

**APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA  
SINTÉTICA (DInSAR) SOBRE LA SUPERFICIE DEL VOLCÁN GALERAS ENTRE  
LOS AÑOS 2017 Y 2019, Y DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHILES – CERRO NEGRO  
DE MAYASQUER ENTRE LOS AÑOS 2019 Y 2020, EN EL DEPARTAMENTO DE  
NARIÑO (SUROCCIDENTE DE COLOMBIA), A PARTIR DE IMÁGENES  
SATELITALES SENTINEL-1.**

Trabajo de Grado del Estudiante

**Daniel García Blanco**

Directores del Proyecto de Investigación

**Serena Sarah Weber**

**Francisco Luis Hernández Torres**

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría En Teledetección

Manizales – Caldas

2021

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de grado a mi abuelita Ofelia Uribe Jaramillo y a mi abuelito Benjamín  
Blanco Chinchilla, los extraño.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a DIOS, en quién yo creo, me cuida y ayuda en la vida.

Quiero agradecer a la persona más importante de mi vida quien es mi mamá María del Pilar Blanco Uribe, ella ha estado en todo momento apoyándome y guiándome para crecer como ser persona, siempre ha estado conmigo, en los momentos buenos y malos para protegerme y enseñarme.

Agradezco a la Universidad Católica de Manizales, a sus directivas y directivos por permitirme estudiar en la Maestría en Teledetección, en tan maravillosa y vanguardista institución.

Le doy gracias a todos los profesionales que dirigen y enseñan en la Maestría en Teledetección, dando especial énfasis a la directora Serena Sarah Weber quien además es mi tutora del trabajo de investigación, ella me ha acompañado y ayudado en este camino desde el primer momento, además me ha aportado no sólo conocimiento sino también calidez humana. También agradezco al profesor Profesor Francisco Luis Hernández Torres quien es mi cotutor en el trabajo de investigación y me introdujo al maravilloso mundo del radar, él también me ha brindado su amabilidad y optimismo.

Por supuesto agradezco al profesor Alexander de Jesús Parra Uzcategui quien me introdujo al mundo de la Teledetección y me brindó excelente clases, al profesor Óscar Cardona Morales por sus indicaciones en las formulaciones de proyectos, a la profesora Glora Yaneth Flórez Yepes por sus aportes en el desarrollo de metodologías, al profesor Alexander Ariza quien me brindó muchas herramientas de exploración en el mundo de la Teledetección, y también a los demás profesores, el profesor Steven Bayer, el profesor Alberto Boada Rodríguez, el profesor Pedro Karín Serrato Álvarez, el profesor Salomón Einstein Ramírez Fernández y el profesor José Vélez Hernández.

También quiero agradecer a las instituciones y personas que externamente me han apoyado en la investigación, como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), institución la cual me brindó datos externos GNSS que utilicé para este trabajo, y hago mención especial a sus profesionales la Maestra en Geofísica Lourdes Narváz Medina y el Físico Darío Fernando Arcos del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP), quienes además de brindarme los datos, me hicieron acompañamiento y me dieron aportes muy importantes para este estudio.

Agradezco a la Agencia Espacial Europea, que con ayuda de su patrocinio por medio de NoR (Network of Resources) pude utilizar la aplicación temática como el SBAS Ground Motion Services del CNR-IREA en la plataforma Geohazards TEP de la organización Terradue, para generar mapas de velocidad de desplazamiento en línea de vista utilizando el algoritmo P-SBAS.

Le doy gracias a los profesionales en interferometría de radar el Profesor Mario Fernando Monterroso Tovar de Guatemala quien trabaja en el CNR-IREA (Italia) y el profesor Pablo Euillades de Argentina quien trabaja en la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina), ellos me dieron consejos significativos para la presente investigación.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros con quienes compartí gratas experiencias y espacios de aprendizaje que me ayudaron mucho, especialmente a Mario de Jesús Agudelo Cano y Héctor Ariel Perilla García con quienes tuve mayor cercanía.

## Resumen

El presente estudio tiene como finalidad aplicar Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) utilizando la técnica y metodología del software SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA) a través de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de los satélites Sentinel-1 cuyo sensor trabaja en la banda C del microondas a una frecuencia aproximada de 5,25 a 5,57 GHz, para el monitoreo del desplazamiento de la superficie del volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019, y de los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer entre julio de 2019 y diciembre de 2020, localizados en el departamento de Nariño (suroccidente de Colombia).

Los productos generados fueron interferogramas diferenciales, mapas de desplazamiento en Línea de Vista (LOS) y mapas de coherencia; siendo los resultados obtenidos por los mapas de desplazamiento (LOS) comparados con datos de desplazamiento vertical de las estaciones del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) permanentes ubicadas en esos volcanes y con información DInSAR de mapas de velocidad de desplazamiento procesados con el algoritmo P-SBAS en la plataforma Geohazards TEP.

Se determinó que los datos de los mapas de desplazamiento (LOS) procesados en SNAP muestran un comportamiento de subsidencia o hundimiento tanto para el volcán Galeras como para el complejo volcánico Chiles - Cerro Negro de Mayasquer, siendo el desplazamiento (LOS) promedio para el volcán Galeras de -117,5cm estimando su movimiento a una velocidad de -33,391cm/año, y para el caso del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro de Mayasquer el desplazamiento (LOS) promedio es de -28,9cm moviéndose a una velocidad estimada de -17,655cm/año, contrastando con los datos de desplazamiento vertical y velocidad de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS y los de los mapas de velocidad procesados con

el algoritmo P-SBAS en los cuales la velocidad de desplazamiento del volcán Galeras y de los volcanes Chiles – Cerro Negro según los datos GNSS son  $-0,281\text{cm/año}$  y  $1,174\text{cm/año}$  respectivamente; y la velocidad de desplazamiento (LOS) adquirida con P-SBAS para el volcán Galeras es entre 0 a  $-2,1742\text{cm/año}$  y para los volcanes Chiles – Cerro Negro entre 0 a  $2,2315\text{cm/año}$ , esos resultados evidencian desplazamientos muy leves, indicando relativa estabilidad en las superficies de esos volcanes, además que ambas fuentes de información coinciden en el comportamiento del movimiento en el cual el Galeras presenta poca subsidencia y los volcanes Chiles – Cerro Negro poco levantamiento.

Esa distorsión y exageración de los resultados de los mapas de desplazamiento (LOS) procesados en SNAP está relacionada con los valores promedio de los mapas de coherencia; dichos valores son de medios a bajos y no superan el 68,3% de correlación, indicando que no hay una alta confiabilidad en los datos, y que hay factores externos que influyen en esa situación.

Con ayuda de los mapas de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los mapas de coherencia se descartó la variable de la vegetación como posible causante de dicha distorsión de los datos, debido a que en las zonas con menor o prácticamente nada de vegetación la coherencia sigue sin ser lo suficientemente alta para garantizar una buena correlación.

Sin embargo, se identificó que el factor que más influye en este problema de distorsión de los datos está relacionado a las condiciones atmosféricas de las zonas de estudio, ese factor es la humedad relativa la cual supera el 80% para ambas regiones, un alto porcentaje de esa variable produce alteraciones en los datos de los interferogramas y a su vez en los resultados de los mapas de desplazamiento generados en el programa SNAP.

**Palabras claves:** Volcanes, monitoreo, SAR, DInSAR, Sentinel-1, SNAP, desplazamiento, coherencia, NDVI, GNSS, vegetación, atmósfera, humedad relativa.

## Abstract

The current study has as goal apply Synthetic Aperture Radar Differential Interferometry (DInSAR) using the technique and methodology of software SNAP of European Space Agency (ESA) through Synthetic Aperture Radar (SAR) images of Sentinel-1 satellites of which sensor works in the band C of microwaves in an approximate frequency of 5,25 to 5,57 GHz, to monitoring the surface displacement of Galeras volcano between January of 2017 and December of 2019, and Chiles – Cerro Negro de Mayasquer volcanoes between July of 2019 and December of 2020, located in the department of Nariño (southwest of Colombia).

The products generated were differential interferograms, displacement maps in Line Of Sight (LOS) and coherence maps, being the results of (LOS) displacement maps compared with vertical displacement data of Global Navigation Satellite System (GNSS) stations located in those volcanoes and with the DInSAR information of displacement velocity maps generated by P-SBAS in Geohazards TEP platform.

It was identified that (LOS) displacement maps data show a behavior of subsidence for Galeras volcano and Chiles – Cerro Negro de Mayasquer volcanic complex, being the average (LOS) displacement for Galeras volcano of -117,5cm estimating it's movement in a velocity of -33,391cm/year, and for Chiles – Cerro Negro de Mayasquer complex the average (LOS) displacement is -28,9cm with an estimated velocity of -17,655cm/year, contrasting with vertical displacement data of GNSS stations and P-SBAS algorithm, which displacement velocity of Galeras and Chiles – Cerro Negro according to GNSS data are -0,281cm/year and 1,174cm/year respectively; and (LOS) velocity displacement acquired with P-SBAS for Galeras is between 0 to -2,1742cm/year and for Chiles – Cerro Negro between 0 to 2,2315cm/year, those results show very low displacements, indicating relative stability in the surfaces of those volcanoes, besides

that both information sources coincide in the behavior of the movement which in Galeras there is little subsidence and in Chiles – Cerro Negro there is little lifting.

That distortion and exaggeration of the results of the displacement processed in SNAP is related with average values of the coherence maps, those values are from middle to low and they don't exceed the 68,3% of correlation, indicating that there is no high reliability in the data, and that there are external factors that influence in that situation.

With help of the analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps and coherence maps it was discarded the variable of vegetation as possible cause of that data distortion, due to in the zones with less or practically no vegetation the coherence still not be enough high to guarantee a good correlation.

However, it was identified that the main factor that influences more that problem of data distortion is related to atmospheric conditions in the study zones, that factor is the relative humidity that exceeds the 80% for both regions, a high percentage of that variable produces alterations in the interferograms data and at the same time in the final results of the displacement maps processed in SNAP program.

**Key words:** Volcanoes, monitoring, SAR, DInSAR, Sentinel-1, SNAP, displacement, coherence, NDVI, GNSS, vegetation, atmosphere, relative humidity.

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	15
1.1. Planteamiento del problema.....	16
1.2. Pregunta de investigación .....	20
1.3. Justificación .....	21
1.4. Política pública.....	22
1. Objetivos.....	23
2.1. Objetivo General .....	23
2.2. Objetivos Específicos .....	23
3. Marco teórico.....	24
3.1. La Teledetección .....	24
3.2. Sensores pasivos.....	26
3.2.1. Información espectral de los sensores pasivos .....	27
3.2.2. Sensor MSI (Sentinel-2).....	32
3.2.3. Sensor TROPOMI (Sentinel-5P) .....	34
3.3. Sensores activos (Radar) .....	35
3.3.1. Región de las Microondas .....	35
3.3.2. Retrodispersión (Backscattering).....	37
3.3.3. Polarización en los sistemas Radar .....	39
3.3.4. Geometría del sistema Radar .....	40
3.3.5. Radar de Apertura Sintética (SAR).....	42
3.3.6. Técnica InSAR.....	45
3.3.7. Técnicas DInSAR .....	50
3.3.7.1. Técnica SBAS .....	51
3.3.7.2. Algoritmo P-SBAS .....	52
3.3.8 Influencia de la atmósfera en los datos SAR.....	54
3.3.9. Satelites Sentinel-1.....	56
3.3.9.1. Instrumento CSAR .....	56
3.3.9.2. Modo Operacional IW .....	57
3.3.9.3 Algunos estudios DInSAR en Sentinel-1.....	58
4. Metodología.....	60
4.1. Zonas de estudio.....	60
4.2. Imágenes satelitales y softwares de procesamiento.....	65
4.3. Fase InSAR .....	69
4.4. Fase DInSAR .....	73
4.5. Análisis de la Información .....	81
4.5.1. Construcción de series de tiempo de los mapas de desplazamiento en línea de vista (LOS) .....	81



4.5.2. Análisis entre los mapas NDVI y los mapas de Coherencia .....	85
4.5.3. Análisis de la información atmosférica.....	94
4.5.4. Información del desplazamiento en línea de vista (LOS) promedio y la velocidad de desplazamiento....	98
5. Resultados.....	99
5.1. Resultados de las gráficas de series de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS).....	99
5.2. Resultados del análisis de los mapas NDVI y de los mapas de Coherencia.....	106
5.3. Resultados información atmosférica de las zonas de estudio .....	111
5.4. Resultados de la velocidad de desplazamiento de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer .....	118
6. Discusión .....	128
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	131
8. Referencias Bibliográficas.....	135
9. Anexos.....	141

## Listado de Figuras

<i>Figura 1.</i> Diagrama del espectro electromagnético. Adaptado de Chuvieco, 2015.....	24
<i>Figura 2.</i> Representación gráfica de los sensores remotos pasivos y activos. Adaptado de Parra, 2014. ....	25
<i>Figura 3.</i> Representación gráfica del explorador de barrido y del explorador de empuje. Adaptado de Jensen, 2015 y Parra, 2014.....	26
<i>Figura 4.</i> Representación gráfica de cómo se transmite la radiancia. Adaptado de Jensen, 2015. ....	28
<i>Figura 5.</i> Comportamiento de firmas espectrales. Adaptado de Chuvieco, 2015.....	30
<i>Figura 6.</i> Imagen NDVI del volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer (B). Fuente propia.....	31
<i>Figura 7.</i> Representación gráfica de uno de los satélites de la constelación Sentinel-2. Tomado de ESA, 2020.....	32
<i>Figura 8.</i> Bandas del sensor MSI de los satélites Sentinel-2. Adaptado de ESA ,2020. ....	33
<i>Figura 9.</i> Representación gráfica del satélite Sentinel-5P. Tomado de ESA, 2015.....	34
<i>Figura 10.</i> Esquema del comportamiento de retrodispersión de las ondas microondas en un sistema Radar. Adaptado de Chuvieco, 2015. ....	38
<i>Figura 11.</i> Tipos de polarizaciones en los sistemas Radar. Adaptado de Chuvieco, 2015.....	40
<i>Figura 12.</i> Esquema en 3 dimensiones de la geometría del sistema Radar. Adaptado de CCRS, 2015 y Meyer, 2019.....	42
<i>Figura 13.</i> Esquema en 3 dimensiones de la geometría del sistema Radar SAR. Adaptado de Meyer, 2019. ....	44
<i>Figura 14.</i> Imágenes SAR Sentinel-1 de los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer. Fuente propia.....	44
<i>Figura 15.</i> Imagen SAR Sentinel-1 del volcán Galeras y la ciudad de Pasto (A), y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B) con efecto speckle. Fuente propia.....	45
<i>Figura 16.</i> Representación gráfica de la Fase en radar. Adaptado de Ferretti et al. (2007).....	46
<i>Figura 17.</i> Esquema en 3 dimensiones del sistema InSAR. Adaptado de Ferretti et al. (2007).....	47

<i>Figura 18.</i> Interferograma con sus franjas en el volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B). Fuente propia. ....	49
<i>Figura 19.</i> Mapas de coherencia del volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B). Fuente propia. ....	50
<i>Figura 20.</i> Manejo de la técnica SBAS. Adaptado de Rosell et al. (2019). ....	52
<i>Figura 21.</i> Flujo diagrama del procesamiento P-SBAS. Tomado de De Luca et al. (2015). ....	53
<i>Figura 22.</i> Gráficas de series de tiempo de la deformación, sin utilizar el modelo GACOS (A) y después de utilizar el modelo GACOS (B) computadas en el estudio de Rosell et al. (2019). Imágenes tomadas de Rosell et al. (2019). ....	55
<i>Figura 23.</i> Representación gráfica de uno de los satélites de la constelación Sentinel-1. Tomado de ESA, 2012. ....	56
<i>Figura 24.</i> Representación gráfica de la adquisición TOPSAR Sub-Swath. Adaptado de ESA, 2020. ....	57
<i>Figura 25.</i> Productos SAR SLC en formato IW. Tomado de ESA, 2020. ....	58
<i>Figura 26.</i> Mapas de localización de las zonas de estudio. Elaborado por Sarah Weber, 2021. ....	60
<i>Figura 27.</i> Imagen óptica del volcán Galeras del 6 de febrero de 2020 obtenida del satélite Sentinel-2 en color natural, se puede apreciar en el centro de la imagen el cráter del volcán y al este se encuentra la ciudad de San Juan de Pasto. Fuente propia. ....	62
<i>Figura 28.</i> Imagen óptica del volcán Galeras obtenida del satélite Sentinel-2 en falso color. Fuente propia. ....	62
<i>Figura 29.</i> Imagen óptica de los volcanes Chiles y Cerro-Negro del 11 de febrero de 2020 obtenida del satélite Sentinel-2 en color natural, se puede apreciar en el centro de la imagen el cráter del Chiles y al oeste el cráter del volcán Cerro-Negro. Fuente propia. ....	64
<i>Figura 30.</i> Imagen óptica de los volcanes Chiles y Cerro Negro obtenida del satélite Sentinel-2 en falso color. Fuente propia. ....	64
<i>Figura 31.</i> Gráficas de la línea base perpendicular de las imágenes SAR utilizadas para generar los interferogramas del volcán Galeras (A), y del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro (B). Fuente propia. ....	66
<i>Figura 32.</i> Flujograma de la fase InSAR. Elaboración propia. ....	69
<i>Figura 33.</i> Secciones de imágenes SAR en producto SLC de la imagen maestra (A) del 2 de junio de 2018, y de la imagen esclava (B) del 20 de julio de 2018, está comprendida por dos burst y una IW. Fuente propia. ....	70
<i>Figura 34.</i> Secciones de las imágenes maestra (A) y esclava (B), después de utilizar el <b>Apply Orbit File</b> . Fuente propia. ....	70
<i>Figura 35.</i> Imagen corregistrada (stack) con la herramienta <b>Back Geocoding</b> de los archivos del 2 de junio y 20 de julio de 2018, visualizada en canales RGB. Fuente propia. ....	71
<i>Figura 36.</i> Imagen con el corregistro mejorado gracias a la herramienta <b>Enhanced Spectral Diversity</b> de los archivos del 2 de junio y 20 de julio de 2018, visualizada en canales RGB. Fuente propia. ....	71
<i>Figura 37.</i> Interferograma generado con la herramienta Interferogram Formation. Fuente propia. ....	72
Interferograma sin la línea que separa los burst, la línea fue removida con la herramienta <b>TOPS Deburst</b> . Fuente propia. ....	72
<i>Figura 39.</i> Flujograma para la fase DInSAR. Elaboración propia. ....	73
<i>Figura 40.</i> Interferograma diferencial generado a partir de la herramienta <b>Topographic Phase Removal</b> , recortado para la zona de estudio utilizando la herramienta <b>Subset</b> . Fuente propia. ....	74
<i>Figura 41.</i> Interferograma diferencial con disminución del ruido de la imagen utilizando la herramienta <b>Multilooking</b> . Fuente propia. ....	75

<i>Figura 42.</i> Interferograma diferencial con la fase filtrada, utilizando la herramienta <i>Goldstein Phase Filtering</i> . Fuente propia.....	75
<i>Figura 43.</i> Interferograma desenrollado utilizando la herramienta <i>Snaphu</i> . Fuente propia.....	76
<i>Figura 44.</i> Imagen del mapa de desplazamiento (LOS), la cual se generó a partir del interferograma desenrollado utilizando la herramienta <i>Phase To Displacement</i> . Fuente propia.....	77
<i>Figura 45.</i> Interferograma diferencial enrollado (A), interferograma diferencial desenrollado (B), mapa de desplazamiento (C), mapa de coherencia (D) del volcán Galeras, con corrección geométrica utilizando la herramienta <i>Range-Doppler Terrain Correction</i> . Fuente propia.....	78
<i>Figura 46.</i> Mosaico de 5 imágenes que muestran la región del Galeras por medio de la plataforma Google Earth: Visualización satelital del volcán Galeras en el centro y en el este la ciudad de Pasto (A), interferograma diferencial enrollado (B), interferograma diferencial desenrollado (C), el mapa de desplazamientos (D), y el mapa de coherencia (E). Fuente propia.....	79
<i>Figura 47.</i> Mosaico de 5 imágenes que muestran la región del Chiles-Cerro Negro por medio de la plataforma Google Earth: Visualización satelital de los volcanes Chiles – Cerro Negro (A), interferograma diferencial enrollado (B), interferograma diferencial desenrollado (C), el mapa de desplazamientos (D), y el mapa de coherencia (E). Fuente propia.....	80
<i>Figura 48.</i> Flujograma para el análisis de la información. Elaboración propia.....	81
<i>Figura 49.</i> Mapa de desplazamiento (LOS) y estaciones GNSS del volcán Galeras. Fuente propia.....	82
<i>Figura 50.</i> Mapa de desplazamiento (LOS) y estación GNSS El Morro de los volcanes Chiles – Cerro Negro. Fuente propia.....	83
<i>Figura 51.</i> Visualización del código de color RGB y valor de desplazamiento en línea de vista (LOS) para la estación Cráter del volcán Galeras entre el 25 de agosto al 18 de septiembre de 2018. Fuente propia.....	84
<i>Figura 52.</i> Mapa de índice NDVI del volcán Galeras. Fuente propia.....	86
<i>Figura 53.</i> Mapa de índice NDVI de los volcanes Chiles – Cerro Negro. Fuente propia.....	87
<i>Figura 54.</i> Valor de índice NDVI para una de las estaciones GNSS. Fuente propia.....	88
<i>Figura 55.</i> Mapas NDVI (A, C, E) y mapas de coherencia (B, D, F) de los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro respectivamente, con los puntos de control. Fuente propia.....	90
<i>Figura 56.</i> Mapa de coherencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer. Fuente propia.....	92
<i>Figura 57.</i> Visualización del código de color RGB y valor de coherencia para la estación El Morro del volcán Chiles entre el 03 de julio al 08 de agosto de 2019. Fuente propia.....	93
<i>Figura 58.</i> Imágenes ópticas Sentinel-2 de la zona de Galeras, diciembre 18 de 2017 (A), junio 11 de 2018 (B), enero 2 de 2019 (C), y diciembre 28 de 2019 (D). Fuente propia.....	95
<i>Figura 59.</i> Imágenes Sentinel-2 de la zona de Chiles - Cerro Negro, julio 6 de 2019 (A), diciembre 3 de 2019 (B), febrero 6 de 2020 (C), y diciembre 22 de 2020 (D). Fuente propia.....	96
<i>Figura 60.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cráter entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,201m. Fuente propia.....	100
<i>Figura 61.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cóndor - Pasto entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,213m. Fuente propia.....	101
<i>Figura 62.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Peladitos entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,026m. Fuente propia.....	101
<i>Figura 63.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Barranco entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,160m. Fuente propia.....	102

<i>Figura 64.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cufiño entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,177m. Fuente propia.....	102
<i>Figura 65.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cobanegra entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,170m. Fuente propia....	103
<i>Figura 66.</i> Gráfica de serie de tiempo de la deformación para el volcán Galeras en la estación GNSS Cóndor entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,247m. Fuente propia.....	103
<i>Figura 67.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Chiguaco entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,209m. Fuente propia....	104
<i>Figura 68.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Mapachicho entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,217m. Fuente propia....	104
<i>Figura 69.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS San Cayetano entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,135m. Fuente propia....	105
<i>Figura 70.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Nariño entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,139m. Fuente propia.....	105
<i>Figura 71.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Chiles en la estación GNSS El Morro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,286m. Fuente propia.....	106
<i>Figura 72.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto de control Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,206m. Fuente propia.....	110
<i>Figura 73.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto de control Chiles entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,326m. Fuente propia.....	110
<i>Figura 74.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto control Cerro Negro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,254m. Fuente propia.....	111
<i>Figura 75.</i> Serie de tiempo de la fracción de nubosidad diaria del volcán Galeras entre agosto de 2018 y diciembre de 2019. Fuente propia.....	112
<i>Figura 76.</i> Serie de tiempo de la fracción de nubosidad diaria del volcán Galeras entre agosto de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.....	112
<i>Figura 77.</i> Serie de tiempo de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. Fuente propia.....	113
<i>Figura 78.</i> Serie de tiempo de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.....	114
<i>Figura 79.</i> Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre el 1 de junio de 2018 hasta 8 de junio de 2018. Fuente propia.....	115
<i>Figura 80.</i> Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro entre el 1 de marzo de 2020 hasta el 8 de marzo de 2020. Fuente propia.....	115
<i>Figura 81.</i> Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre marzo de 2017 y diciembre de 2019. Fuente propia.....	117
<i>Figura 82.</i> Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles y Cerro Negro entre agosto de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.....	117
<i>Figura 83.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) promedio para el volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,175m. Fuente propia.....	120
<i>Figura 84.</i> Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento (LOS) promedio para los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,289m. Fuente propia.....	120

<i>Figura 85</i> Gráficas de series de tiempo del desplazamiento vertical de las estaciones GNSS del SGC en los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro. Información brindada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).....	123
<i>Figura 86</i> Visualización en Google Earth del mapa de velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para el volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre del 2019 generado con el algoritmo P-SBAS. Fuente propia.....	125
<i>Figura 87.</i> Dato de velocidad de desplazamiento más negativo en el volcán Galeras a partir de la información P-SBAS. Fuente propia.....	125
<i>Figura 88.</i> Visualización en Google Earth del mapa velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para los volcanes Chiles y Cerro Negro entre enero de 2019 y diciembre del 2020 generado con el algoritmo P-SBAS. Fuente propia.....	126
<i>Figura 89.</i> Dato de velocidad de desplazamiento más positivo en los volcanes Chiles – Cerro Negro a partir de la información P-SBAS. Fuente propia.....	126

## **Listado de Tablas**

<i>Tabla 1.</i> Bandas de los sistemas Radar .....	36
<i>Tabla 2.</i> Datos específicos de las imágenes Sentinel-1 utilizadas para este estudio.....	66
<i>Tabla 3.</i> Datos geográficos de las estaciones GNSS del volcán Galeras.....	67
<i>Tabla 4.</i> Datos geográficos de la estación GNSS El Morro en el volcán Chiles.....	67
<i>Tabla 5.</i> Coordenadas de los puntos de control.....	89
<i>Tabla 6.</i> Datos NDVI de las estaciones GNSS del volcán Galeras .....	107
<i>Tabla 7.</i> Dato NDVI de la estación GNSS del volcán Chiles .....	107
<i>Tabla 8.</i> Datos NDVI de los puntos de control Galeras, Chiles y Cerro Negro.....	108
<i>Tabla 9.</i> Datos de coherencia promedio de las estaciones GNSS y los puntos de control.....	109
<i>Tabla 10.</i> Datos de fracción de nubosidad para las regiones de Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer...	113
<i>Tabla 11.</i> Datos de temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) promedio para las regiones de Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.....	114
<i>Tabla 12.</i> Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las muestras de tiempo de la región del Galeras.....	116
<i>Tabla 13.</i> Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las muestras de tiempo de la región de Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.....	116
<i>Tabla 14.</i> Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las regiones del Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.....	116
<i>Tabla 15.</i> Datos de desplazamiento acumulado en línea de vista (LOS) para cada una de las ubicaciones de las estaciones GNSS del volcán Galeras y para el punto de control Galeras.....	118
<i>Tabla 16.</i> Datos de desplazamiento acumulado en línea de vista (LOS) para la ubicación de la estación GNSS El Morro del volcán Chiles y para los puntos de control Chiles y Cerro Negro.....	119
<i>Tabla 17.</i> Datos de desplazamiento promedio en línea de vista (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro.....	119
<i>Tabla 18.</i> Velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro .....	120
<i>Tabla 19.</i> Datos de desplazamiento vertical acumulado de la estación GNSS del volcán Galeras.....	121

<i>Tabla 20. Dato del desplazamiento vertical acumulado de la estación GNSS del volcná Chiles.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 21. Datos de la velocidad de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS del volcán Galeras.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 22. Dato de la velocidad de desplazamiento vertical de la estación GNSS del volcán Chiles.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 23. Datos de las velocidades de desplazamiento vertical promedio para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro con base a los datos GNSS.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 24. Datos P-SBAS de velocidades de desplazamiento (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 25. Velocidades de desplazamiento para el volcán Galeras y los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.....</i>	<i>127</i>

## 1. Introducción

Los volcanes son una de las estructuras geológicas más llamativas y más fácilmente reconocibles, generalmente presentan una forma de cono o de escudo y son el conducto o conexión entre la superficie y una cámara magmática subterránea, estos se encuentran ubicados comúnmente en zonas de convergencia de placas tectónicas como en el caso de la zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Suramericana la cual originó la formación y levantamiento de la Cordillera de los Andes y su vulcanismo, aunque también pueden estar presentes en regiones intraplaca como en el caso de los volcanes de las islas de Hawái.

Además, los volcanes, especialmente los que se encuentran activos son muy peligrosos para poblaciones humanas ubicadas cerca de estos, debido a la gran cantidad de amenazas que pueden generar cuando hacen erupción, provocando colapsos de su estructura, lluvias piroclásticas, flujos piroclásticos, coladas de lava, expulsión de gases tóxicos, flujos de escombros, flujos de lahar y avalanchas, siendo muchas de ellas completamente mortales y destructivas.

Desde tiempos de la edad antigua se han registrado eventos que han perjudicado asentamientos humanos incluso llevándolos a su desaparición, tal es el caso más famoso de la antigüedad como la erupción del monte Vesubio (sur de Italia) en el año 79 d.C, sus flujos y lluvias piroclásticas desaparecieron y enterraron las ciudades de Pompeya y Herculano del Imperio Romano. También existen casos muy recientes e importantes tales como la erupción del volcán Krakatoa en Indonesia en 1883 el cual provocó un poderoso maremoto o tsunami que acabó con miles de vidas, o el caso de la erupción del Nevado del Ruiz en Colombia en 1985 que generó un flujo de lahar el cual destruyó el pueblo de Armero.

Por otra parte, a pesar de la gravedad de este tipo de amenazas naturales, por suerte, esta es de las más bajas en cantidad, solamente entre 1998 a 2017 la cantidad de desastres producidos por

actividad volcánica fueron 99 correspondiendo al 1,4% de los desastres naturales acontecidos en el mundo durante ese período de tiempo (CRED y UNISDR, 2018); aunque de todas maneras los organismos de vigilancia y prevención no se pueden descuidar porque aunque no sea un tipo de desastre muy recurrente puede ser muy destructivo.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Colombia es un país ubicado en el extremo noroccidental de Suramérica, por este país cruza la cordillera de los Andes, la cadena montañosa más larga y extensa del planeta. En Colombia esta cordillera se divide en tres ramificaciones, la cordillera occidental, la cordillera central y la cordillera oriental; además la cordillera de los Andes en Colombia se caracteriza por presentar los volcanes activos más septentrionales de Suramérica los cuales se formaron como producto de la subducción de la Placa tectónica de Nazca la cual avanza hacia el oriente por debajo de la Placa Suramericana, siendo algunos de esos volcanes el Nevado del Ruiz, el volcán Cerro bravo, el volcán Cerro Machín, el Nevado del Huila (ubicados en la zona centro-occidental de Colombia), y los volcanes Azufral, Cumbal, Galeras, Chiles – Cerro Negro de Mayasquer, entre otros, (ubicados en la región suroccidental de Colombia).

El volcán Galeras y el complejo volcánico Chiles – Cerro Negro de Mayasquer presentan una importante actividad sísmica, indicando que eventualmente en el tiempo puedan hacer erupción, cerca de ellos se encuentran asentamientos urbanos, para el caso del volcán Galeras, este se encuentra aproximadamente entre 9km al occidente de la ciudad de Pasto, capital del departamento de Nariño; para el caso de los volcanes Chiles – Cerro Negro, estos se encuentran alrededor de 22km al occidente de la ciudad de Tulcán (Ecuador) y alrededor de 30 km al occidente de la ciudad de Ipiales (Colombia).



Debido a lo anterior es crucial para la sociedad que, a través de gestiones y proyectos realizados por varias instituciones, no sólo a nivel local y regional sino también nacional, se monitoreen por todos los medios posibles este tipo de amenazas naturales como medidas de vigilancia y prevención, con el fin de alertar a las poblaciones más vulnerables, y por consiguiente ayudar en la preservación de su seguridad e integridad. Varios instrumentos y tecnologías se utilizan para esta labor, de las más conocidas son los inclinómetros, las redes GNSS, y sismógrafos; sin embargo, existe otro conjunto de herramientas tecnológicas brindadas por una ciencia relativamente reciente llamada teledetección o percepción remota, la cual es a la que se dará enfoque para el presente trabajo de investigación.

La teledetección es una ciencia de la geomática que consiste en la adquisición, preparación, procesamiento, análisis e interpretación de información de materiales y objetos que se encuentran de manera remota o a distancia, teniendo como enfoque principal aquellos materiales que se encuentran en la superficie terrestre pero también su campo de acción puede expandirse a objetos y materiales que se encuentren en el espacio exterior como asteroides, cometas, satélites naturales, otros planetas, nebulosas, estrellas o galaxias; la información adquirida como tal es energía electromagnética, esta se obtiene a través de unos instrumentos llamados sensores remotos los cuales son transportados por vía terrestre, por vía aérea en aviones o drones, y por vía satelital; estos instrumentos convierten la energía electromagnética a valores numéricos de bits, dicha información luego es enviada a estaciones terrestres donde inicialmente se encuentra muy cruda, por tal motivo en esas estaciones debe ser mejorada y preparada para estar a disposición de los profesionales de esa área de estudio quienes posteriormente la procesan, la analizan y la interpretan. Chuvieco (2015) menciona que la teledetección posee varias ventajas como por ejemplo obtener información de la cobertura global del planeta, tener una visión

sinóptica del terreno, la adquisición de datos de la superficie, la rápida transmisión de estos y que además pueden trabajarse de manera digital. También Martínez y Martín (2010) comentan sobre la importancia de la teledetección para la identificación, estudio y monitoreo de los fenómenos naturales tales como los huracanes, los volcanes, los terremotos, las inundaciones, los deslizamientos de tierra y otros. Además, una ventaja muy importante que tiene la teledetección es el aspecto económico ya que con esta se disminuyen los costos para realizar un estudio que normalmente necesitaría abordarse con una gran cantidad de equipos que requerirían mucho tiempo su funcionamiento implicando más gastos, facilitando de esa manera a las instituciones, centros académicos y de investigación la obtención de resultados precisos sin tener que preocuparse por las limitaciones económicas que se puedan tener.

Como se mencionó, los instrumentos más importantes en la teledetección son los sensores remotos, estos se dividen en pasivos y en activos, los pasivos son aquellos que requieren una fuente de energía externa, por ejemplo, el sol, para obtener datos de la superficie terrestre, mientras que los sensores activos no requieren de iluminación externa, sino que ellos generan su propia energía la cual envían hacia la superficie para que esta posteriormente sea retornada al sensor. Los sistemas de RADAR (Radio Detection and Ranging) son probablemente los sensores activos más utilizados en teledetección, estos trabajan en la región del espectro electromagnético de las microondas (MW) ( $\lambda=1\text{mm}-1\text{m}$ ), y como se mencionó anteriormente por ser sensores activos estos generan un pulso de energía en longitudes de onda de esa región del espectro electromagnético, que es enviado a la superficie el cual posteriormente retorna al sensor, la información retornada lo hace mediante la retrodispersión, y la información obtenida genera una imagen la cual mide la amplitud y la fase.

De los primeros sistemas de radar utilizados eran los sensores de Radar Aerotransportado de Visión Lateral o Side-Looking Airborne Radar (SLAR) (Meyer,2019); sin embargo, los datos obtenidos se podían distorsionar espacialmente a grandes alturas, debido a ello a los nuevos sensores de radar transportados por satélites se les introdujo el concepto de una antena virtual la cual mejoró considerablemente la calidad de los datos, los sensores que utilizan esa antena virtual o apertura sintética se les denominó como sistemas de Radar de Apertura Sintética o Synthetic Aperture Radar (SAR).

Gabriel et al. (1989) muestran que es posible que varias imágenes SAR detecten en áreas de gran tamaño pequeños cambios de elevación en un terreno, incluso menores a 1cm, gracias a una técnica llamada Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Esta es una capacidad de los sensores SAR que permite determinar las variaciones de fase entre dos señales retrodispersadas para una misma región de la superficie, con el fin de realizar mediciones precisas del desplazamiento que esta pudo experimentar.

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) a diferencia del InSAR, sólo tiene en cuenta el componente de desplazamiento y se aplica utilizando varios algoritmos como el PS-InSAR o Permanent Scatterer Interferometry, propuesta por Ferretti et al. (2001), y el Small Baseline Subset (SBAS) propuesto por Berardino et al. (2002), el primero consiste en utilizar una imagen maestra, la cual es la imagen inicial, para emparejarla con el resto de imágenes (imágenes esclavas) y generar entre ellas los interferogramas, las mediciones además se realizan en regiones estables de la superficie para que los datos de deformación sean confiables. El segundo algoritmo mencionado permite enlazar o emparejar imágenes SAR entre múltiples imágenes, no necesariamente utilizando una imagen maestra sino varias, con el fin de atenuar los efectos de grandes líneas base perpendiculares, es decir, la distancia entre las

proyecciones de la señal de los satélites cuando tomaron información de una misma zona; al realizar eso no sólo se atenúa el problema de la decorrelación, sino que además se pueden identificar y filtrar artefactos atmosféricos que afecten los interferogramas.

Existe también otra propuesta como la de Singleton et al. (2014) que proponen disminuir el problema de la vegetación con el algoritmo Sub-Pixel Offset Time-series Technique (SPOT-CR) el cual es aplicado específicamente en el monitoreo de movimientos en masa que se forman en pendientes con mucha vegetación.

Conociendo la importancia que tiene el DInSAR para el estudio de la deformación de los volcanes activos, el presente trabajo de investigación se realizó con imágenes SAR del satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del sensor CSAR el cual trabaja en la banda C de las microondas entre los 5,25 y 5,57 GHz. Las ventajas de utilizar imágenes Sentinel-1 son que estas se obtienen de manera gratuita y que además pueden ser procesadas en un software libre llamado SNAP creado también creado por la ESA, permitiendo de esta manera que la información se adquiera y se procese con mayor comodidad para los usuarios.

## **1.2. Pregunta de investigación**

Es fundamental que los estudios DInSAR sean una vía alternativa de conocimiento para la vigilancia o monitoreo de este tipo de estructuras geológicas con el fin de ayudar a complementar información obtenida por otros instrumentos más directos como los instrumentos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), a disminuir costos de proyectos; y a comprender desde otra perspectiva la dimensión de una amenaza volcánica para una población y con respecto a ello generar planes contingencia para preservar la vida de las personas.

Con base en lo anterior la información GNSS que en este caso fue brindada cordialmente por el Servicio Geológico Colombiano indica que los volcanes Galeras durante los últimos años ha presentado un desplazamiento muy leve con una tendencia a subsidencia y el complejo Chiles – Cerro Negro también presentan un desplazamiento poco significativo y con una tendencia a levantamiento, tal y como se podrá observar en el transcurso del documento en el capítulo de resultados y en la figura 85; es bueno resaltar eso ya que es importante para este trabajo que los datos DInSAR generados en SNAP tengan como referencia esa otra fuente de información; y por lo tanto, para el caso de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer se realiza la siguiente pregunta: ¿con las imágenes Sentinel-1 y la técnica DInSAR del programa SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA) se podrán tener resultados de interferometría que indiquen con precisión el comportamiento del desplazamiento en la superficie de esos volcanes, y si estos resultados estarán acorde con el comportamiento del desplazamiento vertical que presenten los datos de las estaciones GNSS localizados en dichos volcanes?

### **1.3. Justificación**

Colombia es un país con una cantidad considerable de volcanes activos, y algunos asentamientos urbanos están ubicados cerca de estos, debido a ello la seguridad de los ciudadanos es fundamental para las entidades del estado, y con ayuda de los avances científicos se pueden monitorear el movimiento de estos volcanes y así prevenir desastres relacionados con este tipo de amenazas naturales.

Por consiguiente, apoyarse en varias estrategias es fundamental para las instituciones y entidades pertinentes en el campo de la gestión de riesgo, porque se tienen más herramientas y estudios que ayuden a prevenir y mitigar este tipo de problemas que ya han demostrado ser muy

perjudiciales para la sociedad colombiana, como el caso de la erupción del Volcán Nevado del Ruíz que destruyó el pueblo de Armero.

Las técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética es una estrategia alternativa que puede aportar mucha información, esta permite medir cuanto ha sido desplazado un terreno de la superficie con valores de precisión en milímetros sin necesidad de tener contacto directo con esta, esta ha mostrado eficiencia no sólo en relación a fenómenos de actividad volcánica sino también para eventos relacionados como movimientos en masa, terremotos, y otros, haciéndola fundamental en los temas asociados en la zonificación de áreas de amenaza y proyectos de gestión del riesgo.

#### **1.4. Política pública**

La política pública a la que da respuesta este proyecto, está enfocada en el medio ambiente, y a la gestión de riesgos debido a la gran problemática económica y social que generan este de fenómenos. Por tal motivo se deben desarrollar estrategias que permitan monitorearlos o vigilarlos y prevenirlos.

Ante esto, el estado con su Plan Nacional de Desarrollo (2014-2018) estableció como reto y objetivo importante, el monitoreo y prevención de las amenazas naturales que afecten a la población civil, con la colaboración de instituciones académicas y científicas.

## 1. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

- Aplicar la técnica DInSAR del software SNAP sobre la superficie del volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019, y de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer entre julio de 2019 y diciembre de 2020 utilizando imágenes SAR Sentinel-1.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento del desplazamiento de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro a través de la información de los mapas de desplazamiento en línea de vista (LOS) generados en SNAP.
- Verificar el comportamiento del desplazamiento de los volcanes con los datos de las estaciones GNSS y los datos obtenidos por el algoritmo P-SBAS.
- Identificar si la vegetación presenta influencia en los resultados obtenidos por los mapas de desplazamiento en línea de vista (LOS).
- Conocer si las condiciones atmosféricas producen afectación en los resultados de los mapas de desplazamiento en línea de vista (LOS).

### 3. Marco teórico

#### 3.1. La Teledetección

Chuvieco (2015) nos introduce que la teledetección es una ciencia que tiene como objetivo obtener información de los objetos de manera indirecta a través de la energía electromagnética, esa información es capturada u obtenida por unos instrumentos llamados sensores los cuales son transportados por plataformas terrestres, aéreas o espaciales (satélites), la información obtenida es en general una imagen digital raster la cual se procesada y analizada.

La teledetección estudia los objetos por medio de la energía electromagnética, la cual se presenta en un espectro o rango de longitudes de onda muy pequeñas medidas en ángstrom ( $1 \times 10^{-10}$  m) hasta longitudes de onda muy largas medidas en metros. El espectro electromagnético se divide en varias regiones, siendo desde la de menor longitud de onda hasta la de mayor longitud de onda: la región de los rayos gamma, la región de los rayos x, la región del ultravioleta (UV), la región del espectro visible (la que puede ser percibida por el ojo humano), la región del infrarrojo, la región de las microondas (MW) y la región de las ondas de Ultra Alta Frecuencia (UHF) y de Muy Alta Frecuencia (VHF), como se observa en la figura 1.

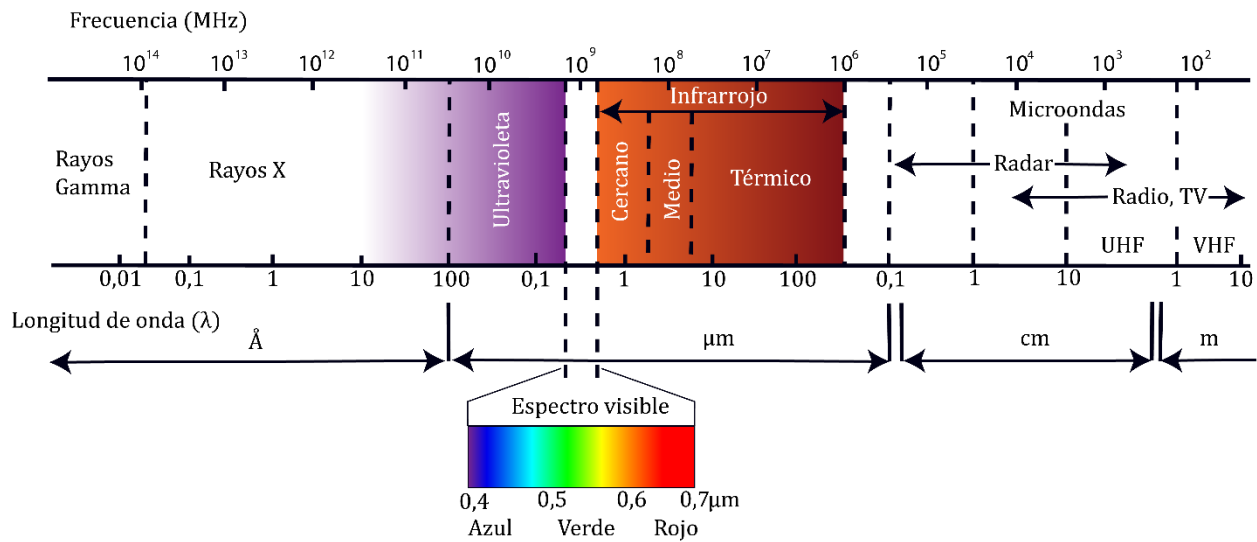


Figura 1. Diagrama del espectro electromagnético. Adaptado de Chuvieco,2015.



También se puede apreciar en la anterior figura que la frecuencia de la onda es inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir, que a mayor frecuencia la longitud de onda será menor y a menor frecuencia la longitud de onda será mayor.

Teniendo en cuenta lo anterior, los instrumentos que permiten obtener información del espectro electromagnético son los sensores remotos como se había mencionado con anterioridad, los cuales pueden ser pasivos o activos, los primeros necesitan de una fuente de energía externa, por ejemplo el sol o la temperatura de los objetos; para el caso de los sensores activos no es necesario una requerir de una fuente externa sino que estos generan su propia energía la cual llega a la superficie y que posteriormente regresa hacia el sensor. La figura 2 muestra un esquema gráfico de la funcionalidad de los sensores pasivos y activos.

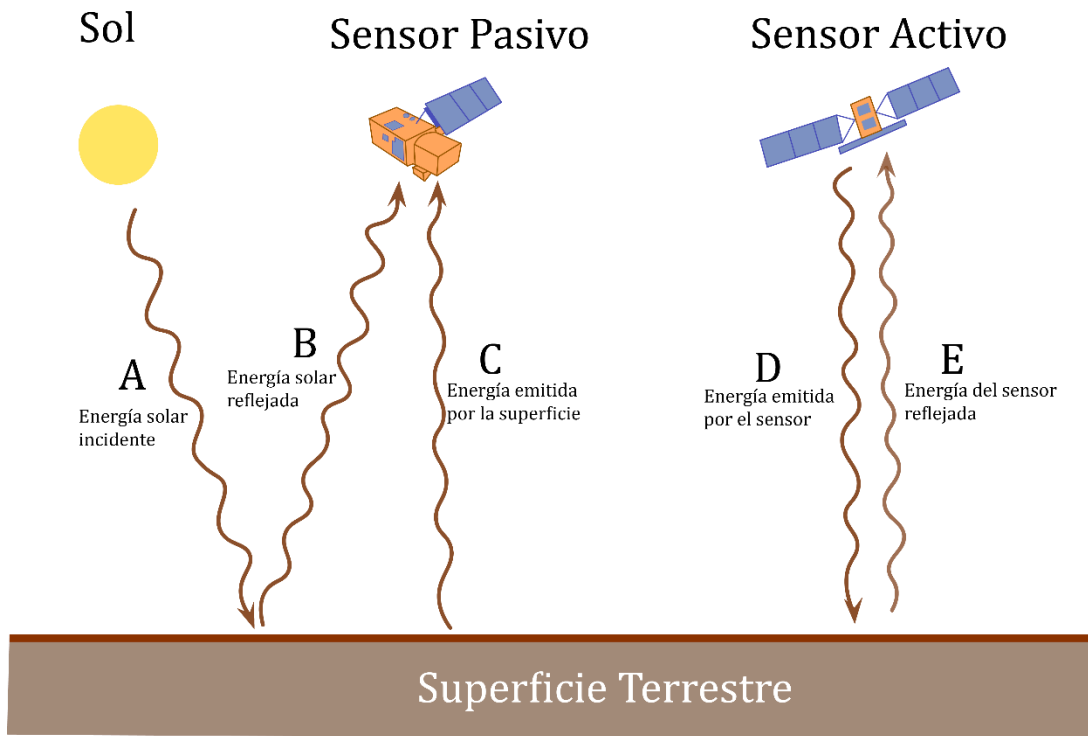


Figura 2. Representación gráfica de los sensores remotos pasivos y activos. Adaptado de Parra, 2014.

