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

NATALIA DEL PILAR TOCASUCHE CASTRO

LIZETH KATERIN PEÑALOZA MOLINA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C.

MAYO DE 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

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CATASTRAL Y GEODESTA

LIZETH KATERIN PEÑALOZA MOLINA

20121025075

NATALIA DEL PILAR TOCASUCHE CASTRO

20121025057

JOSÉ LUIS HERRERA ESCORCIA

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

DIRECTOR

_____

JURADO

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a nuestros padres Martha Peñaloza Molina, Jineth Castro Orozco y Álvaro Tocasuche Rodriguez, por el apoyo incondicional a lo largo de nuestras vidas, especialmente durante el periodo de formación como Ingenieras Catastrales y Geodestas.

A nuestro Director del proyecto, Jose Luis Herrera Escorcia por guiarnos y formarnos desde nuestro ingreso al semillero de investigación GEIPER hasta la culminación de nuestro proyecto de grado.

Al grupo de investigación NIDE y al semillero de investigación GEIPER por propiciar los espacios para el desarrollo de la investigación en la Facultad de Ingeniería.

Al CREPAD de Boyacá quien nos proporcionó información fundamental para el desarrollo de nuestro proyecto de grado.

Al Congreso Internacional de Geomática 2018 por permitirnos presentar los resultados de nuestro proyecto de grado en la ciudad de la Habana, Cuba.

A las personas que contribuyeron a nuestro desarrollo integral como mujeres empoderadas, con pensamiento crítico y social.

Finalmente, a la población bogotana quien nos brindó la posibilidad de acceder a la Universidad Pública.

CONTENIDO

1. RESUMEN 10
2. ABSTRACT 11
3. INTRODUCCIÓN 12
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 14
5. JUSTIFICACIÓN 18
6. OBJETIVOS 19
   6.1. General 19
   6.2. Específicos 19
   5.1. Análisis de características generales en los municipios de la zona de estudio 22
      5.1.1. Soatá 22
      5.1.2. Boavita 23
      5.1.3. Nuestra señora de Guadalupe de la Uvita 24
      5.1.4. Susacón 25
      5.1.5. Socotá 26
      5.1.6. Jericó 27
      5.1.7. Chita 28
      5.1.8. Sativanorte 29
      5.1.9. Sativasur 30
   5.2. Deslizamientos ocurridos en la zona de estudio 32
      5.2.1. Soatá 33
      5.2.2. Boavita 34
      5.2.3. Nuestra Señora de Guadalupe de la Uvita 34
      5.2.4. Susacón 35
      5.2.5. Socotá 36
      5.2.6. Jericó 37
      5.2.7. Chita 38
      5.2.8. Sativanorte 39
      5.2.9. Sativasur 41
6. MARCO TEÓRICO 42
   6.1. Introducción a la teledetección 42
   6.2. Radar 44

6.3. Radar SAR 46
6.3.1. Características de diferentes sensores SAR 47
6.4. Conceptos importantes de Radar 48
6.4.1. Fase y amplitud 48
6.4.2. Ángulo de incidencia 50
6.4.3. Resolución Espacial 50
6.4.4. Distorsiones geométricas 53
6.4.5. Polarización 54
6.4.6. Tipos de Reflexión 56
6.4.7. Niveles de procesamiento 59
6.5. Interferometría de radar 61
6.5.1. Línea base 63
6.5.2. Coherencia 66
6.5.3. Fase interferométrica 70
6.5.4. Ruido de fase interferométrica 71
6.5.5. Aplanamiento 73
6.5.6. Desenrollamiento de fase 75
6.6. Procesamiento complementario 76
6.6.1. Fase a desplazamiento 76
6.6.2. Fase a altura 78
6.6.3. Georreferenciación y ortorrectificación 79
6.7. Movimientos en masa 79
6.7.1. Desprendimientos o caídas 80
6.7.2. Deslizamientos 81
6.7.3. Flujos 82
6.7.4. Vuelco o desplome 83
6.7.5. Expansiones laterales 83
6.7.6. Movimientos complejos 83
6.7.7. Movimientos compuestos 84
6.7.8. Movimiento por reptación 84
6.8. Programa y misión 86
6.8.1. Copernicus 86
6.8.2. Sentinel 1 89

6.9. Software 92
6.9.1. Sentinel Application Platform- SNAP 92
6.9.2. SNAPHU 93
6.10. Series de tiempo con algoritmo Coherence Change Detection (CCD) 95
7. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS INTERFEROMÉTRICOS 96
7.1. Antecedentes a nivel mundial 97
7.2. Antecedentes en Colombia 101
8. METODOLOGÍA 108
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 115
9.1. Imágenes disponibles Sentinel 1 115
9.1.1. Selección de imágenes que conforman el stack de acuerdo al análisis de calidad interferométrica 116
9.2. Interpretación y análisis de los interferogramas 118
9.2.1. Análisis complementario de fallas geológicas presentes en la zona de estudio. 120
9.2.2. Análisis anual por patrones de Franjas interferométricas 125
9.2.3. Análisis por valores de desplazamiento 135
9.2.4. Análisis de deslizamientos en la zona de estudio 138
9.3. Análisis con estaciones continuas GPS 172
9.4. Comparación de interferogramas de diferentes zonas del país 177
9.4.1. Zona de estudio 177
9.4.2. Bogotá D.C. 179
9.4.3. Riohacha 180
9.4.4. Nevado del Cocuy 182
9.4.5. Mesa de los santos 183
9.5. Series de Tiempo 185
10. CONCLUSIONES 189
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 192

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación de la zona de estudio en el Cañón del Chicamocha Fuente. Elaboración propia a partir de cartografía base proporcionada por el IGAC. 21
Ilustración 2. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Soatá. Fuente. Elaboración Propia. 33
Ilustración 3. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Boavita. Fuente. Elaboración Propia. 34
Ilustración 4. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de la Uvita. Fuente. Elaboración Propia. 35
Ilustración 5. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Susacón. Fuente. Elaboración Propia. 36
Ilustración 6. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Socotá. Fuente. Elaboración Propia. 37
Ilustración 7. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Jericó. Fuente. Elaboración Propia. 38
Ilustración 8. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Chita. Fuente. Elaboración Propia. 39
Ilustración 9. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Sativanorte. Fuente. Elaboración Propia 40
Ilustración 10. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Sativasur. Fuente. Elaboración Propia 41
Ilustración 11. Funcionamiento SAR. Fuente. (GlobeSAR, s.f.) 46
Ilustración 12. Componentes de una onda. Fuente. (Naranjo, 2016) 48
Ilustración 13. Onda electromagnética vista en formato complejo. Fuente. (Villa, 2016) 49
Ilustración 14. Slant Range y Ground Range. Fuente. Elaboración propia a partir de información proporcionada por (Jensen, 2006) 51
Ilustración 15. Transmisión de un sistema SAR. Fuente. (Lira, 2002) 52
Ilustración 16. Efectos geométricos SAR. Fuente. (ESA, s.f.-a) 54
Ilustración 17. Propagación de onda polarizada. Fuente. (Hexagon Geospatial, s.f.-d) 55
Ilustración 18. Tipos de reflexión o retrodispersión. Teledetección con RADAR. Fuente. (Lira, 2002) 56
Ilustración 19. Reflector Diedro y Triedro. Fuente. (GlobeSAR, s.f.) 57
Ilustración 20. Reflexión según la humedad de la superficie. Fuente. (Karszenbaum & Barrazza,, s.f.) 58

Ilustración 21. Interacción de microondas según su longitud de onda. Fuente. (ESA, s.f.-a) 59
Ilustración 22. Configuración interferométrica de un sistema SAR. Fuente. Elaboración propia a partir de información obtenida de (Seppi, 2016) 64
Ilustración 23. Configuración interferométrica de un sistema SAR. Fuente. Elaboración propia a partir de información obtenida de (Seppi, 2016) 74
Ilustración 24. Relación entre fase enrollada y desenrollada. Fuente. (Hexagon Geospatial, s.f.-a) 75
Ilustración 25. Modos de Adquisición Sentinel 1. Fuente. (ESA, 2013) 89
Ilustración 26. Interferometric Wide. Bursts (Ráfagas, líneas horizontales) y Sub-Swaths (división vertical). Fuente. (ESA, s.f.-a) 90
Ilustración 27. Constelación Sentinel-1. Fuente. (ESA, 2013) 91
Ilustración 28. Diagrama de flujo de la estrategia de implementación de módulos interferométricos. Fuente. Interferometric Functionality. Fuente. (SNAP, 2015) 93
Ilustración 29. Representación Algoritmo de Árbol de Expansión Mínima (MST). Fuente. Blog About programming, Algorithms and More 95
Ilustración 30. Representación Algoritmo de flujo de costo mínimo (MCF). Fuente. Blog Grafos Unefa: Redes de Flujo 95
Ilustración 31. Interferograma zona de estudio sin filtros. Generado con el software SNAP. ... 110
Ilustración 32. Interferograma zona de estudio después de aplicar el filtro Deburst. Generado con el software SNAP 110
Ilustración 33. Remoción de la topografía de la zona de estudio. Generado con el software SNAP 111
Ilustración 34. Interferograma zona de estudio después de aplicar el filtro Goldstein. Generado con el software SNAP 112
Ilustración 35. Interferograma desenrollado de la zona de estudio. Generado con el software SNAP y SNAPHU. 112
Ilustración 36. Mapa de desplazamientos (en metros) de la zona de estudio. Generado con el software SNAP 113
Ilustración 37. Metodología del proyecto. Fuente. Elaboración propia 114
Ilustración 38. Direcciones de paso y LOS de Sentinel 1 en la zona de estudio. Fuente. Copernicus Open Access Hub, ESA. Elaboración propia. 119

Ilustración 39. Diferencia en interferogramas en relación con su dirección de paso y LOS. Terremoto en Bam - Iran, 2003. Fuente. (Pritchard & Fielding, 2013) 119
Ilustración 40. Visualización de cambios en el terreno, representados en interferogramas de órbita ascendente (rojo) y descendente (azul). Fuente: (Geospatial Information Authority of Japan, 2004) 120
Ilustración 41. Fallas presentes en la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el Atlas Geológico Colombiano 2015, SGC. 121
Ilustración 42. Esquema de Falla definida o normal. Fuente. Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES, Argentina. 122
Ilustración 43. Esquema de Falla Cubierta. Fuente. (Tarbuck & Lutgens, 2001) 123
Ilustración 44. Esquema Falla de Rumbo. Fuente. (Tarbuck. & Lutgens, 2001) 124
Ilustración 45. Esquema de falla inversa o de cabalgamiento Fuente. Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES, Argentina 125
Ilustración 46. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 1. Fuente. Elaboración propia 141
Ilustración 47. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 2. Fuente. Elaboración propia 143
Ilustración 48. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 3. Fuente. Elaboración propia 146
Ilustración 49. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 4. Fuente. Elaboración propia 148
Ilustración 50. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 5. Fuente. Elaboración propia 151
Ilustración 51. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 6. Fuente. Elaboración propia 153
Ilustración 52. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 6. Fuente. Elaboración propia 154
Ilustración 53. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 8. Fuente. Elaboración propia 156
Ilustración 54. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 9. Fuente. Elaboración propia. 158

Ilustración 55. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 10. Fuente. Elaboración propia. 161
Ilustración 56. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 1. Fuente. Elaboración propia 163
Ilustración 57. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 2. Fuente. Elaboración propia. 165
Ilustración 58. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 3. Fuente. Elaboración propia 167
Ilustración 59. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 4. Fuente. Elaboración propia 169
Ilustración 60. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 5. Fuente. Elaboración propia. 171
Ilustración 61. Ubicación de las estaciones GNSS con respecto a la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia 173
Ilustración 62. Ejemplo de interpolación para un conjunto de datos de datos GNSS antes y después con alturas constantes- Zona de estudio. Fuente. Elaboración propia. 174
Ilustración 63. Ejemplo diferencia de alturas a partir de las interpolaciones antes y después de las fechas de un interferograma utilizando datos GNS y alturas constantes. Fuente. Elaboración propia. 175
Ilustración 64. Ejemplo diferencia de alturas a partir de las interpolaciones antes y después de las fechas de un interferograma utilizando solamente datos GNSS. Fuente. Elaboración propia.... 176
Ilustración 65. Mejores interferogramas de la zona de estudio, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018) 178
Ilustración 66. Interferograma Bogotá, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (Guerrero & Hernandez, 2017), (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018)..... 180
Ilustración 67. Interferograma Riohacha Guajira, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (Montaño & Orozco, 2018),(ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018) 181
Ilustración 68. Interferograma PNN del Cocuy, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018) 182
Ilustración 69. Interferogramas Mesa de los santos. Fuente. Elaboración propia. 184

Ilustración 70. Series de Tiempo del mapa de coherencia realizadas para cada municipio de la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia 186

GRÁFICAS

Gráfica 1. Ubicación de la zona de estudio en el Cañón del Chicamocha. Fuente. Elaboración propia 117
Gráfica 2. Valores de Desplazamiento de la Falla de Chicamocha. Fuente. Elaboración propia 136
Gráfica 3. Valores de Desplazamiento de la Falla de Socotá. Fuente. Elaboración propia 137
Gráfica 4. Valores de Desplazamiento de la Falla de Soápaga. Fuente. Elaboración propia 138
Gráfica 5. Valores de Desplazamiento deslizamiento 1. Fuente. Elaboración propia 142
Gráfica 6. Valores de Desplazamiento deslizamiento 2. Fuente. Elaboración propia 145
Gráfica 7. Valores de Desplazamiento deslizamiento 3. Fuente. Elaboración propia 147
Gráfica 8. Valores de Desplazamiento deslizamiento 4. Fuente. Elaboración propia 150
Gráfica 9. Valores de Desplazamiento deslizamiento 5. Fuente. Elaboración propia 152
Gráfica 10. Valores de Desplazamiento deslizamiento 8. Fuente. Elaboración propia 157
Gráfica 11. Valores de Desplazamiento deslizamiento 9. Fuente. Elaboración propia 159
Gráfica 12. Valores de Desplazamiento deslizamiento 10. Fuente. Elaboración propia 162
Gráfica 13. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 1. Fuente. Elaboración propia 164
Gráfica 14. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 2. Fuente. Elaboración propia 166
Gráfica 15. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 3. Fuente. Elaboración propia 168
Gráfica 16. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 4. Fuente. Elaboración propia 170
Gráfica 17. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 5. Fuente. Elaboración propia 172

TABLAS

Tabla 1. Longitudes de onda para Radar 45
Tabla 2. Principales misiones SAR y sus características 47
Tabla 3. Tipos de movimientos en Masa 84
Tabla 4. Imágenes disponibles descargadas por medio de Copernicus Open Access Hub 115
Tabla 5. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2015 128
Tabla 6. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2016. 130
Tabla 7. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2017. 133

ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación del Radar 44
Ecuación 2. Amplitud y Fase en complejos. Fuente. (Hill, 2001) 50
Ecuación 3. Resolución en Azimut 51
Ecuación 4. Resolución Rango Oblicuo. 52
Ecuación 5. Resolución Rango Oblicuo 2 52
Ecuación 6. Resolución Rango de Terreno. 53
Ecuación 7. Ambigüedad de altitud 65
Ecuación 8. Estimación de la Coherencia para una imagen con N pixeles 67
Ecuación 9. Coherencia esperada para la imagen maestra en SNAP 68
Ecuación 10. Línea de Base Crítica 69
Ecuación 11. Decorrelación Geométrica 70
Ecuación 12. Cálculo de la Fase Interferométrica 70
Ecuación 13. Aporte de la deformación a la fase 71
Ecuación 14. Componentes de la Fase Interferométrica 71
Ecuación 15. Calculo del Interferograma Topográfico 74
Ecuación 16. Cálculo del Interferograma Diferencial 74
Ecuación 17. Valor de Fase no ambigua o absoluta 76
Ecuación 18. Fase de deformación 77
Ecuación 19. Fase diferencial sin fase topográfica y errores de la fase topográfica 77
Ecuación 20. Errores de la Fase topográfica 77
Ecuación 21. Cálculo de fase interferométrica a desplazamiento relativo del terreno 78

1. RESUMEN

La susceptibilidad a deslizamientos en Colombia ha venido en aumento en los últimos años por el incremento de actividades antrópicas, condiciones geológicas y geomorfológicas del territorio y el aumento de precipitación en algunas zonas del país. Según el IDEAM y el SGC el 18% del territorio nacional se encuentra en zona de amenaza muy alta y alta por remoción en masa, gran parte de esta cifra corresponde a la cordillera oriental, la cual se destaca por su inestabilidad debido al fracturamiento de los materiales, asociado a la presencia de fallas. En esta cordillera se encuentran ubicadas las provincias Norte y Valderrama del departamento de Boyacá que se clasifican en relieve de tipo Montaña Estructural Erosional y donde se han presentado bastantes eventos. Teniendo en cuenta ésta problemática se propone aplicar interferometría diferencial D-InSAR, que utiliza imágenes de RADAR SAR para detectar cambios y desplazamientos en la superficie a nivel de centímetros, como técnica alternativa a las metodologías existentes en Colombia con el objetivo de analizar el comportamiento de los deslizamientos y poder evaluar la técnica para el mejoramiento de la gestión del riesgo en el país, ya que las metodologías manejadas actualmente dependen de verificación en campo e imágenes ópticas, que pueden presentar pérdida de información en muchas zonas del país. Como productos finales del proyecto se obtienen mapas de coherencia entre pares interferométricos, mapas de desplazamientos que muestran a escala detallada los deslizamientos y un análisis temporal de los eventos para identificar el comportamiento de la zona.

Palabras Clave: Deslizamiento, Interferometría Diferencial, Radar SAR, Riesgo.

2. ABSTRACT

The susceptibility to landslides in Colombia has been increasing in recent years due to the increase in anthropogenic activities such as deforestation and changes in land use, geological and geomorphological conditions of the territory and the increase in precipitation in some areas of the country. According to the IDEAM and the SGC 18% of the national territory is in a zone of very high and high threat due to mass removal, a large part of this number corresponds to the eastern mountain range, which is notable for its instability due to the fracturing of the materials, associated with the presence of faults. In this mountain range are located the provinces North and Valderrama of the department of Boyaca that are classified as relief of type Erosional Structural Mountain and where many events have been presented and where many events have been presented. Taking this problem into account, it is proposed to apply D-InSAR differential interferometry, which uses RADAR SAR images to detect changes and displacements in the surface at the centimeter level, as an alternative technique to the existing methodologies in Colombia with the objective of analyzing the behavior of the landslides and to be able to evaluate the technique for the improvement of the risk management in the country, due to the methodologies current methodologies depend on field verification and optical images, which may present information lost in many areas on the country. As final products of the project are obtained coherence maps between interferometric pairs, displacement maps that show to detailed scale the Landslides and a temporal analysis of the events to identify the behavior of the zone

Keywords: Landslide, Differential Interferometry, RADAR SAR , Risks.

3. INTRODUCCIÓN

Actualmente la susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones en Colombia se ha incrementado debido a la permanente intervención antrópica en los territorios y el constante deterioro ambiental, que tienen como consecuencia la pérdida de cobertura vegetal, la degradación de los suelos y la deforestación. Esto sumado a la inadecuada articulación de las entidades y las debilidades en términos de armonización de los instrumentos de planificación territorial que inciden en la prevención del riesgo, pone en peligro a la población colombiana. Según el Reporte de Emergencias municipales consolidado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) entre los años 2006 y 2014 en el país se reportaron 21.594 emergencias generadas por eventos de origen natural de los cuales 14.853 fueron principalmente inundaciones y deslizamientos. La misma entidad menciona que de 48.203.405 habitantes en el país (cifras 2014), la cuarta parte correspondiente a 12.298.849 personas, ha resultado damnificada o afectada.

Por medio de este proyecto de grado se pretende implementar una técnica (que se encuentra aún en desarrollo) utilizada para el procesamiento y análisis de imágenes de radar, llamada interferometría diferencial (D-InSAR). Esta técnica utiliza imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para generar interferogramas a partir de dos imágenes de una misma zona en diferentes fechas, para poder visualizar y cuantificar fenómenos como deslizamientos de tierra. Debido a que Colombia cuenta con una gran variedad de climas, esta técnica proporciona ventajas importantes para estudios de movimientos de masa en el país, ya que al utilizar imágenes de radar no se presentan algunas limitaciones comúnmente conocidas al utilizar imágenes ópticas satelitales o imágenes aéreas, como lo son por ejemplo la pérdida de información por nubosidad o la necesidad de la luz solar para su toma, esto último, consecuencia de ser obtenidas con un sensor pasivo. Por

el contrario, las imágenes de radar son obtenidas bajo cualquier condición climática y con alta resolución espacial sin importar si es de día o de noche.

Es importante mencionar que esta técnica se ha utilizado de manera exitosa en diferentes países como Estados Unidos, China y España, para monitorear y determinar el riesgo en zonas donde ha existido deformación de la superficie terrestre por deslizamientos, hinchazones, movimientos telúricos o actividad en volcanes. Y es por ello que el presente proyecto tiene el objetivo de aplicar interferometría de radar en zonas de alto riesgo y susceptibilidad a deslizamientos en Colombia, para dar a conocer esta técnica a las diferentes entidades gestoras del riesgo y poderla incluir como una herramienta valiosa de análisis en la toma de decisiones.

Con base en lo anterior, este proyecto se desarrollará dentro del Departamento de Boyacá situado en el centro oriente de Colombia, más puntualmente en la cuenca media del Río Chicamocha entre las provincias Norte y Valderrama que conforman la parte sur del Cañón de Chicamocha, debido a que existe una alta susceptibilidad frente a deslizamientos de tierra causados en gran medida por su estructura geomorfológica y sus suelos generalmente descubiertos de vegetación.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La cifra de deslizamientos en Colombia ha venido en aumento en los últimos años debido al incremento de actividades antrópicas que ocasionan pérdida de suelos, malas prácticas en el ordenamiento territorial, extracciones poco sostenibles y deforestación, que cabe mencionar, para el año 2016 en el país fue de 178.597 hectáreas. Las actividades mencionadas producen en los terrenos desestabilización y procesos de erosión que hacen que las zonas sean más susceptibles a fenómenos como la remoción en masa. Por otro lado, el aumento de precipitación en algunas zonas del país contribuye al aumento de las amenazas de deslizamientos, puesto que se presentan periodos de lluvia muy intensos que, sumados a las condiciones topográficas, geológicas, geomorfológicas, estructurales y geotécnicas del territorio colombiano, aumentan la posibilidad de ocurrencia de los mismos.

Según el IDEAM y el servicio geológico, el 18% del territorio nacional se encuentra ubicado en zonas de amenaza muy alta y zonas de amenaza alta por remoción en masa. La cordillera oriental se destaca por la inestabilidad de la zona debido al fracturamiento de los materiales, asociado a la presencia de fallas; la amenaza alta se concentra especialmente en algunos sectores de la Cordillera Central, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en los macizos de Quetáme y Santander, y en el piedemonte de la Cordillera Oriental. Los deslizamientos relacionados con la variabilidad climática en cada región del país, también incrementan con la ocurrencia de fenómenos como El Niño y La Niña. Es importante mencionar que de acuerdo a un estudio realizado por la Universidad Nacional el 25% de las formaciones rocosas son blandas o lodosas y por tanto suelen degradarse por variaciones drásticas del clima ocasionando deslizamientos. Así mismo el estudio indica que existe mayor presencia de esos materiales en la Cordillera Oriental y

que el 80% de los deslizamientos ocurridos allí, tienen relación con ello (Universidad Nacional, 2010).

De acuerdo con la Subdirección nacional de Agrología del IGAC, para el año 2016 el 49% del departamento de Boyacá presentó algún tipo de conflicto por el uso inadecuado de las tierras (43% sobreutilización y 6% subutilización), debido principalmente a la ampliación de la frontera agrícola, es decir, a la instalación de actividades agrícolas en tierras de ladera, sin implementación de prácticas de manejo y conservación de suelos. Esto ocasionó gran pérdida de cobertura vegetal y erosión del suelo haciéndolo susceptible a deslizamientos (Corpoboyacá, 2016). En contraste con esta información y según el mapa de Amenazas por Movimientos en Masa 2015 del SGC se encuentra que el 24,29% del territorio Boyacense se clasifica en zona de amenaza Muy Alta y el 65,44% en zona de amenaza Alta, principalmente debido a las condiciones naturales del terreno como el clima, el relieve abrupto y el tipo de litología mezclado con el conflicto de uso.

No obstante, en Colombia la prevención y gestión de riesgos ha sido un tema bastante importante para entidades como el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano y el IGAC, que han venido desarrollando estudios para mejorar la prevención de riesgos y la planeación del territorio. Uno de los estudios más importantes enfocado particularmente a los deslizamientos en Colombia es el entregado en 2012 por el IDEAM quién elaboró la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa para Colombia a partir de algunas experiencias, para la actualización del Mapa Nacional de Susceptibilidad a los Movimientos en Masa a escala 1:500.000 (IDEAM, 2012). Este estudio utilizó información de Geomorfología, Geología, Suelos y cobertura de la tierra con insumos cartográficos, imágenes satelitales y aéreas y trabajo de verificación en campo, a partir de los cuales se definieron las variables más relevantes para el estudio de deslizamientos. Otro estudio importante de las entidades mencionadas es la Guía Metodológica

para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa realizado por el Servicio Geológico Colombiano en convenio con la Universidad Nacional de Colombia, estudio que establece los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, que se podrán aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia. En este caso la elección de insumos para su desarrollo, se rige por los requerimientos técnicos presentados en el Decreto 1807 de 2014, para la elaboración de los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a escalas 1:5000 y 1:2000. Entre los que se encuentran como insumos básicos: cartografía básica en formato digital preferiblemente del IGAC, un Modelo Digital de Terreno e imágenes satelitales ópticas con resolución espacial mayor a 15 metros (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Respecto a los insumos necesarios para desarrollar cada metodología, es importante resaltar que en los dos casos se usan imágenes ópticas, que, a pesar de ser una muy buena opción para realizar estudios de coberturas y demás, en comparación con las imágenes de Radar presentan grandes diferencias y algunas limitaciones. Esto se basa principalmente, en el hecho de que los sensores ópticos son pasivos, es decir, que para formar la imagen satelital es necesario realizar la toma en presencia de luz solar (radiancia, luz emitida o reflejada por el sol en la tierra) y que en algunos casos se puede perder información a causa de la presencia de nubes, neblina, polvo, granizo o humo (Universidad de Murcia, 2003). Por el contrario, un sensor activo como lo es el Radar, evita esa pérdida de información siendo él mismo el generador de su radiación y permitiendo así la penetración atmosférica gracias a las longitudes de onda del espectro electromagnético en las que funciona.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, es importante preguntarse si la gestión del riesgo de deslizamientos ha funcionado en Colombia y si es posible entonces, aplicar técnicas como la Interferometría Diferencial (D-InSAR) que: utiliza imágenes de Radar y por lo tanto aumenta la posibilidad de cubrir todo el territorio nacional de manera remota, proporciona resultados con altos niveles de precisión en áreas de gran extensión, permite reducir los tiempos de estudio y diagnóstico ampliando la frecuencia de monitoreos, y que podría ahorrar recursos en su implementación, debido a su independencia del trabajo en campo.

5. JUSTIFICACIÓN

Como estudiantes de Ingeniería Catastral y Geodesia vemos la importancia de seguir desarrollando y aplicando nuevas técnicas basadas en teledetección que permitan contribuir al bienestar de la población colombiana, especialmente si a nivel mundial han resultado bastante efectivas para la prevención de riesgos, ya que en Colombia se evidencia la falta de planeación y ordenamiento de los territorios en especial en áreas rurales y sus centros poblados, donde en la mayoría de los casos, predomina el abandono por parte de las alcaldías municipales y de algunas entidades territoriales que deben apoyar esa gestión.

Ese es el caso de la técnica de Interferometría Diferencial D-InSAR, implementada con imágenes de Radar SAR que ha permitido en repetidos casos, en países como China, México y España, identificar y cuantificar los movimientos de tierra con precisión de centímetros a milímetros, proporcionando la posibilidad de realizar estudios precisos para prevenir el riesgo por movimientos de tierra mediante la debida planeación territorial. Ésta, además de ser una muy buena alternativa para los fines mencionados, también se presenta con un amplio y fácil acceso en el mundo de la teledetección, pues hoy en día se cuenta con las herramientas necesarias para su aplicación como son las imágenes de Radar SAR proporcionadas por la ESA a través de su plataforma Copernicus de manera gratuita para todo el mundo y el software libre disponible para el procesamiento de los datos, además de investigaciones anteriores que muestran resultados exitosos y que son una guía importante para el desarrollo de proyectos como el aquí presentado.

6. OBJETIVOS

6.1.General

Detectar y analizar el comportamiento de los deslizamientos en las Provincias Norte y Valderrama del Departamento de Boyacá entre los años 2015 a 2017, utilizando interferometría diferencial para evaluar esta técnica en estudios de gestión de riesgos

6.2.Específicos

1. Analizar la calidad de las imágenes SAR Sentinel 1 en términos de línea base y coherencia.
2. Generar e interpretar interferogramas a partir de imágenes SAR de las Provincias Norte y Valderrama del Departamento de Boyacá y analizar la calidad de los mismos.
3. Realizar la comparación entre los interferogramas multitemporales de las Provincias Norte y Valderrama del Departamento de Boyacá y otras zonas de estudio.
4. Aplicar y analizar la herramienta de series de tiempo del módulo de ERDAS que aplica el algoritmo Coherence Change Detection CCD

5. MARCO REFERENCIAL

El departamento de Boyacá está situado en el centro oriente de Colombia, comparte las cuencas de los Ríos Magdalena y Orinoco. Su territorio está incluido en su gran mayoría en la cordillera oriental, cuyos accidentes más representativos son: la Sierra Nevada del Cocuy o Güicán, la Serranía de las Quinchas, la Cordillera de El Zorro y los Valles de los Ríos Chicamocha y Suárez, en la parte norte del llamado Altiplano Cundiboyacense.

Tradicionalmente el territorio departamental se ha subdividido en 15 provincias que, si bien no son entidades territoriales, están fuertemente arraigadas en la idiosincrasia de la población y facilitan la ubicación espacial en el departamento, estas provincias se componen de 123 municipios de los cuáles Tunja es la capital del departamento (IGAC & UPTC, 2005).

El Cañón del Río Chicamocha está ubicado entre los Departamentos de Boyacá y Santander sin embargo el presente estudio se centra únicamente en la zona del Departamento de Boyacá que cubre el Cañón en la cuenca media del río Chicamocha específicamente en dos provincias del departamento. Los municipios se escogieron de acuerdo a la participación de su territorio sobre el Cañón del Río Chicamocha en una de sus partes más amplias y estos son Boavita, La Uvita, Soatá, Sativanorte, Sativasur y Susacón pertenecientes a la Provincia Norte y Chita, Jericó, y Socotá pertenecientes a la Provincia Valderrama.

De acuerdo con el documento Elementos del Medio Natural realizado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, la Geomorfología de la totalidad de los municipios pertenecientes a la zona de estudio según la clasificación de tipo de relieve, es de tipo Montaña Estructural Erosional, esta clase de relieve es generalmente escarpado a muy escarpado con pendientes entre medias a cortas. Su paisaje está modelado por escurrimiento difuso es decir erosión laminar sobre laderas desprovistas de vegetación y afectadas por la saltación pluvial (transporte de partículas a

través de fluidos), escurrimiento concentrado, este produce dos formas de erosión, los surcos de erosión que son canales bien definidos y pequeños y las cárcavas, que son canales de mayor magnitud, y procesos de remoción en masa. Dentro de este tipo de paisaje se encuentran los siguientes tipos de relieve: vigas, crestas homoclinales, espinazos y crestones homoclinales, cumbres, glacis y cuestas. Este tipo de relieve está presente en el 61,88% del departamento de Boyacá y lo restante se distribuye entre Altiplanicie Estructural, Lomerío, Valle Aluvial y otras áreas como cuerpos de agua y zonas urbanas. (Corpoboyacá, 2016)

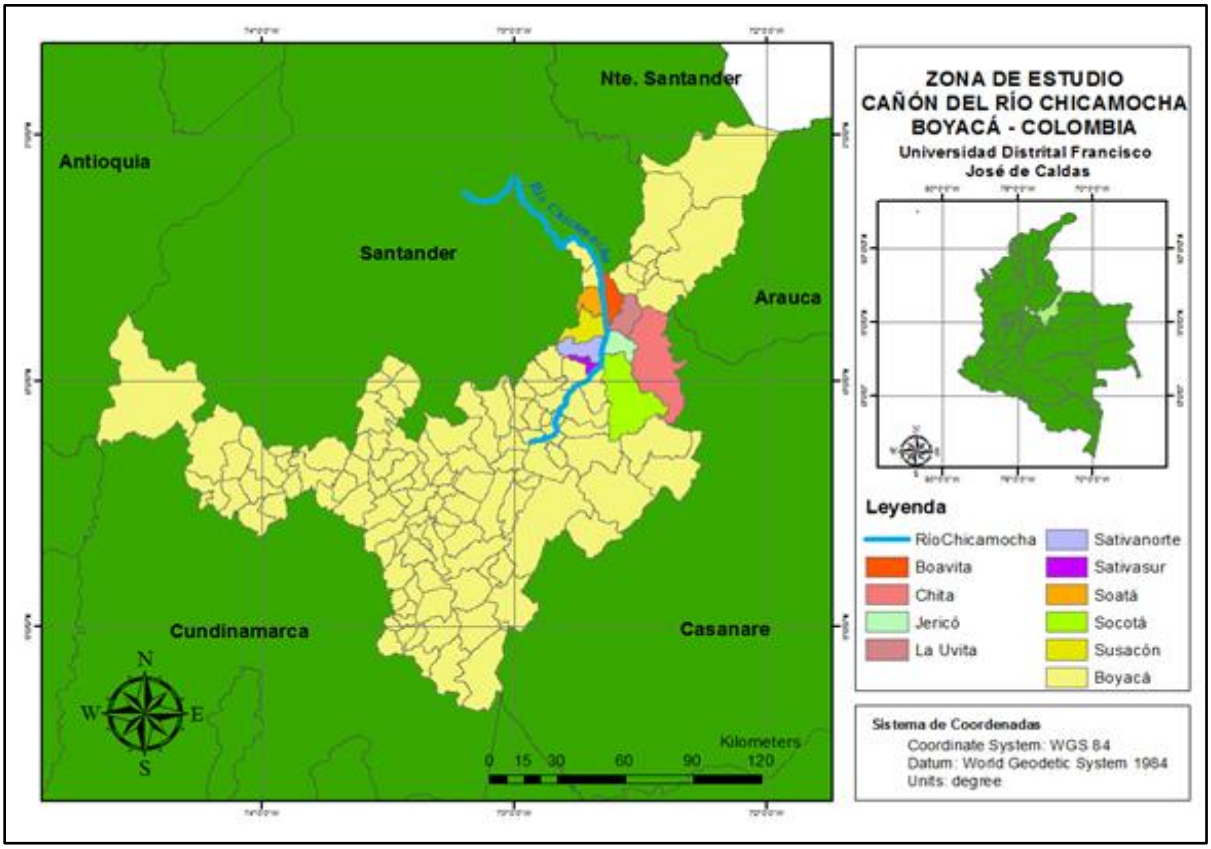


Ilustración 1. Ubicación de la zona de estudio en el Cañón del Chicamocha
Fuente. Elaboración propia a partir de cartografía base proporcionada por el IGAC.

Es importante realizar un análisis de las características físicas (clima, suelos, geomorfología, geología, entre otros) de los municipios que hacen parte del área de estudio, para poder identificar la dinámica y el comportamiento de la zona de montaña que corresponde a la franja del Cañón del

Chicamocha mencionada con antelación. Dicho análisis descriptivo se realizó con base en el documento Elementos del Medio Natural realizado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, los respectivos documentos de diagnóstico de los Esquemas de Ordenamiento Territorial de los municipios y otros documentos departamentales y municipales.

5.1. Análisis de características generales en los municipios de la zona de estudio

5.1.1. Soatá

Municipio ubicado en la zona norte de Boyacá a una altura de 1950 msnm tiene una extensión de 136 km2. Dentro del municipio de Soatá se encuentra gran cantidad del territorio deteriorado por desgaste de los suelos causado por la erosión y los fenómenos de remoción en masa, estos terrenos constituyen las áreas a la orilla del río Chicamocha donde los procesos erosivos alcanzan estados avanzados como el caso de la formación de cárcavas profundas, y áreas donde las mismas condiciones climáticas y de uso del suelo han ocasionado la formación de eriales, terrenos que no han sido labrados o cultivados siendo llanos, comprenden un área de 2917 hectáreas equivalentes al 23.5 % del total del Municipio. En cuanto a amenazas causadas por la degradación de los suelos según el documento de diagnóstico del PBOT, están han aumentado en el municipio de Soatá por el tipo de uso que se le da al suelo, el sistema de regadío, el carácter arcilloso de la mayoría de la rocas que lo conforman, el espesor mínimo en la capa de suelo y la falta de cobertura vegetal en zonas de alta pendiente principalmente. La degradación de los suelos se puede clasificar en dos grupos principales, la degradación ocasionada por erosión y la ocasionada por fenómenos de remoción en masa. (Alcaldía Municipal de Soatá, 2000)

En cuanto al relieve o geomorfología del municipio se encuentran tres divisiones. La primera presente en la parte noroccidental donde existen grandes pendientes con rupturas, erosión lineal

en algunas laderas y hacia los interfluvios (terrenos entre dos cauces fluviales). La segunda se caracteriza por zonas con degradación del suelo alta, principalmente remoción en masa, evidenciando muchas cicatrices de deslizamientos y deslizamientos activos, en este caso los quiebres de pendiente son mucho más nítidos y frecuentes, esta zona se encuentra en la zona urbana, con menor presencia hacia el occidente y mayor presencia hacia el oriente, zona del Cañón. Por último está unidad se localiza hacia la parte oriental del municipio, y corresponde a climas cálidos, posee una superficie aproximada de 4369.1 Ha lo que significa un 35 % del área del municipio, presenta erosión generalizada con fuertes pendientes, erosión hídrica en todos los tipos de movimientos en masa, frecuentes conos de acumulación de materiales hacia el lecho del río Chicamocha, carcavamiento profundo, coladas de barro, flujos de escombros y vertientes muy inestables de sus drenajes (Alcaldía Municipal de Soatá, 2000).

5.1.2. Boavita

Boavita a 2114 msnm se localiza al norte del departamento de Boyacá, en la provincia del Norte. Esta localidad forma parte de la cuenca media del río Chicamocha. Se puede apreciar que las formas del relieve en Boavita son variadas y están representadas en pequeños valles y mesetas de forma redondeada ubicadas en la parte más alta de las divisorias de aguas, con pendientes entre el 3% y el 25%, así mismo se localizan grandes cañones que representan el encallejonamiento de las principales microcuencas y a orillas de las cuencas de los ríos Chicamocha y Nevado con pendientes que oscilan entre el 25 y 50% y mayores; también se encuentran formas inclinadas en ladera de las principales microcuencas y que coinciden con las zonas de recarga, con pendientes entre el 12 y 25%; el relieve muy inclinado se distribuye por toda el área municipal y está representado por laderas y zonas de divorcio de aguas de drenajes primarios y secundarios, las pendientes están entre el 12 y el 50% (Alcaldía Municipal de Boavita, 2002).

Gran parte de los suelos del municipio de Boavita se originan a partir de rocas detríticas de grano muy fino (0.002 mm) constituidos por partículas de arcillas (lutitas) con reacción ácida y calizas. Existe presencia de afloramientos Rocosos que se encuentran dispersos prácticamente por todo el municipio, se caracteriza por presentar carencia de suelo orgánico. En la base de las vertientes como el cañón del Río Chicamocha se presenta abundante piedra con un relieve ondulado o fuertemente ondulado a inclinado, con forma de cono y pendientes hasta del 25%, en donde predomina la erosión de ligera a moderada (Alcaldía Municipal de Boavita, 2002).

Boavita presenta según el Plan Municipal de Gestión del Riesgo 2013 una gran amenaza respecto a los deslizamientos ya que el Municipio cuenta con un porcentaje del 45.4 en una muy alta susceptibilidad, tanto en su cabecera como en el resto de su territorio. Las causas del fenómeno amenazante están dadas por fenómenos naturales al estar el municipio en un área sísmica; pero la actividad minera puede ayudar a que los fenómenos y riesgos naturales se intensifiquen y ocurran con mayor frecuencia a causa del mal manejo de las técnicas mineras y procesos de erosión naturales o inducidos (Plan Municipal de Gestión del Riesgo- Boavita, 2013).

5.1.3. Nuestra señora de Guadalupe de la Uvita

Está ubicado en el norte del departamento de Boyacá a 2.700 msnm. Su aspecto físico está compuesto de tierras quebradas y altiplanos. Se ubica en el ramal oriental de la Cordillera de los Andes, debido a ello su paisaje es riquísimo en diversidad de vistas, y su clima varía desde el más frío, en los páramos, hasta el cálido en las riberas del río Chicamocha. De la superficie del territorio municipal se ha encontrado que solo menos del uno por ciento del territorio tiene pendientes menores del 8%; un 66.25% entre 8 y 50% y el 30% restante en pendientes superiores a 50%; por tanto el relieve se constituye en unos de los limitantes para el uso del territorio municipal (Alcaldía Municipal de Nuestra señora de Guadalupe de la Uvita, 2003).

Este municipio presenta alta susceptibilidad de erosión y movimientos masivos de suelo por su naturaleza inestable y altas pendientes dominantes, presenta gran desprotección de cobertura vegetal y alta humedad en sus suelos, adicional a esto según el diagnóstico del EOT se presenta una gran intervención antrópica en el suelo de páramo, así como una resequedad en los suelos de la parte perteneciente al Cañón del Chicamocha que impide el establecimiento de especies vegetales (Alcaldía Municipal de Nuestra señora de Guadalupe de la Uvita, 2003).

5.1.4. Susacón

Se localiza en la Cordillera oriental, zona nororiental del Departamento de Boyacá, su casco urbano está a una altura de 2480 msnm, tiene una extensión de 171 km2 y cuenta con tres pisos térmicos: Clima medio o templado 9,3%, Clima Frío 25,7% y Páramo 65%. Según el diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial el municipio se encuentra dentro de la clasificación de montaña, correspondiente a cadenas de montañas alargadas, con relieves quebrados y escarpados. En la zona de pie de montaña se encuentra las formaciones que van de onduladas a inclinadas y tiene una buena porción de terreno erosionado, especialmente hacia la vertiente del Río Chicamocha. Existen variedades de clima que van desde el medio seco hasta el frío muy húmedo. A lo largo de toda la ladera son frecuentes los desprendimientos, movimientos en masa, derrumbes y hundimientos debido a que el material geológico es poco compacto (Alcaldía Municipal de Susacón, 2013).

En la franja a lo largo del Río Chicamocha existen diferentes rangos de pendientes, con drenajes buenos hasta excesivos y limitaciones climáticas por las heladas. La vegetación en esta franja está bastante destruida por el uso generalizado de praderas para la ganadería. El municipio dentro de su EOT identificó como zonas de riesgo la parte media del cañón del Chicamocha y la parte occidental del municipio donde se presenta remoción en masa que amenaza afectar el mismo

casco urbano, también se incluye en la zona de alta vulnerabilidad por sismicidad ya que se encuentra en zona de pendiente sobre la Cordillera Oriental (Alcaldía Municipal de Susacón, 2013).

5.1.5. Socotá

Está localizado en la región andina colombiana, en la parte nororiental del departamento de Boyacá, sobre la cordillera oriental de los Andes. Se caracteriza por una compleja topografía, definiendo la presencia de diversos tipos de climas: medio, a los 1.400 msnm en las veredas Guaquira y Chusvita en la Vega del río Chicamocha y páramo, cerca de los 4.000 metros sobre el nivel del mar, parte alta de la vereda el Verde, o en la cuchilla la reforma o el sitio el Santuario en el Parque Nacional Natural de Pisba. El municipio de Socotá aloja acerca del 64% de las 45.000 hectáreas de extensión del Parque Natural Nacional Páramo de Pisba (29.000Has) (Alcaldía Municipal de Socotá, 2004).

La topografía se caracteriza por relieves escarpados y erosionados, de material sedimentario del terciario y mesozoico, posee considerables depósitos minerales de carbón. El río Chicamocha, principal arteria hídrica del departamento de Boyacá, surca el municipio en el sector occidental en límites con los municipios de Socha, Sativasur y Sativanorte, en una longitud cercana a los 7 kilómetros. Debe mencionarse la existencia en el municipio en zonas de deterioro ambiental, como el área circundante del río Chicamocha, en donde la cobertura vegetal es pobre y en ocasiones ha desaparecido, debido a la intervención antrópica, contribuyendo a incrementar la aridez de los suelos y los procesos erosivos de los mismos. De igual manera la zona de páramo se ha visto afectada por la deforestación de sus bosques bajos, ampliando la frontera agrícola, afectando las fuentes y cuerpos de agua que nacen o circulan por esta zona, degradando los suelos, causando

erosión e incrementando el torrente de los cauces, inundaciones y pérdida de humedad en las partes altas (Alcaldía Municipal de Socotá, 2004).

5.1.6. Jericó

Este municipio se encuentra ubicado en la cordillera oriental, específicamente en la provincia Valderrama al norte del departamento de Boyacá, de acuerdo con información suministrada en el documento diagnóstico del esquema de ordenamiento (EOT) el municipio cuenta con una extensión de 128 Km2 y posee una altitud considerable de 3.050 metros sobre el nivel del mar, lo que lo ubica como uno de los municipios con mayor altitud en el departamento y el país. Según información de la alcaldía municipal, el municipio hace parte de una región altamente montañosa con diversidad de pisos térmicos debido a que presenta variaciones de altura desde los 1.438 msnm hasta los 4.000 msnm, de igual forma las precipitaciones pluviales en el municipio son bajas sin embargo en épocas invernales se presenta incrementos considerables entre 3000 mm y 3600 mm que provocan la desestabilización de las laderas en casi la totalidad del área rural y constituye un factor determinante para la ocurrencia de deslizamientos.

El municipio cuenta con asociaciones de suelos tales como Chapa, Chicamocha, Chita, Cheva y Jericó, asimismo dentro de la capacidad agrológica de los suelos la cual fue definida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y modificada por la Subdirección Agrológica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se definen los suelos de Clase VIII, los cuales presentan fuerte degradación por alto grado de erosión, son de tipo erial, superficiales a muy superficiales y corresponden a afloramientos rocosos con relieve escarpado a muy escapado, lo cual ha generado deslizamientos y cárcavas de gran proporción; la vegetación en estas áreas es prácticamente nula. Esta clase la constituyen las asociaciones de suelo de Jericó, Chicamocha y

Pisba localizados al Noroeste del municipio, específicamente en las veredas Tintoba, Cocubal, Ovejera, Juncal y La Estancia.

