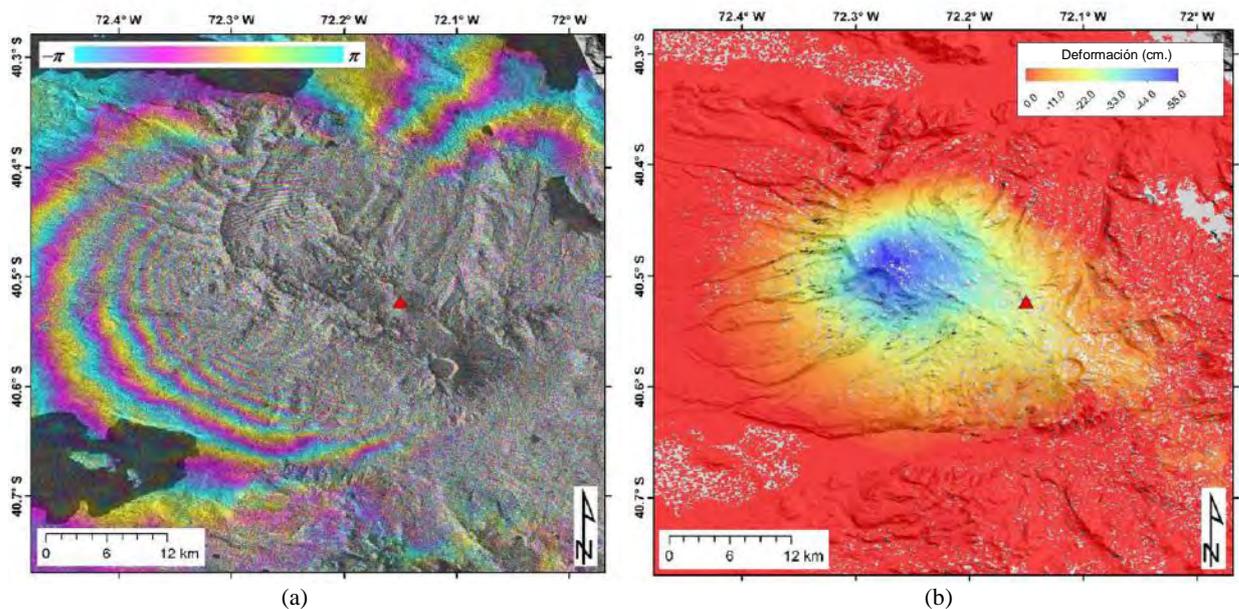


Figura 4.3: imágenes InSar junio y julio 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.

En la Figura 4.3, interferograma Wrapped (a) y mapa de deformación (b), correspondiente a la pareja de imágenes InSAR de las fechas 07/06/2011 y 07/07/2011. En la primera es posible distinguir que el patrón de franjas concéntricas es similar al interferograma anterior (Figura 4.2), manteniéndose principalmente franjas muy delgadas en el área noroeste próxima a la ubicación del nuevo cráter. En el extremo izquierdo de la imagen, de igual modo son identificable franjas concéntricas más gruesas que en el centro de esta misma. Con respecto al mapa de deformación, la deflación notablemente ha disminuido con un valor máximo de hundimiento del terreno de -55 cm., el cual se explicaría por la continua disminución en la presión de la cámara magmática del Complejo Volcánico Cordón Calle producto de la liberación de material desde el mes de junio. En términos generales la descompresión del área se mantiene (centro de la imagen), que corresponde al sector donde se localiza el Cordón Caulle, esta evolución de la erupción del volcán Puyehue fue consignada en los reportes elaborados por el Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN, donde en agosto del año 2011 se indica que el proceso eruptivo se encontraba con baja intensidad y tendencia estable, lo que también será visualizado en los interferogramas y mapas de deformación elaborado de los meses de octubre y diciembre.

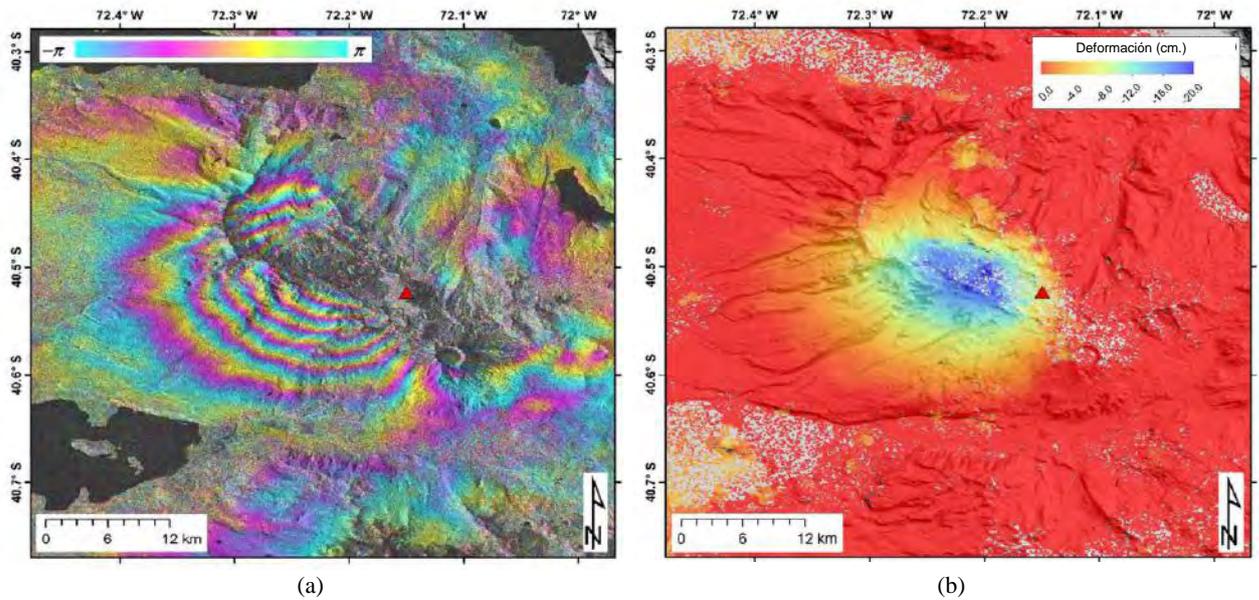


Figura 4.4: imágenes InSar octubre y diciembre 2011. (a) interferograma wrapped, (b) mapa de deformación.

En la Figura 4.4 interferograma Wrapped y mapa de deformación, correspondiente a la pareja de imágenes InSAR de las fechas 05/10/2011 y 04/12/2011. En la primera imagen (a) podemos observar que el área de deformación aún se encuentra en el área de Cordón Caulle, con franjas concéntricas más amplias que las observadas en la misma zona de los dos últimos interferogramas analizados, lo que evidencia visiblemente una disminución de los saltos de fase (valores de deformación) obtenidos para este par de imágenes, lo que se corrobora en la imagen (b) referente al mapa de deformación, el cual registra una disminución de los valores máximos de deflación (aproximadamente 20 cm), manteniéndose los sectores de descompresión.

Con respecto a los interferogramas analizados, posterior al interferograma de los meses de mayo y junio, se consigna la tendencia de disminución de los valores de deformación hasta el mes de diciembre, coincidiendo con los registros y reportes emitidos por SERNAGEOMIN de la actividad volcánica en el periodo observado.

Cabe señalar que uno de los aportes en el artículo científico mencionado como referencia en C. Bignami et al., 2013, como co-autor, tiene relación con la elaboración y análisis junto a Christian Bignami, de interferogramas y mapas de deformación descritos anteriormente, y en el procesamiento de los mapas de detección de cambios utilizando las imágenes COSMO-SkyMed.

4.1.2 Mapa de detección de cambios - imágenes ENVISAT

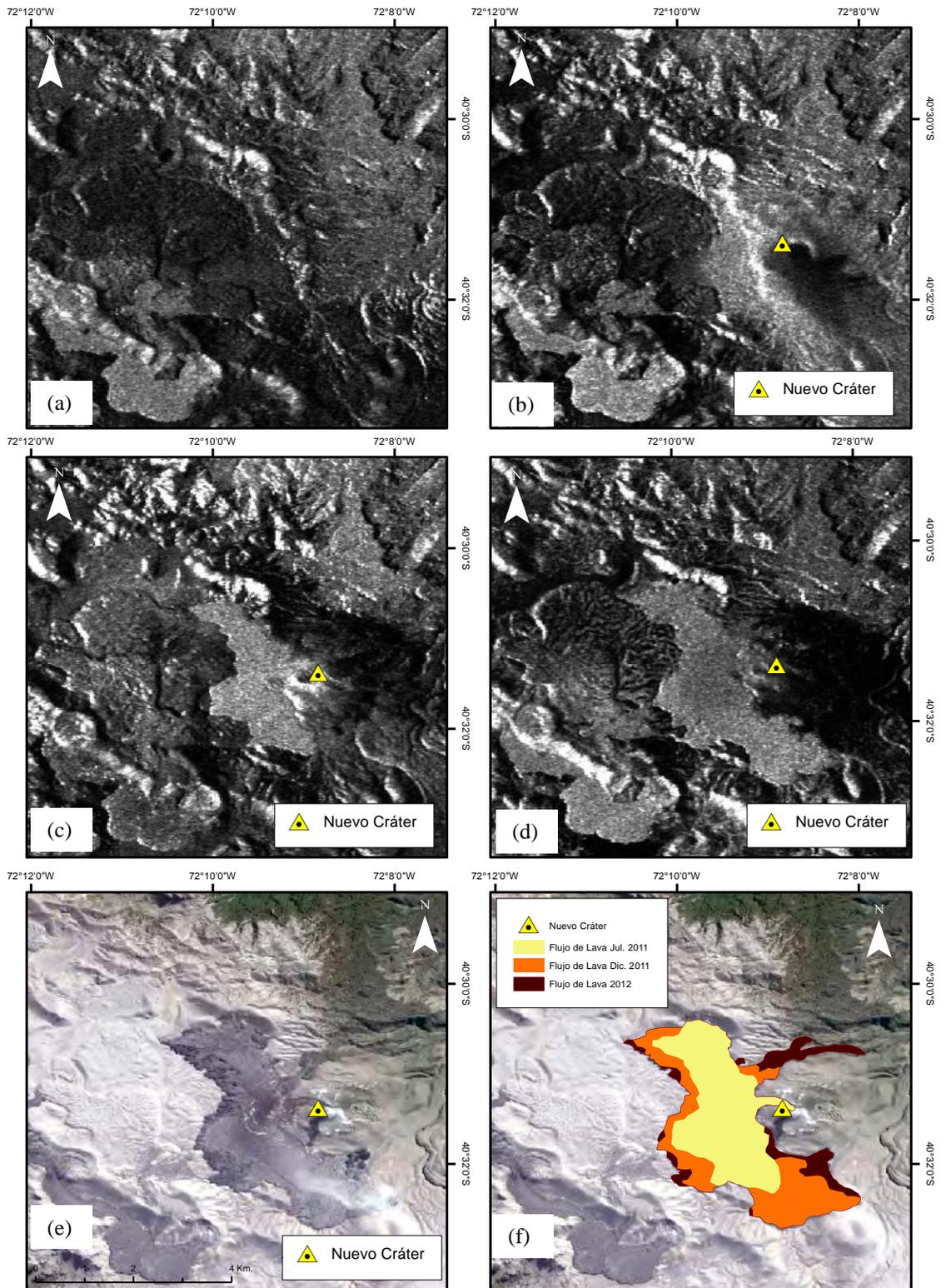


Figura 4.5: imagen ENVISAT (a) 08/05/2011, (b) 07/06/2011, (c) 07/07/2011, (d) 04/12/2011, (e) imagen óptica google earth 26/02/2015. (f) imagen de detección de cambios.