### 3.2. Sensores pasivos

Como se mencionó anteriormente, los sensores pasivos son los que necesitan una fuente de energía externa para obtener información electromagnética de los objetos, estos trabajan en la región espectral entre  $0,4 \mu\text{m}$  y los  $15 \mu\text{m}$  (Parra, 2014), es decir, entre la región del visible y el infrarrojo térmico, aunque también pueden abarcar regiones como la región ultravioleta (UV), tal es el caso del instrumento TROPOMI del satélite Sentinel-5P, o la región de las microondas por medio de los radiómetros de microondas.

Parra (2014) muestra que los sensores pasivos tienen dos maneras de obtener los datos, como exploradores de barrido (Whiskbroom Scanner) y como exploradores de empuje (Pushbroom Scanner), el primer tipo consiste en un espejo oscilatorio que se mueve en dirección perpendicular a la trayectoria del satélite, teniendo datos de una franja del terreno a ambos lados de este, mientras que la segunda configuración ya no utiliza un espejo oscilante sino una cadena conformada por varios detectores llamados Charge-Cuopled Device Detector (CCD) que son los que obtienen la energía electromagnética. Estos dos tipos de configuraciones se pueden apreciar en la figura 3.

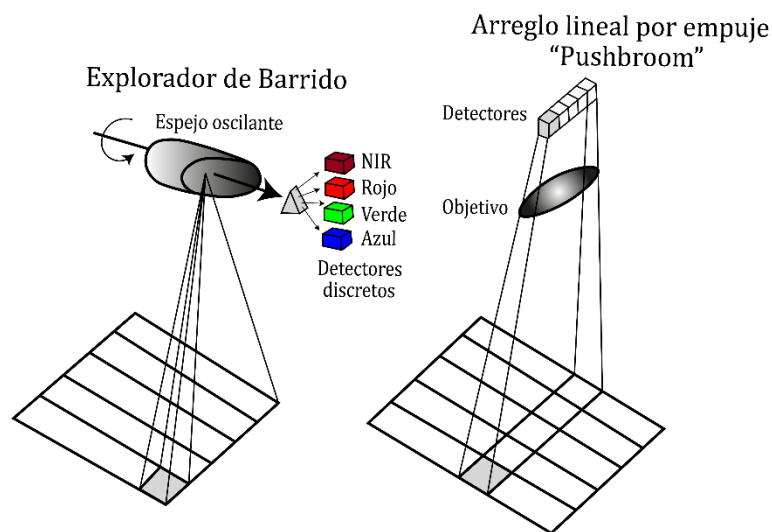


Figura 3. Representación gráfica del explorador de barrido y del explorador de empuje. Adaptado de Jensen, 2015 y Parra, 2014.

En este grupo de sensores se encuentran todos los ópticos y térmicos, y dependiendo de la cantidad de bandas del espectro electromagnético que utilicen a estos se les denominará sensores multiespectrales (como el sensor Multispectral Scanner Instrument (MSI) el cual cuenta con 13 bandas y es transportado por los satélites de la constelación Sentinel 2) y sensores hiperspectrales (como el sensor Hyperion que tiene 220 bandas y es transportado en el satélite EO-1).

### 3.2.1. Información espectral de los sensores pasivos

Jensen (2015) menciona que las mediciones que obtienen este tipo de sensores son valores de radiancia, siendo esta la cantidad de energía radiante que abandona por unidad de tiempo una unidad de área en una dirección y ángulo sólido en particular, representada por la letra ( $L$ ) y definida en la siguiente ecuación:

$$L = \frac{\phi}{\Omega A \cos\theta} \quad (1)$$

Donde

$\phi$  es el flujo radiante, es decir, la cantidad de energía que se transmite por unidad de tiempo.

$\Omega$  es el ángulo sólido específico.

$A$  es el área.

$\theta$  es el ángulo entre al normal a la superficie y la dirección específica.

Las unidades de radiancia son:

$$W/(m^2 sr) \quad (2)$$

Donde

$W$  es vatio, lo que es equivalente a decir,  $J$  (Julio, que es la unidad de energía radiante) sobre  $s$  (segundo, que es la unidad de tiempo).

$m^2$  es unidad de área.

$sr$  es unidad de ángulo sólido.

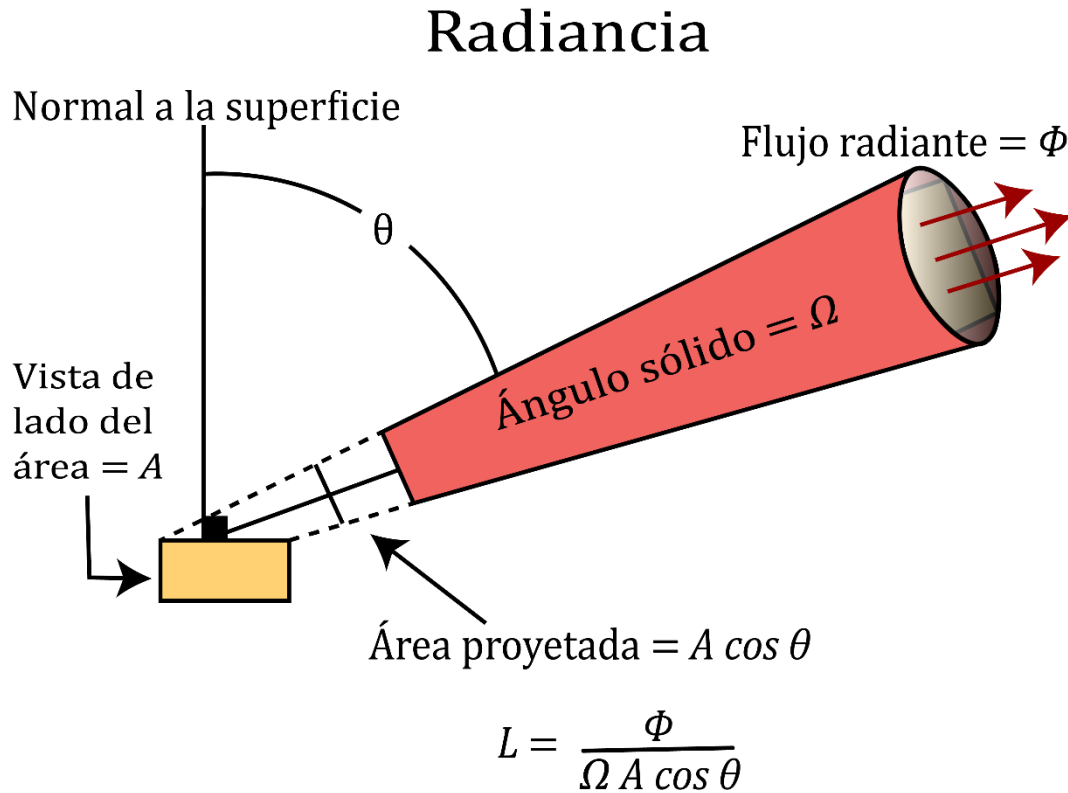


Figura 4. Representación gráfica de cómo se transmite la radiancia. Adaptado de Jensen, 2015.

A pesar de que la radiancia sea la medida que obtienen los sensores multiespectrales e hiperespectrales, en teledetección para tener información del comportamiento de las coberturas y los objetos a través del espectro electromagnético, se utilizan valores de reflectividad para

imágenes ópticas y valores de emisividad para imágenes térmicas. En este caso se profundizará en el concepto de reflectividad.

La reflectividad ( $\rho$ ) es la cantidad de flujo radiante que es emitido por una fuente externa, por ejemplo el Sol, que llega a un punto de una superficie y que luego es reflejada por esta, su valor es adimensional pero también puede ser expresado como porcentaje (Jensen, 2015). El resto del flujo radiante puede ser absorbido o transmitido, por lo tanto, el flujo radiante incidente ( $\phi_i$ ) es la suma entre el flujo reflejado, el flujo absorbido y el flujo transmitido, la siguiente ecuación que explica esa relación:

$$\phi_i = \phi_{reflejado} + \phi_{absorvido} + \phi_{transmitido} \quad (3)$$

La ecuación que define la reflectividad es la siguiente:

$$\rho = \frac{\phi_{reflejado}}{\phi_i} \quad (4)$$

Y con porcentaje la ecuación se define como:

$$\rho_{\%} = \frac{\phi_{reflejado}}{\phi_i} \times 100\% \quad (5)$$

Con ayuda de la reflectividad se pueden conocer las firmas espectrales que es la manera particular como un objeto o cobertura refleja o emite la energía a través del espectro electromagnético (Parra, 2014), permitiendo de esta manera diferenciar cada uno de esos materiales. Como se puede observar en la figura 5, se muestran las firmas espectrales del agua, la vegetación, la arena, el concreto y la nieve en una gráfica de % de Reflectividad vs Longitudes de onda del espectro electromagnético ( $\lambda$ ) en valores de  $\mu\text{m}$ , en donde se puede apreciar que el comportamiento de cada firma es diferente.

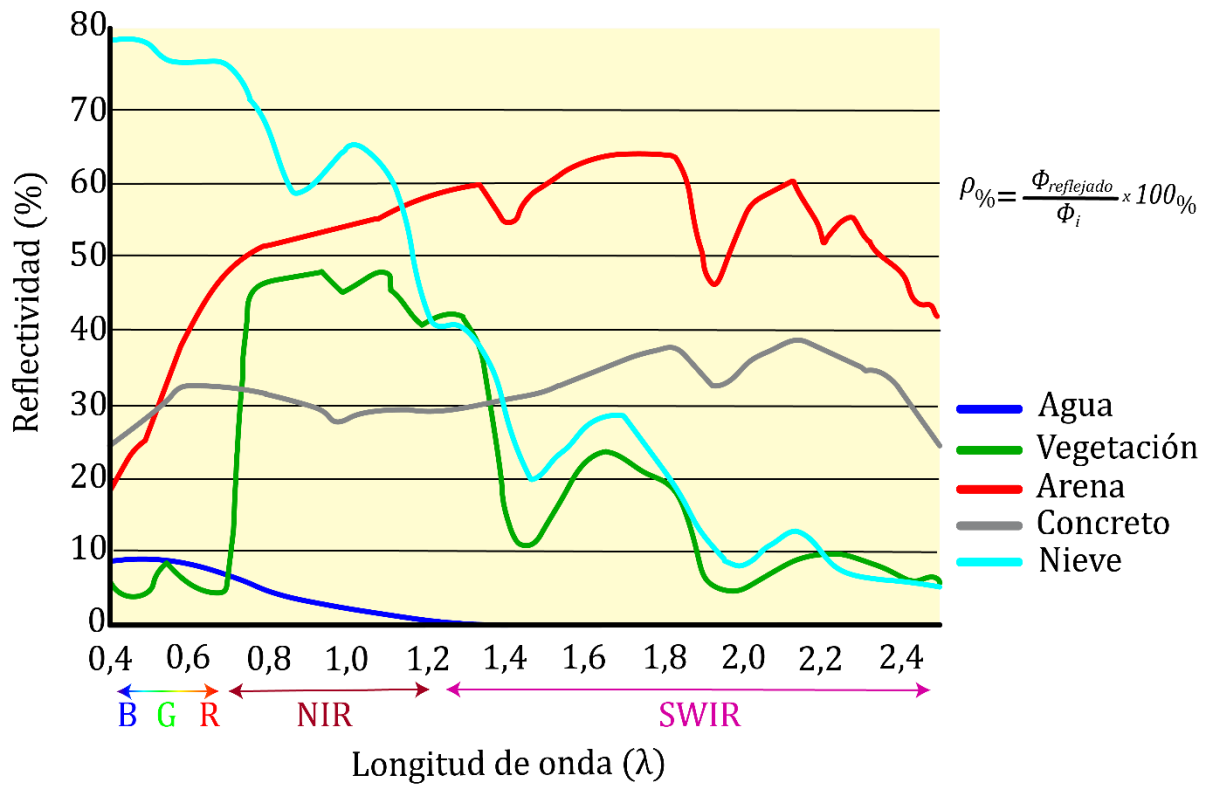


Figura 5. Comportamiento de firmas espectrales. Adaptado de Chuvieco, 2015.

Teniendo en cuenta el concepto de las firmas espectrales, se pueden contrastar ciertas regiones del espectro en donde los valores de reflectividad para una misma cobertura pueden ser más altos o más bajos, tal es el caso de la vegetación en donde se puede apreciar en la anterior figura que en la región del visible la reflectividad es baja estando apenas cerca del 10%, mientras que en la región del infrarrojo cercano (NIR) es alta estando cerca del 50%. Parra (2014) comenta que estos contrastes ayudan para que a partir de la información de las bandas de un sensor se puedan construir unos índices cuantitativos que permiten resaltar con mayor nitidez ciertas características de la superficie, como por ejemplo la vegetación.

Uno de los índices de vegetación más conocidos es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual es muy importante para el presente estudio. Uno de los primeros reportes de este índice es realizado por Rouse et al. (1974) utilizando información espectral del

satélite del ERST-1 sobre las Grandes Llanuras del centro de los Estados Unidos para estudiar las condiciones de vegetación de la zona. El NDVI contrasta la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano (NIR) con la banda del rojo, como se observa en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{rojo}}{\rho_{nir} + \rho_{rojo}} \quad (6)$$

Jensen (2015) anota que la ecuación NDVI produce un rango de valores adimensionales entre -1 a 1, donde mientras más positivos sean los valores la vegetación será más verde, y los valores negativos indican superficies no vegetadas como el agua, el suelo descubierto, las nubes, el hielo o la nieve.

Por ejemplo, la figura 6 muestra una imágenes NDVI de la región del volcán Galeras y de la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer en rangos de color entre blanco y negro, las zonas oscuras son las que tiene los valores NDVI más bajos como la roca descubierta de los cráteres de los volcanes, los lagos, los drenajes y la ciudad de Pasto al oriente del Galeras, y las zonas más claras son las que tienen valores NDVI altos resaltando de esa manera la vegetación vigorosa (bosques y cultivos).

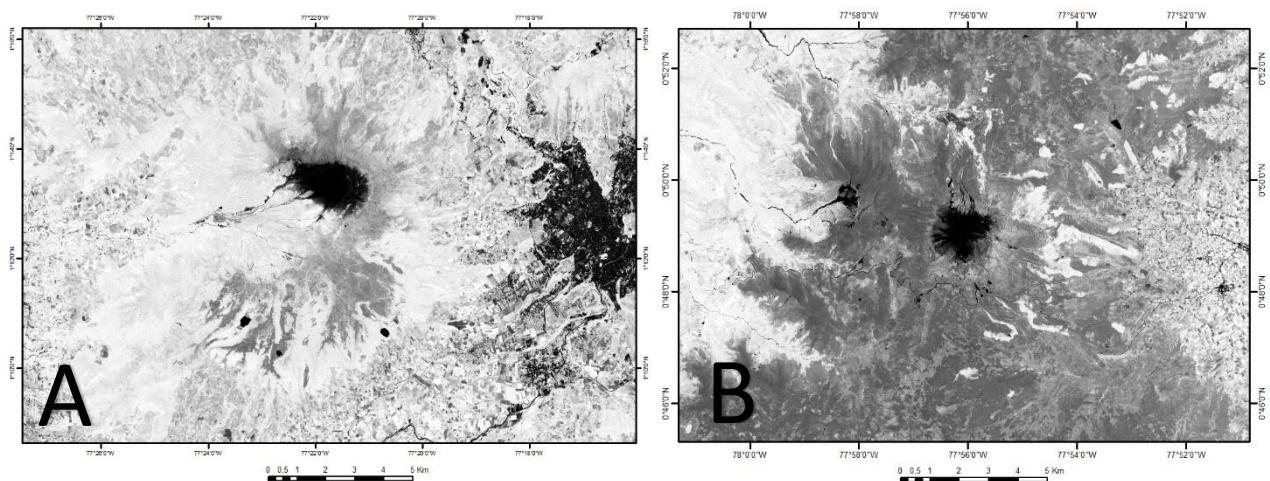


Figura 6. Imagen NDVI del volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer (B). Fuente propia.

Teniendo mayor claridad con los conceptos de sensores pasivos, las unidades de radiancia y reflectividad, las firmas espectrales y los índices cuantitativos como el NDVI, ahora se abordará la información general de los sensores multiespectrales MSI del Sentinel 2 y TROPOMI del Sentinel-5P, debido a que se utilizaron datos de estos en el presente estudio.

### **3.2.2. Sensor MSI (Sentinel-2)**

La constelación Sentinel-2 se compone de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, los cuales fueron lanzados al espacio en los años 2015 y 2017 respectivamente; estos tienen órbitas polares y sirven para monitorear la variación de las condiciones de la superficie terrestre (ESA, 2015). Sus órbitas se encuentran aproximadamente a unos 800 km de altitud (Jensen, 2015), cuentan con un swath o ancho de barrido de 290 km y presentan un período de revisita de 10 días en el Ecuador con un satélite, 5 días con los dos satélites y si las condiciones de nubosidad son óptimas con un período entre 2 y 3 días en latitudes medias (ESA, 2015).



*Figura 7.* Representación gráfica de uno de los satélites de la constelación Sentinel-2. Tomado de ESA, 2020.



El sensor remoto que utilizan estos satélites se llama Multiespectral Scanner Instrument (MSI), está configurado como un explorador de empuje el cual cuenta con 13 bandas (matrices de datos que muestran información de alguna región del espectro electromagnético), de las cuales 4 trabajan en la región del visible (Banda 1 = Aerosol, Banda 2 = Azul, Banda 3 = Verde y Banda 4 = Rojo), 3 en la región del borde rojo (Banda 5 = Borde Rojo 1, Banda 6 = Borde Rojo 2, Banda 7 = Borde Rojo 3), 2 en la región del infrarrojo cercano o Near Infrared (NIR) (Banda 8 = NIR 1 y Banda 8a = NIR 2) , 2 en la región del infrarrojo medio de onda corta o Short Wave Infrared (SWIR) (Banda 11 = SWIR 1 y Banda 12 = SWIR 2) y bandas utilizadas con fines de correcciones atmosféricas (Banda 9 = Vapor de agua y Banda 10 = Cirrus). Estas bandas cuentan con una resolución espacial (el tamaño del píxel de la imagen ráster) de 10m para las bandas del Azul, Verde, Rojo y NIR 1, una resolución de 20m para las bandas del Borde rojo, la banda NIR 2 y las bandas del SWIR; y una resolución de 60m para las bandas Aerosol, Vapor de agua y Cirrus, como se puede observar en la figura 8.

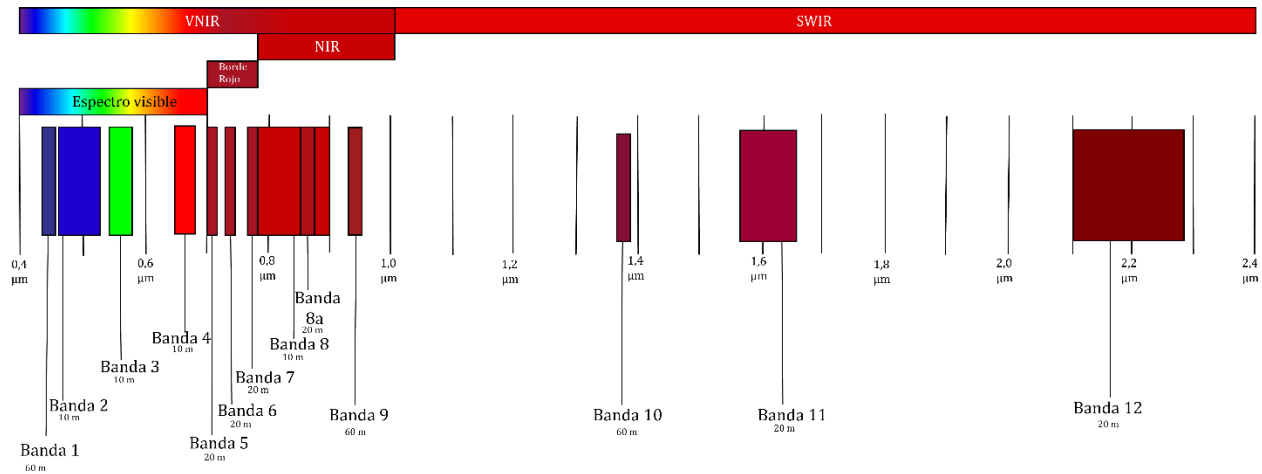


Figura 8. Bandas del sensor MSI de los satélites Sentinel-2. Adaptado de ESA ,2020.

### 3.2.3. Sensor TROPOMI (Sentinel-5P)

El satélite Sentinel-5 Precursor fue lanzado al espacio el 13 de octubre de 2017 y tiene como objetivo el estudio de la atmósfera terrestre, con una alta resolución espacio-temporal este mide la calidad del aire, el ozono y la radiación ultravioleta (UV), además monitorea el clima y el estado del tiempo (ESA, 2015).



*Figura 9.* Representación gráfica del satélite Sentinel-5P. Tomado de ESA, 2015.

El instrumento que transporta este satélite se llama TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI), el cual cubre bandas del espectro electromagnético entre la región ultravioleta y el infrarrojo de onda corta (SWIR).

Este utiliza técnicas de teledetección para llegar a su objetivo midiendo la energía del Techo de la Atmósfera (TOA), la cual es la energía de radiación solar reflejada en la superficie de la tierra y la energía solar dispersada también por esta a través de la atmósfera misma. Este instrumento cuenta con un sistema de explorador de empuje, un área de barrido de 2600km y una resolución espacial en el nadir de  $7 \times 3,5 \text{ km}^2$  para la mayoría de las bandas espectrales, excepto para la banda UV1 con una resolución de  $7 \times 28 \text{ km}^2$  y la banda SWIR con una resolución de  $7 \times 7 \text{ km}^2$  (ESA, 2016).

### **3.3. Sensores activos (Radar)**

Los sensores activos son aquellos que tienen la capacidad de emitir su propia energía hacia la superficie de la tierra, esta energía se refleja y regresa nuevamente al sensor. Entre los sensores activos se encuentran el Radio Detection and Ranging (RADAR) los cuales fueron utilizados en primera instancia para fines militares, aunque con el tiempo ya son una herramienta muy importante para la investigación científica, y el Light Detection and Ranging (LiDAR), el primero trabaja en la región de las microondas y el segundo trabaja en la región del verde y del infrarrojo cercano a través de pulsos de láser, además Jensen (2015) comenta que la medición que obtiene el Radar es la retrodispersión y la que obtiene el LiDAR es la intensidad del láser.

En el presente estudio se profundizará en los sistemas de Radar, ya que es con estos que se puede realizar la medición de los desplazamientos de los terrenos con la Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) la cual se aplicó a los objetos de estudio de la presente investigación, los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro, pero este tema se profundizará más adelante.

#### **3.3.1. Región de las Microondas**

La región de las microondas está comprendida en un rango entre 0,1 a 100cm en longitudes de onda ( $\lambda$ ) siendo además las ondas electromagnéticas de mayor longitud estudiadas en teledetección (Chuvieco, 2015), las cuales son analizadas tanto por sensores pasivos (radiómetros de microondas) como por sensores activos (los sistemas radar). Las microondas tienen unas propiedades que las hacen muy importantes para obtener información de la superficie, a medida que el tamaño de onda aumenta está penetra con mayor facilidad ciertas coberturas como las nubes, el polvo, la lluvia y no son afectadas por la dispersión atmosférica

como los sensores ópticos (CCRS, 2015), implicando aparentemente que pueden trabajar bajo cualquier condición atmosférica y de iluminación; sin embargo, en ciertas ocasiones las condiciones atmosféricas si pueden generar afectaciones en la calidad de los datos que se obtienen, esos problemas se abordarán más adelante.

Ya que la región del microondas es tan ancha, los sistemas de radar la trabaja con varias bandas como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1  
*Bandas de los sistemas Radar.*

<b>Banda</b>	<b>Ancho <math>\lambda</math> (cm)</b>	<b>Frecuencia (GHz)</b>
Ka	0,75 – 1,10	26,50 – 40,00
K	1,10 – 1,67	18,00 – 26,50
Ku	1,67 – 2,40	12,50 – 18,00
X	2,40 – 3,75	8,00 – 12,50
C	3,75 – 7,50	4,00 – 8,00
S	7,50 – 15,00	2,00 – 4,00
L	15,00 – 30,00	1,00 – 2,00
P	30,00 – 100,00	0,30 – 1,00

Elaboración propia.

Según (CCRS, 2015) las bandas Ka, K y Ku son muy cortas, y fueron usadas en sistemas radar en plataformas aéreas, pero en la actualidad rara vez se utilizan; la banda X es muy trabajada también en sistemas aérotransportados para usos militares y para mapeo del terreno; la banda C es común en varios sistemas aéreos como el Convair-580 del CCRS y el AirSAR de la NASA, y en sistemas satelitales como el ERS-1, ERS-2, RADARSAT y Sentinel-1; la banda S es utilizada en el satélite ruso ALMAZ; la banda L es usada en el satélite estadounidense SEASAT y en los satélites japoneses JERS-1 y ALOS; finalmente la banda P es empleada para investigación de sistemas aérotransportados de la NASA.

### 3.3.2. Retrodispersión (Backscattering)

Como se mencionó anteriormente los sistemas de Radar trabajan en la región de las microondas, la cual está comprendida entre longitudes de 0.1 y 100cm, estos sistemas miden el tiempo del pulso energético emitido y el pulso que retorna al sensor además de la intensidad con la que este regresa al sensor, a esa intensidad se le denomina *retrodispersión (backscattering pulse)* (Chuvieco, 2015), la cual es representada como ( $P_r$ ). La retrodispersión es definida en la siguiente ecuación:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (7)$$

Donde

$P_t$  es la intensidad del pulso energético emitido por la antena del radar.

$G$  es el factor de ganancia de la antena.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$\sigma$  es el coeficiente de la retrodispersión.

$r$  es la distancia entre el sensor y la superficie.

Chuvieco (2015) comenta que el  $\sigma$  es el más difícil de determinar debido a que depende de varios factores como la irregularidad de la superficie, las condiciones dieléctricas, la pendiente del terreno y su aspecto en relación con el haz emitido, el ángulo de incidencia y la polarización.

La irregularidad de la superficie es un factor muy importante debido a que la manera como esta varía el comportamiento de la retrodispersión también cambiará, como se puede observar en la figura 10, en donde hay 3 tipos de superficies, un lago, un bosque y unos edificios, debido a

que la superficie del lago es relativamente lisa la retrodispersión tendrá un comportamiento especular, es decir, que el pulso energético emitido cuando tiene contacto con esa superficie se desvía en la dirección contraria de la que fue enviada, en el caso de la vegetación el comportamiento de la retrodispersión es difusa ya que parte de la señal se desvía en varias direcciones, por ende la señal que regresa al sensor llega con menor intensidad, y para el caso de los edificios como la señal rebota completamente contra estos la intensidad de la señal retornada es muy alta. Esto implica que mientras una superficie sea más irregular la intensidad de la señal retornada al sensor será mayor.

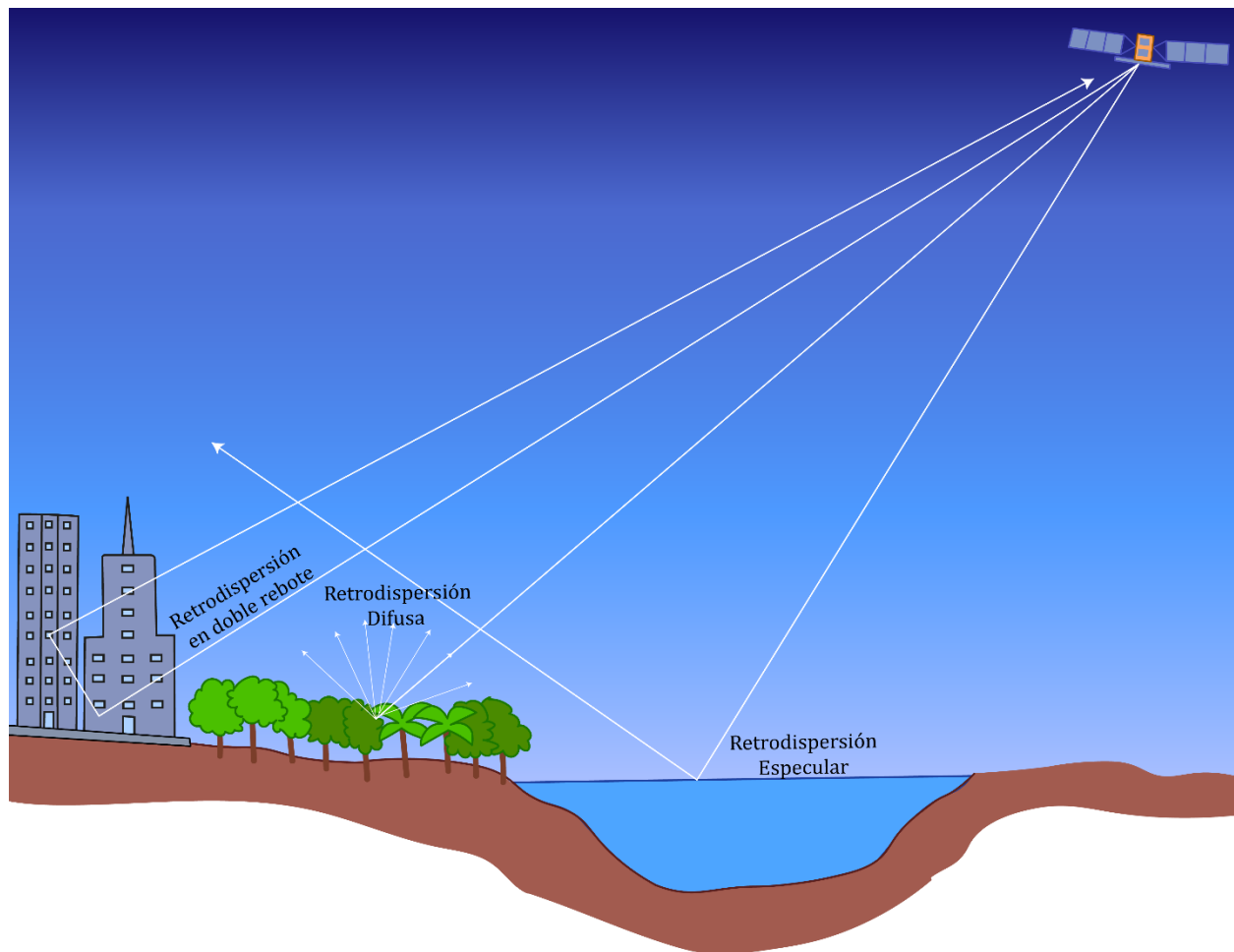


Figura 10. Esquema del comportamiento de retrodispersión de las ondas microondas en un sistema Radar. Adaptado de Chuvieco, 2015.

### **3.3.3. Polarización en los sistemas Radar**

La polarización es una característica fundamental en los sistemas de Radar, esta consiste en la orientación en la que el campo eléctrico de la onda vibra en la señal que es transmitida y también en la señal que es recibida por el sensor (CCRS, 2015). Existen 4 combinaciones posibles para transmitir y recibir las polarizaciones:

- La combinación HH, donde la onda es transmitida en polarización horizontal y recibida en polarización horizontal.
- La combinación VV, donde la onda es transmitida en polarización vertical y recibida en polarización vertical.
- La combinación HV, donde la onda es transmitida en polarización horizontal y recibida en polarización vertical.
- La combinación VH, donde la onda es transmitida en polarización vertical y recibida en polarización horizontal.

Las dos primeras combinaciones se les denomina como co-polarización y las últimas dos como polarización cruzada. Estas combinaciones se pueden observar más claramente en la figura 11.

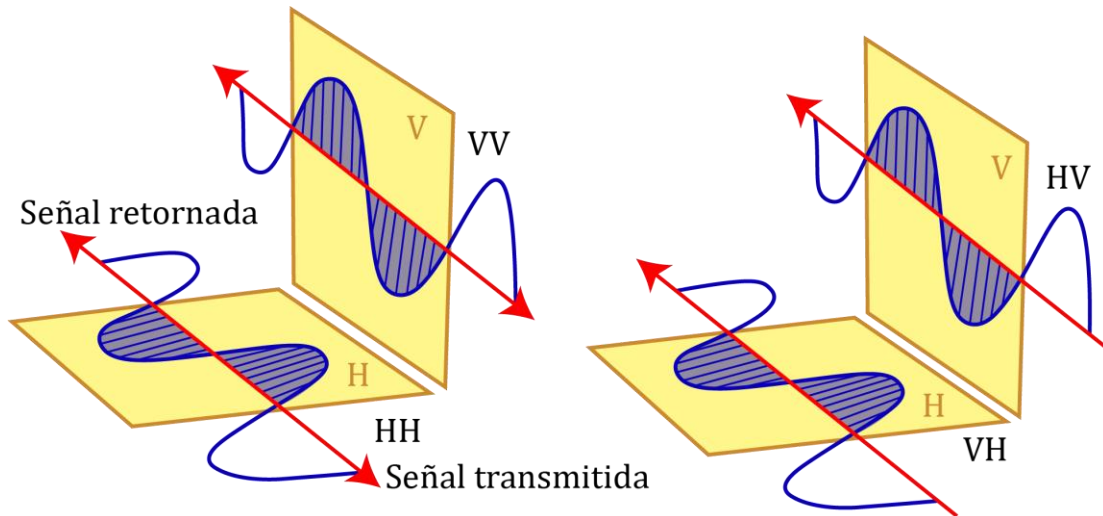


Figura 11. Tipos de polarizaciones en los sistemas Radar. Adaptado de Chuvieco, 2015.

### 3.3.4. Geometría del sistema Radar

En sus inicios los sistemas de radar eran transportados en plataformas aéreas, el radar en Radar Aerotransportado de Visión Lateral o Side-Looking Airbone Radar (SLAR) desarrollado en la década de los años 1950, fue el primer sistema de radar aerotransportado disponible con rendimiento de imagen confiable (Meyer, 2019).

El sensor de un sistema SLAR a diferencia de los sensores ópticos no apunta a la superficie en dirección del Nadir el cual es el punto de referencia que se proyecta rectamente debajo de la plataforma, sino que lo hace a un ángulo en particular el cual se llama ángulo de incidencia  $\theta_i$ , con el fin de evitar problemas asociados a ecos muy fuertes de la señal que produzcan interferencia en los datos obtenidos, este ángulo también puede expresarse como  $\theta_i = 90^\circ - \theta_l$  en donde  $\theta_l$  es el ángulo de mira del sensor; el ángulo de incidencia generalmente es cercano a los  $30^\circ$  y es a partir del cual se ilumina la superficie terrestre con el sensor. La franja iluminada por la señal del microondas se le denomina swath, el rango es la dimensión del área iluminada que va



en vía perpendicular a la dirección de vuelo de la plataforma, y el acimut es la dimensión del área iluminada que va en vía paralela a la dirección de vuelo (CCRS, 2015). El sensor transmite pulsos microondas los cuales iluminan instantáneamente un área determinada en la superficie llamada huella de la antena o antena footprint en la cual se generan los píxeles SLAR conformados por una resolución en rango y una resolución en acimut, ese píxel capta la amplitud y la fase retrodispersada y también es llamado celda de resolución (Ferretti et al., 2007), la amplitud del haz de microondas o beamwidth es representado por  $\beta$ .

En la figura 12 se puede observar la geometría del sistema SLAR y se puede notar que mientras más lejana sea la señal del sensor a la superficie la resolución en acimut se distorsiona haciéndose mayor, repercutiendo en problemas en la calidad de los datos y haciendo que la utilización de los sistemas SLAR a grandes alturas no sea recomendable para obtener información de la superficie. Este problema se puede evitar usando una antena virtual sintética la cual es utilizada por los sistemas de Radar de Apertura Sintética o Synthetic Aperture Radar (SAR).

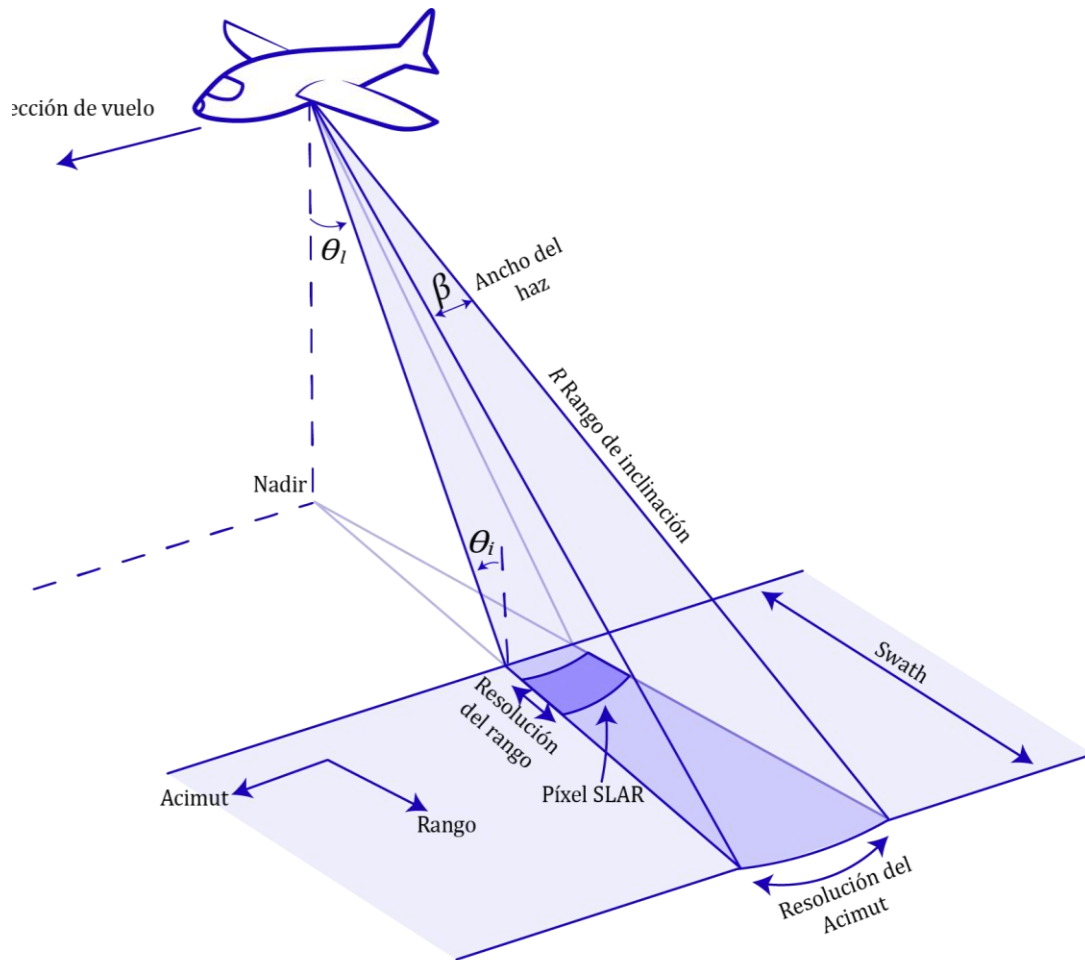


Figura 12. Esquema en 3 dimensiones de la geometría del sistema Radar. Adaptado de CCRS, 2015 y Meyer, 2019.

### 3.3.5. Radar de Apertura Sintética (SAR)

El concepto de la apertura sintética permite crear una más larga y efectiva antena virtual desde una secuencia de adquisiciones realizadas por una antena más corta mientras esta se mueve a través de la línea de vuelo. Este principio fue descubierto por Carl Willey y es la clave detrás de toda la resolución de los sistemas de radar modernos (Meyer, 2019).

La longitud de la antena virtual o la apertura sintética ( $L_{SA}$ ) es definida en la siguiente ecuación:

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} \cdot R_0 \approx \beta \cdot R_0 \quad (8)$$

Donde

$\beta$  es el ancho del haz del pulso energético, también puede ser representado como  $\beta = \frac{\lambda}{L}$

$\lambda$  es la longitud de la onda.

$L$  es la longitud de la antena de radar artificial en el satélite.

$R_0$  es también llamado Rango de Inclinación y es la distancia oblicua entre el sensor de radar y la superficie observada, la cual puede variar dependiendo de la posición del satélite.

La figura 13 ilustra cómo funciona el concepto del radar de apertura sintética (SAR), en la cual se puede observar la antena del radar representada por un rectángulo azul, la cual tiene una longitud corta y que además viaja a una velocidad y una dirección específica; la antena va transmitiendo constantemente pulsos microondas a la superficie que después retornan a esta a una distancia en particular, cada uno de los pulsos iluminan un área de la superficie (antena footprint) y además obtienen información de un punto en común  $P$ , estos pulsos están representados por cada una de las posiciones en las que la antena los envía ( $X_1, X_2, X_3, X_4$  y  $X_5$ ) en donde  $X_1$  es la primera posición que observa el punto  $P$  y  $X_5$  la última posición que observa ese mismo punto.

La información que del punto  $P$  que es capturada por cada uno de los pulsos al ser procesada en un mismo conjunto de datos muestra como si la información hubiese sido obtenida por una antena más grande, por eso se utiliza el concepto de antena virtual o de apertura sintética (Meyer, 2019). Un ejemplo de una imagen SAR se observa en la figura 14.

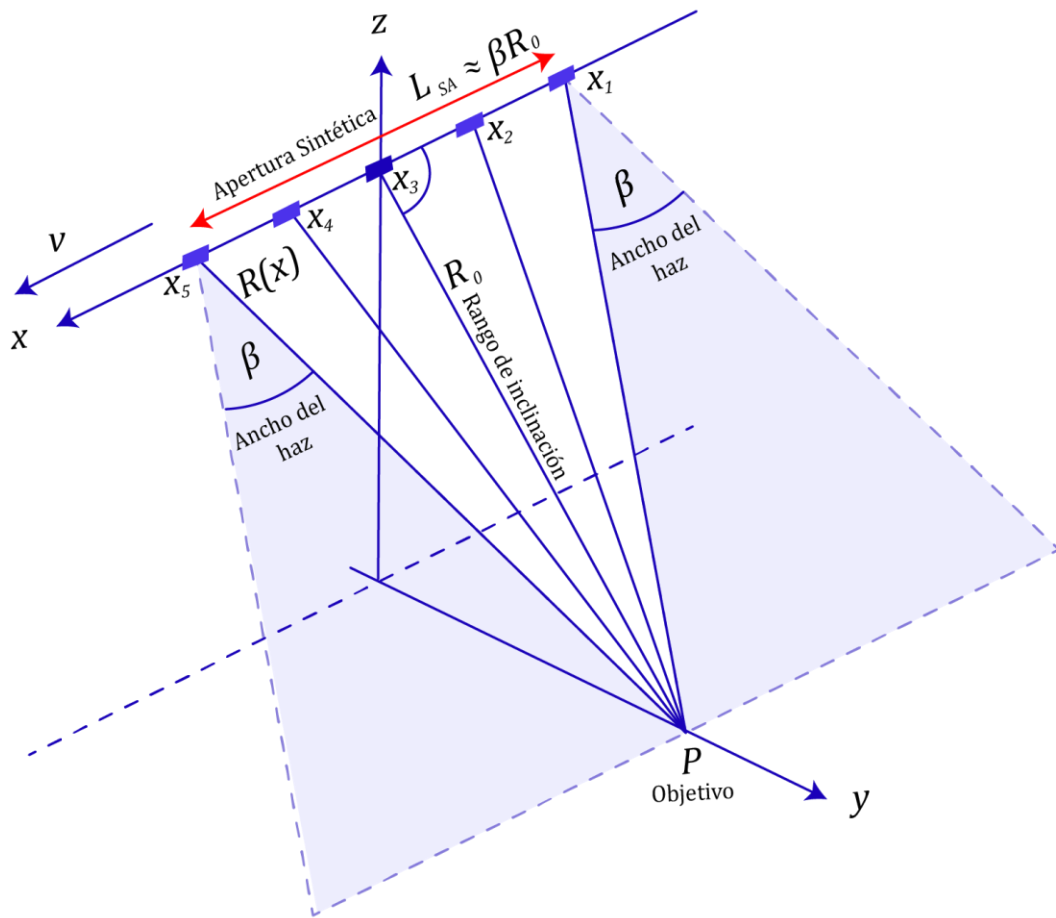


Figura 13. Esquema en 3 dimensiones de la geometría del sistema Radar SAR. Adaptado de Meyer, 2019.

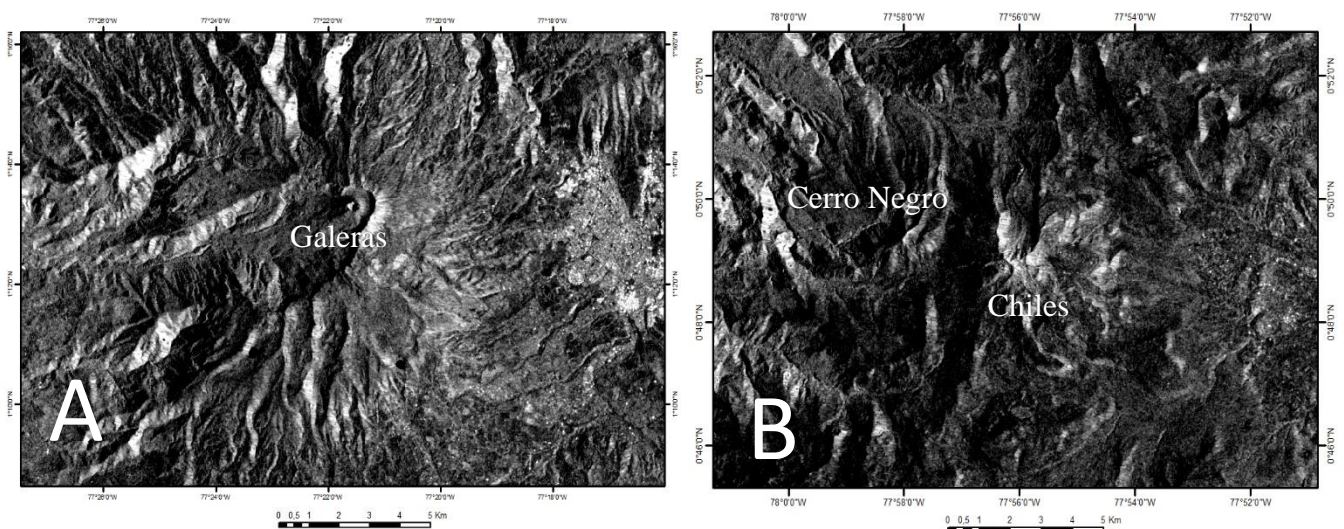


Figura 14. Imágenes SAR Sentinel-1 de los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer. Fuente propia.

Uno de los problemas más característicos que tienen las imágenes SAR es el moteado (*speckle*) el cual es también llamado efecto sal y pimienta; este es producido por la superposición de señales reflejadas en varios y pequeños dispersores dentro de una celda de resolución (ESA, 2007). Este efecto afecta negativamente la calidad de una imagen SAR dándole un aspecto “lluvioso”, sin embargo, gracias a la toma de varias imágenes en diferentes períodos de tiempo y en diferentes ángulos de mirada, se puede minimizar dicho efecto el cual se puede visualizar en la figura 15.