Asimismo, de acuerdo con el Plan de Desarrollo 2012-2015 (Alcaldía Municipal de Jericó, 2012) el municipio cuenta con buena parte de su territorio localizado en zonas de geo inestabilidad en veredas como Tíntoba y Juncal, así, por ejemplo en el sector de Tíntoba Chiquito se presentan varios deslizamientos como aquellos presentados al Este en la Quebrada Agua Agría donde varias viviendas se localizan en zonas de alto riesgo. Cabe mencionar que los factores que influyen en la ocurrencia de deslizamientos en el municipio son la meteorización, el fracturamiento de las rocas, la alta precipitación, la actividad sísmica de la región, la fuerte pendiente y la acción antrópica relacionada con construcción de vías, deforestación e impacto de la agricultura y ganadería que influyen en la pérdida de cobertura vegetal, por lo que el municipio presenta las condiciones de amenaza por remoción en masa.

Por último, es importante mencionar que el municipio es catalogado como área de riesgo sísmico alto de acuerdo con el Código Colombiano de Construcciones sismo-resistentes en consecuencia al sistema de fallas locales que lo atraviesan, es así que la ocurrencia de eventos sísmicos en área de alta sismicidad son la causa de los movimientos de los taludes.

5.1.7. Chita

Este municipio se encuentra ubicado en la cordillera oriental en el sector nororiental del departamento de Boyacá, localizado específicamente en la provincia Valderrama. De acuerdo con el documento diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial (Alcaldía Municipal de Chita, 2000) , el municipio tiene una extensión de 748 Km2, la altitud de la cabecera municipal es de 2.964 msnm y su precipitación se incrementa en los meses de abril y septiembre donde cae el 70% de la precipitación anual promedio, de igual forma el municipio presenta clasificación de clima

frío y muy frio, adicionalmente las pendientes del terreno son superiores al 75% y hay predominancia de laderas. El municipio presenta un sistema montañoso bastante complejo que unido con la variedad climática da como resultado diferentes tipos de suelo, los cuales presentan semejanzas en cuanto a los ecosistemas de alta montaña, drenaje, fenómenos glaciales y otros.

El municipio cuenta con asociaciones de suelos tales como Pisba, Aserradero, Chita, Jericó, Ranchería, Chapa, Chicamocha, Tocaria, Socha y Cheva. Es importante indicar que de acuerdo a información suministrada por el documento diagnóstico del EOT, el municipio fue zonificado como de amenaza alta, media y baja por movimientos en masa ocasionados por un número considerable de zonas inestables con vulnerabilidad físicas que son resultado de la deforestación, el uso inadecuado de la tierra, precipitación pluvial y sistemas inadecuados de conducción de agua, lo anterior sumado a condiciones geológicas y geomorfológicas las cuales presentan fuertes pendientes, litología con unidades permeables e impermeables, tectónica de fallamientos y demás, que aportan a desestabilizar los taludes de las laderas. Estos fenómenos se presentan por ejemplo en amenaza alta en el sector noroccidental aledaño al casco urbano en la vertiente del Río Chitano, de igual forma la asociación de Tocaria mencionada antes presenta en algunos sectores deslizamientos y escurrimientos en masa localizados en el corregimiento de minas al sur oriente del municipio, por lo que el municipio presenta varias áreas críticas por movimientos en masa.

5.1.8. Sativanorte

El municipio se encuentra localizado en la provincia Norte del departamento de Boyacá, sobre la cordillera oriental, en la vertiente del Río Magdalena y la hoya hidrográfica del Río Chicamocha. Según el documento diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial (Alcaldía Municipal de Sativanorte, 2000), cuenta con una extensión de 161 Km2, su altitud varía entre 1.800 hasta cerca de 2.700 msnm y posee tres pisos climáticos tales como clima medio, frío y páramo. El

mismo documento indica que el territorio se caracteriza por presentar laderas rectas y onduladas además de fenómenos de remoción de masa, reptación y pequeños deslizamientos, los cuales se localizan en las veredas Téquita, Batán y Centro, asimismo, de acuerdo con la clasificación de pendientes para el municipio, la zona de pendientes media es decir aquella que está entre el 7 y el 12 por ciento de inclinación presenta fenómenos de remoción en masa, especialmente deslizamientos, reptación y erosión hídrica, los cuales se observan en sectores como El Salitre, vereda La Estancia y el cañón de la quebrada Baracuta, entre otros.

El municipio cuenta con unidades geomorfológicas tales como unidad denudativa o erosional, unidad agradativa o de acumulación y unidad glaciaria. La unidad denudativa o erosional presenta amenaza por remoción en masa, localizada principalmente en la zona central y oriental del municipio. Los factores que intervienen en la inestabilidad de la zona son el factor geológico, pendientes (12 al 25 %), factor hídrico y acción antrópica como tala de bosques, desplazamiento de la cobertura vegetal nativa como el rastrojo bajo además de malas prácticas agrícolas y pecuarias. Por otro lado, de acuerdo con las Normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo-resistentes, el municipio está clasificado como zona de amenaza sísmica alta de acuerdo con sus condiciones geológicas y la presencia de fallas regionales como lo son Bucaramanga, Boyacá, Chicamocha y Soápaga, este proceso geodinámico interno influye en el desprendimiento de laderas cuando se presenta eventos sísmicos.

5.1.9. Sativasur

El municipio se localiza en la provincia Norte del departamento de Boyacá, según el plan de desarrollo municipal (2016-2019) se encuentra situado a 2.600 msnm y tiene una extensión de 62 Km2, la precipitación anual es de 2.905 mm por lo que el municipio corresponde a zonas de alta

precipitación y buena oferta hídrica, de igual forma el municipio presenta las categorías de clima de frío y muy frío a lo largo del territorio.

Según el Análisis sobre la gestión del riesgo de desastres en Boyacá 2015-2016 (Ardila & Fajardo, 2016), las zonas de remoción en masa del departamento se encuentran ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta, por lo que Sativasur se encuentra entre los municipios del departamento que superan el 80% de sus territorios involucrados en zonas de riesgo por remociones en masa. Asimismo, el documento de Susceptibilidad a Inundaciones y Deslizamientos del Departamento de Boyacá (Departamento Administrativo de Planeación, 2011), indica que el municipio de Sativasur presenta el 33,5% de su área municipal en alta susceptibilidad a los deslizamientos, lo que corresponde a 1.796 ha de las 5.366,8 ha del área total municipal.

De acuerdo con la anterior información , se puede decir que la geomorfología de la totalidad de los municipios pertenecientes a la zona de estudio según la clasificación del tipo de relieve corresponde a Montaña Estructural Erosional, este relieve es generalmente escarpado a muy escarpado con pendientes entre medias a cortas, su paisaje está modelado por escurrimiento difuso es decir erosión laminar sobre laderas desprovistas de vegetación y afectadas por la saltación pluvial (transporte de partículas a través de fluidos) y escurrimiento concentrado, este último produce dos formas de erosión, los surcos de erosión que son canales bien definidos y pequeños y las cárcavas, que son canales de mayor magnitud, además de procesos de remoción en masa. Dentro de este tipo de paisaje se encuentran los siguientes tipos de relieve: vigas, crestas homoclinales, espinazos y crestones homoclinales, cumbres, glacis y cuestas. Este tipo de relieve está presente en el 61,88% del departamento de Boyacá y lo restante se distribuye entre Altiplanicie Estructural, Lomerío, Valle Aluvial y otras áreas como cuerpos de agua y zonas urbanas (Corpoboyacá, 2016).

5.2.Deslizamientos ocurridos en la zona de estudio

En Colombia los deslizamientos de tierra han tenido como consecuencia un número considerable de personas muertas, heridas, desplazadas y damnificadas. De acuerdo con el reporte de Emergencias municipales consolidado por la UNGRD entre los años 2006 y 2014 en el país, de los 14.853 eventos de inundaciones y deslizamientos, 1.252 casos se presentaron en Boyacá y como consecuencia de ello resultaron 414.286 personas afectadas y 150 muertos.

De acuerdo con lo anterior y con el fin de cumplir con los objetivos de este proyecto fue preciso realizar un inventario de los deslizamientos ocurridos en la zona de estudio con base en información suministrada por instituciones del estado como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Comité Regional Para La Prevención y Atención de Emergencias y Desastres (CREPAD) del departamento de Boyacá y la Policía Nacional de Carreteras, además de instituciones como la Defensa Civil del departamento de Boyacá y fuentes de información como los Esquemas de Ordenamiento Territorial de los municipios en cuestión, informes oficiales de los municipios, periódicos virtuales, noticias de canales privados e informes de distintas universidades del país. Este inventario constituye la recopilación de los eventos ocurridos desde el año 2000 hasta el año 2017, esto con el objetivo de tener antecedentes amplios sobre la ocurrencia de fenómenos de remoción de masa en la zona de estudio y poder relacionar estos eventos con los resultados de la D-InSAR.

La base de datos espacial se desarrolló dentro del software ArcGIS, el cual permitió ubicar y representar espacialmente los eventos consultados. Esta base de datos se compone de una serie de puntos que especifican el lugar donde ocurrió el evento a nivel veredal e incluso puntual, debido a que algunos eventos poseen coordenadas del punto exacto donde se presentaron y otros únicamente especifican la vereda donde ocurrieron, adicionalmente se especifica la fecha del mismo, su

descripción y la fuente, es decir, donde se encontró el reporte o quien lo realizó.

Es importante mencionar que los deslizamientos tienen una descripción al detalle especificado en el *"Anexo 1. Descripción de los deslizamientos ocurridos en la zona de estudio"*. Los deslizamientos por tanto se presentan para los municipios en cuestión de la siguiente manera:

5.2.1. Soatá

El municipio de Soatá presenta un 52,2% de su territorio en alerta de Alta susceptibilidad por deslizamientos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011), dato que concuerda con las múltiples alertas naranja emitidas por el IDEAM en las que se aconseja a las entidades encargadas de la gestión de riesgos a instaurar medidas de seguridad en el municipio, pues es uno de los que podría resultar más afectado en caso de emergencia. De acuerdo a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

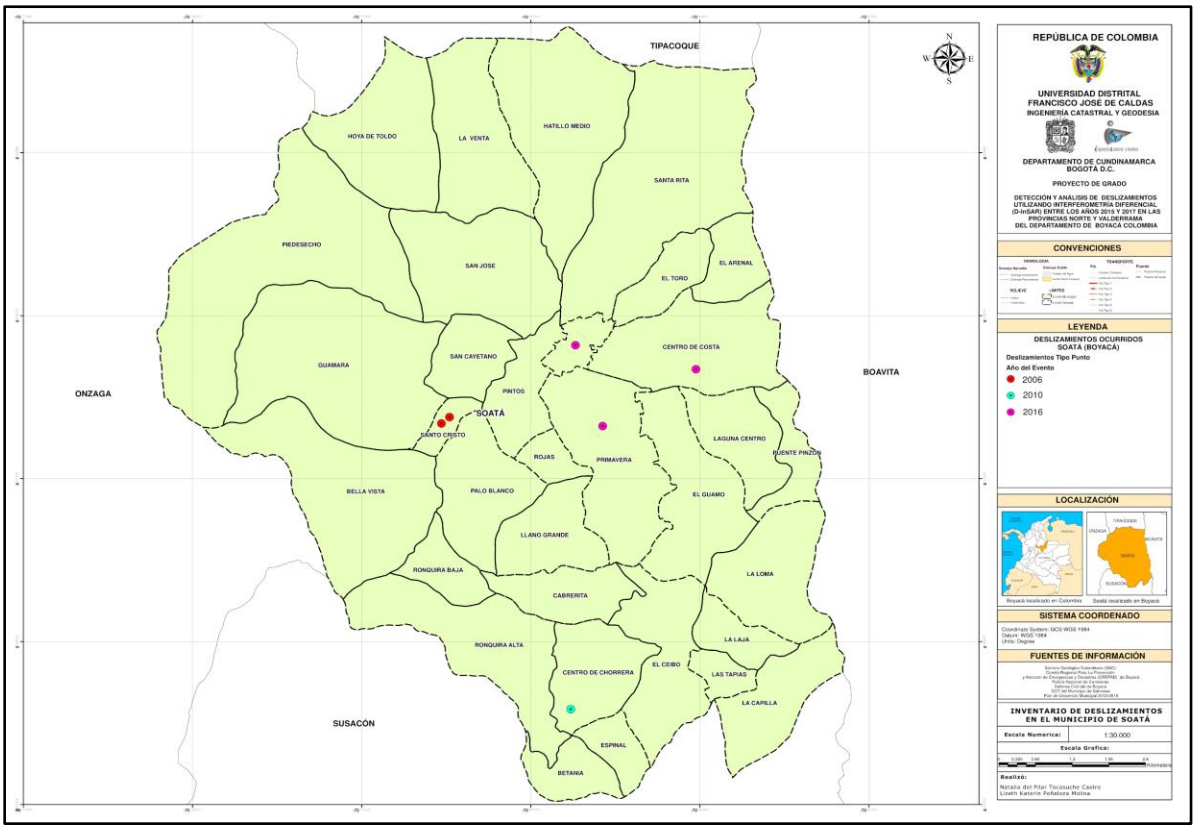


Ilustración 2. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Soatá. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.2. Boavita

Este municipio presenta un 45,4% de su área municipal en zona de Alta susceptibilidad ante deslizamientos y presenta una precipitación media anual intensificada en épocas de invierno que contribuye a la ocurrencia de los eventos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011). Según los informes presentados semanalmente por el IDEAM Boavita presenta una amenaza baja pero constante entre 2014 y 2017, hecho por el cual se ha aconsejado reforzar los mecanismos de emergencia. Conforme a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

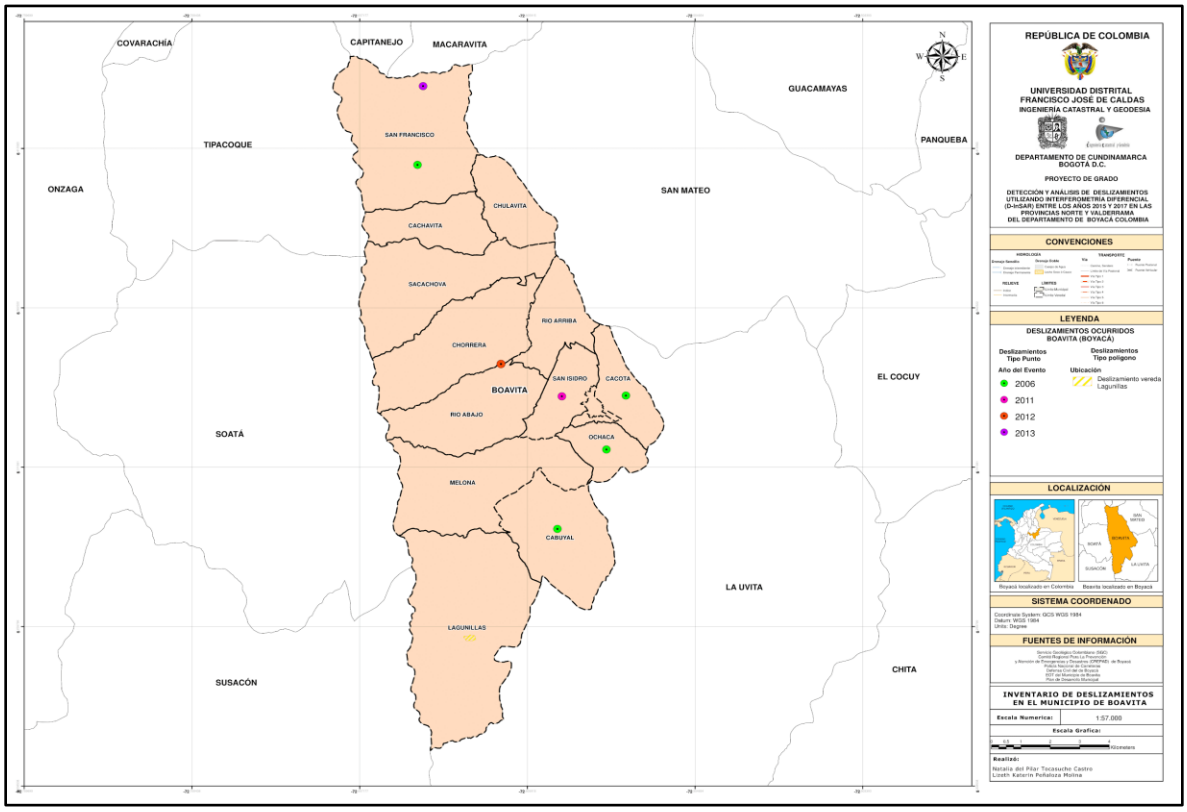


Ilustración 3. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Boavita. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.3. Nuestra Señora de Guadalupe de la Uvita

En el municipio el 48,4% del territorio se encuentra clasificado como Zona de Alta Susceptibilidad según el documento de susceptibilidad realizado por el Departamento

Administrativo de Planeación de Boyacá, adicionalmente en diferentes reportes de entidades como el IDEAM y la Policía Nacional se han emitido alertas por amenaza amarilla y naranja en zonas principalmente de precipitaciones altas. Conforme a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

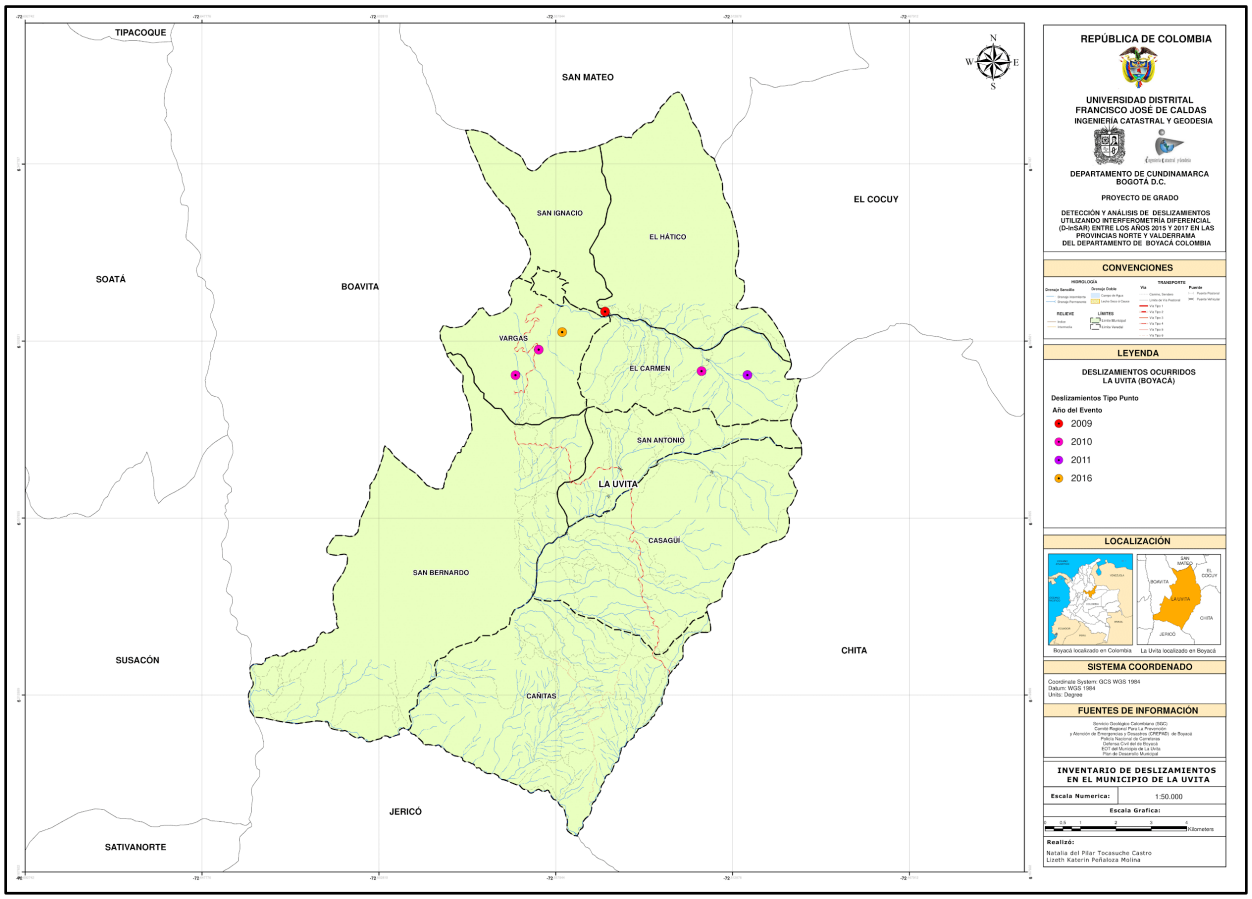


Ilustración 4. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de la Uvita. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.4. Susacón

El municipio cuenta con un 47% de su territorio clasificado como zonas de Alta Susceptibilidad (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011). Adicionalmente, de manera constante se han emitido informes en los que se avisa de alerta naranja y amarilla por deslizamientos, principalmente en temporadas de lluvias. Conforme a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

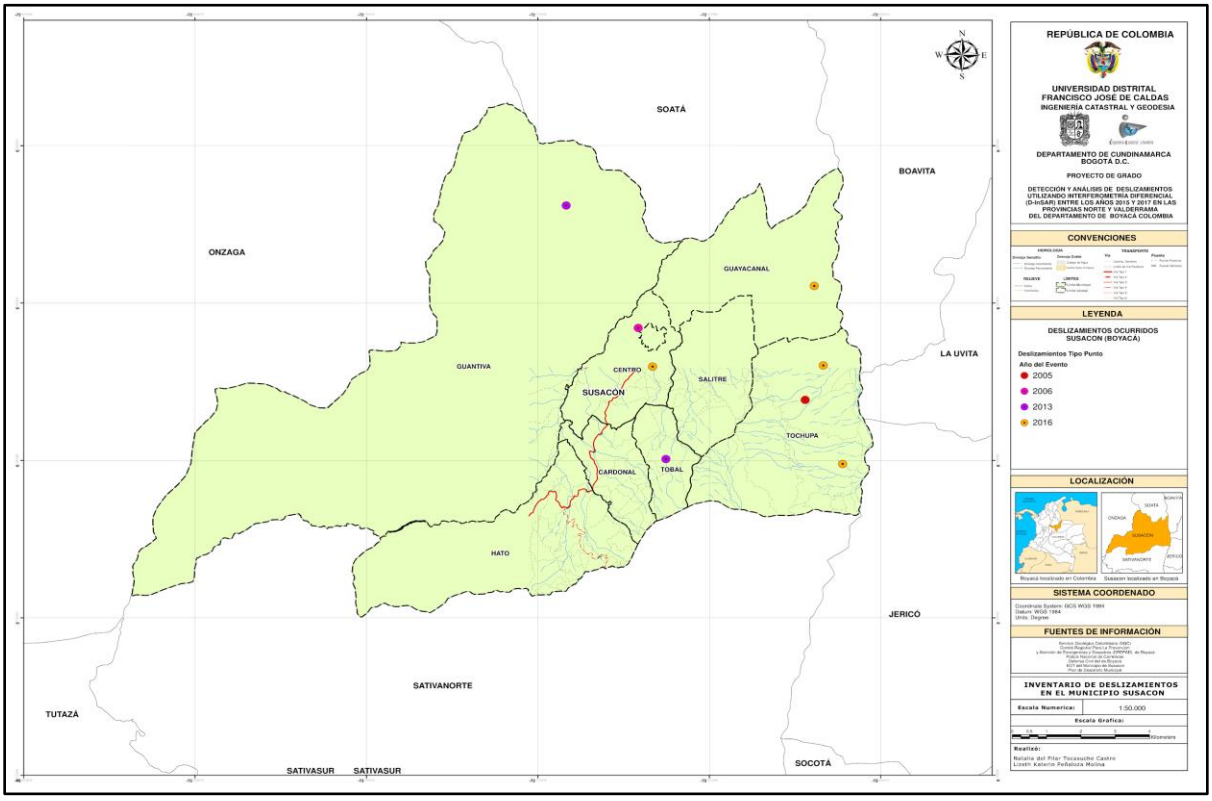


Ilustración 5. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Susacón. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.5. Socotá

En Socotá se presenta una alta vulnerabilidad en el terreno debido a sus altas pendientes y condiciones químicas del suelo. Según (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011) el 51% de su territorio municipal se encuentra en zona de Susceptibilidad Alta y por parte del IDEAM en sus constantes publicaciones, se ha notificado al municipio alerta amarilla y naranja. De acuerdo con lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

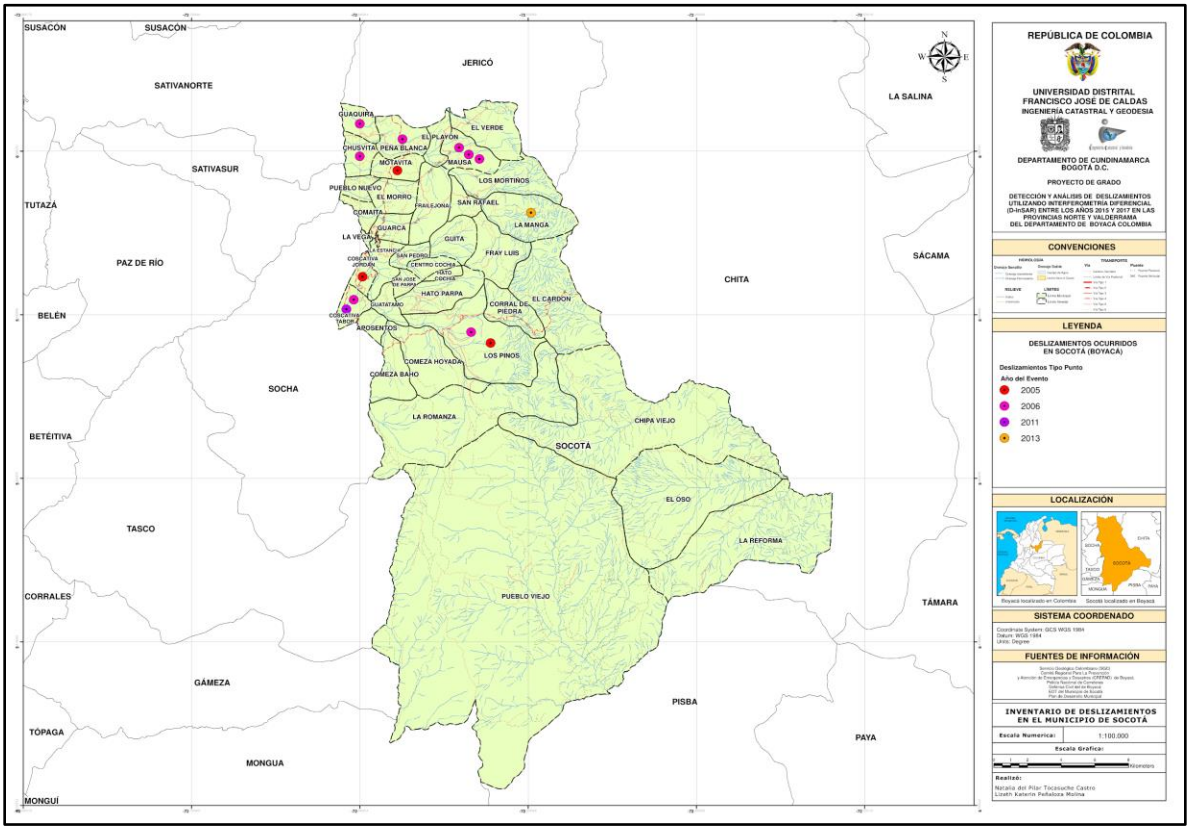


Ilustración 6. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Socotá. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.6. Jericó

Acorde al mapa de riesgo de deslizamientos realizado por el departamento administrativo de planeación del departamento de Boyacá, este municipio presenta susceptibilidad a deslizamientos en 5.543,6 Ha de 13.225,7 Ha de su área total, es decir 41,9% del territorio municipal, lo anterior de acuerdo al documento de Susceptibilidad del departamento de Boyacá a inundaciones y deslizamientos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011). Por otro lado, de acuerdo con el mapa departamental de amenazas por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015) este municipio tiene 3.596,68 Ha en amenaza muy alta, 8.718,89 en amenaza alta y 867,57 Ha en amenaza media. Conforme a ello, el municipio ha venido presentando una serie de deslizamientos a lo largo de su territorio en los últimos años como se representan a continuación:

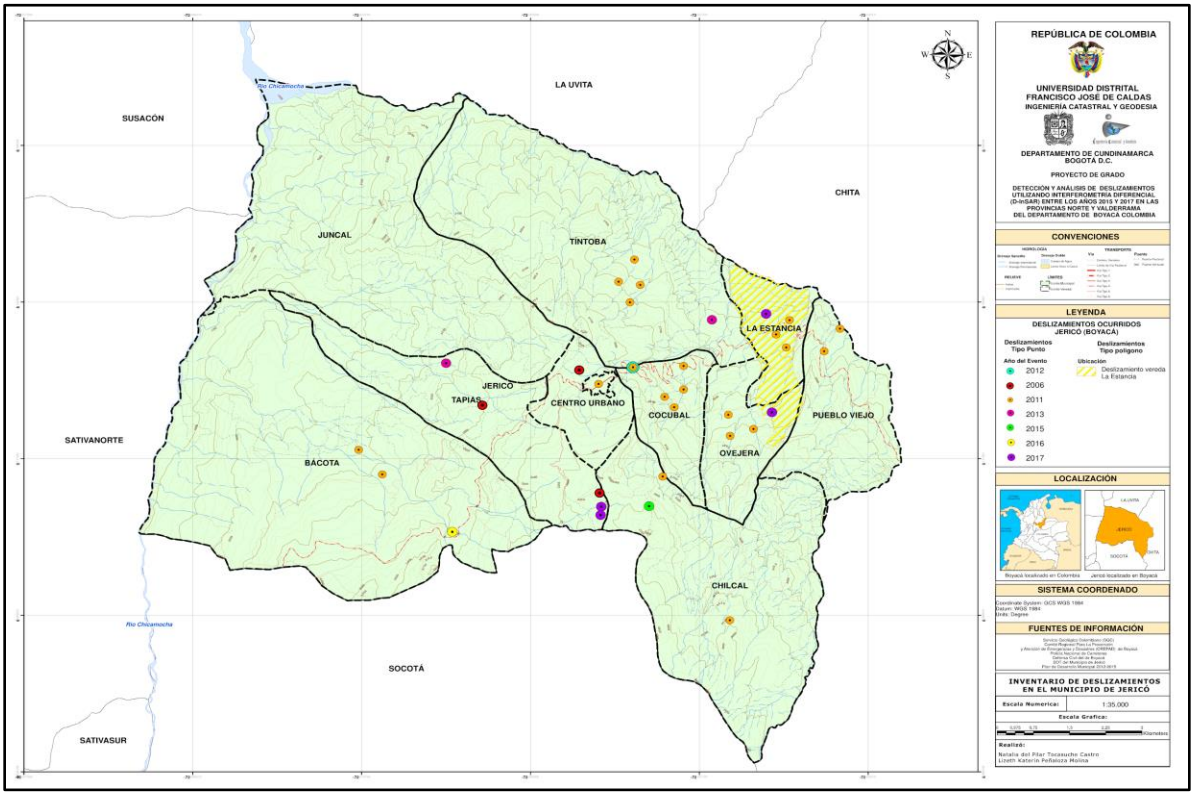


Ilustración 7. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Jericó. Fuente. Elaboración Propia.

Es importante mencionar que el relieve evidencia zonas con mayor o menor susceptibilidad a presentar remociones en masa, por lo que la zona con mayor favorabilidad a deslizamientos en el municipio es el sector de La Estancia, donde se presentan pendientes >10º, materiales de tipo lutitico, morfología de ladera coluvial y perfil cóncavo-convexo (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia & Corpoboyacá, 2011).

5.2.7. Chita

De acuerdo con el documento de Susceptibilidad del Departamento de Boyacá a Inundaciones y Deslizamientos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011), el municipio de Chita presenta el 0,6% de su área municipal con muy alta susceptibilidad a deslizamientos lo que equivale a 420 Ha, por otro lado de acuerdo con el mapa departamental de amenazas por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015) este municipio tiene 6.305,15 Ha

en amenaza muy alta, 29.774,65 en amenaza alta y 32.575, 51 Ha en amenaza media. Es importante mencionar que las zonas de amenaza muy alta en el municipio se ubican en la zona alta y occidental del mismo, mientras una pequeña parte se presenta en la zona sur. Conforme a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

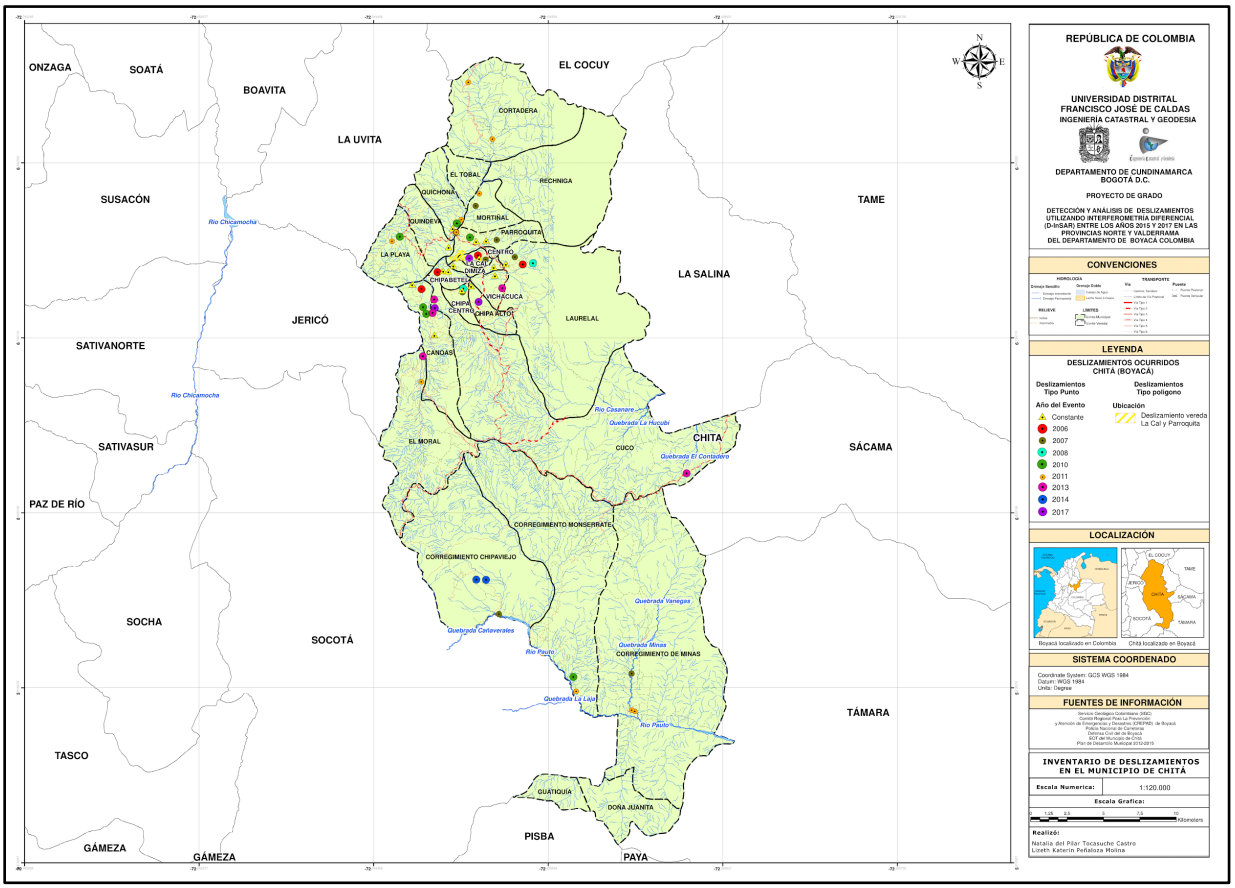


Ilustración 8. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Chita. Fuente. Elaboración Propia.

5.2.8. Sativanorte

En correspondencia con el documento de Susceptibilidad del Departamento de Boyacá a Inundaciones y Deslizamientos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011), el municipio de Sativanorte presenta el 22,7% de su área municipal con alta susceptibilidad a deslizamientos lo que equivale a 3.659,7 Ha, por otro lado de acuerdo con el mapa departamental de amenazas por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015) este municipio

tiene 127,14 Ha en amenaza muy alta, 10.950,43 en amenaza alta y 5.071,91 Ha en amenaza media. De acuerdo con lo anterior, es importante mencionar que las zonas de amenaza muy alta se presentan en la zona oriental del municipio principalmente en la zona centro oriental y nororiental. Conforme a lo anterior el municipio ha venido presentado una serie de deslizamientos, representados a continuación:

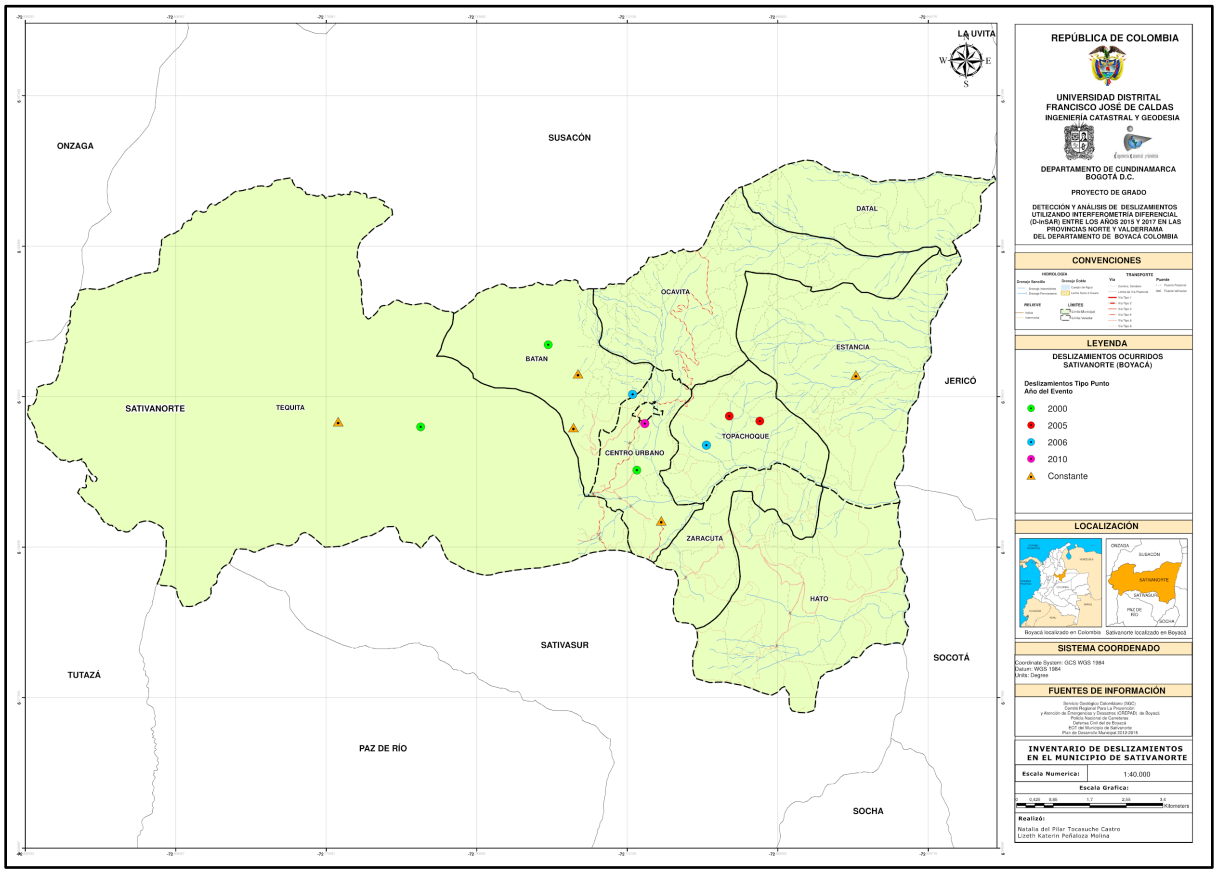


Ilustración 9. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Sativanorte. Fuente. Elaboración Propia

En el cañón del Chicamocha se presentan flujos con gran cantidad de material que aumentan la fuerza erosiva, esta se ve favorecida por las lluvias intensas y la escasa protección contra la erosión. Los sedimentos son en general heterométricos y el arrastre se produce en distancias relativamente cortas, los materiales son arcillas, areniscas y lutitas de formaciones cretácicas y de depósitos coluviales frecuentes en la zona (Alcaldía Municipal de Sativanorte, 2000).

5.2.9. Sativasur

De acuerdo con el documento de Susceptibilidad del Departamento de Boyacá a Inundaciones y Deslizamientos (Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá, 2011), el municipio de Sativasur tiene el 33,5% de su área municipal con alta susceptibilidad a deslizamientos lo que equivale a 1.796 Ha, por otro lado de acuerdo con el mapa departamental de amenazas por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015) este municipio tiene 120,58 Ha en amenaza muy alta, 3.998,38 en amenaza alta y 1.237,19 Ha en amenaza media.

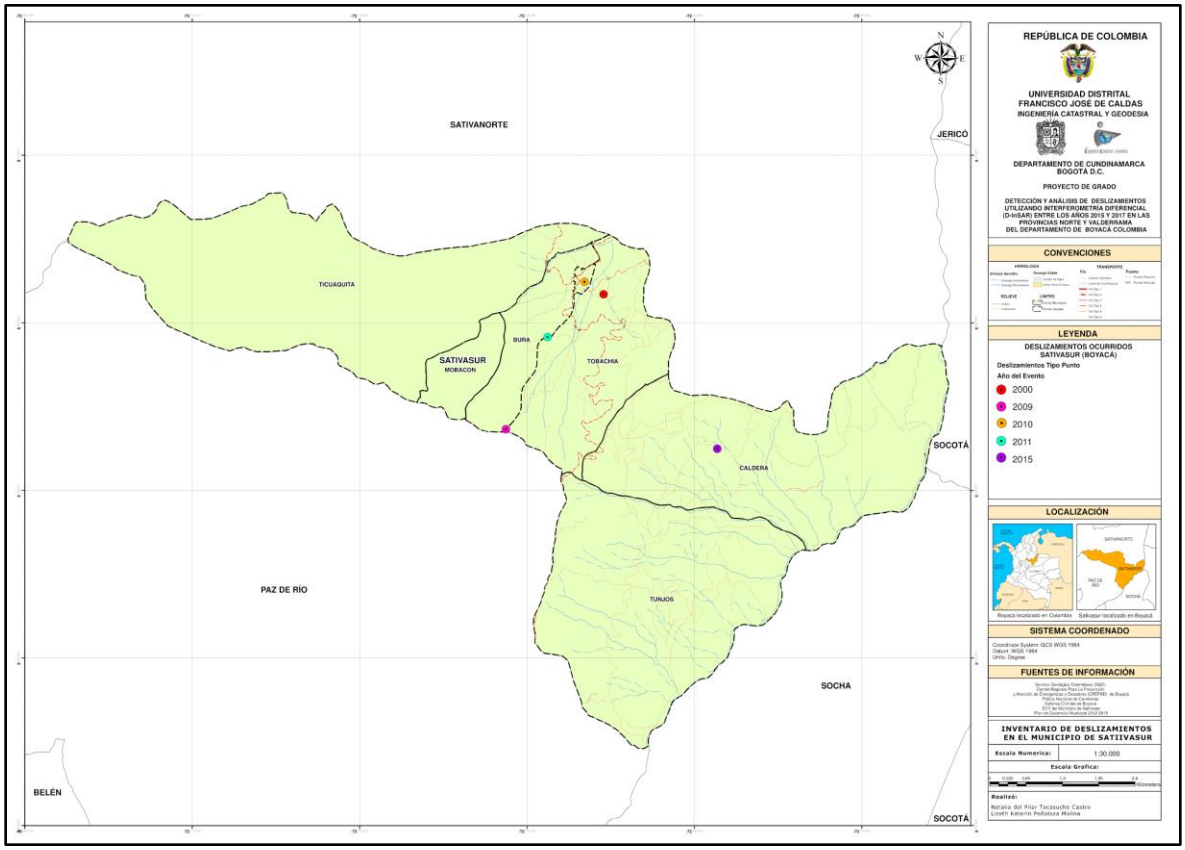


Ilustración 10. Deslizamientos ocurridos en el Municipio de Sativasur. Fuente. Elaboración Propia

En correspondencia con lo anterior, es importante mencionar que las zonas de amenaza muy alta se presentan en la zona oriental del municipio principalmente en la zona centro oriental, es así que en el municipio se han presentado varios deslizamientos, algunos de ellos presentados en la *Ilustración 10.*

6. MARCO TEÓRICO

6.1.Introducción a la teledetección

Chuvieco (1995) define la teledetección espacial como "aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales" (p. 27), y supone basado en lo anterior que "entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia" (p. 27). Gracias a esta descripción es claro que se deben introducir conceptos técnicos de la toma y profundizar en las características del tipo de imagen, teniendo en cuenta el sensor con el que se realizó el proceso de adquisición.

Partiendo de lo anterior es importante definir la composición de un sistema de teledetección espacial, y en este caso se hará con base en la obra de Chuvieco (1995). En este texto se describen los siguientes elementos:

- **(i) Fuente de energía**, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste, teledetección activa. La fuente de energía más importante, obviamente, es la energía solar.
- **(ii) Cubierta terrestre**, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de (i), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- **(iii) Sistema sensor**, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

- **(iv) Sistema de recepción-comercialización**, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- **(v) Intérprete**, quien analiza esa información -normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales-, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- **(vi) Usuario final**, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

Como se mencionó antes de acuerdo a la fuente de energía se pueden distinguir dos tipos de teledetección, pasiva y activa, y así mismo cada sensor posee características propias. En el caso de los sensores pasivos ópticos, dicho así debido al rango del espectro electromagnético en el que realizan la toma de las imágenes, se presentan ventajas como son la posibilidad de interpretar y analizar diferentes patrones del terreno gracias al número de bandas disponibles, detectar cambios de coberturas, analizar firmas espectrales, realizar monitoreos y tener cobertura global; sin embargo, también existen desventajas como lo son la pérdida de información debido a nubosidad.