En la Figura 4.5, en las primeras cuatro imágenes de Radar ENVISAT, es posible observar la evolución de la emanación de lava expulsada desde el nuevo cráter, consignándose que para el mes de junio (b) no es posible observar con exactitud si había zona cubierta por lava emanada recientemente, habiendo transcurrido solo tres días desde el comienzo de la erupción, lo que podría hacer suponer muy poca emisión de lava para esa fecha en los sectores aledaños al nuevo cráter y en segundo lugar podría explicarse por a la interacción de la imagen SAR con la pluma volcánica con lo cual la zona afectada por esa condición es observable de manera borrosa, sin embargo, es posible notar diferencias con la imagen del mes de mayo (a) un mes antes de la erupción, cambios que podrían ser atribuidos de igual modo a los efectos de la pluma volcánica antes mencionados y a zonas afectadas cubiertas por material piroclástico (cenizas).

Para las imágenes de los meses de junio (c) y diciembre (d) se registra la evolución del área cubierta por lava. Paralelamente al análisis de las imágenes de radar, se incorporó al análisis una imagen óptica del 26 de febrero del año 2015 desde google earth, la cual muestra el área de lava emitida hasta el fin de proceso eruptivo (2011-2012). Finalmente, a través de la interpretación visual de las imágenes tanto de radar como ópticas, se obtuvo las áreas aproximadas cubiertas por lava, en julio, diciembre del año 2011 y los primeros meses del año 2012, esta última correspondiente a la última etapa de emanación de lava. En el programa ArcGis, se demarcaron las zonas con lava, que entregó para el mes de julio un área de 360.299 m², para el mes de diciembre un área de 593.423 m², y finalmente para el término del proceso eruptivo (principio del año 2012), alcanzó un área de 687.678 m².

Otros de los riesgos asociados a las erupciones volcánicas, particularmente en volcanes con presencia de nieve como el Puyehue, es la generación de lahares que se originan por la emanación de lavas a altas temperaturas desde el cráter y el posterior derretimiento de la nieve aledaña a él, lo que provoca activación de las quebradas y aumento de los caudales aguas abajo, originando muchas veces afectación a sectores varios kilómetros distantes del volcán. El tipo de peligro señalado anteriormente estuvo presente para esta erupción, observándose en las imágenes ópticas de Google Earth de febrero del 2015 la gran cantidad de nieve en el Cordón Caulle, que se acrecienta en los meses de invierno por presentar la época de mayores precipitaciones y que correspondió a la fecha que comenzó la erupción (4 de junio 2011). Finalmente, la imagen (f) realiza una integración de los avances de la lava en diferentes fechas, cartografía que permite dimensionar además los posibles escurrimientos y activación de quebradas producto de lahares, siendo esta condición uno de los peligros considerados para evacuar sectores en riesgo.

4.2 Mapas de detección de cambios - imágenes COSMO-SkyMed

Imagen sector “cráter nuevo”

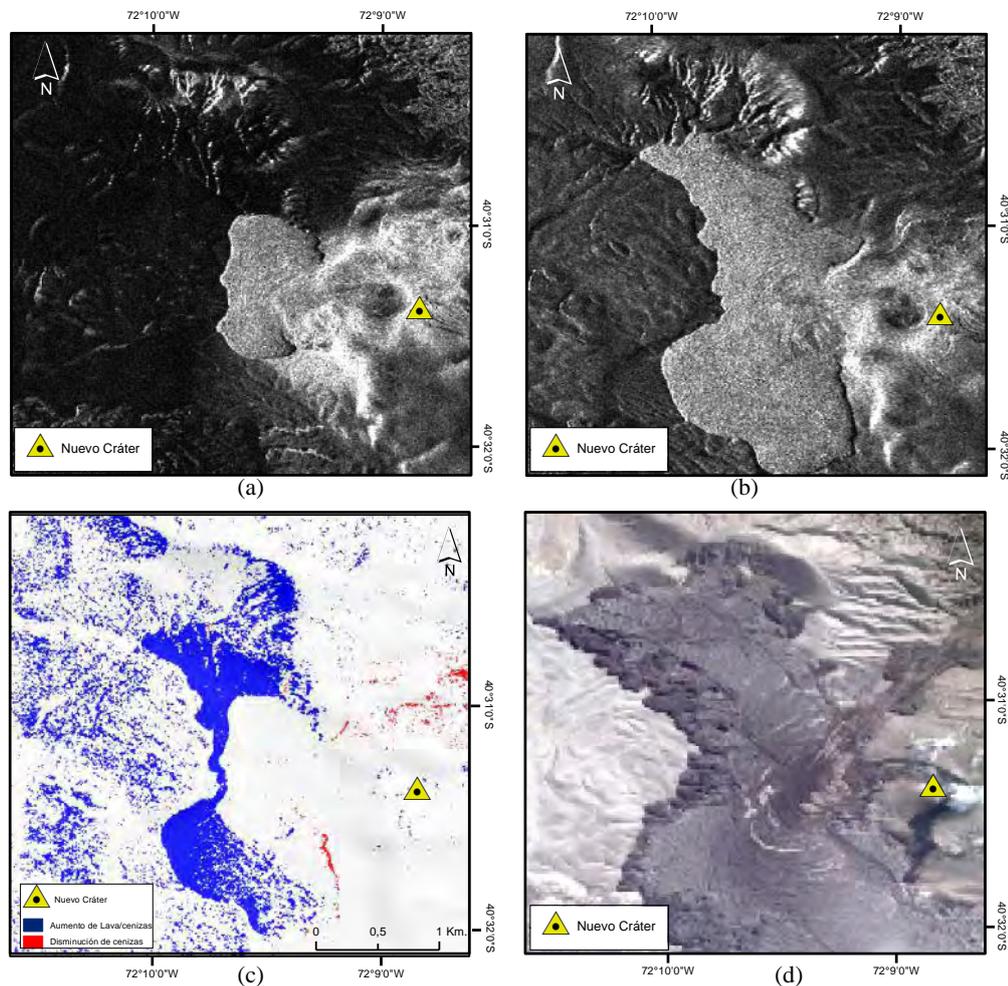


Figura 4.6: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) Imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.

En términos generales la técnica de detección de cambios se aplica con seguridad en prolongados periodos de tiempos o en situaciones que se tiene la certeza de la ocurrencia de cambios importantes debido a un fenómeno en particular, como es en este caso, que debido a la erupción volcánica, tenemos presentes cambios principalmente por la emanación de lava y por la caída de piroclastos.

En las dos primeras imágenes SAR (a) y (b), es posible apreciar visualmente la evolución del área cubierta por la lava emitida desde el nuevo cráter por el periodo de 7 días, áreas que favorablemente para la interpretación visual hacen contrastes con otras zonas cuyos tonos son grises más oscuros, a diferencia de cambios relacionado a la caída de ceniza volcánica que no es posible distinguir. En la imagen (c), se aplicó una operación algebraica simple (resta) entre pixeles de dos imágenes con fechas diferentes (a) y (b) para detectar los cambios en ese periodo de tiempo, para lo cual es importante incorporar en este análisis otras imágenes disponibles incluyendo ópticas y tener conocimiento de los tipos de peligros presentes para este tipo de erupción, lo que

permitirá determinar con un mayor nivel de certeza qué tipo de cambios se han registrado. De acuerdo a lo anterior, fue posible asociar los cambios asociados al avance del área cubierta por lava, correspondientes a áreas de color azul más homogéneas (sector oeste más próximo del nuevo cráter) y nuevas zonas cubiertas por capas de cenizas también representadas de color azul principalmente en extremo izquierdo de la imagen. Además, se aprecia áreas pequeñas de color rojo, que representarían principalmente sectores que en la primera imagen estaban cubiertas por cenizas y en la segunda imagen no. Otro aspecto relacionado a cambios detectados asociados a la caída de cenizas, tiene relación con la variación en la dirección de los vientos y a la caída de nieve por la época del año, por lo cual zonas que estuvieron cubiertas de cenizas en la primera imagen pudieron dejar de estarlo y zonas que no lo estaban, pudieron estar cubiertas en la segunda imagen.

Es importante señalar que las condiciones meteorológicas en la zona del volcán Puyehue presentan nubosidad gran parte del año, incrementándose en la época de invierno, que corresponde a la fecha de la erupción del volcán, razón por la cual no fue posible obtener imágenes ópticas que permitieran observar el proceso eruptivo durante los primeros días de la erupción. Finalmente, la imagen óptica de referencia obtenida desde google earth (d) del 26 de febrero del 2015, permitió diferenciar la nieve de la lava en el cordón volcánico, identificando visualmente hasta donde llegó la lava en dicho proceso eruptivo.