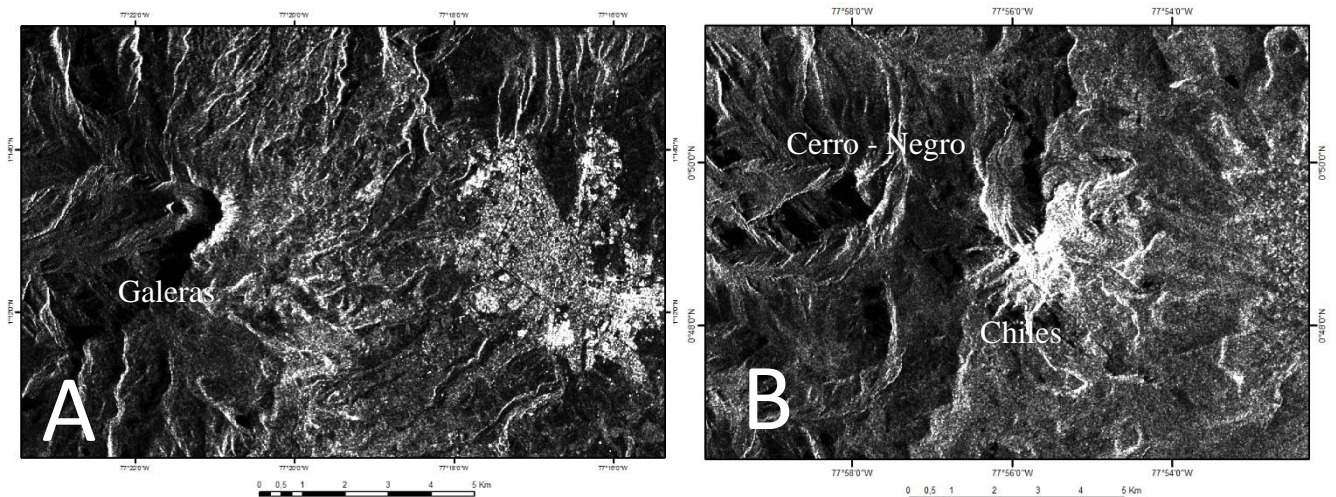


Figura 15. Imagen SAR Sentinel-1 del volcán Galeras y la ciudad de Pasto (A), y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B) con efecto speckle. Fuente propia.

### 3.3.6. Técnica InSAR

En primer lugar, se debe entender lo que es la fase ( $\varphi$ ) en radar, siendo definida como aquella posición dentro del ciclo de una onda, siendo un ciclo de onda  $360^\circ$  o  $2\pi$  radianes, y es fundamental para el entendimiento de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). La fase se expresa en la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R \quad (9)$$

O en su expresión más simplificada

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R \quad (10)$$

Donde

$R$  es la distancia que recorre la señal entre el sensor y la superficie y se multiplica por 2 porque tiene en cuenta la distancia bidireccional, la de ida y la de regreso de la señal.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$2\pi$  es el ciclo de onda

También la ecuación se puede ilustrar en la siguiente figura:

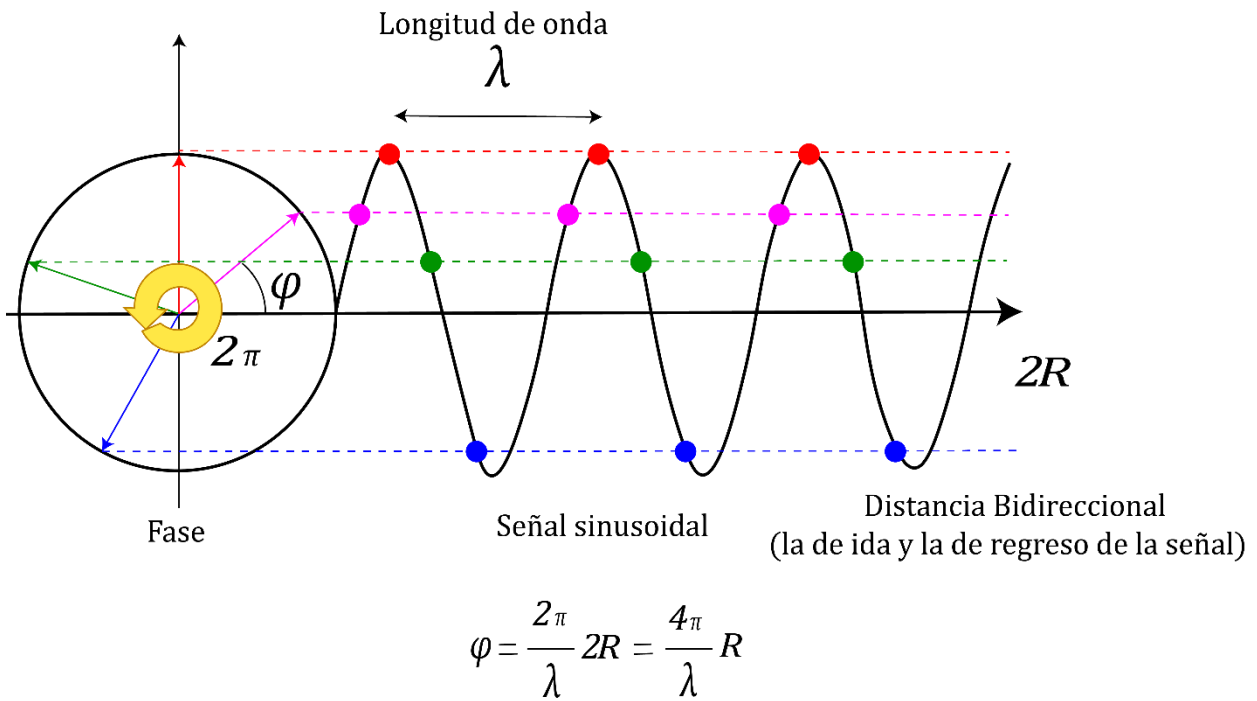


Figura 16. Representación gráfica de la Fase en radar. Adaptado de Ferretti et al. (2007).

La técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética, se fundamenta en la diferencia de fase entre dos imágenes SAR que adquieren información de la superficie de una misma región del planeta en diferentes épocas y a diferentes ángulos (Rocca et al., 2000). Como se puede ver en la figura 17 la técnica el InSAR se compone de dos satélites SAR los cuales observan una

misma región de la superficie terrestre, la distancia entre las órbitas de los dos satélites se llama línea base interferométrico y su proyección perpendicular al rango inclinado se llama línea base perpendicular, dicha proyección se llama rango inclinado o slant range. El cambio de fase también mide el desplazamiento de la superficie entre las fechas de las dos imágenes, este cambio se percibe en línea de vista o Line Of Sight (LOS), es decir, que el desplazamiento se detecta desde la perspectiva de visión del satélite a la superficie mientras este se encuentra en movimiento.

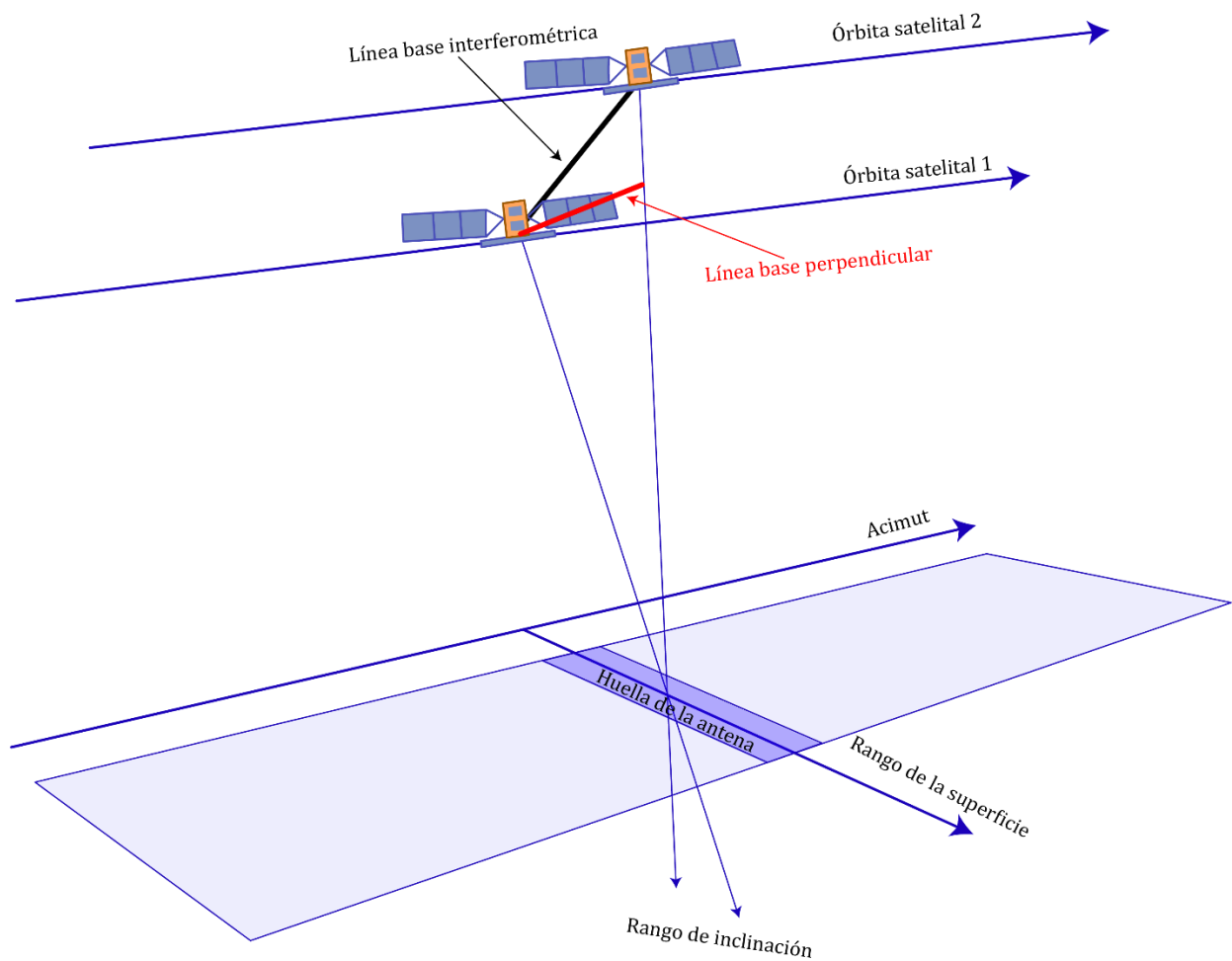


Figura 17. Esquema en 3 dimensiones del sistema InSAR. Adaptado de Ferretti et al. (2007).

Con respecto a las imágenes a una de ellas se le denomina imagen maestra (master image) y a la otra imagen esclava (slave image), la diferencia de fase entre ambas se representa en la siguiente ecuación:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (11)$$

Donde

$\Delta\varphi$  es la diferencia entre las fases de la imagen maestra y la imagen esclava ( $\varphi_m - \varphi_s$ ).

$\Delta R$  es la diferencia entre el  $R$  de la imagen maestra y el  $R$  de la imagen esclava ( $R_m - R_s$ ).

Sin embargo, la diferencia de fase comprende de varias contribuciones que condicionan su medición, como se expresa en siguiente fórmula.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{height} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise} \quad (12)$$

Donde

$\Delta\varphi_{flat}$  es la influencia de la Tierra plana.

$\Delta\varphi_{height}$  es la influencia de la topografía.

$\Delta\varphi_{displacement}$  es la influencia de la deformación en la superficie la cual se mide a través de la línea de vista o Line Of Sight (LOS).

$\Delta\varphi_{atmosphere}$  es la influencia de la atmósfera la cual produce un retraso en la propagación de la onda de radar.

$\Delta\varphi_{noise}$  es la influencia del ruido residual.

La diferencia de fases se evidencia en el interferograma en una serie de franjas de colores llamadas franjas o fringes como se ve en la figura 18, esas franjas se forman por factores como el



movimiento que experimentó un terreno debido a un sismo, a una erupción volcánica, o a la subsidencia del suelo, entre otros (Suarez y Posada, 2010), definiéndose por lo tanto como una técnica que tiene la capacidad de estimar el movimiento y la deformación de una superficie.

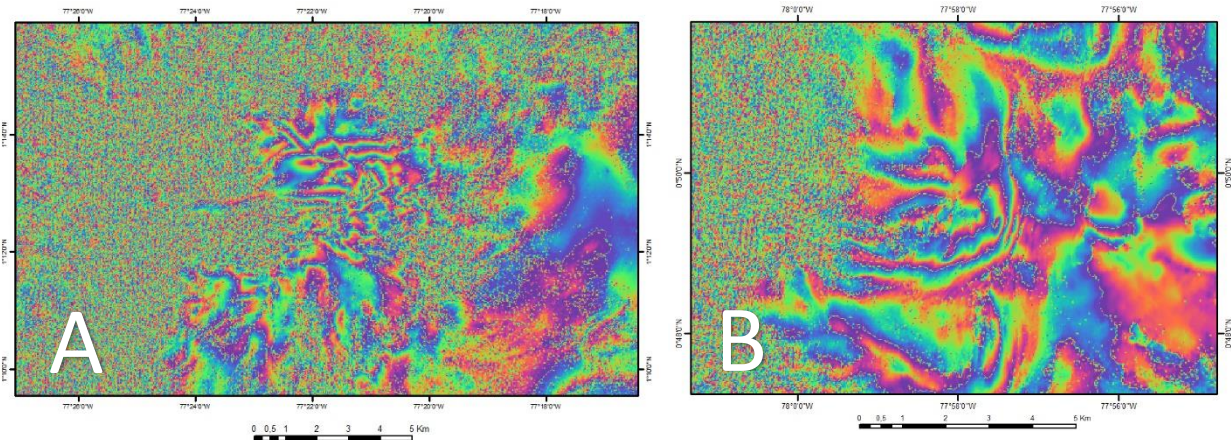


Figura 18. Interferograma con sus franjas en el volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B). Fuente propia.

Una de las características más importantes en la interferometría es la coherencia, la cual es la correlación que existe entre dos imágenes SAR estimada en una ventana compuesta por algunos píxeles en acimut y en rango. Esta varía en valores de 0 a 1, en donde el valor de 0 indica que el ruido en la fase es total y el valor de 1 indica ausencia de ruido en la fase (Ferretti et al., 2007) lo cual brinda mayor confiabilidad a los datos; dicho ruido se conoce también como decorrelación o incoherencia y básicamente lo que hace es destruir el patrón organizado de las franjas de los interferogramas generando a su vez un moteado en las imágenes, sucediendo debido a que la fase interna entre las dos imágenes (pares interferométricos) no es constante (Massonnet y Feigl, 1998) por causa de factores como la topografía empinada, la densidad de la vegetación, la cobertura de la nieve, y a pesar de que las ondas microondas atraviesen las nubes las condiciones atmosféricas pueden ser una variable de afectación para generar ruido y disminuir la coherencia de los interferogramas; y también se puede formar por una gran distancia de la línea base perpendicular y de las fechas de adquisición entre dos imágenes SAR y por la diferencia de fecha

de adquisición de estas, eso implica que las imágenes seleccionadas deben tener un espacio de tiempo y de distancia relativamente cercanas para evitar ese tipo de problemas. Un ejemplo de mapas de coherencia se puede observar en la figura 19, en donde los píxeles oscuros indican los menores valores de coherencia y los píxeles blancos los mayores valores.

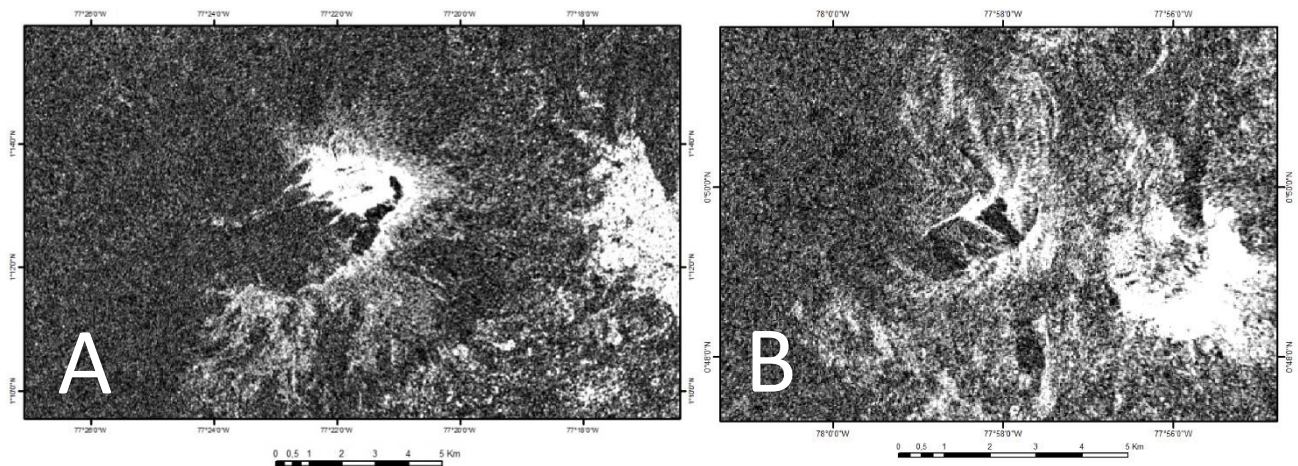


Figura 19. Mapas de coherencia del volcán Galeras (A) y de los volcanes Chiles - Cerro Negro (B). Fuente propia.

### 3.3.7. Técnicas DInSAR

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) cumple una función similar a la técnica InSAR, sin embargo, a diferencia del InSAR el DInSAR remueve de su procedimiento cualquiera de las influencias que condicionan la diferencia entre fases, con excepción de la influencia o contribución por desplazamiento.

La técnica DInSAR ha demostrado ser muy efectiva y precisa para la determinación de la deformación de la superficie: por ejemplo Rosen et al. (2000) menciona que esta es una técnica de teledetección que ayuda a complementar y suplementar muy bien las medidas obtenidas por monitoreo en tierra, como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), los cuales muchas veces no son suficientes.

A pesar de ello es una tecnología con limitaciones técnicas debido a los efectos de ruido en los interferogramas, a este efecto se le denomina decorrelación o incoherencia como se mencionó anteriormente. Para tratar de contrarrestar la decorrelación y tener datos de deformación con mayor exactitud se desarrollaron algunos algoritmos o técnicas como PSI, SPOT-CR y SBAS.

La técnica Permanent Scatterer Interferometry (PSI) fue propuesta por Ferretti et al. (2001), esta se encarga de brindar mediciones confiables de la deformación del terreno con base en unos subconjuntos de píxeles ubicados (dispersores permanentes) en regiones estables para formar una especie de “red de GPS” en un marco de múltiples imágenes, teniendo como referencia una única imagen maestra.

Existe también otra propuesta como la de Singleton et al (2014) que proponen disminuir el problema de la vegetación con el algoritmo Sub-Pixel Offset Time-series Technique (SPOT-CR) el cual es aplicado específicamente en el monitoreo de movimientos en masa que se forman en pendientes con mucha vegetación.

Sin embargo, hay una técnica que ha demostrado resultados muy efectivos y que además es muy relevante para el presente estudio, la técnica SBAS.

#### ***3.3.7.1. Técnica SBAS***

La técnica Small BAseLine Subset (SBAS), propuesta por Berardino et al (2002), se basa en una combinación apropiada de interferogramas diferenciales generados a partir de parejas de imágenes SAR caracterizadas por tener una separación orbital pequeña, implicando una corta separación de la línea base perpendicular para limitar problemas generados por la atmósfera (atmospheric artifacts). Una característica clave de esta técnica es el de un gran número de imágenes SAR y un área de cobertura grande, ya que se permite que se abarque un rango

temporal amplio para tener mejor información sobre el monitoreo de una extensa superficie. En la figura 20 que ilustra el manejo del SBAS, en esta hay un diagrama línea base vs fecha de adquisición, entre ella hay unos círculos azules los cuales representan las imágenes SAR, y estas se encuentran enlazadas con las imágenes vecinas más próximas, ese enlace se representa como el par interferométrico.

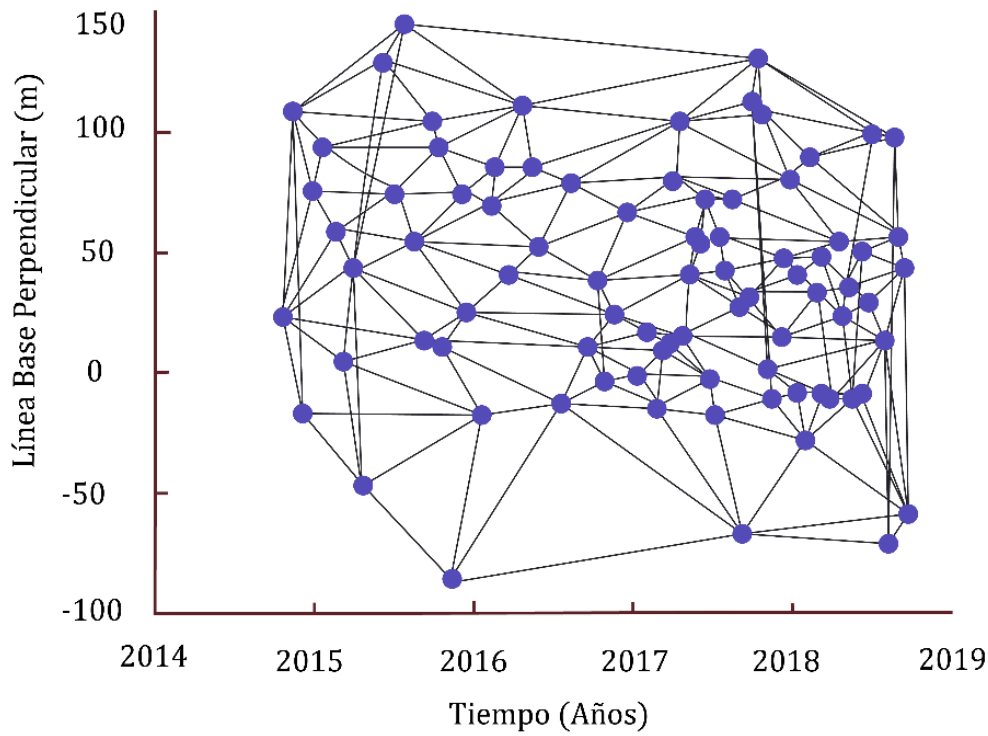


Figura 20. Manejo de la técnica SBAS. Adaptado de Rosell et al. (2019).

### 3.3.7.2. Algoritmo P-SBAS

Para el presente estudio es muy importante el uso de un algoritmo avanzado derivado del SBAS llamado Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS), este permite generar información multitemporal DInSAR de alta calidad sin necesidad de realizar procesos extensos y complejos por los usuarios que simplemente quieren enfocarse más en los resultados y en la interpretación de los desplazamientos (De Luca et al., 2015). Este algoritmo es llevado a cabo por el ambiente

ESA's Grid Processing on Demand (G-POD) el cual hace parte de Geohazards Thematic Exploitation Platform (GEP), esta plataforma ha sido originada por la ESA, y a través de este ambiente se pueden generar trabajos de procesamiento con gran volumen de información en poco tiempo para tener resultados de observación de la Tierra, específicamente de desplazamiento, esto es posible debido a que G-POD es un ambiente virtual que trabaja en la nube. El Instituto para la Detección Electromagnética del Medio Ambiente (CNR-IREA) de Italia también tiene ese algoritmo el cual se puede utilizar en la aplicación temática SBAS Ground Motion Services por medio de la plataforma Geohazards TEP.

En la figura 21 se observa el diagrama de flujo del procesamiento del algoritmo P-SBAS el cual necesita imágenes SAR en tipo de producto Single Look Complex (SLC), las cuales se corregistran, a partir de esos corregistro se generan los interferogramas, a esos interferogramas se les desenrolla la fase y finalmente son convertidos a series de tiempo de desplazamiento. Este paso a paso es muy similar al procesamiento utilizado en SNAP el cual se empleó en el presente estudio, por lo tanto, se hablará más específicamente de cada paso en el capítulo de metodología.

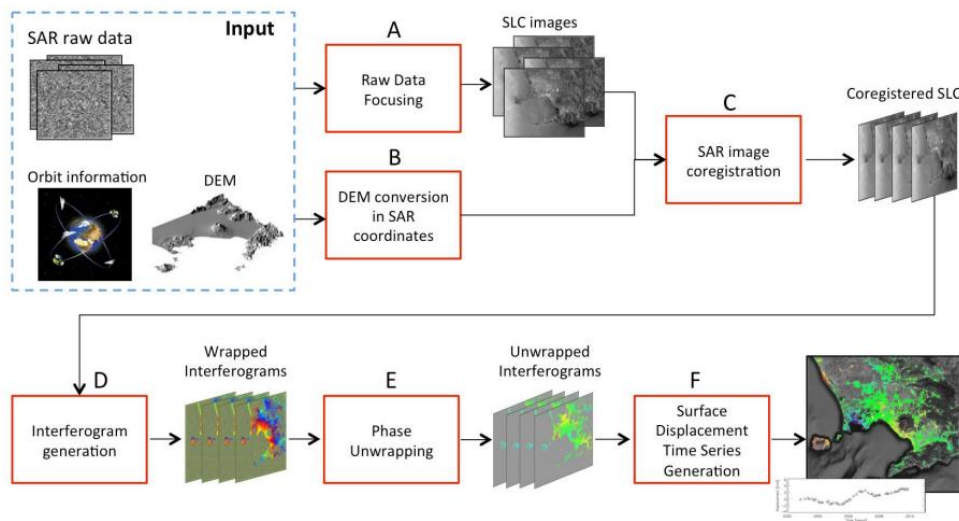


Figura 21. Flujo diagrama del procesamiento P-SBAS. Tomado de De Luca et al. (2015).

### **3.3.8 Influencia de la atmósfera en los datos SAR**

Se había mencionado anteriormente que las microondas debido a su gran tamaño no eran afectadas por la dispersión atmosférica, la nubosidad y la lluvia, sin embargo, esto no es del todo cierto ya que si hay cierta influencia de las condiciones atmosféricas en la información de los datos SAR.

Según ESA (2007) como un par interferométrico es formado por dos imágenes SAR tomadas en diferentes fechas, las condiciones atmosféricas no son las mismas para ambas, y esos cambios como la humedad, la temperatura y la presión atmosférica puedan afectar los datos de la fase de cada imagen y por ende la diferencia de fase del interferograma.

Cuando la señal del radar pasa la atmósfera tanto de ida como de regreso, esta sufre un retraso el cual provoca que la misma pierda exactitud generando errores que aumentan o exageran los valores de deformación. Zebker y Rosen (1996) mencionan que factores como la presión y la temperatura pueden generar distorsiones en los datos de deformación, pero a menor escala comparado con el factor de la humedad, ya que determinan que bajo condiciones de humedad relativa del 20% el error en los datos puede rondar entre los 10 y los 14 cm.

Existen algunos modelos que realizan correcciones atmosféricas como el ofrecido por el Generic Atmospheric Correction Service (GACOS). Por ejemplo, este modelo fue utilizado en el estudio de Rosell et al. (2019) en un área cercana a la ciudad de San Juan utilizando imágenes Sentinel-1 para el estudio de la deformación de ese terreno y como los modelos de corrección atmosférica implementados como el GACOS reducirían los efectos atmosféricos para tener mayor exactitud en los datos. Por ejemplo, la figura 22 muestra series de tiempo de desplazamiento de los interferogramas del estudio de Rosell et al. (2019) antes (A) y después de utilizar el modelo GACOS (B), se pueden notar diferencias en donde las series de tiempo con las

correcciones atmosféricas muestran un punto de quiebre notable representado por una línea vertical la cual indica un evento sísmico; dicho evento se puede evidenciar con claridad en las series de tiempo con corrección atmosférica en donde se observan que los valores de desplazamiento se “hunden” posteriormente a ese evento mostrando un notable subsidencia en la superficie.

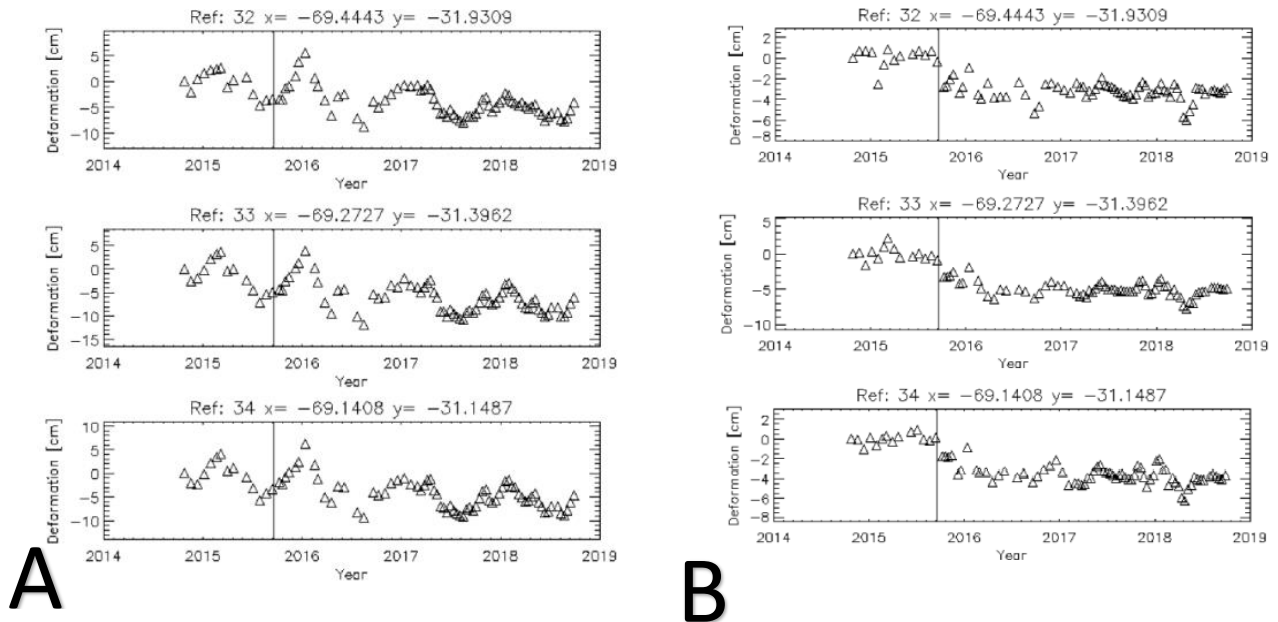


Figura 22. Gráficas de series de tiempo de la deformación, sin utilizar el modelo GACOS (A) y después de utilizar el modelo GACOS (B) computadas en el estudio de Rosell et al. (2019). Imágenes tomadas de Rosell et al. (2019).

### 3.3.9. Satelites Sentinel-1



Figura 23. Representación gráfica de uno de los satélites de la constelación Sentinel-1. Tomado de ESA, 2012.

La constelación satelital Sentinel-1 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) se compone de dos satelites (Sentinel-1A y Sentinel-1B), el primero fue lanzado en el año 2014 y el segundo en el año 2016. ESA (2012) introduce que la órbita de estos satélites es cuasi-polar heliosincrónica y está a una altitud de 693 km y que los objetivos de Sentinel-1 son el monitoreo de zonas de hielo en ambientes polares, el mapeo para ayuda humanitaria y situaciones críticas, la vigilancia de ambientes marinos, el monitoreo de los riesgos de la superficie terrestre, y el mapeo de tipos de cobertura como agua, suelo, cultivos y bosques.

#### **3.3.9.1. Instrumento CSAR**

El instrumento que utilizan estos satélites es el CSAR el cual trabaja con las microondas a una frecuencia de 5.405 GHz, este instrumento cuenta con varios modos operacionales para la obtención de imágenes, el Wave Mode (WM), Strip Map Mode (SM), el Extra Wide-swath



Mode (EW) y siendo el más importante para el uso de interferometría el el Interferometric Wide-swath Mode (IW) (ESA, 2012).

### 3.3.9.2. Modo Operacional IW

Este modo trabaja con polarización dual (HH + HV, VV + VH), con un ángulo entre  $31^\circ$  a  $46^\circ$ , con una resolución del acimut de 20m, con una resolución del rango de superficie de 5m, y un swath o ancho de barrido de 250km (ESA, 2012). El modo IW trabaja con la técnica Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR) propuesta por De Zan y Guarnieri (2006), en la cual los datos se adquieren en ráfagas mediante el movimiento cíclico del haz de la antena del radar entre varias franjas adyacentes, (ESA, 2020), esto permite que la información adquirida tenga mayor calidad que con otras técnicas. La manera como la información se adquiere con la técnica TOPSAR se visualiza en la figura 24.

A través del modo IW se adquieren imágenes Single Look Complex (SLC), estas se dividen en 3 sub-franjas o sub-swaths (IW1, IW2, IW3) y en varias ráfagas o burst como se puede ver en la figura 25.

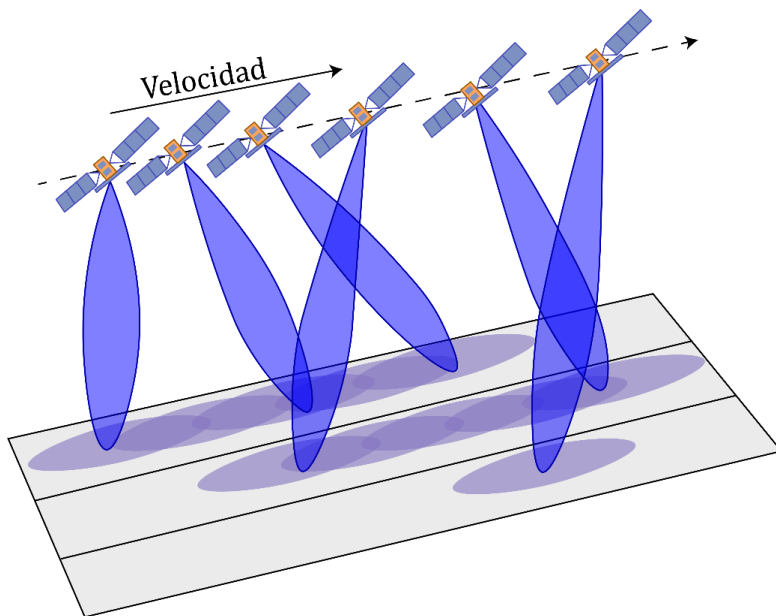


Figura 24. Representación gráfica de la adquisición TOPSAR Sub-Swath. Adaptado de ESA, 2020.

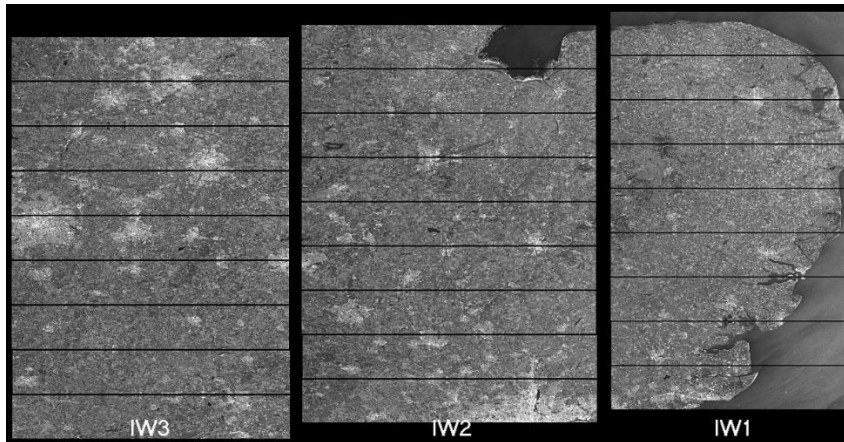


Figura 25. Productos SAR SLC en formato IW. Tomado de ESA, 2020.

### ***3.3.9.3 Algunos estudios DInSAR en Sentinel-1***

Algunos trabajos realizados con técnica DInSAR en imágenes SAR Sentinel-1 son los siguientes:

Un estudio significativo fue realizado por Fárova et al. (2019) en donde hicieron un análisis comparativo entre las técnicas PSI y la técnica DInSAR estándar del software SNAP aplicadas al monitoreo de estabilidad vertical en una autopista en República Checa, en la cuales durante su construcción sucedió un movimiento en masa en junio de 2013. Ambas metodologías utilizaron imágenes Sentinel-1 las cuales fueron procesadas en el programa SNAP, siendo validados los resultados con medidas geodésicas, de inclinómetros 3D, y escáneres láser, al final demostrando tener resultados similares, pero muchos más precisos para la técnica PSI.

Referente a actividad volcánica, De Novellis et al. (2017) realizaron un estudio en el volcán Wolf de las islas Galápagos en el para determinar la deformación que experimentó durante su erupción en el año 2015 con imágenes Sentinel-1A, además también utilizaron imágenes SAR ENVISAT entre los períodos 2004 y 2010 para analizar el comportamiento de la deformación del volcán antes del evento eruptivo utilizando la técnica SBAS.

También Wang et al. (2019) investigaron el comportamiento de la deformación de un volcán, para el caso de su estudio fue el volcán Asama en Japón utilizando 120 imágenes Sentinel-1 con órbitas ascendentes y descendentes y también 20 imágenes ALOS-2 con órbitas descendentes entre los años 2014 y 2018. En este estudio se enfocaron en analizar las regiones del volcán con menor vegetación, por lo tanto, requirieron del uso del índice NDVI y trabajar en las zonas menores a 0,4 de ese índice.

Como se había mencionado anteriormente el trabajo de Rosell et al. (2019) utilizó imágenes Sentinel-1 para visualizar la deformación de la superficie cercana a la ciudad de San Juan en Argentina, las cuales fueron corregidas atmosféricamente por el modelo GACOS y gracias a ello se pudo identificar una deformación en subsidencia como consecuencia de un evento sísmico.

Para Colombia, no ha habido muchos estudios referentes a estas técnicas DInSAR con imágenes Sentinel-1, siendo una de las pocas investigaciones realizada por Tocasucho & Peñaloza (2018) pero este estuvo enfocada a deslizamientos o movimientos en masa en la Provincia Norte y Valderrama en el Departamento de Boyacá utilizando imágenes SAR del Satélite Sentinel-1.

## 4. Metodología

### 4.1. Zonas de estudio

Los objetos de estudio son el volcán Galeras y el complejo volcánico Chiles – Cerro Negro de Mayasquer, estos se encuentran ubicados en la cordillera de los Andes en Suramérica, específicamente en la región suroccidental de Colombia en el departamento de Nariño, el volcán Galeras sólo se localiza en dicho departamento mientras que los volcanes Chiles y Cerro Negro también tienen una porción de su extensión en la región norte de Ecuador en la provincia de Carchi, ya que ese complejo se localiza en el límite territorial de ambos países. Ver figura 26.

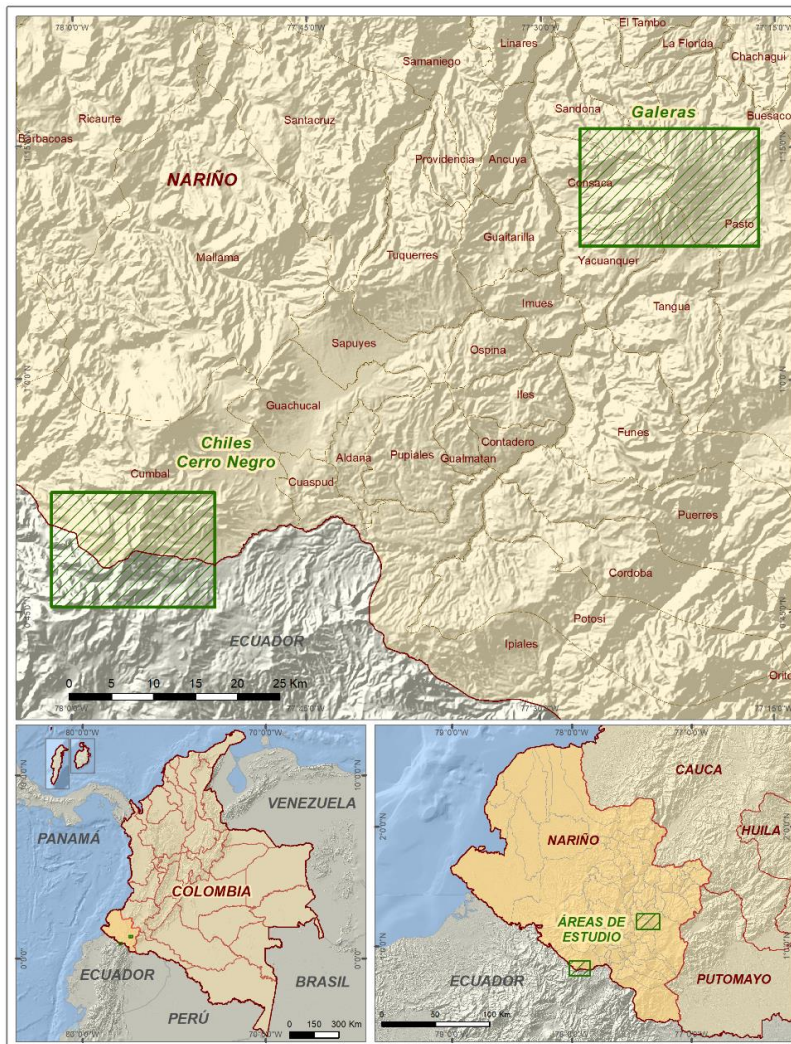


Figura 26. Mapas de localización de las zonas de estudio. Elaborado por Sarah Weber, 2021.

El volcán Galeras es un estratovolcán que se encuentra a 9 km al occidente de la ciudad de San Juan de Pasto (capital de ese departamento), ver figura 2; el cual presenta una elevación máxima de 4272 msnm, litológicamente está conformado por rocas ígneas volcánicas de tipo andesita principalmente y se le determinó una edad aproximada a 1 millón de años (Cepeda, 1984), es decir, que se formó durante la época del Pleistoceno del Período Cuaternario.

Es uno de los volcanes más activos en Colombia, tiene un comportamiento explosivo y desde los últimos 4500 años ha provocado 6 erupciones de gran magnitud, sin embargo, la actividad más reciente del volcán inició en 1988 la cual ha generado eventos eruptivos de tipo vulcaniano (SGC, 2015), y precisamente desde el año 1989 está siendo monitoreado por el Servicio Geológico Colombiano.

Como se observa en la figura 27 que es una imagen satelital Sentinel-2 en color natural (Canal Rojo = Banda del Rojo, Canal Verde = Banda del Verde, Canal Azul = Banda del Azul), la región del volcán Galeras está densamente vegetada, resaltándose mucho mejor esa vegetación en la figura 28 con la misma imagen pero en falso color (Canal Rojo = Banda Infrarrojo cercano, Canal Verde = Banda Infrarrojo medio de onda corta, Canal Azul = Banda del rojo), la vegetación se ve de color marrón rojizo y anaranjado, mientras que el suelo descubierto, roca expuesta y estructuras artificiales se ven de color azul oscuro a azul verdoso.

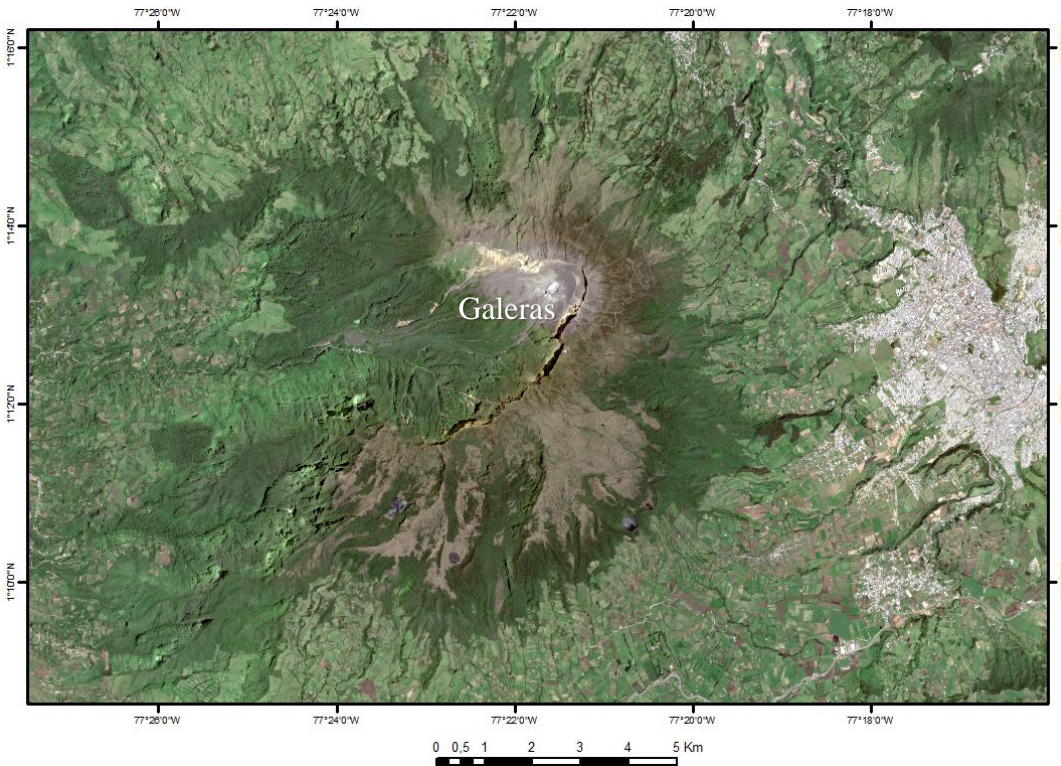


Figura 27. Imagen óptica del volcán Galeras del 6 de febrero de 2020 obtenida del satélite Sentinel-2 en color natural, se puede apreciar en el centro de la imagen el cráter del volcán y al este se encuentra la ciudad de San Juan de Pasto. Fuente propia.

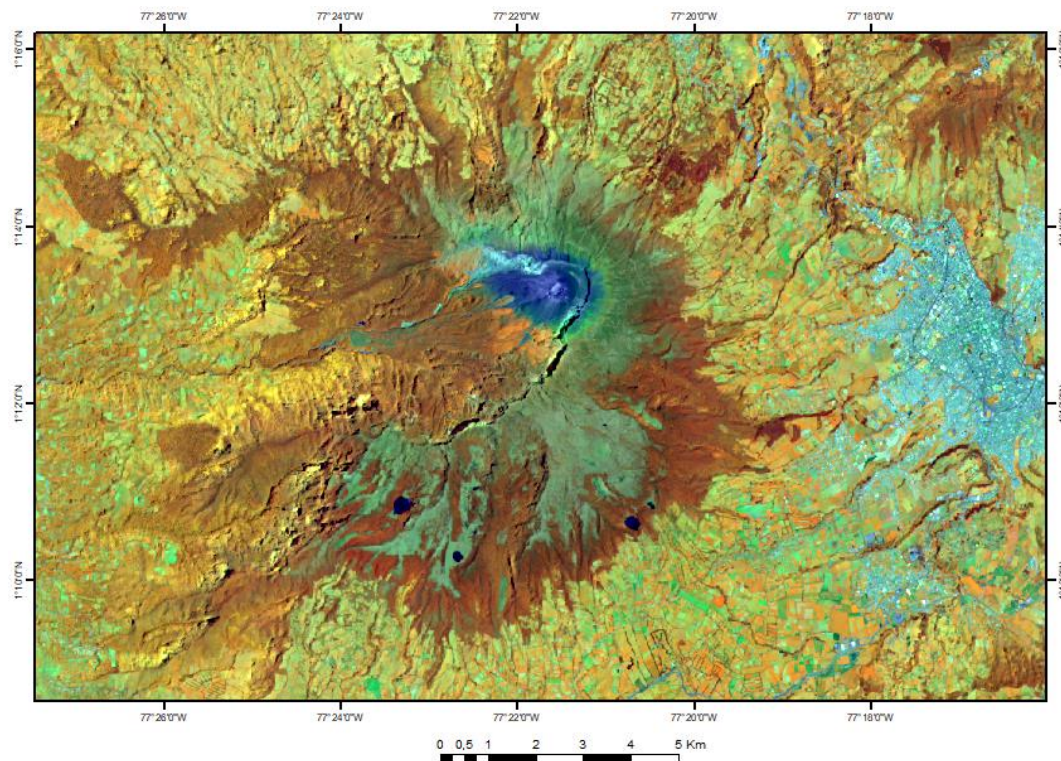


Figura 28. Imagen óptica del volcán Galeras obtenida del satélite Sentinel-2 en falso color. Fuente propia.