En el caso de sensores activos como lo son LIDAR o RADAR se pueden analizar otras características del terreno como son la rugosidad, geometría, alturas y topografía, debido a que su rango en el espectro electromagnético pertenece a las microondas, hecho que puede subsanar la falta de información en zonas ecuatoriales por nubosidad, ya que para estos sensores la atmósfera no es un impedimento para la toma de datos. Unas de las ventajas importantes de este sensor es el hecho de que se puedan controlar las condiciones de adquisición como el ángulo de inclinación, la distancia al objeto, la orientación, la polarización, etc. (Chuvieco, 1995, p. 72)

6.2.Radar

El Radar acrónimo de Radio Detection And Ranging en inglés y Detección y Localización por Radio en español, es un sensor activo que funciona en las microondas, región del espectro electromagnético comprendida entre 1 m y 1 cm de longitud de onda, por esta razón tiene la capacidad de trabajar en cualquier condición atmosférica (Chuvieco, 1995, p. 111). Este sistema realiza tres operaciones principales: transmite pulsos en las longitudes de onda de las microondas hacia un blanco en la superficie de la tierra, recibe la señal reflejada (señal retrodispersada que vuelve en la dirección del sensor) después de haber interactuado con el blanco, y mide la intensidad y el tiempo de retardo de la señal que retorna al sistema satelital. (Forigua, 2016)

La relación fundamental entre las características del radar, el objeto y la intensidad de señal que le llega al receptor está dada por la ecuación del radar que viene dada así:

Ecuación 1. Ecuación del Radar

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}$$

Dónde: Pt = potencia transmitida, Gt = ganancia de la antena de transmisión, Ar = apertura efectiva (área) de la antena de recepción, σ = sección transversal del radar, o coeficiente de decaimiento del objetivo, F = factor de propagación del patrón, Rt = distancia del transmisor al objetivo, Rr = distancia del objetivo al receptor.

La teledetección con Radar funciona iluminando el terreno con ondas electromagnéticas en frecuencias de microondas y utilizando la amplitud de la señal y el tiempo que tarda entre transmitir la señal y recibir los ecos para deducir la distancia desde el sensor al objeto. Estas distancias se utilizan, junto con la información orbital, para producir una imagen 2D del suelo, las frecuencias de energía electromagnética y el rango de longitudes de onda de microondas que se utilizan comúnmente para teledetección son las correspondientes a las bandas L, C y X, sin embargo, dentro de las microondas también existen más bandas (Hill, 2001).

Tabla 1. Longitudes de onda para Radar

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)
P	0,3 - 1	30 - 100
L	1 - 2	15 - 30
S	2 - 4	7,5 - 15
C	4 - 8	3,75 - 7,5
X	8 - 12,5	2,4 - 3,75
Ku	12,5 - 18	1,67 - 2,4
K	18 - 26,5	1,1 - 1,67
Ka	26,5 - 40	0,75 - 1,1
Milimétrica a Submilimétrica	100 - 26,5	0,3 - 0,75

Las imágenes de teledetección se utilizan de forma extensiva para el monitoreo y también prevención de los efectos de los riesgos naturales de forma que es una herramienta básica para su cartografía, es el caso de las imágenes de Radar que tienen como objetivo producir imágenes de la superficie terrestre, esas imágenes de Radar son un registro de la interacción de las ondas electromagnéticas y los objetos de la superficie, su apariencia depende de variables como las características geométricas de los elementos del terreno, rugosidad de la superficie y contenido de humedad, y de las características del Radar como la longitud de onda, polarización, ángulo de incidencia, tamaño de la antena y dirección de mira (Forigua, 2016).

Es importante mencionar que el tamaño de la antena se relaciona de manera indirecta con el ancho del haz de la señal de radar y la resolución espacial, esto quiere decir que para obtener una imagen de alta resolución la que está vinculada con una haz de ancho pequeño, hace falta una gran antena, es así que el Radar puede ser, en relación al tamaño de la antena, un Radar de Apertura Real (RAR), cuando el ancho del haz está determinado por el ancho de la antena, o un Radar de Apertura Sintética (SAR), cuando se simula una gran antena a partir de una antena normal y cuyo comportamiento es equivalente a varias veces su tamaño real para obtener resoluciones altas con antenas relativamente pequeñas y cubriendo grandes áreas.

6.3.Radar SAR

El Radar SAR nace con mejoras respecto a otros sistemas como lo son el SLAR y RAR, sistemas que mostraron gran versatilidad respecto a la fotografía aérea pero que cuentan con baja resolución a consecuencia del tamaño de su antena, ya que para obtener mayores resoluciones se necesitan antenas grandes y este hecho deja estos sensores con complicaciones para emplearse en plataformas espaciales (Chuvieco, 1995). El SAR o Radar de Apertura Sintética es un sistema de Radar de iluminación lateral que produce una resolución fina de la superficie observada al moverse a lo largo de su trayectoria. El Radar ilumina hacía un lado de la dirección de vuelo, franjas continuas y paralelas entre sí, que acumulan información de las microondas reflejadas y posteriormente permite la formación de imágenes (GlobeSAR, s.f.).

Según Chuvieco: "Su principio de operación se basa en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor. En el caso del SAR se registran pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una sola antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos" (Chuvieco, 1995).

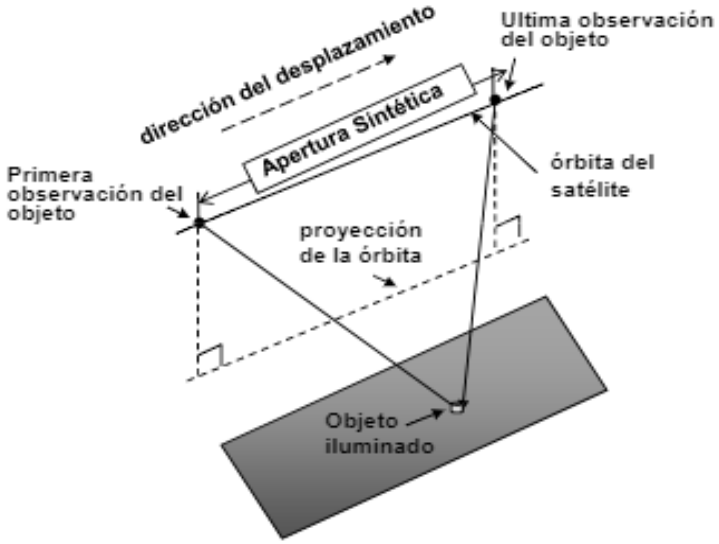


Ilustración 11. Funcionamiento SAR. Fuente. (GlobeSAR, s.f.)

Según la Agencia Espacial Europea, ESA por sus siglas en inglés, "el radar y el SAR registran el tiempo que tarda un pulso en volver, su intensidad y la fase de la microonda, estas señales de fase producen un interferograma entre dos captaciones de datos del SAR. El radar interferométrico (InSAR) se utiliza para medir las elevaciones del terreno, mientras que el InSAR diferencial (DInSAR) se emplea para medir desplazamientos como los del flujo glaciar." (ESA Eduspace, s.f.). En concordancia con lo anterior en el caso de los movimientos en masa, el radar SAR presenta una valiosa alternativa ya que en dependencia con el ángulo de observación o visión y la geometría de adquisición del radar se pueden detectar las componentes del movimiento para identificar el tipo de movimiento de la tierra, aplicación bastante importante para los geólogos (Pérez & Mu oz, 2006).

6.3.1. Características de diferentes sensores SAR

A continuación, se presentará una tabla comparativa de los diferentes sensores de RADAR SAR que están o han estado en funcionamiento y las diferentes características del modo de toma y el producto obtenido.

Tabla 2. Principales misiones SAR y sus características

Satélite	ERS-1	SEASAT	JERS-1	SIR C/X SAR	ERS-2	RADARSAT-1
Lanzamiento	1991	1978	1992	1994	1995	1995
Banda	C	L	L	L,C / X	C	C
Polarización	VV	HH	HH	FULL POL / VV	VV	HH
Resolución (m)	26 x 6-30	25 x 25	18	30x30	26 x 6-30	10-100
Ángulo de incidencia (°)	24	25	35	17-60	24	10-60
Ancho de Swath (km)	100	100	76	15-90 / 15-45	100	50-500

Satélite	ALOS	ENVISAT	TERRASAR-X	RADARSAT-2	COSMO SKYMED	SENTINEL-1
Lanzamiento	2006	2002	2007	2007	2007	2013
Banda	L	C	X	C	X	C
Polarización	HH o VV VV+VH HH+HV VH+VV	HH o VV VV+HH HV+HH VH+VV	HH o VV HH+VV HH+HV HV+VV	HH+HV VV+VH HH+HV+VV+ VH	HH o VV HH+VV HH+HV	VV o HH VV+VH HH+HV
Resolución (m)	10-100	30 x 30	1,7 - 3,5 x 3	3-100	1-100	5 x 5 5 x 20 25 x 100
Ángulo de incidencia (°)	20-55	20-45	15-60	10-60	Necesitado	20-45
Ancho de Swath (km)	70-250	100-400	15-30	10-500	10-200	80 250 400

Compilación de características de los sensores RADAR SAR. Elaboración propia a partir de información consultada en la página web de cada misión. La resolución se encuentra en metros de resolución en Rango por resolución en Azimut.

6.4.Conceptos importantes de Radar

6.4.1. Fase y amplitud

Una señal de SAR procesada se compone de dos cosas: una amplitud y una fase, que están representadas por un número complejo. La fase no se usa en los estudios SAR tradicionales, debido a que está influenciada por muchas cosas que la hacen parecer aleatoria sobre una imagen SAR, adicionalmente los factores que la influencian son muy difíciles de cuantificar. De hecho, la información de fase usualmente es destruida por completo mediante técnicas de eliminación de moteado, que promedian las amplitudes de los píxeles vecinos. (Hill, 2001)

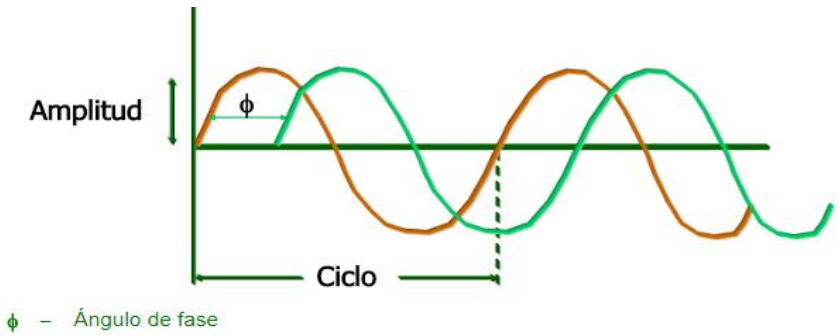


Ilustración 12. Componentes de una onda. Fuente. (Naranjo, 2016)

Cuando el sensor de radar envía un pulso de energía electromagnética, hay un número entero de longitudes de onda completas que viajan hacia y desde el objetivo, luego una longitud de onda final e incompleta recibida por el sensor, es lo que se denomina la 'fase'. La fase se mide como un ángulo, en radianes o grados, 2π radianes de fase componen un ciclo de fase. Los factores más importantes para determinar la fase son: la topografía, las deformaciones de superficie, la curvatura de la tierra, la reflexión de la señal según el objeto, el cambio en el retardo de fase causado por diferencias en la posición de los objetos, error de órbita, la atmósfera y el ruido de fase producido por el sistema de radar (Hill, 2001).

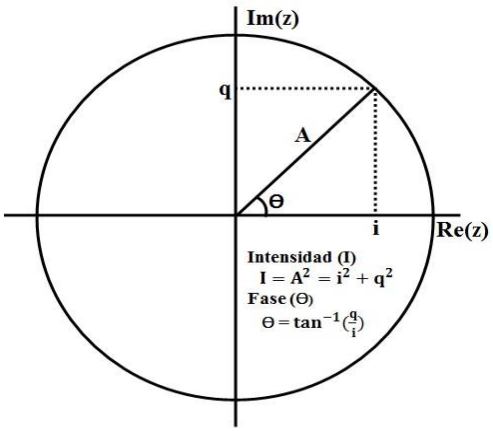


Ilustración 13. Onda electromagnética vista en formato complejo. Fuente. (Villa, 2016)

La onda del radar se puede ver como se muestra en la *Ilustración 13* y se puede definir en términos matemáticos como *A.Cos(θ)*, donde A es la amplitud y θ es el número de radianes. Según Emma Hill si se traducen estos parámetros en ejes reales y complejos, se obtiene la *Ilustración 13*. Así θ gira alrededor del círculo con un número creciente de ondas, aumentando en 2π cada vez que completa el ciclo. Si la onda está incompleta, el círculo no se completará y todos los ciclos completos anteriores de 2π más el valor parcial de θ serán la fase.

Además, a partir de esto se deducen las siguientes ecuaciones para la amplitud observando la geometría en el círculo:

Ecuación 2. Amplitud y Fase en complejos. Fuente. (Hill, 2001)

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \; ; \quad A = \frac{I}{\cos\theta} \; ; \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right)$$

6.4.2. Ángulo de incidencia

Se refiere al ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la normal a la superficie de la Tierra. Dependiendo de la altura del radar sobre la superficie de la Tierra, el ángulo de incidencia cambia a lo largo de la dirección del Rango. Por lo tanto, la geometría de visualización una una misma imagen es diferente de punto a punto en la dirección del rango. También se habla del Ángulo de Incidencia Local, el cual se define como el ángulo entre la línea de visión del radar y la vertical relativa al plano tangente local; es así que toma es la inclinación local de la superficie iluminada y por tanto influye de forma determinante en la brillantez de la imagen (GlobeSAR, s.f.)

El ángulo de incidencia local causa ciertos efectos en el terreno, como lo son según (Lira, 2002):

- Para terrenos con relieve bajo, variaciones en el ángulo de incidencia local modifican la dispersión o backscatter, dependiendo de la pendiente del terreno.
- Cuando la pendiente está hacia el radar, el backscatter aumenta (respecto al caso de terreno plano) y cuando la pendiente se aleja de la dirección de visión, el backscatter disminuye.
- A medida que el relieve se hace más grande, aparecen tres tipos de distorsiones geométricas: Foreshortening (Escorzo), Layover (Inversión por relieve) y Shadow (Sombra).

6.4.3. Resolución Espacial

La resolución del sensor tiene dos dimensiones, una en la dirección del Rango y otra en dirección del Azimut. La resolución en dirección del azimut (Ra) se determina por el ancho angular del haz, por ejemplo, para que dos objetos puedan ser identificados independientemente, deben estar separados en la dirección del azimut por una distancia mayor al ancho del haz en el terreno.

Afortunadamente el ancho del haz es inversamente proporcional a la longitud de la antena (L), por lo que en el caso del SAR esto aporta a que exista mayor resolución, ya que según la *Ecuación 3* cuanto mayor sea la longitud de la antena del radar, más estrecho será el ancho del haz y mayor será la resolución del azimut (Jensen, 2006).

Ecuación 3. Resolución en Azimut

$$Ra = L / 2$$

Donde L: Longitud de la antena en dirección del azimut

En el caso del Rango, existen dos parámetros: Slant Range o Rango Oblicuo y Ground Range o Rango sobre el terreno. En Slant Range es la distancia sobre la línea de visión entre el Radar y cada objeto observado y el Ground Range es la distancia en la dirección del rango proyectada sobre un plano de referencia nominalmente horizontal; para datos obtenidos de una plataforma espacial se utiliza un modelo del geoide de la tierra mientras que para un Radar aéreo se realiza una aproximación planar. Es válido aclarar que para realizar la proyección del rango en el terreno es necesario aplicar una transformación geométrica que conlleva a un desplazamiento del relieve, efecto escorzo e inversión del relieve (distorsiones) si no se emplea información de la elevación del terreno (GlobeSAR, s.f.).

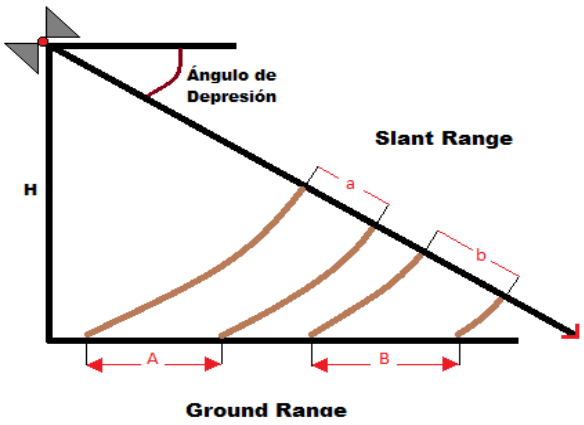


Ilustración 14. Slant Range y Ground Range. Fuente. Elaboración propia a partir de información proporcionada por (Jensen, 2006)

En cuanto a la resolución en rango se presentan así mismo dos resoluciones, en la siguiente figura se muestra la geometría lateral del sistema SAR y la forma en que el pulso se expande en forma concéntrica desde el sensor a la velocidad de la luz, en ella se muestran con líneas punteadas el comienzo y el final del pulso (Panozzo, 2013).

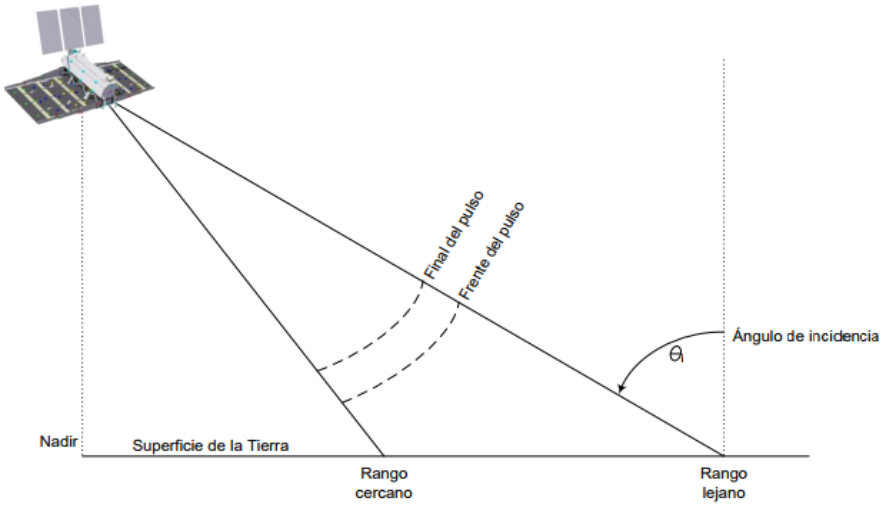


Ilustración 15. Transmisión de un sistema SAR. Fuente. (Lira, 2002)

De acuerdo a esto, la resolución en Rango Oblicuo corresponde a:

Ecuación 4. Resolución Rango Oblicuo.

$$Rro = \frac{ct}{2}$$

Donde c: Velocidad de la luz; t: Duración del pulso [Seg]

y debido a que, a menor duración del pulso, mejor resolución y la duración del pulso es inversamente proporcional al ancho de banda B, se obtiene:

Ecuación 5. Resolución Rango Oblicuo 2

$$Rro = \frac{c}{2B}$$

Donde c: Velocidad de la luz; B: Ancho de banda [Hz]

Para el caso de los sistemas SAR el pulso está modulado linealmente en frecuencia y por lo tanto logra un mayor ancho de banda B mediante el envío de pulsos más largos en tiempo, contrariamente a lo que sucede con los radares convencionales.

En el caso de la Resolución en Rango de Terreno, es necesario convertir el rango oblicuo al rango de terreno. Por lo tanto, la ecuación para calcular la resolución de rango de Terreno de un sistema SAR es:

Ecuación 6. Resolución Rango de Terreno.

$$Rrt = \frac{c}{2B \sin(\theta i)}$$

Donde c: Velocidad de la luz; B: Ancho de banda (Frecuencia); θ_i: Ángulo de Incidencia

Ya que el ángulo de incidencia aumenta desde el rango cercano hacia el lejano y por tanto al dividir por el seno del mismo, la resolución en tierra resulta mejor en el rango lejano que en el cercano.

6.4.4. Distorsiones geométricas

El efecto Foreshortening o Escorzo es por el cual un terreno con pendiente y de cara hacia la iluminación de un radar de visión lateral, se presenta como si tuviera una escala comprimida en la dirección del rango, en relación a la apariencia que tendría si el mismo terreno fuera plano. Este efecto se pronuncia más en terrenos con pendientes mayores y en radares que emplean ángulos de incidencia más cercanos a cero (GlobeSAR, s.f.).

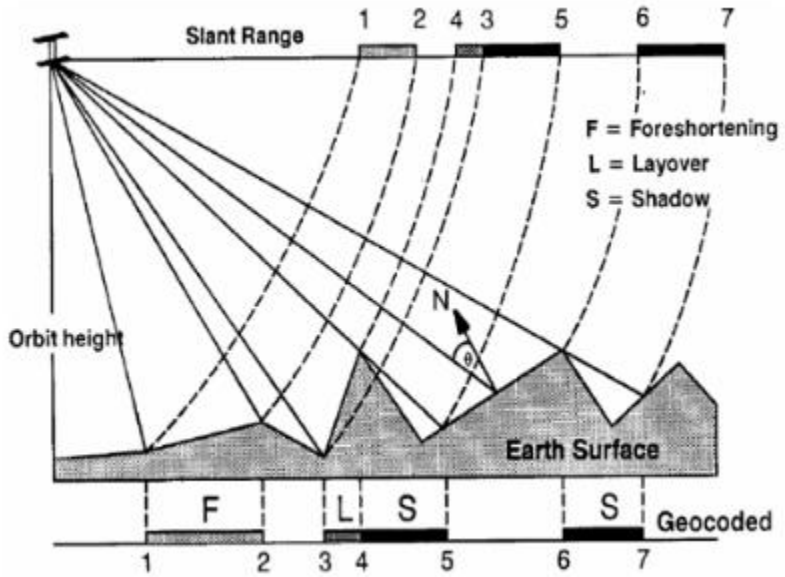


Ilustración 16. Efectos geométricos SAR. Fuente. (ESA, s.f.-a)

El efecto Layover o inversión por relieve, ocurre cuando el pulso del radar alcanza primero la cima de una montaña y luego su base, como resultado la cima de la montaña se desplaza desde su verdadera posición en el terreno hacia el radar. En estas situaciones los puntos más altos en el terreno se inclinan hacia la dirección de visión del radar. En relación al ángulo de incidencia, ocurre cuando este es más pequeño que la pendiente del terreno (GlobeSAR, s.f.). Esta distorsión no puede ser corregida, aun cuando se conozca la topografía del terreno, por esto hace falta bastante experiencia para interpretar imágenes de Radar de zonas montañosas (Jensen, 2006).

El efecto Shadow o Sombra se presenta cuando existe un mayor ángulo de incidencia. Se muestra en puntos de la escena más alejados del nadir local, es decir, donde existen rangos grandes, y tiene como resultado la pérdida de información en zonas montañosas o construcciones, ya que se obstruye el paso del pulso y se convierte en zonas negras en las imágenes (GlobeSAR, s.f.).

6.4.5. Polarización

La polarización es un parámetro que aporta a la definición de la radiación del sensor. Este parámetro se refiere a la orientación del vector del campo eléctrico y magnético de la señal

transmitida y puede ser Horizontal (H) o Vertical (V). Junto con la frecuencia, la polarización determinará la naturaleza exacta de la interacción onda de Radar - Objetivo. Según la información consignada en GeoSpatial la polarización V es preferible para estudios de oceanografía y la H para estudios de la tierra, sin embargo, esto puede varias según la naturaleza de los elementos del territorio estudiado.

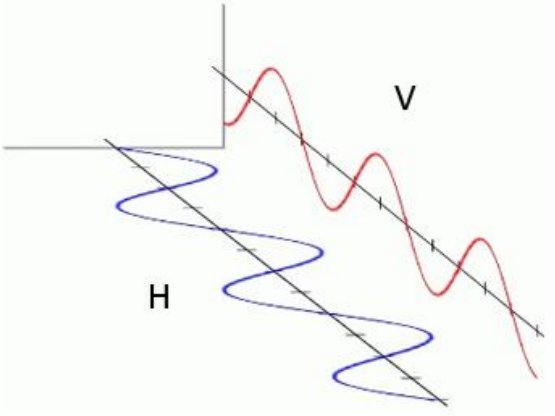


Ilustración 17. Propagación de onda polarizada. Fuente. (Hexagon Geospatial, s.f.-d)

Se dice que las imágenes son polarizadas similares cuando son VV ó HH, es decir que la energía se transmite y recibe vertical u horizontalmente respectivamente, o pueden ser polarizadas cruzadas cuando son VH o HV, es decir cuando la energía transmitida se polariza ortogonal a la recibida. Según esto la polarización indica la orientación del campo eléctrico de la onda incidente y la reflejada en ese orden. En general para cualquier superficie la polarización VV retorna igual o mayor energía que la polarización HH, también se esperaría que la polarización VV produzca un retorno más fuerte cuando los objetivos dominantes están orientados en el plano vertical. De forma similar, se esperaría un retorno más fuerte de la polarización HH cuando los objetivos están orientados horizontalmente. Por ejemplo, la vegetación de altura (vertical) dará un rendimiento mayor con un radar polarizado verticalmente (Hexagon Geospatial, s.f.-d).

6.4.6. Tipos de Reflexión

Sabiendo que un sensor SAR produce imágenes basadas en la intensidad de la energía reflejada, retrodispersión o backscatter por su traducción en inglés, se deben tener en cuenta los parámetros antes mencionados como la longitud de onda, la polarización y uno nuevo que está fuertemente relacionado con la superficie, su rugosidad y el ángulo de incidencia, el tipo de reflexión. Los tipos de reflexión son reflexión Especular, Difusa, Moderada y de Efecto de esquina o angular.

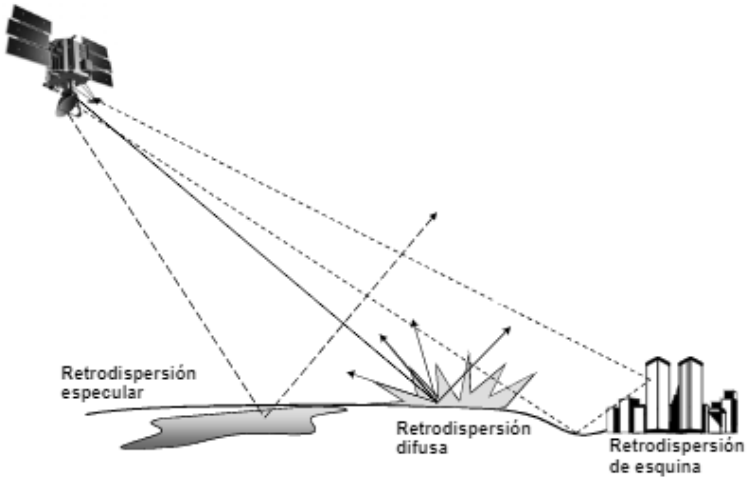


Ilustración 18. Tipos de reflexión o retrodispersión. Teledetección con RADAR. Fuente. (Lira, 2002)

La reflexión especular se presenta en superficies lisas o con rugosidad suave, estas superficies son llamadas especulares del latín *speculum* que significa espejo, esto en términos de longitud de onda, de define como una superficie lisa si sus escalas geométricas de variaciones máximas son considerablemente menores que la longitud de onda del radar. Las superficies especulares pueden ser regiones de aguas tranquilas o autopistas pavimentadas y aparecen obscuras en las imágenes de radar, debido a que la energía incidente se refleja en una dirección lejana al sensor. En relación con el ángulo de incidencia una superficie es menos rugosa si su ángulo de incidencia es pequeño.

La reflexión difusa se presenta en superficies rugosas. En general una superficie rugosa se define como aquella que tiene variaciones de altura típicas, del orden de la mitad de la longitud de

onda del radar. Las superficies rugosas pueden ser zonas cubiertas de vegetación o con relieve fuerte y se presentan con tonos brillantes en las imágenes de radar, esto debido a que su superficie hace que se refleje la energía en muchas direcciones y llegue al sensor más energía. La reflexión moderada es similar a esta, pero en relieves más suaves y su retorno de energía es más bajo, por tanto, su tono no es tan brillante en la imagen.

La reflexión angular se presenta cuando se reúnen tres o dos superficies planas que son casi perpendiculares o perpendiculares entre sí y están de cara al sensor, esta formación geométrica conocida como reflector de esquina o angular produce una retrodispersión en dirección contraria a la dirección del rayo incidente bastante intensa. Estas superficies se encuentran principalmente en ciudades debido a la geometría de las construcciones, también es fácil de identificar por alta respuesta de barcos o embarques en medio de cuerpos de agua.

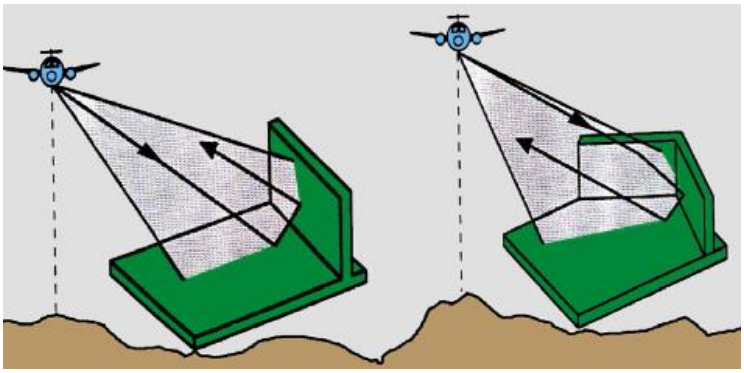


Ilustración 19. Reflector Diedro y Triedro. Fuente. (GlobeSAR, s.f.)

Otro parámetro importante y derivado de los tipos de reflexión es la **Dispersión Volumétrica,** esta dispersión está relacionada con los procesos de reflexión múltiple en un medio físico. Sucede en la parte superior de la vegetación, en maizales, copas de árboles, capas de suelo muy seco, capas de arena o de hielo y es importante ya que influye en la señal que retorna al radar, es decir, el radar recibe la componente de la señal reflejada por la superficie y la reflejada por volumen. La intensidad de esta reflexión depende de las propiedades físicas del terreno u objeto observado

como lo son la constante dieléctrica y de las características del radar como lo son su longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia (GlobeSAR, s.f.).

Respecto a la constante dieléctrica, parámetro que expresa las propiedades dieléctricas del terreno, se menciona como factor importante debido a que incide directamente en la absorción y/o propagación de las ondas electromagnéticas. Esta constante depende básicamente del contenido de agua en la superficie, ya que la penetración de la señal es mayor y la reflexión es menor en una superficie con bajo contenido de humedad y viceversa, se obtiene menor penetración y mayor reflexión cuando hay alta humedad.

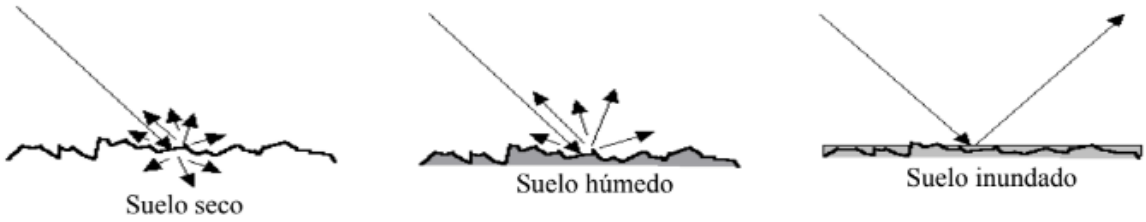


Ilustración 20. Reflexión según la humedad de la superficie. Fuente. (Karszenbaum & Barrazza, s.f.)

La constante dieléctrica está formada por dos componentes: permisividad y conductividad. Ambas son funciones de la longitud de onda del radar, y fuertemente dependientes del contenido de humedad. Los materiales con constantes altas generalmente reflejan la onda de radar con muy poca energía absorbida. Algunas constantes dieléctricas más comunes son:

- 5 para suelo seco y hielo (penetración de varios metros).
- 15 para suelo húmedo (penetración del orden de centímetros).
- 80 para agua (prácticamente sin penetración).

Respecto a la longitud de onda del radar, se puede hablar de mayor o menor penetración en una superficie, por ejemplo, para identificación de hielo se dice que una banda óptima es la X, para cartografía geológica con características grandes la banda L y para penetración del follaje es mejor

una longitud de onda mayor como pueden ser las bandas P o L, sin embargo, la banda C bajo algunas condiciones es una buena alternativa (Valle, 2010).

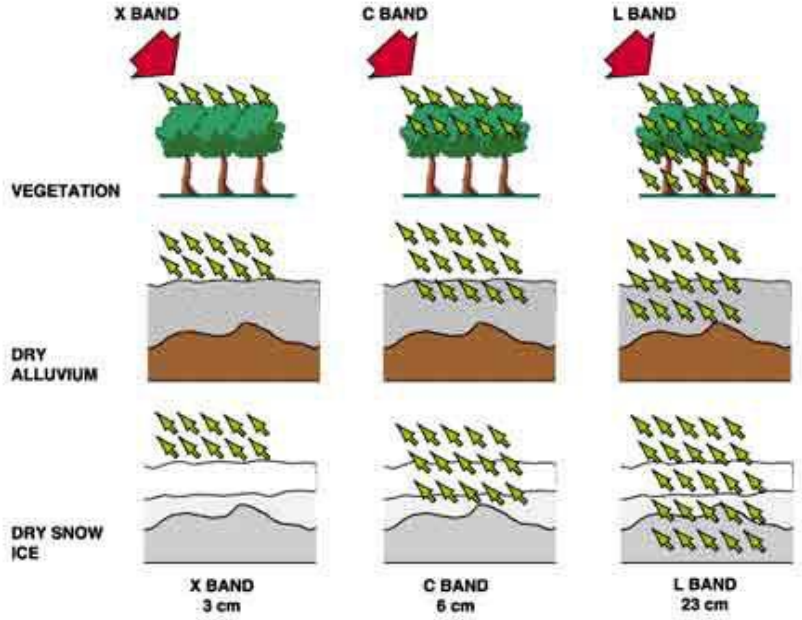


Ilustración 21. Interacción de microondas según su longitud de onda. Fuente. (ESA, s.f.-a)

6.4.7. Niveles de procesamiento

Según (Maitre et al., 2001) las imágenes SAR pueden ser adquiridas en diferentes niveles de procesamiento, los productos son designados según su modo de adquisición, tipo de producto y en algunos casos su resolución. Es importante resaltar que todos los productos son procesados directamente del Nivel 0.

I. **Nivel 0 (bruto o raw):** son los datos brutos comprimidos y sin focalizar. Los productos en Nivel 0 son la base de todos los otros niveles de procesamiento e incluyen paquetes de calibración interna, de ruido y paquetes de fuente de eco, así como la información de órbita y altitud. Estos productos de Nivel 0 se pueden almacenar en archivos a largo plazo que permiten que sea posible procesarlos para generar cualquier tipo de producto durante la

vida de la misión y durante 25 años después del final de las operaciones del segmento espacial (ESA, 2013).

II. **Nivel 1:** son los productos generalmente disponibles y destinados a la mayoría de los usuarios de datos. El producto de Nivel 0 se transforma en un producto de Nivel 1 mediante la aplicación de algoritmos y datos de calibración para formar un producto de ingeniería de referencia a partir del cual se derivan niveles más altos. Para convertir los valores de píxeles digitales a una retrodispersión calibrada radiométricamente, toda la información requerida se puede encontrar en el producto, ya que se incluye un vector de calibración como una anotación en el producto que permite la conversión simple de los valores de intensidad de la imagen en valores sigma o de nulos gamma (ESA, 2013).

El procesamiento involucrado para producir productos de Nivel 1 incluye preprocesamiento, estimación de centroides Doppler, enfoque complejo de una sola mirada e imagen y postprocesamiento para la generación de productos SLC y GRD (ESA, 2013).

- **Single Look Complex (SLC/SSC):** Datos en formato complejo, focalizados (a partir de datos raw), georreferenciados (gracias a datos de las órbitas y altitud del satélite) y provistos en geometría de vista lateral o slant-range. Slant-Range es la observación coordenada del rango natural del radar, definida como la línea de visión desde el radar hasta cada objeto reflector (ESA,2013).
- **Ground Range Detected (GRD):** Datos focalizados detectados, en multivista y proyectados a nivel de la superficie a partir de un modelo elipsoide de la Tierra como el WGS84. La proyección elipsoidal de los productos GRD se corrige utilizando la altura del terreno especificada en la anotación general del producto y esta altura del terreno utilizada varía en azimut, pero es constante en el rango. Las coordenadas del rango de

terreno o Ground Range son las coordenadas del rango inclinado o Slant Range proyectadas sobre el elipsoide de la Tierra (ESA,2013).

Sus valores de píxel representan la magnitud detectada, sin embargo, en este producto la información de fase se pierde, así mismo el producto resultante tiene píxeles de resolución aproximadamente cuadrada y un espaciado de píxeles cuadrados con moteado reducido a cambio de un alto costo de resolución geométrica reducida. Además de las correcciones aplicadas a los productos SLC de Nivel 1, los productos GRD eliminan el ruido térmico para mejorar la calidad de la imagen detectada (ESA,2013).

III. **Nivel 2:** consiste en productos geofísicos geolocalizados derivados del Nivel 1, es decir datos de amplitud corregidos, generalmente en multivista (multilook), distribuidos de forma sistemática para diferentes aplicaciones como estudios de viento, olas y corrientes. Estos productos pueden contener los siguientes componentes geofísicos derivados de los datos SAR: Campo de viento del océano (OWI), Espectro Ocean Swell (OSW) o Velocidad radial superficial (RVL). La disponibilidad de los componentes depende del modo de adquisición ya que los metadatos que se refieren a OWI se derivan de un producto GRD procesado internamente, los metadatos que se refieren a RVL y OSW se derivan de un producto SLC procesado internamente (ESA,2013).

6.5.Interferometría de radar

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica del procesamiento digital de imágenes que permite medir la topografía de una superficie, sus cambios en el tiempo y las deformaciones analizadas de los patrones de interferencia construidos sobre las bases de diferencia de las imágenes combinando dos imágenes SAR de la misma zona en épocas distintas,

las cuales permiten realizar mediciones, dichas imágenes son conocidas como par interferométrico. Las fases de dos imágenes SAR con diferencia de posición o de tiempo se pueden comparar, la diferencia resultante entre las fases es un nuevo tipo de imagen llamado *interferograma,* el cual contiene toda la información sobre la geometría relativa y los patrones de interferencia. Esta técnica ha permitido mediciones en tercera dimensión y ha convertido la teledetección de una ciencia interpretativa a una cuantitativa que tiene aplicaciones en la geodesia, cartografía, gestión de riesgos y demás.

De acuerdo a la información suministrada por el módulo Radar Interferometry de ERDAS imagine 3.0, la creación del interferograma contiene la información de la diferencia entre las dos escenas como una serie de franjas, con cada franja se representa una longitud de onda originaria de la diferencia de longitud de trayectoria, luego convierte estas series de franjas en una altura de píxel que es proporcional a la elevación, la cual es cuantificada como un múltiplo de la longitud de onda y codificada como una serie de franjas de interferencia. Se entienden las franjas como una agrupación de las diferencias de fase de las imágenes y la fase cómo el componente que se observa únicamente en ondas periódicas sin cambios en picos, valles y longitudes de onda, e indica su posición en un ciclo que se determina de 0° a 360°. Matemáticamente, el interferograma se crea multiplicando una imagen de radar compleja (SLC) con el conjugado complejo del otro.

La interferometría ha desarrollado aplicaciones en cuanto a temas de remoción en masa en el mundo utilizando la técnica de Displacement Mapping, or Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) la cual hace una eliminación de las contribuciones topográficas y orbitales para poder revelar movimientos de tierra a lo largo de la línea de visión entre el radar y el objetivo, cualquier desplazamiento de una parte de la escena aparece directamente como un cambio de fase con respecto al resto de la escena. Matemáticamente, el radar mide el cambio

escalar en la distancia del satélite a la tierra, que es igual a la componente del vector de desplazamiento o en la dirección del eje del radar (Rosen et al., 2000).

D-InSAR es capaz de medir los desplazamientos de la superficie terrestre con una precisión en el nivel de centímetros a milímetros. Los softwares utilizados para procesar este tipo de técnicas extraen cuantitativamente el desplazamiento superficial que se efectuó entre los tiempos de adquisición de las dos imágenes, mientras que la técnica de interferometría de radar tradicional (lnSAR) está diseñada para extraer la elevación de las superficies teniendo como un insumo imágenes de radar tomadas de posiciones ligeramente diferentes en el espacio, las cuales se combinan para producir el interferograma. D-InSAR ha sido aplicada en temas como subsidencias y levantamiento de la tierra, hinchazón de un volcán, deslizamientos de tierra y terremotos, minería, hidrocarburos, extracción de agua y otros fenómenos de la tierra.

Esta técnica proporciona una herramienta bastante valiosa para la mitigación y prevención de riesgos ya que mediante un monitoreo continuo por medio de interferometría de radar en zonas vulnerables se podrá conocer el estado y dinámica del movimiento para poder planear de manera más precisa y óptima el territorio, de esta forma prevenir la pérdida de vidas y de infraestructura, así como detrimento económico en la región de estudio.

6.5.1. Línea base

La línea base interferométrica es el componente de la distancia entre dos líneas de vuelo o vías orbitales del satélite de radar en el momento de la captura de las imágenes y el tiempo entre las dos adquisiciones se denomina línea base temporal, la cual es un requisito para las series de tiempo interferométricas y la interferometría diferencial.

En los sistemas de antena dual, dos antenas están montadas en la misma plataforma, por lo que existe una línea base fija entre ellas y la geometría del sistema está restringida. La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es el mejor ejemplo de un "sistema de antena dual". En los sistemas de única antena el mapeo topográfico generalmente es llamado “dual-pass” o “repeat-track”, ya que el par interferométrico se forma con dos imágenes tomadas en fechas diferentes y por tanto en diferente órbita, esto implica que los parámetros de órbita para las dos tomas de la imagen deben tener ciertas restricciones con el fin de tener el sensor casi la misma posición para la segunda toma (Hill, 2001).

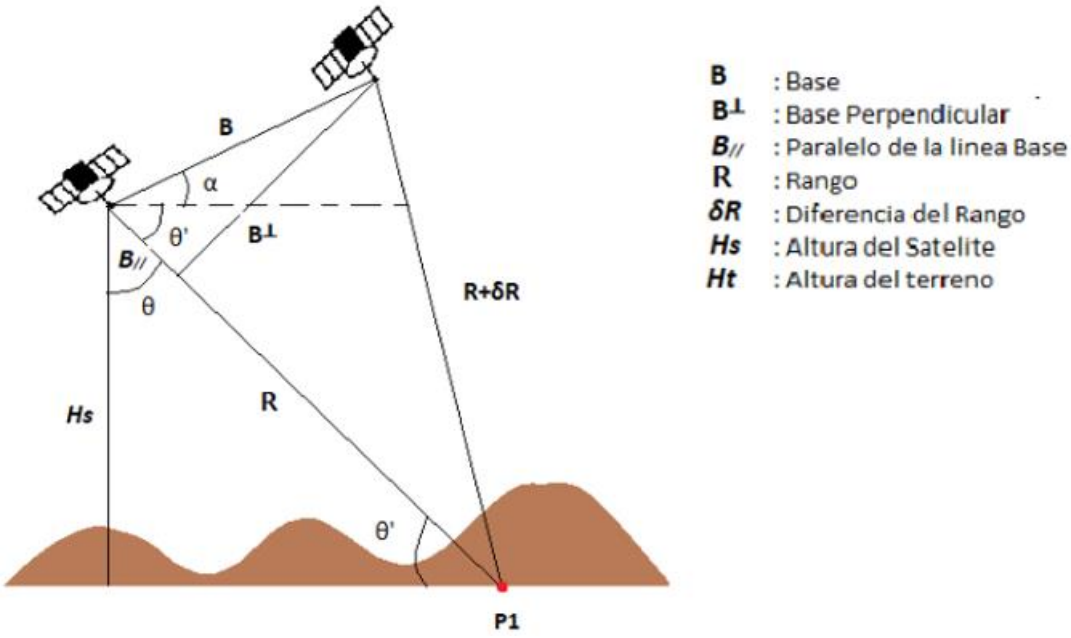


Ilustración 22. Configuración interferométrica de un sistema SAR. Fuente. Elaboración propia a partir de información obtenida de (Seppi, 2016)

En la figura de la *Ilustración 22* se observa la configuración de toma interferométrica de un sistema de Radar SAR junto con los componentes más importantes de la misma, entre estos componentes además de línea base se encuentran línea base perpendicular y línea base paralela, estas últimas representan las proyecciones sobre los diferentes ejes de la distancia orbital. La línea base perpendicular B⊥ es, para la *Ilustración 22*, la proyección de la línea base desde la ubicación

del sensor en la segunda toma a 90° sobre la dirección del Slant Range de la primera toma y la línea base paralela es la distancia que representa la diferencia de ubicación del sensor en las dos tomas, en dirección del Slant Range.

La línea base perpendicular es un componente bastante importante para poder realizar interferometría ya que según experiencias anteriores un interferograma con línea base perpendicular muy pequeña, es decir menores a 30 m, son casi inútiles, ya que, a pesar de ser fáciles de desenrollar, tienen alta sensibilidad al ruido de fase y efectos atmosféricos. En el caso de interferogramas con líneas base "normales", más altas de 450 m, es por lo general imposible desarrollarlos si no existe un DEM y la topografía no es suave, además la coherencia por lo general es bastante baja debido a la decorrelación de alta dispersión geométrica y de volumen. Es así que se ha establecido un rango aproximado para una línea base perpendicular óptima entre 150 y 300 m, sin embargo, se aconseja manejar más de un interferograma para obtener mejores resultados (ESA, s.f.-b).

Este componente está íntimamente relacionado con la **Ambigüedad de Altitud** *ha*, que se define como la diferencia de altitud que genera un cambio de fase interferométrica de 2π, después del aplanamiento del interferograma y es inversamente proporcional a la línea base perpendicular;

Ecuación 7. Ambigüedad de altitud

$$h_a = \frac{\lambda R \sin\theta}{2B_n}$$

Donde λ es la longitud de onda, R es la distancia del sensor al terreno, ha es la ambigüedad de altitud y Bn es la línea base perpendicular.

Esto nos indica que, en principio, cuanto más alta es la línea de base, más precisa es la medición de la altitud, ya que el ruido de fase es equivalente a un ruido de menor altitud. Sin embargo, se mostrará más adelante que hay un límite superior en la línea base perpendicular, sobre el cual las

señales interferométricas se decorrelacionan y no se generarán franjas. En conclusión, existe una línea de base perpendicular óptima que maximiza la relación señal-potencia del ruido (donde la señal es la altitud del terreno) (ESA, s.f.).