Imagen sector “Lago Huishue”

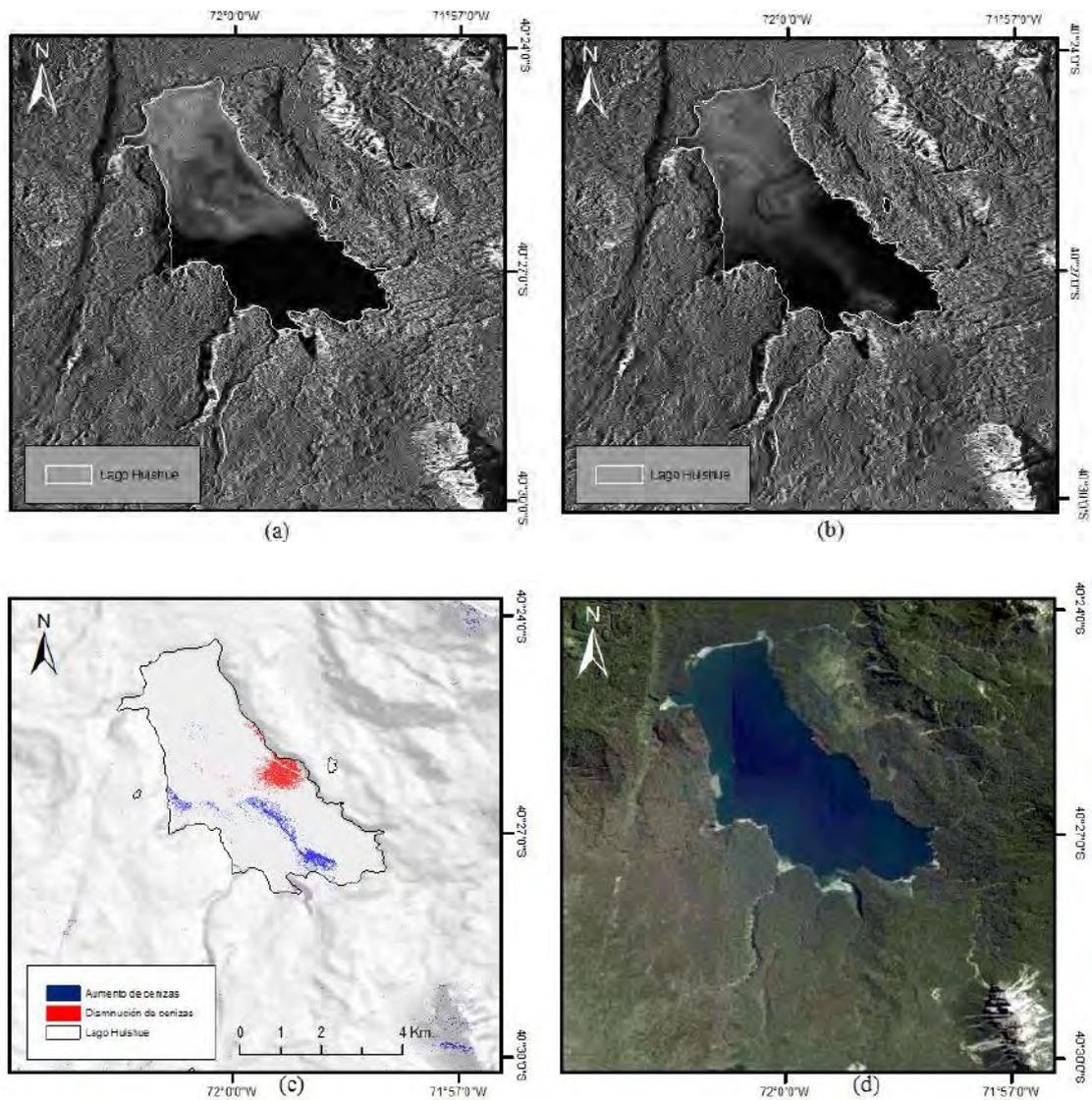


Figura 4.7: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.

En las imágenes de radar SAR analizadas que incluyen el lago Huishue, debemos considerar que el comportamiento de la señal de radar en cuerpos de agua calmo, es especular, por lo cual nula o muy poca señal regresa al sensor, y como resultando tendremos una zona de color negro intenso. Para el caso particular del agua, el viento, olas, o la escorrentía, puede originar cambios, debido a que las longitudes de ondas en las imágenes de radar generalmente son sensibles a estas variaciones en los cuerpos de agua. Estos cambios generan una mayor retrodispersión y por consiguiente, disminuye el contraste entre las superficies de agua respecto a otras coberturas. Lo anterior está directamente relacionado al tamaño del cuerpo de agua, donde, estos cambios en la superficie son casi imperceptibles en agua con superficies pequeñas.

Tomando en consideración los antecedentes mencionados anteriormente e incorporando una línea del contorno del lago, es posible identificar visualmente la superficie del lago

cubierta probablemente por cenizas en las imágenes (a) y (b), correspondiente a zonas de color grises más claro. En la imagen de la primera fecha (a) el agua cubierta por cenizas se circunscribe al sector norte del lago, en la imagen de la segunda fecha (b) gran parte de la zona cubierta se mantiene, visualizándose además una superficie delgada con cenizas que llega hasta el borde sur del lago, lo anterior es posible ser asociado a las cenizas transportadas por las corrientes del lago. Preliminarmente podríamos descartar los efectos del viento y oleaje, dado que este comportamiento debería ser reflejado en todo el cuerpo de agua y no solo en algunas zonas, y con respecto a la escorrentía, básicamente sería apreciable en la distribución de sedimentos, en este caso de cenizas en diferentes sectores del lago.

En la imagen (C) que muestra la detección de cambios de las dos fechas a través de la operación algebraica (sustracción), en color azul podemos observar el área de avance de la superficie del lago cubierta por cenizas, y en color rojo el área cuya superficie dejó de estarlo.

La imagen óptica de google earth (d) nos sirve para contextualizar el área geográfica de la zona de estudio, apreciando las zonas aledañas al lago cubiertas completamente con vegetación nativa y en los sectores montañosos más altos la presencia de nieve. Finalmente, y al comparar las imágenes c y d, es posible observar que el extremo inferior derecho de la imagen c, es posible distinguir pequeñas áreas de color azul, observándose caída de cenizas en zonas montañosas cubiertas por nieve, por lo cual es posible señalar que la detección de cambios por efectos de la ceniza volcánica tiene mayor efectividad en cuerpos de agua y en zonas cubiertas por nieve a diferencia de zonas cubiertas por vegetación.

Imagen sector “Lago Constanca”

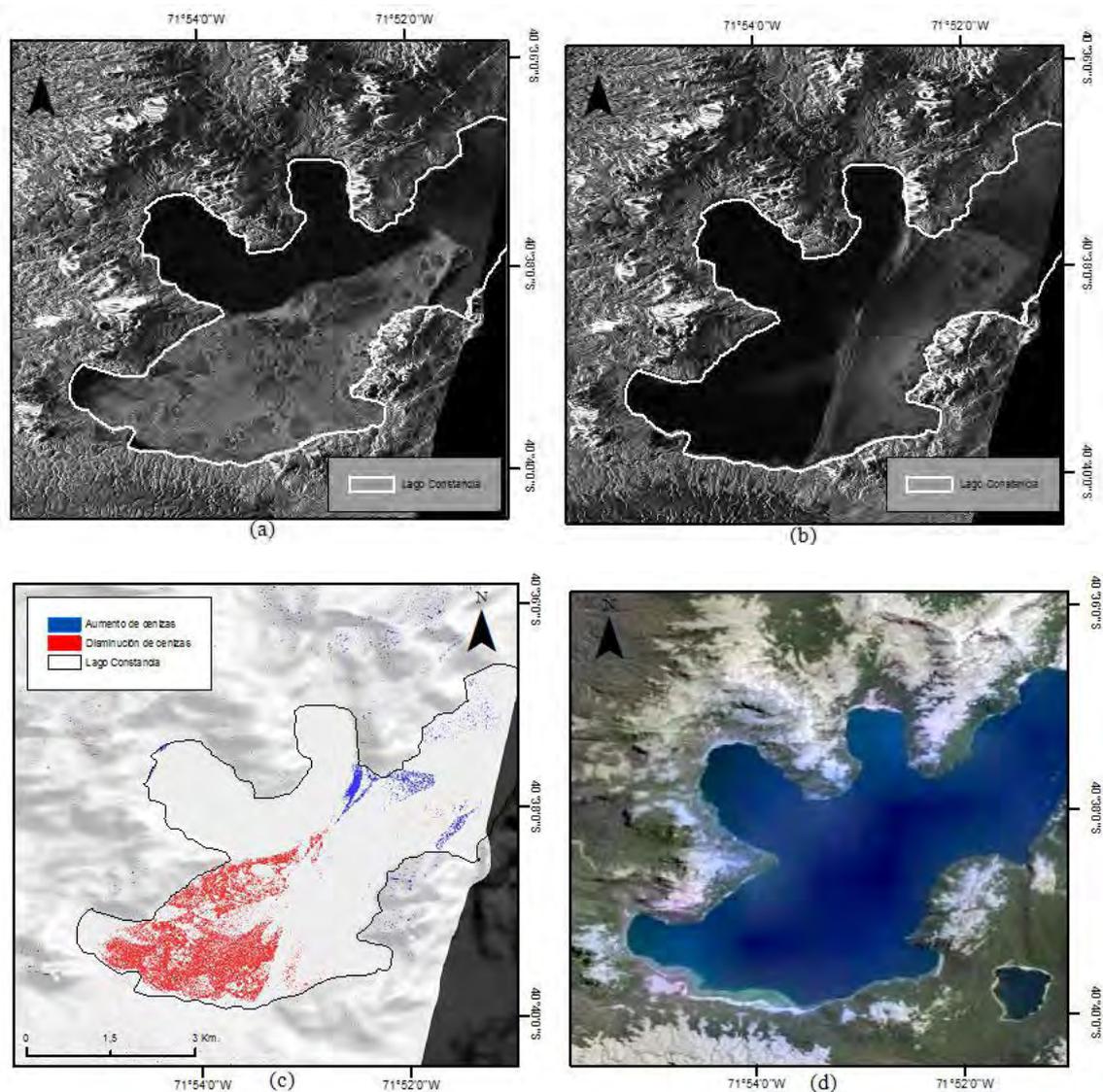


Figura 4.8: imagen COSMO-SkyMed (a) 19/06/2011, (b) 26/06/2011, (c) imagen de cambios entre las dos fechas (d) imagen óptica de referencia google earth 26/02/2015.

De igual modo que las imágenes analizadas anteriormente, el comportamiento sería el mismo para esta zona del lago Constanca, en las imágenes de radar SAR (a) y (b), es posible apreciar visualmente diferencias de color en el lago, sectores de color negro o gris oscuro que es lo normal para cuerpos de agua calmo y gris claros que podría ser explicado por los sectores cubiertos por cenizas. En la imagen (C), en color rojo correspondería a las zonas que dejaron de estar cubierta por cenizas, y en color azul las nuevas zonas cubiertas. La última imagen (D) corresponde a la imagen de referencia de google earth para este sector, que mantiene las características para esta zona con una intensa vegetación y los sectores más altos con nieve.