Como se mencionó anteriormente, el complejo volcánico Chiles - Cerro Negro de Mayasquer son estratovolcanes ubicados en el límite territorial entre Colombia (departamento de Nariño) y Ecuador (provincia de Carchi), este complejo tiene una elevación máxima de 4748 msnm en el volcán Chiles y 4470 msnm en el volcán Cerro Negro (IGEPN, 2015).

A diferencia del volcán Galeras este complejo volcánico no presenta un historial eruptivo reciente. Sin embargo, desde el año 2013 estos volcanes están siendo monitoreados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador (IGEPN) y por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVS-Pasto) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Monsalve y Laverde, 2016) y cuyos datos obtenidos han mostrado una interesante actividad para ambos volcanes.

En las figuras 29 y 30 se aprecian imágenes satelitales Sentinel-2 de este complejo volcánico, en donde se ve que esa región tiene menor densidad de vegetación con respecto al volcán Galeras.

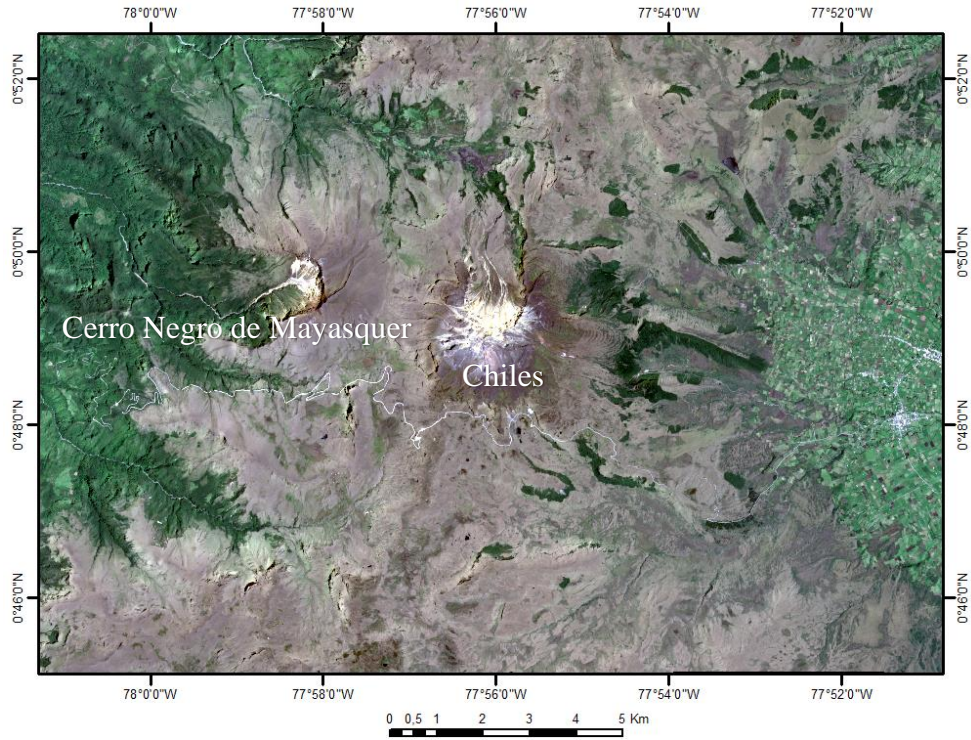


Figura 29. Imagen óptica de los volcanes Chiles y Cerro-Negro del 11 de febrero de 2020 obtenida del satélite Sentinel-2 en color natural, se puede apreciar en el centro de la imagen el cráter del Chiles y al oeste el cráter del volcán Cerro-Negro. Fuente propia.

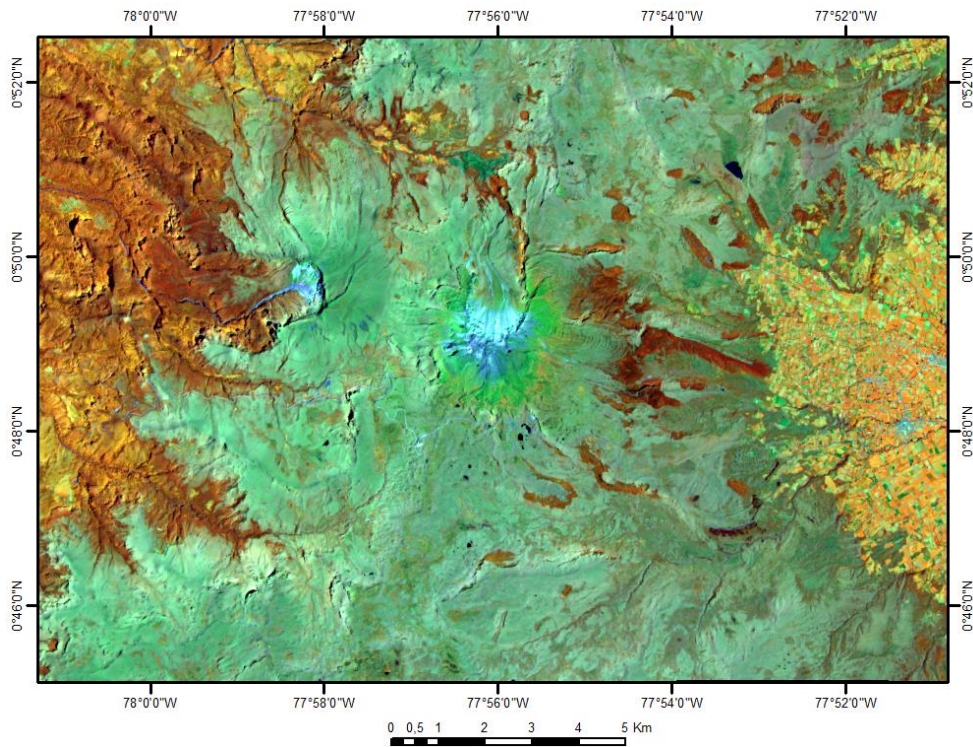


Figura 30. Imagen óptica de los volcanes Chiles y Cerro Negro obtenida del satélite Sentinel-2 en falso color. Fuente propia.



#### **4.2. Imágenes satelitales y softwares de procesamiento.**

Para el procesamiento DInSAR se utilizaron 88 imágenes SAR Sentinel-1, 67 de ellas sobre el volcán Galeras y 21 sobre el complejo volcánico Chiles – Cerro Negro de Mayasquer, la colección de imágenes del Galeras tiene un rango de tiempo entre enero del año 2017 hasta diciembre del año 2019 y la colección de imágenes de Chiles – Cerro Negro comprende un período desde junio de 2019 hasta diciembre de 2020. Se tomaron esas fechas como períodos de estudio a analizar, porque para el caso del Galeras se interesó en conocer el comportamiento del desplazamiento durante los últimos años de la década 2010 – 2019, y para el caso de Chiles – Cerro Negro se estudió ese período en específico porque solamente a mediados del año 2019 se instaló la estación GNSS El Morro en el volcán Chiles y como uno de los objetivos de la presente investigación es verificar el comportamiento del desplazamiento con la información DInSAR con la de los datos GNSS no se pudo tener un período de estudio como en el caso del Galeras, por lo tanto, para que tampoco la información de Chiles fuese muy escasa también se tomó el año 2020 como tiempo de estudio para ese caso; además también se consideraron dichos períodos de tiempo como recomendación de profesionales del Servicio Geológico Colombiano quienes tuvieron interés en conocer la información de desplazamiento a partir de procesamiento DInSAR para esos volcanes en esos rangos temporales.

Las imágenes Sentinel-1 se descargaron de la página web Alaska Satellite Facility de la NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), esas imágenes son de uso libre. Estas se obtuvieron como productos Single Look Complex (SLC) los cuales trabajan con datos de altitud y orbitales del satélite, y en formato IW (Interferometric Wide) que permite adquirir información de la superficie con un swath de 250 km. El procesamiento de las imágenes SAR se realizó en el

programa SNAP de la Agencia Espacial Europea. En la tabla 2 se pueden observar las especificaciones de las imágenes.

Tabla 2

*Datos específicos de las imágenes Sentinel-1 utilizadas para este estudio.*

Zona	Satélite	Primera imagen	Última imagen	Dirección de vuelo	Pista	Tipo de producto	Formato	Número de adquisiciones
Galeras	S1B	2/01/2017	18/12/2019	Descendente	142	SLC	IW	67
Chiles y Cerro Negro	S1A-S1B	3/07/2019	30/12/2020	Descendente	142	SLC	IW	21

Elaboración propia.

Estas imágenes además presentan una línea base perpendicular cuyo valor máximo es de 162m para el volcán Galeras y de 112m para el volcán Chiles, evitando que la distancia entre las tomas de las imágenes sea muy grande y se presente a causa de ello una alta decorrelación, ver figura 31.

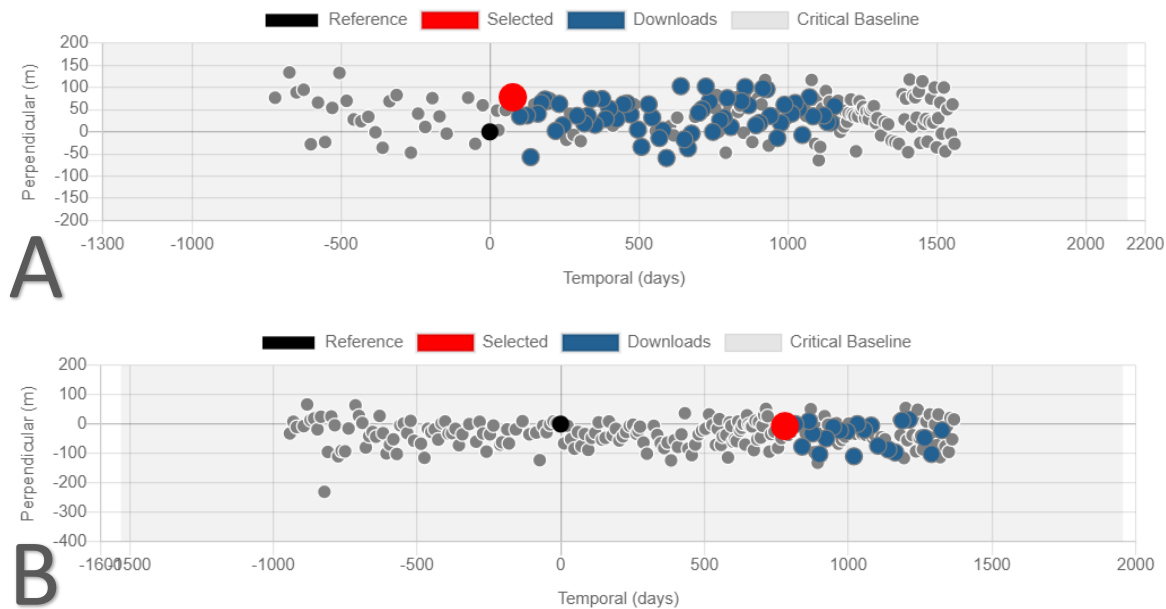


Figura 31. Gráficas de la línea base perpendicular de las imágenes SAR utilizadas para generar los interferogramas del volcán Galeras (A), y del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro (B). Fuente propia.

También se tuvieron en cuenta datos de desplazamiento vertical de estaciones GNSS ubicadas en los volcanes de estudio, cuyos datos de ubicación y elevación sobre el nivel del mar se observan en la tabla 3 y 4.

Tabla 3

*Datos geográficos de las estaciones GNSS del volcán Galeras.*

<b>Estaciones GNSS</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
Cráter	1°12'28.44"N	77°21'31.77"O	4060,4m
Cóndor - Pasto	1°11'31.49"N	77°23'10.25"O	3984,2m
Peladitos	1°12'49.61"N	77°20'55.28"O	3930,7m
Barranco	1°13'52.70"N	77°22'30.33"O	3903,6m
Cufiño	1°13'36.93"N	77°20'44.43"O	3822,4m
Cobanegra	1°11'6.61"N	77°20'37.93"O	3633,9m
Cóndor	1°10'13.10"N	77°24'16.55"O	3527,3m
Chiguaco	1°14'46.40"N	77°21'31.58"O	3509,2m
Mapachico	1°13'57.24"N	77°20'7.21"O	3284,5m
San Cayetano	1°13'26.80"N	77°19'21.72"O	3047m
Nariño	1°16'2.45"N	77°21'46.40"O	2844,5m

Elaboración propia.

Tabla 4

*Datos geográficos de la estación GNSS El Morro en el volcán Chiles.*

<b>Estación GNSS</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
El Morro	0°49'57.04"N	77°55'39.88"O	4075,1m

Elaboración propia.

Como complemento para el análisis DInSAR se obtuvieron datos de mapas de velocidad desplazamiento en línea de vista (LOS) generados automáticamente con el algoritmo P-SBAS en la aplicación temática SBAS Ground Motion Services del instituto CNR-IREA de Italia en la plataforma Geohazards TEP de la organización Terradue (<https://geohazards-tep.eu/#!>); el manejo de esa plataforma fue posible gracias al patrocinio de la Agencia Espacial Europea por medio de Network of Resources (NoR) (<https://nor-discover.cloudeo.group/>).

Para el análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se utilizaron 2 imágenes satelitales multiespectrales Sentinel-2, una para la región del volcán Galeras y otra para la región de los volcanes de Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, las cuales fueron descargadas y procesadas automáticamente utilizando la plataforma Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>).

En el análisis de las condiciones atmosféricas se utilizó información del sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P para la fracción de nubosidad, datos del ERA5 para la temperatura atmosférica 2m por encima del suelo y datos del GFS para la humedad relativa 2m por encima del suelo, esta información fue obtenida también de la plataforma Google Earth Engine.

Finalmente, se utilizaron los softwares de Global Mapper, ArcGIS y la plataforma Google Earth para la visualización de las imágenes satelitales, y el software Excel para la visualización de los datos.

### 4.3. Fase InSAR

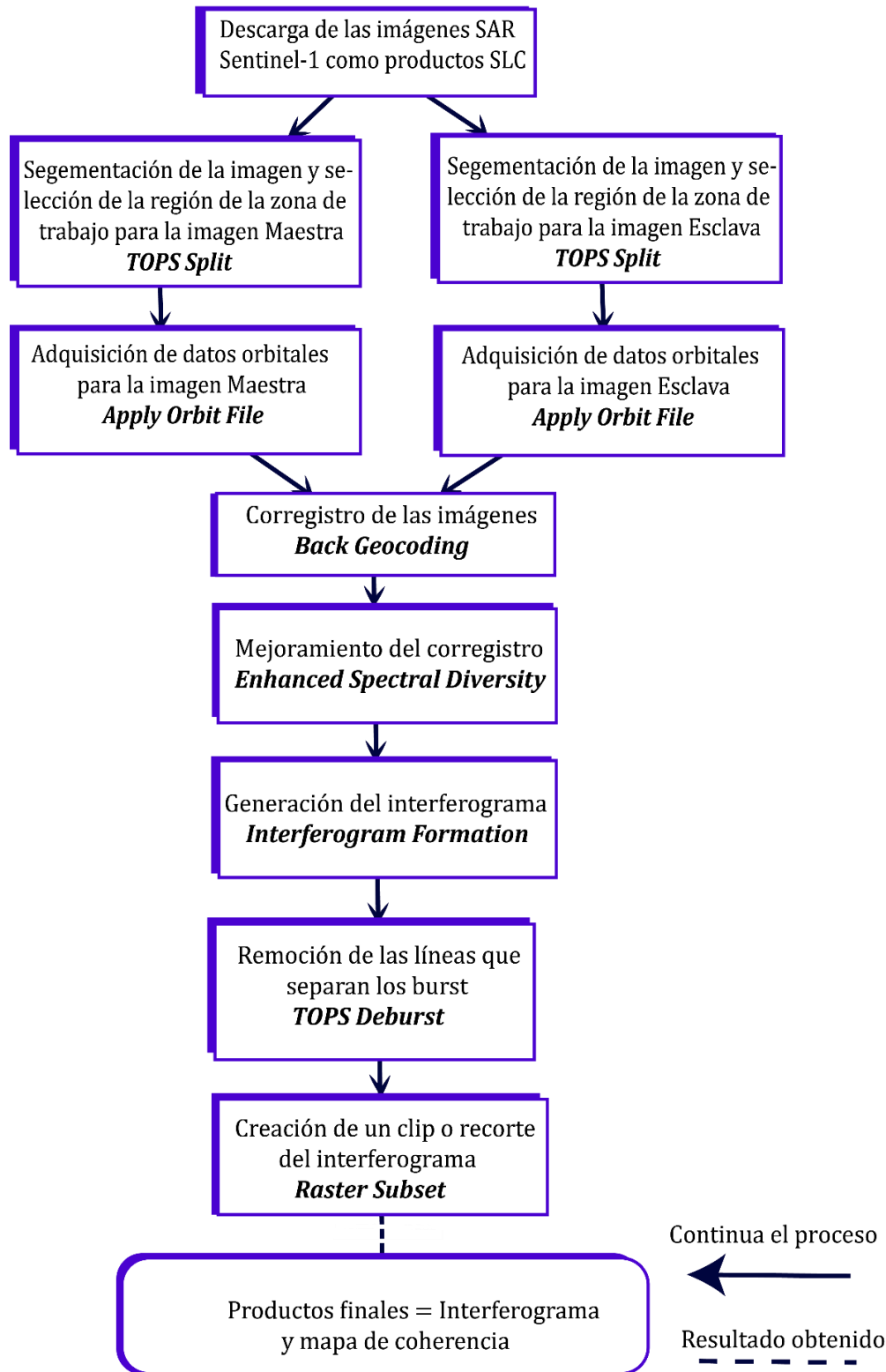


Figura 32. Flujograma de la fase InSAR. Elaboración propia.

Cada una de las imágenes descargadas se dividen en una serie de filas y columnas, las filas son llamadas Burst y las columnas son llamadas IW, entonces para obtener la sección de interés de la imagen, esta se dividió con la herramienta *TOPSAR Split*. En la figura 33 se puede observar que las imágenes tienen una apariencia lluviosa en tonalidades de blanco a negro.

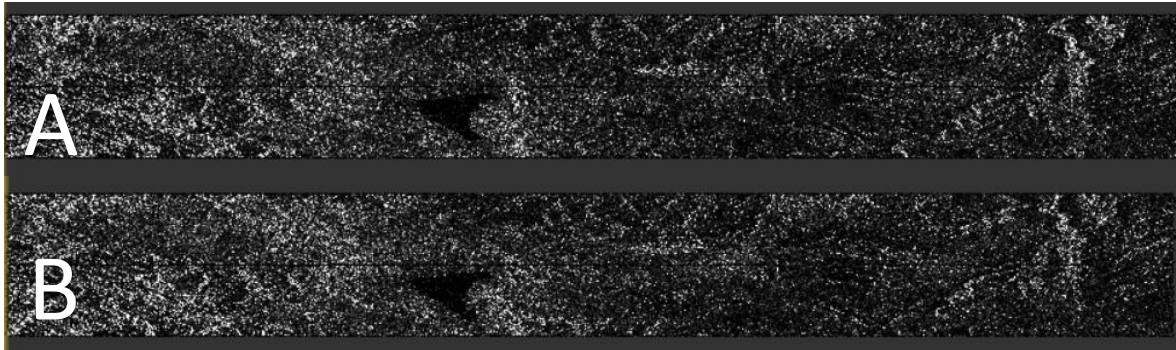


Figura 33. Secciones de imágenes SAR en producto SLC de la imagen maestra (A) del 2 de junio de 2018, y de la imagen esclava (B) del 20 de julio de 2018, está comprendida por dos burst y una IW. Fuente propia.

Después de dividir todas las imágenes para que sólo correspondan a las regiones de interés, a estas se les emplea la herramienta *Apply Orbit File* con el fin de adquirir los datos orbitales la del satélite Sentinel-1 al momento de tomar la imagen. En la figura 34 se visualiza un resultado visualmente idéntico como en el paso anterior.

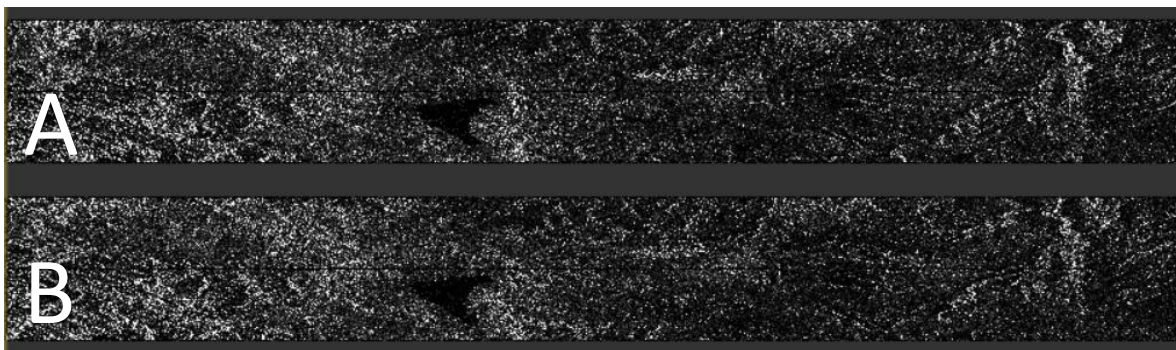


Figura 34. Secciones de las imágenes maestra (A) y esclava (B), después de utilizar el *Apply Orbit File*. Fuente propia.

Para generar un interferograma se necesita de dos imágenes, la imagen maestra y la imagen esclava, estas se apilan para formar una sola imagen que es la corregistrada. La herramienta

utilizada se llama **Back Geocoding**, su función es corresponder la ubicación de cada píxel de la imagen maestra con su píxel homólogo en la imagen esclava, formando así un paquete o “stack” con ayuda de un Modelo Digital de Elevaciones (MED). El resultado se observa en la figura 35 en combinación RGB (Canales Red y Green = Intensidad de la imagen maestra, Canal Blue = Intensidad de la imagen esclava).

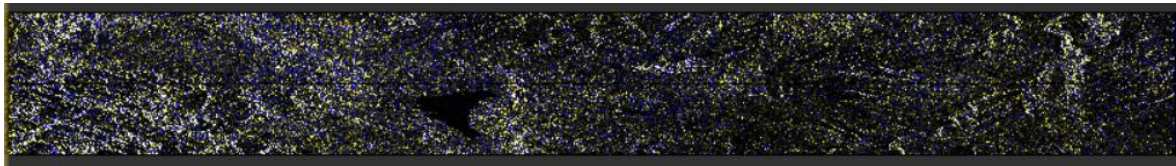


Figura 35. Imagen corregistrada (stack) con la herramienta **Back Geocoding** de los archivos del 2 de junio y 20 de julio de 2018, visualizada en canales RGB. Fuente propia.

A cada stack de imágenes se le realiza un mejoramiento del corregistro con la herramienta **Enhanced Spectral Diversity** para arreglar el desplazamiento entre el rango y el acimut de los píxeles. Su visualización es muy similar al resultado anterior (figura 36).

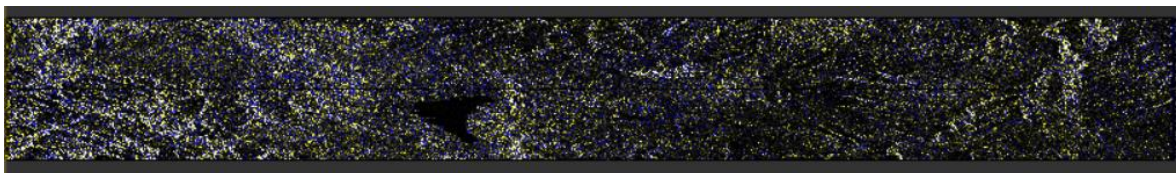


Figura 36. Imagen con el corregistro mejorado gracias a la herramienta **Enhanced Spectral Diversity** de los archivos del 2 de junio y 20 de julio de 2018, visualizada en canales RGB. Fuente propia.

Ya se puede construir el interferograma con la herramienta **Intererogram Formation** para cada una de las parejas de imágenes, cuando se generó se observó que las imágenes presentan una coloración con textura lluviosa y con una línea negra que separan los dos burst de cada imagen como se observa en la figura 37; además con el interferograma se genera también el mapa de coherencia, el cual indica la que tan baja o que tan alta o baja es la correlación entre las

dos imágenes que forman el interferograma con los datos de fase obtenidos en la superficie en un punto en el terreno.

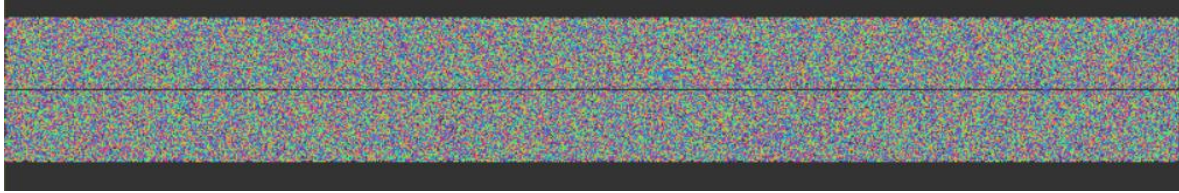


Figura 37. Interferograma generado con la herramienta *Interferogram Formation*. Fuente propia.

Las imágenes SAR están compuestas por varios burst, estos son separados por líneas como se ve en la figura anterior. Para remover esta línea que divide los burst se utiliza una herramienta llamada *TOPS Deburst*, de esta manera la imagen se ve con mayor calidad (figura 38). Esta es la última etapa del procesamiento InSAR.

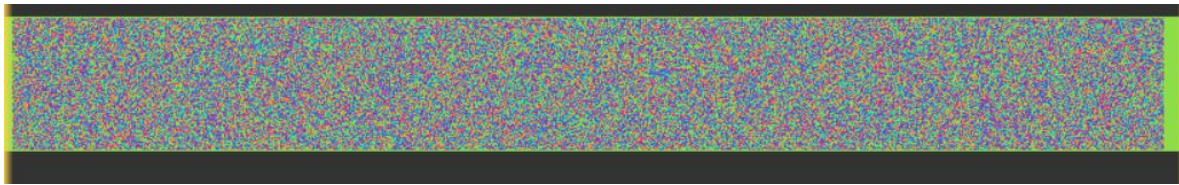


Figura 38. Interferograma sin la línea que separa los burst, la línea fue removida con la herramienta *TOPS Deburst*. Fuente propia.

Posteriormente al deburst de los interferogramas, se recortó con la herramienta *Subset* a un área más específica de la zona de interés, esta etapa es opcional en el procesamiento, pero muy recomendable para agilizar el procesamiento.



#### 4.4. Fase DInSAR

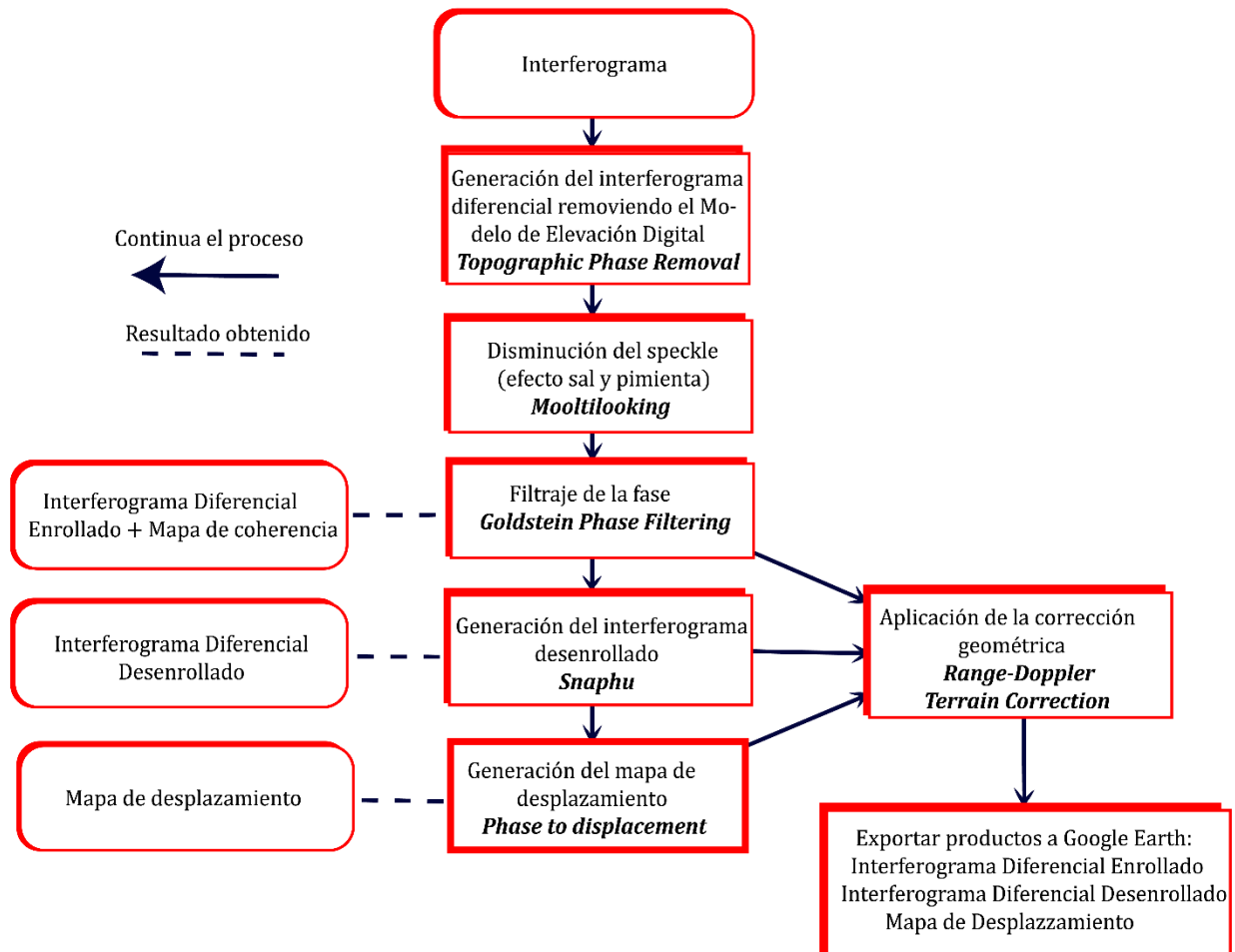


Figura 39. Flujo para la fase DInSAR. Elaboración propia.

Posteriormente a la fase InSAR se continuó con la fase DInSAR para obtener los interferogramas diferenciales y los mapas de desplazamiento. Para iniciar con este procesamiento se necesitó remover el MED del interferograma para que los interferogramas sólo fuesen afectados por el factor de desplazamiento y no por las características topográficas y de elevación, para ello se utilizó la herramienta *Topographic Phase Removal*, siendo el producto generado un interferograma diferencial enrollado tal y como se puede apreciar en la figura 40.

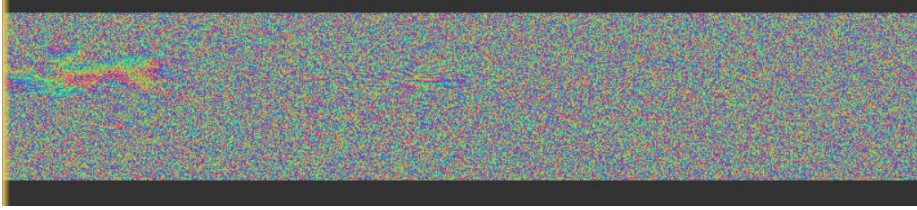
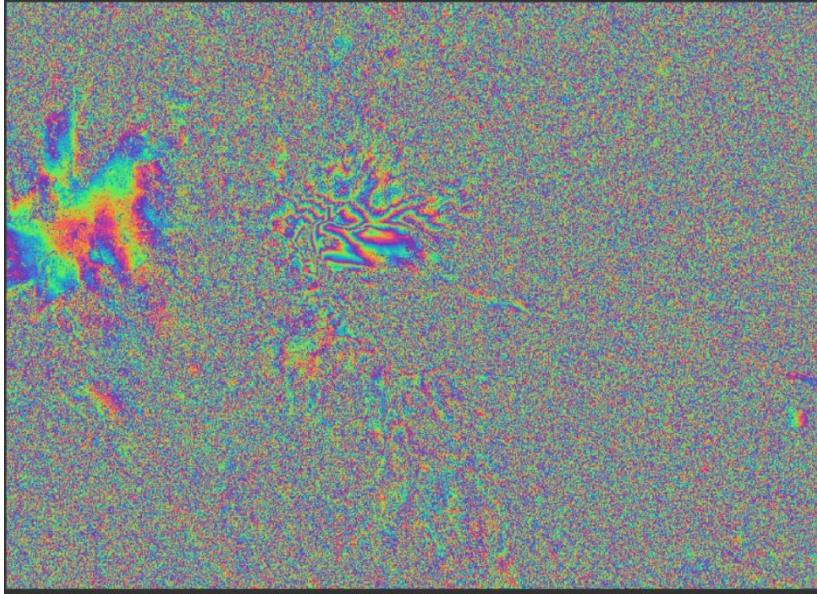


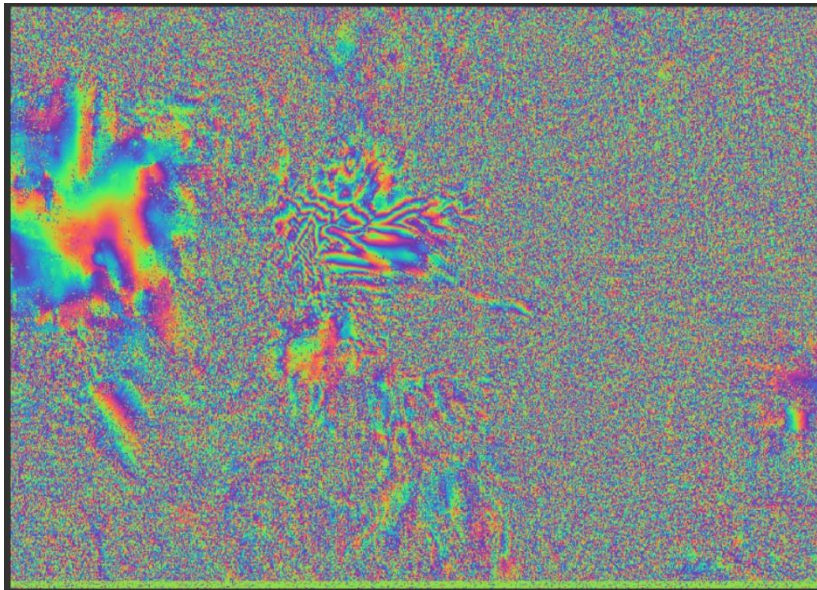
Figura 40. Interferograma diferencial generado a partir de la herramienta *Topographic Phase Removal*, recortado para la zona de estudio utilizando la herramienta *Subset*. Fuente propia.

Teniendo el interferograma diferencial, a este se le removió lo máximo posible el ruido utilizando la herramienta *Multilooking*, a través de esta herramienta la forma de la imagen se adecuó más a un cuadrado y no a un rectángulo como anteriormente se observaba ya que se aumentó la resolución en rango (número de miradas rango = 8) y en acimut (número de miradas en acimut = 2) disminuyendo la resolución espacial pero aumentando la resolución radiométrica, al realizar esto la imagen obtuvo menor ruido. También se puede observar que gracias a eso se pueden visualizar mucho mejor las franjas o fringes del interferograma, como muestra en la figura 41, siendo estas franjas más frecuentes en la zona que se encuentra el volcán Galeras (centro de la imagen), indicando una diferencia de fase ocasionada por un presunto movimiento brusco o importante para esa región. La cantidad de fringes y el patrón de los colores pueden indicar cuanto se ha movido una zona y si este movimiento ha sido ascendente o descendente.



*Figura 41.* Interferograma diferencial con disminución del ruido de la imagen utilizando la herramienta **Multilooking**. Fuente propia.

Se utiliza la herramienta **Goldstein Phase Filtering** para filtrar la fase de cada interferograma y mejorar la calidad de la imagen. En la figura 42 las franjas de colores o fringes se ven mucho mejor con este filtro.



*Figura 42.* Interferograma diferencial con la fase filtrada, utilizando la herramienta **Goldstein Phase Filtering**. Fuente propia.

Para desenvolver la fase de cada interferograma se necesitó una herramienta llamada *Snaphu*. El producto generado es un interferograma desenrollado que permite visualizar la suma de los números enteros de ciclos de fase  $2\pi$  a las franjas interferométricas (Ferretti et al., 2007) para tener una medida con mayor precisión entre la antena del radar y la superficie y así con posteriores cálculos determinar el valor del desplazamiento. La imagen generada muestra un interferograma desenrollado, en el cual las tonalidades en rojo y púrpura indican levantamiento, tonalidades en verde que indican poca o nada de deformación y tonalidades en azul que indican subsidencia. Ver figura 43.

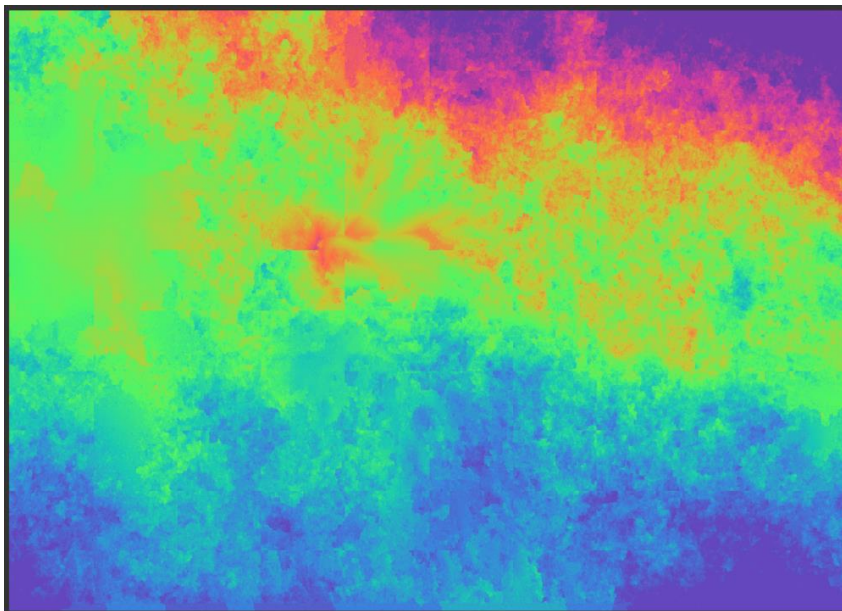


Figura 43. Interferograma desenrollado utilizando la herramienta *Snaphu*. Fuente propia.

Los interferogramas desenrollados presentan valores de la fase en radianes, pero se necesitan pasar a valores de longitud, en metros, por ejemplo, para ser mejor interpretados, por lo tanto, con ayuda de la herramienta *Phase To Displacement* a partir del interferograma desenrollado se construyó un mapa de desplazamiento vertical en línea de vista (LOS) de la superficie, con medidas en metros. Los mapas de desplazamiento se presentan en una paleta de colores, esta fue

construida manualmente teniendo como referencia el color azul para el mayor valor de levantamiento, el color rojo para el mayor valor de subsidencia y el blanco cuando el desplazamiento es 0m, tal y como se observa en la figura 44.

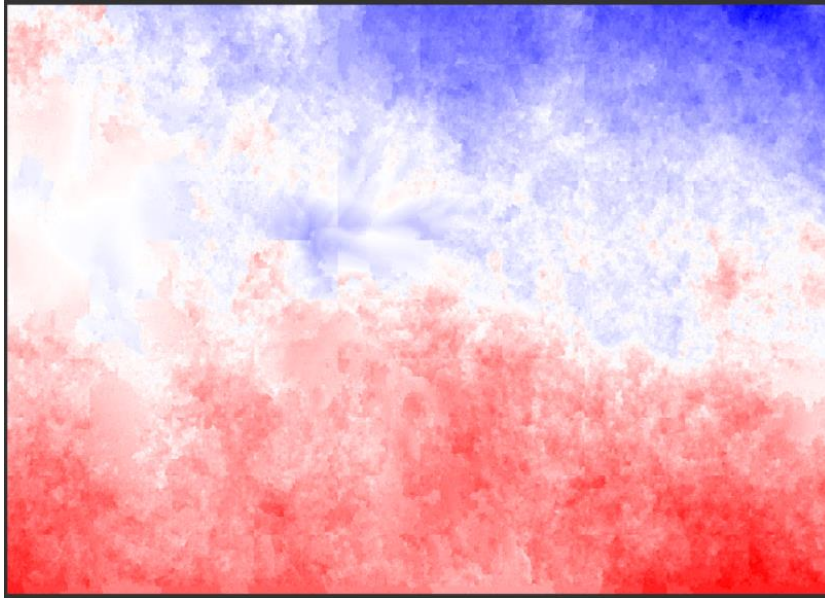


Figura 44. Imagen del mapa de desplazamiento (LOS), la cual se generó a partir del interferograma desenrollado utilizando la herramienta *Phase To Displacement*. Fuente propia.

Al construir el interferograma diferencial enrollado, el desenrollado, y el mapa de desplazamiento, se les asigna una corrección geométrica en la superficie teniendo como referencia el sistema de coordenadas WGS84, con ayuda de la herramienta *Range-Doppler Terrain Correction*, como se muestra en la figura 45.

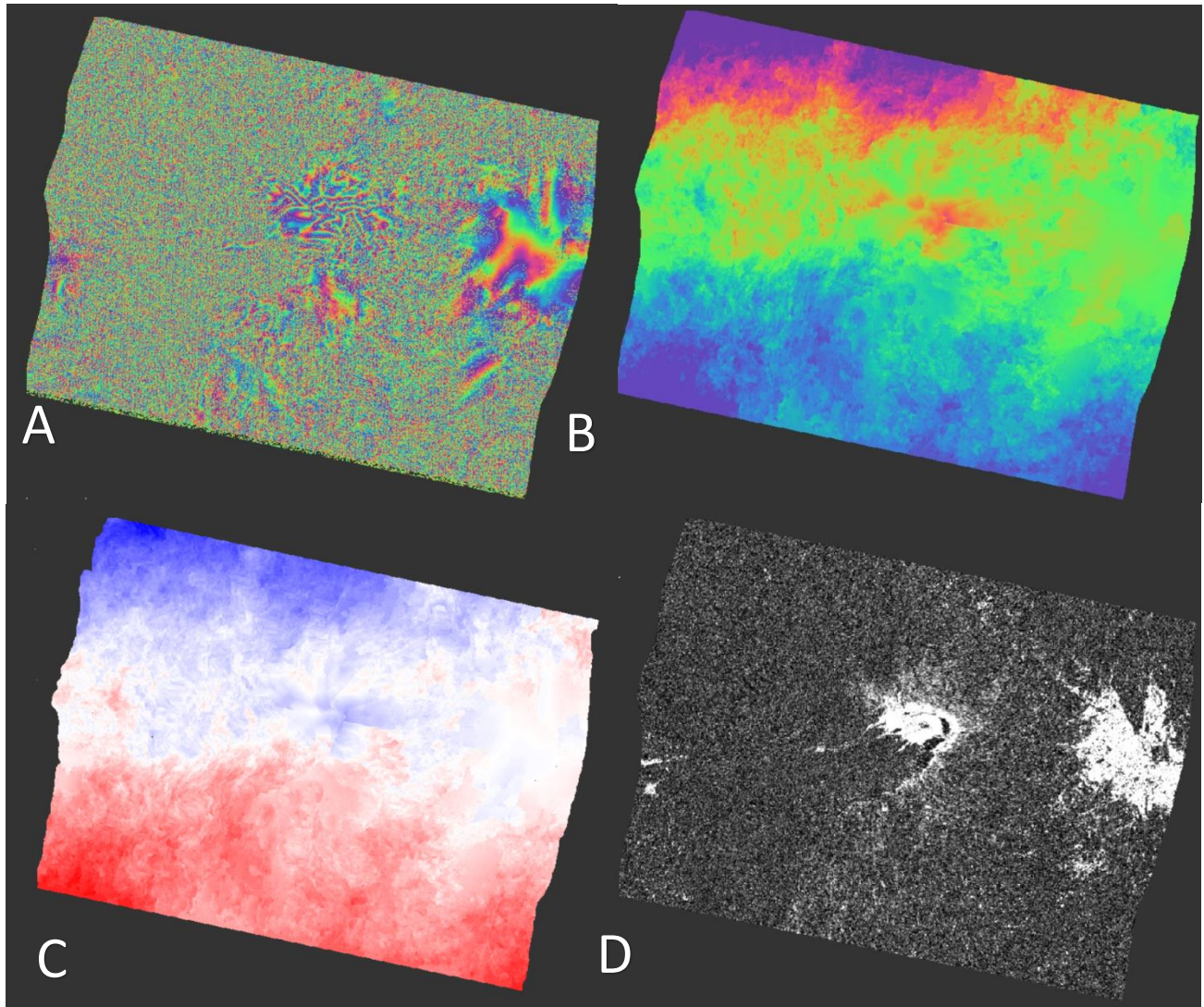


Figura 45. Interferograma diferencial enrollado (A), interferograma diferencial desenrollado (B), mapa de desplazamiento (C), mapa de coherencia (D) del volcán Galeras, con corrección geométrica utilizando la herramienta *Range-Doppler Terrain Correction*. Fuente propia.

Con los productos finales corregidos geoméricamente, estos se exportan a Google Earth como archivo kmz. Este paso es opcional pero recomendable ya que en Google Earth estos productos se pueden visualizar y analizar más fácilmente. Algunos ejemplos se observan en las figuras 46 y 47.

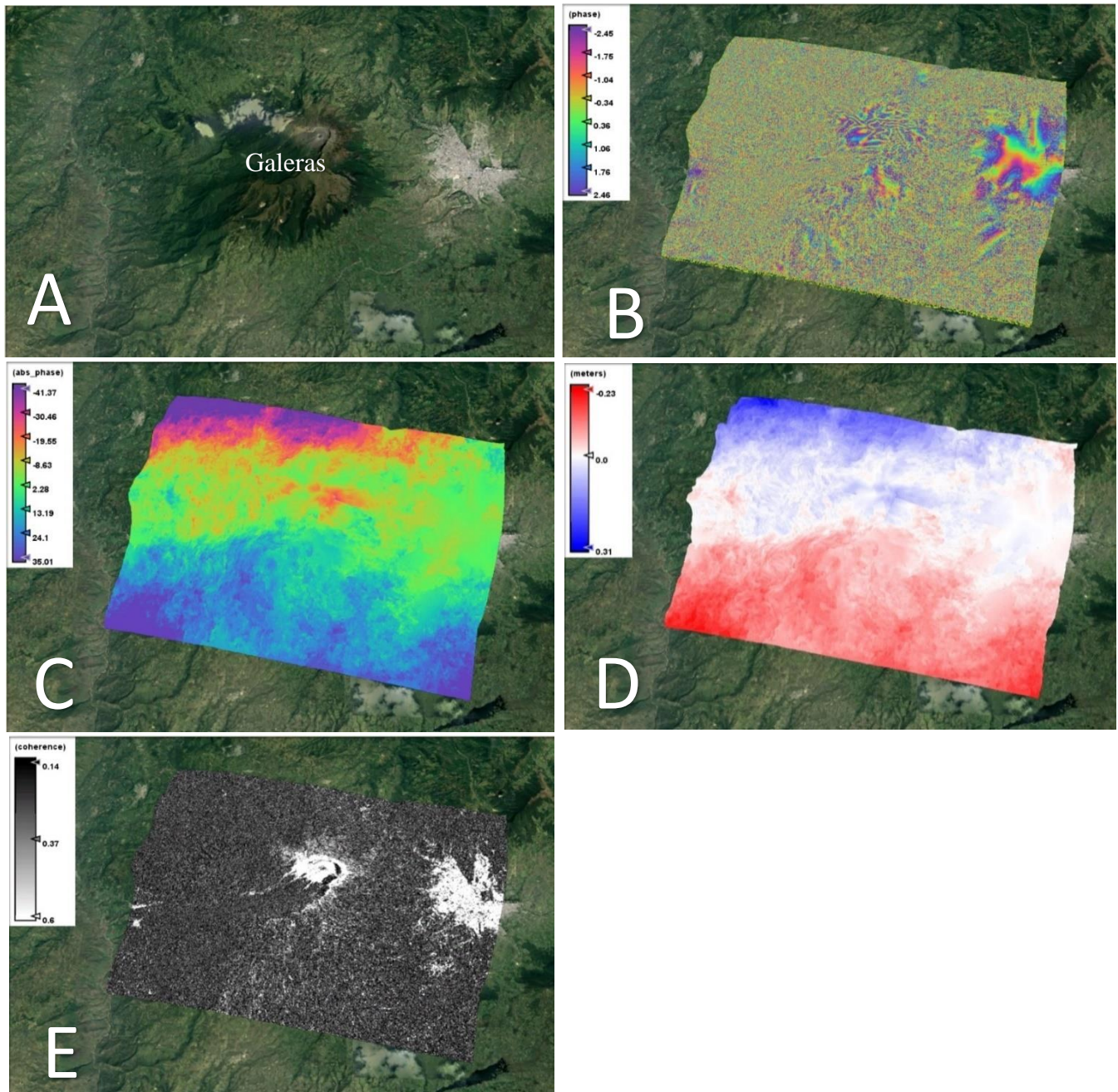


Figura 46. Mosaico de 5 imágenes que muestran la región del Galeras por medio de la plataforma Google Earth: Visualización satelital del volcán Galeras en el centro y en el este la ciudad de Pasto (A), interferograma diferencial enrollado (B), interferograma diferencial desenrollado (C), el mapa de desplazamientos (D), y el mapa de coherencia (E). Fuente propia.