6.5.2. Coherencia

Se dice que dos imágenes de la misma zona en diferentes épocas, es decir el par interferométrico, es coherente cuando no se modifica su geometría o propiedades físicas y por lo tanto la fase tampoco se altera, por el contrario, si se produce algún cambio físico o geométrico entre las imágenes se genera una variación en la fase y se dice que pierde coherencia. El grado de variación de la fase indica la magnitud de la pérdida de coherencia, por lo tanto, cuando se produce fenómenos como remociones en masa la geometría es transformada presentándose pérdida de coherencia (Lira, 2002, p.32).

En el corto plazo (días a semanas) la mayoría de las áreas conservan diferentes grados de coherencia y pueden permitir un análisis cuantitativo, mientras el monitoreo de la deformación a largo plazo mediante D-InSAR está limitado por áreas que permanecen coherentes durante un largo plazo como las zonas urbanas, suburbanas e industriales, mientras las áreas de vegetación muestran valores de baja coherencia, por lo que es importante para no perder demasiada coherencia en los interferogramas analizar zonas donde no exista demasiada cobertura vegetal en caso de hacer análisis en zonas rurales. La coherencia es un indicador de calidad del interferograma resultante, además es un indicador de precisión de resultados de medición cuantitativa de altura o movimientos.

El factor de coherencia es calculado como el valor absoluto del coeficiente de correlación entre las muestras de imágenes de radar complejas (Single Look Complex SLC) en una ventana local. (A. Sosnovsky et al., 2015.). La técnica de interferometría de radar funciona a partir del factor de

coherencia, por lo que las señales recibidas entre las dos imágenes SAR deben estar correlacionadas, es decir, los porcentajes de similitud entre pixel y pixel al realizar la comparación entre las dos imágenes debe ser significativo. Para una imagen con N píxeles, la coherencia puede ser modelada como (Seymour & Cumming, 1994):

Ecuación 8. Estimación de la Coherencia para una imagen con N pixeles

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{n=1}^{N} Y_1^{(n)} Y_2^{*(n)}\right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left|Y_1^{(n)}\right|^2 \sum_{n=1}^{N} \left|Y_2^{(n)}\right|^2}}$$

El proceso de estimación de la coherencia, tiene como resultado valores de pixeles que van desde el 0 (color negro) donde no hay coherencia, hasta el 1 (color blanco) donde los pixeles son completamente coherentes. La pérdida de coherencia puede ser causada por los cambios en las propiedades físicas y geométricas de la escena entre las dos imágenes, el aumento de la base temporal, un valor elevado de la línea base espacial entre las imágenes, el procesamiento interferométrico de los datos SAR, entre otros. Asimismo, la coherencia entre las imágenes comparadas dependerá de los cambios del suelo entre una y otra y los cambios de vegetación y humedad, por lo que las zonas más aptas para estos estudios en las zonas rurales son las zonas áridas con poca vegetación.

Las magnitudes de coherencia pueden variar en distintos grados, cuando es muy baja es porque hay presencia de agua, cuando es moderada puede ocurrir que sea vegetación en crecimiento o en movimiento, y es alta cuando hay manchas urbanas, desiertos u otras características estables (Austin & Beacon, 2004). Las magnitudes de la coherencia son las siguientes:

- 0,3 a 0,5 es utilizable pero ruidosa
- 0,5 a 0,7 es buena.
- 0,7 a 1 es excelente.

Por otro lado, Sentinel Application Platform (SNAP) en el cual se realiza el tratamiento de las imágenes con la técnica de interferometría, es posible calcular la coherencia entre dos imágenes con su función stack overview, la cual hace una estimación de la coherencia esperada para la imagen maestra del par interferométrico. Esta imagen principal se selecciona de tal manera que la línea base perpendicular sea lo más baja posible, por lo tanto, la coherencia para el par interferométrico se define en esta plataforma como:

Ecuación 9. Coherencia esperada para la imagen maestra en SNAP

$$\gamma^m = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K} g(B_{\perp}^{k,m}, 1200) \times g(T^{k,m}, 5) \times g(f_{dc}^{k,m}, 1380),$$

$$g(x,c) = \begin{cases} 1 - |x|/c & \text{if } |x| < c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases},$$

Donde el símbolo B⊥ representa la línea base perpendicular entre las imágenes m y k en el centro de la imagen, el símbolo T la línea de base temporal y la línea de base Doppler (la diferencia de frecuencia Doppler centroide media). El divisor c, en la segunda ecuación, puede considerarse como una línea de base crítica para la cual se espera la de-correlación total para los objetivos con un mecanismo de dispersión distribuido (SNAP, 2015).

La pérdida de coherencia es llamada decorrelación, la cual es conocida como ruido en la fase presente en los interferogramas. Santiago Seppi (2016) menciona en su tesis las diferentes fuentes de decorrelación:

I. Decorrelación geométrica o por línea de base (γgeom), causada por la diferencia entre los ángulos de incidencia entre ambas adquisiciones.

II. Decorrelación por centroide Doppler (γDC), causada por la diferencia entre los centroides Doppler de ambas adquisiciones.

III. Decorrelación volumétrica (γVOL), causada por la penetración de la onda del radar en el medio dispersor.

IV. Decorrelación térmica o del sistema (γthermal), producida por las características del sistema SAR, como las características de la antena.

V. Decorrelación temporal (γtemporal), debida a cambios físicos en el terreno que afectan a los dispersores locales.

VI. Decorrelación debida al procesamiento InSAR (γprocessing), que resulta de los algoritmos elegidos para procesar los datos.

La pérdida de coherencia está asociada principalmente a la vegetación, la cual está asociada a la *decorrelación temporal* ya que su reflectividad compleja varía en el tiempo y los elementos y/o posición de los mismos que emiten el eco dentro de una celda de muestra, como pueden ser las hojas y las ramas pequeñas de los árboles cambia (Colesanti & Wasowski, 2006), este tipo de decorrelación también se presenta cuando se utilizan intervalos de tiempo extensos entre las imágenes del par interferométrico. De acuerdo con lo anterior cabe mencionar que en las zonas de deslizamiento la coherencia es alta debido a que la superficie de la roca se encuentra expuesta.

La decorrelación por línea base también es una de las principales pérdidas de coherencia y es importante tenerla en cuenta para las aplicaciones en InSAR. Existe un valor de línea de base a partir del cual la diferencia o salto espectral entre dos adquisiciones supera el ancho de banda BR, causando que la correlación geométrica sea cero (Seppi, 2016). Parámetros como el ángulo de incidencia, la altitud, la frecuencia y el ancho de banda permiten calcular la línea de base crítica denomina como *B⊥crit*, la cual expresa la máxima separación horizontal de dos satélites para realizar interferometría (Hanssen, 2001).

Ecuación 10. Línea de Base Crítica

$$B_{\perp crit} = \lambda \frac{B_R}{c} . R \tan(\theta_i - \varsigma)$$

Donde c es la velocidad de la luz y ς es la pendiente local, que se define positiva desde el satélite.

La decorrelación geométrica puede entonces calcularse como:

Ecuación 11. Decorrelación Geométrica

$$|\gamma_{geom}| = \begin{cases} \dfrac{B_{\perp crit} - B_{\perp}}{B_{\perp}}, & |B_{\perp}| \leq B_{\perp crit} \\ 0, & |B_{\perp}| > B_{\perp crit} \end{cases}$$

Siendo B⊥ la línea base perpendicular entre las adquisiciones que conforman el par interferométrico.

Para el satélite de observación ERS (European Remote Sensing Satellite) la pérdida de coherencia debido a la longitud de la línea base perpendicular se presenta a 1 Km aproximadamente y es esta la denominada línea base crítica, sin embargo, autores como Massonnet y Feigl (1998) señalan que el satélite presenta problemas en estudios de deformación, por lo que se esperaría que la línea base crítica sea mucho menor a 1 km para estos estudios.

6.5.3. Fase interferométrica

La fase del interferograma es igual a la resta de las fases de la imagen master y slave. En el caso extremo de tomar las dos imágenes desde el mismo punto ($B_n = 0$), la fase del interferograma sería igual a 0 y no podríamos extraer ninguna información de ella (Blanco y Barreto, 2009).

Según Hanssen la diferencia de fases entre las tomas A y B se escribe como la contribución de dos términos:

Ecuación 12. Cálculo de la Fase Interferométrica

$$\triangle \Phi_{AB} = \triangle \Phi_{plana} + \triangle \Phi_{topografía}$$

El primero es conocido como término de tierra plana, el cual expresa la fase interferométrica debido a un plano o superficie de altura constante. El segundo relaciona los cambios de fase con los cambios de altura △h, es decir, es el que contiene información de la topografía de la escena y lo que mide son incrementos de altura entre los puntos de la escena. La topografía de la escena se representa en el interferograma como ciclos 2π (Blanco y Barreto, 2009).

Por otra parte, el desplazamiento ρ, el cual corresponde al cambio de la altura de la escena entre dos imágenes, causa que la fase interferométrica incluya finalmente un término en la ecuación que representa este movimiento de deformación (Blanco y Barreto, 2009).

Ecuación 13. Aporte de la deformación a la fase

$$\Phi_D = \frac{4\pi}{\lambda}\,\rho$$

Cabe aclarar que ρ se refiere a la deformación en la dirección del Slant Range y además no depende de la línea base. Entonces la expresión que define la fase interferométrica quedaría así con el aporte de la deformación y demás componentes que según (Rosen, 2000) aportan a la fase interferométrica:

Ecuación 14. Componentes de la Fase Interferométrica

$$\Phi = \Phi_{superficie} + \Phi_{topografía} + \Phi_{deformación} + \Phi_{ionósfera} + \Phi_{tropósfera} + \Phi_{órbita} + \Phi_{ruido}$$

Dónde $\Phi_{superficie}$ es causado por la curvatura del planeta, $\Phi_{topografía}$ es debida a la superficie topográfica, $\Phi_{deformación}$ representa la deformación de la superficie, $\Phi_{ionósfera}$ y $\Phi_{tropósfera}$ son los aportes a la fase por retrasos de propagación en la ionosfera y la troposfera, $\Phi_{órbita}$ y Φ_{ruido} son contribuciones a la fase debidos a la incertidumbre de las órbitas y sistemas de ruido (Rosen, 2000).

6.5.4. Ruido de fase interferométrica

Los ruidos de fase son la consecuencia de las heterogeneidades de la atmósfera entre las dos tomas del sensor de radar sobre el área iluminada y esencialmente se deben a las condiciones climáticas cambiantes. Sin embargo, no solo depende de las condiciones climáticas, sino que también depende considerablemente del rango, es decir, del ángulo de observación. De hecho, para un ángulo de mirada creciente, la trayectoria de la onda electromagnética a través de la atmósfera

se hace más larga. Además, este fenómeno depende en gran medida de la topografía, que debería ser importante en las zonas de montaña (ESA, s.f.-b).

Según lo anterior se deben tener en cuenta principalmente cuatro contribuciones al ruido de fase:

I. **Ruido de fase debido al cambio temporal de los dispersores o scatterers**: en el caso de una cuenca hidrográfica o áreas con vegetación densa, los dispersores cambian totalmente después de unos pocos milisegundos, mientras que las rocas expuestas o las áreas urbanas permanecen estables incluso después de años. Por supuesto, también existen situaciones intermedias en las que la fase interferométrica sigue siendo útil incluso si está alterada por el ruido de cambio (ESA, s.f.-b).

II. **Ruido de fase debido a un ángulo de visión diferente**: el efecto Speckle cambiará debido a la combinación diferente de ecos elementales, incluso si los dispersores no cambian a tiempo. La consecuencia más importante de este efecto es que existe una línea base crítica sobre la cual la fase interferométrica es puro ruido. La línea de base crítica depende de la dimensión de la celda de resolución del rango de terreno (y por lo tanto también de la pendiente del terreno), de la frecuencia del radar y de la distancia entre el sensor y el objetivo. Sin embargo, este término de ruido de fase puede eliminarse del interferograma por medio de un paso de procesamiento previo (filtro) de las dos imágenes SAR (ESA,s.fb).

III. **Ruido de fase debido a la dispersión de volumen:** La línea base crítica se reduce en el caso de la dispersión del volumen, cuando los difusores primarios no están dispuestos en una superficie plana, sino que ocupan un volumen (por ejemplo, las ramas de un árbol). En este caso, el cambio del Speckle también depende de la profundidad del volumen ocupado por los difusores primarios (ESA, s.f.-b).

IV. **Contribución atmosférica:** Cuando dos imágenes interferométricas SAR no son simultáneas, la trayectoria del recorrido de la radiación para cada una puede verse afectada diferentemente por la atmósfera, (diferentes niveles de humedad atmosférica, temperatura y presión). Este efecto suele limitarse a un cambio de fase interferométrico de pico a pico de 2π a lo largo de la imagen con una variabilidad espacial uniforme (desde unos pocos cientos de metros hasta unos pocos kilómetros). El efecto de dicha contribución afecta tanto a la altitud (especialmente en el caso de líneas de base pequeñas) como a las mediciones de deformación del terreno (ESA, s.f.).

6.5.5. Aplanamiento

Mediante el proceso conocido como aplanamiento o achatamiento del interferograma llamado en inglés flattening, es posible modelar y calcular la fase de tierra plana (Φ_{FLAT}) la cual tiene en cuenta la curvatura de la tierra, ya que la fase interferométrica se ve afectada por esta última. Por lo tanto, el efecto de la curvatura de la tierra tiene que ser removido para obtener franjas que se puedan relacionar con cambios en desplazamiento (en algunos casos), elevación, ruido y efectos atmosféricos, el flattening por tanto servirá para realizar el desenvolvimiento de la fase de una manera más sencilla (Mangla & Kumar, 2014).

Al realizar este proceso el interferograma aplanado queda referido a la topografía o a los desplazamientos del terreno. De acuerdo con la tesis realizada por Santiago Seppi en el 2016, si no se han producido deformaciones de terreno, entonces el término ΦD (el cual hace referencia a las deformaciones del terreno), es igual a cero, y se tiene como resultado un interferograma topográfico, si en cambio, se cuenta con una fuente de información externa que provee el dato de elevación (un Modelo de Elevación Digital, por ejemplo), el término ΦTopo (el cual hace referencia a la altura del terreno) puede también ser modelado y sustraído, siendo el resultado

entonces de lo que se conoce como *interferograma diferencial*, que contendrá una fase referida sólo a los desplazamientos de terreno**.**

Ecuación 15. Calculo del Interferograma Topográfico

$$\Phi_{pFLAT} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_p - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p}}{R_P \, sin\theta_p} H_p$$

Ecuación 16. Cálculo del Interferograma Diferencial

$$\Phi_{pFLATD} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_p$$

De acuerdo con los términos indicados en la *ilustración 23* donde se observa gráficamente el proceso realizado por la interferometría SAR al observar dos puntos desde geometrías ligeramente distintas, es posible definir las ecuaciones para los interferogramas topográficos y geométricos como se indicó con anterioridad.

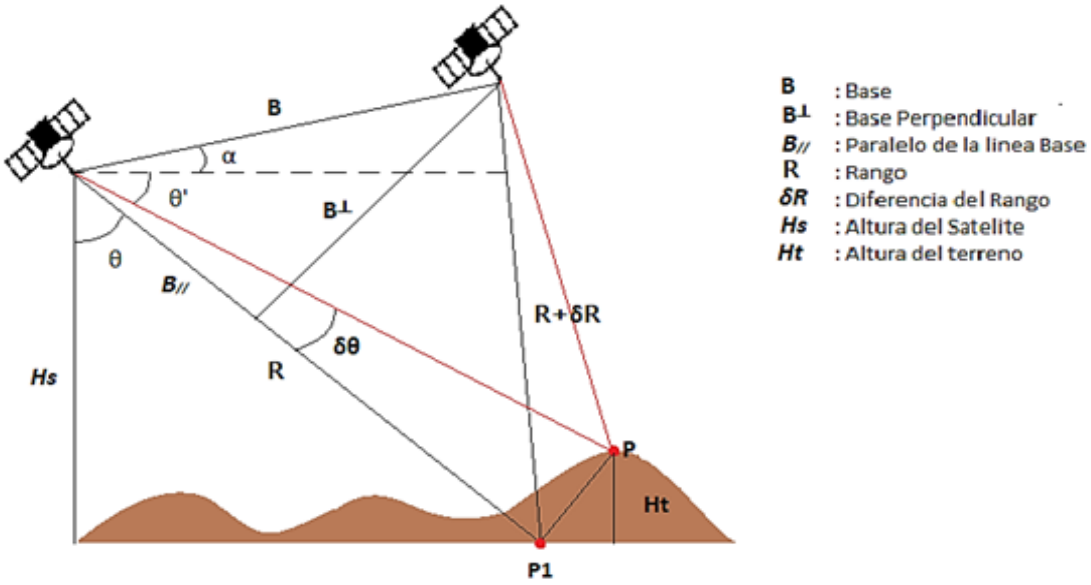


Ilustración 23. Configuración interferométrica de un sistema SAR. Fuente. Elaboración propia a partir de información obtenida de (Seppi, 2016)

6.5.6. Desenrollamiento de fase

Uno de los pasos más difíciles en la interferometría es la extracción de fases absolutas a partir de los valores de fase envueltos o enrollados, sin embargo, es una de las partes más importantes ya que para estimar la topografía y el movimiento del terreno se necesitan las fases absolutas. Debido a que la información que se tiene de la fase al momento de generar un interferograma es únicamente la diferencia de fase entre las dos imágenes, esta se debe desenrollar para poder realizar su conversión a datos de altura. En el caso de un interferograma aplanado, la fase proporciona una medición ambigua de la altitud relativa del terreno, esto debido a la naturaleza cíclica de la fase interferométrica de 2π, sin embargo, la variación de fase entre dos puntos en el interferograma aplanado proporciona una medida de la variación de altitud real después de eliminar cualquier número entero de altitudes de ambigüedad (equivalente a un número entero de 2π ciclos de fase) (ESA, s.f.-b).

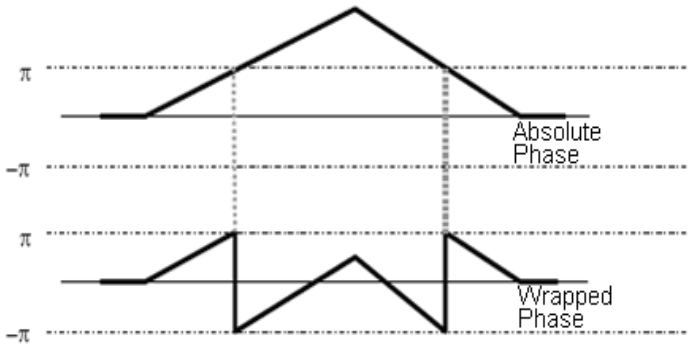


Ilustración 24. Relación entre fase enrollada y desenrollada. Fuente. (Hexagon Geospatial, s.f.-a)

Para desenvolver la fase, primero se mide la fase interferométrica para todos los píxeles y se hace una suposición inicial de que los valores medidos son confiables. Luego, se agrega a cada valor de fase de píxel el múltiplo entero de 2π que se requiere para desenrollarlo, es decir pasarlo a valores absolutos. Este proceso se puede entender gráficamente con la *Ilustración 24*, en la que

se muestra el paso de los valores de la fase enrollada entre -π y +π (onda inferior) a valores que pueden sobrepasar π (onda superior) y que muestran la onda reconstruida.

Un ejemplo del cálculo que se realiza en el desenrollamiento puede ser el siguiente, en el cual se busca recuperar el número entero de ciclos *n* que serán añadidos a la fase enrollada Φ para que el valor no ambiguo de fase ψ pueda finalmente obtenerse para cada pixel (ESA, s.f.-b).

Ecuación 17. Valor de Fase no ambigua o absoluta

$$\psi = \phi + 2\pi \cdot n$$

Este cálculo es presentado por la Agencia Espacial Europea en uno de sus manuales para usuario, sin embargo, existen muchos otros algoritmos que por ejemplo se basan en la suposición de que el campo de fase desenrollada real es "suave" y varía "lentamente", más precisamente, se supone que los valores de fase vecinos están dentro de medio ciclo (π radianes) el uno del otro. Aunque esta hipótesis suele ser válida para la mayoría de los píxeles de imagen, la presencia de algunas discontinuidades de fase (es decir, variaciones absolutas de fase entre píxeles vecinos de más de π radianes) causa incoherencias, ya que la integración produce resultados diferentes (ESA, s.f.).

6.6.Procesamiento complementario

6.6.1. Fase a desplazamiento

La detección de deformaciones superficiales en el terreno para la identificación de deslizamientos o subsidencias hace parte de los objetivos de la interferometría diferencial puesto que aporta la información necesaria para determinar la actividad de los movimientos.

Como se indicó con anterioridad la obtención de los interferogramas diferenciales se realiza luego del aplanamiento de la fase donde los interferogramas quedan referidos a la topografía o a

las deformaciones del terreno. La *ecuación 16* indica el cálculo para obtener los desplazamientos del terreno (metros) a partir de la fase (radianes).

En la medición de las deformaciones del terreno, la línea base perpendicular no tiene mucha influencia en la sensibilidad del sistema, sin embargo, la propagación de los errores de medición de la fase topográfica antes de ser removida si afectan de manera importante el interferograma diferencial (Seppi, 2016), por lo que dichos errores también deben ser removidos. La fase debido a la deformación puede ser despejada así:

Ecuación 18. Fase de deformación

$$\Phi_{deformación} = \Phi - \Phi_{Topografía}$$

Dado que se tienen en cuenta los errores de la estimación de la fase topográfica, Seppi en el 2015 indica que la ecuación anterior debe ser descrita de la siguiente manera:

Ecuación 19. Fase diferencial sin fase topográfica y errores de la fase topográfica

$$\Phi_{deformación} = \Phi - \Phi_{Topografía} \pm \sigma_{\Phi topografía}$$

Donde:

Ecuación 20. Errores de la Fase topográfica

$$\sigma_{\Phi topografía} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp p}}{R_p \sin(\theta_p)} \sigma_z$$

Donde σ_z = Error de medición topográfica (Precisión teórica del DEM utilizado en D-InSAR)

Es posible observar en la ecuación anterior que mientras más grande sea la línea base perpendicular mayor será la propagación del error topográfico y mayor será la propagación de este error en la deformación, es por esto que las líneas base de los interferogramas escogidos deben ser cortas.

Sentinel Application Platform (SNAP) tiene como base la *ecuación 16* para realizar el cálculo de fase a desplazamiento cuando los dispersores de puntos del suelo cambian ligeramente su posición relativa en el intervalo de tiempo entre dos observaciones SAR (como, por ejemplo, en caso de hundimiento, derrumbe, terremoto, etc.) (SNAP, 2015).

Este programa dispone de modelo de elevación digital (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para eliminar la contribución de la altitud de la fase interferométrica, lo que se conoce como eliminación de la fase topográfica indicado con anterioridad. De igual forma si se dispone de los datos orbitales precisos, el programa calcula y sustrae la curvatura de la tierra, lo que en apartados anteriores se llamó aplanamiento de la fase. De acuerdo a lo anterior, el programa genera un mapa de desplazamiento relativo del terreno, el cual es calculado así:

Ecuación 21. Cálculo de fase interferométrica a desplazamiento relativo del terreno

$$\boldsymbol{d} = -\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\Phi_d$$

6.6.2. Fase a altura

La formación del modelo de elevación digital (DEM) se hace mediante la transformación de valores de fase a valores de altura y una geocodificación para obtener el DEM, los cuales se obtienen a partir de dos adquisiciones SAR en diferentes intervalos de tiempo. El interferograma topográfico es calculado como se indica en la *ecuación 15*.

Sentinel Application Platform (SNAP) convierte la fase interferométrica desenvuelta en las alturas del sistema codificado de radar, este cálculo se realiza mediante el método Schwäbisch, que utiliza polinomios para comparar la fase real con la fase de tierra plana (referencia) utilizando el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (SNAP, 2015). El método Schwäbisch, es un método rápido que produce las alturas codificadas por radar, se basa en la idea de primero calcular

la fase de referencia en un número de alturas discretas y, a continuación, comparar la fase real del interferograma con estos valores pre-calculados para determinar la altura (SNAP, 2015).

6.6.3. Georreferenciación y ortorrectificación

Las distancias en las imágenes pueden distorsionarse debido a variaciones topográficas de la escena y a la inclinación del sensor satelital, por lo que las correcciones del terreno compensan las distorsiones para que la representación geométrica de la imagen se acerca lo mejor posible a la realidad.

El programa Sentinel Application Platform (SNAP) utiliza el algoritmo Range Doppler Terrain Correction Operator para geocodificar las imágenes, utilizando la información de vectores del estado de órbita disponible en los metadatos o en la órbita precisa externa, las anotaciones de sincronización de radar, los parámetros de conversión de rango de tierra junto con los datos de referencia de un DEM externo (SNAP, 2015), lo último para obtener la geolocalización precisa de la información. El DEM utilizado durante este proceso es el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Este proceso se realiza después de hacer la conversión de fase a desplazamiento o fase a altura para obtener mayor precisión y la localización exacta de la información.

6.7.Movimientos en masa

Estos fenómenos son desplazamientos de masas de tierra o rocas en una pendiente en forma súbita o lenta considerados procesos de dinámica externa, los cuales modifican la forma del terreno, los deslizamientos a su vez son la principal manifestación de los movimientos en masa. Si bien la gravedad que actúa sobre las laderas es la principal causa de un movimiento en masa y/o deslizamiento, su ocurrencia también depende de variables como las clases de rocas y suelos, la

Topografía (lugares montañosos con pendientes fuertes), orientación de las fracturas o grietas en la tierra, cantidad de lluvia en el área, actividad sísmica, actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.), fallas o fracturas, erosión (por actividad humana y de la naturaleza) y contenido de arcillas en el suelo, las cuales tienen la propiedad de que al empaparse de agua aumentan su volumen, esto supone que los terrenos arcillosos en climas en los que alternan periodos secos con otros húmedos se deforman y empujan taludes (acumulación de fragmentos de rocas), rocas, carreteras, etc. (Ayala, 2000).

Los deslizamientos de tierra ocurren con mayor frecuencia que cualquier otro evento geológico y se producen a diario en las capas más superficiales del terreno como consecuencia de fuertes precipitaciones o de ondas sísmicas. Existen por tanto una gran variedad de clasificaciones de los procesos de remoción en masa y según Alcántara (1999) la clasificación más aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo del movimiento, por lo que, de manera general, estos movimientos se dividen en caídas o desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos. También se presentan movimientos compuestos y movimientos por reptación.

6.7.1. Desprendimientos o caídas

Son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos, se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. Se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, caídas o desprendimiento de detritos y caídas o desprendimientos de suelos. La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida.

I. **Caída de Roca:** Esto sucede cuando los macizos sufren procesos de meteorización, los cuales pueden fracturarse debido a su cercanía con zonas de fallamiento, las

cuales pueden estar sometidos a prácticas de minería o construcción de obras viales. La entrada de agua en las abundantes fracturas y las fuertes pendientes facilitan el desprendimiento de la roca, de esta forma pueden llegar a zonas bajas con facilidad (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia & Corpoboyacá, 2011).

6.7.2. Deslizamientos

Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de ruptura semi-planas u onduladas a los movimientos traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos.

I. **Deslizamiento Traslacional:** Este deslizamiento consiste en el desplazamiento de una masa a lo largo de una superficie de ruptura de forma plana u ondulada con una inclinación constante. Se caracteriza por tener poca profundidad y por sus discontinuidades estructurales, generalmente se ocasionan porque los suelos tienen rocas muy fracturadas que se asientan sobre otra roca menos firme como el suelo arcilloso, roca meteorizada que se asienta sobre suelo firme y roca que presenta una fractura paralela a la superficie.

II. **Deslizamiento Rotacional:** Este deslizamiento consiste en el desplazamiento de una masa a lo largo de una superficie de ruptura de forma curva o cóncava. Estos deslizamientos son conocidos como hundimientos, puesto que son desplazamientos de suelos blandos a lo largo de una depresión del terreno, por lo que es típico de suelos pegajosos como los arcillosos o sobre superficies arcillosas.

III. **Deslizamiento Retrogresivo:** Estos deslizamientos son entendidos como la distribución espacial de los deslizamientos traslacionales o rotacionales, donde la superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.

IV. **Deslizamiento Progresivo:** Estos deslizamientos son entendidos como la distribución espacial de deslizamientos traslacionales o rotacionales, donde la superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

6.7.3. Flujos

Son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar. Los flujos envuelven todos los tipos de materiales disponibles y se clasifican con base en su contenido, por tanto, se dividen en flujos de rocas, flujos o corrientes de derrubios y flujos de arena o suelo.

I. **Flujo de Detritos:** Es el movimiento de masa que durante su desplazamiento transporta el material llamado detritos, el cual es un material suelto o sedimento de la roca, estos son productos de la erosión, el transporte, la meteorización química y física o de los procesos que afectan química y físicamente al sedimento luego del depósito. Se caracteriza por el desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado (Suarez, 1998). Este tipo de movimiento puede mover grandes volúmenes de materiales.

II. **Flujo de Lodo:** Se forman generalmente cuando el agua debilita considerablemente la vegetación y la tierra, alcanzando gran fuerza cuando la intensidad de las lluvias y su duración son largas. Se caracteriza por transportar materiales de suelo muy finos y las humedades son muy altas, por lo que se habla del transporte de material viscoso. Los flujos de lodo poseen tres etapas, la primera consiste en un origen que generalmente es

un deslizamiento; el segundo es un camino o canal de flujo a través del cual fluye el material viscoso y por último la zona de acumulación, la cual se caracteriza por tener menor pendiente donde el flujo pierde velocidad y forma un abanico de deposición.

III. **Flujo de suelo o tierra:** Estos movimientos son lentos debido a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia y transportan materiales blandos y secos. Estos flujos arrastran generalmente parte de la capa vegetal, dejando en la parte superior un escarpe y al final una masa acumulada en forma de lengua.

6.7.4. Vuelco o desplome

Consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad, este movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa. Se clasifican en vuelcos o desplome de rocas, de derrubios o detritos y de suelos.

6.7.5. Expansiones laterales

Estos movimientos son resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compacta, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas.

6.7.6. Movimientos complejos

Ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir deslizándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes.

I. **Avalanchas:** Son movimientos muy rápidos donde el flujo desciende transportando grandes materiales de roca y suelo. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de altas intensidades, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un

prerrequisito para que ocurran (Suarez, 1998). Las avalanchas al ser movimientos complejos son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con volúmenes importantes de agua, los cuales forman una masa de comportamiento de líquido viscoso que puede lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje (Suarez, 1998).

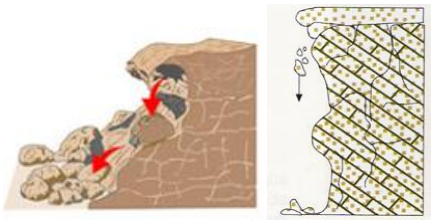
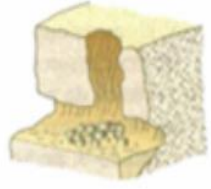
6.7.7. Movimientos compuestos

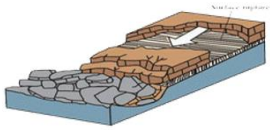
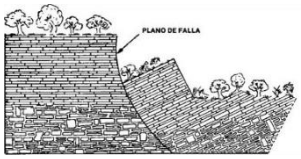
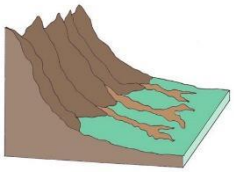
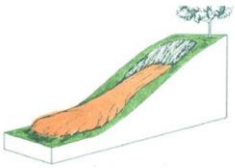
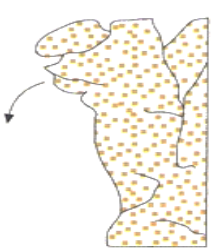
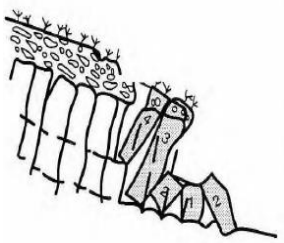
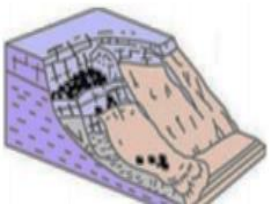
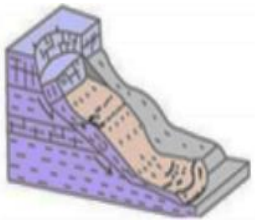
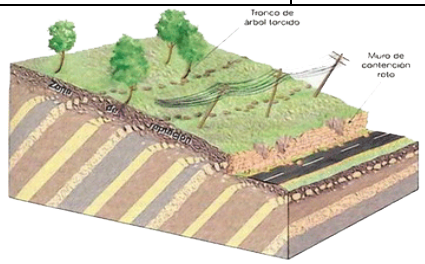
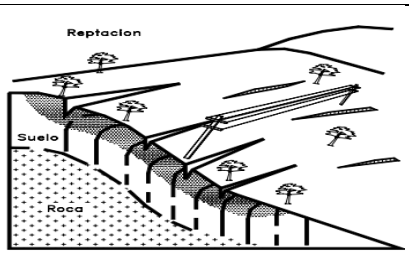
Ocurren cuando al menos dos clases de movimientos simultáneos se presentan en diferentes partes de la masa deslizada.

6.7.8. Movimiento por reptación

Consiste en la deformación de la masa del suelo o roca como consecuencia de movimientos lentos a extremadamente lentos por acción de la gravedad y no presenta una superficie de falla definida. Se manifiesta por la inclinación de árboles, postes, corrimiento de las carreteras, tensión de las raíces de los árboles y la aparición de grietas. Este movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta grandes extensiones de terreno, la reptación puede proceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.

Tabla 3. Tipos de movimientos en Masa

Movimiento	***Ilustración***	
Desprendimiento o Caída	*Caída de Roca* 	*Desprendimiento de Suelo* 

Deslizamiento	*Deslizamiento Traslacional* 	*Deslizamiento Rotacional* 	*Deslizamiento Retrogresivo* 
Flujos	*Flujo de Detritos* 	*Flujo de Lodo* 	*Flujo de Tierra o Suelo* 
Vuelco o desplome	*Vuelco de Roca*  		*Vuelco de Suelo* 
Expansiones Laterales			
Movimiento Complejo y Compuesto	*Movimiento Complejo* 	*Movimiento Compuesto*  	
Movimiento de Reptación			

Fuente. Elaboración propia a partir de imágenes de movimientos en masa tomadas en la web

La interferometría de radar permite identificar pequeños movimientos del terreno que pueden ser precursores de la ocurrencia de algún deslizamiento (Pérez & Muñoz, 2006). Casagli (2008) señala que cuando ocurre un evento por deslizamiento, es crucial realizar un mapeo rápido de la extensión del daño para producir un plan de emergencia y estrategias de mitigación tan pronto como sea posible, y las imágenes de radar por medio de la técnica de InSAR proveen mediciones precisas del desplazamiento del terreno debido a inestabilidad en la pendiente y permite mapear cambios tan pequeños, con precisión de centímetros a milímetros, que han ocurrido en la superficie de la Tierra (Casagli, Ferreti, & Righini, 2008).

6.8.Programa y misión

6.8.1. Copernicus

Copérnico es un Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, que observa nuestro planeta y su entorno para el máximo beneficio de todos los ciudadanos. Ofrece servicios de información basados en la observación de la Tierra por satélite y en datos in situ (no espaciales). El programa es coordinado y gestionado por la Comisión Europea. Se implementa en asociación con los Estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), las Agencias de la UE y Mercator Ocean. (Copernicus, s.f.)

Copernicus cuenta con un conjunto de satélites dedicados (las familias Sentinel) y misiones colaboradoras (satélites comerciales y públicos existentes). Los satélites Sentinel están diseñados específicamente para satisfacer las necesidades de los servicios de Copernicus y sus usuarios. Desde el lanzamiento de Sentinel-1A en 2014, la Unión Europea puso en marcha un proceso para colocar una constelación de casi 20 satélites más en órbita antes de 2030. Copernicus también

recolecta información de sistemas in situ como estaciones terrestres, que entregan datos adquiridos por una multitud de sensores en el suelo, en el mar o en el aire. (Copernicus, s.f.)

La familia Sentinel se compone de siete misiones:

I. **Sentinel-1:** proporciona imágenes de radar para todo tipo de clima, día y noche, para servicios terrestres y oceánicos. Son dos satélites gemelos Sentinel-1A y Sentinel-1B que se lanzaron respectivamente el 3 de abril de 2014 y el 25 de abril de 2016 (Copernicus, s.f.);

II. **Sentinel-2:** proporciona imágenes ópticas de alta resolución para servicios terrestres, por ejemplo, imágenes de vegetación, suelo y cubierta de agua, vías navegables interiores y áreas costeras, también brinda información para servicios de emergencia. Esta misión se compone de dos satélites gemelos Sentinel-2A y Sentinel-2B que se lanzaron respectivamente el 22 de junio de 2015 y el 7 de marzo de 2017 (Copernicus, s.f.);

III. **Sentinel-3:** proporciona datos ópticos, de radar y altimetría de alta precisión para servicios marinos y terrestres. Mide variables como la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie terrestre y marítima, el color del océano y el color de la tierra con precisión y confiabilidad de alta gama. El primer satélite Sentinel-3 se lanzó el 16 de febrero de 2016. Sentinel-3B está programado para su lanzamiento en 2018(Copernicus, s.f.);

IV. **Sentinel-4:** proporcionará datos para el control de la composición atmosférica. Su objetivo es monitorear los gases traza y aerosoles clave de la calidad del aire en Europa a una alta resolución espacial con un tiempo de revisión rápido (por hora). Su lanzamiento se realizará siendo carga útil en la Tercera Generación Meteosat (MTG) de EUMETSAT y está previsto para 2019 (Copernicus, s.f.);

V. **Sentinel-5:** estará dedicado al monitoreo de la composición atmosférica. Será una carga útil embarcada en Metop Second Generation (Metop-SG) de EUMETSAT que se lanzará en el período 2021. Proporcionará mediciones precisas de los componentes atmosféricos clave, como el ozono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el metano, el formaldehído y las propiedades de los aerosoles (Copernicus, s.f.);

VI. **Sentinel-5P:** Precursor es una misión satelital lanzada el 13 de octubre de 2017. Es una misión de relleno de huecos que tiene como objetivo proporcionar continuidad de datos hasta el lanzamiento de Sentinel-5 (Copernicus, s.f.);

VII. **Sentinel-6:** proporcionará altimetría de alta precisión para medir la altura global de la superficie del mar, principalmente para oceanografía operacional y estudios climáticos. Es una misión cooperativa desarrollada en asociación entre Europa (UE, ESA y EUMETSAT) y los EE. UU. (NOAA y NASA). Su lanzamiento está planificado para 2020 (Copernicus, s.f.).

Además de los datos proporcionados por los satélites Sentinel, las "**Contributing Missions**" desempeñan un papel crucial en la entrega de datos complementarios, ya que aseguran que se satisfaga toda una gama de requisitos de observación. Son misiones de la ESA, sus Estados miembros, Eumetsat y otros operadores de misión de terceros europeos e internacionales que ponen a disposición algunos de sus datos para Copernicus. (Copernicus, s.f.)

Hay alrededor de 30 "**Contributing Missions**" existentes o planificadas y se clasifican en las siguientes categorías:

- Radar de Apertura Sintética (SAR) para observar día y noche la tierra y el océano;
- Sensores ópticos para monitorear actividades terrestres y dinámicas oceánicas;
- Sistemas de altimetría para la medición del nivel del mar;

- Radiómetros para controlar la temperatura de la tierra y el océano;
- Espectrómetros para mediciones de calidad del aire.

Incluso cuando los Sentinel estén operativos, las Misiones Contribuyentes continuarán siendo esenciales, entregando datos complementarios para garantizar que se satisfaga toda una gama de requisitos de observación (Copernicus, s.f.).

6.8.2. Sentinel 1

Este sistema hace parte del Observatorio de Radar Europeo, vinculado al programa Copérnico, y se compone de una constelación de dos satélites con órbita polar. Este sistema proporciona capacidad operacional independiente para el mapeo de radar continuo de la Tierra y está diseñado para proporcionar mayor frecuencia de revisión, cobertura, puntualidad y confiabilidad. También ofrece una alta capacidad de interferometría operacional a través de estrictos requisitos impuestos a la altitud, exactitud, conocimiento de la órbita, y precisión en el tiempo de toma de datos. La constelación compuesta de los satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B cuenta con sensores de Radar de Apertura Sintética SAR de Banda C, que proporcionan imágenes con cobertura mundial (ESA, 2013).

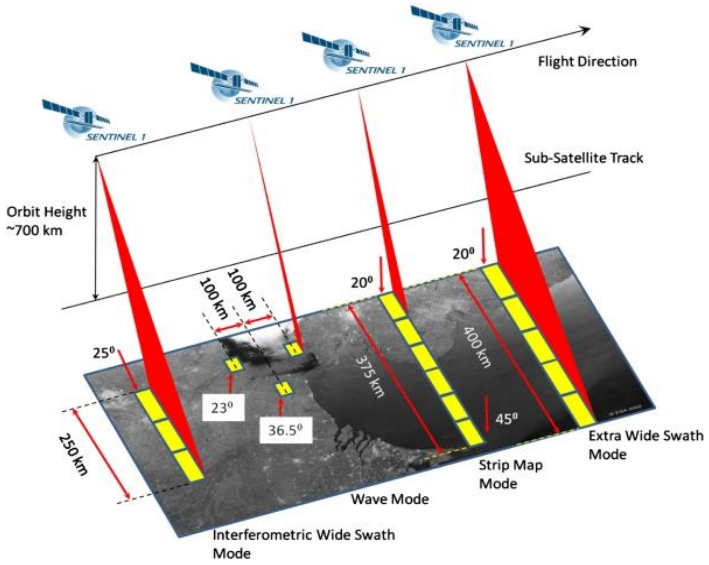


Ilustración 25. Modos de Adquisición Sentinel 1. Fuente. (ESA, 2013)

Los satélites S1A y S1B proporcionan imágenes de diferentes modos de adquisición: Strip Map Mode, Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Swath Mode y Wave-Mode. Debido a que el proyecto utiliza únicamente imágenes recolectadas mediante el modo Interferometric Wide Swath, se presentarán sus características de manera puntual. Este modo de adquisición proporciona imágenes con un ancho de barrido o swath de 250 km y resolución espacial de 5m en Azimut x 20m en Rango, la captura de los datos se realiza en Banda C con un escáner SAR progresivo para la observación del terreno llamado TOPSAR, por sus siglas en inglés, que divide la imagen en tres sub-swath, cada uno compuesto de ráfagas que se encuentran alineadas gracias a la sincronización que realiza el sensor en cada paso para permitir la formación de los pares interferométricos. Tiene un rango amplio de ángulos de incidencia, entre 29,1° y 46,0° y presenta diferentes polarizaciones, polarización simple HH y VV o polarización doble HH/HV o VV/VH (ESA, 2013).

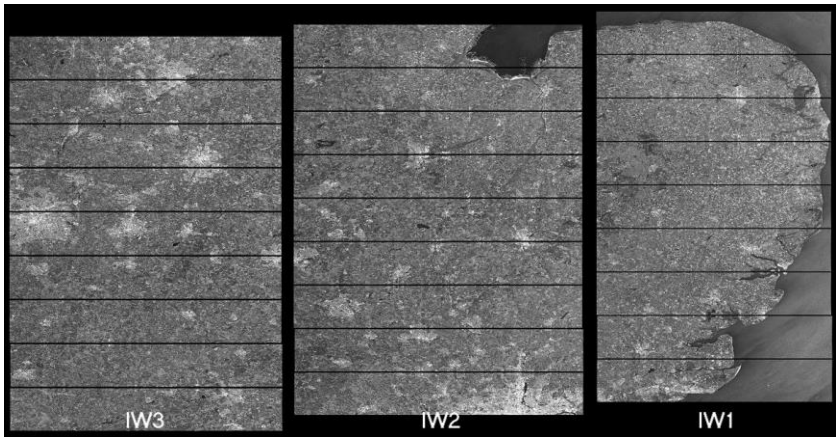


Ilustración 26. Interferometric Wide. Bursts (Ráfagas, líneas horizontales) y Sub-Swaths (división vertical). Fuente. (ESA, s.f.-a)

Entre los objetivos principales de la misión Sentinel-1 están el monitoreo de bosques, agua, suelo y agricultura, apoyo al mapeo de emergencia en caso de desastres naturales, monitoreo marino del ambiente marítimo, observaciones del hielo marino y monitoreo del iceberg, pronosticar condiciones de hielo en el mar, mapeo de derrames de petróleo y monitoreo del cambio climático.

Órbita

Los satélites de la misión Sentinel-1 se encuentran en una órbita circular, helio sincrónico con cercanía polar y su altura orbital es de 693 km. La diferencia de fase entre el satélite Sentinel-1A y Sentinel-1B es de 180°, cada satélite tiene un ciclo de repetición de 12 días por el Ecuador y tiene un total de 175 orbitas por ciclo.

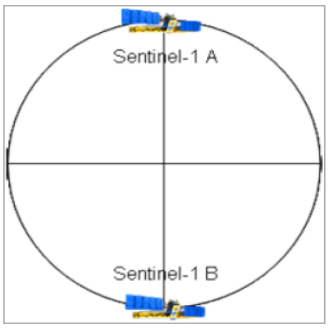


Ilustración 27. Constelación Sentinel-1. Fuente. (ESA, 2013)

En particular para la interferometría, SENTINEL-1 requiere un estricto control de la órbita. El posicionamiento de satélites a lo largo de la órbita debe ser preciso, con apunte y sincronización entre los pares interferométricos. El control de posicionamiento de órbita para SENTINEL-1 se define utilizando un "tubo" orbital fijo en la Tierra, de 50 m (RMS) de ancho en radio, alrededor de una ruta operacional nominal. El satélite se mantiene dentro de este "tubo" durante la mayor parte de su vida operativa (ESA, 2013).

Un solo satélite SENTINEL-1 puede mapear el mundo entero una vez cada 12 días, pero como ahora se cuenta con la constelación de dos satélites, se ofrece un ciclo de repetición exacto de 6 días. La constelación tiene una frecuencia repetida (ascendente/descendente) de 3 días en el ecuador, menos de 1 día en el Ártico y se espera que proporcione cobertura en Europa, Canadá y las principales rutas de envío en 1-3 días, independientemente de las condiciones climáticas. Los datos del radar se entregan a los servicios de Copernicus una hora después de la adquisición (ESA, 2013).