4.3 Interpretación visual – imagen MODIS

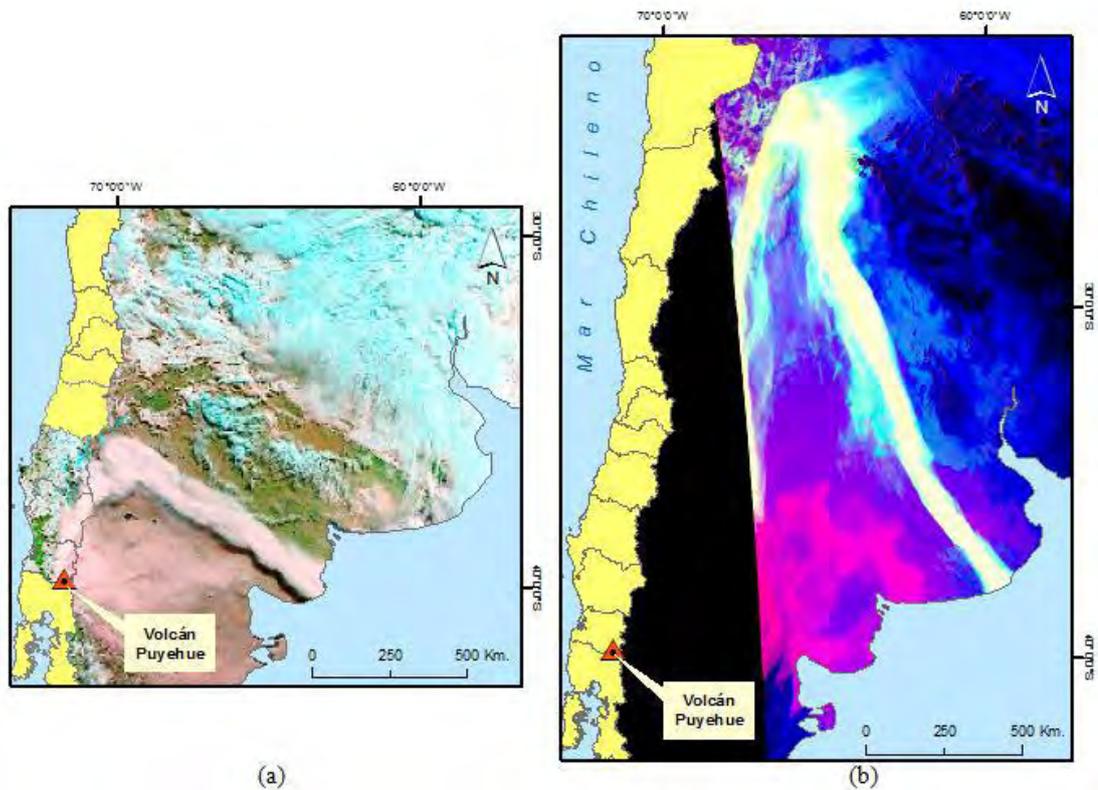


Figura 4.9: imagen MODIS sensor Terra (a) 06/06/2011 hora: 02:23 UTM (b) 07/06/2011 hora: 14:25 UTM.

En la Figura 4.9, tenemos dos imágenes MODIS, la imagen (a) corresponde a una adquisición del día 06 junio de 2011, la segunda imagen (b) corresponde a otra imagen MODIS del día 07 de junio de 2011. El objetivo de analizar este par de imágenes era conocer la dirección de la pluma, particularmente para el día 7 de Junio de 2011, con lo cual se podría realizar un análisis de la posible afectación de la pluma de cenizas volcánicas en el resultado del interferograma que utilizó una imagen ENVISAT del día 7 de junio, analizada en este capítulo (4.1.1). Lamentablemente la zona disponible de la imagen no cubre el área del volcán Puyehue, por lo cual solo permitió realizar suposiciones de las posibles direcciones de la pluma en el entorno más cercano del volcán. En la imagen MODIS del día 6 de junio (b), se muestra a modo de ejemplo, donde es posible observar nítidamente la pluma volcánica y su dirección, apreciando de este modo la variabilidad de la dirección de los vientos en la atmósfera, en este caso para el primer recorrido dirección norte y noreste, y en un segundo tramo cambiando de dirección hacia el este y sureste.

4.4 Interpretación visual – imágenes CHARTER

A continuación se analizarán las imágenes obtenidas por la activación del CHARTER producto de la erupción volcánica, que derivó a la evacuación de la población que se encontraba aledaña al volcán. Durante los primeros días de la erupción se obtuvieron imágenes de radar de los sensores TerraSAR_X, ENVISAT, y RADARSAT 1 Y 2,

posteriormente y debido a la mejoras en las condiciones meteorológicas fue posible obtener imágenes ópticas SPOT 4 y 5, y Landsat 5 TM.

Las imágenes antes mencionadas, permitieron observar principalmente la posición de nuevo cráter, la dirección de la pluma volcánica, y algunas zonas cubiertas por la ceniza.

Fecha	Sensor
06/06/2011	TerraSAR-X
07/06/2011	ENVISAT
07/06/2011	TerraSAR-X
08/06/2011	TerraSAR-X
08/06/2011	RADARSAT 2
12/06/2011	TerraSAR-X
25/06/2011	SPOT 4
26/06/2011	Landsat 5 TM
26/06/2011	SPOT 5

Tabla 4.2: imágenes satelitales CHARTER volcán Puyehue erupción 2011.

4.4.1 Interpretación visual – imagen TerraSAR-X

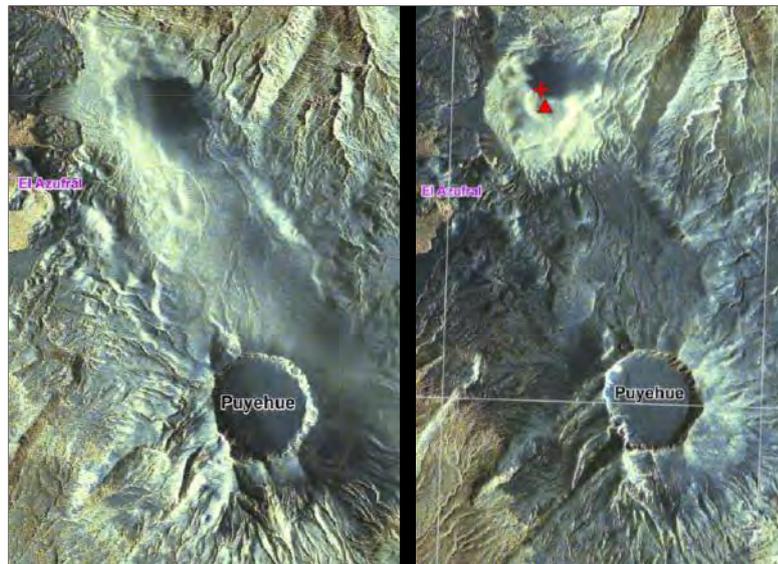


Figura 4.10: imagen TerraSAR-X, izquierda 06/06/2011, derecha 08/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por ZKI (DLR).

En ambas imágenes TerraSAR-X, Figura 4.10, fue posible identificar visualmente el nuevo cráter, destacado en la imagen con una cruz de color rojo, la zona aparece con un color gris oscuro que contrasta con la nieve que por la época del año (invierno) abunda en el Complejo Volcánico, la misma área se aprecia de manera borrosa a diferencia de otras áreas de la imagen la que podría estar siendo afectada por la emanación de cenizas desde el nuevo cráter. Al realizar una comparación de ambas imágenes es posible observar que la correspondiente al 8 de junio presenta zonas más grises que la imagen del 6 de junio, lo que podría explicarse por la acumulación de cenizas en la superficie, principalmente en zonas nevadas luego de dos días de haber comenzado el proceso

eruptivo. Con respecto a la dirección de la pluma, en la imagen del día 6 de junio por el color gris oscuro podría indicarse que tiene una orientación sureste, en cambio en la imagen del 8 de junio tendría una orientación norte. La ubicación del nuevo cráter coincide con la orientación y localización de la falla Liquiñe – Ofqui indicada en la Figura 1.4 en el capítulo 1.

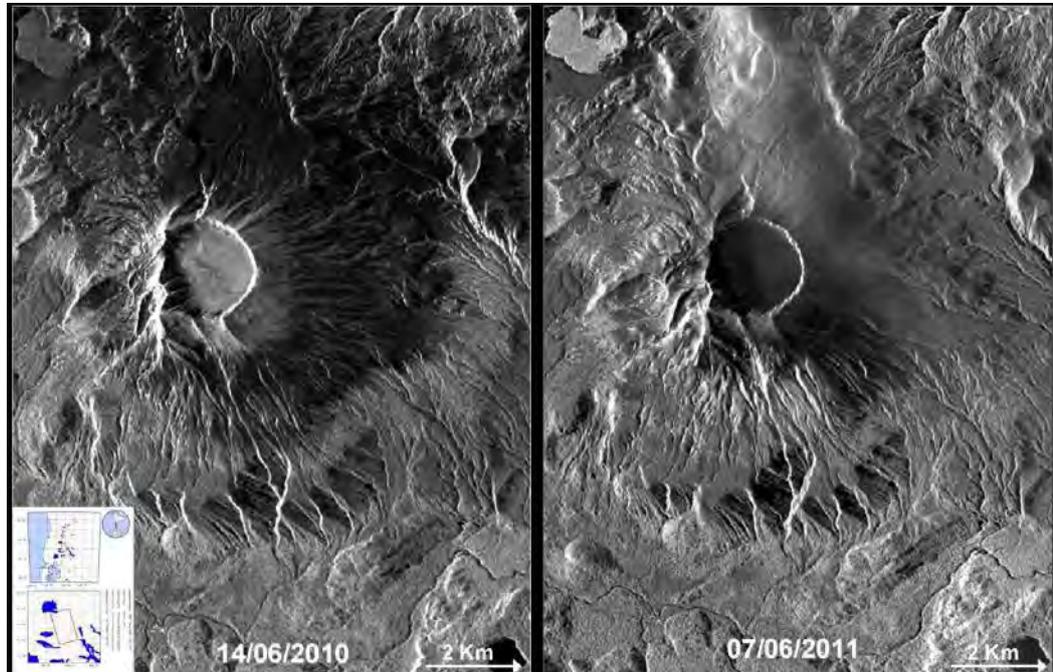


Figura 4.11: imagen TerraSAR-X, izquierda 14/06/2010, derecha 07/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por ZKI (DLR).