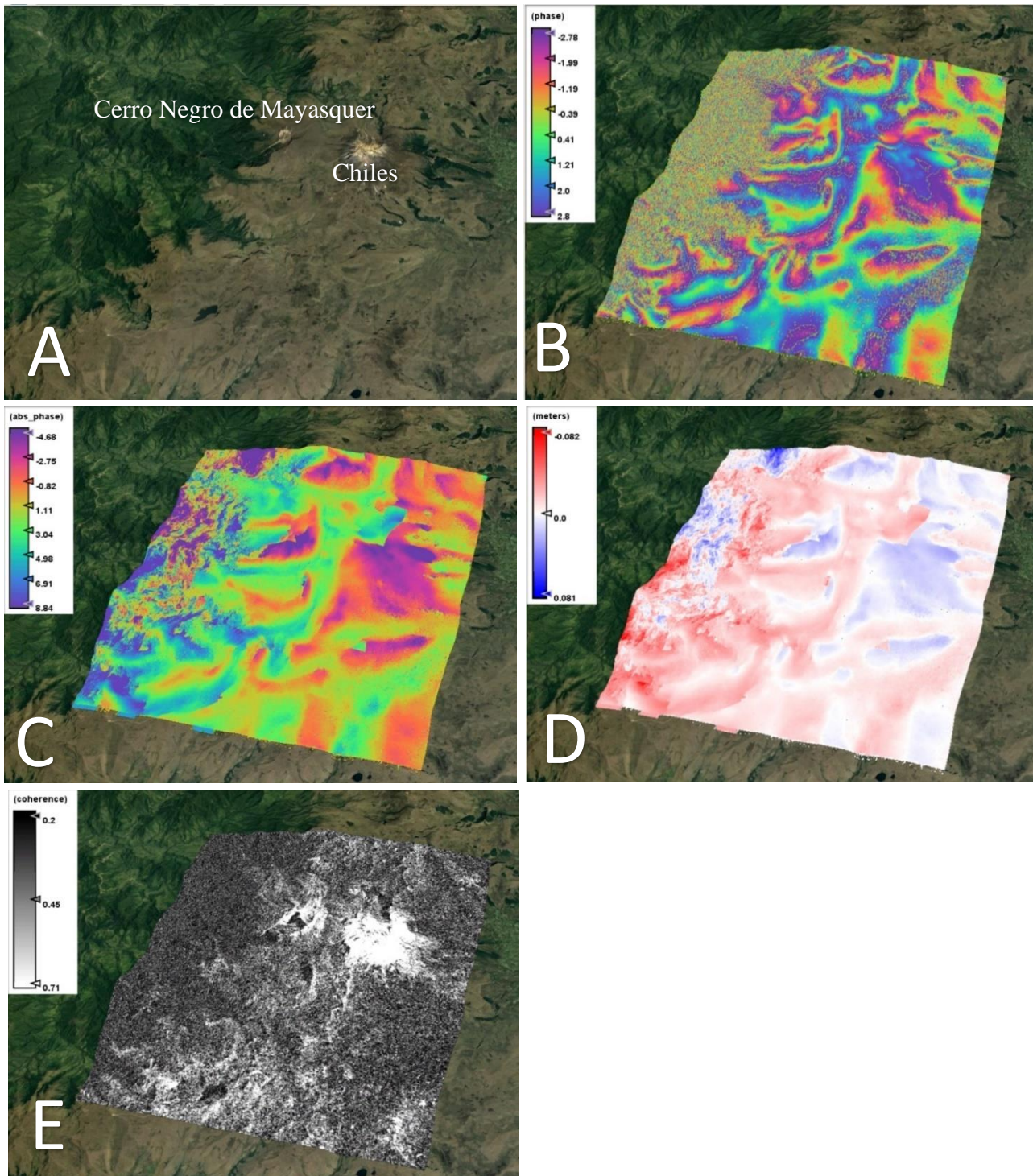


Figura 47. Mosaico de 5 imágenes que muestran la región del Chiles-Cerro Negro por medio de la plataforma Google Earth: Visualización satelital de los volcanes Chiles – Cerro Negro (A), interferograma diferencial enrollado (B), interferograma diferencial desenrollado (C), el mapa de desplazamientos (D), y el mapa de coherencia (E). Fuente propia.



## 4.5. Análisis de la Información

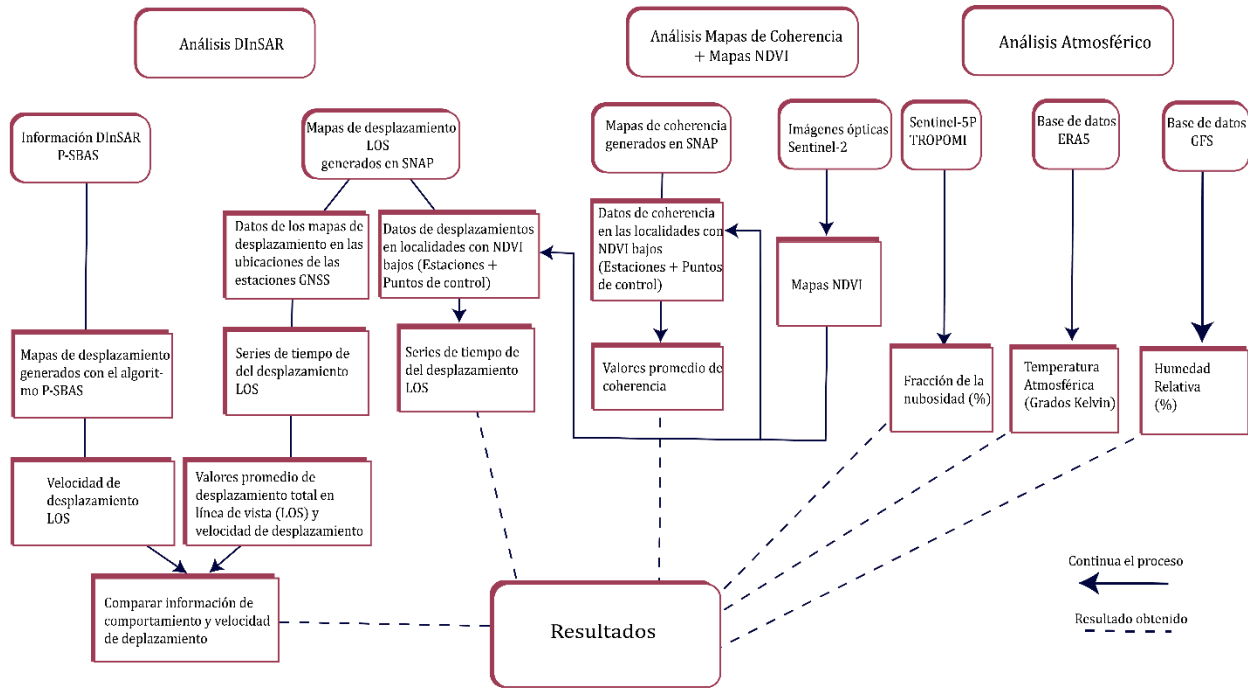


Figura 48. Flujograma para el análisis de la información. Elaboración propia.

### 4.5.1. Construcción de series de tiempo de los mapas de desplazamiento en línea de vista (LOS)

Los mapas de desplazamiento generados presentan un rango o una paleta de colores que varía del rojo que corresponde al valor más negativo (subsistencia), blanco cuando el valor es 0 (estabilidad) y el azul que indica el valor más alto (levantamiento), esa paleta de colores tiene una tabla de datos con las combinaciones RGB (Red, Green, Blue) y sus respectivos valores de desplazamiento para cada combinación de la paleta.

Cada una de las estaciones GNSS ubicadas en el volcán están sobre alguno de los píxeles del mapa de desplazamiento, el color que corresponde a ese píxel en combinación RGB determina como y cuanto fue que se desplazó ese punto del volcán. Ver figuras 49 y 50.

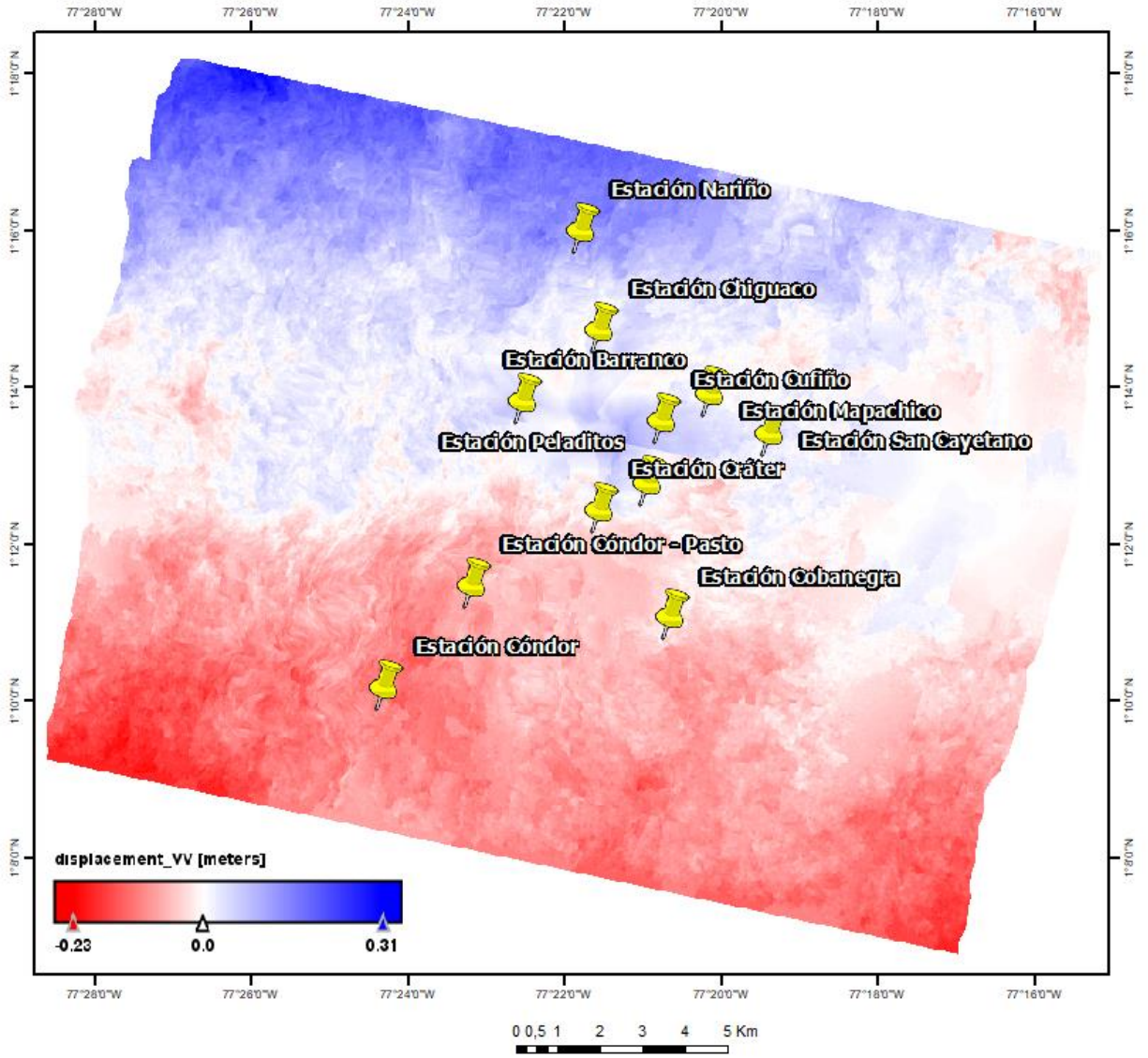


Figura 49. Mapa de desplazamiento (LOS) y estaciones GNSS del volcán Galeras. Fuente propia.

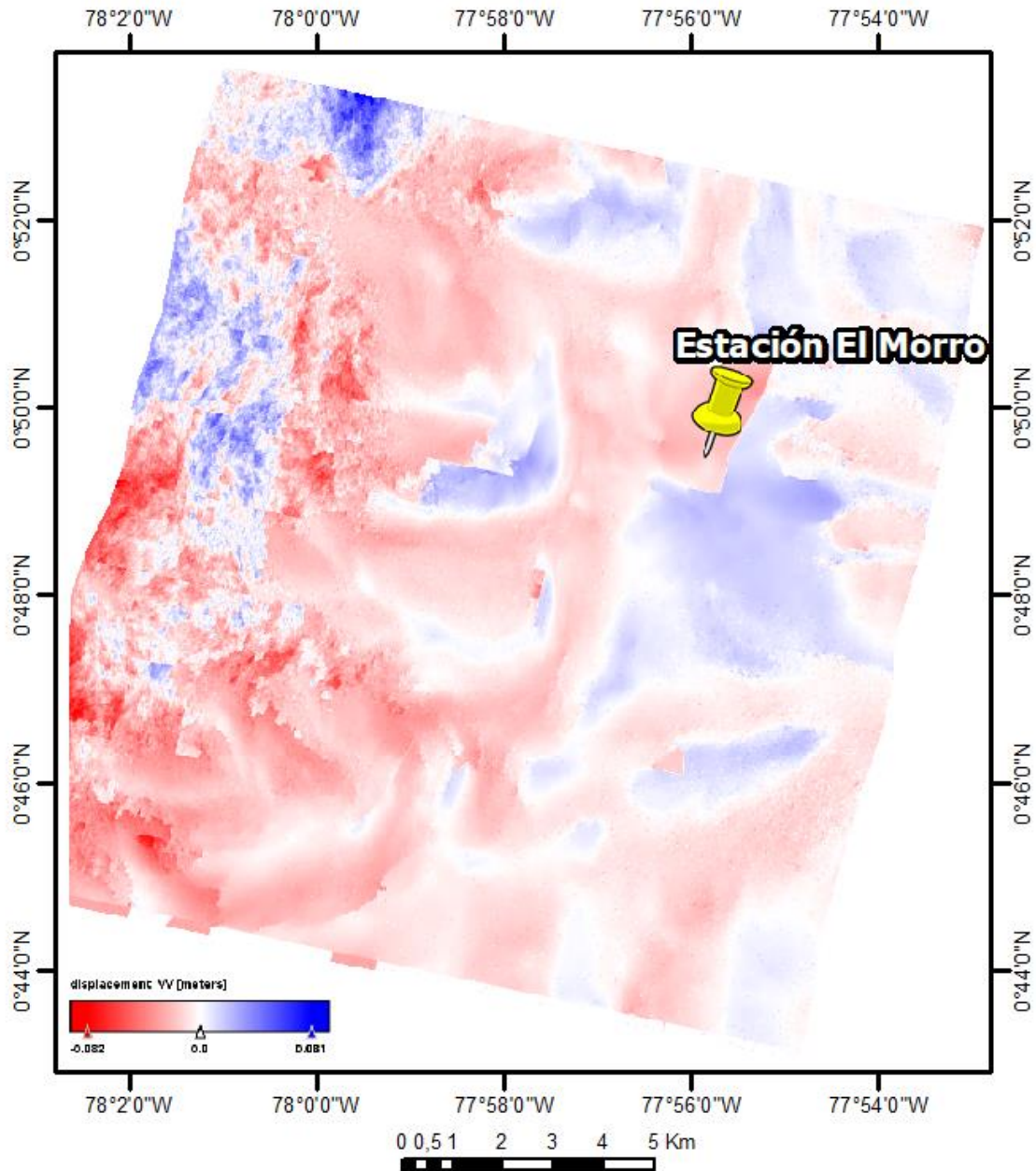


Figura 50. Mapa de desplazamiento (LOS) y estación GNSS El Morro de los volcanes Chiles – Cerro Negro. Fuente propia.

Posteriormente en el programa Excel se buscan los valores que correspondan a la combinación RGB, como se observa en la figura 51 el mapa de desplazamiento entre el 25 de agosto al 18 de septiembre de 2018, en la estación Cráter del volcán Galeras la combinación de color RGB es (255, 147, 147); así que, según la paleta de colores de Excel para ese período de

tiempo hubo un desplazamiento en línea de vista (LOS) de  $-0,04245$  m o  $-4,245$  mm, por lo tanto, hubo subsidencia entre esas fechas para ese punto del terreno.

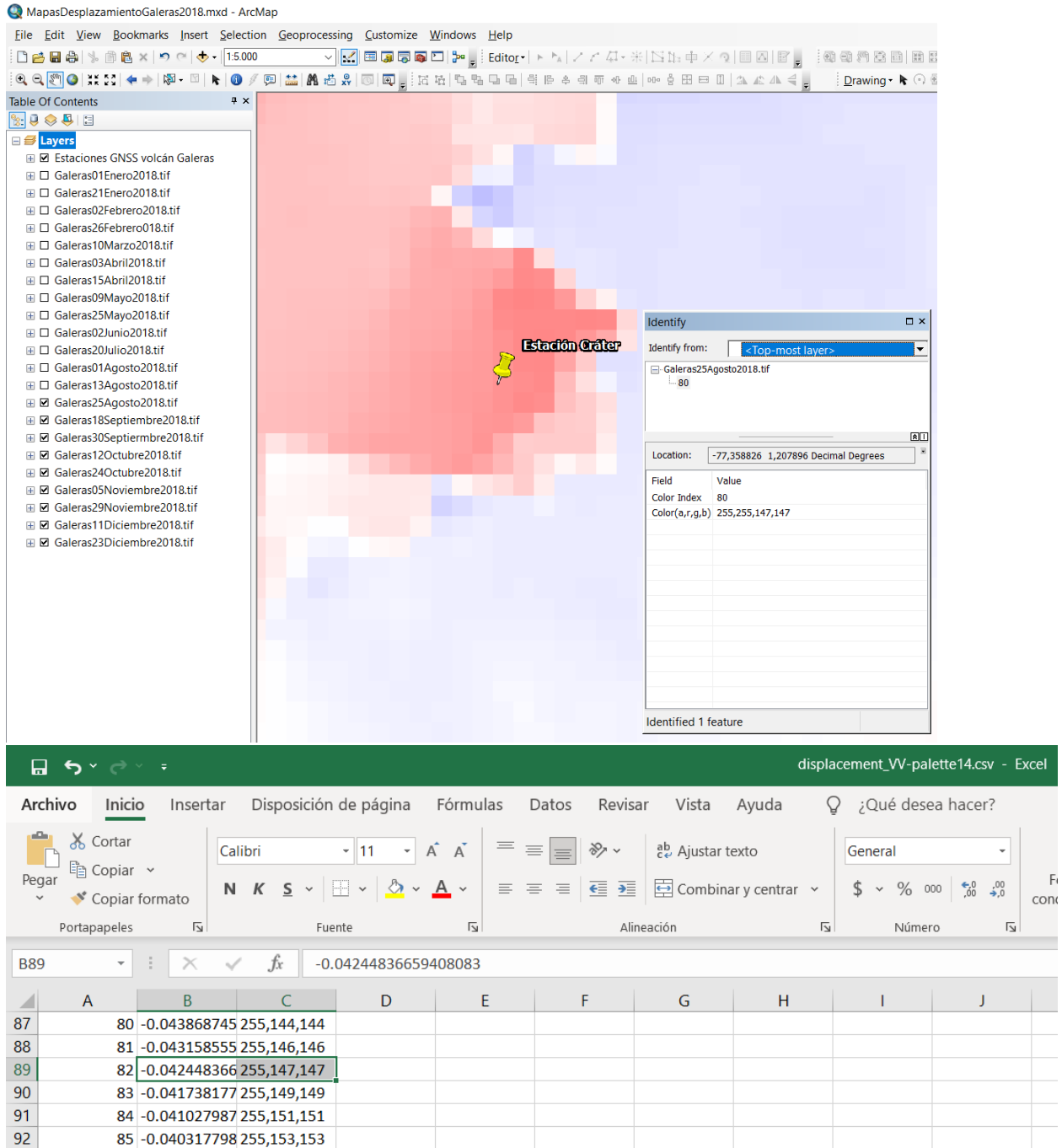


Figura 51. Visualización del código de color RGB y valor de desplazamiento en línea de vista (LOS) para la estación Cráter del volcán Galeras entre el 25 de agosto al 18 de septiembre de 2018. Fuente propia.

Se repitió el mismo proceso para cada una de las estaciones (11 para el Galeras y 1 para el Chiles – Cerro Negro de Mayasquer) y para cada uno de los mapas de desplazamiento (66 para el Galeras y 20 para el Chiles – Cerro Negro de Mayasquer) por lo tanto se conocieron 746 valores de desplazamiento en línea de vista (LOS), y con ellos se construyeron en el programa Excel gráfica de series de tiempo en cada una de las estaciones GNSS. Esos valores de desplazamiento fueron comparados con valores oficiales de desplazamiento obtenidas por las propias estaciones GNSS, dichos datos fueron brindados por cortesía del equipo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto del Servicio Geológico Colombiano en apoyo del presente estudio.

#### **4.5.2. Análisis entre los mapas NDVI y los mapas de Coherencia**

La presencia de la vegetación puede afectar los resultados de los interferogramas, por tal motivo se verificó mediante mapas de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) generados a partir de las mismas imágenes satelitales Sentinel-2 si esa variable era la causante de dichos problemas.

Las fechas de estas imágenes corresponden para el volcán Galeras el día 6 de febrero de 2020, y para los volcanes Chiles y Cerro Negro el día 11 de febrero de 2020. En el caso de la imagen utilizada para la zona del Galeras lamentablemente no corresponde dentro del rango de tiempo de estudio para ese volcán (2017 – 2019) debido a que en ese período de tiempo no se encontró una imagen con baja nubosidad para poder tener el terreno o la superficie descubierta y se pudiese realizar un mapa NDVI de manera correcta, sin embargo, a pesar de eso la imagen aporta información muy útil para entender la condición de la vegetación en la zona y así poder identificar las zonas con menor influencia de esa cobertura.

Teniendo en cuenta el estudio de Wang et al. (2019) donde se enfocaron en estudiar las regiones con NDVI menor a 0,4 del volcán Asama en Japón, se investigó por medio de estos mapas cuáles eran las ubicaciones de las estaciones GNSS con menor valor NDVI que estuvieran asociados a una cobertura con baja vegetación; en donde se identificaron para el volcán Galeras dos estaciones con valores bajos, una con un NDVI menor a 0,4 y otra estación con un NDVI ligeramente mayor a ese valor; pero en el caso de la única estación ubicada en Chiles - Cerro Negro, se utilizó el dato NDVI para esa estación independientemente de si fuese alto o bajo.

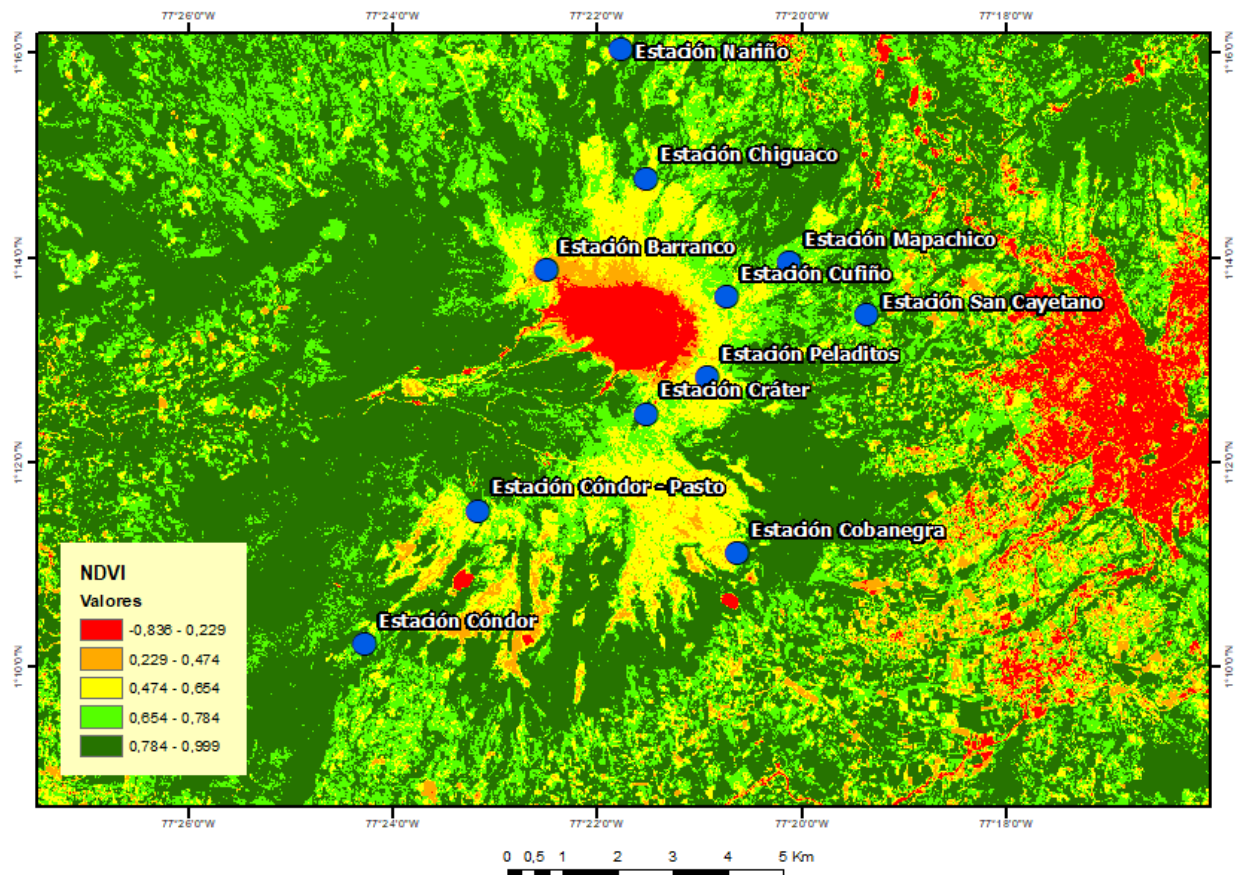


Figura 52. Mapa de índice NDVI del volcán Galeras. Fuente propia.

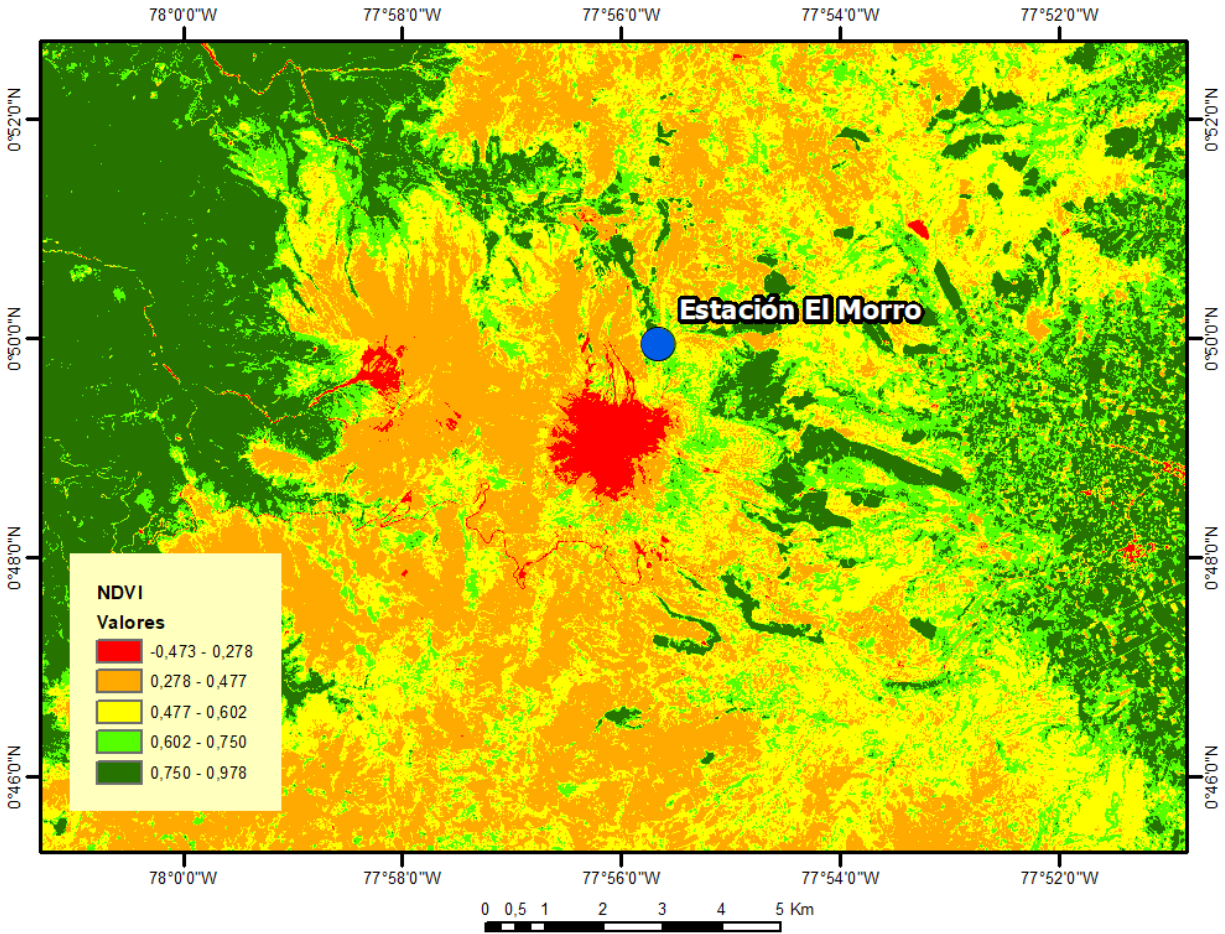


Figura 53. Mapa de índice NDVI de los volcanes Chiles – Cerro Negro. Fuente propia.

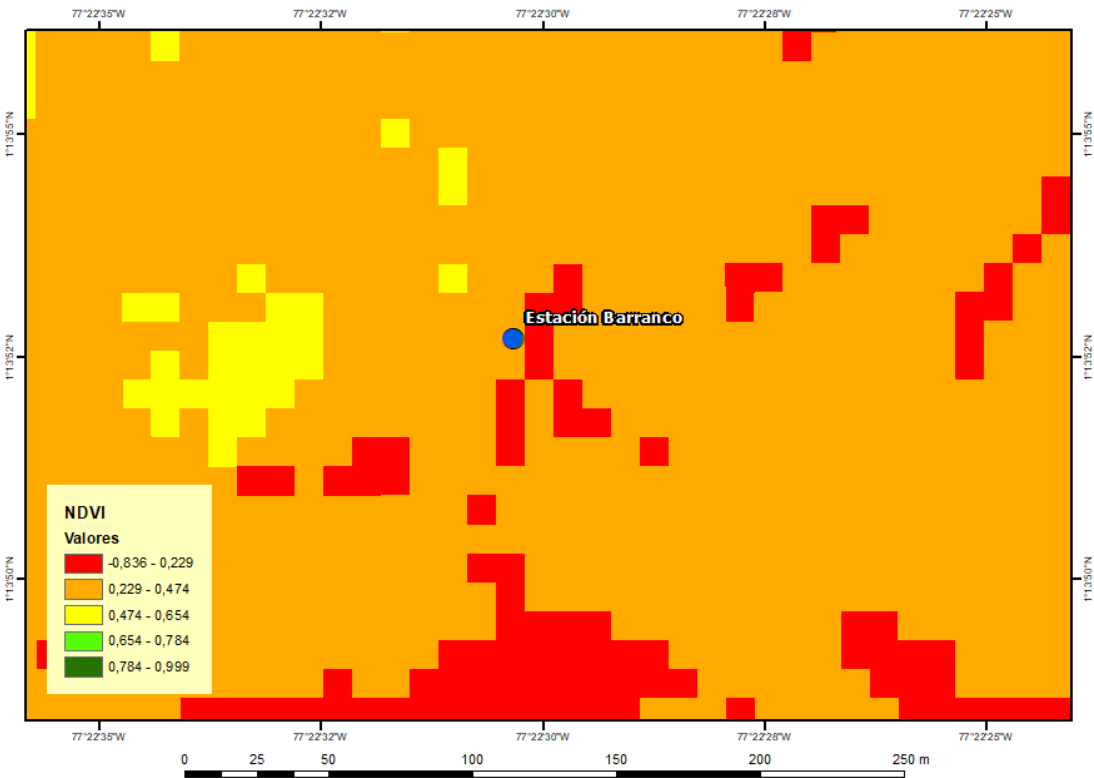


Figura 54. Valor de índice NDVI para una de las estaciones GNSS. Fuente propia.

Ubicación de puntos de control con bajos valores NDVI y altos valores de Coherencia

Además, se ubicaron puntos de control diferentes a las estaciones para cada volcán, bajo el criterio de zonas con muy escasa vegetación determinada por valores muy bajos NDVI y que coincidan con valores de coherencia medios a altos, en este caso están ubicados en los cráteres de cada volcán que son las zonas con menor vegetación, con el fin de revisar también su comportamiento en desplazamiento a través del tiempo y para conocer sus valores de coherencia promedio con el fin de determinar si a pesar de la presencia o ausencia de la vegetación condiciona los resultados de desplazamiento y así definir la búsqueda de otra variable que pueda interferir.



Las nuevas localizaciones o puntos de control se nombraron como los volcanes de estudio: Galeras, Chiles y Cerro Negro, cuyas coordenadas se ven en la tabla 5.

Tabla 5  
*Coordenadas de los puntos de control.*

<b>Volcanes</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
Galeras	1°13'12.88"N	77°21'13.60"O
Chiles	0°49'26.13"N	77°56'3.54"O
Cerro Negro	0°49'49.94"N	77°58'8.15"O

Elaboración propia.

Los puntos de control se pueden visualizar en la figura 55 la cual muestra los mapas NDVI y mapas de coherencia, con el fin de verificar que la ubicación de los puntos de control está en zonas con muy bajo valor NDVI (color rojo), indicando que se encuentran en zonas descubiertas de vegetación, y a su vez en zonas con los valores de coherencia más altos (píxeles blancos) que generaron esos interferogramas.

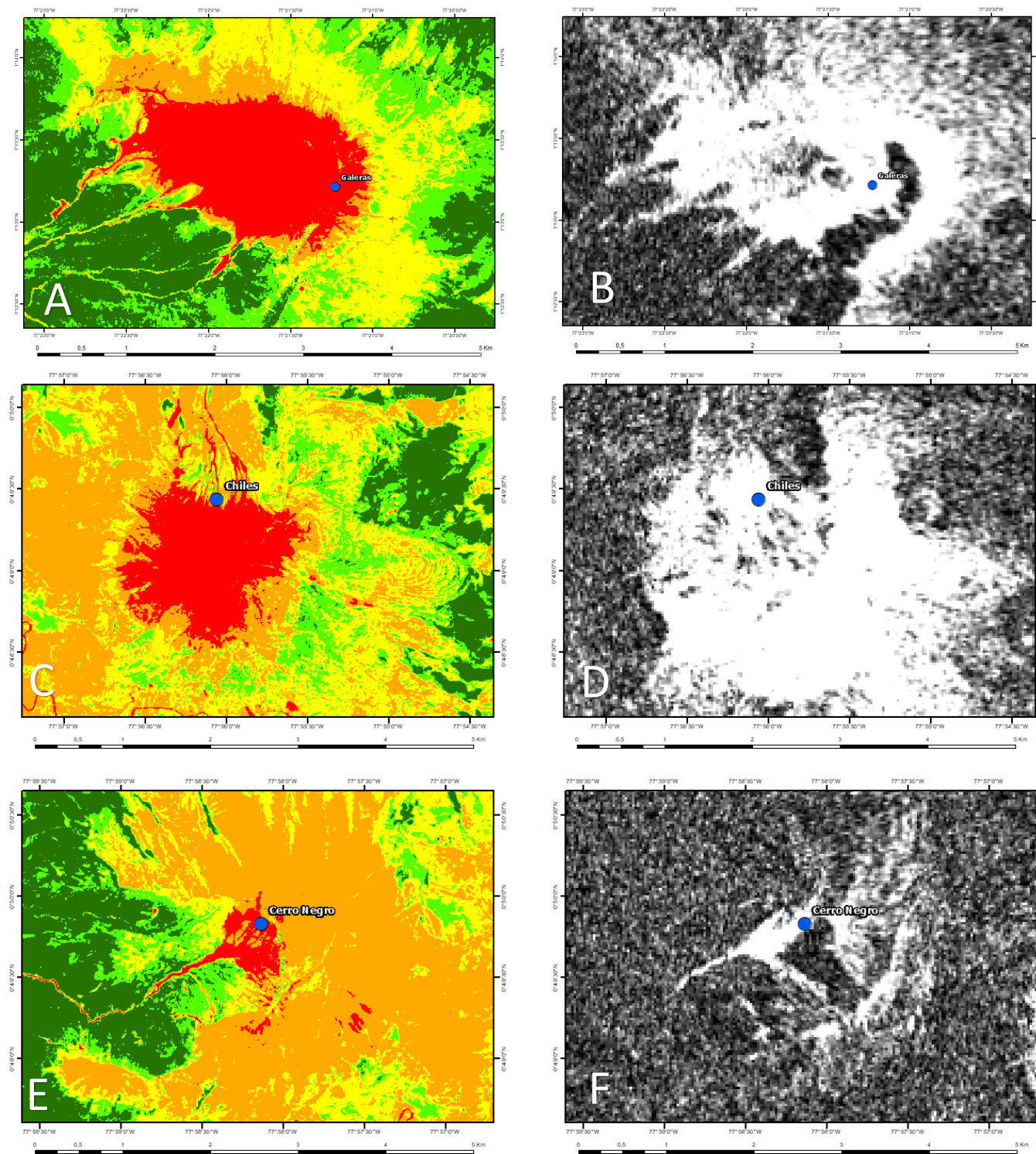


Figura 55. Mapas NDVI (A, C, E) y mapas de coherencia (B, D, F) de los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro respectivamente, con los puntos de control. Fuente propia.

Conociendo las estaciones con los valores más bajos en NDVI y los puntos de control seleccionados para los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, se procedió a realizar el mismo proceso utilizado en los mapas de desplazamiento (LOS), el cual es identificar para esas localizaciones en ese caso los valores de coherencia en cada una de las fechas establecidas y así obtener la coherencia promedio en las zonas de las estaciones y puntos de control seleccionados, y de esa manera determinar si esta es baja, media o alta.

Por ejemplo, en la figura 56 se observa el mapa de coherencia entre el 03 de julio al 08 de agosto de 2019, en donde en la estación El Morro del volcán Chiles con la combinación de color RGB es (218, 218, 218); así que, según la paleta de colores de Excel para ese período de tiempo hubo una coherencia de 0,608, indicando un valor medio – alto para ese período de tiempo y para ese punto del terreno (figura 57).

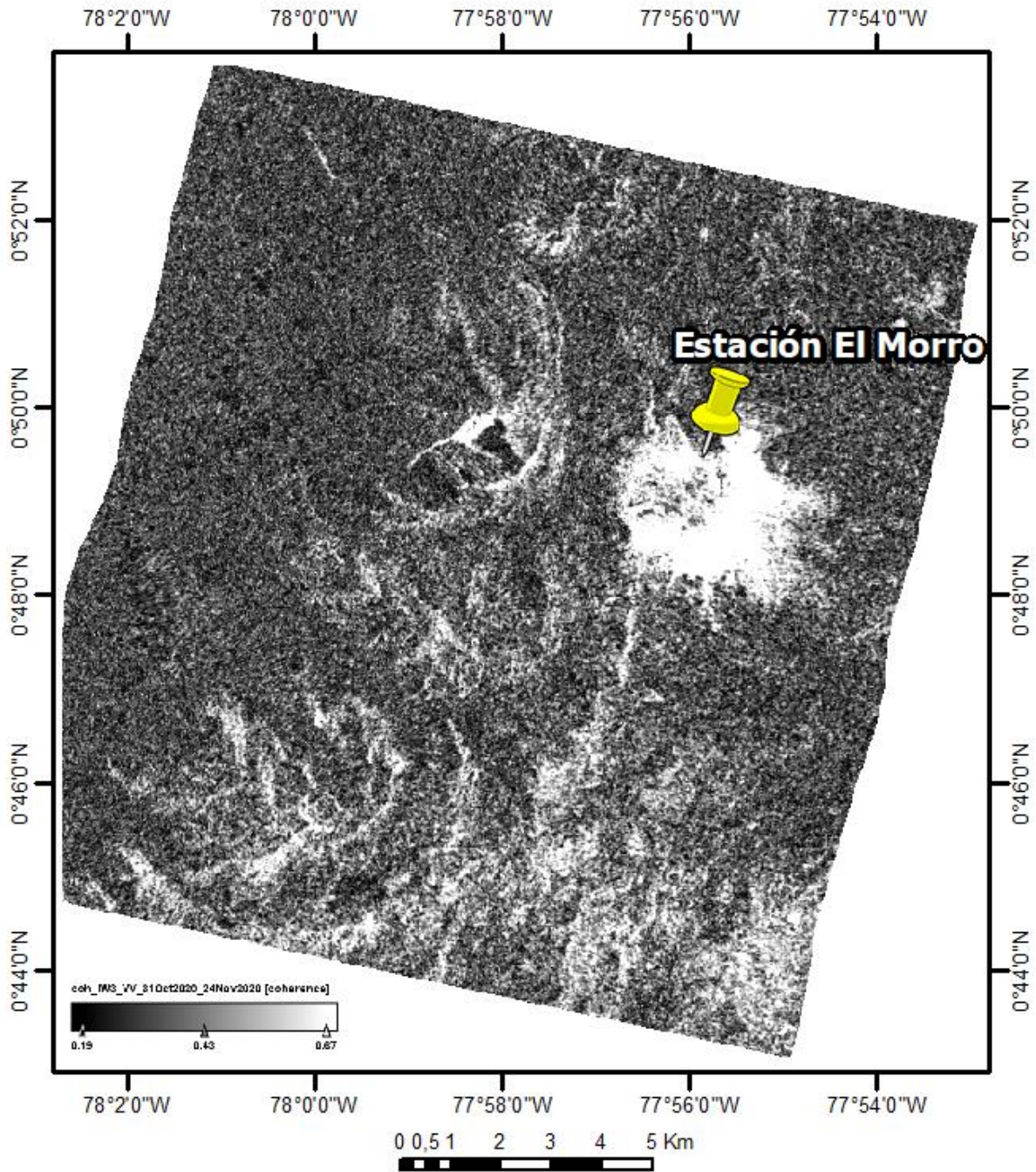


Figura 56. Mapa de coherencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer. Fuente propia.

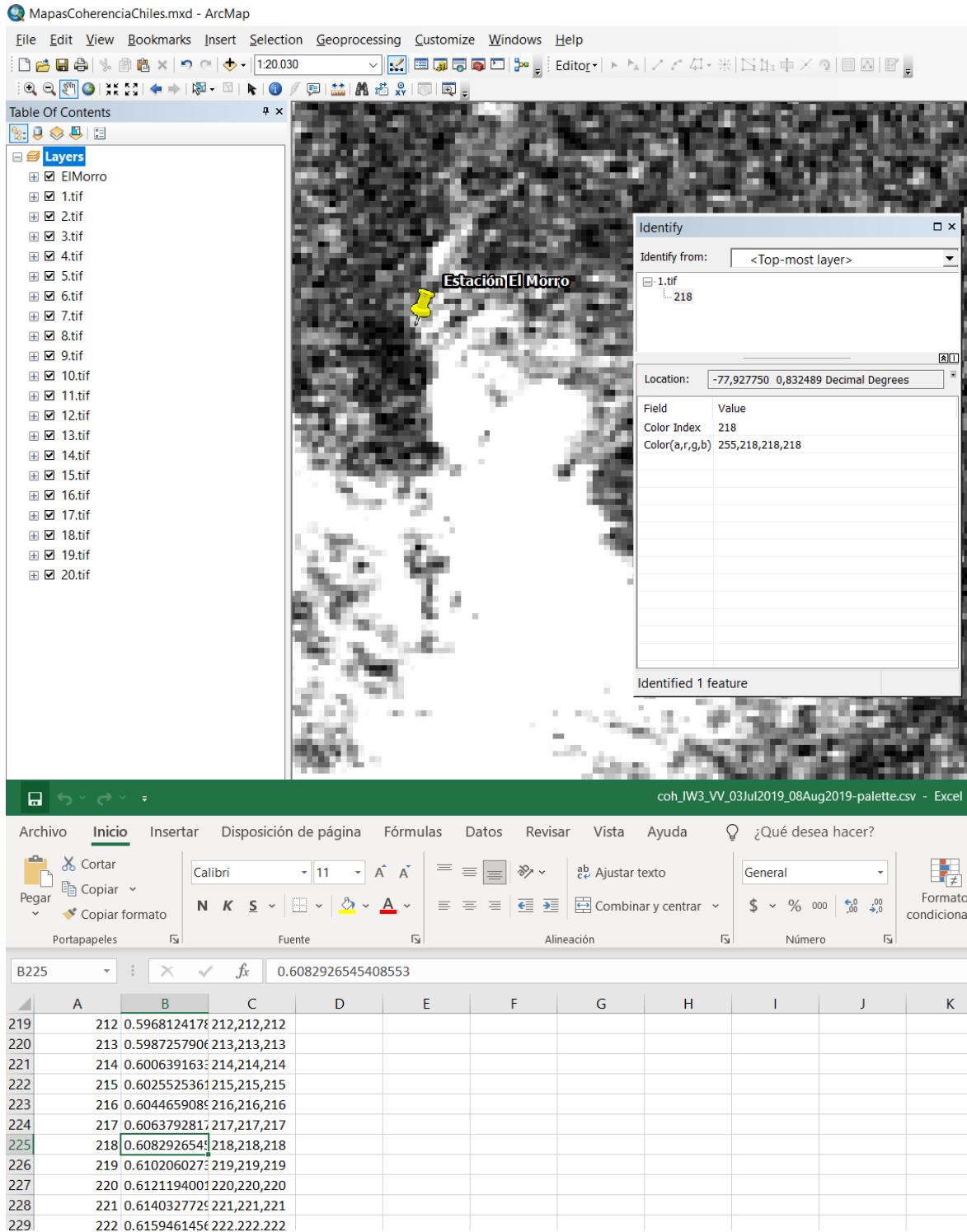


Figura 57. Visualización del código de color RGB y valor de coherencia para la estación El Morro del volcán Chiles entre el 03 de julio al 08 de agosto de 2019. Fuente propia.

### **4.5.3. Análisis de la información atmosférica**

Con imágenes satelitales Sentinel-2 se puede observar que hay constante presencia de nubes para las regiones del volcán Galeras y los volcanes Chiles y Cerro Negro, como se ve en las figuras 58 y 59, por tal motivo se procedió a realizar un análisis de las condiciones atmosféricas de las zonas de estudio ya que estas podrían influir en los resultados de los interferogramas, así que se obtuvieron datos de la fracción de nubosidad por medio del sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P, de la temperatura atmosférica 2m por encima del suelo por medio el conjunto de datos ERA5-Land y datos de la humedad relativa 2m por encima del suelo por medio del modelo de estado del tiempo GFS, además de dichas informaciones también se adquirieron sus respectivas series de tiempo.