6.9.Software

6.9.1. Sentinel Application Platform- SNAP

Este programa es de uso libre y fue desarrollado por SEOM (Scientific Exploitation of Operational Missions) de la ESA (Agencia Espacial Europea). Es una plataforma con arquitectura de software común para el uso de herramientas de Sentinel 1, Sentinel 2 y Sentinel 3, sin embargo, también es útil para procesar imágenes ENVISAT, Radarsat, SPOT, Modis y otras, tiene una arquitectura basada en módulos con varias extensiones y uso lenguaje de programación de Java y Phyton. La arquitectura del software posee dos subsistemas: Desktop y Engine; SNAP Desktop por su lado es una interfaz de usuario moderna con varias funciones de análisis y visualización, además posee interfaces para la operación y generación de gráficos para el procesamiento, mientras SNAP Engine es la base del código central de SNAP, posee un modelo de datos de operador, permite la utilización de formatos de imágenes genéricos o comunes, además de funciones genéricas comunes como lo son re proyección, geo codificación, filtros de la imágenes y demás .

El programa maneja grandes volúmenes de datos y multi resolución, manipula valores de ráster muy grandes para productos Sentinel, cuenta con un algoritmo de procesamiento complejo, utiliza el uso intensivo de ventanas espaciales y temporales, trabaja en series de tiempo pues realiza análisis temporales, usa servicios en la nube y posee herramientas comunitarias para compartir datos, recursos y resultados.

Este programa cuenta con el módulo de *Interferometric* el cual tiene una interfaz específica de biblioteca y aplicación para la función de interferometría llamada jLinda (Biblioteca Java para el análisis de datos interferométricos) y cuenta con módulos extendidos como la función de deformación la cual preserva la fase y los núcleos de interpolación (SNAP, 2015), de igual manera

funciones como el corregistro se ha implementado para aplicaciones interferométricas. La arquitectura del módulo de interferometría se presenta en la *Ilustración 28*

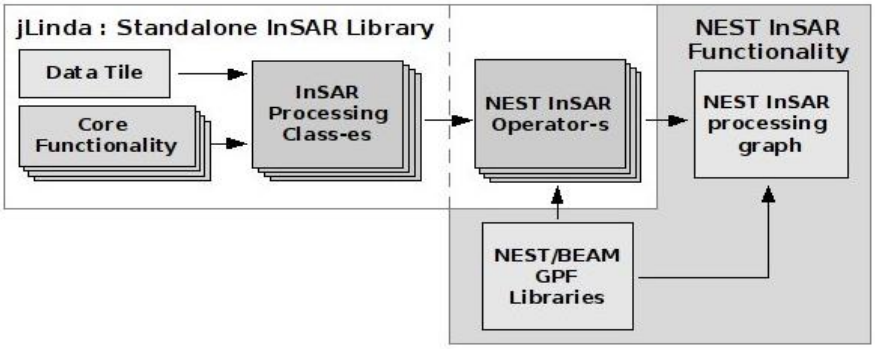


Ilustración 28. Diagrama de flujo de la estrategia de implementación de módulos interferométricos. Fuente. Interferometric Functionality. Fuente. (SNAP, 2015)

6.9.2. SNAPHU

Es la implementación del algoritmo de flujo de red y de costo estadístico aplicado a grandes conjuntos de datos, esta implementación fue desarrollada por Chen y Zebker para el desenvolvimiento de la fase bidimensional, es decir estimar la fase no ambigua a valores de datos observados conocidos de 0 a 2π rad para aplicaciones en el análisis de datos de radar de apertura sintética InSAR, se habla de grandes conjuntos de datos cuando las dimensiones de los datos de entrada interferométrica exceden los límites de las capacidades computacionales de uno (Zebker & Chen, 2002).

Mediante su trabajo investigativo Chen y Zebker presentaron el desenvolvimiento de la fase como la división del interferograma en un conjunto de varios mosaicos pequeños que se desenvuelven individualmente y luego se dividen en regiones independientes, de forma irregular y confiables, posteriormente las regiones se ensamblan en una solución completa desenvuelta con los desplazamientos de la fase calculados entre las regiones (Zebker & Chen, 2002). Lo anterior se realizará mediante una estimación de probabilidad máxima a posteriori (MAP), la cual plantea

calcular la solución desenvuelta más probable dados los datos de entrada observables, por lo que SNAPHU incorpora tres modelos estadísticos para datos de topografía, datos de deformación y datos genéricos uniformes debido a que las estadísticas que relacionan los datos de entrada depende de la cantidad medida. Por otro lado, dado que se presentan algunos problemas de optimización, estos se resuelven con el uso de técnicas de flujo de red (European Space Agency, 2017).

El software está escrito en lenguaje de programación C, por lo que se debería ejecutar en las plataformas de Unix/Linux, sin embargo, es posible ejecutarlo en software propietario como Microsoft Windows.

Para realizar el desenvolvimiento de fase es necesario realizar la exportación del archivo del interferograma con valores de desplazamiento, altura o elevación procesados y los respectivos filtros aplicados a través de SNAP, para que las bandas del interferograma sean compatibles en el procesamiento con SNAPHU. En este proceso de exportación se definen algunos parámetros como el modelo estadístico de costo, el método inicial, el número de tiles (rows and columns), el número de procesadores y el umbral de los tiles en el estadístico de costo.

Los modelos estadísticos de costo disponibles son *defo, topo, smoth y notstatcosts*, los más utilizados son *defo* y *topo, defo* es utilizado para mapas de deformación y topo para valores de altura que luego se convertirán en un DEM. Por otro lado los métodos iniciales son MCF y MST; MCF es el algoritmo de flujo de costo mínimo, el cual tiene como objetivo encontrar la ruta más corta a través de la trayectoria con la mínima distancia total del origen al destino, es decir encuentra la combinación de arcos que vincula todos los nodos mientras se minimiza el costo total de la ruta, mientras MST definido como el algoritmo de árbol de expansión mínima es una ruta dirigida que vincula todos los nodos y cada arco es la ruta más corta posible que uno esos dos nodos (Irwin, 2017).

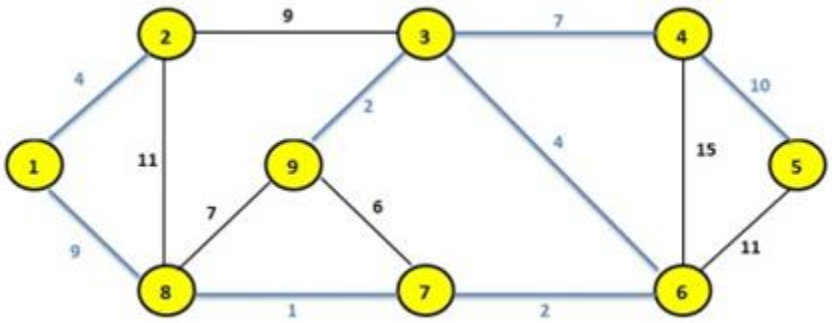


Ilustración 29. Representación Algoritmo de Árbol de Expansión Mínima (MST). Fuente. Blog About programming, Algorithms and More

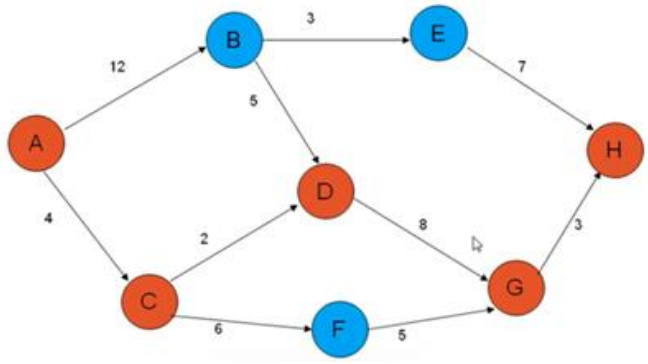


Ilustración 30. Representación Algoritmo de flujo de costo mínimo (MCF). Fuente. Blog Grafos Unefa: Redes de Flujo

6.10. Series de tiempo con algoritmo Coherence Change Detection (CCD)

El módulo Radar Interferometry de ERDAS imagine 3.0 define Coherence change detection como la herramienta que detecta los cambios mientras las técnicas como D-InSAR intenta cuantificar el cambio, esta técnica es recomendable para el monitoreo de periodos cortos de tiempo (Días, semanas) que conservan diferentes grados de coherencia y permiten realizar análisis cuantitativos. El módulo de series de tiempo CCD permite automatizar los análisis de coherencia del tiempo monitoreado. Los pasos que realiza este algoritmo de series temporales son los siguientes de acuerdo a las especificaciones del módulo:

I. CCD Espectral Shift Step: El objetivo del filtro de desplazamiento espectral interferométrico es permitir maximizar con lo que respecta a la coherencia, cada uno de los

píxeles de la imagen de coherencia. Se basa en un análisis de tiempo-frecuencia de las señales que se adquieren a partir de las imágenes obtenidas que son aquellas que proporcionan información para la imagen de coherencia a través de las frecuencias emitidas. Este filtro espectral se utiliza para preservar las bandas de frecuencia de solapamiento comunes puesto que las áreas espectrales que no están sobrepuestas no son coherentes es decir no están correlacionadas por lo que son una fuente de ruido en la imagen de coherencia final. Este filtrado tiene lugar tanto en el rango como en el azimut;

II. CCD Coregister Step: En este paso se realiza el proceso de detección de cambios y registra la imagen de coincidencia en la imagen de referencia;

III. CCD Coherence Step: Calcula la coherencia de las imágenes de referencia y coincidencia indicando que tan bien correlacionadas están las imágenes;

IV. CCD Analysis Step: Analiza las imágenes de coherencia mediante la aplicación de un filtro local para suprimir el ruido de la imagen o mediante la aplicación de un algoritmo de detección de objetos;

V. Guardar el resultado de la imagen de series de tiempo, la cual puede ser guardada como: Imagen de coherencia, imagen de textura en RGB, imagen multitemporal de coherencia usando RGB, imagen textura-coherencia y shapefile que contiene los cambios.

7. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS INTERFEROMÉTRICOS

Según el módulo de ERDAS para interferometría diferencial, esta tecnología ha sido aplicada con éxito a tareas tales como el hundimiento y el levantamiento de la tierra, el movimiento de los glaciares, la hinchazón de volcanes, deslizamientos de tierra y terremotos, minería, hidrocarburos, extracción de agua y otros fenómenos que se pueden visualizar en la Tierra.

7.1.Antecedentes a nivel mundial

Aplicando Interferometría SAR (Wang et al., 2004) estudiaron dos casos de deformación de la tierra: el Terremoto Zhangbei-Shanyi de 1998 y el progreso de la subsidencia en zona urbana de la ciudad Suzhou entre los años 1993 y 2000. Mediante el uso de imágenes ERS 1 y 2 lograron obtener mapas de alta resolución en los cuales se evidenciaron los desplazamientos del terreno y lograron concluir, en el caso del Terremoto que fue bastante útil la técnica para medir la deformación superficial con una cobertura espacial continua y tener un entendimiento amplio de su ciclo; en el caso de la subsidencia se concluyó que puede ser bastante efectivo para adquirir información espacial y temporal de los sistemas acuíferos para poder optimizar el diseño de control de redes y para adquirir datos hidrogeológicos que aporten en estudios de mecanismos y mitigación de riesgos.

En Córdoba Ecuador (Mayorga, 2011) presenta un estudio en las estribaciones occidentales de la cordillera Central de los Andes, zona de clima seco y frío templado con geomorfología dominada por montañas muy elevadas que adicionalmente se encuentra en el área de influencia del Volcán Tungurahua y por el que fue considerado un factor sísmico para el estudio de deslizamientos, ya que en cercanías al Volcán se registraron 124 sismos en dos meses para 2006. La autora determina que con la aplicación de diferencia de interferogramas y D-InSAR con imágenes de ALOS PALSAR se puede dar temprana alerta a áreas sensibles ante la deformación de la superficie y que es importante además contar con un registro preciso de fecha, ubicación y extensión de los eventos para poder comparar los resultados.

Utilizando GBIR Ground Based Interferometric Radar combinado con tecnología LiDAR, GPS e imágenes fotogramétricas (Lowry et al., 2013) realizó el monitoreo de un deslizamiento de falla traslacional lenta en Granby, Grand County, Colorado, con el fin de comparar los métodos

comunes y actuales de topografía basados en GPS para medir deformaciones, con el presentado en su estudio. Este último emplea un Radar de Apertura Real ubicado sobre un trípode a tal distancia que permite detectar y calcular superficies deformadas con áreas hasta de 10 Km2, resolución espacial de 1 mm y resolución temporal de una (1) hora, la utilidad de técnicas de monitoreo interferométrico en un periodo denso de tiempo con métodos de topografía basados en GPS para verificar los desplazamientos medidos. El resultado de esta investigación evidenció la capacidad de monitoreo con la que cuenta la técnica interferométrica y la cual mostró alta resolución temporal para deslizamientos.

Uno de los últimos estudios fue el publicado en agosto de 2016, hecho por un equipo compuesto por 6 personas de China, Reino Unido y España, quienes realizaron un estudio de monitoreo a uno de los deslizamientos más grandes del mundo, el deslizamiento de Daguangbao que cubrió un área de 8 Km^2 aproximadamente y el cual fue ocasionado por el terremoto Wenchuan en China en el año 2008; en el estudio se generaron 53 interferogramas de alta calidad que fueron adquiridos con interferometría diferencial de 15 imágenes Sentinel 1-A de la zona y obtuvieron con la aplicación de series de tiempo, los sectores donde el deslizamiento, aún después de 8 años, se encontraba activo. (Daí, 2016)

En su artículo Chen et. al en el año 2014 explicaron la metodología utilizada para obtener la recuperación de las características espaciales del deslizamiento más grande Daguangbao calculando una estimación cuantitativa del cambio de elevación local, el volumen de desplazamiento en masa y el espesor del depósito asociado con el deslizamiento de tierra inducido por el terremoto de Wenchuan en la provincia de Sichuan, China, lo anterior mediante la técnica de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) a bordo de vehículos con dispersor persistente (PS). Se utilizaron 20 pares interferométricos con buena coherencia a partir de

imágenes ALOS/PALSAR que cubrieron el área montañosa Longmen Shan y una red de observación geodésica natural con numerosas rocas desnudas dispersas que emergieron después del terremoto y eventos de derrumbes co-sísmicos, los cuales fueron reconocidos como los objetos dispersores. De igual forma, se establecieron conexiones espaciales entre los PS adyacentes para formar líneas base de observación que tiene parámetros diferenciales asociados con la topografía y la deformación, a estos datos se les aplicó un modelamiento a partir del método de mínimos cuadrados partiendo del análisis de fase interferométrica de series de tiempo de los pares interferométricos realizados.

El resultado de la investigación arrojó que el patrón espacial del movimiento de masas sugiere que el deslizamiento de tierra gigante se caracteriza por una gran longitud de deslizamiento de 4.350 metros a lo largo de las direcciones NE-SW con un ancho de extensión de 3.400 metros a lo largo del barranco Huangdongzi y un cambio de altura pico de 535 minutos en dirección vertical (Chen et. al, 2014).

En el año 2008 mediante una investigación realizada por W. Y. Gong, J. X. Zhang y Y. H. Zhang se calculó el nivel de deformación del suelo a lo largo del ferrocarril Qinghai-Tíbet con base en la técnica InSAR y la técnica de dispersores persistente (PS) entre los años 2004-2006, adicionalmente se utilizaron DEM derivados de InSAR para estimar la deformación en las áreas de estudio, esta zona presenta doce zonas sismo tectónicas regionales donde ocurrieron algunos grandes terremotos. La técnica PS es apropiada para la detección de deformación a través de series de tiempo por lo que manifiesta la ventaja sobre la debilidad del procesamiento D-lnSAR tradicional en cuestiones como la decorrelación y la contribución de la atmósfera. Se utilizaron siete imágenes ENVISAT SAR para el procesamiento de PS y se hizo una selección basada en la coherencia y la retrodispersión dominante de aproximadamente 20.305 candidatos de PS

encontrados, los cuales se realizaron en su mayoría en la zona urbana sin embargo en la zona rural se ubicaron en su mayoría rocas alrededor de la montaña y en la zona del Tíbet fueron mucho menores que en otro lugar por problemas con la capa de nieve.

La investigación anterior encontró la velocidad de deformación de 2.329 objetivos PS, donde la velocidad en la mayoría de ellos es inferior a 0,1 mm/año y se identificó que en las grandes líneas base temporales y geométricas solo los objetivos puntuales portadores transportan información de fase útil, además el estudio muestra la probabilidad del procesamiento de PS en la región rural.

La investigación titulada Landslide Displacement Monitoring Using Multi-Aperture InSAR and D-InSAR (He et al. 2014) se desarrolló con el fin de develar la deformación de los deslizamientos de tierra causados por la minería a cielo abierto en el oeste de Fushun a partir de la técnica InSAR de apertura múltiple (MIC) e interferometría diferencial tradicional D-InSAR utilizando datos SAR de banda L del sensor PALSAR a bordo del satélite ALOS, ya que la minería es uno de los peligros geológicos más importantes en China. La técnica D-InSAR en el estudio se encargó de medir la deformación unidimensional de este a oeste a lo largo de la línea de visión, sin embargo una característica especial de los deslizamientos de tierra en la mina a cielo abierto del oeste de Fushun es que la deformación principal se produce a lo largo de la dirección norte-sur por lo que fue necesario aplicar la técnica MIC para obtener estos desplazamientos, por ello mediante la integración de InSAR de apertura múltiple y D-InSAR tradicional se exploró para revelar la distribución de la deformación tridimensional de los deslizamientos de tierra causados por la extracción de carbón.

La investigación anterior concluyo que, fue posible saber la deformación horizontal mediante la técnica D-InSAR y dicha deformación es similar al desplazamiento vertical, por lo que el

desplazamiento horizontal más grande se estima hasta 1.45 metros, mientras que por medio de la técnica MIC se observó que los derrumbes ocurrieron en el borde de la mina con una gran extensión de norte-sur y el desplazamiento vertical más grande se estima hasta de 1.10 metros.

7.2.Antecedentes en Colombia

En Colombia se han desarrollado algunos proyectos de investigación aplicando Interferometría Diferencial D-InSAR, tales como los que se nombran a continuación:

Entre los años 2006 a 2008 el Instituto Cartográfico de Cataluña en compañía del FOPAE y DPAE, realizó un estudio en la ciudad de Bogotá a cerca de la evolución de subsidencias y la evaluación del potencial de la técnica. El estudio plantea una metodología de siete pasos desde la adquisición de las imágenes hasta la generación del mapa de deformación, entre estos pasos están el registro de la "imagen esclava" y la "imagen dominante", la generación del interferograma, la geocodificación inversa a partir de un DEM y la información de las órbitas, la generación del interferograma diferencial y el desenrollamiento de la fase. El estudio finalmente obtuvo 57 interferogramas, con 18 imágenes de Radar ENVISAT y 6 ALOS-PALSAR, que fueron procesados con un algoritmo desarrollado por el mismo Instituto Cartográfico de Cataluña, en los que se seleccionaron los píxeles con una coherencia media con el fin de obtener niveles de ruido bajo. El estudio determinó que en la zona de Puente Aranda en Bogotá existe un foco de subsidencia que tiene un movimiento de 7,5 cm/año y otra zona con subsidencia significativa al norte de la ciudad, finalmente se recomendó seguir haciendo monitoreo por medio de esta técnica para apoyar la gestión del riesgo (Blanco y Barreto, 2009)

Seguido a la realización del estudio anterior la DPAE, Dirección de prevención y atención de emergencias, consideró importante la difusión de tal experiencia en conjunto con sus resultados para crear conciencia en la ciudadanía y entidades a cargo, con el fin de poder abrir la puerta a más

estudios basados en la técnica interferométrica y realizar una gestión del riesgo integrada, esto se llevó a cabo por medio de un artículo publicado en el año 2010 en el Boletín de la Sociedad Colombiana de Geotecnia. (Blanco, Barreto y Ortiz, 2010)

Para los años 2008 a 2010 (Mora, Chaussard, Wdowinski y Cabral, 2013) con apoyo del Servicio Geológico Colombiano, realizaron un estudio que utilizó además de la técnica InSAR con imágenes ALOS, mediciones con equipos GPS del Proyecto GEORED. Por medio del estudio se logró identificar un patrón de subsidencia en la parte urbana de Bogotá y territorios agrícolas ubicados en los alrededores de la ciudad, zonas en las que según los datos GPS la tasa de subsidencia era de 4,5 cm/año. Como posibles causas del hundimiento urbano señalaron, con base en estudios de otros países, la extracción excesiva de agua de acuíferos, la extracción de hidrocarburos y la excavación superficial, entre otros.

En el 2010 los autores Fournier, Pritchard, and Riddick realizaron una investigación para conocer las deformaciones en los volcanes de Sudamérica y Centroamérica por medio de la técnica InSAR tomando como base 100 estudios de deformación previos en otras áreas del mundo para restringir la frecuencia, magnitud y duración de los eventos de deformación (Fournier, Pritchard, and Riddick, 2010). En el estudio, utilizaron la Banda L del satélite de radar ALOS para realizar la búsqueda sistemática de deformación de los volcanes en América latina a través de InSAR en el periodo de tiempo de 2006 a 2008, de igual forma combinaron las observaciones de InSAR para la banda L del satélite de radar ALOS y la banda C de los satélites de radar ENVISAT y ERS sobre los volcanes del sur de los Andes para aumentar la serie temporal de 2002 a 2008 y así mismo evaluar las capacidades de los diferentes radares, donde la banda L evidencio mejores resultados en áreas con mucha vegetación.

Las observaciones realizadas en la investigación anterior revelaron 11 áreas de deformación de los volcanes, algunas de ellas se encontraban inactivas, de igual forma se observó que el número total de volcanes deformantes en los Andes Centrales y meridionales ascendió a 15 a partir de las observaciones entre 1992 y 2008, dos de ellos se ubican en Colombia como lo son el Volcán Nevado del Ruiz y el Volcán Galeras.

Utilizando interferometría de radar InSAR, Parks y otros en el año 2011 realizaron un análisis de 100 interferogramas de volcanes jóvenes y activos en Colombia utilizando datos de radar de la banda L adquiridos durante el 2006 y 2009, lo cual mostró que la mayoría de los volcanes no se estaban deformando. Sin embargo, los interferogramas independientes mostraron un hundimiento promedio de 3 cm en el flanco noroeste del volcán Galeras coincidiendo con la erupción de enero del 2008 (Parks et al. 2011), se combinó la técnica InSAR con mediciones de campo y modelado de fuentes para determinar el origen, tamaño y ubicación de la subsidencia en el Galeras. Los resultados obtenidos con la técnica InSAR corroboran la hipótesis del almacenamiento de magma superficial debajo de Galeras y proporcionan la primera evidencia que puede vincularse a una erupción particular (Parks et al. 2011).

Entre los años 2007 y 2011 (Solano, Cabral, Wdowinski y Chaussard, 2014) realizaron un estudio InSAR con imágenes ALOS PALSAR de las principales áreas metropolitanas de Sur América, con el cuál lograron detectar subsidencias en las ciudades de Bogotá-Colombia y Sao Paulo-Brasil. Para realizar el estudio aplicaron un algoritmo basado en la técnica SBAS (Small Baseline Subset), técnica que permite la formación de interferogramas diferenciales con pequeños subsets de referencia temporal y espacial, así mismo contribuye a la disminución de distorsiones por medio de análisis de series de tiempo. El estudio también fue realizado en Lima y Buenos Aires, pero en estas ciudades no hubo hallazgos de subsidencias, por lo tanto sugirieron que este

fenómeno tiende a afectar zonas continentales, en lugar de zonas costeras debido posiblemente al bombeo de los acuíferos cercanos a las costas, hecho por el cual la explotación de estos no incurre en movimientos de tierra. Finalmente, la investigación quedó abierta para analizar las demás áreas metropolitanas de Sur América y seguir monitoreando la evolución de subsidencias en aquellas áreas densamente pobladas.

El estudiante (Bohórquez, 2014) de la Universidad de los Andes realizó su tesis de pregrado en Geociencias basándose en el análisis de subsidencias causadas por minas de carbón localizadas en cuatro municipios de Boyacá, por medio del método D-InSAR. Para su desarrollo utilizó nueve imágenes de RADAR SAR con las que se formaron ocho interferogramas, sin embargo, la coherencia de estos no fue muy alta debido a la gran cantidad de vegetación en la zona, por lo que los resultados localizaron deslizamientos irreales, además de problemas con el efecto de moteado en las imágenes. Estas distorsiones se disminuyeron por medio de la aplicación del filtro Gamma Map y la resta de valores de desplazamiento irreales. Finalmente, Bohórquez realizó un análisis puntual a una mina del municipio de Samacá en el que se logró determinar una tasa de subsidencia de 0,61 cm/mes y concluyó que la técnica D-InSAR presenta mejores resultados bajo unas condiciones establecidas, como lo son la escasez de vegetación.

Para el año 2015 en la Universidad de los Andes (Castillo, 2015) estudiante de pregrado en Geociencias, realizó su tesis aplicando InSAR con imágenes proporcionadas por la Agencia Espacial Canadiense del Sistema Volcánico Chiles - Cerro Negro en la frontera Colombo Ecuatoriana con el fin de analizar deformaciones en su superficie. Las imágenes del 17 de Mayo hasta el 1 de Noviembre de 2014 permitieron mediante la aplicación de modelos numéricos, obtener dos fuentes posibles de deformación en el sistema volcánico, una falla de desgarre con 2 Km de profundidad, 200 m de anchura y 3,5 Km de longitud y un dique con 200 m de profundidad,

2 Km de anchura y 3,5 Km de longitud. De acuerdo a los resultados presentados las deformaciones encontradas superficialmente podrían estar asociadas a actividad magmática o movimientos de la falla.

En el año 2015, Lundgren y otros realizaron un estudio en el volcán nevado del Ruiz utilizando interferometría de radar de apertura sintética InSAR con datos de RADARSAT-2 para calcular mapas de deformación relativa en la superficie y de esta forma conocer las ubicaciones, profundidades y volúmenes del depósito del magma para comprender los procesos previos a las erupciones y así mitigar el peligro en un futuro. Se usó por tanto los datos de desplazamiento de la línea de visión de InSAR para restringir los modelos inversos para la ubicación y los volúmenes de fuentes magmáticas, posteriormente se comparó las fuentes magmáticas calculadas y sus cambios inducidos de estrés con la sismicidad observada durante los últimos 3 años a partir de una serie temporal con datos ascendentes y descendentes de la banda C y banda L. Los datos InSAR fueron modelados a partir de una cadena de Markov de Monte Carlo (MCMC) para resolver los cambios en el volumen del depósito de magma.

La investigación anterior concluyo que las observaciones de los datos ascendentes y descendentes de RADARSAR-2 muestran que el volcán nevado del Ruíz tiene un patrón de inflación grande (> 20 km) que comenzó aparentemente a finales de 2011 hasta principios de 2012 y continúa hasta el momento de la realización del estudio a principios de 2015 a una tasa de LOS (línea de visión) de más de 3-4 cm / año. Los modelos de volumen de presión volcánica por su parte encontraron sismicidad a más de 14 km debajo de la superficie y centrados a 10 Km al sur este del volcán nevado del Ruíz (Lundgren et al. 2015).

El trabajo de grado realizado por Mario Angarita en compañía de PhD. Jillian Pearse y PhD. Jhon Sánchez de la Universidad de los Andes en Bogotá, plantea un modelo teórico de deformación

en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro utilizando el método de Elementos Finitos e interferometría de radar con imágenes RADARSAT-2 para el año 2014. En este estudio Angarita logró identificar una inflación en el flanco Sur del volcán Chiles con un máximo de 20 cm y una subsidencia al Este con un máximo de 5 cm aplicando InSAR, trabajó con dos modelos analíticos de inversión para ajustar el comportamiento de los datos y finalmente realizó un análisis de la posible fuente de la deformación dejando abierta la propuesta para continuar aportando a las labores de mitigación y prevención de los efectos de amenazas volcánicas en la región. (Angarita, 2016)

El estudio realizado en los volcanes de los andes septentrionales y centrales en el año 2016 por Morales, Amelung y Mothes mostró a partir de la técnica de interferometría de radar de apertura sintética utilizando datos satelitales de ALOS-1 durante los años 2007 y 2011, la deformación del suelo dependiente del tiempo sobre los volcanes de Colombia, Ecuador y Perú. Se detectaron deformaciones en o cerca de los volcanes Galeras, Reventador, Tungurahua, Guagua Pichincha, Sangay y Cerro Auquihuato, descubriendo deformaciones previamente indocumentadas en los últimos tres (Morales Rivera, Amelung, and Mothes, 2016). En volcanes como el Galeras en Colombia, la deformación se atribuye a los cambios de presión de los sistemas volcánicos mientras en volcanes como el Reventador en Ecuador, muestran subsidencias asociadas con depósitos de flujo. Los modelos realizados en la investigación, sugirieron fuentes de presión que se encuentran en profundidades de más o menos 1-6 Km de la superficie, lo que indicó en el estudio que la deformación medible dentro de los datos está restringida a las cámaras de magma bajas y los sistemas hidrotermales (Morales Rivera, Amelung, and Mothes, 2016).

Ebmeier y otros en el año 2016 realizaron una investigación en proximidad a los volcanes Chiles y Cerro Negro en la frontera entre Ecuador y Colombia que consistía en utilizar la técnica de radar

de apertura sintética interferométrica (InSAR) y realizar mediciones GPS durante octubre del 2014 para detectar los desplazamientos en la zona causados por terremotos de pequeña magnitud asociados a erupciones, los cuales a menudo mejoran el ascenso del magma. Las deformaciones fueron capturadas por cuatro interferogramas independientes de tres instrumentos satelitales: TerraSAR-X, CosmoSkymed y RADARSAT-2, los interferogramas se construyeron usando ISCE y el software GAMMA, las contribuciones topográficas a la fase del interferograma se corrigieron usando el DTM 30M SRTM y el desenrollamiento se llevó a cabo utilizando el algoritmo SNAPHU. De igual forma, se analizaron los datos GPS de la estación de la red tectónica continua IG COEC de Ecuador, las estaciones CHLS y COEC fueron utilizadas registrando desplazamientos entre el 1 y el 19 de octubre de 2014, lo cual indicó cambios de presión al sur de los volcanes.

Las observaciones realizadas en la anterior investigación en Chiles-Cerro Negro, fueron importantes porque demostraron que un terremoto desencadenado durante una agitación volcánica puede inhibir, en lugar de mejorar, el proceso que lo impulsa (Ebmeier et al. 2016).

El trabajo de grado realizado por Paola Hernández y Camilo Guerrero en la Universidad Distrital F.J.C durante el año 2017, consistió en la determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría de radar. Para el proyecto fue selecciona la zona de Bogotá y municipios aledaños por presentar mejores resultados en términos de coherencia, fase y resolución temporal , los interferogramas se construyeron usando el software SNAP, se utilizó como base el DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el desenrollamiento se llevó a cabo utilizando el algoritmo SNAPHU y para el proceso de revisión y evaluación del producto final obtenido (DEM) se utilizaron datos de la RED MAGNA ECO de las estaciones que se encontraban dentro de la zona de estudio y finalmente se comparó el DEM obtenido en el proyecto y el SRTM.

El DEM generado posee una resolución espacial de 14 metros y presenta mayor heterogeneidad en la distribución de los valores de altura que el modelo de referencia, sin embargo, el análisis estadístico arrojó unos resultados positivos, mostrando que a pesar de la irregularidad del DEM la correlación con el modelo de referencia es considerablemente alta (Hernández & Guerrero, 2017).

8. METODOLOGÍA

La metodología planteada contiene los procesos necesarios para llegar a la obtención del mapa de deslizamientos, los pasos para la realización de la metodología son los siguientes:

I. *Consulta de imágenes disponibles:* Se realizó la búsqueda de imágenes Sentinel-1 disponibles desde Octubre de 2014 hasta Agosto de 2016 (periodo en el que fueron consultados los eventos) las cuales cubren la totalidad de los municipios pertenecientes a la zona de estudio, esto se realizó por medio de la plataforma Open Hub del programa Copernicus de la ESA;

II. *Descarga de las imágenes disponibles* de la zona de estudio

III. *Verificación de línea base*: Este es uno de los procesos principales en la selección de imágenes para el procesamiento interferométrico, ya que cuanto mayor es la Línea Base Perpendicular entre las dos imágenes, definida esta como la distancia perpendicular entre las dos posiciones de toma del sensor, mayor es la diferencia de fase interferométrica, de esto también depende la coherencia y el aporte al ruido de fase del par interferométrico (ver marco teórico);

IV. *Selección de imágenes que conforman el stack*: Es la selección final de las imágenes de acuerdo a la verificación de la línea base y los valores de coherencia. De este proceso parten otros dos pasos, realización de series de tiempo y formación de pares interferométricos;

V. *Formación de los pares interferométricos* los cuales estarán conformados de acuerdo a la línea base y a la fecha de toma de las dos imágenes, se tuvo en cuenta en este paso que las imágenes fueran temporalmente cercanas y/o que coincidieran con algunos de los eventos registrados, esto para evitar problemas de coherencia en los interferogramas.

VI. *Realización del corregistro de las imágenes:* proceso que genera un archivo adicional en el que se combinan dos imágenes Sentinel 1 (par interferométrico) con el mismo sub-swath y polarización, usando las órbitas de cada producto y un DEM con el que realiza un re-muestreo por medio de un método de interpolación seleccionado, para obtener valores de elevación. (SNAP, 2015).

VII. *Formación del interferograma y eliminación de la tierra plana:* Se genera una imagen que proporciona información del cambio de fase entre el par interferométrico, a partir de esto se genera una representación por medio de franjas en valores relativos de 0 a 2π, las franjas son obtenidas al remover el efecto de la curvatura de la tierra, por lo que en este proceso el algoritmo realiza simultáneamente la estimación y remoción de la fase de tierra plana por medio de las órbitas y metadatos, esta fase está presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de referencia y es sustraída por medio de un estimador polinomial del interferograma, su sustracción es necesaria para obtener las diferencias de fase y analizar posibles movimientos en la superficie sin que la curvatura de la tierra influya en ello (SNAP, 2015). Al realizar el proceso de anterior, el interferograma queda referido a la topografía o a los desplazamientos del terreno y es posible realizar análisis posteriores. En este proceso también se crea una imagen de coherencia en la que se puede evaluar la calidad del interferograma.

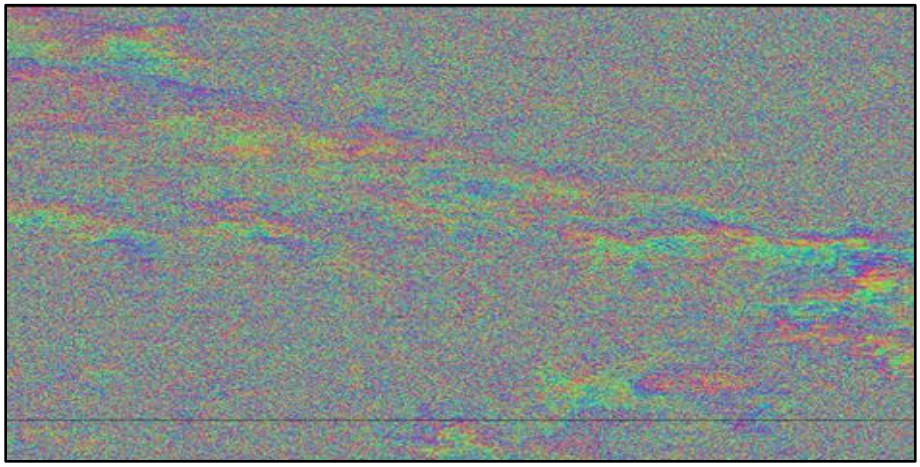


Ilustración 31. Interferograma zona de estudio sin filtros. Generado con el software SNAP.

VIII. *Aplicación del filtro Deburst:* ya que en las imágenes IW de Sentinel 1 - TOPSAR cada uno de los tres sub-swaths está compuesto por series de ráfagas o Bursts en inglés, en todos los sub-swaths de imágenes S1 se generan unas franjas horizontales que representan la división de las ráfagas. La remoción de estas se realiza con el filtro Deburst, el cual por medio del remuestreo de pixeles en una cuadrícula con tamaños en rango y azimut en común realiza la sincronización de las ráfagas, este proceso no representa pérdida de datos ya que el traslapo en azimut de la imagen es suficiente para tener continuidad del terreno. (SNAP 2014)

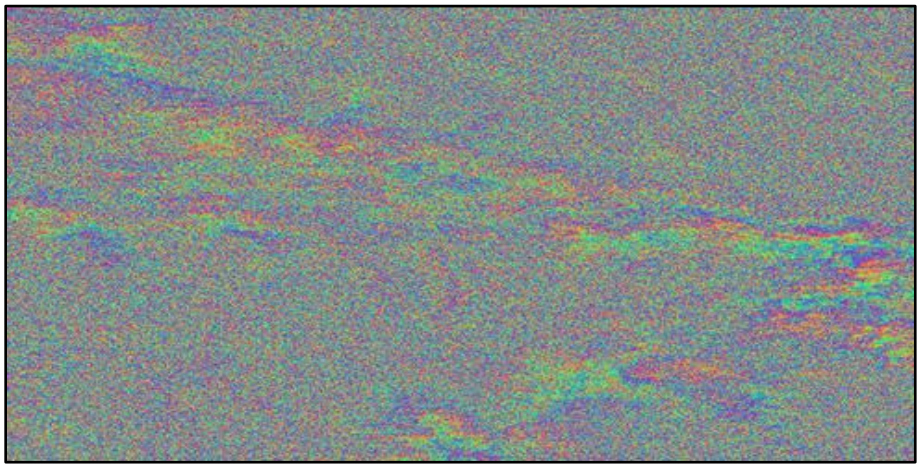


Ilustración 32. Interferograma zona de estudio después de aplicar el filtro Deburst. Generado con el software SNAP

IX. *Remoción de la Topografía (Generación del interferograma diferencial):* este algoritmo realiza dos procesos, primero "codifica por radar" el Modelo de Elevación Digital (DEM), proceso en el que se calcula la fase de referencia DEM y guarda una coordenada maestra o valor real por punto del DEM. Posteriormente se sustrae esta fase al interferograma complejo para poder realizar análisis de cambios en la superficie, el producto resultante es un Interferograma Diferencial en valores de Radar.

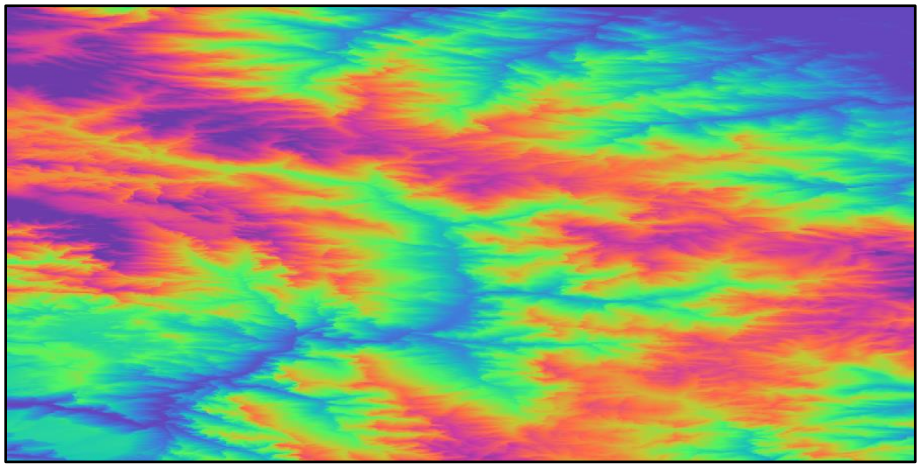


Ilustración 33. Remoción de la topografía de la zona de estudio. Generado con el software SNAP

X. *Filtro de Fase Goldstein:* el filtrado de fase es una técnica de preprocesamiento que reduce en gran medida los residuos en el último paso del desenrollamiento de la fase y mejora la precisión del desenrollamiento de fase. El método implementado en este operador es un algoritmo adaptativo no lineal propuesto por Goldstein y Werner en 1998. (SNAP, 2014)

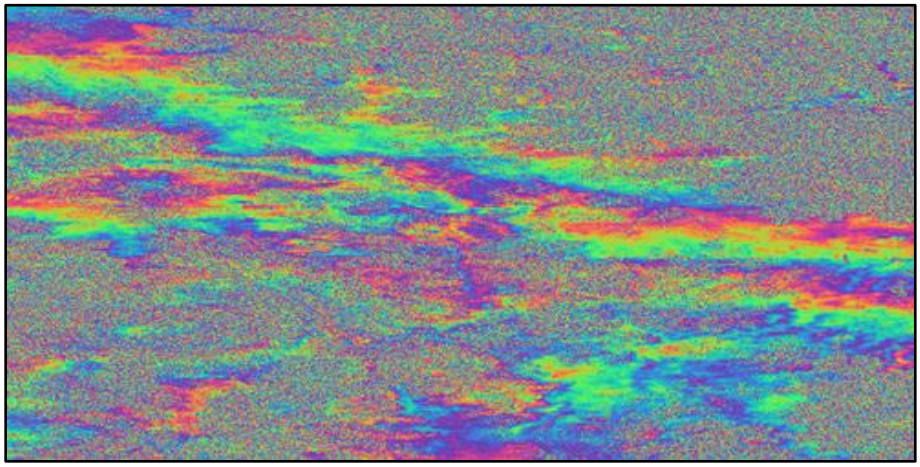


Ilustración 34. Interferograma zona de estudio después de aplicar el filtro Goldstein. Generado con el software SNAP

XI. *Desenrollamiento de la fase*: Proceso mediante el cual se obtienen valores absolutos de altura del interferograma (Blanco, 2004).

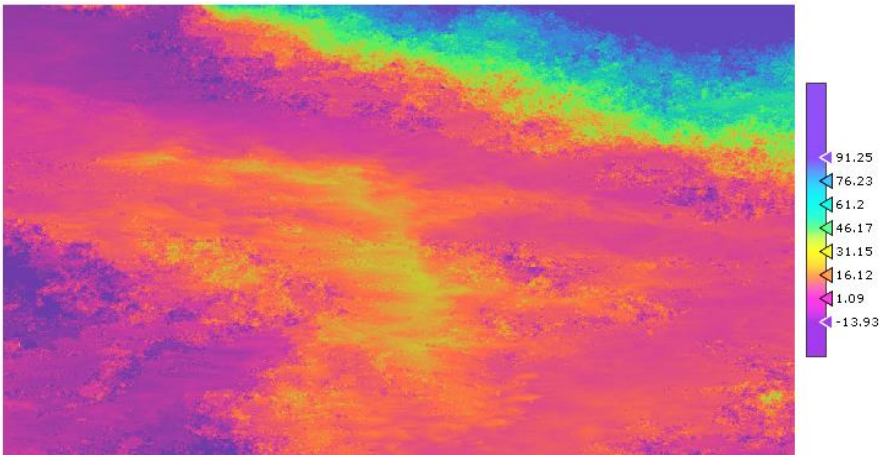


Ilustración 35. Interferograma desenrollado de la zona de estudio. Generado con el software SNAP y SNAPHU.

XII. *Comparación entre los interferogramas* diferenciales generados en el proyecto y con algunos de otras zonas para analizar la información en ellos proporcionada y evaluar su calidad.

XIII. *Obtención del producto final del procesamiento*: Se genera un mapa de deslizamientos después del desenrollamiento de la fase, proceso mediante el cual se obtienen valores absolutos de altura del interferograma (Blanco, 2004).

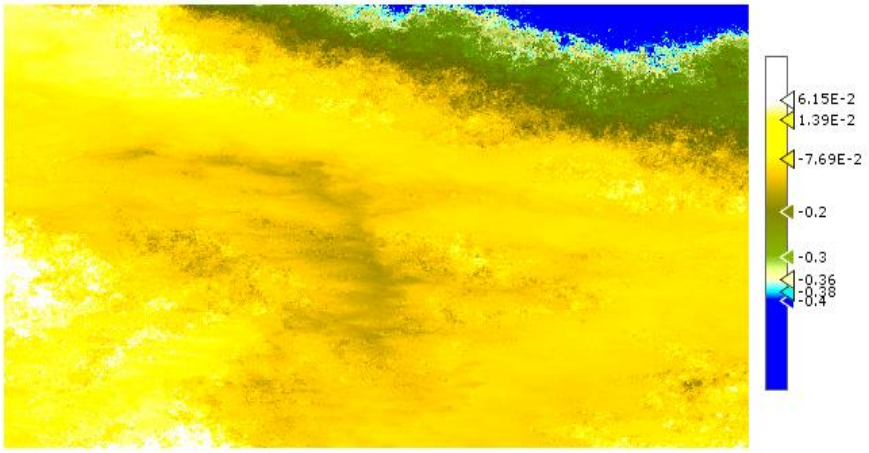


Ilustración 36. Mapa de desplazamientos (en metros) de la zona de estudio. Generado con el software SNAP

XIV. *Análisis por series de tiempo:* Este proceso se realizará con el algoritmo CCD del módulo de ERDAS Imagine para interferometría, proceso explicado anteriormente, del cual se pueden escoger diferentes productos para visualizar los cambios;

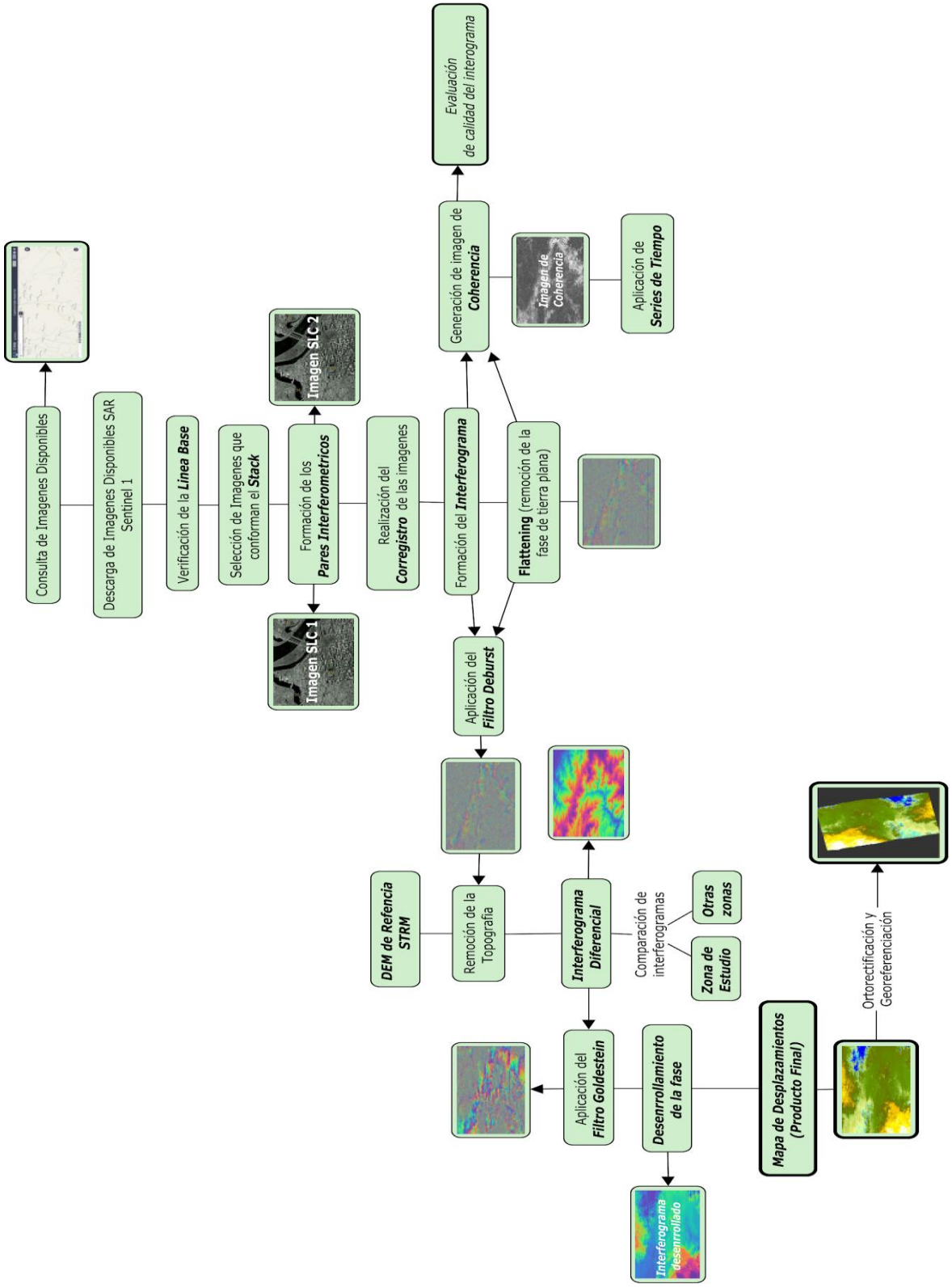


Ilustración 37. Metodología del proyecto. Fuente. Elaboración propia

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1.Imágenes disponibles Sentinel 1

La búsqueda y descarga de las imágenes Sentinel 1 se realizó por medio de la plataforma de la ESA y Copernicus, Copernicus Open Access Hub, en la que se configuraron como parámetros de búsqueda: el polígono de la zona de estudio, la misión Sentinel 1 con sus dos plataformas S1A y S1B, como tipo de producto Single Look Complex (SLC) y como modo de adquisición Interferometric Wide (IW).