En la Figura 4. 11, El área del mapa de la imagen previa y posterior a la erupción no permite observar el nuevo cráter originado en esta erupción, ubicado al norte del cráter principal y fuera del área observable en esta imagen. Las imágenes se centraron en la zona del cráter del volcán Puyehue, lo que disminuyó la posibilidad de identificar cambios en la zona de mayor actividad. Sin embargo, al observar y comparar visualmente las dos imágenes es posible identificar que en la zona este y noreste más próxima al cráter principal de la imagen del 7 de junio no se distingue nítidamente el relieve a diferencia de otras áreas de la misma imagen y de la imagen del año 2010, por lo cual se podría inferir que una de las posibles causas estaría vinculada a la interacción de la señal SAR con la pluma de cenizas que afectaba la zona.

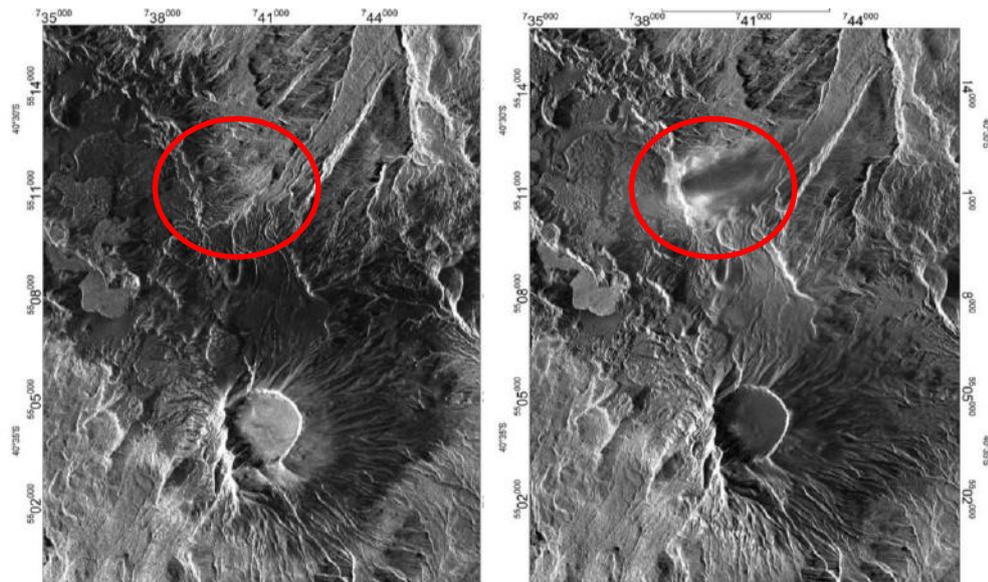


Figura 4.12: imagen TerraSAR-X, izquierda 14/06/2010, derecha 12/06/2011. Copyright: German Aerospace Center (DLR) 2011. Mapa elaborado por CONAE.

Al comparar visualmente las imágenes de la Figura 4.12, es posible identificar claramente al igual que las otras imágenes SAR analizadas anteriormente, el área de emisión de cenizas desde el nuevo cráter ubicado al norte del cráter principal y delimitado para su identificación con un círculo de color rojo, zona que cambia considerablemente a la imagen pre-erupción. En la imagen de la derecha, del 12 de junio del 2011 es posible apreciar la emisión de piroclastos desde el nuevo cráter, de igual modo se podría identificar preliminarmente la dirección de la pluma volcánica, que tendría una orientación noreste, la que debería verificarse con registros de viento de la zona o alguna imagen óptica tomada el mismo día y similar hora.

Por último resaltar nuevamente una de las ventajas de las imágenes SAR, que permiten realizar un análisis preliminar del proceso eruptivo en condiciones meteorológicas desfavorables para la adquisición de imágenes ópticas, como fue lo que ocurrió para esta erupción.

4.4.2 Interpretación visual – imagen ENVISAT ASAR

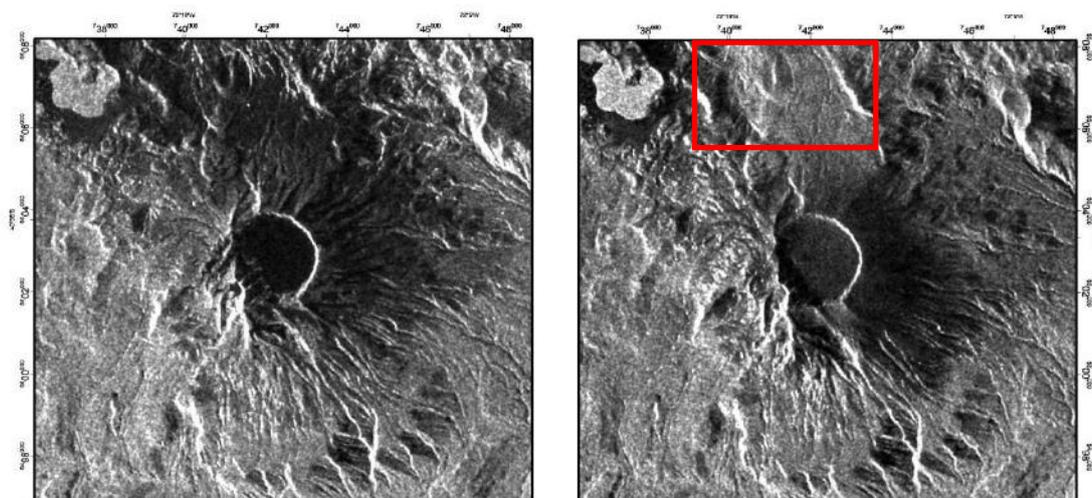


Figura 4.13: imagen ENVISAT, izquierda 07/02/2011, derecha 07/06/2011. Copyright: European Space Agency (ESA). Mapa elaborado por CONAE.

Al igual que la imagen TerraSAR_X del 7 de junio del 2011, las áreas seleccionadas de las imágenes ENVISAT ASAR, en la Figura 4.13, no es posible observar el área del nuevo cráter, ubicado más al norte del cráter principal (antiguo) y del área de la imagen seleccionada, sin embargo, se aprecian diferencias visuales en el sector norte del cráter principal identificado con un rectángulo de color rojo, observándose la zona más homogénea y suavizada en relación a la imagen de la izquierda, lo que podría deberse a las cenizas en suspensión que afectaba esa zona.

4.4.3 Interpretación visual – imagen RADARSAT

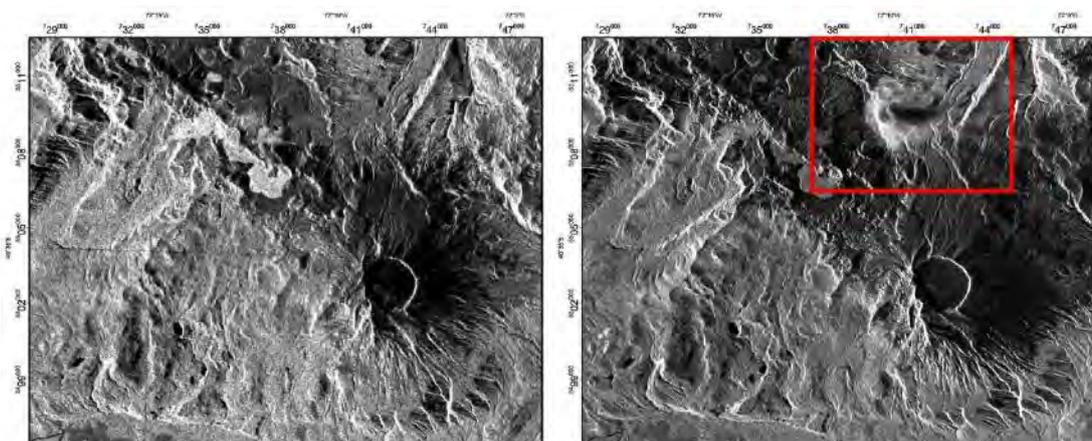


Figura 4.14: izquierda imagen Radarsat 1 01/05/2004, derecha imagen Radarsat 2 08/06/2011. Copyright: RADARSAT-2 Data and Products © MacDonal. Mapa elaborado por CONAE.

De igual manera de los anteriores análisis e interpretación de las imágenes de radar que incluye la zona de la erupción del año 2011, en la Figura 4.14, es posible visualizar las diferencias entre las dos imágenes pre y post erupción, en la imagen de la derecha se identifica nítidamente la zona de emisión de cenizas del nuevo cráter destacado en un rectángulo de color rojo al norte del cráter principal, esta zona se aprecia difusa, de igual

forma como fue observada en las otras imágenes SAR analizadas anteriormente del mismo sector. Con respecto a la orientación de la pluma volcánica por el color gris oscuro, podría señalarse que en el momento de la toma de la imagen tenía una orientación este, cabe señalar que la dirección de la pluma volcánica tuvo permanentes variaciones durante todo el proceso eruptivo.

4.4.4 Interpretación visual – imagen Spot

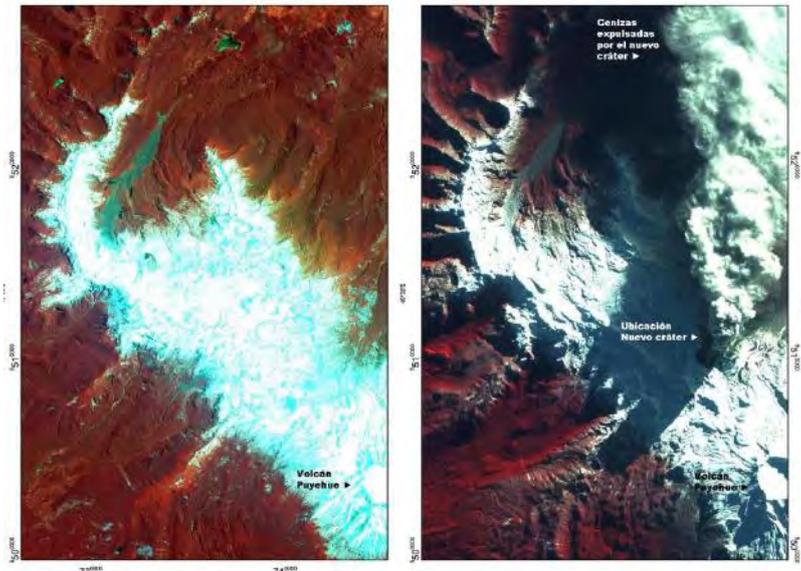


Figura 4.15: imagen Spot 4, izquierda 25/12/2007, derecha 25/06/2011. Composición falso color. Copyright: SPOT Image 2011. Mapa elaborado por CONAE.