El sensor TROPOMI trabaja entre la región del ultravioleta y el infrarrojo de onda corta (SWIR), obteniendo información del Techo de la Atmósfera (TOA).

El conjunto de reanálisis de datos ERA5-Land del Centro Europeo de Previsiones a Plazo Medio (ECMWF) produce una visión consistente de la evolución de variables de la superficie, combinando modelos de datos con observaciones de la Tierra utilizando leyes de la física, además también produce datos sobre el clima de décadas pasadas (CDS, 2018)

El Sistema Global de Predicción (GFS) es un modelo de predicción del estado del tiempo producido por los Centros Nacionales para la Predicción del Ambiente (NCEI) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), su conjunto de datos se compone de varios modelos en los cuales se incluye un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo para la superficie y el suelo, y un modelo para la nieve, estos modelos trabajan juntos para brindar datos precisos de las condiciones del estado del tiempo a nivel global (NCEI, 2020).

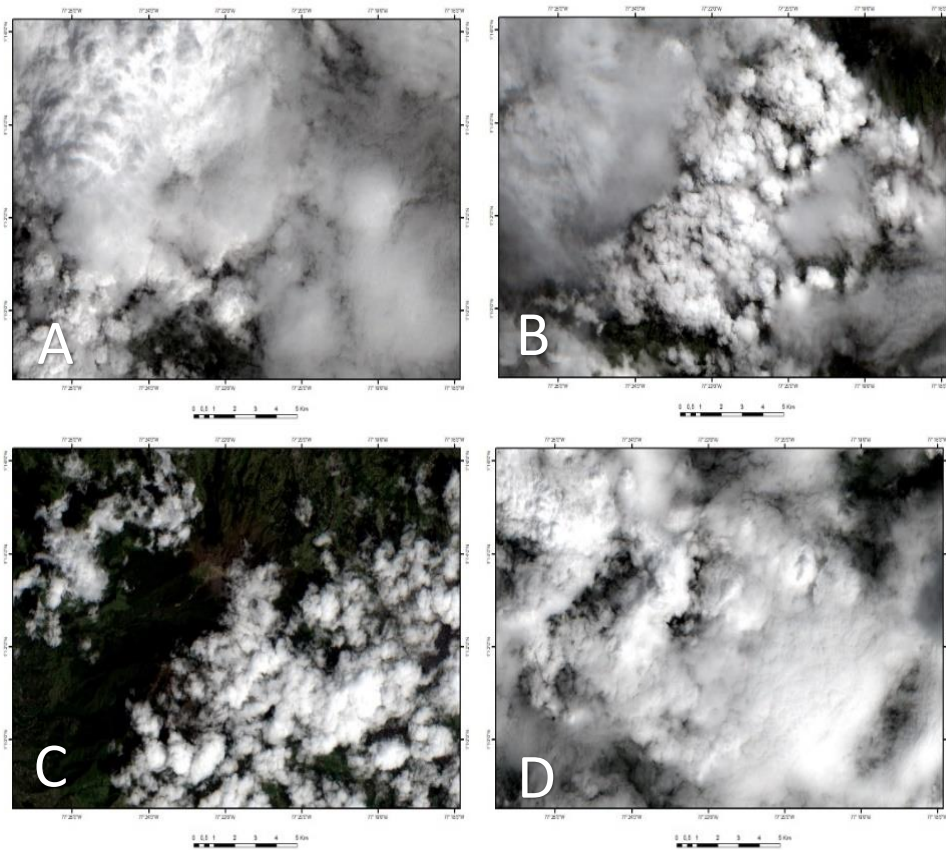


Figura 58. Imágenes ópticas Sentinel-2 de la zona de Galeras, diciembre 18 de 2017 (A), junio 11 de 2018 (B), enero 2 de 2019 (C), y diciembre 28 de 2019 (D). Fuente propia.

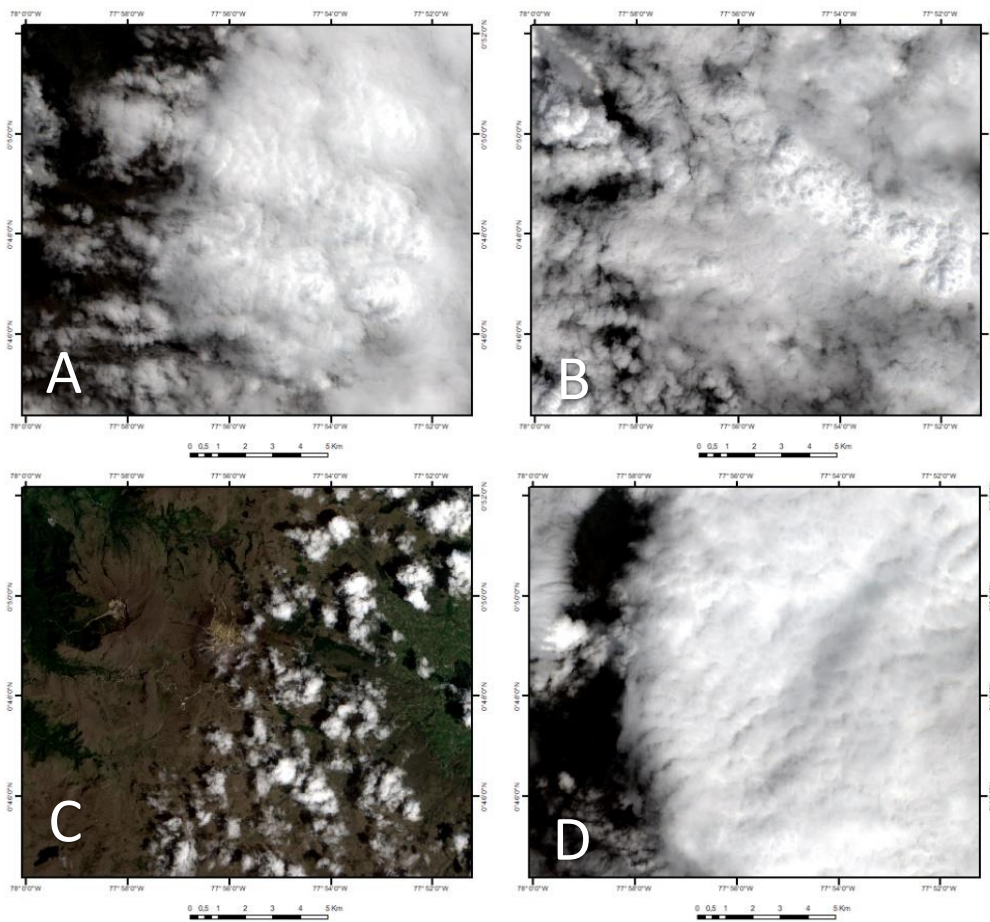


Figura 59. Imágenes Sentinel-2 de la zona de Chiles - Cerro Negro, julio 6 de 2019 (A), diciembre 3 de 2019 (B), febrero 6 de 2020 (C), y diciembre 22 de 2020 (D). Fuente propia.

Las variable de fracción de nubosidad para el volcán Galeras tiene datos desde agosto de 2018 hasta diciembre de 2019, y para los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer entre julio de 2019 y diciembre de 2020; la variable de la temperatura de la atmósfera 2m por encima del suelo para el volcán Galeras tienen datos entre enero de 2017 y diciembre de 2019, y para los volcanes Chiles – Cerro Negro tienen datos entre julio de 2019 y diciembre de 2020; sin embargo, para la variable de humedad relativa 2m por encima del suelo la cantidad de datos que tiene por día es muy grande y por tal motivo computar una serie de tiempo en esos períodos es imposible para la plataforma Google Earth Engine la cual es en donde se procesaron esos datos; por tal motivo se basó en la serie de tiempo de temperatura atmosférica para observar los picos bajos y altos en el tiempo para esa variable, y a partir de ello



se eligieron los períodos para obtener información de la humedad relativa en donde se sacaron muestras con datos en rangos de 5 a 8 días.

Las muestras obtenidas para el volcán Galeras fueron 9 y los rangos de tiempo seleccionados son los siguientes:

- Muestra 1 (marzo 1 de 2017 – marzo 8 de 2017)
- Muestra 2 (agosto 1 de 2017 – agosto 8 de 2017)
- Muestra 3 (febrero 1 de 2018 – febrero 8 de 2018)
- Muestra 4 (junio 1 de 2018 – junio 8 de 2018)
- Muestra 5 (agosto 1 de 2018 – agosto 8 de 2018)
- Muestra 6 (noviembre 1 de 2018 – noviembre 8 de 2018)
- Muestra 7 (abril 1 de 2019 – abril 8 de 2019)
- Muestra 8 (agosto 1 de 2019 – agosto 6 de 2019)
- Muestra 9 (noviembre 1 de 2019 – noviembre 6 de 2019)

Las muestras obtenidas para el volcán Galeras fueron 9 y los rangos de tiempo seleccionados son los siguientes:

- Muestra 1 (agosto 1 de 2019 – agosto 6 de 2019)
- Muestra 2 (noviembre 1 de 2019 – noviembre 6 de 2019)
- Muestra 3 (marzo 1 de 2020 – marzo 4 de 2020)
- Muestra 4 (septiembre 1 de 2020 – septiembre 4 de 2020)
- Muestra 5 (diciembre 1 de 2020 – diciembre 4 de 2020)

Es de aclarar que la humedad relativa es la relación de la cantidad de vapor de agua en el aire con la cantidad de agua máxima que el aire está capacitada en contener bajo una temperatura determinada (Ramanujan, 2004).

#### **4.5.4. Información del desplazamiento en línea de vista (LOS) promedio y la velocidad de desplazamiento**

Este es el paso final, ya que es el que muestra el comportamiento definitivo de la velocidad de desplazamiento de los volcanes Galeras, Chiles y Cerro Negro.

Finalmente, con todos los datos de desplazamiento (LOS) promedio en las localizaciones de las estaciones GNSS y puntos de control generados a partir de los interferogramas en SNAP se determinaron las velocidades de desplazamiento de las superficie de los volcanes, esta información fue verificada y comparada con la velocidad de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS obtenidas y brindadas por el Servicio Geológico Colombiano y con información de velocidades de desplazamiento en línea de vista (LOS) procesada con el algoritmo P-SBAS de la aplicación temática SBAS Ground Motion Services del instituto CNR-IREA de Italia, ejecutado en la plataforma Geohazards TEP de Terradue.

La información P-SBAS generada para el volcán Galeras abarca el rango de tiempo desde el 2 de enero de 2017 hasta el 18 de diciembre de 2019, y para los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer desde el 14 de enero de 2019 hasta el 22 de diciembre de 2020.

## 5. Resultados

### 5.1. Resultados de las gráficas de series de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS)

Los primeros resultados son presentados mediante las gráficas de series de tiempo de desplazamiento en línea de vista (LOS) a partir de la información de los mapas de desplazamiento generados en SNAP (línea azul) en las ubicaciones de las estaciones GNSS de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro, estas series de tiempo tienen su línea de tendencia (color amarillo) con la ecuación y el valor  $R^2$  el cual indica que tan cerca están los datos de la línea de tendencia y para estos casos esta medida es cercana a 1 para todas la mayoría estableciendo que los datos se ajustan bien a los modelos.

También en esas gráficas se construyeron series de tiempo para el desplazamiento vertical para esas mismas estaciones GNSS (línea naranja), sin embargo, hay que aclarar que los datos directos GNSS mostrados para estas series de tiempo se tomaron con base a las fechas de las adquisiciones de las imágenes, por tal motivo se presentan vacíos de información ya que para todas esas fechas no hay datos GNSS como se explicará más adelante.

En todas las series de tiempo para el volcán Galeras (figuras 60 – 71) se observa un comportamiento decreciente con base a los resultados de los mapas de desplazamiento, es decir, un comportamiento de subsidencia, llegando a tener un desplazamiento acumulado hasta de los -1,247m como en la estación Cándor (figura 66), sin embargo, la información de las estaciones GNSS muestran resultados diferentes, ya que se puede ver que en general no presentan un comportamiento de levantamiento o de subsidencia resaltable, prácticamente muestran una tendencia estable cercana a los 0 metros, indicando que el volcán en esas ubicaciones no presenta deformación según en esos datos.

Como se mencionó con anterioridad, las líneas de tiempo para las estaciones GNSS (línea naranja) están cortadas en algunos períodos de tiempo, debido a que no hay información de desplazamiento para esas fechas, a pesar de ello, esos vacíos de información no afectan las tendencias generales que muestran un comportamiento de estabilidad y poca o nada de deformación para esas series de tiempo; sin embargo, si la series de tiempo son muy incompletas o carecen de información en un año en específico no son muy fiables para comparar con la información de los mapas de desplazamiento durante los años 2017 y 2018, esto puede notar que la serie de tiempo con más vacío de información es la de la estación Mapachico, ya que sólo tiene información desde el año 2019 como se ilustra en la figura 68.

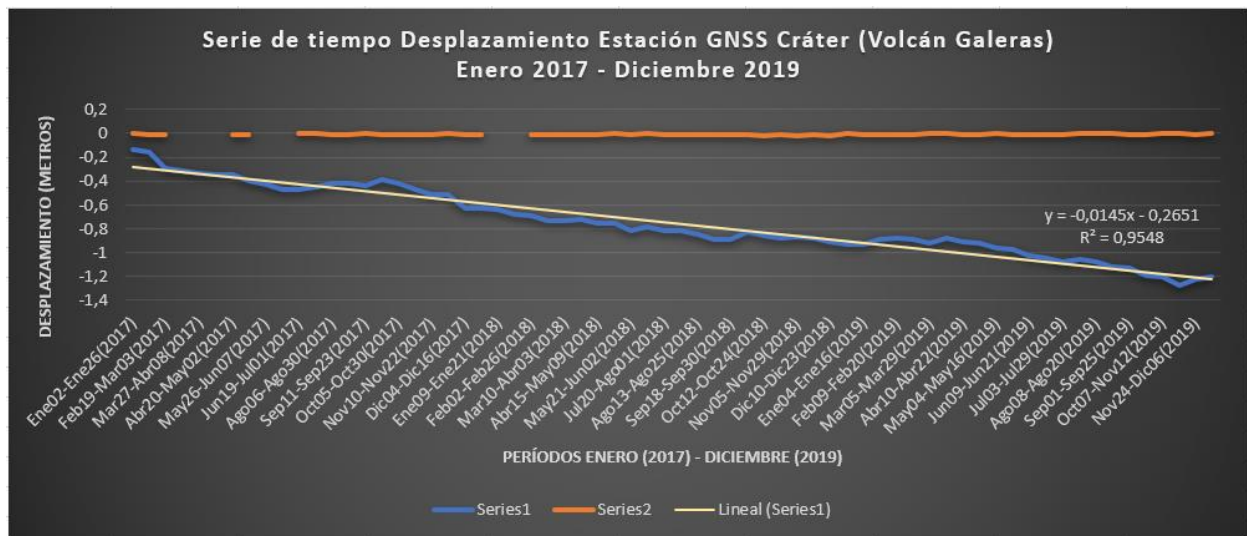


Figura 60. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cráter entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,201m. Fuente propia.

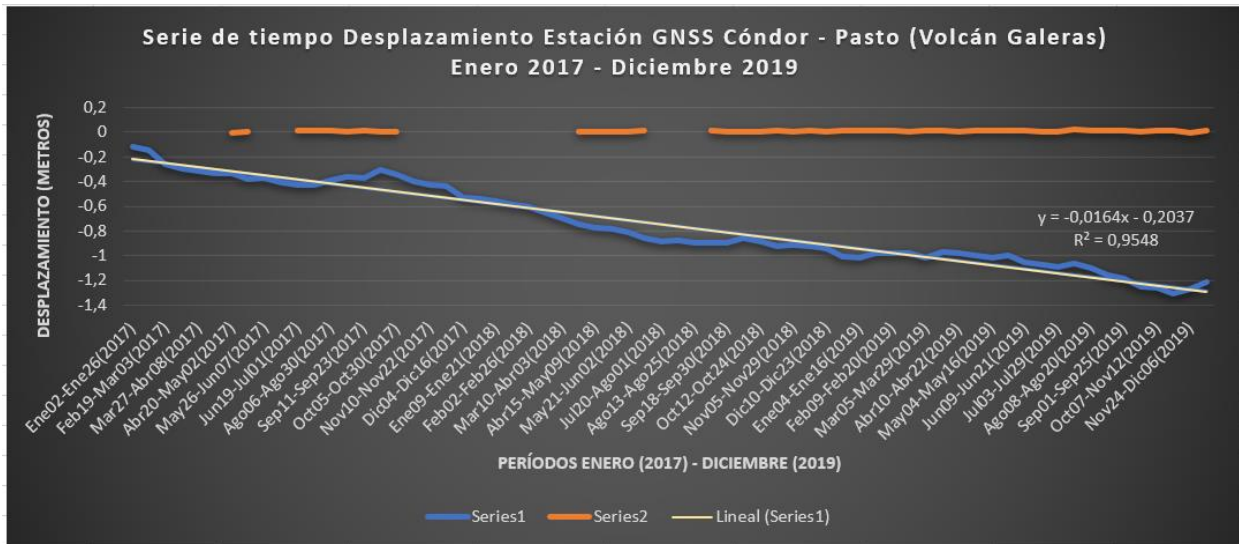


Figura 61. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Córdor - Pasto entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,213m. Fuente propia.

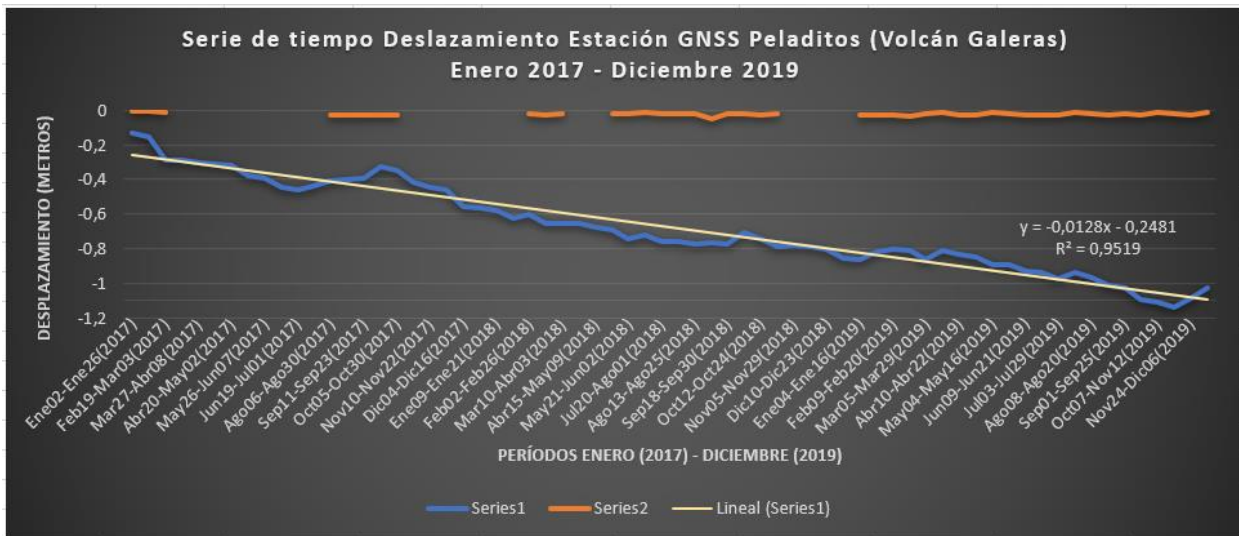


Figura 62. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Peladitos entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,026m. Fuente propia.

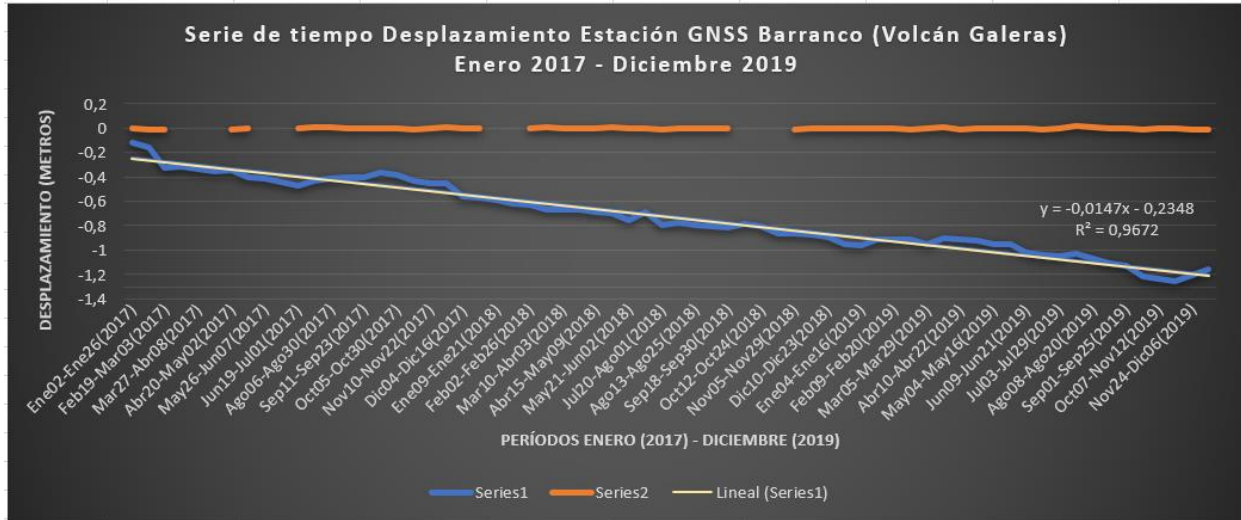


Figura 63. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Barranco entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,160m. Fuente propia.

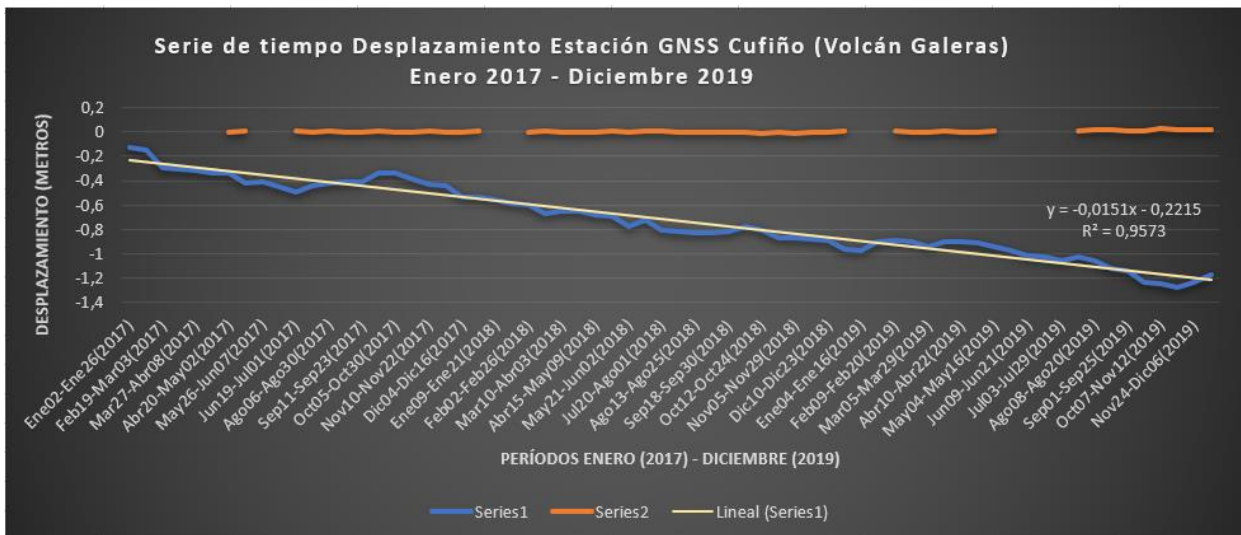


Figura 64. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cufiño entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,177m. Fuente propia.

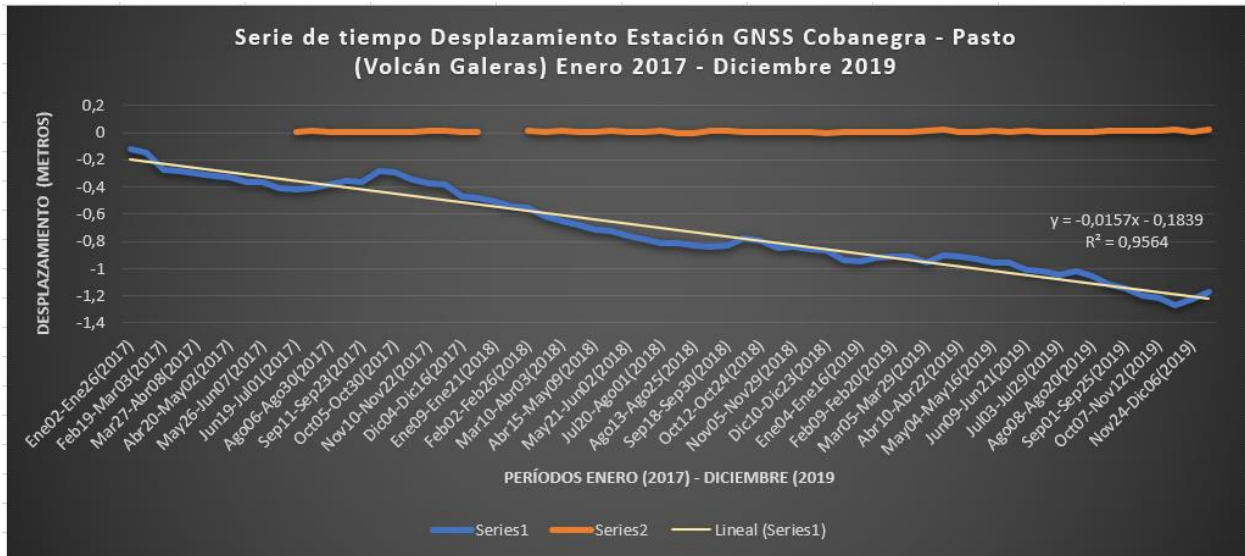


Figura 65. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Cobanegra entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,170m. Fuente propia.

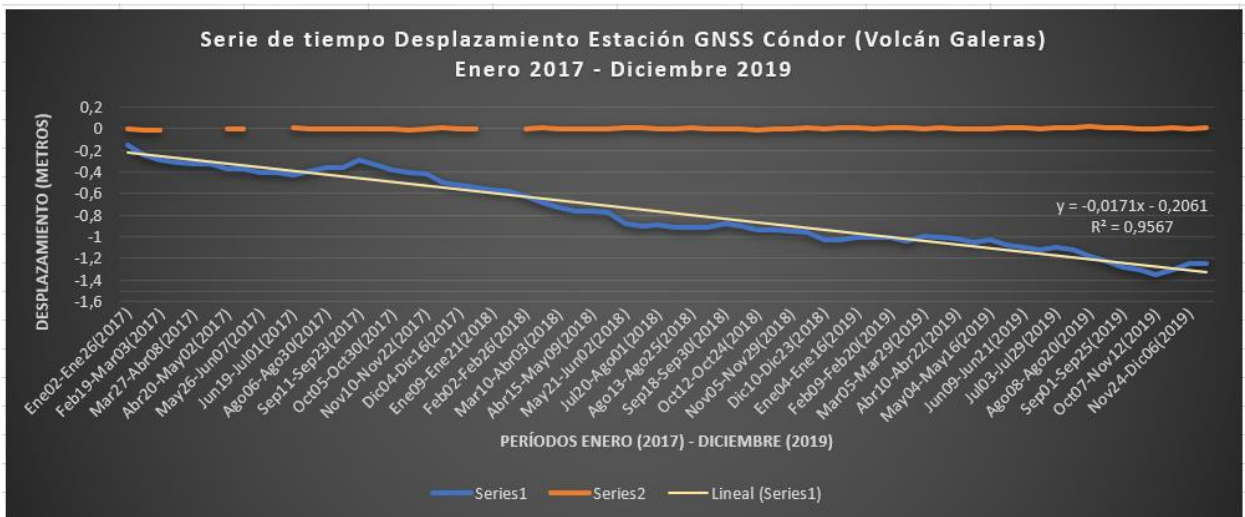


Figura 66. Gráfica de serie de tiempo de la deformación para el volcán Galeras en la estación GNSS Cóndor entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,247m. Fuente propia.

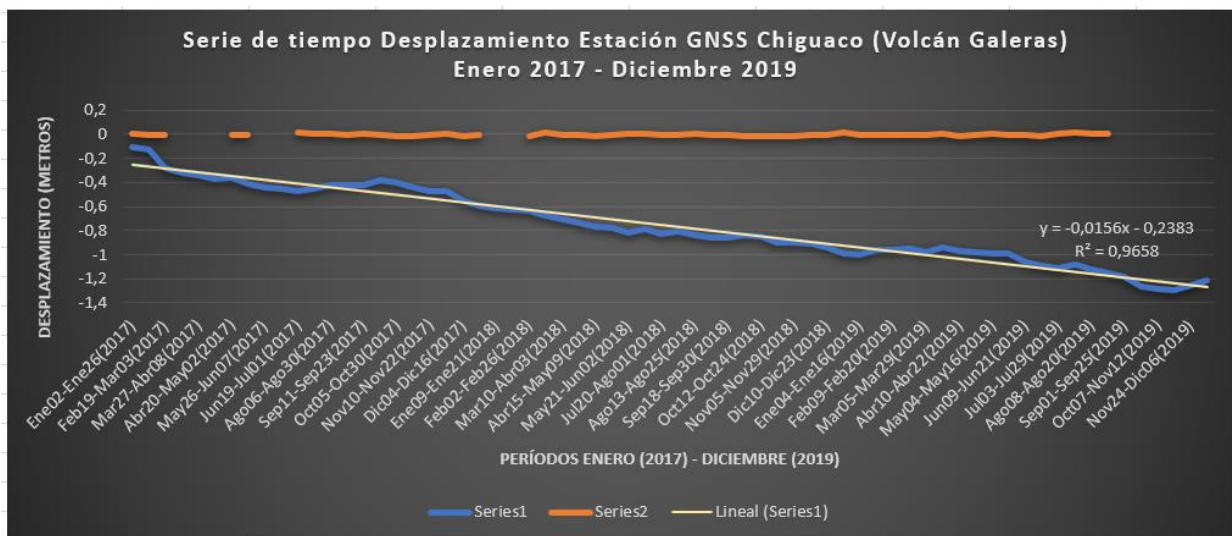


Figura 67. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Chiguaco entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,209m. Fuente propia.

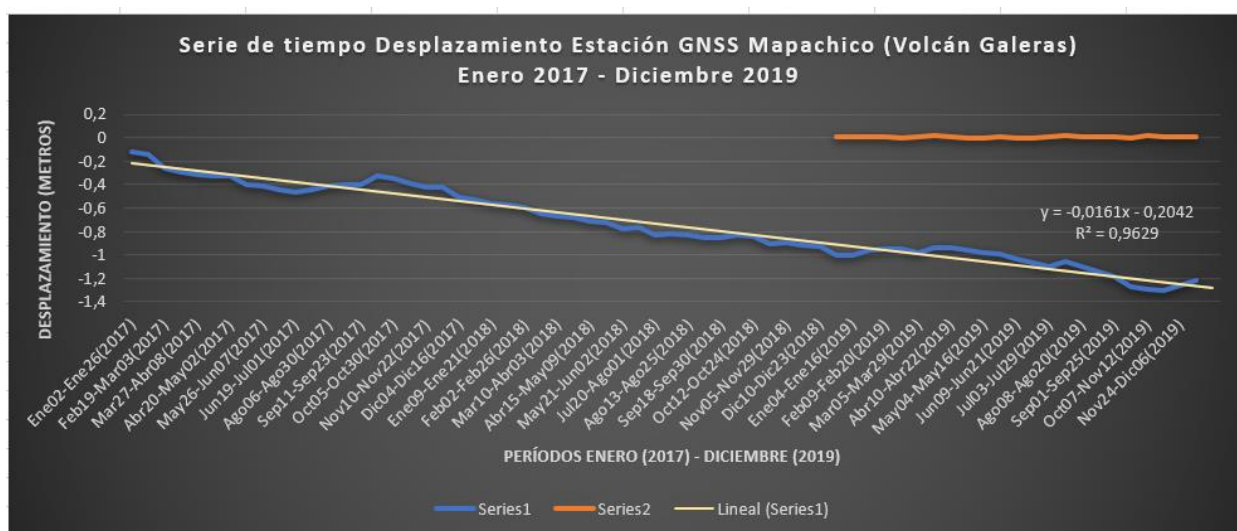


Figura 68. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Mapachico entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,217m. Fuente propia.



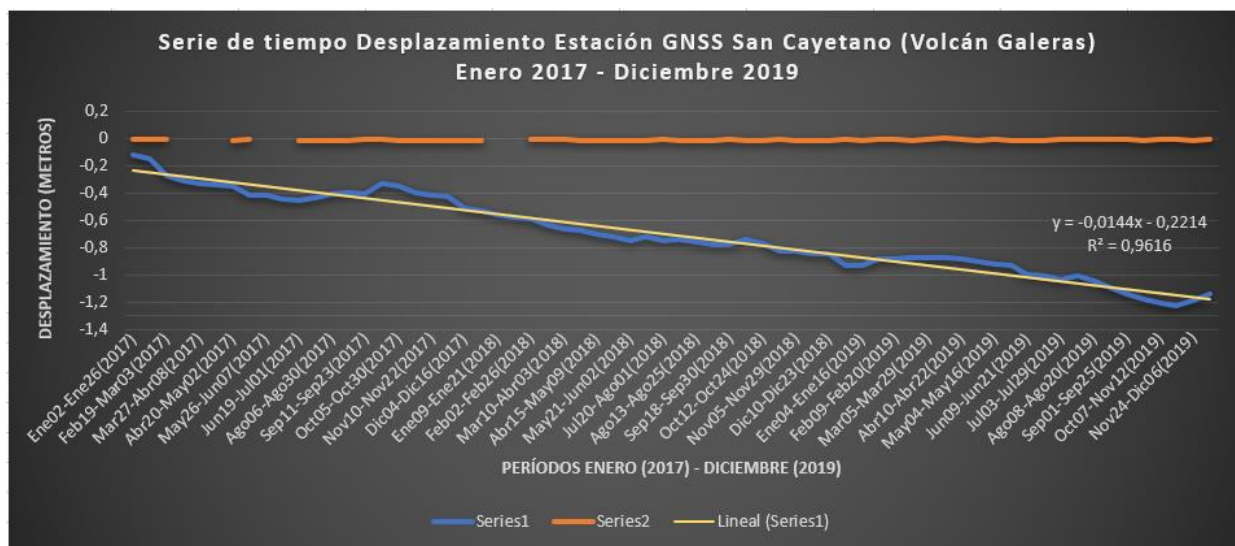


Figura 69. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS San Cayetano entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,135m. Fuente propia.

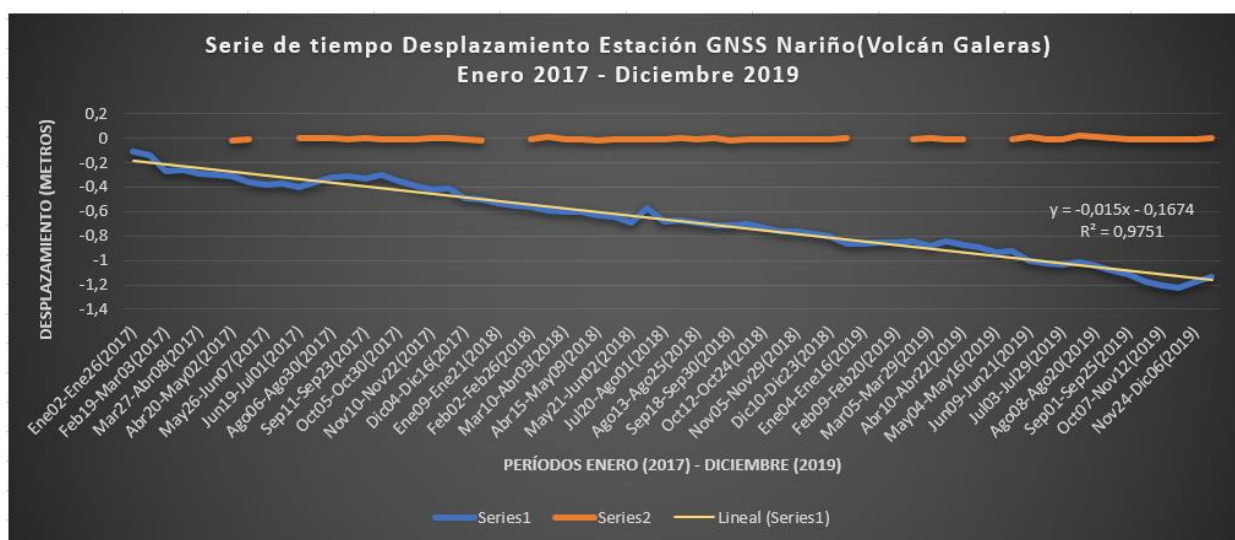


Figura 70. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Galeras en la estación GNSS Nariño entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,139m. Fuente propia.

En el caso para la ubicación de la única estación GNSS del Servicio Geológico Colombiano en el complejo Chiles – Cerro Negro de Mayasquer, el comportamiento mostrado por la serie de tiempo construida con los datos de deformación en línea de vista de los mapas de desplazamiento (línea azul) también es decreciente (subsistencia), mostrando un decrecimiento acumulado máximo entre -30 y 35 centímetros, mientras que la serie de tiempo de la estación El Morro

muestra también un comportamiento de subsidencia pero muy leve, con valores máximos acumulados cercanos a los 5 centímetros pero muy lejos de los valores máximos de la serie de tiempo de los mapas de desplazamiento, esto indica que la información de la estación El Morro ilustrada en la figura 71 muestra una tendencia levemente decreciente cercana a la estabilidad o a indicar que no se presenta prácticamente deformación, situación muy similar al de los casos de las estaciones del volcán Galeras.

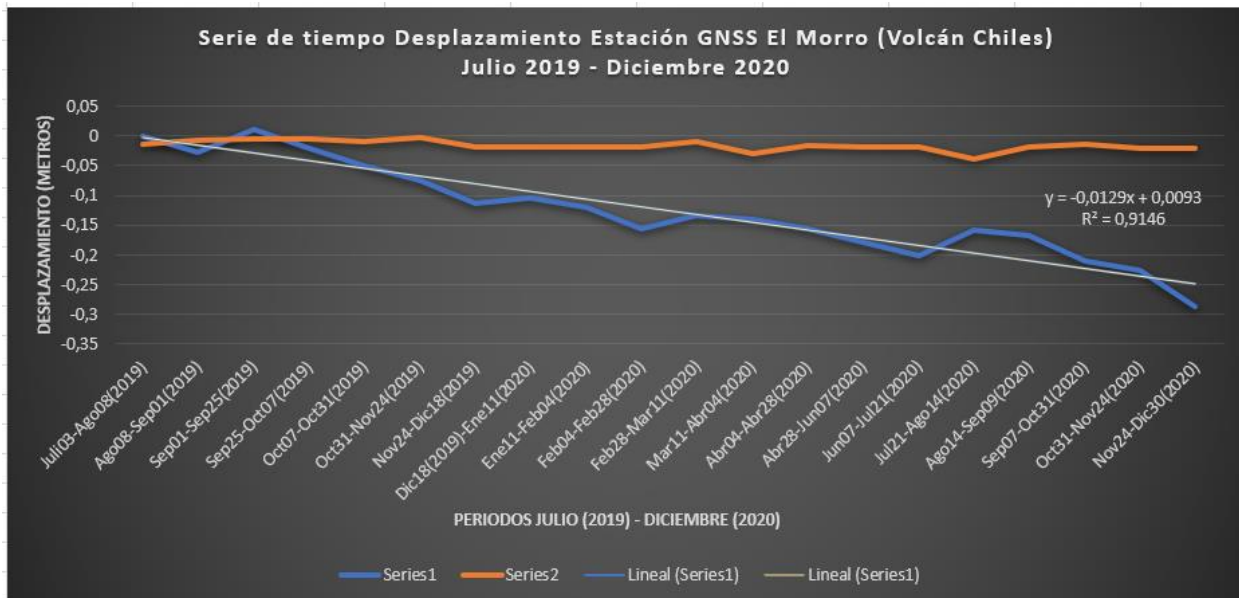


Figura 71. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento para el volcán Chiles en la estación GNSS El Morro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,286m. Fuente propia.

## 5.2. Resultados del análisis de los mapas NDVI y de los mapas de Coherencia

Debido al desfase de los datos de deformación de las estaciones GNSS con la de los mapas de desplazamiento, se decidió verificar si la coherencia de los interferogramas influía en algún sesgo para los resultados de los mapas de desplazamiento. Por lo tanto, con ayuda de mapas de índice NDVI que se construyeron a partir de imágenes ópticas Sentinel-2 se identificaron las estaciones con los menores valores de este índice, ya que se ubican en zonas donde la coherencia

es mayor, dichas estaciones fueron Barranco con un valor de 0,267 y Cufiño con un valor de 0,433, en el caso de la Estación El Morro el valor NDVI en dicha localidad es de 0,521, como se ve en las tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6  
*Datos NDVI de las estaciones GNSS del volcán Galeras.*

<b>Estación GNSS</b>	<b>Valores NDVI</b>
Cráter	0,628919
Cóndor - Pasto	0,578119
Peladitos	0,631902
Barranco	0,267192
Cufiño	0,433419
Cobanegra	0,704000
Cóndor	0,589345
Chiguaco	0,565404
Mapachico	0,664145
San Cayetano	0,831945
Nariño	0,557175

Elaboración propia.

Tabla 7  
*Dato NDVI de la estación GNSS del volcán Chiles.*

<b>Estación GNSS</b>	<b>Valores NDVI</b>
El Morro	0,520792

Elaboración propia.

Conociendo las estaciones de interés con base a los datos NDVI, se promedió el valor de la coherencia para esas localidades, dando los siguientes resultados:

- Para la estación Barranco la coherencia promedio entre enero de 2017 y diciembre de 2019 es de 0,530.

- Para la estación Cufiño la coherencia promedio entre enero de 2017 y diciembre de 2019 es de 0,549.
- Para la estación El Morro la coherencia promedio entre julio de 2019 y diciembre de 2020 es de 0,454.

Esto quiere decir que son valores de coherencia medios a bajos, indicando muy poca correlación entre las imágenes que forman los interferogramas, haciendo difícil confiar en esos datos.

Debido a lo anterior se requirió identificar si los valores de coherencia podían ser mayores y así saber si los datos de desplazamiento son fiables, para ello como se mencionó en el capítulo anterior se seleccionaron puntos de control para cada uno de los volcanes, con base a valores muy bajos de NDVI, muchos más bajos que los de las ubicaciones de las estaciones, en los cuales se conocieron para esos puntos los valores de coherencia. Los valores NDVI para los puntos de control se observan en la tabla 8.

Tabla 8  
*Datos NDVI de los puntos de control Galeras, Chiles y Cerro Negro.*

<b>Punto de control</b>	<b>Valores NDVI</b>
Galeras	0,210300
Chiles	0,235063
Cerro Negro	0,062697

Elaboración propia.

- Para el punto de control Galeras el valor promedio de coherencia entre enero de 2017 y diciembre de 2019 es de 0,683.

- Para el punto de control de Chiles el valor promedio de coherencia entre julio de 2019 y diciembre de 2020 es de 0,628.
- Para el punto de control Cerro Negro el valor promedio de coherencia entre julio de 2019 y diciembre de 2020 es de 0,631.

Tabla 9

*Datos de coherencia promedio de las estaciones GNSS y los puntos de control.*

<b>Estaciones GNSS y Puntos de control</b>	<b>Coherencia promedio</b>
Estación Barranco	0,530
Estación Cufiño	0,549
Estación El Morro	0,454
Punto de control Galeras	0,683
Punto de control Chiles	0,628
Punto de control Cerro Negro	0,631

Elaboración propia.

En estos casos los valores de coherencia son mayores y son los máximos posibles obtenidos por los mapas de desplazamiento generados, siendo valores moderados a altos, sin embargo, el objetivo es que la correlación de las imágenes sea mayor, esto refleja que hay una variable o varias que hacen que estos valores para que los datos de desplazamiento tengan mayor fiabilidad.

Teniendo en cuenta esos puntos de control, los cuales tienen valores NDVI muy bajos, se construyeron series de tiempo del desplazamiento (LOS) para esas regiones, y lo que se encontró fue que el comportamiento de la deformación es prácticamente el mismo que en las zonas donde se ubican las estaciones GNSS de los volcanes con mayor vegetación, aunque tuvieses valores de coherencia más bajos (figuras 72, 73 y 74), además se puede observar que el  $R^2$  de las líneas de tendencia es cercano a 1 con excepción de la línea de tendencia del punto de control Cerro Negro el cual es de 0,7336 debido a que los datos se encuentran un poco más dispersos entre ellos (figura 74).

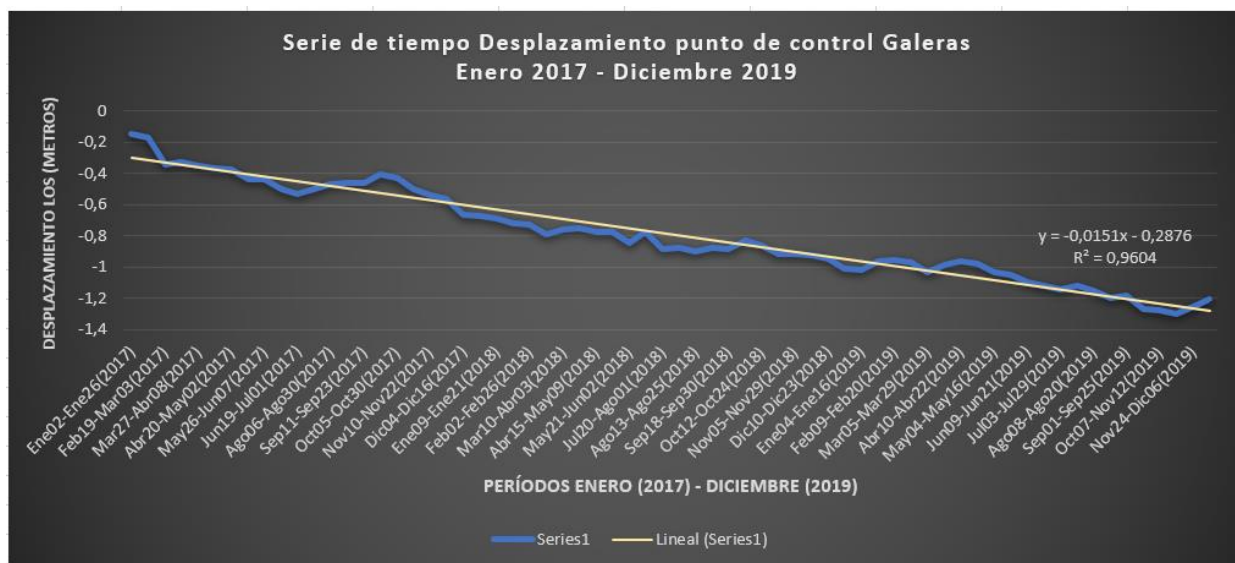


Figura 72. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto de control Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,206m. Fuente propia.