A partir de esa búsqueda se escogieron 40 imágenes con órbita ascendente, de las cuales 18 fueron adquiridas por la plataforma S1A, 15 con polarización simple VV y 3 con doble polarización VV y VH. Las 22 restantes fueron adquiridas por la plataforma S1B y todas ellas son doble polarizadas VV y VH.

Tabla 4. Imágenes disponibles descargadas por medio de Copernicus Open Access Hub

Imágenes (Año/Mes/Día)			
2014 10 22 2014 11 15	2015 01 02 2015 01 26 2015 03 03 2015 03 27 2015 04 20 2015 06 07 2015 07 01 2015 07 25 2015 08 18 2015 10 05 2015 10 29	2016 02 02 2016 02 26 2016 03 21 2016 07 31 2016 09 05 2016 10 05 2016 10 29 2016 11 22 2016 12 16	2017 01 09 2017 02 02 2017 02 26 2017 03 10 2017 03 22 2017 04 03 2017 04 15 2017 04 27 2017 05 09 2017 05 21 2017 06 02 2017 06 14 2017 06 26 2017 07 08 2017 07 20 2017 08 01 2017 08 13 2017 08 25

9.1.1. Selección de imágenes que conforman el stack de acuerdo al análisis de calidad interferométrica

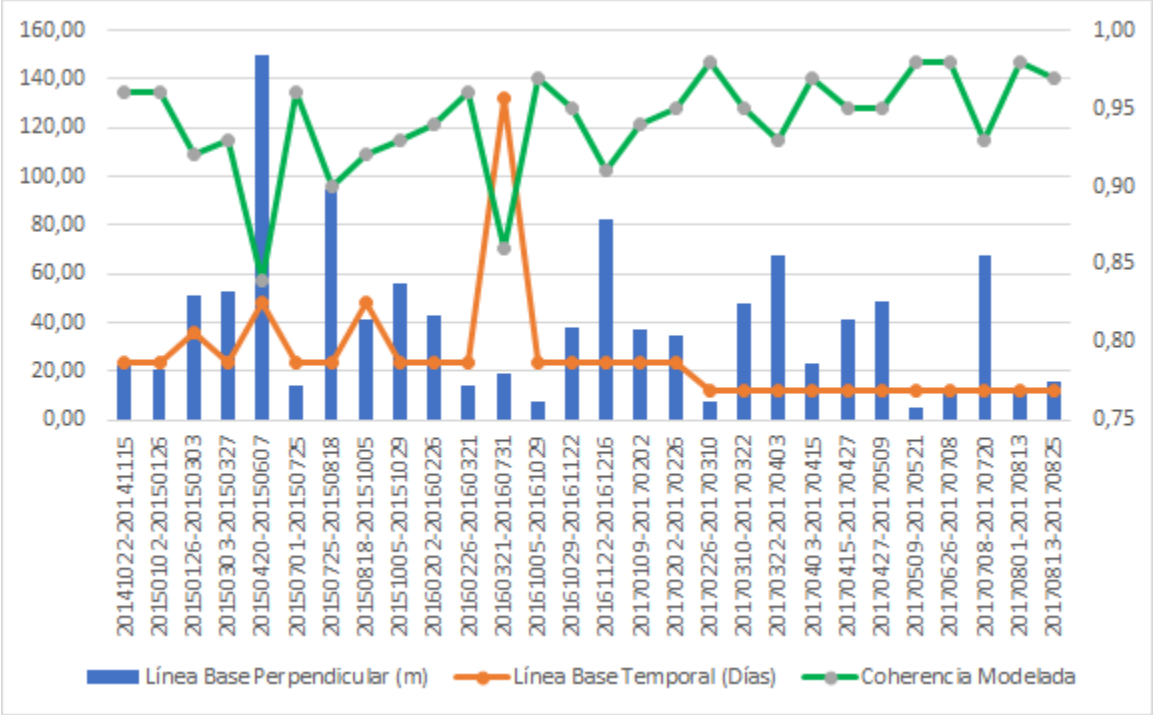
Para hacer la selección de los interferogramas que conforman el stack, se realizó un análisis de calidad en términos de los parámetros: Coherencia, Línea Base Perpendicular (LBP) y Línea Base Temporal (LBT), adicionalmente la calidad visual de los mismos fue muy importante, debido a que en algunos casos los interferogramas tenían una LBT bastante grande pero aun así mostraban muchos patrones interesantes de franjas que se analizaron posteriormente. De acuerdo a los parámetros mencionados se escogieron 28 interferogramas de los 40 generados, con los cuáles se realizó el análisis

En la *Gráfica 1* se puede ver que los mejores interferogramas en cuanto a coherencia (Línea verde) presentan LBP muy pequeñas, este es el caso, por ejemplo de los interferogramas del 5 al 29 de Octubre de 2016, del 26 de Febrero al 10 de Marzo de 2017 y del 9 al 21 de Mayo de 2017, que presentan LBP con valores de 7,69 m, 7,59 m y 5,08 m respectivamente, además si se tiene en cuenta la LBT se puede ver que corresponden a los valores más pequeños, aunque en general el promedio en estos datos es entre 12 y 24 días. Se puede observar acorde con lo anterior que en general para estos interferogramas la coherencia presenta sus picos más altos cuando existen valores de LBT pequeños, que para este stack están alrededor de los 15 m o menos.

En la *Gráfica 1* también se ve un cambio abrupto en los datos del interferograma del 20 de Abril al 7 de Junio de 2015, lo cual se debe a valores muy grandes de LBP (150,07 m) y LBT (48 días), que nos indican que para un interferograma creado a partir de imágenes Sentinel 1, la calidad puede ser muy baja y presentará pérdida de coherencia; otro ejemplo que nos demuestra la importancia de que estos tres factores estén en armonía, es el interferograma del 21 de Marzo al 31 de Julio de

2016 que a pesar de tener una línea base perpendicular de 18,94 m, tiene una línea base temporal de 132 días y por lo tanto presenta gran pérdida de coherencia.

En términos generales los interferogramas del stack presentan valores entre aceptables y buenos, y el análisis en los patrones de franjas para cada uno muestra una alta correlación con respecto a datos de clima, cobertura, geomorfología y reportes de deslizamientos entre los años 2000 y 2017.



Gráfica 1. Ubicación de la zona de estudio en el Cañón del Chicamocha. Fuente. Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que la (ESA, 2013) habla de valores definidos de línea base perpendicular y temporal entre los cuales los interferogramas presentan sus mejores resultados, sin embargo, estos valores aún no se han estipulado para los productos de Sentinel 1, ya que estos productos son relativamente recientes y la mayoría de estudios interferométricos se han realizado con imágenes ERS y ALOS PALSAR. Hecho por el cual el análisis aquí presentado tendrá una discusión posterior y posiblemente será el inicio de la caracterización para trabajar interferometría con imágenes Sentinel 1.

9.2.Interpretación y análisis de los interferogramas

Para realizar la interpretación de los interferogramas es importante tener en cuenta dos cosas: la dirección de paso del Satélite, es decir, Ascendente o Descendente y las órbitas de las dos imágenes con las que se genera el interferograma, ya que en caso de que las condiciones de toma no sean las mismas, es decir, que las imágenes no sean de la misma órbita, desde el proceso de corregistro se generará un error al no coincidir el área de una imagen con la de la otra. Sin embargo, es posible generar un interferograma con una imagen con dirección de paso descendente y otra ascendente (sólo en algunos softwares, en el caso de SNAP no es posible), siempre y cuando tengan un área en común, el problema de hacerlo de esa manera es que la coherencia estará totalmente perdida debido a que, por ejemplo, el valor de Línea Base Perpendicular será muy grande y la línea de visión o LOS, por sus siglas en inglés, será totalmente diferente. Esto básicamente se refiere al hecho de que el satélite pasa y captura la escena con una perspectiva y al cambiar de órbita o de dirección la segunda escena será tomada desde otra perspectiva y por tanto al crear el interferograma, todo se verá como un cambio.

Para entender mejor estos conceptos, en la *Ilustración 38* se muestra la órbita ascendente y descendente que pasa por la zona de estudio y su correspondiente línea de visión (LOS). Las 40 imágenes utilizadas en este proyecto fueron tomadas mientras el satélite Sentinel 1, realizaba su paso por la zona de estudio en dirección ascendente en la órbita número 77.

Por otro lado, es importante mencionar que los movimientos del terreno como remociones en masa, terremotos y demás, causan cambios en la superficies del suelo en tres dimensiones (este-oeste, norte-sur, arriba-abajo), sin embargo la presente técnica detecta desplazamientos unidimensionales en la línea de visión del satélite, por lo que es imposible determinar la dirección en la cual se movió la superficie a partir de un solo interferograma, sin embargo para tener algún

indicio de la dirección es preciso obtener el interferograma para una misma fecha en órbita ascendente y descendente. Así mismo para tener certeza de la dirección de un desplazamiento es preciso realizar la comparación de datos D-InSAR con datos de medición GPS tomados en la zona de interés.

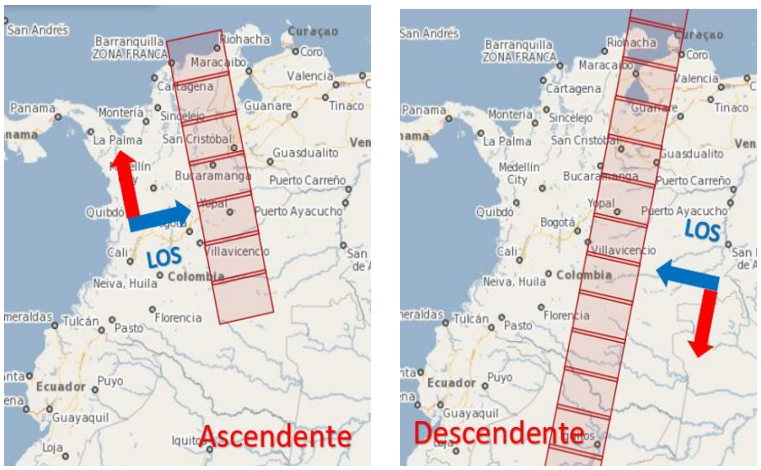


Ilustración 38. Direcciones de paso y LOS de Sentinel 1 en la zona de estudio. Fuente. Copernicus Open Access Hub, ESA. Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, un interferograma expone el deslizamiento sólo en la dirección donde el suelo se mueve hacia el satélite o lejos de él, es decir en dirección opuesta, por tanto, la misma deformación puede presentarse diferente en un interferograma de órbita ascendente que en uno de órbita descendente, como se muestra a continuación:

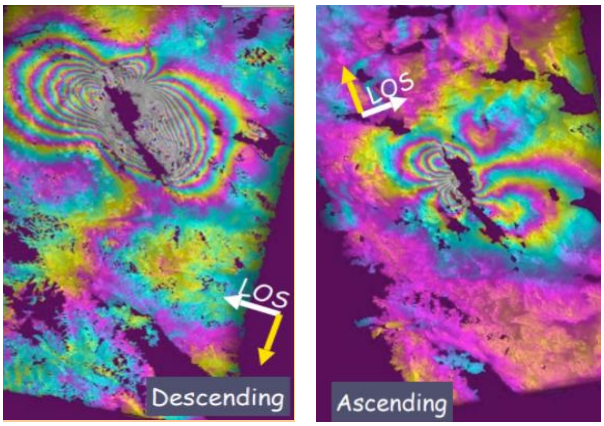


Ilustración 39. Diferencia en interferogramas en relación con su dirección de paso y LOS. Terremoto en Bam - Irán, 2003. Fuente. (Pritchard & Fielding, 2013)

Por último, es importante mencionar que la frecuencia con la que se presentan las franjas en una zona puede obedecer a dos razones: la primera relacionada con la línea de visión y la segunda con los movimientos del terreno. (1) Si la línea de visión cambia lejos del satélite las franjas son menos frecuentes y se ven más anchas, o si la línea de visión cambia cerca del satélite las franjas se presentarán con mayor frecuencia y delgadas; (2) Si se identifican cambios en el terreno: debidos a un movimiento suave, las franjas serán anchas, pero si se presenta un movimiento brusco, las franjas serán más delgadas y continuas. Lo anterior se muestra en la *Ilustración 40*

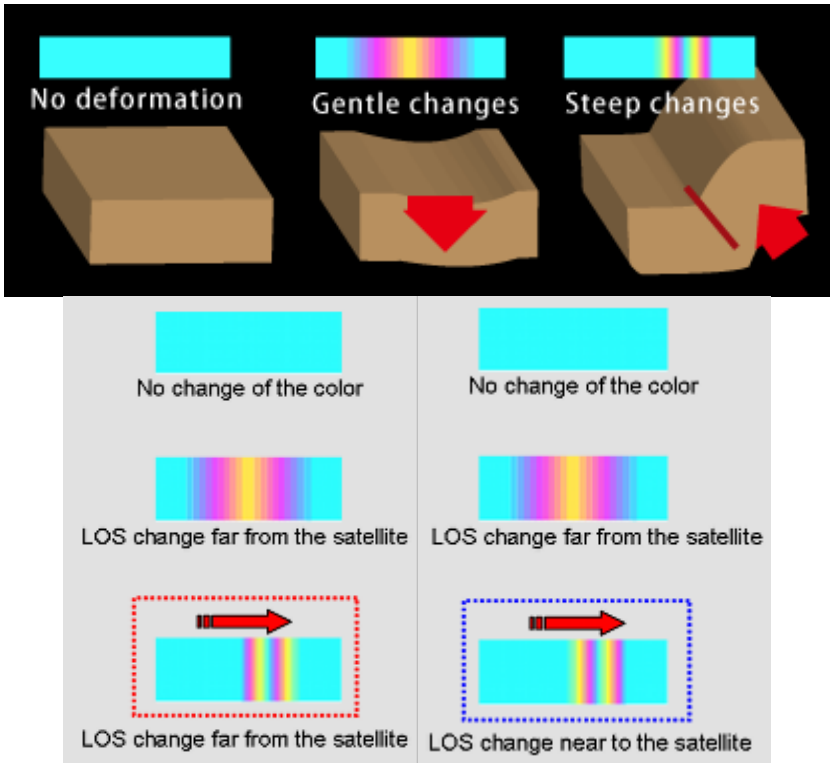


Ilustración 40. Visualización de cambios en el terreno, representados en interferogramas de órbita ascendente (rojo) y descendente (azul). Fuente: (Geospatial Information Authority of Japan, 2004)

9.2.1. Análisis complementario de fallas geológicas presentes en la zona de estudio.

En varios de los interferogramas escogidos como mejores en términos de coherencia, definición de franjas (interferograma enrollado) y menor presencia de ruido en la zona, se muestra un constante patrón de franjas que se extiende en el territorio, principalmente en la parte central de la

zona de estudio durante el tiempo de observación establecido por este proyecto, por lo que fue preciso realizar un análisis de la geología en la zona, específicamente de las fallas geológicas presentes en la misma, para así identificar si existe relación de dicho patrón con estas últimas. Las fallas relacionadas con la zona de estudio de acuerdo con el atlas geológico de Colombia 2015 del SGC a escala 1:500.000, son las siguientes:

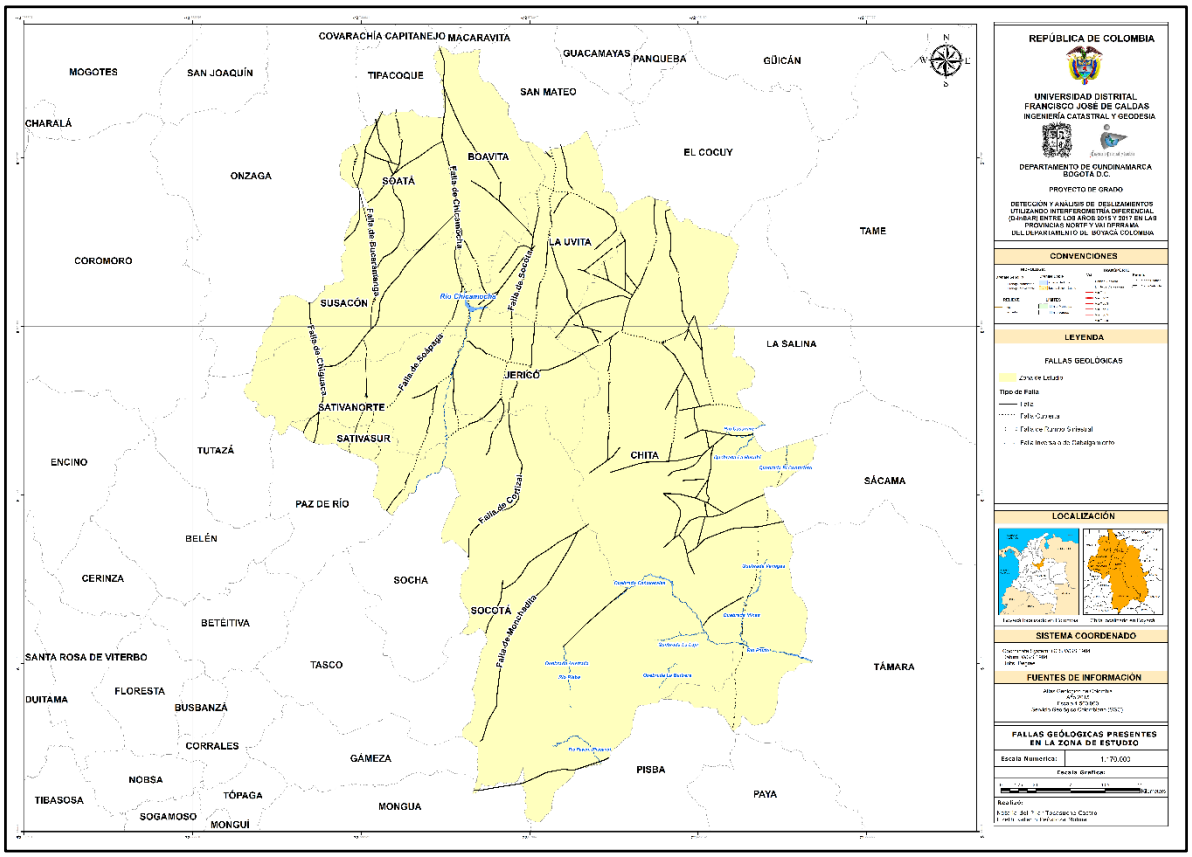


Ilustración 41. Fallas presentes en la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el Atlas Geológico Colombiano 2015, SGC.

De acuerdo con el mapa anterior, las principales fallas geológicas identificadas en la zona de estudio corresponden a la falla de Chicamocha, Socotá, Soápaga, Bucaramanga, Monchadita, Cortizal, y Chigüaca. Así mismo se identifican un conjunto de fallas menores que también tienen influencia en la zona de estudio pero que el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el Atlas

Geológico no les tiene definido un nombre. Las fallas anteriormente mencionadas se clasifican en los siguientes tipos de fallas:

- ***Falla definida:*** Este tipo de fallas se generan por tensión horizontal, las fuerzas inducidas en la roca son perpendiculares al acimut de la falla (línea de ruptura superficial), y el movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal (Instituto Nacional de Prevención Sísmica-INPRES, n.d.). El bloque que se encuentra por encima del plano de la falla se denomina techo, y se desliza hacia abajo; mientras que el bloque que se encuentra por debajo del plano de la falla se denomina piso, y asciende (Instituto Nacional de Prevención Sísmica -INPRES, n.d.).

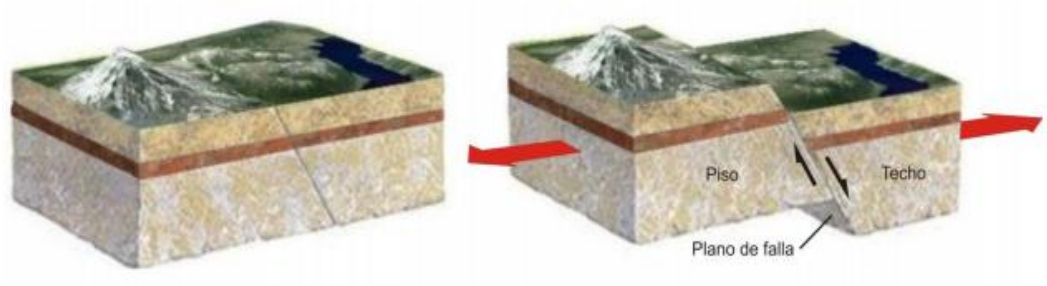


Ilustración 42. Esquema de Falla definida o normal. Fuente. Instituto Nacional de Prevención Sísmica – INPRES, Argentina.

En la zona de estudio, la falla de Socotá tiene este tipo de clasificación en los municipios de Jericó, La Uvita y Socotá, siendo esta falla clasificada en su mayoría como definida; la falla de Soápaga presenta esta clasificación en los municipios de Susacón y Sativanorte; la falla de Monchadita es clasificada en su totalidad como definida; la falla de Cortizal la cual se ubica en el municipio de Socotá tiene este tipo de clasificación en casi la totalidad de su extensión; la falla de Chigüaca presenta esta clasificación en los municipios de Sativasur, Sativanorte y Susacón; la falla de Chicamocha se clasifica como definida en los municipios

de Susacón, Soatá y Boavita. Adicionalmente un conjunto de fallas menores ubicadas en la zona de estudio también presenta esta clasificación.

- ***Falla Cubierta:*** Estas fallas presentan la misma definición de la falla definida, sin embargo, de acuerdo con la red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica estas se encuentran ocultadas por coladas de lava o sedimentos, por lo que las fracturas quedan enterradas y no afloran en la superficie. Estas fallas ciegas pueden tener en la corteza ciudades, bosques, mares o desiertos.

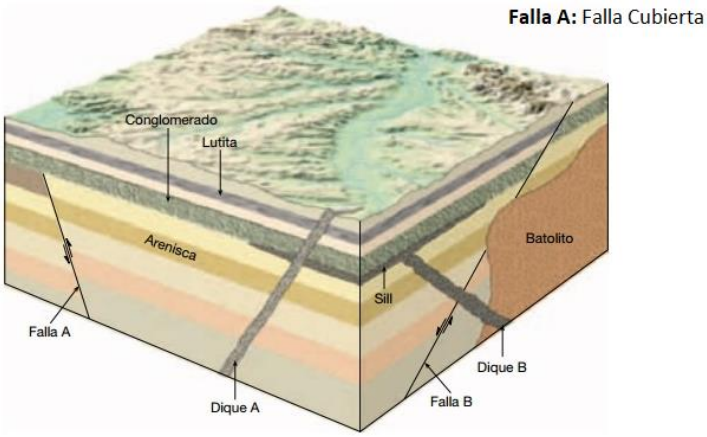


Ilustración 43. Esquema de Falla Cubierta. Fuente. (Tarbuck & Lutgens, 2001)

En la zona de estudio, la falla de Socotá presenta este tipo de clasificación en los municipios de Jericó y La Uvita; la falla de Soápaga se clasifica como cubierta en los municipios de Sativanorte y Susacón; la falla de Cortizal tiene esta clasificación en una pequeña parte ubicada en el municipio de Socotá; la falla de Chigüaca en el municipio de Susacón presenta en su extensión una pequeña parte clasificada como cubierta; la falla de Chicamocha en los municipios de Jericó, Socotá y Susacón se encuentra clasificada como cubierta y coincide con el río Chicamocha en esta zona, lo cual indica que la falla oculta tiene en la corteza la presencia de este afluente. Así mismo, un conjunto de fallas menores

ubicadas en la zona de estudio principalmente en los municipios de La Uvita, Jericó y Chitá presentan esta clasificación.

- ***Falla de Rumbo Sinistral:*** De acuerdo con la red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica en estas fallas predomina el desplazamiento horizontal, paralelo a la dirección de la falla, muchas de estas fallas presentan trazas visibles, como puede ser el cambio de dirección del cauce de un río o una cerca. Las fallas de rumbo siniestral poseen un movimiento hacia la izquierda esto viendo la traza de la falla de frente.

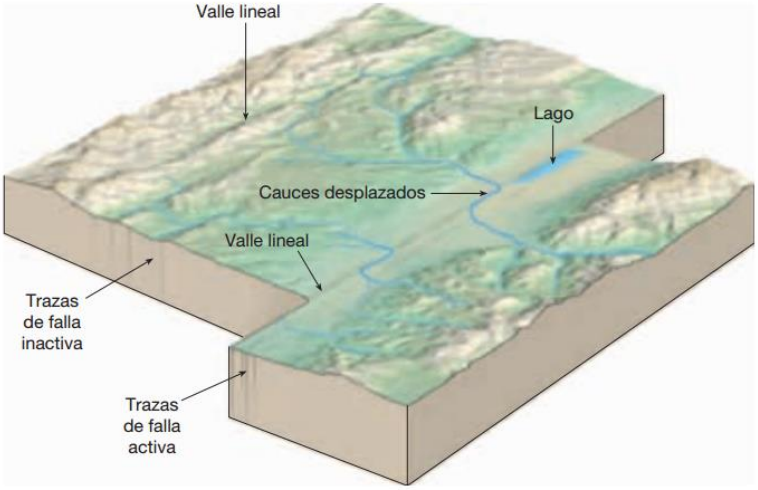


Ilustración 44. Esquema Falla de Rumbo. Fuente. (Tarbuck. & Lutgens, 2001)

La falla de Bucaramanga la cual se ubica en los municipios de Sativanorte, Sativasur, Soatá y Susacón se encuentra clasificada en toda su extensión como falla de rumbo sinistral.

- ***Falla inversa o de Cabalgamiento:*** Este tipo de fallas se genera por compresión horizontal, el movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal, así el bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso (Instituto Nacional de Prevención Sísmica -INPRES, n.d.). Cuando las fallas

inversas presentan un buzamiento (inclinación) inferior a 45º, éstas también toman el nombre de cabalgamiento (Instituto Nacional de Prevención Sísmica -INPRES, n.d.).

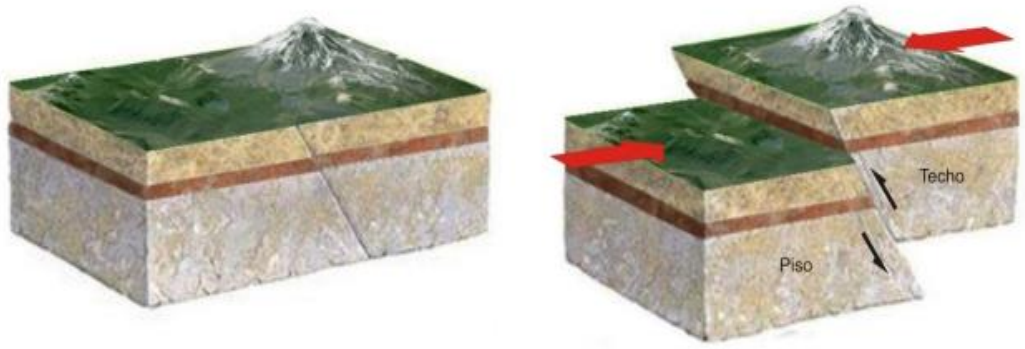


Ilustración 45. Esquema de falla inversa o de cabalgamiento Fuente. Instituto Nacional de Prevención Sísmica –INPRES, Argentina

En la zona de estudio, la falla de Soápaga es clasificada como inversa en los municipios de Sativanorte y Sativasur, de igual forma un pequeño conjunto de fallas menores en el municipio de Chitá también presentan esta clasificación.

9.2.2. Análisis anual por patrones de Franjas interferométricas

El análisis se realizó anualmente haciendo una comparación de las fallas geológicas de la zona (descritas anteriormente) mediante una superposición con los interferogramas enrollados, para así identificar los patrones de franjas que coinciden con las fallas geológicas presentes. Así mismo se pretende hacer una identificación en los interferogramas de los lugares donde existe dicha correlación y analizar los desplazamientos que pudieron haberse ocasionado a largo de las principales fallas geológicas y sus zonas inmediatamente aledañas.

I. Año 2015

Durante el año 2015 se evidenció una alta correlación de franjas interferométricas y fallas geológicas, específicamente con las fallas del Chicamocha, Socotá y Soápaga, aunque esta última

en menor proporción. Sin embargo, esta relación no se presenta a lo largo de toda la falla en todos los casos, sino en zonas específicas que se describirán a continuación:

Falla del Chicamocha:

1. En el interferograma del 2 al 26 de Enero se presenta una alta correspondencia de franjas verticales que definen muy bien toda la presencia de la falla del Chicamocha en medio de los municipios que conforman la zona de estudio. Es así como inicia en el límite norte del municipio de Boavita y llega hasta la parte sur del municipio de Sativasur;
2. En el interferograma del 26 de Enero al 3 de Marzo, se ve una correspondencia en el límite noroccidental del municipio de Boavita que colinda con Soatá y en el costado occidental de la falla que reposa sobre Sativanorte y Sativasur;
3. En el interferograma del 1 al 25 de Julio se presenta correspondencia a lo largo de todo el límite noroccidental del municipio de Boavita;
4. En el interferograma del 25 de Julio al 18 de Agosto se puede identificar una alta correspondencia a lo largo del límite entre los municipios de Jericó, Sativanorte, Socotá y Sativasur;
5. Este patrón también aparece en los interferogramas del 18 de Agosto al 5 de Octubre y del 5 al 29 de Octubre, pero únicamente en la zona alta de límite municipal entre Boavita y Soatá, la zona media de límite entre Boavita y Susacón y casi todo el límite entre Jericó y Sativanorte.

Falla de Socotá y Soápaga:

1. El interferograma del 2 al 26 de Enero se ve una alta correspondencia de patrones con la Falla de Soápaga a lo largo de su paso por los municipios de Susacón y Sativanorte; así mismo se presenta para la falla de Socotá en su paso por el municipio de la Uvita,

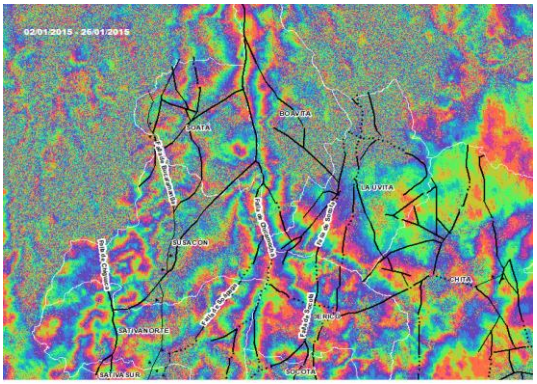
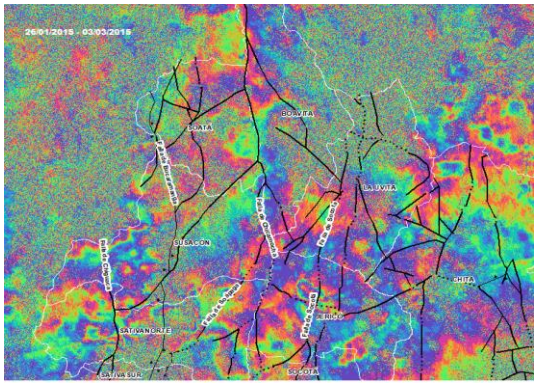
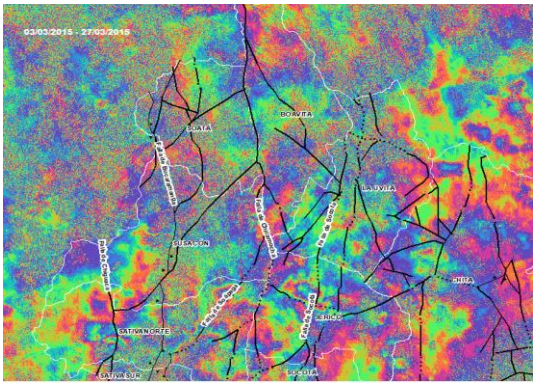
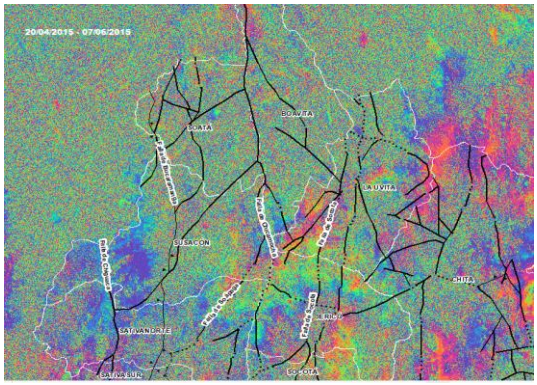
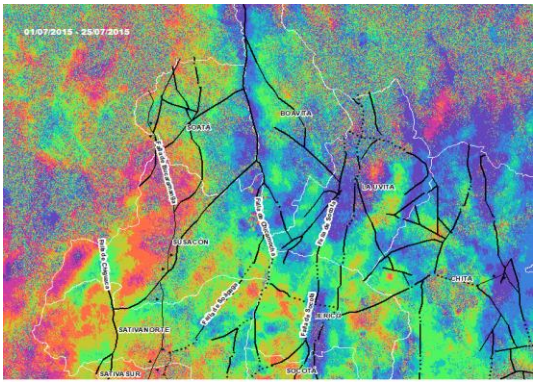
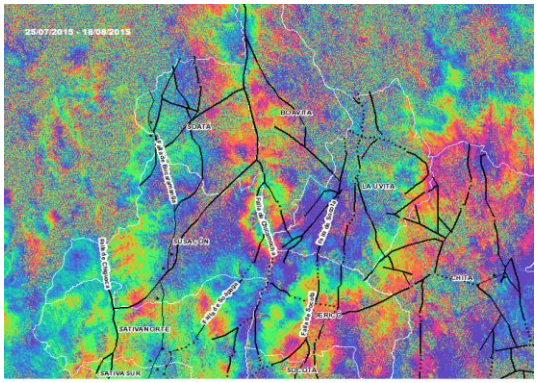
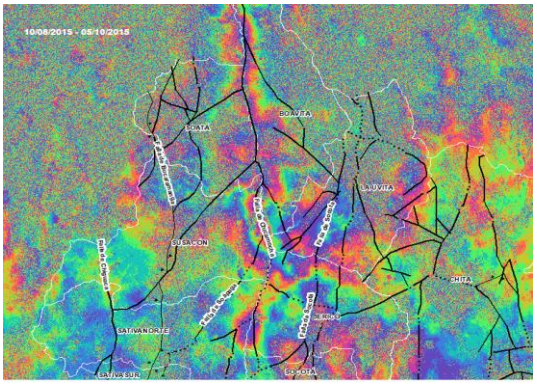
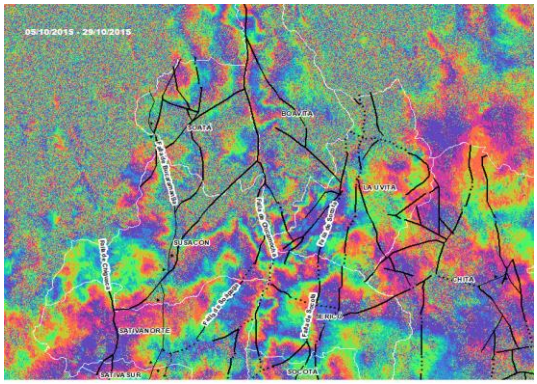
específicamente en su cruce con otras fallas locales, esto también ocurre en los interferogramas del 26 de Enero al 3 de Marzo y del 3 al 27 de Marzo, con la falla de Socotá;

2. La falla de Socotá corresponde a un patrón de franjas grande en el interferograma del 1 al 25 de Julio, en su paso del municipio de la Uvita al municipio de Jericó;
3. En los interferogramas del 25 de Julio al 18 de Agosto y del 5 al 29 de Octubre se evidencia un patrón de franjas amplias que delinea de manera cercana la falla de Socotá en su camino por el municipio de Jericó.

Otros patrones interesantes fueron:

1. En los interferogramas del 2 al 26 de Enero, 26 de Enero al 3 de Marzo y del 5 al 29 de Octubre, se presenta un patrón constante en la zona noroccidental del municipio de Soatá en la que se unen cuatro fallas locales definidas como cubiertas;
2. En los interferogramas del 2 al 26 de Enero y del 26 de Enero al 3 de Marzo, se presenta de manera marcada una continuidad de franjas bastante seguidas que coinciden con la falla cubierta de Cortizal en la zona occidental del municipio de Socotá;
3. En todos los interferogramas del año 2015 se repite un patrón marcado en la parte oriental del municipio de Chita que coincide con la ubicación de cinco fallas locales que se unen por diferentes costados;
4. En siete de los ocho interferogramas del 2015, exceptuando el del 1 al 25 de Julio, se presenta un patrón repetitivo en la zona límite entre los municipios de la Uvita y Jericó, que no corresponde totalmente con alguna falla geológica, pero en la que sí atraviesan cuatro fallas de manera vertical, entre ellas la de Socotá.

Tabla 5. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2015

Correlación de Fallas con interferogramas enrollados-2015	
	
	
	
	

II. Año 2016

Para el año 2016, de manera similar al año 2015, se pudo evidenciar una alta correlación de franjas con fallas geológicas como la del Chicamocha, Socotá y Soápaga principalmente, y de manera secundaria patrones aislados que pueden ser interesantes de analizar.

A continuación, se presentarán los interferogramas con mayor correspondencia a la falla del Chicamocha:

1. En el interferograma del 2 al 26 de Febrero se ve una alta correspondencia de franjas con la parte baja de la falla del Chicamocha dentro de los municipios de Jericó y Socotá;
2. En el interferograma del 26 al 21 de Marzo se presenta una correlación bastante representativa a lo largo de la falla desde la parte media del límite entre los municipios de Boavita y Soatá, hasta el municipio de Socotá;
3. Para el interferograma del 29 de Octubre al 22 de Noviembre se evidencia el patrón de franjas partiendo desde el municipio de Boavita hasta Jericó;

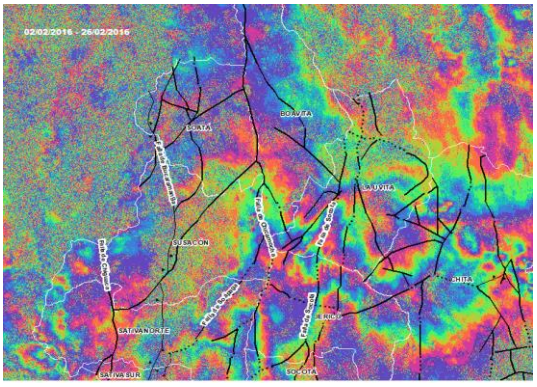
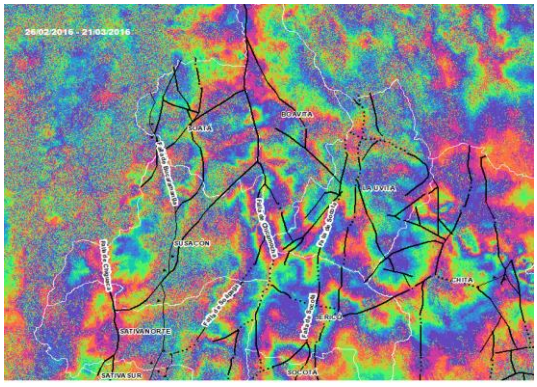
En relación a las Fallas de Socotá y Soápaga los siguientes fueron los interferogramas que presentaron patrones importantes:

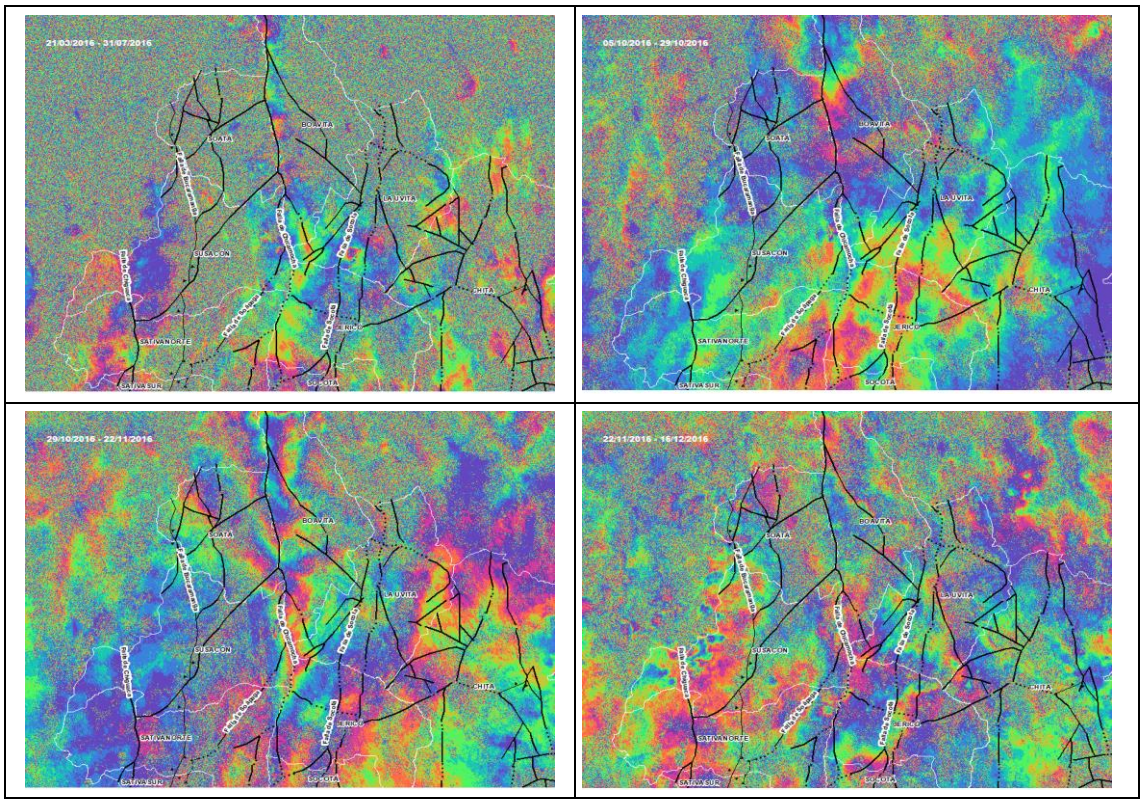
1. En los interferogramas del 2 al 26 de Febrero y del 26 de Febrero al 21 de Marzo, existen patrones de franjas que coinciden a lo largo de toda la falla de Soápaga, que corresponde a su paso por los municipios de Susacón, Sativanorte y Sativasur, lo mismo sucede con la falla de Socotá en los municipios de la Uvita y Jericó;
2. En el interferograma del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre, se ve correlación de la falla de Socotá en su parte baja correspondiente al municipio de Jericó.

Otros patrones importantes se enuncian a continuación:

1. En los interferogramas del 26 de Febrero al 21 de Marzo, del 29 de Octubre al 22 de Noviembre y del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre, se evidencia un comportamiento constante de franjas que coincide con la existencia de cinco fallas locales dentro del municipio de Soatá, iniciando en su límite al norte por todo el centro del municipio y dirigiéndose hacia Susacón.
2. En los interferogramas del 26 de Febrero al 21 de Marzo, del 29 de Octubre al 22 de Noviembre y del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre, se presenta un patrón marcado alrededor de una falla pequeña que se desprende de la falla del Chicamocha y se dirige hacia el municipio de Boavita, presentando cruce con una falla que se desprende de la falla de Socotá, pero que se conduce hacia el occidente.
3. Similar al año 2015, se ve un patrón en el límite municipal entre Jericó y la Uvita, esta vez en los interferogramas del 2 al 26 de Febrero, del 26 de Febrero al 21 de Marzo, del 5 al 29 de Octubre y del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre.

Tabla 6. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2016.