En la imagen del 25 de junio del 2011, es posible visualizar con precisión la ubicación del nuevo cráter de donde emana la pluma de ceniza volcánica con dirección norte, esta se observa de color blanco y gris, que por su textura es fácilmente reconocible, diferenciándola de la zona del volcán cubierta por nieve de color blanco, y de la zona cubierta por vegetación representada en color rojo (composición falso color), además es posible apreciar en color gris oscuro bordeando el nuevo cráter la presencia de lava volcánica. Esta imagen corresponde a la primera imagen óptica entregada por el CHARTER sin problemas de nubosidad.

Como comentario adicional de las imágenes, es posible indicar que la imagen del 25 de junio es posible visualizar sombras producto del relieve montañoso y por la pluma volcánica a diferencia de la imagen del 25 de diciembre de 2007, en la cual no se observan zonas con sombras, la que podría ser explicado por la diferencia de hora de la toma de las imágenes y la diferencia de las estaciones del año correspondiente a verano en la imagen izquierda e invierno en la imagen de la derecha.

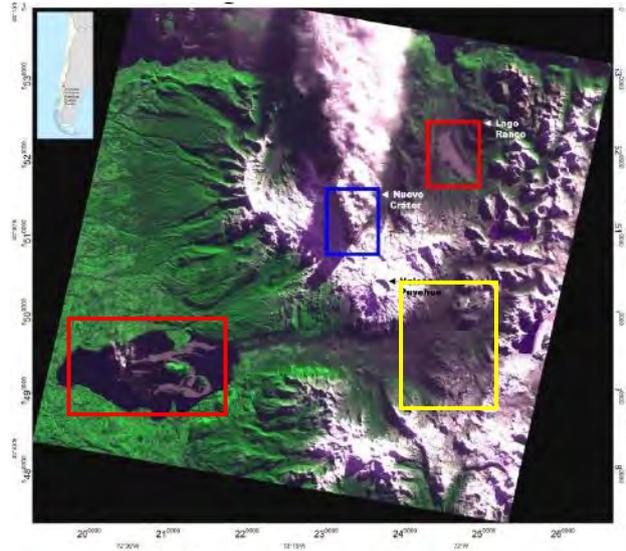


Figura 4.16: imagen SPOT 4 25/06/2011, pixel 10 m. Copyright: SPOT Image 2011. Mapa elaborado por CONAE.

En la Figura 4.16, además, de los aspectos mencionados observables, como la presencia de la pluma de cenizas volcánicas con dirección norte y la identificación del nuevo cráter destacado en rectángulo de color azul, es posible identificar cuerpos de agua como lagos próximos al volcán cubiertos parcial o completamente con cenizas volcánicas destacados en rectángulos de color rojo, además, es posible apreciar otras zonas de nieve y vegetación cubiertas por cenizas, como ejemplo podemos mencionar la zona identificada en un rectángulo de color amarillo localizada al sureste del nuevo cráter, con lo anterior podemos reafirmar lo fluctuante que fue la dirección de los vientos, lo que provocó afectación por cenizas en diversos sectores. Particularmente esta imagen al tener una mayor cobertura geográfica que las imágenes SPOT analizadas anteriormente, permitió realizar un análisis más integral de las zonas afectadas por el proceso eruptivo.

4.4.4 Interpretación visual – imagen Landsat

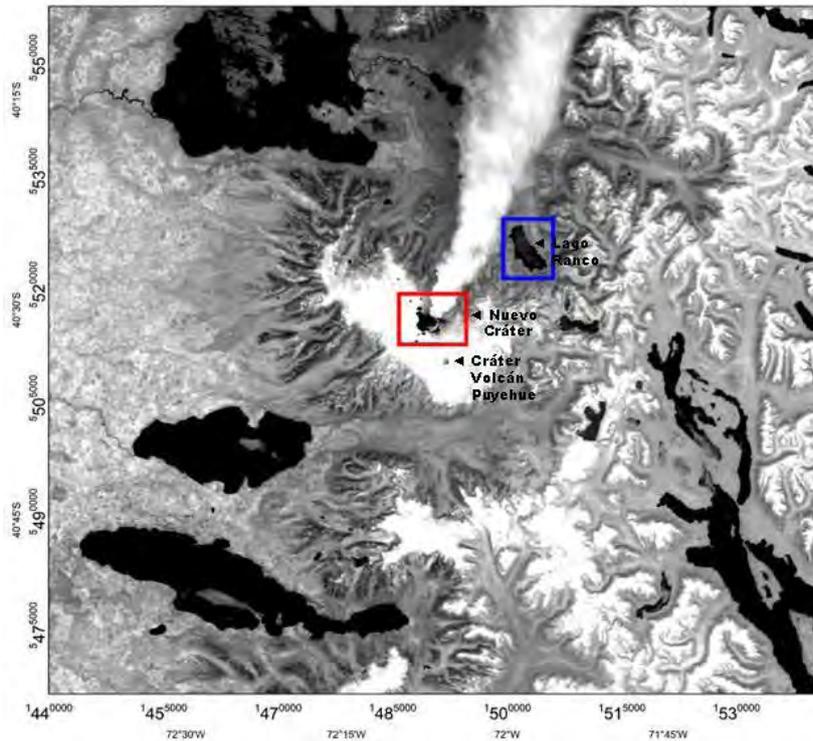


Figura 4.17: imagen nocturna Landsat 5 26/06/2011, banda térmica pixel 30 m. Copyright: USGS 2011. Mapa elaborado por CONAE.

En la imagen Landsat 5, a través de la banda térmica fue posible conseguir una imagen nocturna, identificándose el nuevo cráter destacado en rectángulo de color rojo correspondiente a la zona de emisión de la columna de cenizas y la dirección de la pluma volcánica (noreste), además es posible identificar sutilmente lagos próximos al cráter con superficie contaminada con cenizas, como ejemplo el lago Ranco destacado en rectángulo de color azul.

Con respecto a los colores de la imagen, es posible observar que los cuerpos de agua, correspondientes a los lagos próximos al volcán se visualizan de color negro a diferencia de las zonas más altas de los cordones montañosos, que se visualizan de color blanco asociados a las zonas con presencia de nieve, correspondientes a zonas frías, esto podría ser explicado dado que los cuerpos de agua durante la noche emiten el calor que absorbieron durante el día, a diferencia de la tierra que absorbe y pierde dicha energía muy rápidamente. Siguiendo este mismo análisis es posible observar el nuevo cráter de color negro (rectángulo rojo) correspondiente a la emanación de lava que presenta elevadas temperaturas a diferencia de la pluma de cenizas volcánicas de color blanco que al elevarse el material piroclástico fino (cenizas volcánicas), estas se enfrían rápidamente.

5. Conclusiones

Para el análisis de la evolución y comportamiento de la erupción del volcán Puyehue el año 2011, se procuró trabajar utilizando la máxima información disponible, para lo cual fueron utilizadas imágenes ópticas que se obtuvieron de forma gratuitas de fácil acceso como de la plataforma google earth, además de imágenes MODIS, utilizándose de manera simultánea imágenes proporcionadas por el Instituto Nazionale de Geología e Vulcanología, ENVISAT y CosmoSkymed, con las cuales se apuntó al desarrollo principalmente de interferogramas y mapas de detección de cambios, además se realizó un análisis de los productos de diferentes sensores tanto ópticos como de radar obtenidos por la Carta Internacional Espacio y Grandes Catástrofes CHARTER, durante la primera etapa de la emergencia. Con lo anterior se muestra la disponibilidad de datos espaciales y los alcances en su utilización que mencionaré a continuación.

Sin duda se debe considerar la utilización de datos ópticos como de radar, no solo para un mejor y más adecuado análisis, sino más bien, porque en muchas ocasiones, principalmente por condiciones meteorológicas adversas, no hay disponibilidad de datos ópticos, por lo cual las imágenes de radar son en esos momentos la única alternativa existente.

Con respecto a la utilización de información satelital para el monitoreo y alertamiento temprano para volcanes, a través del trabajo realizado, fue posible corroborar que particularmente la técnica de interferometría de radar, entregó información previa que indicaba la existencia de cambios que posteriormente dio comienzo a la erupción del volcán Puyehue, por lo cual sin duda es una fuente de información que idealmente complementada con otros instrumentos de medición y monitoreo, permitirían a los organismos técnicos y autoridades, tomar decisiones con la mayor antelación posible frente a una inminente erupción volcánica, considerando además el gran número de volcanes activos en Chile alrededor de 500, 95 con mayor peligrosidad, de los cuales muchos de ellos no poseen instrumental de monitoreo, por lo cual esta técnica es una real alternativa. Lamentablemente los sensores remotos, aún es un medio poco utilizado en Chile en esta etapa del ciclo del manejo del riesgo, debido a diferentes factores, dentro de los cuales, el económico es uno de ellos. De esto último, las alternativas de desarrollo están vinculadas a alianzas estratégicas, convenios de cooperación con agencias espaciales internacionales, y otras instancias como UN-SPIDER.

Ahora, específicamente a las técnicas empleadas, como la elaboración de los interferogramas, uno de los puntos más críticos corresponde a la estimación de la fase absoluta, que presenta dificultad particularmente en estudios de volcanes, generándose errores de tipo atmosféricos, presentes en los valores de fase, siendo su principal causa la topografía, por lo cual dentro de lo posible, es necesario descartar que los resultados

de deformación obtenidos a través de interferogramas, estén relacionados a esta variable. De igual manera es importante señalar, que la diferencia de fase tiene asociado un grado de incertidumbre, inherente al propio procesamiento de los datos de las imágenes y a la topografía de la superficie, que influye en definitiva en la estimación de los valores de altura, por lo cual es siempre recomendable tener información de estaciones de monitoreo en terreno que permitan corroborar los datos obtenidos, lamentablemente en la época de erupción del volcán no había estaciones GPS, que permitieran medir su deformación.

Otros de los problemas que están asociados a la interferometría, corresponde a los cambios que pueden presentar el par de imágenes debido a las distintas fechas de adquisición, que provocan cambios en las propiedades físicas y geométricas de la zona observada entre dos adquisiciones que originan una pérdida de coherencia.

Algunos de los motivos señalados anteriormente para los interferogramas, principalmente a la baja coherencia y efectos atmosféricos, no permitieron la obtención de interferogramas de todos los pares de imágenes procesadas, lo cual probablemente afectó la acumulación de cenizas en la superficie, como a cambios de estaciones del año del periodo analizado (verano, otoño, primavera y verano).