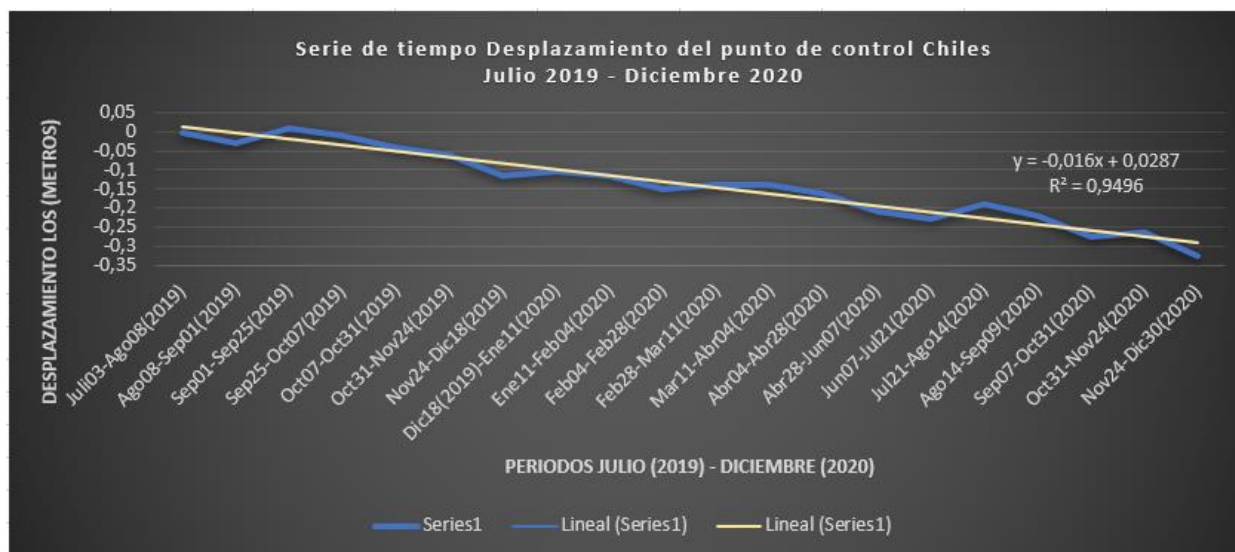


Figura 73. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto de control Chiles entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,326m. Fuente propia.

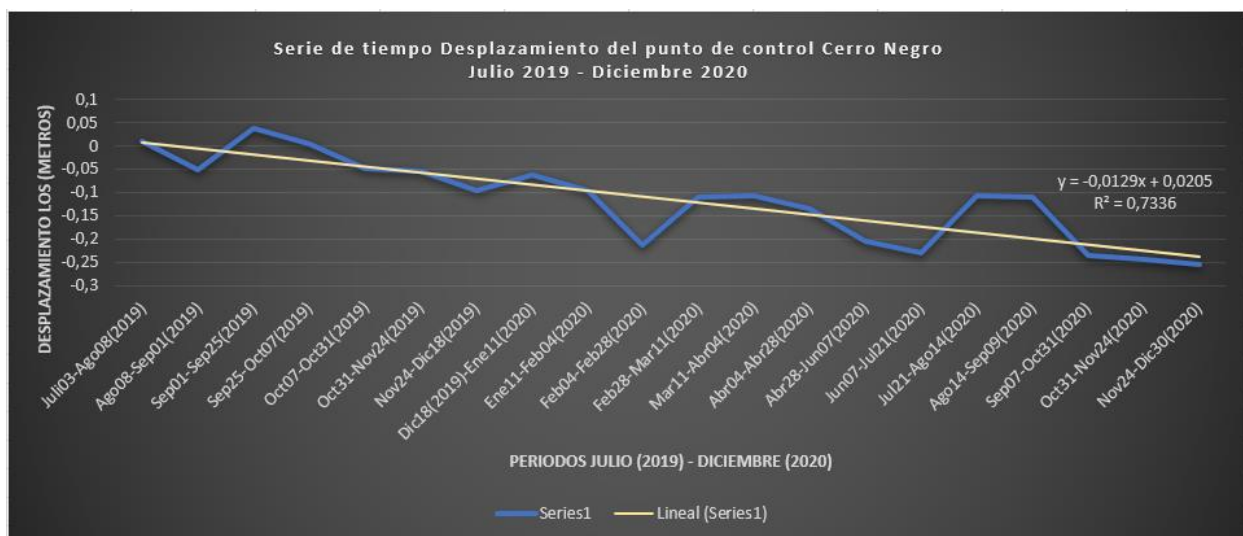


Figura 74. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) para el punto de control Cerro Negro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,254m. Fuente propia.

### 5.3. Resultados información atmosférica de las zonas de estudio

La fracción de nubosidad fue la primera variable a tener en cuenta en este análisis, debido a que con esta se desea sustentar si las zonas de estudio presentan una cobertura constante por nubes a través de los rangos de tiempo del estudio, las cuales pueden condicionar la presencia de las variables como temperatura atmosférica y la humedad relativa.

En el volcán Galeras el sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P empieza a tomar datos de la fracción de nubosidad a partir de agosto de 2018, y además no de todos los días; sin embargo, a pesar de eso se adquirió el valor promedio de la fracción de nubosidad para esa zona con los datos existentes dando una fracción promedio de 0,648, lo que quiere decir que la región estuvo en promedio cubierta en un 64,8% por la nubosidad, dicho dato se obtuvo con la serie de tiempo mostrada en la figura 75.

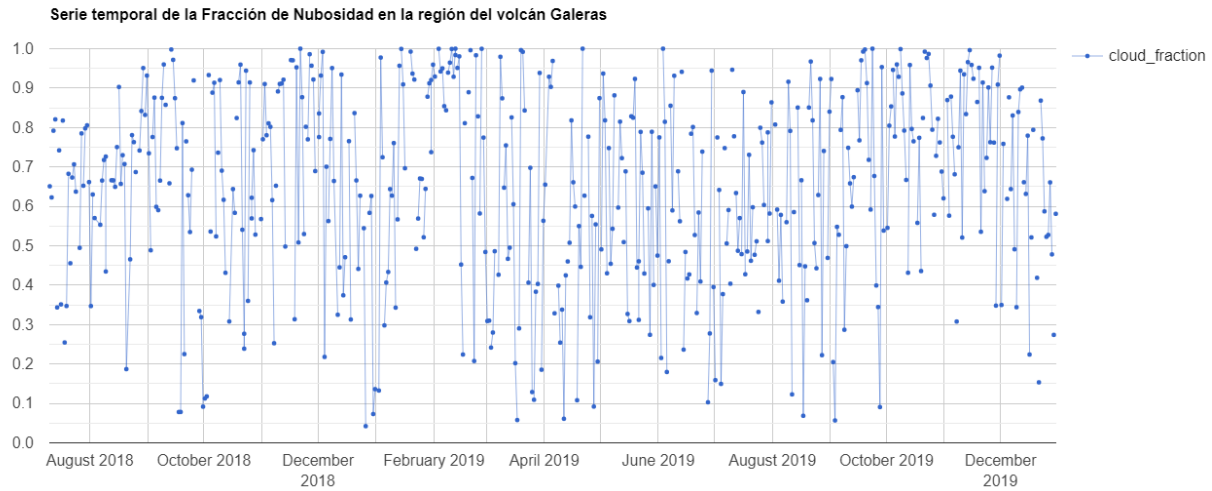


Figura 75. Serie de tiempo de la fracción de nubosidad diaria del volcán Galeras entre agosto de 2018 y diciembre de 2019. Fuente propia.

En la región de Chiles - Cerro Negro se tiene un registro entre julio de 2019 y diciembre de 2020 aunque también incompleto porque no se tienen los datos de todos los días, pero con los existentes se obtuvo una fracción de nubosidad promedio de 0,779, eso quiere decir que en promedio la zona estuvo cubierta de nubes en un 77,9%, siendo un valor mayor que el que presenta la región del Galeras; este dato se obtuvo a partir de la serie temporal mostrada en la figura 76.

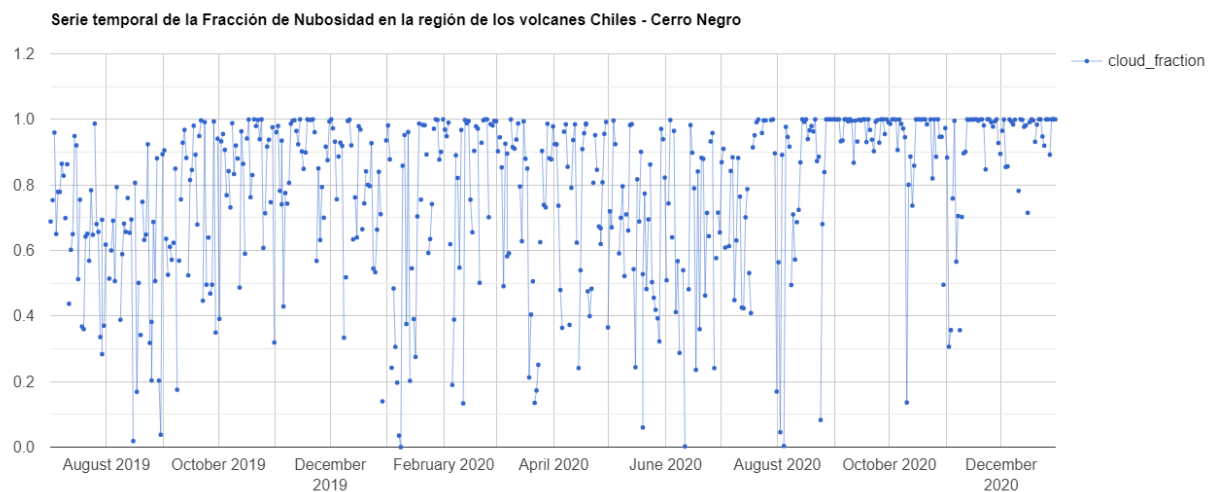


Figura 76. Serie de tiempo de la fracción de nubosidad diaria del volcán Galeras entre agosto de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.



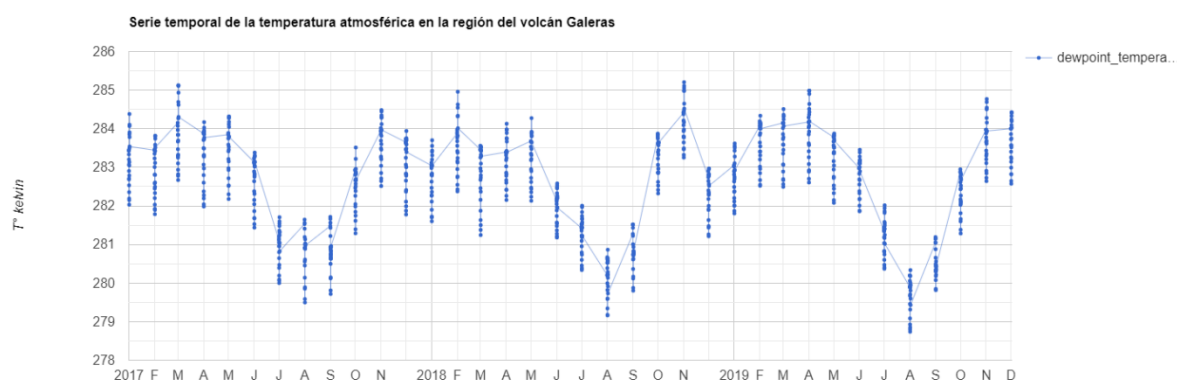
Tabla 10

*Datos de fracción de nubosidad para las regiones de Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.*

<b>Regiones</b>	<b>Fracción de Nubosidad (%)</b>
Galeras	64,8
Chiles y Cerro Negro	77,9

*Elaboración propia.*

En el volcán Galeras se obtuvieron datos de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) toma datos desde enero de 2017 hasta diciembre de 2019, la temperatura que enseña está en grados kelvin como se observa la figura 77, por lo tanto, los valores de temperatura promedio se pasaron a grados centígrados siendo la temperatura promedio para esa región de 9,4°C. En esa misma figura se ilustra la serie de tiempo de esos datos con un patrón específico el cual muestra que los entre los meses de julio y septiembre son los de menor temperatura mientras que entre octubre a diciembre y marzo a mayo son los períodos de tiempo en donde la temperatura atmosférica es mayor.



*Figura 77. Serie de tiempo de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. Fuente propia.*

En los volcanes Chiles - Cerro Negro se obtuvieron datos de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) que toma datos desde julio de 2019 hasta diciembre de 2020, también las

medidas de la temperatura está en grados kelvin los cuales se convirtieron a grados centígrados, obteniéndose una temperatura promedio de 6,2°C. En la figura 78 se muestra la serie de tiempo de estos datos, sin embargo, como no es una serie que abarque un gran período de tiempo como la serie de tiempo del volcán Galeras si se puede determinar que la temperatura atmosférica más baja para los años 2019 y 2020 se presentan en los meses de agosto y septiembre respectivamente, mientras que las temperaturas más altas de los años 2019 y 2020 suceden en los meses de noviembre y marzo respectivamente.

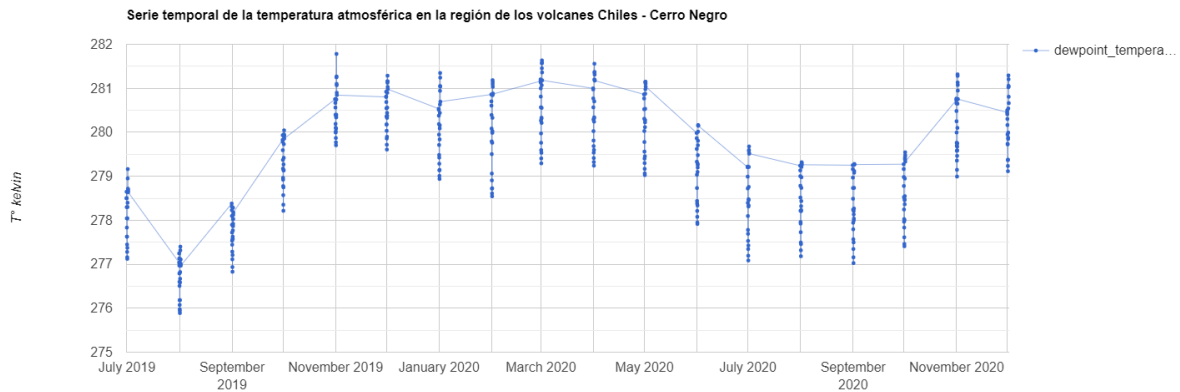


Figura 78. Serie de tiempo de la temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro entre julio de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.

Tabla 11

*Datos de temperatura atmosférica (2m por encima del suelo) promedio para las regiones de Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.*

<b>Regiones</b>	<b>Grados Centígrados (°C)</b>
Galeras	9,4
Chiles y Cerro Negro	6,2

*Elaboración propia.*

Finalmente, para la variable de la humedad relativa (2m por encima del suelo) los valores obtenidos fueron en porcentaje (%), como se mencionó la información obtenida no abarca períodos de tiempo grandes debido a que no se pueden computar en la plataforma Google Earth Engine, así que basado en las series de tiempo de la temperatura atmosférica se seleccionaron

cortos períodos de tiempo como muestras para determinar el comportamiento de la humedad relativa en las zonas del Galeras y de Chiles-Cerro Negro, como se pueden ver en las figuras 79 y 80 que muestran algunos ejemplos de las muestras de series de tiempo procesadas.

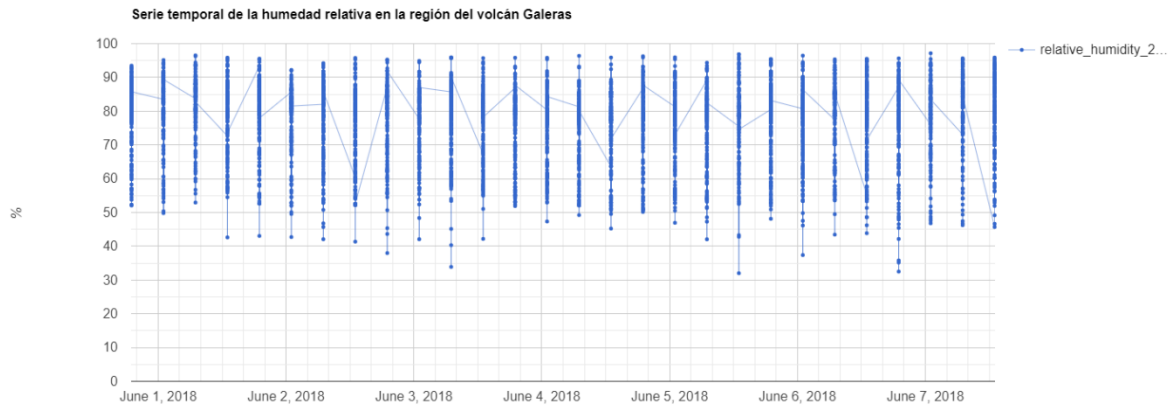


Figura 79. Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre el 1 de junio de 2018 hasta 8 de junio de 2018. Fuente propia.

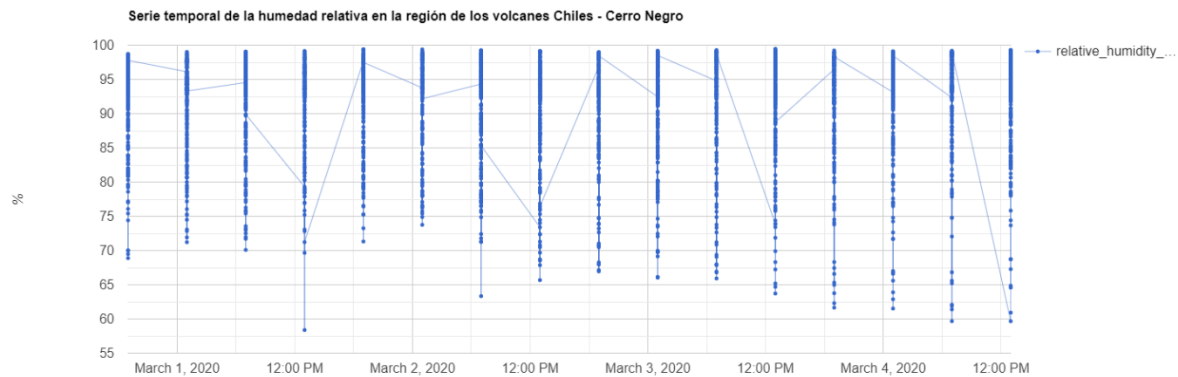


Figura 80. Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro entre el 1 de marzo de 2020 hasta el 8 de marzo de 2020. Fuente propia.

Con los datos de la humedad relativa para cada una de las muestras se identificó que la humedad relativa promedio para la región del Galeras es de 83,5% y para la región de Chiles – Cerro Negro es del 86,6%. En las tablas 12, 13 y 14 se presentan estos resultados.

Tabla 12

*Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las muestras de tiempo de la región del Galeras.*

<b>Muestras</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>
1	91,8
2	70,5
3	91
4	77,2
5	72,8
6	91,5
7	91,8
8	75,7
9	89,6

*Elaboración propia.*

Tabla 13

*Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las muestras de tiempo de la región de Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.*

<b>Muestras</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>
1	81
2	89,7
3	91,3
4	78,7
5	92,1

*Elaboración propia.*

Tabla 14

*Datos de humedad relativa (2m por encima del suelo) promedio para las regiones del Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.*

<b>Regiones</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>
Galeras	83,5
Chiles – Cerro Negro	86,6

*Elaboración propia.*

También se construyeron series de tiempo a partir de los datos de humedad relativa promedio de cada una de las muestras, aunque efectivamente sería más recomendable crear series de tiempo con más datos para ver patrones y comportamientos más detallados, de todas maneras, los resultados con los datos que se tienen son bastante interesantes como se observan en las figuras

81 y 82. En dichas figuras se puede observar que los meses con menor % de humedad relativa coinciden con los meses con menos temperatura atmosférica como es el caso de los meses de agosto y septiembre, y los meses con mayor % de humedad relativa coinciden con los meses con mayor temperatura atmosférica como lo son los meses de noviembre, diciembre, febrero, marzo y abril.

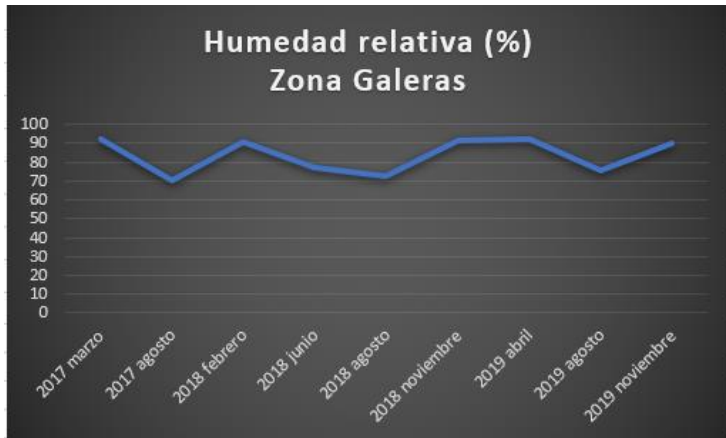


Figura 81. Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región del volcán Galeras entre marzo de 2017 y diciembre de 2019. Fuente propia.

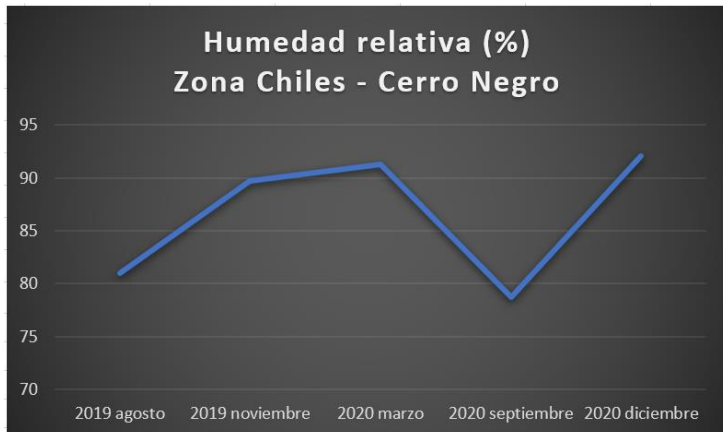


Figura 82. Serie de tiempo de la humedad relativa (2m por encima del suelo) para la región de los volcanes Chiles y Cerro Negro entre agosto de 2019 y diciembre de 2020. Fuente propia.

#### 5.4. Resultados de la velocidad de desplazamiento de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro de Mayasquer

Teniendo los datos de desplazamiento total en línea de vista (LOS) procesados en SNAP en las ubicaciones de las estaciones GNSS y el punto de control Galeras se determinó que el desplazamiento promedio es de -1,175m o -117,5cm entre los días 2 de enero de 2017 y 18 de diciembre de 2019.

Tabla 15

*Datos de desplazamiento acumulado en línea de vista (LOS) para cada una de las ubicaciones de las estaciones GNSS del volcán Galeras y para el punto de control Galeras.*

<b>Localizaciones</b>	<b>Desplazamiento acumulado (LOS) (m)</b>
Estación Cráter	-1,201
Estación Cóndor - Pasto	-1,213
Estación Peladitos	-1,026
Estación Barranco	-1,160
Estación Cufiño	-1,177
Estación Cobanegra	-1,170
Estación Cóndor	-1,247
Estación Chiguaco	-1,209
Estación Mapachico	-1,217
Estación San Cayetano	-1,135
Estación Nariño	-1,139
Punto de control Galeras	-1,206

Elaboración propia.

Para el caso de los volcanes Chiles y Cerro Negro con los datos de desplazamiento acumulado (LOS) de la estación El Morro y los puntos de control Chiles y Cerro Negro se identificó que el promedio del desplazamiento es de -0,289m o -28,9cm entre los días 3 de julio de 2019 y 30 de diciembre de 2020.

Tabla 16

*Datos de desplazamiento acumulado en línea de vista para la ubicación de la estación GNSS El Morro del volcán Chiles y para los puntos de control Chiles y Cerro Negro.*

<b>Localizaciones</b>	<b>Desplazamiento acumulado (LOS) (m)</b>
Estación El Morro	-0,286
Punto de control Chiles	-0,326
Punto de control Cerro Negro	-0,254

Elaboración propia.

Tabla 17

*Datos de desplazamiento promedio en línea de vista (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro.*

<b>Regiones</b>	<b>Desplazamiento (LOS) promedio de los Mapas de desplazamiento (cm)</b>
Galeras	-117,5
Chiles – Cerro Negro	-28,9

Elaboración propia.

Con base en los resultados de desplazamiento (LOS) promedio se construyeron series de tiempo que ayudaron a determinar la velocidad de desplazamiento para estos volcanes (figuras 83 y 84), Efectivamente el comportamiento del desplazamiento para todos los volcanes es de subsidencia y se puede observar que las líneas de tendencias tienen un  $R^2$  cercanos a 1, por lo tanto, la distribución de los datos no se encuentra dispersa brindando gran confiabilidad en los resultados de la tendencia.

A partir de la información de las gráficas se estimó una velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) entre el 2 de enero de 2017 y el 18 de diciembre de 2019 (rango de 1080 días) de -33,391cm/año para el volcán Galeras, y una velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) entre el 3 de julio de 2019 y el 30 de diciembre de 2020 (rango de 546 días) de -17,655cm/año.

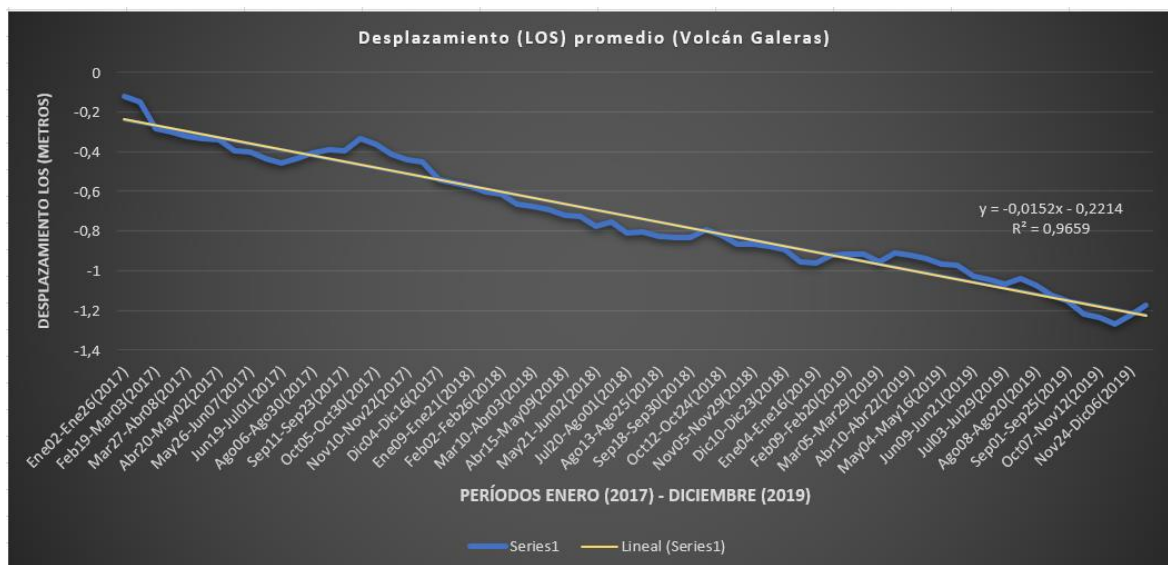


Figura 83. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) promedio para el volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -1,175m. Fuente propia.

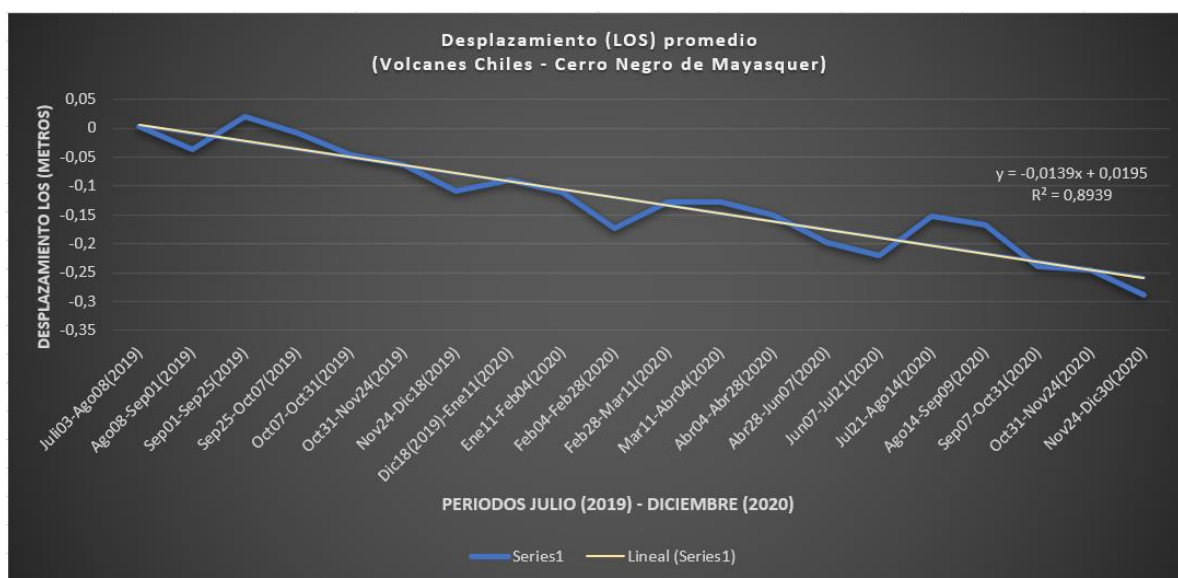


Figura 84. Gráfica de serie de tiempo del desplazamiento (LOS) promedio para los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer entre julio de 2019 y diciembre de 2020. El desplazamiento (LOS) acumulado es de -0,289m. Fuente propia.

Tabla 18

Velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro.

Regiones	Velocidad de desplazamiento (LOS) promedio (cm/año)
Galeras	-33,391
Chiles – Cerro Negro	-17,655

Elaboración propia.



Esta información fue contrastada con los datos de desplazamiento vertical obtenidos a partir de las de las estaciones GNSS del Servicio Geológico Colombiano. Para el volcán Galeras el desplazamiento vertical total promedio de las estaciones GNSS es de 0,00341m o 0,341cm, este valor se obtuvo gracias a la información de la tabla 19. En el caso del volcán Chiles el desplazamiento vertical total de la única estación GNSS que tiene del Servicio Geológico Colombiano (El Morro) es de -0,02123m o -2,123cm, ver tabla 20.

Tabla 19

*Datos de desplazamiento vertical acumulado de las estaciones GNSS del volcán Galeras.*

<b>Estaciones GNSS</b>	<b>Desplazamiento vertical acumulado (m)</b>
Cráter	-0,00236
Cóndor - Pasto	0,01072
Peladitos	-0,01232
Barranco	-0,00885
Cufiño	0,01979
Cobanegra	0,01965
Cóndor	0,00687
Chiguaco	0,00046
Mapachico	0,01093
San Cayetano	-0,00519
Nariño	-0,00216

Elaboración propia.

Tabla 20

*Dato del desplazamiento vertical acumulado de la estación GNSS del volcán Chiles.*

<b>Estación GNSS</b>	<b>Desplazamiento vertical acumulado (m)</b>
El Morro	-0,02123

Elaboración propia.

Estos resultados de los datos GNSS solamente derivan de los datos de las fechas relacionadas a las de las tomas de las imágenes SAR, por lo tanto, no serían suficientes además de que presentan vacíos de información para dar resultados de velocidades de desplazamiento

confiables, sin embargo, el Servicio Geológico Colombiano brindó para este estudio mucha más información GNSS para más el resto de fechas la cual evidenciada en series de tiempo generadas por esa misma institución, como se puede observar en la figura 85.

Con respecto a esas series de tiempo para las estaciones del volcán Galeras el rango de fechas que abarca los datos van desde enero de 2017 hasta diciembre del 2020, y en el caso de la estación El Morro del volcán Chiles esta presenta datos desde abril – mayo del 2019 hasta diciembre de 2020, además para cada una de las series de tiempo, se observa el comportamiento general y la velocidad del desplazamiento, dichas velocidades se pueden visualizar también en las tablas 21 y 22.

Tabla 21

*Datos de la velocidad de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS del volcán Galeras.*

<b>Estaciones GNSS</b>	<b>Velocidad Desplazamiento vertical (cm/año)</b>
Cráter	-0,317
Cóndor - Pasto	-0,460
Peladitos	0,015
Barranco	-0,347
Cufiño	-0,038
Cobanegra	-0,253
Cóndor	-0,306
Chiguaco	-0,530
Mapachico	-0,238
San Cayetano	-0,397
Nariño	-0,224

Elaboración propia.

Tabla 22

*Dato de la velocidad de desplazamiento vertical de la estación GNSS del volcán Chiles.*

<b>Estación GNSS</b>	<b>Velocidad Desplazamiento vertical (cm/año)</b>
El Morro	1,174

Elaboración propia.

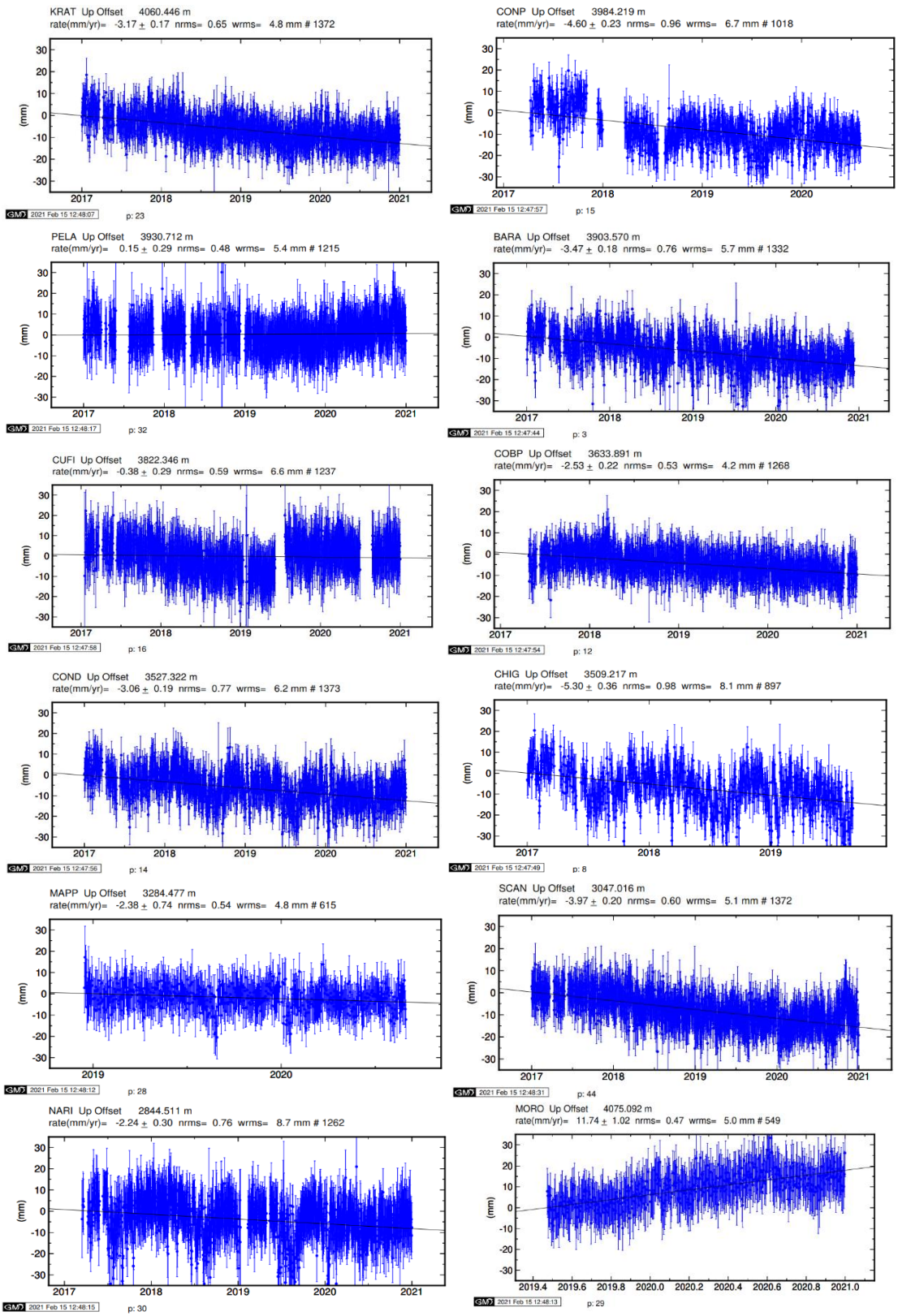


Figura 85. Gráficas de series de tiempo del desplazamiento vertical de las estaciones GNSS del SGC en los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro. Información brindada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Con base en la información de esas series de tiempo de los datos de desplazamiento de las estaciones GNSS se determinó la velocidad de desplazamiento vertical promedio para esos volcanes. En el caso del volcán Galeras la velocidad de desplazamiento es de -0,281cm/año y en el caso de los volcanes Chiles – Cerro Negro es de 1,174cm/año.

Tabla 23

*Datos de las velocidades de desplazamiento vertical promedio para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro con base a los datos GNSS.*

<b>Regiones</b>	<b>Velocidad de desplazamiento vertical promedio (cm/año)</b>
Galeras	-0,281
Chiles – Cerro Negro	1,174

Elaboración propia.

Finalmente, estos resultados se verificaron con los datos de los mapas de velocidad de desplazamiento generados por medio del algoritmo P-SBAS de la aplicación temática SBAS Ground Motion Services del instituto CNR-IREA de Italia en la plataforma Geohazards TEP.

El comportamiento del desplazamiento del volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre de 2019 es de subsidencia, mostrando una velocidad de desplazamiento (LOS) entre 0 a <-2cm/año (figura 86). En ese mapa de velocidad de desplazamientos (LOS) se pueden visualizar rangos de colores para el volcán Galeras en rangos de rojo a verde, donde rojo es el máximo valor negativo (<-2cm/año) y verde el valor de 0cm/año; la zona del cráter del volcán es la que presenta mayor subsidencia con respecto a la periferia del mismo en donde el comportamiento tiendo a ser de mayor estabilidad. Con respecto a los valores de velocidad en el volcán Galeras se encontró en la tabla de datos del mapa observada en Excel que el valor más negativo es -2,1742 como se observa en la figura 87.

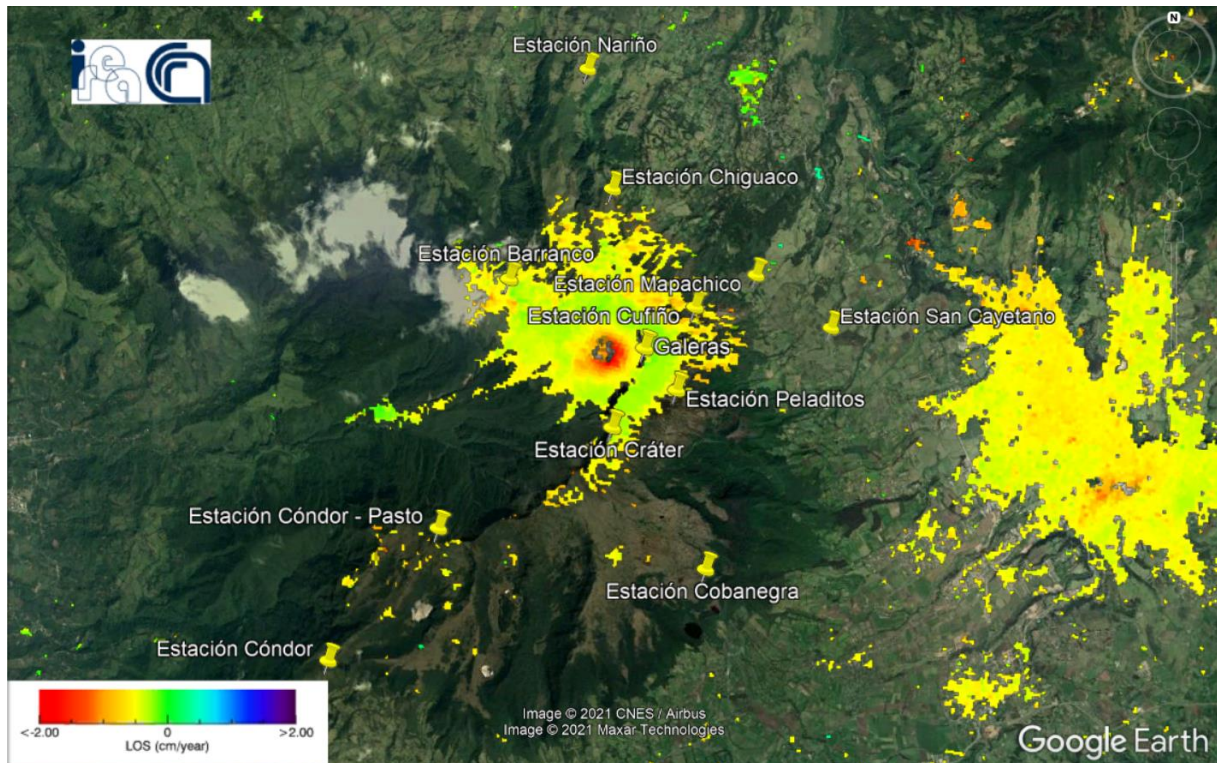


Figura 86. Visualización en Google Earth del mapa de velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para el volcán Galeras entre enero de 2017 y diciembre del 2019 generado con el algoritmo P-SBAS. Fuente propia.

24853	24809,	1.22292,	-77.35708,	4116.08,	-1.2560,
24854	24810,	1.22208,	-77.35792,	4137.86,	-1.6439,
24855	24811,	1.22208,	-77.35792,	4130.18,	-2.0378,
24856	24812,	1.22125,	-77.35792,	4140.78,	-2.1742,
24857	24813,	1.22042,	-77.35792,	4149.26,	-2.1035,
24858	24814,	1.22042,	-77.35792,	4148.78,	-1.5407,
24859	24815,	1.21958,	-77.35792,	4119.96,	-1.0833,

Figura 87. Dato de velocidad de desplazamiento más negativo en el volcán Galeras a partir de la información P-SBAS. Fuente propia.

En el caso de los volcanes Chiles y Cerro Negro también se generó un mapa de velocidad de desplazamiento con el mismo algoritmo P-SBAS en la plataforma Geohazards TEP, mostrando entre enero de 2019 y diciembre de 2020 un comportamiento de levantamiento con una velocidad de entre 0 y  $>2$ cm/año, observar figura 88, en donde el valor de 0 se visualiza de color

verde y el máximo valor de velocidad ( $>2\text{cm/año}$ ) se visualiza de color púrpura oscuro. Se puede identificar que en dirección de norte a sur el levantamiento de la superficie aumenta gradualmente. Por medio de la tabla de Excel del mapa de velocidad se identificó que el valor máximo para los volcanes es de  $2,2315\text{cm/año}$  como se observa en la figura 89.

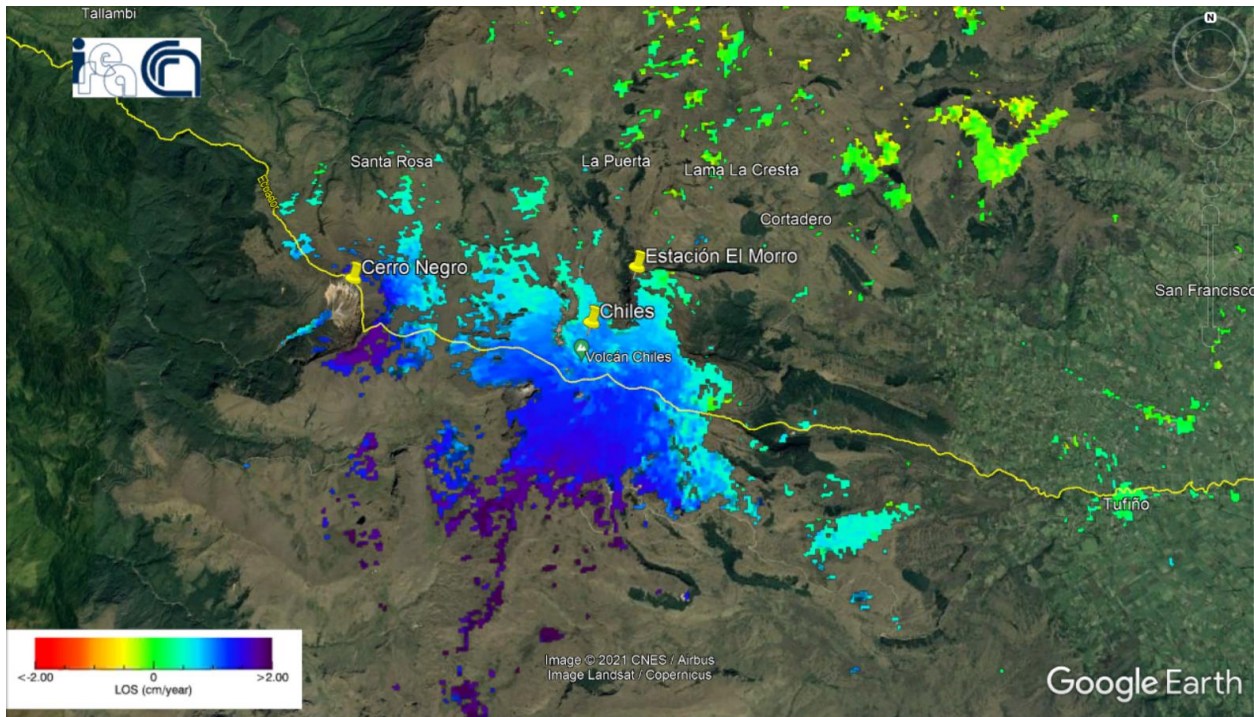


Figura 88. Visualización en Google Earth del mapa de velocidad de desplazamiento en línea de vista (LOS) para los volcanes Chiles y Cerro Negro entre enero de 2019 y diciembre del 2020 generado con el algoritmo P-SBAS. Fuente propia.

2152	2108,	0.77708,	-77.94375,	3892.27,	2.5110,
2153	2109,	0.79625,	-77.94542,	4137.94,	2.1130,
2154	2110,	0.79708,	-77.94542,	4148.58,	2.0618,
2155	2111,	0.79792,	-77.94542,	4154.71,	2.2315,
2156	2112,	0.79958,	-77.94625,	4085.54,	2.0185,
2157	2113,	0.79958,	-77.94708,	4062.95,	1.9389,
2158	2114,	0.80042,	-77.94708,	4056.87,	1.7024,

Figura 89. Dato de velocidad de desplazamiento más positivo en los volcanes Chiles – Cerro Negro a partir de la información P-SBAS. Fuente propia.

Tabla 24

*Datos P-SBAS de velocidades de desplazamiento (LOS) para las regiones de los volcanes Galeras y Chiles-Cerro Negro.*

<b>Regiones</b>	<b>Velocidad de desplazamiento (LOS) (cm/año)</b>
Galeras	-2,1742
Chiles – Cerro Negro	2,2315

Elaboración propia.

En la tabla 25 se observan los datos de velocidades de desplazamiento obtenidos por los mapas de desplazamiento generados en SNAP, los mapas generados con el algoritmo P-SBAS y los datos de las estaciones GNSS, en la tabla se resaltan de un color rojo suave las velocidades negativas y azul suave las velocidades positivas. Se muestra que los resultados de los mapas de desplazamiento generados en SNAP son negativos para ambos volcanes y con valores muy exagerados con respecto a los resultados de los datos GNSS y los del algoritmo P-SBAS, mientras que los resultados de las velocidades a partir de la información GNSS y P-SBAS son muy cercanos estando en los mismos rangos y además coinciden en el comportamiento del desplazamiento, siendo negativo para Galeras y positivo para Chiles – Cerro Negro.

Tabla 25

*Velocidades de desplazamiento para el volcán Galeras y los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.*

<b>Regiones</b>	<b>Velocidad (SNAP) (cm/año)</b>	<b>Velocidad (GNSS) (cm/año)</b>	<b>Velocidad (P-SBAS) (cm/año)</b>
Galeras	-33,391	-0,281	0 a -2,1742
Chiles – Cerro Negro	-17,655	1,174	0 a 2,2315

Elaboración propia.