Correlación de Fallas con interferogramas enrollados-2016	
	



III. Año 2017

Durante el año 2017 se presentó correlación entre las franjas de los interferogramas y las fallas presentes en la zona de estudio, principalmente con las fallas de Chicamocha, Soápaga y Socotá. Los siguientes interferogramas presentaron correspondencia entre los patrones de franjas y la falla del Chicamocha en las zonas mencionadas a continuación:

1. Los interferogramas del 9 al 26 de Enero y 3 al 15 de Abril cerca al cruce de la falla de Chicamocha con la falla de Soápaga donde se intersecan los municipios de Susacón, La Uvita y Jericó;
2. El interferograma del 2 al 26 de Febrero en el cruce de los municipios Jericó, Sativanorte y Susacón;
3. En el interferograma del 22 de Mayo al 3 de Abril presenta patrones de franjas definidos, los cuales coinciden a lo largo de la falla del Chicamocha en la zona de estudio;

4. En el interferograma del 27 de Abril al 9 de Mayo en la intersección del municipio de Jericó y Sativanorte, a pesar de presentar algo de ruido;
5. En el interferograma del 1 al 13 de Agosto en la intersección de los municipios de Jericó y Sativanorte;
6. En el interferograma del 13 al 25 de Agosto al sur de la intersección del municipio de Soatá y Boavita.

Por otro lado, los interferogramas mencionados a continuación muestran una clara relación entre los patrones de franjas y las fallas geológicas de Soápaga y Socotá:

1. El interferograma del 22 de Mayo al 3 de Abril presenta patrones de franjas definidos, los cuales tienen correlación con la falla de Soápaga y Socotá, los patrones que coinciden con la falla de Soápaga se ubican en los municipios de Susacón y Sativanorte y con la falla de Socotá en la intersección entre el municipio de Jericó y La Uvita;
2. Los interferogramas del 9 de Enero al 2 de Febrero, 2 de Febrero al 26 de Febrero, 27 de Abril al 9 de Mayo y 13 al 25 de Agosto presentan relación entre las franjas y la falla de Socotá al sur del municipio de La Uvita;
3. En los interferogramas del 26 de Junio al 8 de Julio y 8 al 20 de Julio se presenta un patrón similar de franjas que coincide con la falla del Chicamocha, Soápaga y Socotá.

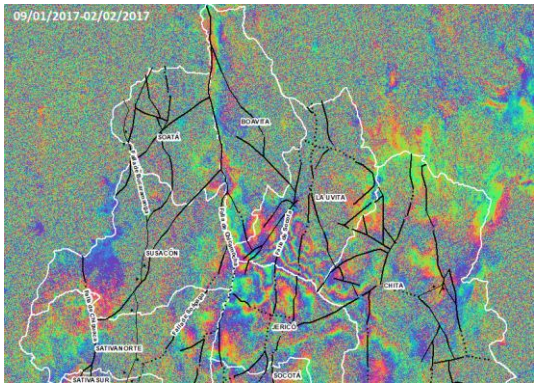
De igual forma los siguientes interferogramas presentan correlación de franjas en los lugares donde se intersecan fallas principales como la del Chicamocha con fallas menores, estas últimas se unen con fallas principales como la de Socotá y Bucaramanga:

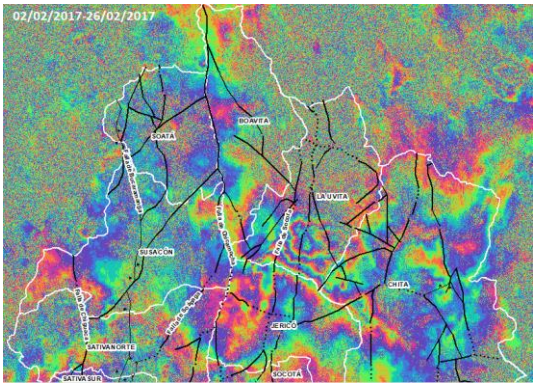
1. El interferograma del 10 al 22 de Marzo presenta patrones de franjas en la intersección de la falla de Chicamocha y la falla clasificada como cubierta y definida que conecta con la falla de Socotá e involucra a los municipios de Susacón, Jericó y Sativanorte;

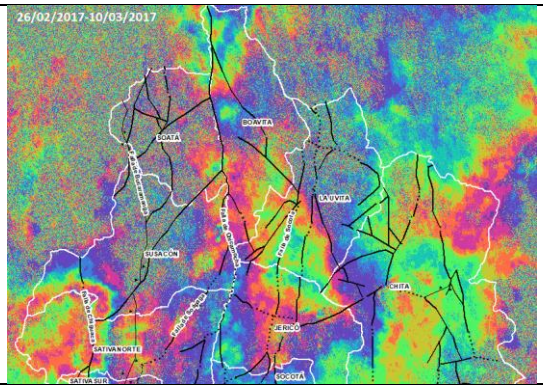
2. El interferograma del 1 al 13 de Agosto presenta relación entre los patrones de franjas y la falla del Chicamocha en la intersección de los municipios de Boavita, La Uvita y Susacón donde se interseca la falla del Chicamocha y la falla definida que conecta con la falla de Bucaramanga, este patrón también se presenta en el interferograma del 15 al 27 de Abril con un poco de ruido y en el interferograma del 3 al 15 de Abril con menor intensidad.
3. El interferograma del 9 de Enero al 2 de Febrero presenta correlación de franjas en la intersección de la falla del Chicamocha con una falla menor al norte del municipio de Susacón en el cruce con el municipio de Boavita.

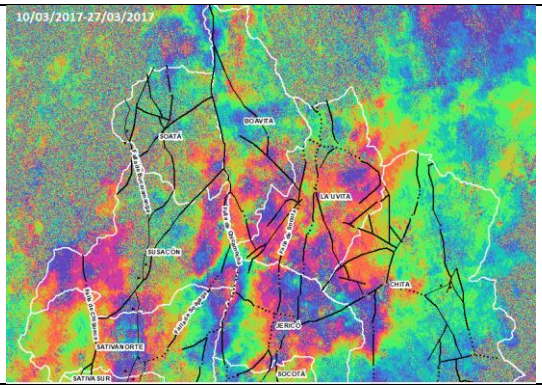
Tabla 7. Correlación de fallas con los interferogramas enrollados, 2017.

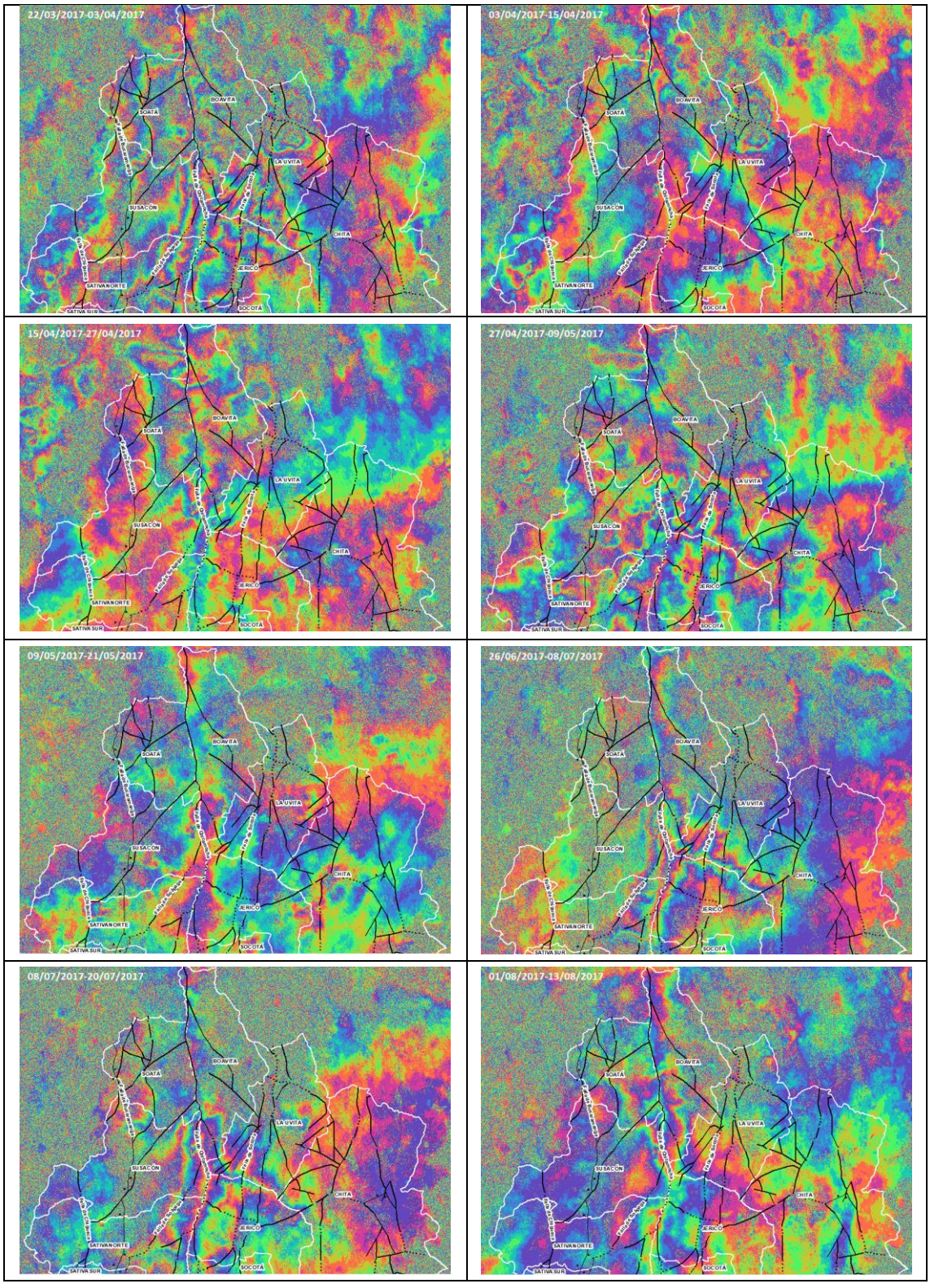
Correlación de Fallas con interferogramas enrollados-2017










22/03/2017-03/04/2017
03/04/2017-15/04/2017
15/04/2017-27/04/2017
27/04/2017-09/05/2017
09/05/2017-21/05/2017
26/06/2017-08/07/2017
08/07/2017-20/07/2017
01/08/2017-13/08/2017
BOAVITA
SOATÁ
LA UVITA
SUSACÓN
CHITA
JERICÓ
SATIVANORTE
SATIVA SUR
SOCOTÁ

9.2.3. Análisis por valores de desplazamiento

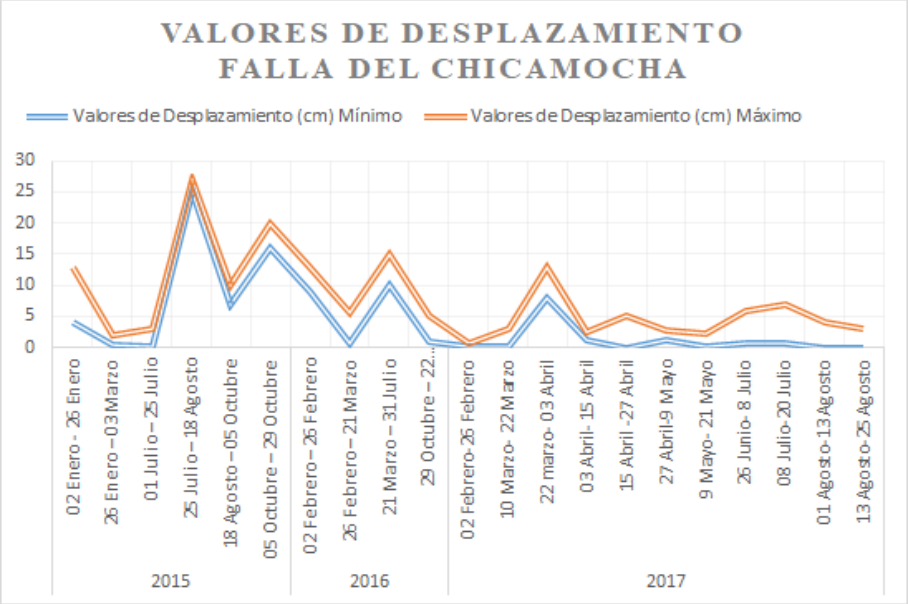
El siguiente análisis se realizó con base en los resultados arrojados por los interferogramas diferenciales con fase relativa y el mapa de desplazamientos, del cual se obtuvieron los valores máximos y mínimos absolutos de desplazamientos en las zonas donde se ubican las fallas del Chicamocha, Socotá y Soápaga. Dichas fallas corresponden a los patrones de franjas más representativos en la zona de estudio a lo largo del periodo de tiempo establecido en este proyecto.

I. Falla del Chicamocha

El análisis de 21 interferogramas que presentaron patrones de franjas significativos en la zona donde se ubica la falla del Chicamocha permitió identificar valores de desplazamiento representativos, los cuales presentan picos durante los años de estudio, por tanto en el año 2015 del 25 de Julio al 18 de Agosto se muestra un valor máximo de desplazamiento de 27 cm, así mismo para el año 2016 del 21 de Marzo al 31 de Julio el valor máximo se ubicó alrededor de los 15 cm, mientras que para el año 2017 del 22 de marzo al 3 de Abril los desplazamientos no superaron los 13 cm, lo anterior se evidencia en la *Gráfica 2*. Es importante mencionar que, durante el tiempo de análisis, las zonas que muestran mayor concentración de franjas aledañas a la falla presentaron valores de desplazamiento que no disminuyeron de los 0,2 mm. (Anexo 2)

Los anteriores valores de desplazamiento podrían ser consecuencia de una actividad en la falla durante el tiempo de estudio, sin embargo, en la *Gráfica 2* se puede evidenciar que los picos de los valores de desplazamiento que se muestran a través del tiempo van disminuyendo conforme este avanza, por lo que los valores de desplazamiento más pequeños se presentan durante los últimos meses del año 2017, lo que podría indicar una disminución en la actividad de las zonas aledañas a la falla. Adicionalmente, la serie representada gráficamente no es el de todo uniforme pues los

valores máximos y mínimos en algunos de los casos no muestran correspondencia entre ellos a pesar de mostrar una tendencia decreciente, lo cual indica una actividad variable en la zona.



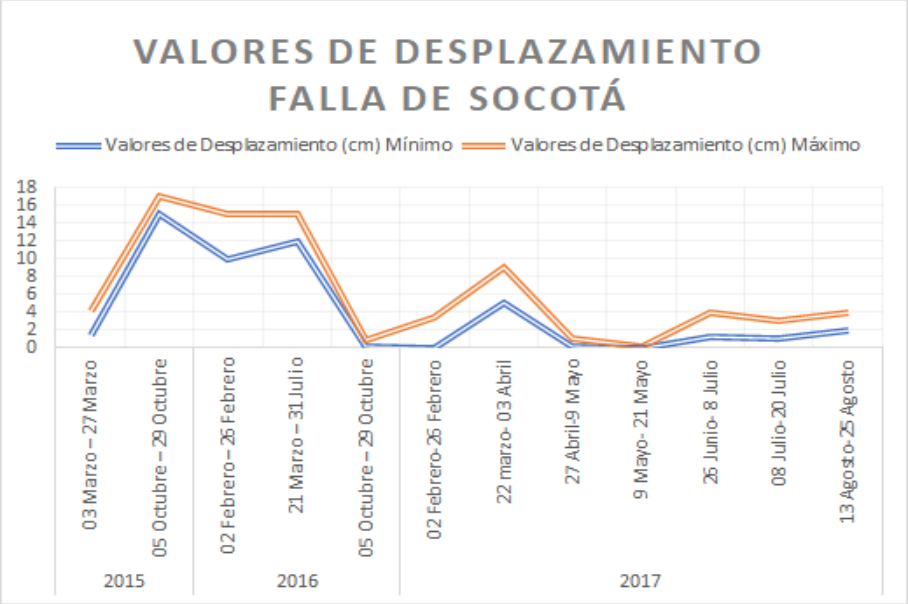
Gráfica 2. Valores de Desplazamiento de la Falla de Chicamocha. Fuente. Elaboración propia

II. Falla de Socotá

Para realizar el análisis de desplazamientos en la zona correspondiente a la falla de Socotá, se asociaron 12 interferogramas en los que se encontraron los patrones más significativos de franjas. De acuerdo a los datos tomados en la zona de fallamiento se tiene un valor máximo de desplazamiento de 17 cm correspondiente al interferograma del 5 al 29 de Octubre de 2015 y un valor mínimo de 0,005 cm en el interferograma del 9 al 21 de Mayo de 2017, adicionalmente se presentan picos con valores de 9 cm y 15 cm en los interferogramas del 22 de Marzo al 3 de Abril del 2017 y del 2 al 26 de Febrero de 2016, respectivamente.

En la *Gráfica 3* se puede evidenciar que existe una tendencia decreciente que presenta picos cada vez más bajos a medida que pasa el tiempo, además se muestra una correspondencia de valores mínimos y máximos a lo largo de la serie, es decir, cuando los valores máximos suben, los

mínimos también lo hacen, por lo cual se muestra una gráfica uniforme a pesar de que las diferencias sean muy diferentes entre fecha y fecha.



Gráfica 3. Valores de Desplazamiento de la Falla de Socotá. Fuente. Elaboración propia

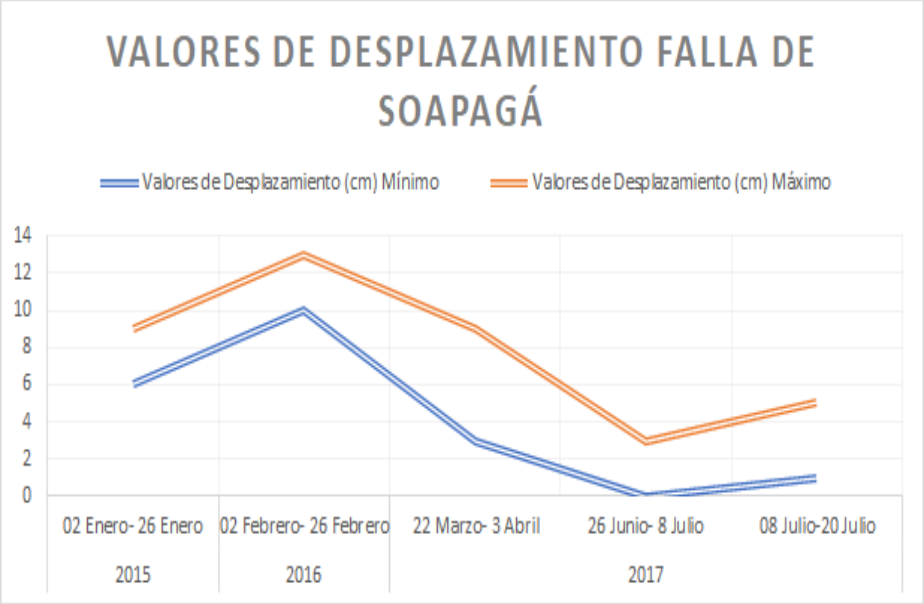
III. Falla de Soápaga

En el caso de la falla de Soápaga se evidencia un comportamiento diferente respecto al de las otras fallas, dado que presenta una menor influencia sobre la zona aledaña a la misma. Debido a esto el número de interferogramas asociados fue de cinco (5), por lo que también fue menor.

Respecto a los valores de desplazamiento se puede ver en la *Gráfica 4* que no existen cambios abruptos, sino suavizados, con presencia de tres picos para los valores máximos de 9 cm correspondientes a los interferogramas del 2 al 26 de Enero de 2015 y del 22 de Marzo al 3 de Abril de 2017 y de 13 cm en el interferograma del 2 al 26 de Febrero de 2016. También se puede ver que la máxima diferencia entre valores mínimos y máximos se da en el interferograma del 22 de Marzo al 3 de Abril del 2017 y corresponde a 6 cm de desplazamiento.

Es importante tener en cuenta que esta falla no es tan extensa como las dos anteriores y por eso mismo su influencia y actividad, pueden no ser tan constante o dinámica, por lo que probablemente

la tendencia decreciente indica una disminución en su actividad en los años de estudio de este proyecto.



Gráfica 4. Valores de Desplazamiento de la Falla de Soápaga. Fuente. Elaboración propia

9.2.4. Análisis de deslizamientos en la zona de estudio

El análisis que se presenta a continuación tiene como fin relacionar los resultados obtenidos en los interferogramas y mapas de desplazamientos con: información proporcionada por el IDEAM de precipitación promedio mensual calculada entre los años 1981-2010, cartografía base proporcionada por el IGAC, mapa departamental de Cobertura de la Tierra 2009 Corine Land Cover que alcanza hasta 5 nivel de detalle, a escala 1:650.000 realizado por CORPOBOYACÁ y el inventario de eventos reportados en la zona de estudio. Ese inventario es básicamente el registro de deslizamientos creado a partir de la recolección de información publicada por medios de información, artículos de universidades como la Universidad Pedagógica y Tecnológica (UPTC) de Tunja y la Universidad Nacional de Colombia, e información proporcionada por entidades como el Comité Regional Para La Prevención y Atención de Emergencias y Desastres (CREPAD) de Boyacá, INVÍAS y el Servicio Geológico Colombiano SGC. El inventario mencionado se

presenta al final del documento como Anexo 1 y se encuentra también depositado en una base de datos geográfica, hecho que facilitó el empalme de la información encontrada.

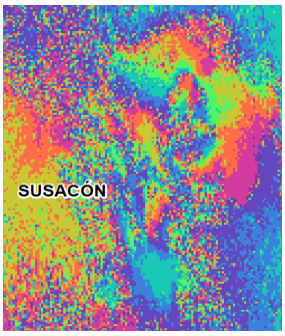
En los interferogramas se logró identificar un total de 15 patrones importantes que potencialmente corresponden a deslizamientos, sin embargo, se clasificaron 10 como deslizamientos específicos y 5 como zonas de deslizamientos, su diferencia radica en la cantidad de eventos que existen en el área del patrón identificado, ya que por ejemplo en una zona de deslizamiento pueden existir de dos a *n* deslizamientos, mientras que en un deslizamiento específico será un único evento.

Es importante mencionar que en las ilustraciones que exponen la temporalidad de los diferentes deslizamientos, se observan algunos símbolos puntuales que representan los eventos del inventario de deslizamientos realizado en este proyecto. Este inventario clasifica los deslizamientos reportados de acuerdo al año en que ocurrieron, por tanto, los círculos corresponden a los eventos reportados durante el año 2015, los pentágonos a los eventos reportados durante el año 2016 y los cuadrados a los eventos reportados durante el año 2017, así mismo los triángulos representan los eventos reportados entre el año 2000 y el año 2014.

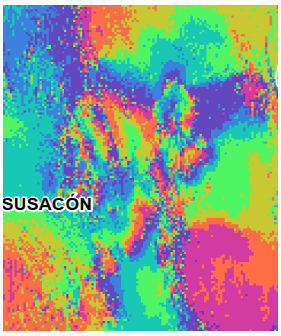
I. Deslizamiento 1

Este deslizamiento se ubica en el centro oriente del municipio de Susacón en las veredas de Tochupa y Guayacanal, con coordenadas aproximadas de 72°38’53” W 6°14’6” N, limita con el municipio de Boavita y se ubica en el costado occidental del Río Chicamocha en alturas que varían desde los 2.250 msnm hasta los 1.550 msnm. El deslizamiento cubre un área cercana a las 114 ha y se distinguen patrones de franjas importantes en 24 de los 28 interferogramas como se muestra a continuación.

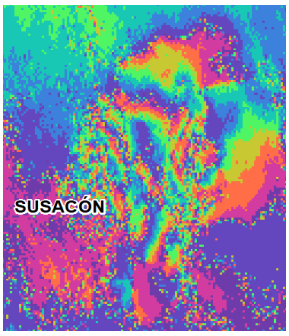
22Oct -15Nov 2014



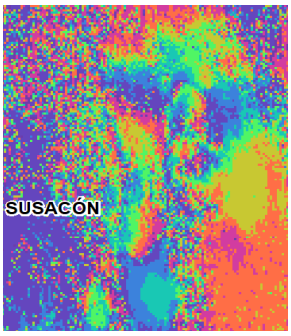
02Ene-26Ene 2015



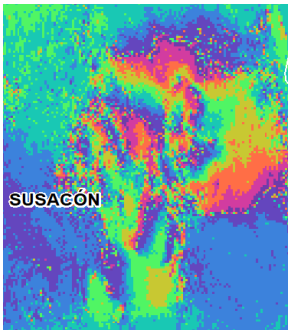
26Ene-03Mar 2015



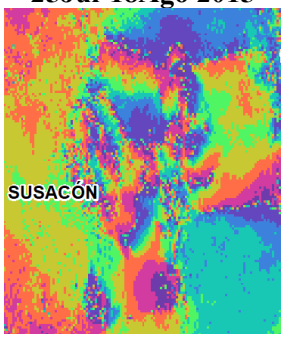
03Mar-27Mar 2015



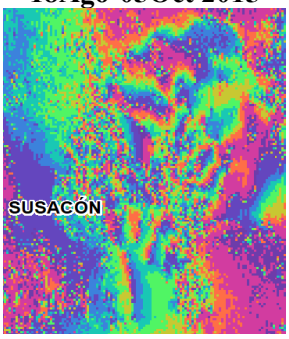
01Jul-25Jul 2015



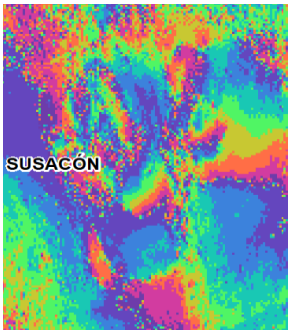
25Jul-18Ago 2015



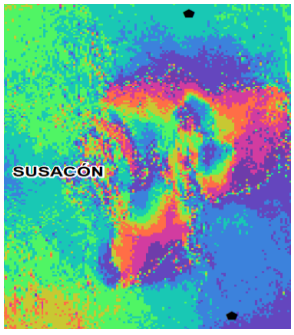
18Ago-05Oct 2015



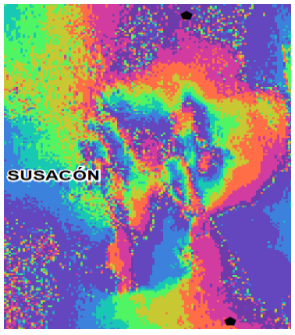
05Oct- 29Oct 2015



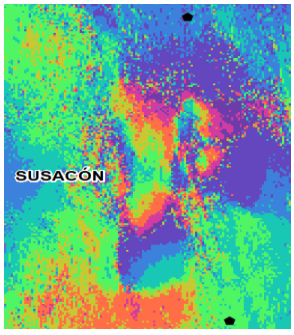
02Feb-26Feb 2016



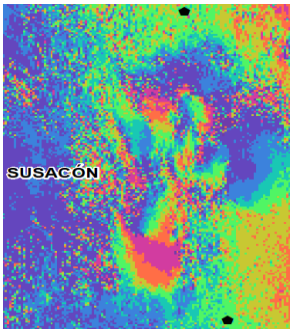
26Feb-21Mar 2016



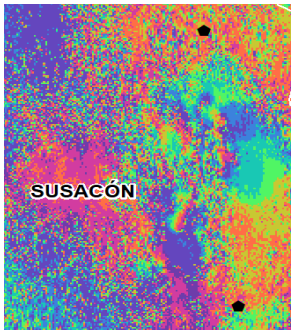
05Oct-29Oct 2016



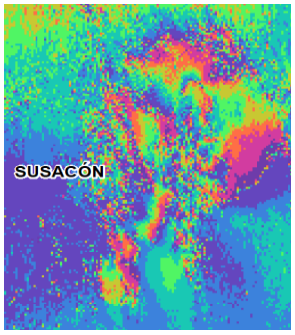
29Oct-22Nov 2016



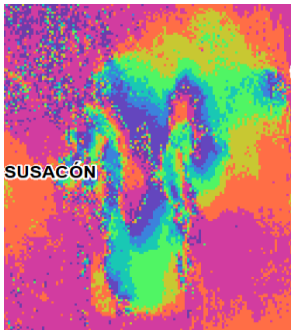
22Nov-16Dic 2016



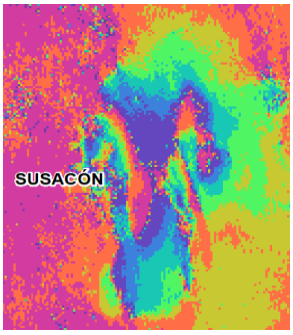
02Feb-26Feb 2017



26Feb-10Mar 2017



10Mar-22Mar 2017



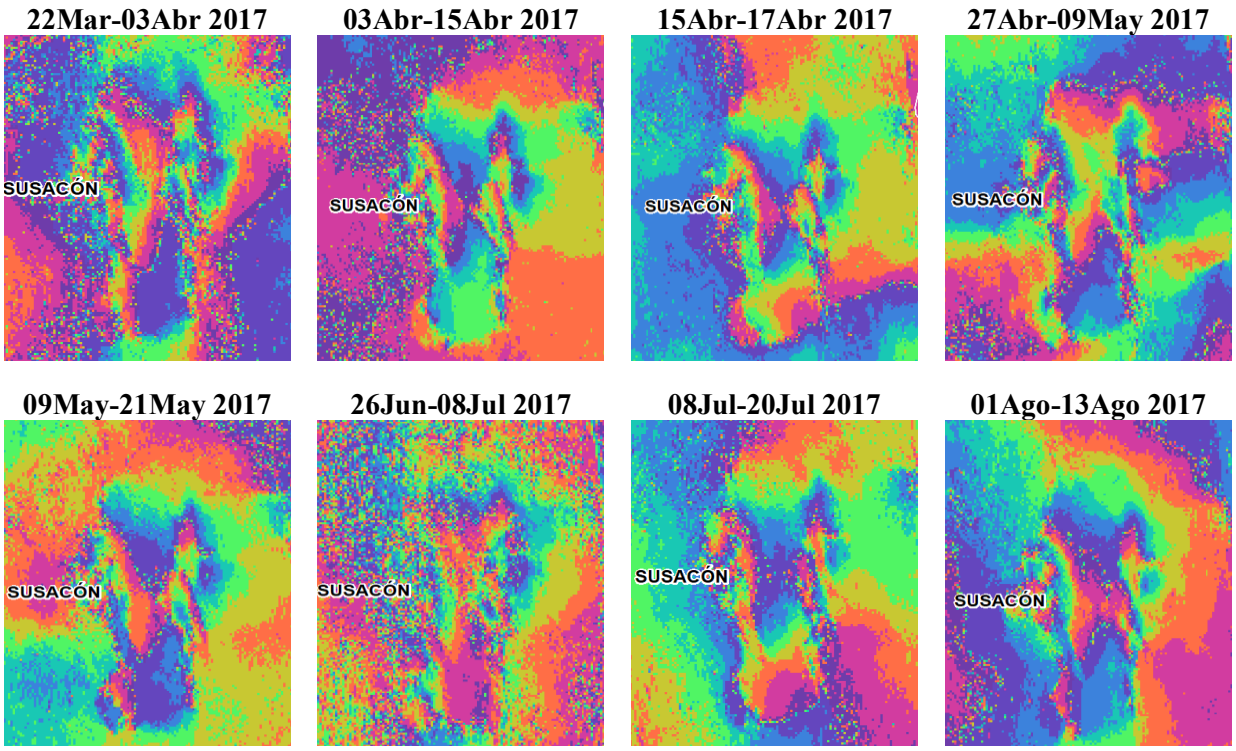
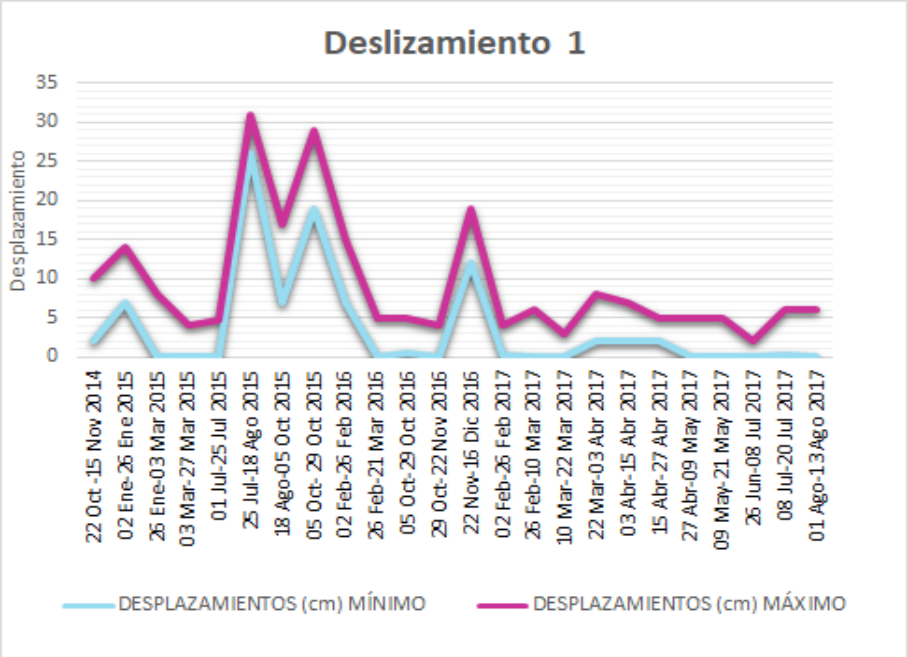


Ilustración 46. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 1. Fuente. Elaboración propia

El área donde se ubica el deslizamiento presenta características que hacen susceptible el terreno a fenómenos de remoción en masa debido a que presenta relieve fuertemente quebrado, se sitúan en la zona pequeños drenajes sencillos que desembocan en el río Chicamocha lo que puede ocasionar filtraciones de agua y generar inestabilidad y la cobertura corresponde a herbazal denso de tierra firme no arbolado, lo cual al presentar ausencia de vegetación arbórea podría ocasionar susceptibilidad a erosión, ya que las raíces de los árboles refuerzan el suelo aportando resistencia, retiene las partículas del mismo y controla las infiltraciones de agua subterráneas.

De acuerdo con la *Ilustración 46* el deslizamiento se presenta de manera constante en el tiempo de estudio de este proyecto, sin embargo, en algunas interferogramas presenta franjas con mayor definición e incrementa su área como se evidencia en el interferograma del 26 Enero al 03 de Marzo de 2015 o 18 de Agosto al 5 de Octubre de 2015, donde la precipitación en estos meses no sobrepasó los 100 mm.



Gráfica 5. Valores de Desplazamiento deslizamiento 1. Fuente. Elaboración propia

Por otro lado, acorde con la *Gráfica 5* los valores máximos de desplazamiento correspondientes al deslizamiento tienen un valor máximo promedio de 7 cm exceptuando los valores máximos atípicos que se presentan en los interferogramas del 25 Julio al 18 Agosto de 2015 con un valor de 31 cm, del 05 de octubre al 29 de octubre de 2015 con un valor de 29 cm y del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre del 2016 con un valor de 19 cm. De igual forma los valores mínimos de desplazamiento no son menores a los 0,009 mm.

Es importante mencionar que para el año 2016 de acuerdo con el inventario de deslizamientos realizado en este proyecto (Anexo 1), se registraron eventos ocasionados por el fuerte invierno en las veredas con mayor territorio sobre el Cañón del Chicamocha, en zonas de alta pendiente, estas veredas corresponden a Tochupa y Guayacanal, donde se ubica el deslizamiento en cuestión. De igual forma la vereda Tochupa tiene antecedentes de deslizamientos en zonas de alta pendiente, ya que en el mes de Noviembre del año 2005 12 Ha de terreno presentaron movimiento debido a

erosión y al alto flujo de lodo. Lo anterior indica la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la zona donde se presenta el deslizamiento.

II. Deslizamiento 2

El deslizamiento se ubica en la parte oriental del municipio de Chitá, en el corregimiento de Chipa viejo, con coordenadas aproximadas de 72°29'31" W 5°58'48" N, limita con el municipio de Socotá y tiene un área por lo menos de 77 Ha. Se sitúa en alturas que varían desde los 3.150 msnm hasta los 2.800 msnm y se distinguen patrones de franjas relevantes en 10 interferogramas como se muestra a continuación.

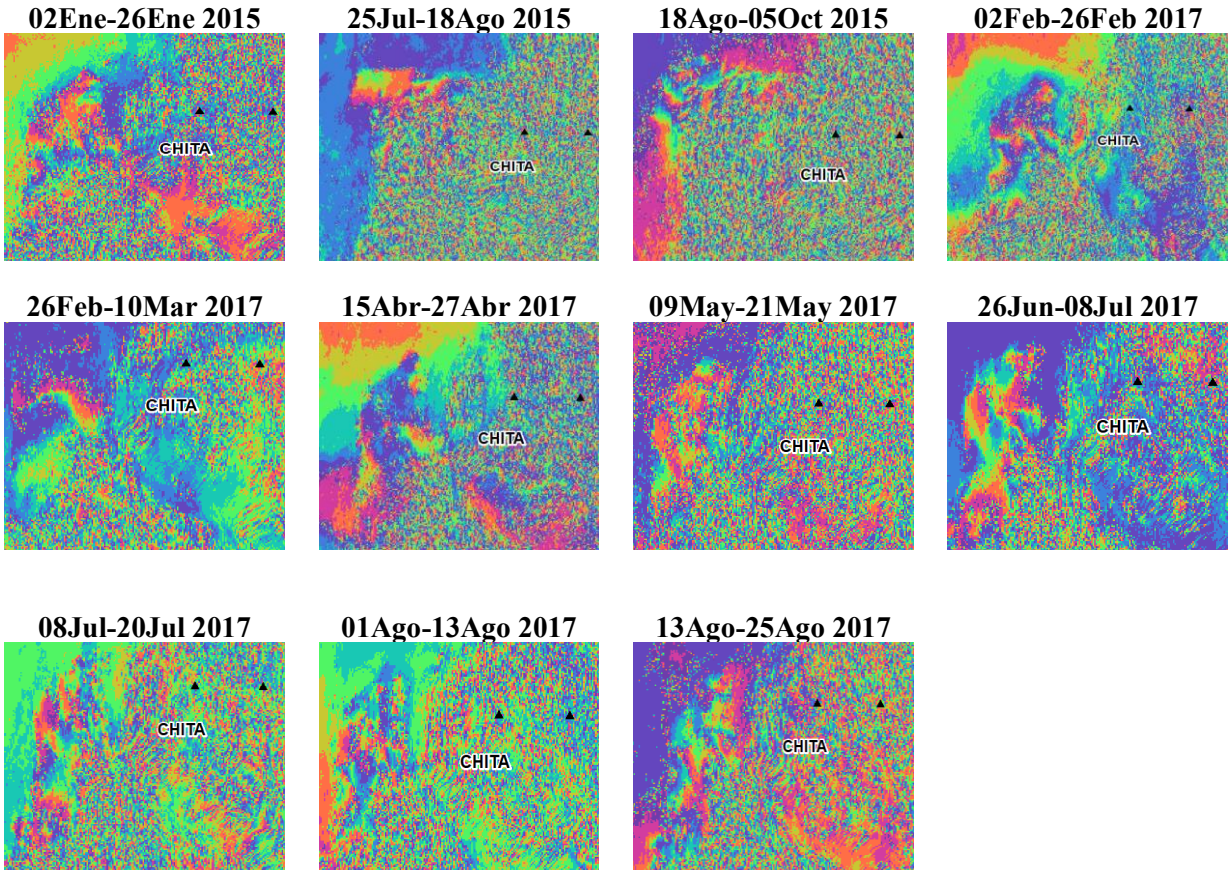


Ilustración 47. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 2. Fuente. Elaboración propia

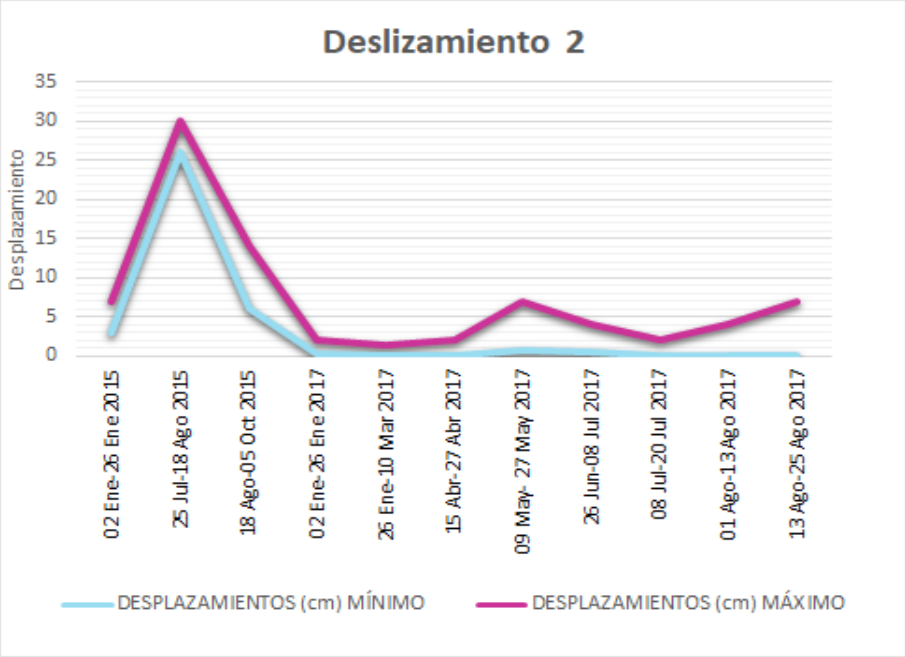
El deslizamiento se ubica en zona de relieve de montaña y es atravesado por la quebrada mugrosa clasificada como un drenaje sencillo permanente lo que podría implicar infiltraciones de agua y generar susceptibilidad a remociones en masa, el drenaje anteriormente mencionado desemboca en el río Pauto, el cual se encuentra cerca del deslizamiento en cuestión. Existen dos coberturas presentes en el área del deslizamiento como lo son herbazal denso de tierra firme no arbolado y mosaico de pastos y cultivos, las anteriores coberturas incrementan la susceptibilidad a deslizamientos puesto que al cultivar en zonas de ladera el suelo tiene riesgo de erosión y la zona no se encuentra protegida por vegetación arbórea la cual disminuye este riesgo, así como la infiltración de aguas.

La *Ilustración 47* permite observar que en algunas fechas los patrones de franjas están mejor definidos y algunos incrementan su área como se presenta en el interferograma del 26 de Junio al 8 de Julio de 2017, en este mes la precipitación estuvo alrededor de los 300 mm.

La *Gráfica 6* permite evidenciar los desplazamientos máximos y mínimos en los interferogramas donde se presentó el patrón de franjas indicativo del deslizamiento, los valores máximos promedio de deslizamientos es de 4 cm aproximadamente exceptuando los valores atípicos que corresponden a los interferogramas del 25 Julio al 18 Agosto y 18 de Agosto al 5 de Octubre de 2015 con valores de 30 y 14 cm respectivamente, las precipitaciones en esos meses no fueron superiores a los 200 mm. Por otra parte, los valores mínimos no disminuyeron de los 0,08 mm.

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, el corregimiento donde se ubica el deslizamiento presenta antecedentes puntuales (con coordenadas) registrados en 2007 y 2014, el primer deslizamiento presentado en el 2014 tuvo como causa detonante las fuertes lluvias y sus contribuyentes fueron la deforestación o ausencia de vegetación, la socavación de márgenes de ríos y la socavación de pata de talud por corriente de agua, el segundo deslizamiento presentado

en el mes de junio de 2014 fue detonado por las lluvias y contribuyeron factores como la ausencia de la vegetación y el mantenimiento deficiente del sistema de drenaje.



Gráfica 6. Valores de Desplazamiento deslizamiento 2. Fuente. Elaboración propia

Por último el tercer deslizamiento presentado en ese mismo mes fue provocado por el material triturado y el no adecuado sistema de drenaje de las aguas subterráneas los cuales saturaron el material. Lo anterior indica antecedentes de susceptibilidad en la zona puesto que el deslizamiento en cuestión se encuentra muy cerca a los deslizamientos presentados durante Junio de 2014.

III. Deslizamiento 3

Este deslizamiento al igual que el anterior se ubica en el municipio de Chitá, corregimiento de Chipa Viejo, presenta coordenadas de ubicación aproximadas de 72°29’31” W 5°59’46” N en alturas que varían desde los 3.450 hasta los 2.850 msnm, limita con el municipio de Socotá y tiene un área no menor a las 827 ha. Los patrones de franjas relevantes en este deslizamiento se presentaron en cinco (5) interferogramas como se observa a continuación.

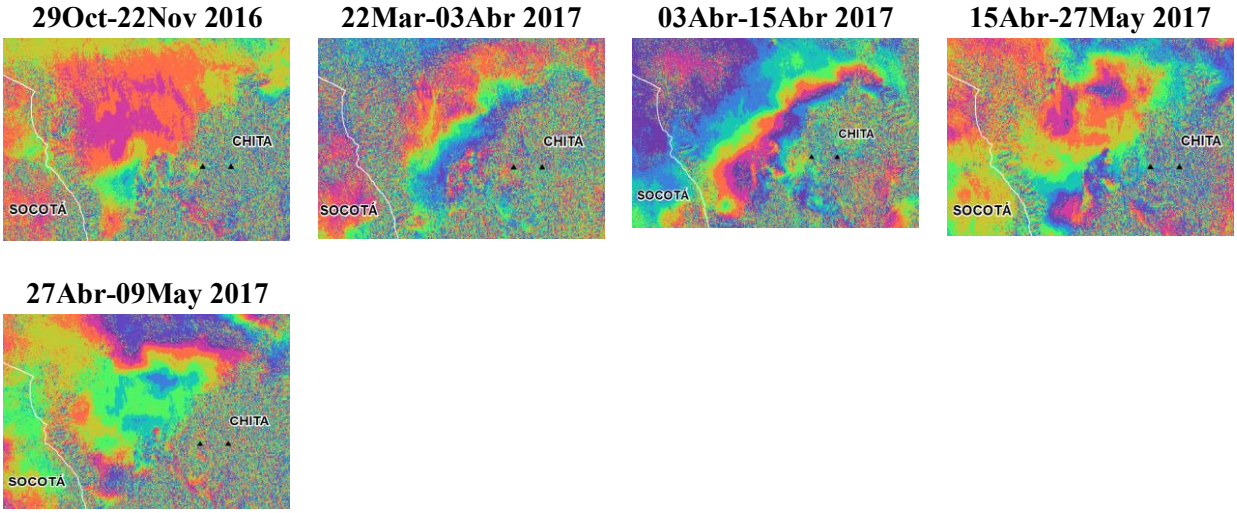
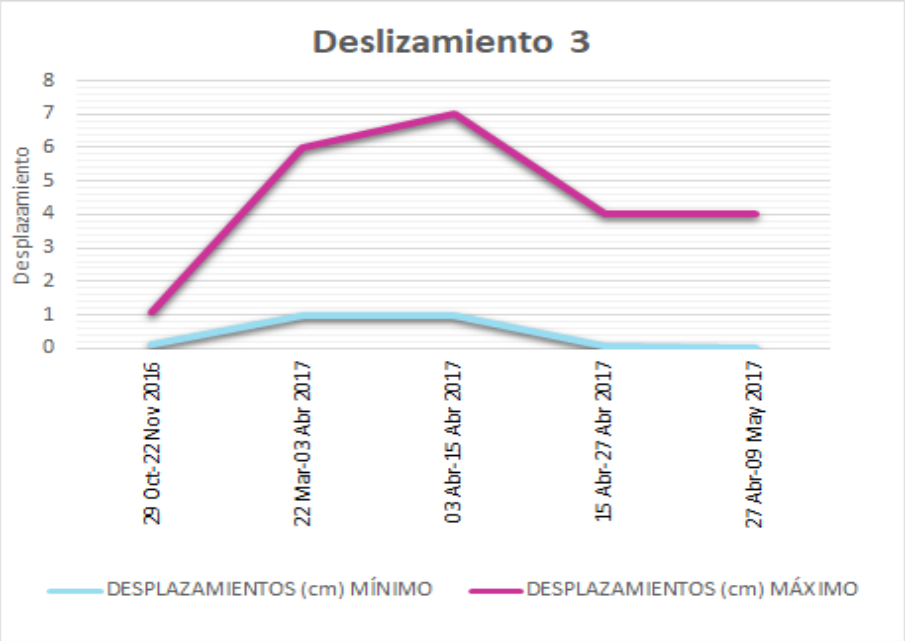


Ilustración 48. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 3. Fuente. Elaboración propia

El área donde se encuentra ubicado el deslizamiento cuenta con la presencia de cuatro drenajes sencillos de tipo intermitente lo que podría ocasionar una infiltración de aguas ocasional principalmente en épocas de invierno, lo que haría más susceptible la zona a remociones en masa durante esas épocas. Lo anterior sumado a que la cobertura presente en esta área corresponde a herbazal denso de tierra firme no arbolado el riesgo se incrementa, dado que la vegetación arbórea disminuye el riesgo de deslizamientos por infiltraciones de agua, debido a que los árboles extraen la humedad del suelo y son interceptores de la lluvia por lo que también controla la erosión causada por las escorrentías de agua.