Particularmente en la etapa de la respuesta, en el ciclo del manejo del riesgo, es necesario analizar en las imágenes los diferentes escenarios de riesgo, en esta oportunidad el aporte significativo que entregó los productos de valor agregado por el CHARTER, fue que sin ser productos con procesamientos complejos, sino más bien apuntando a la interpretación visual del área del volcán, indicó la existencia de un nuevo cráter, situación que cambió significativamente el escenario de riesgo para la zona, por lo cual esta información permitió dimensionar nuevos escenarios asociados a la probabilidad de generación de lahares y aumento de los cursos de aguas afectados por esta erupción, información que fue incorporada en los análisis para identificar los sectores con mayor peligro.

También es necesario resaltar, que para las imágenes de radar, que fueron los únicos medios disponibles los primeros días de la emergencia, con una simple operación algebraica (sustracción) para este caso de estudio, logramos detectar cambios, asociados principalmente a diferencias en la superficie debido a las cenizas volcánicas, lo anterior entrega información valiosa en zonas que por las características de las imágenes SAR, con una simple interpretación visual no es posible detectar.

De acuerdo al nombre de la Maestría, el cual es Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, los procesos y análisis desarrollados en el presente trabajo, apuntaron a cubrir de forma práctica los ámbitos antes descritos, los cuales en concreto podrían ser incorporados en un corto plazo, en los mecanismos utilizados para el análisis de futuras emergencias volcánicas y gestión en la reducción de riesgo de desastres, muchas veces mal llamados naturales, siendo correcto señalar que son de origen natural, debido a que la naturaleza no es desastrosa, sino más bien existen cambios en el territorio, ubicación de asentamientos humanos y decisiones políticas-administrativas, que pueden ocasionar que una manifestación de la naturaleza se transforme en un desastre.

Finalmente señalar, que la utilización de la tecnología satelital y de todos los medios disponibles, su finalidad en estas aplicaciones espaciales, es la Protección Civil, entendida como la protección a las personas, a sus bienes y ambiente, por lo cual si es posible salvar vidas activando planes de evacuación en emergencia, y si son incorporadas de manera integral en los planes de ordenamiento territorial, estarían cumpliendo un rol fundamental en nuestra sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

AIRBUS, Defence and Space, 2015. <http://www.geo-airbusds.com/es>

P. Allard, J. Carbonelle, N. Métrich, H. Loyer, P. Zettwoog, "Sulphur output and magma degassing budget of Stromboli volcano", *Nature* 368, pp. 326–330, 1994.

R. Bamler, "Digital terrain models from radar interferometry. Photogrammetry week 97", D. Fritsch & D. Hobbie, Eds., Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997.

N. Beaulieu, M. Álvares de León, A. Rincón. "Detección de la degradación en pasturas usando series temporales de imágenes multiespectrales en los llanos orientales de Colombia", 2006.

C. Bignami, J. Ruch, M. Chini, M. Neri, M. Buongiorno, S. Hidayati, D. Sayudi, y Surono, "Pyroclastic density current volume estimation after the 2010 Merapi volcano eruption using X-band SAR," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 261, pp. 236–243, Jul. 2013.

C. Bignami, S. Corradini, L. Merucci, M. Michele, D. Raucoules, G. De Astis, S. Stramondo y J. Piedra. Multisensor satellite monitoring of the 2011 Puyehue-Cordon Caulle Eruption. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2014.

CCRS, Canada Centre for Remote Sensing "Interferometría mediante radares", Ministerio de Recursos Naturales de Canadá, 2014. http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/gsarcd/pdf/adv_int_s.pdf

CCRS, Canada Centre for Remote Sensing "Conceptos básicos de teledetección por radar". Proyecto ProRADAR., Ottawa, Canadá. p. 89, 1995.

CHARTER, "Carta Internacional Espacio y Grandes Desastres". 2014. <http://www.disasterscharter.org/web/charter/home>

E. Chuvieco, "Teledetección Ambiental" 2 Edición, 2006.

CONAE, "Información espacial para la gestión de desastres: La experiencia de CONAE", Julio de 2002.

CONAE, Landsat 7, 2016. <http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c/landsat.html>

R. Congalton y K. Green, *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practice*. Mapping sciences series. New York: CRC Press Inc. p. 98, 1999.

P. Coppin y M. Bauer. "Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, pp. 918-927, 1994.

COSMO-SkyMed, 2015. <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>

CSA. Canadian Space Agency, 2015. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>

J. Curlander y R. McDonough, "Synthetic Aperture Radar – Systems and Signal Processing, 1991.

R. De Ruyt. Tesis Maestría: "Análisis comparativo de las técnicas INSAR Persistent Scatterers Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS) aplicada en la medición de la deformaciones del complejo volcánico Cordón Caulle (40.5°S) – Andes del sur, Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba Argentina y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, 2013.

DLR, Agencia Espacial Alemana, 2015. http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#/gallery/350

DMC, Dirección Meteorológica de Chile, Descripción climatológica, Región de Los Ríos y Los Lagos. 2014. http://www.meteochile.cl/climas/climas_decima_region.html#a

J. Dvorak y D. Dzurisin, "Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents," Reviews of Geophysics, vol. 35, no. 3, p. 343, 1997.

D. Dzurisin "Volcano Deformation, New Geodetic Monitoring Techniques, 2016.

M. Edmonds, A. Aiuppa, M. Humphreys, R. Moretti, G. Giudice, R.S. Martin, R.A. Herd, T. Christopher, "Excess volatiles supplied by mingling of mafic magma at an andesite arc volcano", Geochem. Geophys. Geosyst. 11, Q04005, 2010.

E-GEOS, An ASI Telespazio Company, 2015. http://www.e-geos.it/products/pdf/e-GEOS_COSMO-SkyMed.pdf

S. Enrique, Tesis Magister Geomática "Método para la detección de cambios del paisaje en la amazonía con base en sensores remotos", 2014.

ESA, European Space Agency, ASAR Product Handbook, 2007. <https://earth.esa.int/handbooks/asar/toc.html>

ESA, Envisat's Rainbow Vision Detects Ground Moving at Pace Fingernails Grow, 2015. [http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat_s_rainbow_vision_detects_ground_moving_at_pace_fingernails_grow/\(print\)](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat_s_rainbow_vision_detects_ground_moving_at_pace_fingernails_grow/(print))

ESA, European Space Agency, "InSAR principles, guidelines for SAR interferometry processing and interpretation", 2007.

ESRI Chile, 2015. <http://www.esri.cl/fichaproductos.php?idProducto=62>

ESRI España, 2015. <http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>

ESRI Official Distributor, 2015. www.geosistec.com/productos_envi.html

H. Falk, P. Baxter, J. French, F. Gary, G. Stein, C. Health, J. Merchant, “Mount St. Helens volcano health report” no. 14, Department of Health and Human Services, Center for Disease Control, Atlanta, 1980.

E. García-Meléndez. Tesis Master: “Análisis Visual de Imágenes” Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua, Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, 2007.

Geografía de Chile, 2014. <http://www.saladehistoria.com/geo/Cont/C012.htm>

O. González-Ferrán, “Volcanes de Chile” Instituto Geográfico Militar de Chile, 1995.

GSP, GeoService Perú, 2016. http://gspperu.com/pdf/res_landsat7etm.pdf

GVP, Global Volcanism Program, Department of Mineral Sciences, National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, 2014.

<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357150#>

R. Hanssen. “Radar interferometry”. Data interpretation and error analysis. Radar interferometry. 2001.

A. Hopper, F. Prata y F. Sigmundsson “Remote Sensing of Volcanic Hazards and Their Precursors”. 2012.

C. Horwell y P. J. Baxter, “The respiratory health hazards of volcanic ash: A review for volcanic risk mitigation”, Bull. Volcanol., 69, pp. 1–24, 2006.

IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica CIAF, grupo de percepción remota y aplicaciones geográficas, Titulo: Interpretación visual de imágenes satelitales, Bogotá 2009.

INE, Instituto Nacional de Estadística de Chile, Síntesis Geográfica de la Región de Los Ríos. 2007. http://www.inelosrios.cl/archivos/files/pdf/DPA/dpa_losrios.pdf

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, 2015.

http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf

B. Kampes, “Delft object-oriented radar interferometric software”. User’s manual and technical documentation, Delft University of Technology, Netherlands. 2005.

L. Lara, J. Naranjo y H. Moreno, “Rhyodacitic fissure eruption in southern Andes (Cordón Caulle; 40.5°S) after the 1960 (Mw:9.5) Chilean earthquake: a structural

interpretation,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 138, no. 1–2, pp. 127–138, Nov. 2004.

L. Lara, A. Lavenu, J. Cembrano y C. Rodríguez. Structural controls of volcanism in transversal chains: Resheared faults and neotectonics in the Cordón Caulle–Puyehue area (40.5°S), Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, p.4, 2006.

T. Lillesand, R. W. Kiefer, "Remote sensing and image interpretation" 3rd Edition. John Wiley. 1994.

E. Magnússon, M. Gudmundsson y B. Oddsson “Details of ice volcano interaction observed with airborne imaging radar during the 2010 Eyjafjalljökull eruption, 2012.

F. Maldonado, J. Santos, y V. Carvalho: “Land use dynamics in the semiarid region of Brazil (Quixabá-PE): Characterization by principal components analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v.23, no.23, pp.5005- 5013. Londres: Taylor & Francis, 2002.

F. Maldonado y R. Dos Santos. Metodología de detección de cambios utilizando técnicas de rotación radiométrica. Análisis XII Simposio Brasileiro de Sensores Remotos, Goiana, Brasil, abril. INPE. 2005.

D. Marchionni y F. Cavayas, “La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural. Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta* vol.39 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires jun. 2014

J. Más, Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, v.20, n.1, p.139-152, 1999.

D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, y T. Rabaute, “The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry,” *Nature*, vol. 364, no. 6433, pp. 138–142, Jul. 1993.

P. Mather. “Computer – Processing of Remotely-Sensed Image”. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York. 2004.

T. Miller y T. J. Casadevall, “Volcanic ash hazards to aviation”, *Encyclopedia of volcanoes*, edited by: Sigurdsson, H., Academic Press, San Diego, California, pp. 915–930, 2000.

NASA, National Aeronautics and Space Administration, 2015. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

ONEMI, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública “Informe técnico consolidado, Actividad volcánica, Complejo Puyehue – Cordón Caulle” 2011.

M. Pritchard y M. Simons, "A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes," *Nature*, vol. 418, no. 6894, pp. 167–171, Jul. 2002.

R. Rabus, M. Eineder, A. Roth, R. Bamler. "The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, no. 57, Elsevier, pp.241-262. 2003.