## 6. Discusión

Los resultados de las series de tiempo del desplazamiento en línea de vista (LOS) de los mapas generados en SNAP muestran mucha diferencia con los datos directos de las estaciones GNSS, ya que se observa una evidente tendencia o comportamiento de subsidencia en general para los volcanes de Galeras, Chiles y Cerro Negro con base a la información obtenida en SNAP con respecto a los datos de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS los cuales muestran un comportamiento de estabilidad. Sumado esto que en la información de velocidad de desplazamiento también se observan diferencias considerables entre los datos procesados en SNAP y los datos de los GNSS, sin embargo, la velocidad de desplazamiento obtenida por el algoritmo P-SBAS es muy cercana a las adquiridas a partir de las mediciones de las estaciones GNSS, esto indica que la técnica SBAS tiene mayor correlación con los datos directos obtenidos en superficie, y además que los mapas de desplazamiento procesados en SNAP pueden estar sujetos a algún tipo de error que no permita mostrar correlación con la información directa obtenida por las estaciones GNSS o por la información del algoritmo P-SBAS.

Esa distorsión se puede corroborar con los bajos a medios valores de coherencia que presentan los mapas de desplazamiento, es decir, que la correlación de las imágenes no es alta para tener una validación confiable con respecto a los datos que se obtienen directamente en la superficie, y eso se puede deber a varios factores como largas distancias de línea base perpendicular y largos períodos de tiempo entre las tomas de los satélites, la influencia de la vegetación, o la influencia atmosférica.

En el caso de la línea base perpendicular y el tiempo de toma de imágenes entre los satélites Sentinel-1, estas no pueden ser condiciones que afecten la información de los interferogramas procesados en SNAP debido a que en general la línea base perpendicular es inferior a los 165m



lo cual quiere decir que está a una distancia trabajable, y además las tomas de las imágenes se hicieron prácticamente entre cada mes teniendo un espacio de tiempo más que razonable para realizar cada interferograma.

Entonces, la distorsión y la falta de una alta coherencia puede estar relacionada a la influencia de la vegetación en las zonas de estudio, ya que las regiones de los volcanes Galeras y Chiles – Cerro Negro, especialmente la del Galeras muestra una alta densidad de la vegetación como se muestra en el mapa NDVI y en donde muchas de las estaciones presentes se encuentran ubicadas en zonas con vegetación, haciendo probablemente que los datos de desplazamiento obtenidos a partir de los interferogramas no tengan la mejor coherencia; sin embargo, durante este trabajo se utilizaron puntos de control donde los valores de coherencia fuesen los mayores posibles y los valores NDVI fuesen los menores posibles teniendo en cuenta el trabajo de Wang et al. (2019) en donde se enfocaron en analizar lugares con bajo NDVI (menores a 0,4) para realizar su estudio DInSAR en el volcán Asama en Japón; pero a pesar de ello el comportamiento de los desplazamientos son muy similares a los mostrados donde los valores de NDVI son altos y los de coherencia son bajos, indicando que la vegetación no es la variable adecuada a tener en cuenta para tener en cuenta como principal causante de la alteración de los resultados DInSAR; aunque hay que considerar que las imágenes NDVI corresponden cada una a información de un sólo día, 6 de febrero de 2020 para el Galeras y 11 de febrero de 2020 para Chiles – Cerro Negro, por lo tanto, hay que considerar que los valores NDVI a través del tiempo pueden estar sujetos a cambios, aunque también es probable que estos no sean significativos.

Es aquí cuando se considera precisamente la variable atmosférica, si bien las imágenes de radar tienen la capacidad de atravesar ciertas coberturas como las nubes, no es del todo cierto que no puedan seguir siendo afectadas por estas condiciones tal como lo indica Ferretti et al.

(2007) la atmósfera puede generar alteraciones en los datos DInSAR por causa de la temperatura, la presión atmosférica y la humedad; por ejemplo, Zebker y Rosen (1996) mencionan que bajo condiciones de humedad relativa del 20% los datos de la fase pueden recibir distorsiones entre los 10 y 14cm. Debido a las afectaciones que puede producir la atmósfera en la información DInSAR se han desarrollado modelos de corrección atmosférica como el modelo GACOS el cual ha sido utilizado en estudios como en el de Rosell et al. (2019) para la ciudad de San Juan en Argentina en donde mostraron que el uso de este modelo permitió que la precisión de la información fuese de mayor calidad incluso identificando un evento de deformación ocasionado por un movimiento sísmico, que previamente sin los datos corregidos atmosféricamente no se hubiese podido determinar.

Por lo tanto, se buscó conocer si la atmósfera podría tener un gran peso específico para generar en los interferogramas y mapas de desplazamiento procesados en SNAP alguna influencia en la decorrelación de los datos, así que se analizó la cobertura de nubosidad, la temperatura atmosférica y la humedad relativa, siendo la última variable la más importante ya que es la que produce mayor distorsión en los datos según Zebker y Rosen (1996); y se identificó que las zonas de estudio están la mayor parte del tiempo cubierta por nubes, con temperaturas atmosféricas bajas y con humedades relativas altas, muy por encima del 20%, indicando que estas variables si pueden influir en gran medida en los datos obtenidos por los interferogramas procesados en SNAP.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

Se aplicó para la región del volcán Galeras y del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro la técnica de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) utilizando imágenes SAR Sentinel-1 en el programa SNAP de la Agencia Espacial Europea, con la cual se obtuvieron interferogramas diferenciales enrollados, interferogramas diferenciales desenrollados, mapas de desplazamiento y mapas de coherencia.

Los mapas de desplazamiento generados en SNAP muestran datos en metros en línea de vista (LOS) y presentan un desplazamiento con comportamiento o tendencia decreciente, tanto para los volcanes Galeras como para el Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro de Mayasquer, indicando una presunta deformación negativa o de subsidencia. Para el caso del volcán Galeras el desplazamiento promedio entre enero de 2017 y diciembre de 2019 es de -117,5cm, y para el caso de Chiles – Cerro Negro entre julio de 2019 y diciembre de 2020 es de -28,9cm. Al verificar dichos resultados con las mediciones directas de desplazamiento vertical de las estaciones GNSS se identifica un gran desfase o decorrelación de los datos ya que la información de los GNSS manifiesta un comportamiento de estabilidad en donde el desplazamiento acumulado es muy leve o poco significativo.

La velocidad de desplazamiento obtenida de la información de los interferogramas y mapas de desplazamiento procesados en SNAP estima valores para el volcán Galeras de -33,391cm/año y para los volcanes Chiles-Cerro Negro de Mayasquer -17,655cm/año. Con la información de las series de tiempo procesadas por el Servicio Geológico Colombiano de las estaciones GNSS se determinó que la velocidad de desplazamiento del volcán Galeras es de -0,281cm/año y de los volcanes Chiles - Cerro Negro de 1,174cm/año; y basándose en los resultados del algoritmo P-SBAS se determinó que el Galeras se mueve a una velocidad entre 0 a -2,1742cm/año y el

Chiles- Cerro Negro a una velocidad entre 0 a 2,2315cm/año, indicando que las velocidades generadas con SBAS son más cercanas a los valores brindados por las mediciones directas de las estaciones GNSS en los volcanes, además que en el comportamiento del desplazamiento para ambos volcanes presentan las mismas tendencias, y por tal motivo esta técnica demuestra tener mayor precisión en los resultados de desplazamiento que la utilizada en el programa SNAP.

Por lo anterior, se concluye que para ambos volcanes no se presenta deformación, simplemente el volcán Galeras experimenta una muy leve subsidencia especialmente en el sector del cráter, y los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer un muy leve levantamiento siendo más evidente hacia el sur de estos, pero como ya se mencionó estos desplazamientos no son muy significativos. También se llega a la conclusión que los resultados de los interferogramas y mapas de desplazamiento (LOS) procesados en SNAP tienen una gran distorsión con respecto a la información GNSS y del algoritmo P-SBAS.

Esa distorsión de los resultados se relaciona con la baja a moderada coherencia que presentan los interferogramas y mapas de desplazamiento, inclusive los valores de coherencia más altos posibles no llegan a mostrar una correlación alta, siendo la máxima posible de un 68,3% estando presente en el volcán Cerro Negro. Se supusieron algunas posibles razones que pudiesen generar esta decorrelación como la distancia de la línea base perpendicular y el rango de tiempo entre toma de imágenes, la presencia de vegetación y las condiciones atmosféricas.

Para el primer caso se corroboró que las distancias de línea base perpendicular entre las imágenes SAR es pertinente, y también las diferencias de tiempo se encuentran en rangos trabajables y se determina que no pueden influir negativamente en los datos DInSAR.

En el caso de la densidad de vegetación se identificó con los mapas NDVI que la mayoría de zonas de los volcanes presentan está densamente vegetada especialmente en la periferia mientras

que hacia los cráteres la vegetación es menor. Con estos mapas se identificó que las localizaciones en donde se encuentran las estaciones GNSS corresponden a valores de índice NDVI medio altos, solamente las estaciones Barranco y Cufiño presentan los valores NDVI más bajos (0,267 y 0,433 respectivamente), y en el caso del GNSS El Morro del volcán Chiles el cual es el único ubicado en dicho volcán presenta un valor NDVI moderado de 0,521.

También se ubicaron puntos de control llamados Galeras, Chiles y Cerro Negro en localizaciones con valores NDVI muy bajos (0,21, 0,235 y 0,063 respectivamente) que coincidieran con valores de coherencia más altos posibles; sin embargo, tanto en las estaciones Barranco, Cufiño, El Morro y los puntos de control Galeras, Chiles y Cerro Negro no mostraron valores de coherencia superiores a 0,683 o 68,3%, además el comportamiento del desplazamiento es prácticamente idéntico al que se evidencia en las demás localizaciones sin importar que tengan mucha o poca vegetación. Por lo tanto, se determinó que la presencia de vegetación no influye significativamente para producir distorsión de los datos DInSAR en este estudio.

Se identificó que las condiciones atmosféricas si influyen en gran peso las mediciones de los datos DInSAR para las regiones de estos volcanes, en primer lugar porque la mayor parte del tiempo están cubiertas por nubes, para la región del Galeras en un 64,8% y para la región de Chiles – Cerro Negro en un 77,9%, lo cual indica que constantemente está siendo afectada por vapor de agua de la cual están hechas las nubes, implicando relación con otras variables como la temperatura atmosférica y la humedad relativa, siendo esta última variable considerada la más influyente en generar distorsión de los datos DInSAR.

Con respecto a la temperatura atmosférica, esta variable en el volcán Galeras es de un promedio de 9,4°C, y en los volcanes Chiles – Cerro Negro de 6,2°C; mientras que la humedad

relativa para el Galeras muestra un valor del 83,5% y para Chiles – Cerro Negro un valor de 86,6%, por consiguiente, sabiendo que si la humedad relativa es del 20% la distorsión de los datos DInSAR puede rondar entre los 10 y 14cm, concluyendo de esta manera que la humedad relativa es el factor más determinante en generar los problemas de alteración de los datos en los interferogramas generados en SNAP para este trabajo, debido a que el valor de esta variable se encuentra muy por encima del 20% para ambas regiones.

Si bien en el presente trabajo se aplicó la técnica SBAS por medio del algoritmo P-SBAS, este no se utilizó en las imágenes procesadas en SNAP, por lo tanto, es recomendable que para las imágenes SAR que se procesadas en dicho software sean para futuros estudios preparadas con dicha técnica la cual demostró generar resultados con alta precisión y cercanos a los que se toman directamente en la superficie, además evidenciando que también ayudó a disminuir los efectos que producen las condiciones atmosféricas.

También se recomienda realizar corrección a las condiciones atmosféricas con el modelo GACOS posteriormente al aplicar la técnica SBAS en las imágenes SAR, con el fin de reducir aún más los problemas de distorsión de los datos ocasionados por esas variables y así obtener información aún más precisa y cercana a la de los instrumentos en tierra como los GPS o GNSS.

Finalmente, sería necesario determinar sólo el desplazamiento vertical y no en línea de vista de los interferogramas para mejorar la exactitud de la información, pero para ello se requeriría otros procesamientos los cuales no se mencionaron en el presente estudio pero que se podrían tener en cuenta para investigaciones futuras.

## 8. Referencias Bibliográficas

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Member, S., Sansosti, E., & Member, S. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.
- Canada Centre for Remote Sensing (2015). *Fundamentals of Remote Sensing, A Canada Centre for Remote Sensing Remote Sensing Tutorial*. Canada: Canada Centre for Remote Sensing. Recuperado de [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundamentals/pdf/fundamentals\\_e.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundamentals/pdf/fundamentals_e.pdf)
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters & United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2018). *Economic Losses, Poverty & Disasters (1998 - 2017)*. Recuperado de [https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018\\_Economic%20Losses.pdf](https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_Economic%20Losses.pdf)
- Cepeda, H. (1984). *Anotaciones acerca de la geología del Volcán Galeras*. Colombia: Instituto Nacional de Investigaciones Mineras.
- Chuvieco, E. (2015). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing An Environment*. Second Edition. Estados Unidos: CRC Press.
- Climate Data Store (2018). *ERA5-Land Monthly averaged data from 1981 to present*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab=overview>

- De Luca, C., Cuccu, R., Elefante, S., Zinno, I., Manunta, M., Casola, V., Rivolta, G., Riccardo Lanari, R., & Casu, F. (2015). An On-Demand Web Tool for the Unsupervised Retrieval of Earth's Surface Deformation from SAR Data: The P-SBAS Service within the ESA G-POD Environment. *Remote Sensing* 7(11), 15630-15650. doi:10.3390/rs71115630
- De Novellis, V., Castaldo, R., De Luca, C., Pepe, S., Zinno, I., Lanari, R., & Solaro, G. (2017). Source modelling of the 2015 Wolf volcano (Galápagos) eruption inferred from Sentinel 1-A DInSAR deformation maps and pre-eruptive ENVISAT time series. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 344(2017) 246 – 256. doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.05.013
- De Zan, F., & Guarnieri, A. M. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(9), 2352 – 2360.
- Departamento Nacional de Planeación (2014). Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/pnd/pnd%202014-2018%20tomo%201%20internet.pdf>
- European Space Agency (2012). *SENTINEL-1 ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services*. Leiden, The Netherlands. Contactivity bv.
- European Space Agency (2015). *Sentinel-5P*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- European Space Agency (2016). *Sentinel-5P TROPOMI User Guide*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>



European Space Agency (2020). *Overview Sentinel-2 MSI*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview>

European Space Agency (2020). *Spatial Resolution*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

European Space Agency (2020). *Interferometric Wide Swath*. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

Fárová, K., Jelének, J., Kopačková-Strnadová, V. & Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI techniques employed to Sentinel-1 data to monitor highway stability: A case study of a massive Dobkovičky landslide, Czech Republic. *Remote Sensing*, 11(22), 1-23.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. The Netherlands. European Space Agency.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20. doi:10.1109/36.898661

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183–9191. doi:10.1029/JB094iB07p09183

Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional (2015). *Chiles – Cerro Negro*. Ecuador. Recuperado de <https://www.igepn.edu.ec/chiles-cerro-negro>

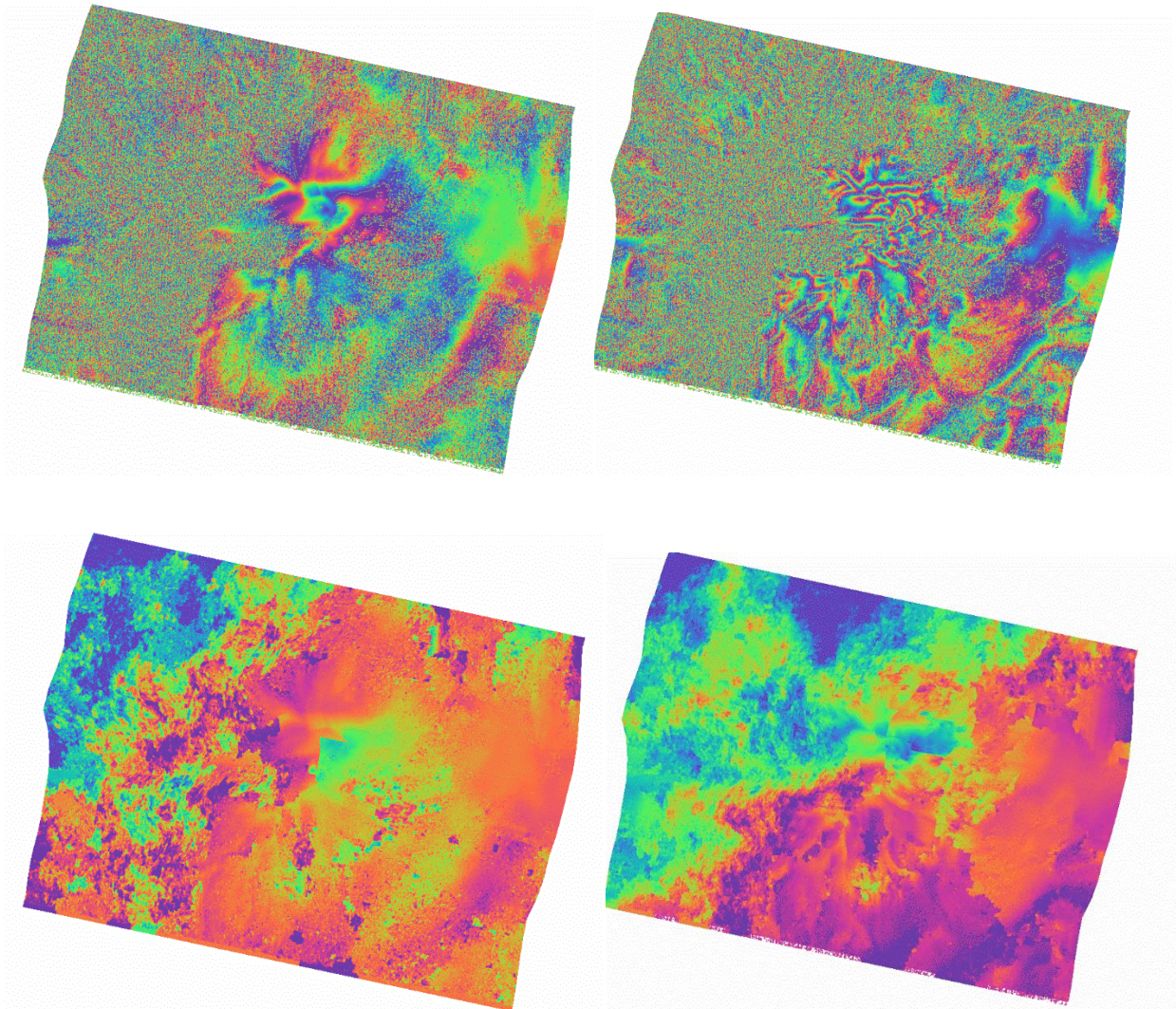
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing, A Remote Sensing Perspective*. Fourth Edition. Pearson Series in Geographic Information Science Keith C. Clarke Editor.
- Martínez, J., & Martín, M. P. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y de Medio Ambiente*. España: Centro de Ciencias Humanas y Sociales, (pp. 1-198).
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Reviews Of Geophysics*, 36(4), 441–500.
- Meyer, F. (2019). Chapter 2: Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. *The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (pp. 1-307). En A. L. Flores-Anderson, K. E. Herndon, R. B. Thapa, & E. Cherrington (Ed). Estados Unidos. First Edition, SERVIR-GLOBAL, SilvaCarbon, USAID and USGS. Recuperado de <https://gis1.servirglobal.net/TrainingMaterials/SAR/Chp2Content.pdf>
- Monsalve, M. L., & Laverde, C. A. (2016). Contribución al registro histórico de actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro (Frontera Colombo-Ecuatoriana). *Boletín de Geología*, 38 (4), 61-78. Recuperado de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5851/6147>. doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n4-2016004>
- Ramanujan, K. (2004). *Humidity Relative to Earth's Temperature*. Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de [https://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/warmer\\_humidity.html](https://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/warmer_humidity.html)

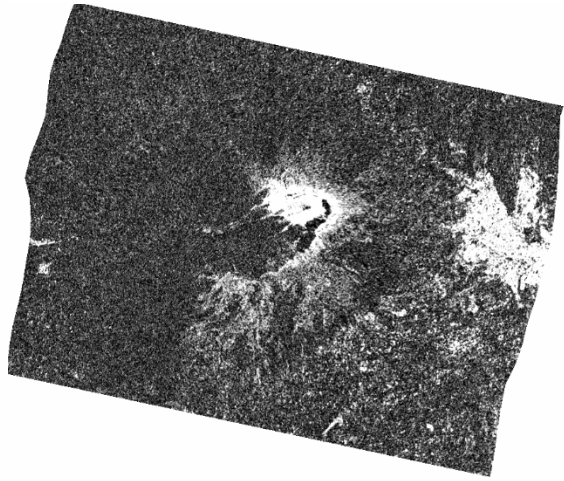
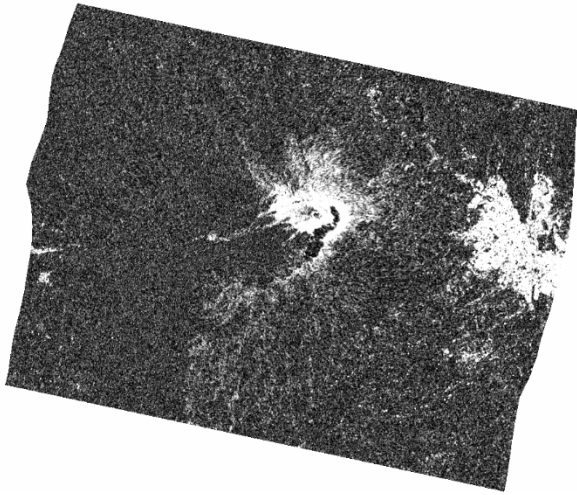
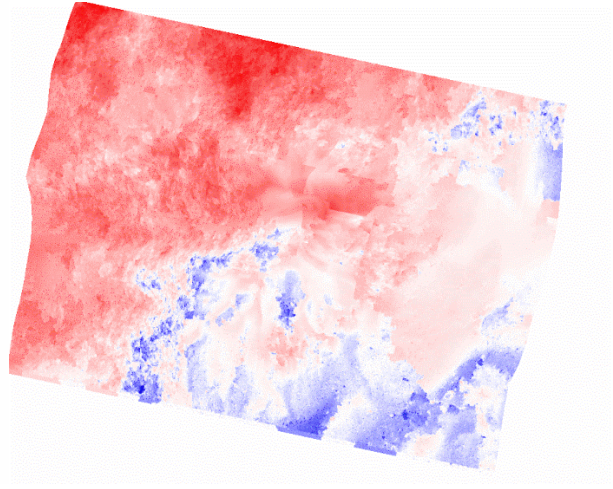
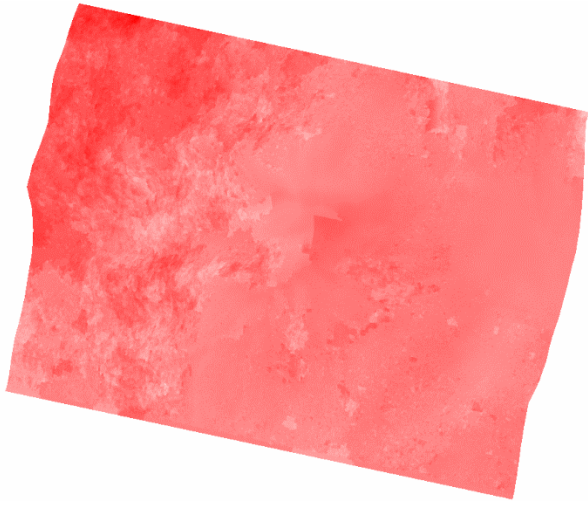
- National Centers for Environmental Information (2020). *Global Forecast System*. Estados Unidos. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 17 de octubre de 2021 de <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>
- Parra, A. (2014). *Análisis Digital de Imágenes de Teledetección, Teoría y Práctica*. Mérida: Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Rocca, F., Prati, C., Guarnieri, A. M., & Ferretti, A. (2000). Sar interferometry and its applications. *Surveys in Geophysics*, 21(2–3), 159–176. doi:10.1023/A:1006710731155
- Rosell, P. A., Euillades, P. A., & Euillades, L. D. (2019). Mitigation of atmospheric noise in DinSAR technique. XVIII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2019 18 al 20 de septiembre de 2019 - Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. doi:10.1109/RPIC.2019.8882133
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., LI, F. K., Rodríguez, E., & Goldstein, M. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *IEEE*, 88(3), 333–382.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in The Great Plaind with ERST. *Remote Sensing Center, Texas A&M University, College Station, Texas, paper A(20)*, 309-317.
- Servicio Geológico Colombiano (2015). Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia. *Dirección de Geoamenazas*. Recuperado de [https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria\\_Actualizacion\\_Mapa\\_Amenaza\\_Volcanica\\_Volcan\\_Galeras\\_2015.pdf](https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapa_Amenaza_Volcanica_Volcan_Galeras_2015.pdf)
- Singleton, A., Li, Z., Hoey, T., & Muller, J. -P. (2014). Evaluating sub-pixel offset techniques as

- an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensings of Environment*, 147(2014), 133-144. doi:10.1016/j.rse.2014.03.003
- Suaréz, B. & Posada, M. E. (2010). Análisis Geográficos. *Revista Instituto Agustín Codazzi*, Número 44, (pp. 45-57).
- Tocasuche, N. P. & Peñaloza, L. K. (2018). Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias Norte y Valderrama del departamento de Boyacá. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia*. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13777>
- Wang, X., Aoki, Y., & Chen, J. (2019). Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatterers, 2014–2018. *Earth, Planets and Space*, 71(121), 1-16. doi:10.1186/s40623-019-1104-9
- Zebker, H. A., & Rosen, P. A. (1997). Atmospheric Artifacts in Interferometric SAR Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research* 102(B4), 7547-7563.

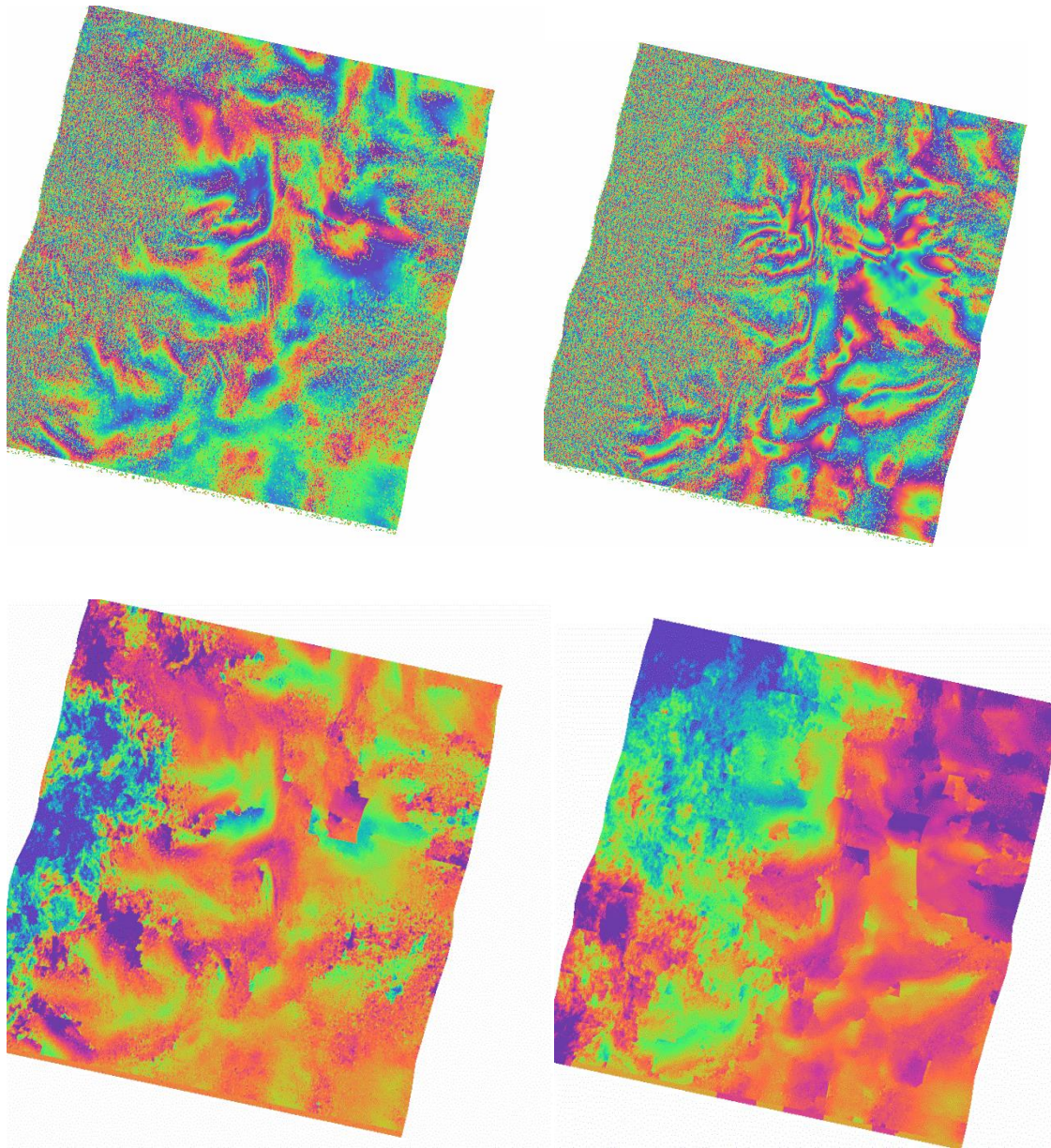
## 9. Anexos

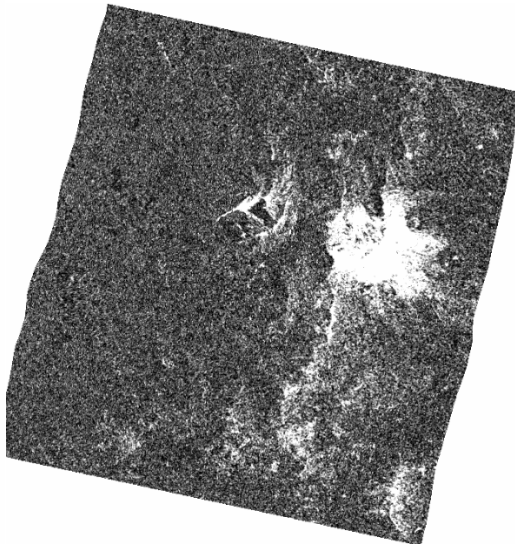
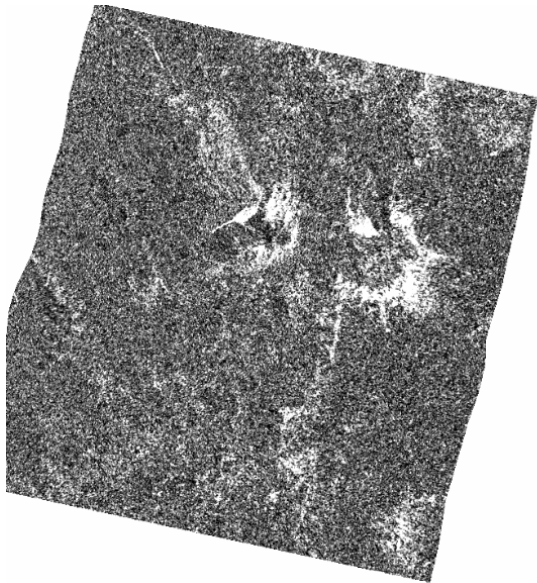
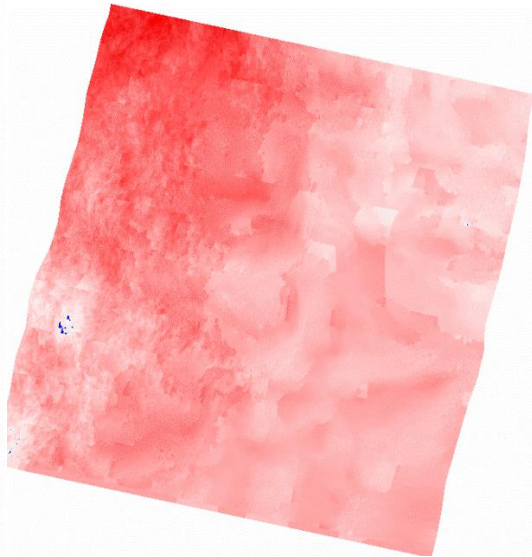
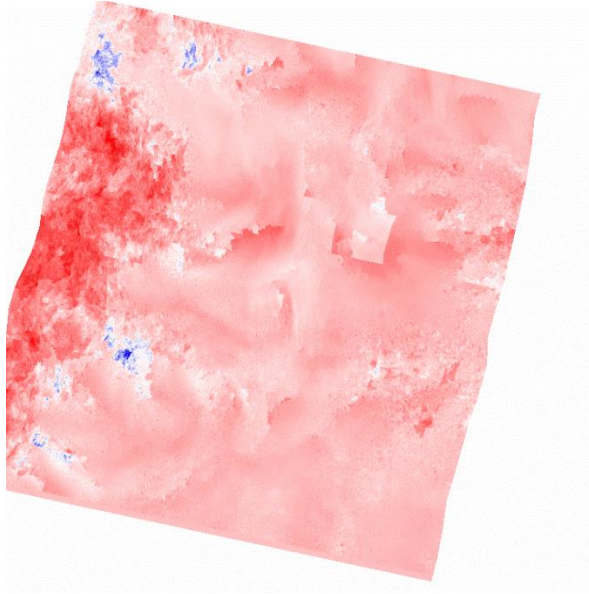
**Anexo 1: Ejemplos de interferogramas diferenciales enrollados, interferogramas diferenciales desenrollados, mapas de desplazamiento (LOS) y mapas de coherencia de la región del volcán Galeras.**





**Anexo 2: Algunos ejemplos de interferogramas diferenciales enrollados, interferogramas diferenciales desenrollados, mapas de desplazamiento (LOS) y mapas de coherencia de la región de los volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer.**







**Anexo 3: Ejemplo de tabla de datos para la creación de la serie de tiempo del desplazamiento (LOS) y el desplazamiento vertical GNSS en la estación Cónдор – Pasto del volcán Galeras.**

<b>Períodos</b>	<b>Datos Desplazamiento (LOS) (m)</b>	<b>Desplazamiento vertical Datos GNSS (m)</b>	<b>Desplazamiento (LOS) acumulado (m)</b>	<b>Desplazamiento vertical acumulado datos GNSS (m)</b>
Ene02-Ene26(2017)	-0,11701		-0,11700838	
Ene26-Feb19(2017)	-0,03100		-0,148012144	
Feb19-Mar03(2017)	-0,10770		-0,255712125	
Mar03-Mar27(2017)	-0,04213		-0,297837681	
Mar27-Abr08(2017)	-0,01377		-0,311612425	
Abr08-Abr20(2017)	-0,02149		-0,333102425	
Abr20-May02(2017)	0	-0,00587	-0,333102425	-0,00587
May02-May26(2017)	-0,04198	0,0102	-0,375085577	0,00433
May26-Jun07(2017)	0,00643		-0,368657319	
Jun07-Jun19(2017)	-0,04308		-0,411739823	
Jun19-Jul01(2017)	-0,01005	0,00698	-0,421793374	0,01131
Jul01-Ago06(2017)	0	0,00426	-0,421793374	0,01557
Ago06-Ago30(2017)	0,03036	0,00134	-0,391433374	0,01691
Ago30-Sep11(2017)	0,02697	-0,01071	-0,364467062	0,0062
Sep11-Sep23(2017)	-0,00400	0,004	-0,368469618	0,0102
Sep23-Oct05(2017)	0,06142	-0,00369	-0,307052462	0,00651
Oct05-Oct30(2017)	-0,03967	0,00169	-0,346722462	0,0082
Oct30-Nov10(2017)	-0,04791		-0,394628672	
Nov10-Nov22(2017)	-0,03051		-0,42513622	
Nov22-Dic04(2017)	-0,00755		-0,432688658	
Dic04-Dic16(2017)	-0,09692		-0,529608658	
Dic16(2017)-Ene09(2018)	-0,01		-0,539608658	
Ene09-Ene21(2018)	-0,01908		-0,558686065	
Ene21-Feb02(2018)	-0,02950		-0,588190848	
Feb02-Feb26(2018)	-0,01179		-0,599977406	
Feb26-Mar10(2018)	-0,05161		-0,65158757	
Mar10-Abr03(2018)	-0,05121		-0,70279757	
Abr03-Abr15(2018)	-0,03886	-0,0066	-0,741661131	0,0016
Abr15-May09(2018)	-0,03207	0,0029	-0,773731131	0,0045
May09-May21(2018)	-0,00927	0,00278	-0,783001131	0,00728
May21-Jun02(2018)	-0,02589	-0,00449	-0,808889473	0,00279
Jun02-Jul20(2018)	-0,04442	0,01319	-0,853309473	0,01598
Jul20-Ago01(2018)	-0,03485		-0,888161481	
Ago01-Ago13(2018)	0,00818		-0,879985538	
Ago13-Ago25(2018)	-0,01759		-0,897575538	
Ago25-Sep18(2018)	0	-0,00528	-0,897575538	0,0107

Sep18-Sep30(2018)	0,00518	-0,00305	-0,892397779	0,00765
Sep30-Oct012(2018)	0,03498	-0,0003	-0,857420157	0,00735
Oct12-Oct24(2018)	-0,02401	-0,00583	-0,881430517	0,00152
Oct24-Nov05(2018)	-0,03795	0,00996	-0,919381429	0,01148
Nov05-Nov29(2018)	0,0048	-0,00793	-0,914581429	0,00355
Nov29-Dic10(2018)	-0,01148	0,00589	-0,926056866	0,00944
Dic10-Dic23(2018)	-0,01755	-0,00213	-0,943606258	0,00731
Dic23(2018)-Ene04(2019)	-0,06342	0,01023	-1,00702889	0,01754
Ene04-Ene16(2019)	-0,00620	-0,00527	-1,013232264	0,01227
Ene16-Feb09(2019)	0,03247	-0,00132	-0,980764761	0,01095
Feb09-Feb20(2019)	0,00574	0,00233	-0,975029097	0,01328
Feb20-Mar05(2019)	-0,00226	-0,00588	-0,977289471	0,0074
Mar05-Mar29(2019)	-0,03685	0,00564	-1,014135573	0,01304
Mar29-Abr10(2019)	0,04239	0,0045	-0,971749068	0,01754
Abr10-Abr22(2019)	-0,00778	-0,01257	-0,979529068	0,00497
Abr22-May04(2019)	-0,01476	0,00485	-0,994289068	0,00982
May04-May16(2019)	-0,01901	0,00081	-1,013298208	0,01063
May16-Jun09(2019)	0,01410	0,00451	-0,999201673	0,01514
Jun09-Jun21(2019)	-0,05443	0,00188	-1,053636567	0,01702
Jun21-Jul03(2019)	-0,01707	-0,0114	-1,070707609	0,00562
Jul03-Jul29(2019)	-0,01961	0,00207	-1,090315081	0,00769
Jul29-Ago08(2019)	0,02318	0,0163	-1,067137722	0,02399
Ago08-Ago20(2019)	-0,03212	-0,00936	-1,099261122	0,01463
Ago20-Sep01(2019)	-0,05344	0,00344	-1,152697268	0,01807
Sep01-Sep25(2019)	-0,03343	-0,00787	-1,186126034	0,0102
Sep25-Oct07(2019)	-0,06144	-0,00414	-1,247568838	0,00606
Oct07-Nov12(2019)	-0,01563	0,00632	-1,26320332	0,01238
Nov12-Nov24(2019)	-0,04614	0,00273	-1,309339438	0,01511
Nov24-Dic06(2019)	0,04181	-0,01621	-1,267524491	-0,0011
Dic06-Dic18(2019)	0,05440	0,01182	-1,21312	0,01072

**Anexo 4: Ejemplo de tabla de datos para la creación de la serie de tiempo del desplazamiento (LOS) y el desplazamiento vertical GNSS en la estación El Morro del volcán Chiles.**

<b>Períodos</b>	<b>Datos Desplazamiento (LOS) (m)</b>	<b>Desplazamiento vertical Datos GNSS (m)</b>	<b>Desplazamiento (LOS) acumulado (m)</b>	<b>Desplazamiento vertical acumulado datos GNSS (m)</b>
Juli03-Ago08(2019)	0	-0,01375	0	-0,01375
Ago08-Sep01(2019)	-0,02806	0,00572	-0,02806	-0,00803
Sep01-Sep25(2019)	0,03889	0,00378	0,01083	-0,00425
Sep25-Oct07(2019)	-0,03146	-0,00139	-0,02063	-0,00564
Oct07-Oct31(2019)	-0,02827	-0,00399	-0,0489	-0,00963
Oct31-Nov24(2019)	-0,02602	0,00681	-0,07492	-0,00282
Nov24-Dic18(2019)	-0,03889	-0,01534	-0,11381	-0,01816
Dic18(2019)-Ene11(2020)	0,00881	-0,00029	-0,105	-0,01845
Ene11-Feb04(2020)	-0,01586	0,00052	-0,12086	-0,01793
Feb04-Feb28(2020)	-0,03492	0,00041	-0,15578	-0,01752
Feb28-Mar11(2020)	0,02273	0,00824	-0,13305	-0,00928
Mar11-Abr04(2020)	-0,00728	-0,01975	-0,14033	-0,02903
Abr04-Abr28(2020)	-0,01648	0,01302	-0,15681	-0,01601
Abr28-Jun07(2020)	-0,02284	-0,0013	-0,17965	-0,01731
Jun07-Jul21(2020)	-0,02132	-0,0014	-0,20097	-0,01871
Jul21-Ago14(2020)	0,0426	-0,01982	-0,15837	-0,03853
Ago14-Sep09(2020)	-0,00977	0,02054	-0,16814	-0,01799
Sep07-Oct31(2020)	-0,04188	0,00412	-0,21002	-0,01387
Oct31-Nov24(2020)	-0,01598	-0,00652	-0,226	-0,02039
Nov24-Dic30(2020)	-0,05977	-0,00084	-0,28577	-0,02123

**Anexo 5: Tabla de datos para la creación de la serie de tiempo del desplazamiento (LOS) promedio (Volcán Galeras)**

<b>Períodos</b>	<b>Datos Desplazamiento (LOS) promedio (m)</b>	<b>Desplazamiento (LOS) acumulado promedio (m)</b>
Ene02-Ene26(2017)	-0,12258736	-0,12258736
Ene26-Feb19(2017)	-0,025855314	-0,148442673
Feb19-Mar03(2017)	-0,13550666	-0,283949333
Mar03-Mar27(2017)	-0,017160463	-0,301109796
Mar27-Abr08(2017)	-0,019699906	-0,320809702
Abr08-Abr20(2017)	-0,014865367	-0,335675069
Abr20-May02(2017)	-0,002544319	-0,338219388
May02-May26(2017)	-0,057434352	-0,39565374
May26-Jun07(2017)	-0,007211016	-0,402864756
Jun07-Jun19(2017)	-0,033995209	-0,436859965
Jun19-Jul01(2017)	-0,018613365	-0,45547333
Jul01-Ago06(2017)	0,021022507	-0,434450823
Ago06-Ago30(2017)	0,029567464	-0,404883359
Ago30-Sep11(2017)	0,013937206	-0,390946153
Sep11-Sep23(2017)	-0,005465281	-0,396411434
Sep23-Oct05(2017)	0,05950311	-0,336908324
Oct05-Oct30(2017)	-0,02352857	-0,360436894
Oct30-Nov10(2017)	-0,051780639	-0,412217533
Nov10-Nov22(2017)	-0,030816654	-0,443034187
Nov22-Dic04(2017)	-0,006745858	-0,449780045
Dic04-Dic16(2017)	-0,093508575	-0,54328862
Dic16(2017)-Ene09(2018)	-0,012683507	-0,555972127
Ene09-Ene21(2018)	-0,021130467	-0,577102593
Ene21-Feb02(2018)	-0,027473192	-0,604575785
Feb02-Feb26(2018)	-0,007542258	-0,612118043
Feb26-Mar10(2018)	-0,051502514	-0,663620556
Mar10-Abr03(2018)	-0,014097751	-0,677718307
Abr03-Abr15(2018)	-0,013372797	-0,691091104
Abr15-May09(2018)	-0,0283775	-0,719468604
May09-May21(2018)	-0,008989167	-0,72845777
May21-Jun02(2018)	-0,045748885	-0,774206656
Jun02-Jul20(2018)	0,0193725	-0,754834156
Jul20-Ago01(2018)	-0,056914334	-0,81174849
Ago01-Ago13(2018)	0,005717735	-0,806030755
Ago13-Ago25(2018)	-0,01948	-0,825510755
Ago25-Sep18(2018)	-0,009260426	-0,834771181
Sep18-Sep30(2018)	0,001087865	-0,833683316
Sep30-Oct01(2018)	0,039208135	-0,794475181
Oct12-Oct24(2018)	-0,026435313	-0,820910493

Oct24-Nov05(2018)	-0,046989724	-0,867900217
Nov05-Nov29(2018)	0,003740981	-0,864159236
Nov29-Dic10(2018)	-0,013706857	-0,877866093
Dic10-Dic23(2018)	-0,017025457	-0,894891549
Dic23(2018)-Ene04(2019)	-0,060198022	-0,955089571
Ene04-Ene16(2019)	-0,006247781	-0,961337353
Ene16-Feb09(2019)	0,041532068	-0,919805285
Feb09-Feb20(2019)	0,003829273	-0,915976012
Feb20-Mar05(2019)	0,000550802	-0,915425209
Mar05-Mar29(2019)	-0,041238008	-0,956663218
Mar29-Abr10(2019)	0,045770542	-0,910892676
Abr10-Abr22(2019)	-0,011216994	-0,92210967
Abr22-May04(2019)	-0,016883398	-0,938993067
May04-May16(2019)	-0,030177368	-0,969170435
May16-Jun09(2019)	-0,002933593	-0,972104028
Jun09-Jun21(2019)	-0,054630408	-1,026734436
Jun21-Jul03(2019)	-0,018782318	-1,045516754
Jul03-Jul29(2019)	-0,023363123	-1,068879877
Jul29-Ago08(2019)	0,026526332	-1,042353545
Ago08-Ago20(2019)	-0,033232857	-1,075586402
Ago20-Sep01(2019)	-0,048486576	-1,124072978
Sep01-Sep25(2019)	-0,025569408	-1,149642386
Sep25-Oct07(2019)	-0,068956462	-1,218598848
Oct07-Nov12(2019)	-0,017707811	-1,236306659
Nov12-Nov24(2019)	-0,032309078	-1,268615737
Nov24-Dic06(2019)	0,045842912	-1,222772825
Dic06-Dic18(2019)	0,047656796	-1,175116028

**Anexo 6: Tabla de datos para la creación de la serie de tiempo del desplazamiento (LOS) promedio (Volcanes Chiles – Cerro Negro de Mayasquer)**

<b>Períodos</b>	<b>Datos Desplazamiento (LOS) promedio (m)</b>	<b>Desplazamiento (LOS) acumulado promedio (m)</b>
Juli03-Ago08(2019)	0,00228	0,00228
Ago08-Sep01(2019)	-0,039073333	-0,036793333
Sep01-Sep25(2019)	0,056433333	0,01964
Sep25-Oct07(2019)	-0,0284	-0,00876
Oct07-Oct31(2019)	-0,037903333	-0,046663333
Oct31-Nov24(2019)	-0,017056667	-0,06372
Nov24-Dic18(2019)	-0,043963333	-0,107683333
Dic18(2019)-Ene11(2020)	0,017423333	-0,09026
Ene11-Feb04(2020)	-0,02033	-0,11059
Feb04-Feb28(2020)	-0,06313	-0,17372
Feb28-Mar11(2020)	0,04672	-0,127
Mar11-Abr04(2020)	-0,001336667	-0,128336667
Abr04-Abr28(2020)	-0,022703333	-0,15104
Abr28-Jun07(2020)	-0,04642	-0,19746
Jun07-Jul21(2020)	-0,02217	-0,21963
Jul21-Ago14(2020)	0,068356667	-0,151273333
Ago14-Sep09(2020)	-0,01577	-0,167043333
Sep07-Oct31(2020)	-0,072643333	-0,239686667
Oct31-Nov24(2020)	-0,0049	-0,244586667
Nov24-Dic30(2020)	-0,04412	-0,288706667