RADARSAT International, *Geology Handbook*. Richmond, British Columbia, Canadá, 1997.

R. Raney. Course notes (unpublished notes). Canada Centre for Remote Sensing. Ottawa, Ontario. Canadá, 1992.

C. Rebelo. Tesis Mestrado: "Aplicação do insar na geração de modelos digitais do terreno" Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática (geodesia), 2007.

REDIAM, Red de Información Ambiental de Andalucía, 2015. <https://comunidadrediam.wordpress.com/2014/09/18/teledeteccion-fundamentos-basicos/>

O. Riaño. Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa. *Colombia Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. vol:7 no.15 pp.41-62, 2002.

J. Richards. "Remote sensing with imaging radar". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

A. Robock, "Volcanic eruptions and climate", *Rev. Geophys.*, 38(2), pp. 191–219, 2000.

P. Rosen, S. Hensley, I. Joughin, F. Li. S. Madsen, E. Rodriguez, y R. Goldstein "Synthetic aperture radar interferometry" 2000.

C. Sanz, Tesis Doctoral: "Razonamiento evidencial dinámico , un método de clasificación aplicado al análisis de imágenes hiperespectrales" Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de La Plata, Argentina. 2002.

J. Seaman, S. Leivesley, C. Hogg, "Epidemiología de desastres naturales", apéndice erupciones volcánicas. 1984.

SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Vulcanología de Chile, 2014. <http://www.sernageomin.cl/volcan.php?iId=38>

F. Sigmundsson, S. Hreinsdóttir, A. Hooper, T. Árnadóttir, R. Pedersen, M. J. Roberts, N. Óskarsson, A. Auriac, J. Deciem P. Einarsson, H. Geirsson, M. Hensch, B. G. Ófeigsson, E. Sturkell, H. Sveinbjörnsson, y K. Feigl, "Intrusion triggering of the 2010 Eyjafjallajökull explosive eruption," *Nature*, vol. 468, no. 7322, pp. 426–430, Nov. 2010.

B. Singer, B. Jicha, M. Harper, J. Naranjo, L. Lara, y H. Moreno-Roa, “Eruptive history, geochronology, and magmatic evolution of the Puyehue-Cordon Caulle volcanic complex, Chile,” *Geological Society of America Bulletin*, vol. 120, no. 5–6, pp. 599–618, Apr. 2008.

A. Sosnovsky y V. Kobernichenko, “Algorithm of Interferometric Coherence Estimation for Synthetic Aperture Radar Image Pair”, 2015.

D. Torlai, Tesis de Laurea: “Applicazioni di Interferometria Radar da Satellite per la Generazione di Mappe di Spostamento nell’analisi di Fenomeni Dinamici” año academico 2008/2009.

F. Ulaby y C. Elachi, “Radar polarimetry for geoscience applications”, Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts. p. 365 (ed.). 1990.

UN, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator. Disaster prevention and mitigation: a compendium of current knowledge, vol. 1: Volcanological aspects, New York, 1977.

O. Viedma, J. Salas y E. Chuvieco “ Evaluación de daños causados por el incendio de Buriol (Valencia) con imágenes TM. En: V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Las Palmas de Gran Canaria, 1993.

Cartografías elaboradas en este estudio para el análisis de erupciones volcánicas

A.1 Listado de cartografías elaboradas

Cartografía elaborada /imagen satelital procesada	Número de figura en documento
Mapa ubicación volcán Puyehue	Figura: 1.2
Mapa volcán Puyehue, Cordón Caulle	Figura: 1.3
Imagen SLC	Figura: 3.2
Imagen “Multilooking”	Figura: 3.3
Imagen interferograma (Base)	Figura: 3.4
Imagen interferograma aplanado “Flattening”	Figura: 3.5
Interferograma filtrado “Flattened”	Figura: 3.6
Imagen de coherencia	Figura: 3.7
Imagen desenrollado de la fase “Unwrapping”	Figura: 3.9
Imagen de deformación	Figura: 3.10
Mapa interferograma imágenes ENVISAT abril y mayo de 2011	Figura: 4.1 letra (a)
Mapa de deformación imágenes ENVISAT abril y mayo de 2011	Figura: 4.1 letra (b)
Mapa interferograma imágenes ENVISAT mayo y junio de 2011	Figura: 4.2 letra (a)
Mapa de deformación imágenes ENVISAT mayo y junio de 2011	Figura: 4.2 letra (b)
Mapa interferograma imágenes ENVISAT junio y julio de 2011	Figura: 4.3 letra (a)
Mapa de deformación imágenes ENVISAT junio y julio de 2011	Figura: 4.3 letra (b)
Mapa interferograma imágenes ENVISAT octubre y diciembre de 2011	Figura: 4.4 letra (a)
Mapa de deformación ENVISAT octubre y diciembre 2011	Figura: 4.4 letra (b)
Mapas imágenes ENVISAT pre y post erupción.	Figura: 4.5 (a) fecha 08/05/2011 (b) fecha 07/06/2011 (c) fecha 07/07/2011 (d) fecha 04/12/2011
Mapa imagen Google Earth 25/02/2015	Figura: 4.5 letra (e)
Mapa imagen Google Earth de base y coberturas de detección de cambios de diferentes periodos.	Figura: 4.5 letra (f)

Cartografía elaborada /imagen satelital procesada	Número de figura en documento
Mapa imágenes COSMO-SkyMed - sector “nuevo cráter”	Figura: 4.6 (a) fecha 19/06/2011 (b) fecha 26/06/2011
Mapa detección de cambios imágenes COSMO-SkyMed (19/06/2011 y 26/06/2011) - sector “nuevo cráter”	Figura: 4.6 letra (c)
Mapa imagen óptica de referencia Google Earth 26/02/2015 - sector “nuevo cráter”	Figura: 4.6 letra (d)
Mapa imágenes COSMO-SkyMed - sector “Lago Huishue”	Figura: 4.7 (c) fecha 19/06/2011 (d) fecha 26/06/2011
Mapa detección de cambios imágenes COSMO-SkyMed (19/06/2011 y 26/06/2011) - sector “Lago Huishue”	Figura: 4.7 letra (c)
Mapa imagen óptica de referencia Google Earth 26/02/2015 - sector “Lago Huishue”	Figura: 4.7 letra (d)
Mapa imágenes COSMO-SkyMed - sector “Lago Constancia”	Figura: 4.8 (e) fecha 19/06/2011 (f) fecha 26/06/2011
Mapa detección de cambios imágenes COSMO-SkyMed (19/06/2011 y 26/06/2011) - sector “Lago Constancia”	Figura: 4.8 letra (c)
Mapa imagen óptica de referencia Google Earth 26/02/2015 - sector “Lago Constancia”	Figura: 4.8 letra (d)
Mapa imagen MODIS, sensor Terra fecha: 06/06/2011 hora: 02:23 UTM.	Figura: 4.9 letra (a)
Mapa imagen MODIS, sensor Terra fecha: 07/06/2011 hora: 14:25 UTM.	Figura: 4.9 letra (b)

Tabla A.1: listado de cartografías elaboradas.

A.2 Descripción de modo general los principales procedimientos desarrollados para la elaboración de las cartografías.

Todas las imágenes utilizadas tanto ópticas como de radar SAR (radar de apertura sintética), para la obtención de las cartografías en la presente tesis fueron procesadas con el software ENVI, desde su visualización hasta los respectivos procesamientos, mencionados en detalle en el capítulo número 3 del presente informe. Particularmente para la obtención de los interferogramas, fue utilizado el módulo de SARscape de ENVI, el cual permitió trabajar con imágenes SAR.

Algunos de los procesos principales realizados para la obtención de los interferogramas y mapas de deformación del terreno en las imágenes ENVISAT (SAR) fueron: corrección, multilooking, filtrado espectral, combinación de la imagen y obtención del interferograma. Al obtener los resultados finales, en la tabla de colores de ENVI fue necesario seleccionar minuciosamente la combinación de colores que permitiera representar adecuadamente los saltos de fase en el interferograma (2π), y la degradación de colores donde fueron representados deformaciones del terreno, zonas con deflación y otras zonas elevadas productos de la erupción, características que debían ser bien identificadas para realizar un análisis visual del proceso eruptivo.

Para el proceso de detección de cambios en las imágenes de radar (SAR), fue el multilooking y corrección de las imágenes COSMO-SkyMed, para posteriormente realizar una ecuación (sustracción) para detectar los cambios entre las dos fechas analizadas. De los resultados obtenidos se determinó representar en dos colores los cambios registrados producto de la erupción volcánica, manifestándose en dos principales variables los cambios, por caída de cenizas y emanación de lava. En color rojo se identificó y representó la ausencia de zonas con cenizas que en la primera imagen habían estado cubiertas y en color azul nuevas zonas cubiertas por cenizas que en la primera imagen no lo estaban. En relación a la emanación de lava el color azul también representa nuevas zonas cubiertas por el avance de esta.

Posteriormente los interferogramas, imágenes de deformación del terreno, imágenes de detección de cambios georreferenciadas, fueron exportados en formato Geotiff, para ser trabajadas en la determinación y cuantificación de áreas cubiertas por el avance de la lava en diferentes fechas y en la elaboración de la cartografía en el software de Sistema de Información Geográfica ArcGis, el cual corresponde a uno de los sistemas que además de tener un gran potencial en la edición, análisis y procesamiento de bases de datos asociadas a elementos vectoriales, otro de sus fortalezas es la variedad de herramientas para el diseño y elaboración de cartografías.

En el programa ArcGis, y teniendo diferentes imágenes georreferenciadas de diferentes fechas, fue posible identificar visualmente el avance de la lava, por lo cual se crearon diferentes polígonos con la delimitación del área cubierta por ésta en imágenes ENVISAT de julio y diciembre de 2011, y en imagen óptica de google earth de febrero de 2015, logrando en el mismo programa calcular los metros cuadrados en los diferentes tiempos.

Finalmente, toda la elaboración cartográfica, diseño e incorporación de elementos como sistemas de referencias de coordenadas cartográficas, escala gráfica, simbología, norte, entre otros, se trabajó en ArcGis, obteniendo la opción de exportar los productos en diferentes formatos como jpeg, png, gif, tiff, entre otros. Considerando que los productos cartográficos fueron ajustados al formato de este informe, por lo cual cambiaron de tamaño, se optó por privilegiar e indicar en todas las cartografías la escala gráfica versus la escala numérica, debido que esta última con los cambios de tamaño realizados no mantenía la relación que existe entre el valor que el mapa está representando y el valor de la realidad de manera numérica.