La *Ilustración 47* nos permite evidenciar que el deslizamiento se presenta principalmente en el mes de abril de 2017, mes en que las lluvias aumentan de manera significativa, en este caso las precipitaciones variaron de los 200 a 300 mm durante el mes. Sin embargo, los patrones con franjas mejor definidas se presenta a principios del mes de abril cuando las precipitaciones no superaron los 200 mm. Así mismo se puede observar en la *Gráfica 7* que los valores más altos de desplazamiento se presentaron en los interferogramas donde los patrones de franjas se encuentran mejor definidos, el interferograma del 22 Marzo al 3 de abril de 2017 tiene un valor máximo de

desplazamiento de 6 cm y el interferograma del 3 al 15 de Abril de 2017 presenta un valor máximo de desplazamiento de 7 cm, mientras que los valores mínimos de desplazamiento durante el tiempo de estudio no disminuyeron de los 0,04 mm.



Gráfica 7. Valores de Desplazamiento deslizamiento 3. Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, el evento más cercano a la zona donde se ubica el deslizamiento en cuestión se presentó en Junio de 2014 sobre el camino veredal que conduce del sector cardón a la vereda Chipaviejo en el sector Santa Cruz. El movimiento fue clasificado como avalancha de detritos con una longitud de masa desplazada de 200 metros, un volumen desplazado de 36.000 metros cúbicos y un área total afectada de 0,006 kilómetros cuadrados, el principal detonante del evento fueron las lluvias y contribuyeron factores como la ausencia de la vegetación y el mantenimiento deficiente del sistema de drenaje. El movimiento causó daños ambientales severos en bosques y daños económicos moderados a actividades ganaderas de la zona.

IV. Deslizamiento 4

El deslizamiento se ubica en el centro occidente de la vereda Canoas en el municipio de Chita, se localiza aproximadamente en las coordenadas 72°29’53” W 6°07’19” N en alturas que varían desde los 2.900 a los 3.600 msnm. El deslizamiento se presenta de manera relevante en 10 interferogramas cubriendo alrededor de 88 Ha.

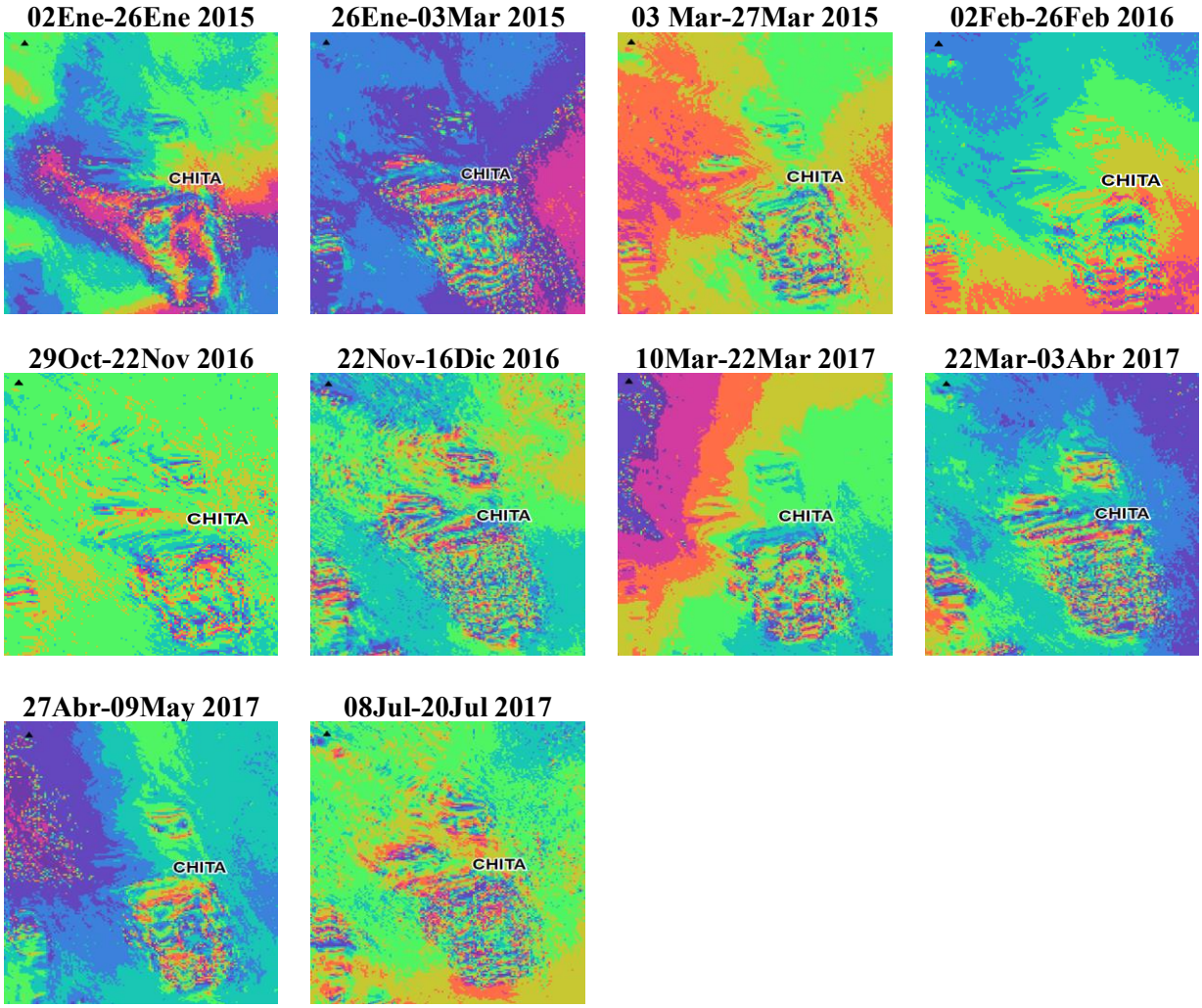


Ilustración 49. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 4. Fuente. Elaboración propia

En el área del deslizamiento se encuentra ubicada la quebrada El Bosque la cual atraviesa el mismo, este drenaje sencillo es de tipo permanente sin embargo cinco drenajes intermitentes se

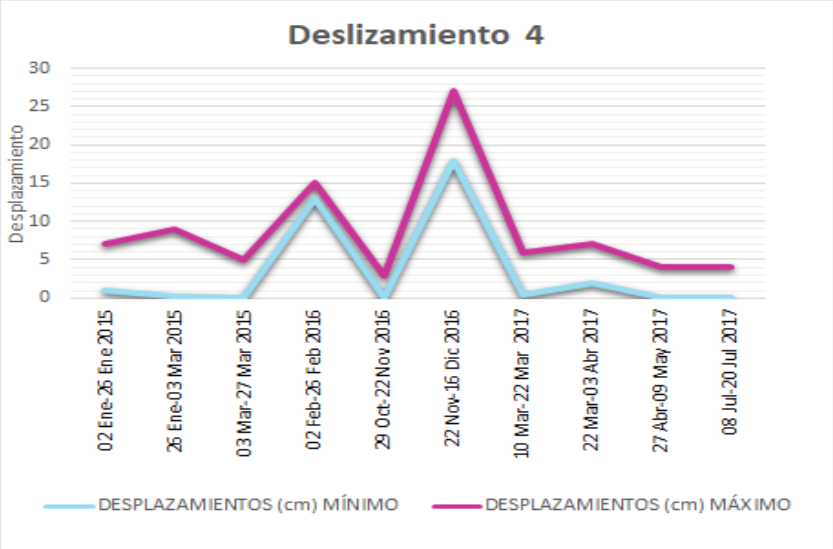
ubican en la zona conectando con esta quebrada. Adicionalmente, la zona presenta fuertes pendientes puesto que las alturas alcanzan rápidamente los 3.600 msnm y la cobertura presente corresponde a herbazal denso de tierra firme no arbolado, los anteriores factores incrementan el riesgo a remociones en masa debido a infiltraciones de agua e inestabilidad de terreno por ausencia de vegetación arbórea.

La *Ilustración 49* permite ver que algunos interferogramas como el de 02 de Enero al 26 de Enero de 2015 presentan franjas mejor definidas, mientras que en interferogramas como 22 de Noviembre al 16 de Diciembre de 2016, 22 de Marzo al 3 de Abril de 2017 y 8 de Julio al 20 de Julio el patrón de franjas incrementó su tamaño, lo cual coincide por lo menos para el interferograma de Julio con altas precipitaciones de 300 mm.

El promedio de los valores máximos de desplazamientos se encuentra alrededor de los 5 cm exceptuando los valores atípicos del patrón presentado para el interferograma del 22 de Noviembre al 16 de Diciembre con un valor máximo de desplazamiento de 27 cm y el patrón presentado del 2 de Febrero al 26 de Febrero de 2016 con un valor máximo de desplazamiento de 15 cm, lo anterior de acuerdo con la *Gráfica 8*, los valores de precipitación para estos interferogramas fueron de 50 y 100 mm respectivamente. Es importante mencionar que el patrón presentado para el interferograma del 22 de noviembre al 16 de Diciembre incrementó su área como se mencionó anteriormente.

En relación con el inventario de deslizamientos, la vereda presenta antecedentes de deslizamientos por socavación de márgenes de ríos y quebradas como La colorada, fuertes lluvias y erosión pluvial, de igual manera la vereda presenta deslizamientos constantes debido a la inestabilidad de sus terreno puesto que los habitantes de la misma tienen la costumbre de transportar agua para los cultivos por el sistema de tomas en canal abierto, por lo tanto las filtraciones de agua se acentúan

y produce inestabilidad de los terrenos produciéndose deslizamientos, los cuales aumentan la aridez de los suelos perdiéndose la capa vegetal.

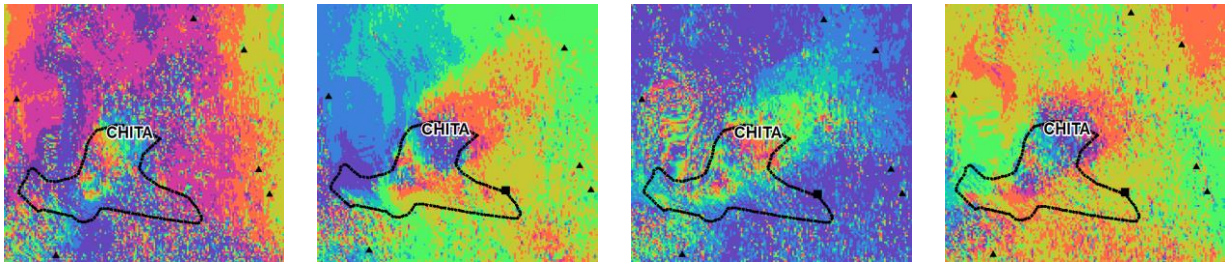


Gráfica 8. Valores de Desplazamiento deslizamiento 4. Fuente. Elaboración propia

V. Deslizamiento 5

Este deslizamiento fue identificado y suministrado por el Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres (CREPAD) del departamento de Boyacá para utilidad del presente proyecto, se localiza en el municipio de Chita, en las veredas de Parroquita, La Cal y Dimiza, sin embargo, de las 59 ha que tiene el deslizamiento la mayoría se ubican en las veredas Parroquita y La Cal. Las alturas del deslizamiento varían entre los 2.400 y 2.700 msnm y el patrón de franjas correspondiente al mismo se localiza con mayor relevancia en 5 interferogramas.

26Feb-21Mar 2016 **26Feb-10Mar 2017** **22Mar-03Abr 2017** **03Abr-15Abr 2017**



15Abr-27Abr 2017

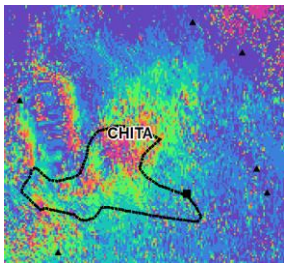
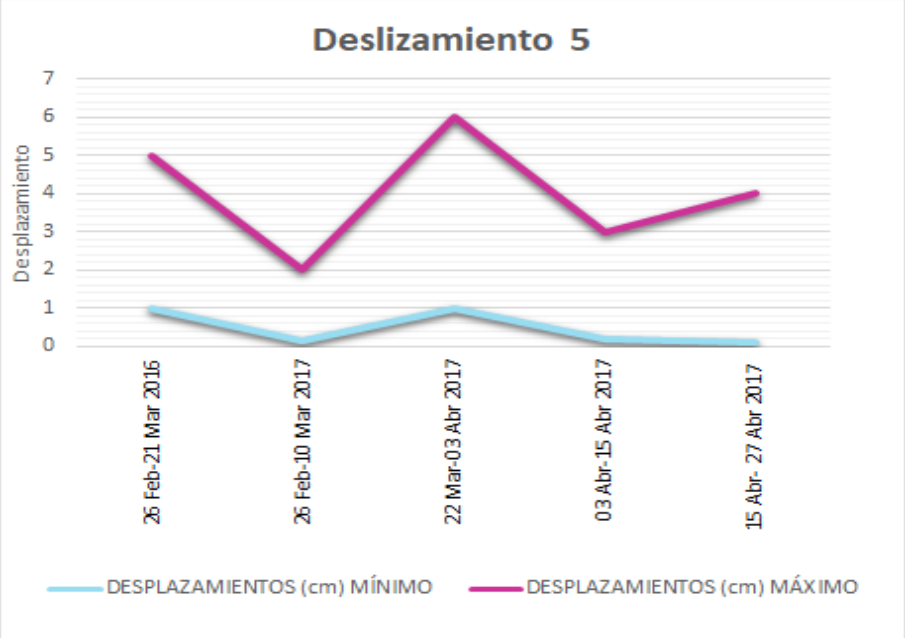


Ilustración 50. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 5. Fuente. Elaboración propia

El deslizamiento presenta coberturas correspondientes a bosque fragmentado con pastos y cultivos y mosaico de pastos, además se ve influenciado por la presencia del río Peñablanca y la quebrada Gusaneque, es importante mencionar que debido a la presencia de cuerpos de agua permanentes como los anteriormente mencionados la zona podría tener filtraciones de agua que acentúan la inestabilidad del terreno, esto sumado a la intervención antrópica realizada al bosque natural que a pesar de conservar su estructura original presenta erosión. Así mismo la presencia de cultivos en la zona, puede aumentar la saturación del suelo debido al transporte de agua para los mismos.

La *Ilustración 50* permite observar que el deslizamiento se acentuó durante los primeros meses del año 2016 y 2017, sin embargo, durante el 2017 su presencia es más constante en los primeros meses de ese año. Es importante mencionar que meses como Abril se caracterizan por el aumento de las precipitaciones que corresponden a 150 mm, mientras que para los demás meses la precipitación no superó los 100 mm.



Gráfica 9. Valores de Desplazamiento deslizamiento 5. Fuente. Elaboración propia

La *Gráfica 9* permite observar que el promedio de valores máximos de desplazamientos para este deslizamiento está alrededor de los 4 cm, sin embargo, es importante mencionar que los valores más altos se ubicaron en los interferogramas del 26 de febrero al 21 de Marzo de 2016 con un valor máximo de desplazamiento de 5 cm y del 22 de Marzo al 03 de Abril de 2017 con un valor máximo de desplazamiento de 6 cm. Por otro lado, los valores mínimos de desplazamiento no estuvieron por debajo de 1 mm.

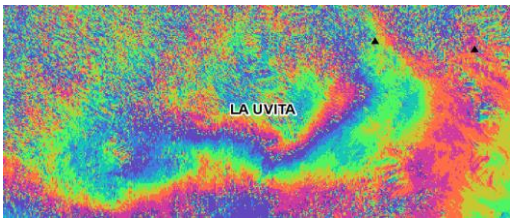
Adicionalmente, el inventario de deslizamientos indica que para los primeros meses del 2017 en la vereda La Cal se generaron deslizamientos por saturación hídrica debido al exceso de riego proveniente del Río Loblanco y la Quebrada Gusaneque para el cultivo de alfalfa. De igual forma, las veredas La Cal y Parroquitas presenta antecedentes de deslizamientos causado por las fuertes olas invernales, además de un constante deslizamiento que se encuentra localizado en la desembocadura de la quebrada Gusaneque y el Río Peña Blanca, este fenómeno es muy activo y de gran velocidad por lo que se encuentra afectando alrededor de 20 hectáreas con posibilidades

de llegar a las áreas aledañas al Río Peña Blanca en las veredas Dimiza y la Cal hasta cercanías del casco urbano.

VI. Deslizamiento 6

Este deslizamiento se localiza en las veredas El Carmen, San Bernardo, Vargas y San Antonio del municipio de la Uvita con coordenadas aproximadas 72°32’24” W 6°17’02” N, las alturas en la zona varían desde los 3.600 hasta los 3.050 msnm y cubre un área de por lo menos 577 ha. Este deslizamiento se ubica en dos interferogramas como se observa a continuación.

22Mar-03Abr 2017



03Abr-15Abr 2017

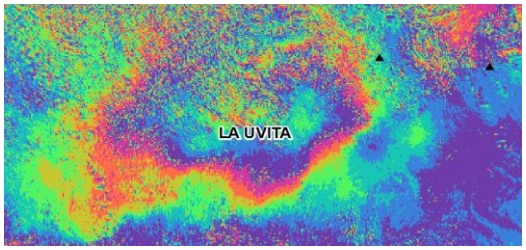


Ilustración 51. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 6. Fuente. Elaboración propia

Como se observa en la *Ilustración 51,* el deslizamiento se presenta durante los meses de Marzo y Abril del año 2017, meses donde la precipitación se encontraba entre los 100 y los 200 mm. Los valores máximos de desplazamiento para este deslizamiento están entre los 4 y 5 cm, mientras los valores mínimos de desplazamiento no son inferiores a 6 mm. Es importante mencionar que para el mes de Abril en donde la precipitación fue de 200 mm el valor máximo de desplazamiento fue de 5 cm, por lo que en esta época alcanzó el valor más grande de desplazamiento presentando en los dos mapas de desplazamientos correspondiente a los patrones de franjas presentadas en la

Ilustración 51.

Las coberturas presentes en la zona donde se ubica el deslizamiento corresponden a mosaico de pastos y cultivos, herbazal denso de tierra firme no arbolado y vegetación secundaria o en transición, adicionalmente se presentan en esta zona algunos drenajes sencillos intermitentes, los cuales aparecen en épocas de lluvias y podrían presentar un riesgo por infiltración de aguas en épocas de lluvia.

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, las veredas en las que se localiza el deslizamiento se presentan antecedentes de eventos reportados como consecuencia de erosión pluvial, vibración generada artificialmente, fuertes lluvias y material fisurado o agrietado.

VII. Deslizamiento 7

El deslizamiento se presenta en los municipios de Socotá y Sativasur, a ambos costados del río Chicamocha con coordenadas aproximadas 72°39’04” W 6°04’41” N y alturas que varían entre los 1.900 y 2.400 msnm. El deslizamiento alcanza un área cercana a las 122 ha y solo se presenta durante el mes de febrero del año 2017 como se muestra a continuación.

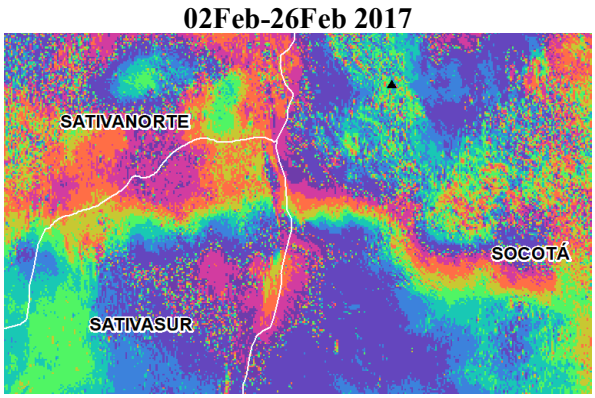


Ilustración 52. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 6. Fuente. Elaboración propia

En el área del deslizamiento se encuentra ubicada Zanjón San Emigdio el cual atraviesa el mismo en el municipio de Socotá, este drenaje sencillo es de tipo permanente y desemboca en el río Chicamocha. Las coberturas presentes en el área del deslizamiento corresponden principalmente a zonas arenosas naturales y herbazal denso de tierra firme no arbolado, sin embargo también se encuentran coberturas como bosque abierto de tierra firme. Por otro lado, la zona presenta un relieve de montaña que sumado a las coberturas anteriormente mencionadas y la presencia de cuerpos de agua importantes indicaría susceptibilidad a remoción en masa.

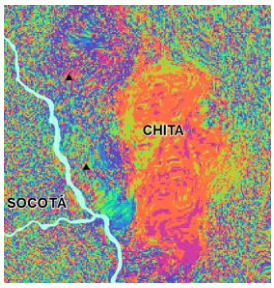
El deslizamiento presentó valores de desplazamiento que no superaron los 3,5 cm y no fueron inferiores a los 2 mm, por otro parte, la precipitación durante el mes no fue superior a los 50 mm.

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, en la vereda Chusvita, en el municipio de Socotá donde el deslizamiento ubica parte de su área, se presentó durante el año 2006 un deslizamiento complejo por invierno con fuerte lluvias que desplazó una masa de tierra de 8 km2 sobre la vía que comunica al municipio de Socotá con Jericó.

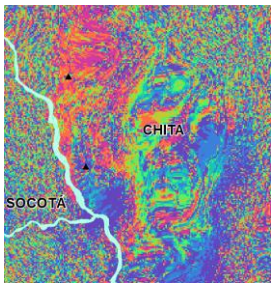
VIII. Deslizamiento 8

Este deslizamiento se encuentra ubicado al suroccidente del municipio de Chita en su límite con el municipio de Socotá, específicamente en la vereda Corregimiento Monserrate con coordenadas aproximadas 72°24’40” W 5°55’08” N. Cubre un área aproximada de 492 Has y se encuentra en una zona de alta pendiente con alturas entre los 2.400 msnm y 1.450 msnm.

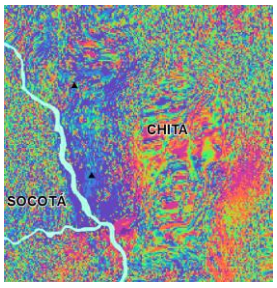
22Oct-15Nov 2014



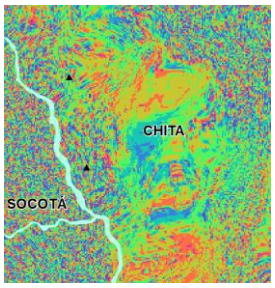
02Ene-26Ene 2015



03Mar-27Mar 2015



01Jul-25Jul 2015



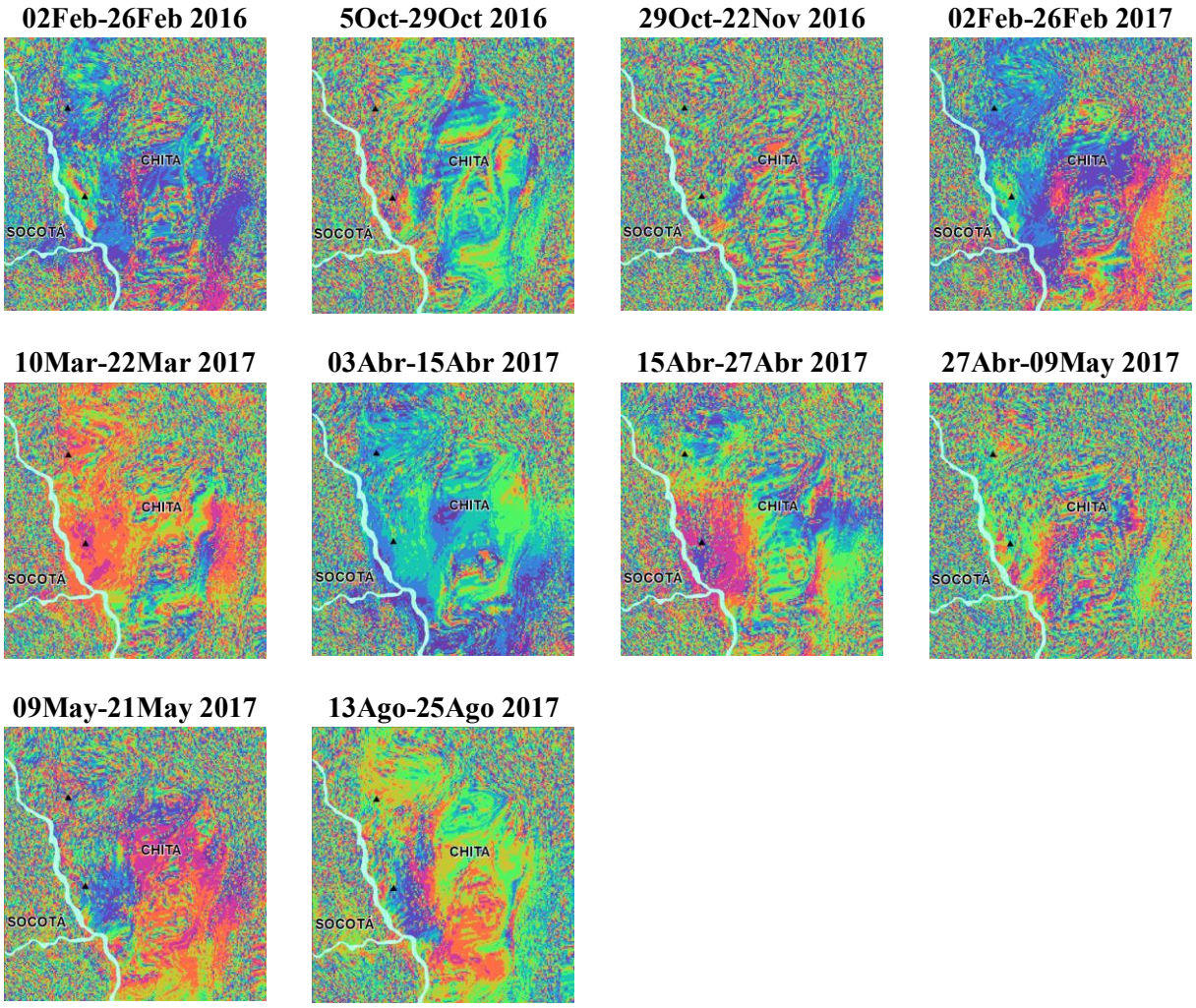


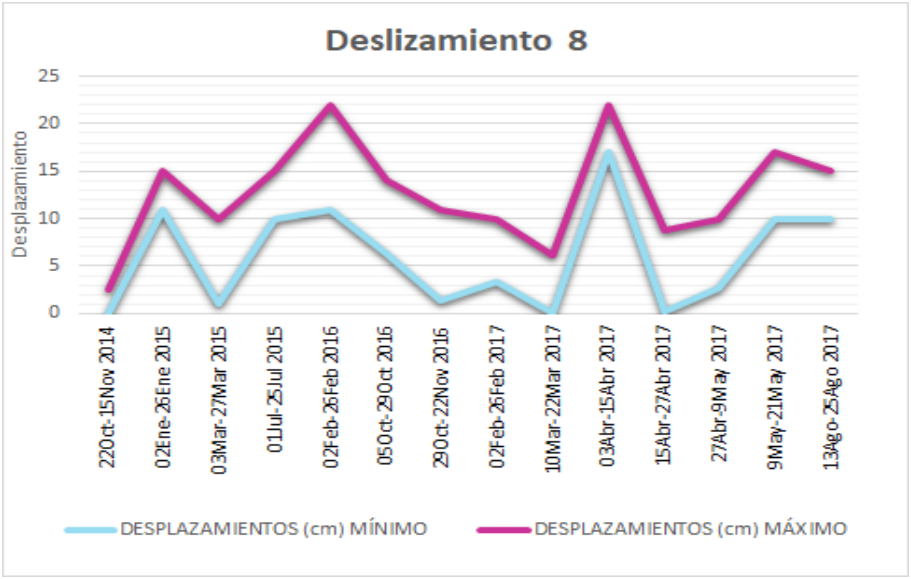
Ilustración 53. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 8. Fuente. Elaboración propia

En el área cubierta por el deslizamiento hay principalmente dos coberturas: Mosaico de pastos y cultivos y Afloramientos rocosos, existen alrededor de 10 cuerpos de agua clasificados como intermitentes con nacimiento en la parte alta de la montaña (2400 msnm) y desembocadura en el Río Pauto, se encuentra en una zona de régimen bimodal de lluvias, con precipitaciones promedio mensuales que varían entre los 200 y 300 mm en los meses de Abril a Mayo y de Octubre a Noviembre. Es importante resaltar que existe una alta correspondencia entre los valores de alta precipitación y los interferogramas donde la zona está mejor definida, sucediendo esto en

interferogramas como el del 22 de Octubre al 15 de Noviembre de 2014, el del 5 al 29 de Octubre de 2016 y el del 13 al 25 de Agosto de 2017.

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, desde el año 2010 existen reportes por parte de la UIS de deslizamientos traslacionales de material tierra y flujo de detritos en el corregimiento Monserrate contiguos al Río Pauto, estos reportes están directamente relacionados con los patrones identificados en los interferogramas y pueden ser consecuencia de la presencia de cultivos en zona de alta pendiente, ya que la adecuación del terreno (reemplazo de la cobertura natural vegetal) y los sistemas de riego allí instalados, hacen que se convierta en una zona con baja estabilidad y posteriormente con presencia de erosión.

Al realizar el análisis de los mapas de desplazamiento, se pudo encontrar que, en los dos primeros meses de los años 2015, 2016 y 2017 se presentaron los valores más grandes de desplazamientos (entre los 15 y 22 cm) y en meses como Marzo y Noviembre los valores más pequeños, rondando alrededor del centímetro. Esto se ve reflejado en la *Gráfica 10,* en la cual se presentan los valores mínimos y máximos de desplazamientos para el área del deslizamiento 8.



Gráfica 10. Valores de Desplazamiento deslizamiento 8. Fuente. Elaboración propia

IX. Deslizamiento 9

Este deslizamiento se encuentra en el límite occidental entre el municipio de Chita y Jericó, entre las veredas Canoas y Cuco de Chita, cubre un área aproximada de 1440 Has y su patrón fue evidenciado en seis de los veintiocho interferogramas. Tiene una variación de alturas desde los 2150 msnm a los 3200 msnm y al interior del mismo tiene su paso el Río Chitano del cual se desprenden varios cuerpos de agua clasificados como intermitentes.

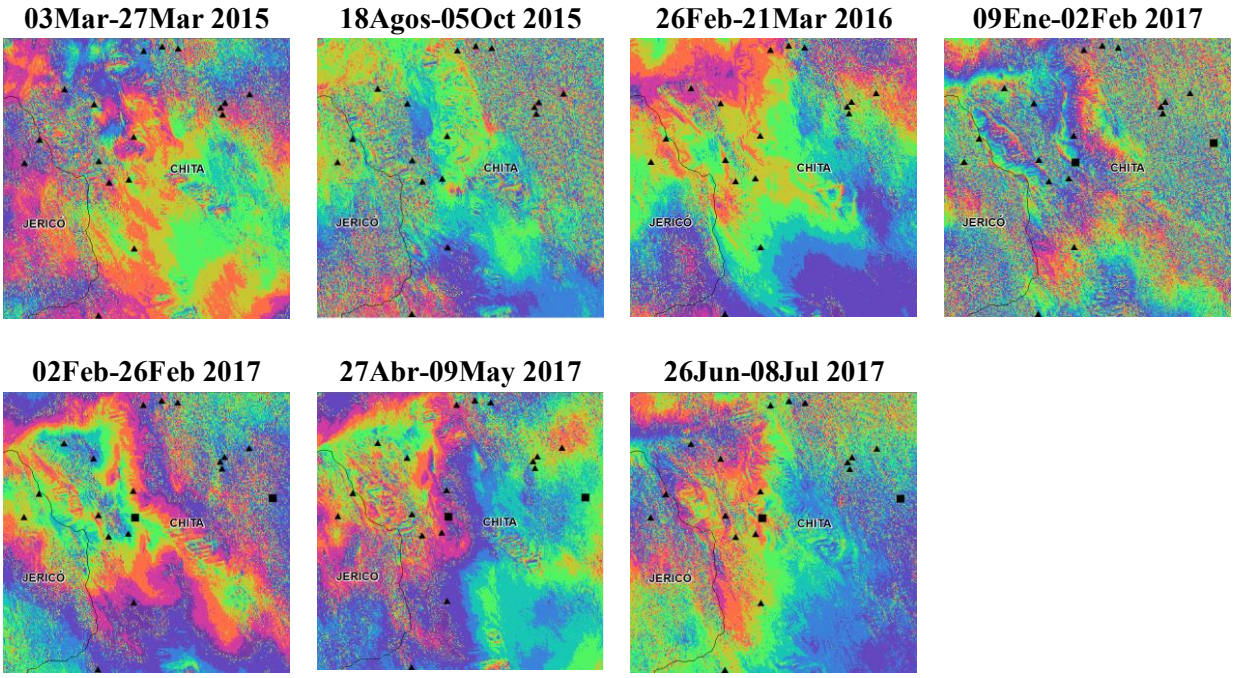
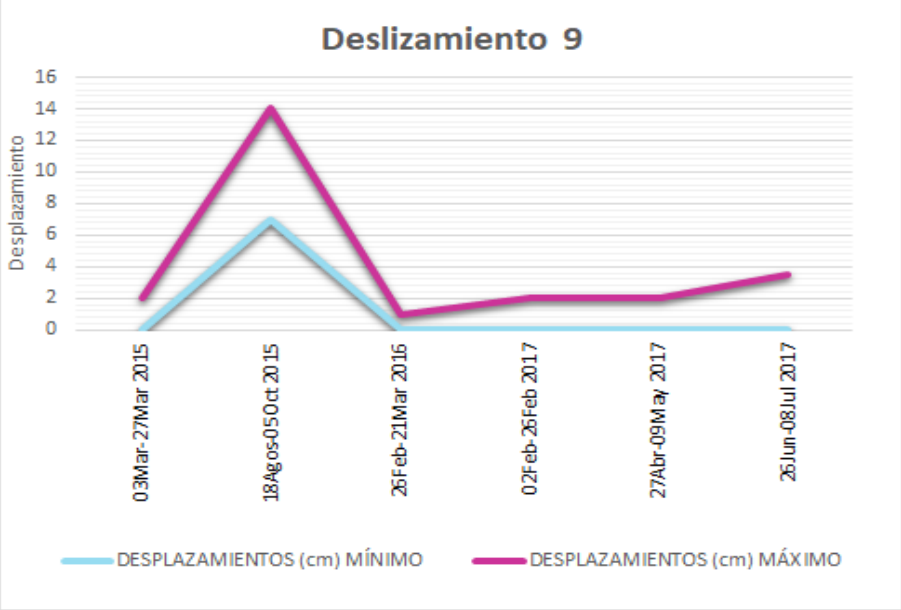


Ilustración 54. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 9. Fuente. Elaboración propia.

El deslizamiento se presenta entonces en una zona de alta pendiente, en la que predominan coberturas de Mosaico de pastos y cultivos, Bosque plantado, Herbazal denso de tierra firme y Afloramientos de rocosos. En relación al inventario de deslizamientos se encuentra una alta presencia de eventos, con un total de ocho. Dos de tipo constante ocasionados por filtraciones de agua y pérdida de cobertura vegetal, uno en el año 2006, dos en Noviembre del año 2010 debido a la socavación de la quebrada Colorada y dos en Octubre del año 2013 de tipo traslacional planar

con material rocoso, que afectaron en múltiples casos la vía que comunica de Chita a Jericó y la vía que conduce de Cheva a la cabecera municipal, por último en Noviembre del año 2017 se presentó un deslizamiento en la ladera de la vía Chita-Jericó causado por el efecto erosivo del agua de escorrentía (lluvia), que desplazó material rocoso, estos reportes fueron realizados por el CREPAD de Boyacá y la Universidad Industrial de Santander UIS.

De acuerdo con la *Gráfica 11*, se puede hablar de una zona de deslizamiento constante, por lo menos durante los años de estudio, que únicamente presentó un pico en el interferograma del 18 de Agosto al 5 de Octubre de 2015 con valores de desplazamiento entre 7 y 14 cm. Además, en relación con los eventos presentados se puede asociar el alto valor de precipitación para la zona en los meses de Octubre y Noviembre, siendo una de las causas principales, según el inventario, el crecimiento de los ríos y la saturación hídrica en la zona de montaña, que incrementa los problemas de estabilidad debido a la presencia de cultivos y afloramientos rocosos.

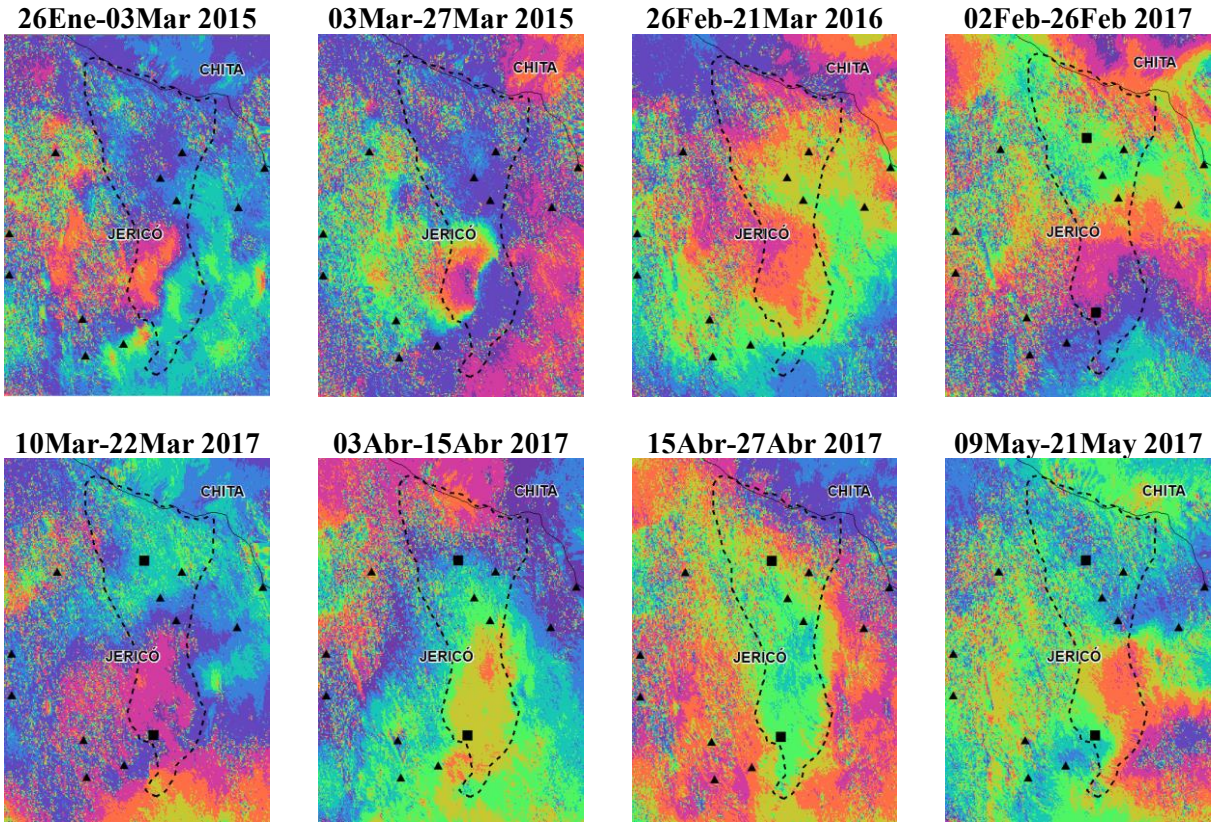


Gráfica 11. Valores de Desplazamiento deslizamiento 9. Fuente. Elaboración propia

X. Deslizamiento 10

Este deslizamiento se detectó gracias a la información proporcionada por el CREPAD de Boyacá y se ubica en el municipio de Jericó entre las veredas la Estancia y Ovejera, aproximadamente en la coordenada 72°32’16” W 6°09’10” N, su límite occidental está marcado por las quebradas la Estancia y el Bebedero y su límite oriental por cuerpos de agua intermitentes. Cubre un área de 351 Has aproximadamente y tiene cambios de altura desde los 2.050 msnm a los 3.100 msnm.

En el área del deslizamiento predominan dos tipos de cobertura: Mosaico de cultivos y Herbazal denso de tierra firme no arbolado, el régimen de lluvias tiene un comportamiento bimodal, presentando los valores más altos de precipitación en los meses de Abril a Mayo con valores entre los 100 y 150 mm y de Agosto a Octubre con valores entre los 150 y 200 mm.



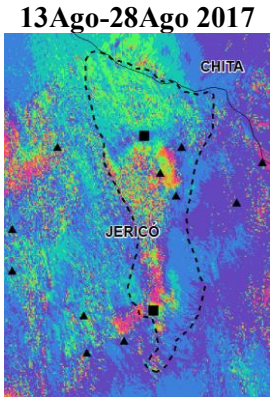
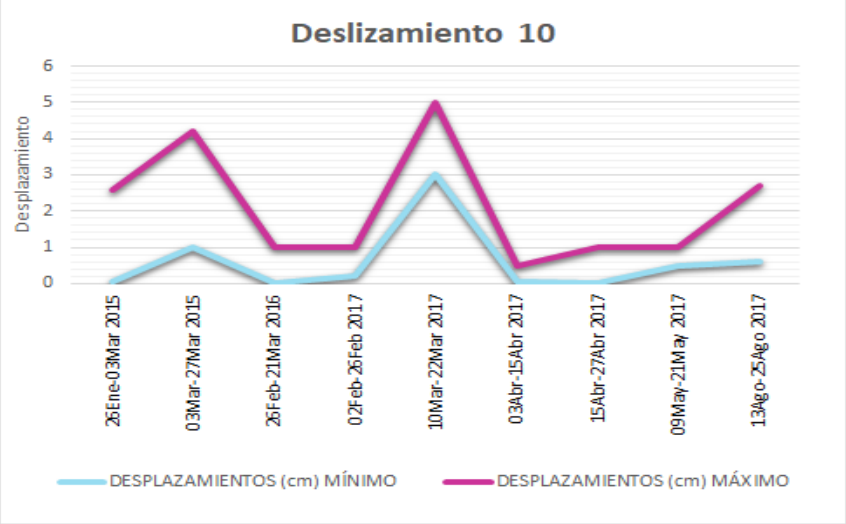


Ilustración 55. Patrones de franjas interferogramas enrollados, deslizamiento 10. Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo a lo presentado en la *Gráfica 12* los valores de deslizamientos varían en sus picos (Marzo y Agosto) de 3 a 5 cm y en sus valles entre valores muy por debajo del milímetro hasta el centímetro. En relación con el inventario de deslizamientos y como se evidencia en la *Ilustración 52* se han reportado múltiples deslizamientos dentro de la zona definida, como a su alrededor. Es así que hay un total de cinco deslizamientos reportados con precisión de tipo "vereda", de los cuales tres se presentaron en el año 2011 en el mes de Abril según el periódico digital El Tiempo y en publicaciones de la UPTC, y dos se presentaron en el año 2017 en el mes de Agosto, reportados por las cadenas radiales de RCN y CARACOL con base en información proporcionada por la Defensa Civil de Boyacá. En la mayoría de los casos la principal causa de los deslizamientos fue la saturación hídrica del suelo, debido en principio a la existencia de cultivos (en gran parte de la zona) y las épocas de lluvia. De la descripción de los deslizamientos es importante resaltar que los deslizamientos del año 2011 y uno del 2017, fueron de tipo compuesto y causaron daños a la infraestructura vial y de servicios públicos, también la destrucción de viviendas y la pérdida de muchas hectáreas de cultivos debido a la caída de material rocoso y lodo. Por otra parte, el deslizamiento del 6 de Agosto de 2017 vino acompañado de un movimiento subterráneo, el cual generó además del movimiento de tierra, grietas en las vías y desbordamiento de cuerpos de agua.



Gráfica 12. Valores de Desplazamiento deslizamiento 10. Fuente. Elaboración propia

XI. Zona de Deslizamientos 1

Esta zona de deslizamiento se puede dividir en dos partes, ya que el patrón identificado cubre las laderas norte y sur que bordean el Río Chitano, derivado del Río Chicamocha. Su presencia en la parte superior lo ubica en las veredas San Bernardo y Canitas del municipio de la Uvita y la parte inferior en las veredas de Junco y Tíntoba del municipio de Jericó **(***ver Ilustración 56***)**. Cubre un área total aproximada de 4.600 Has y está presente en zona de montaña, en la parte sur con alturas que van desde los 1.800 msnm a los 25.00 msnm en Jericó y en la zona norte en alturas que van desde los 1.800 msnm a los 2.750 msnm en la Uvita. Según la *ilustración 53* el patrón de deslizamiento se identifica únicamente en el primer semestre del año, época en la que la precipitación promedio mensual varía de 50 a 150 mm.

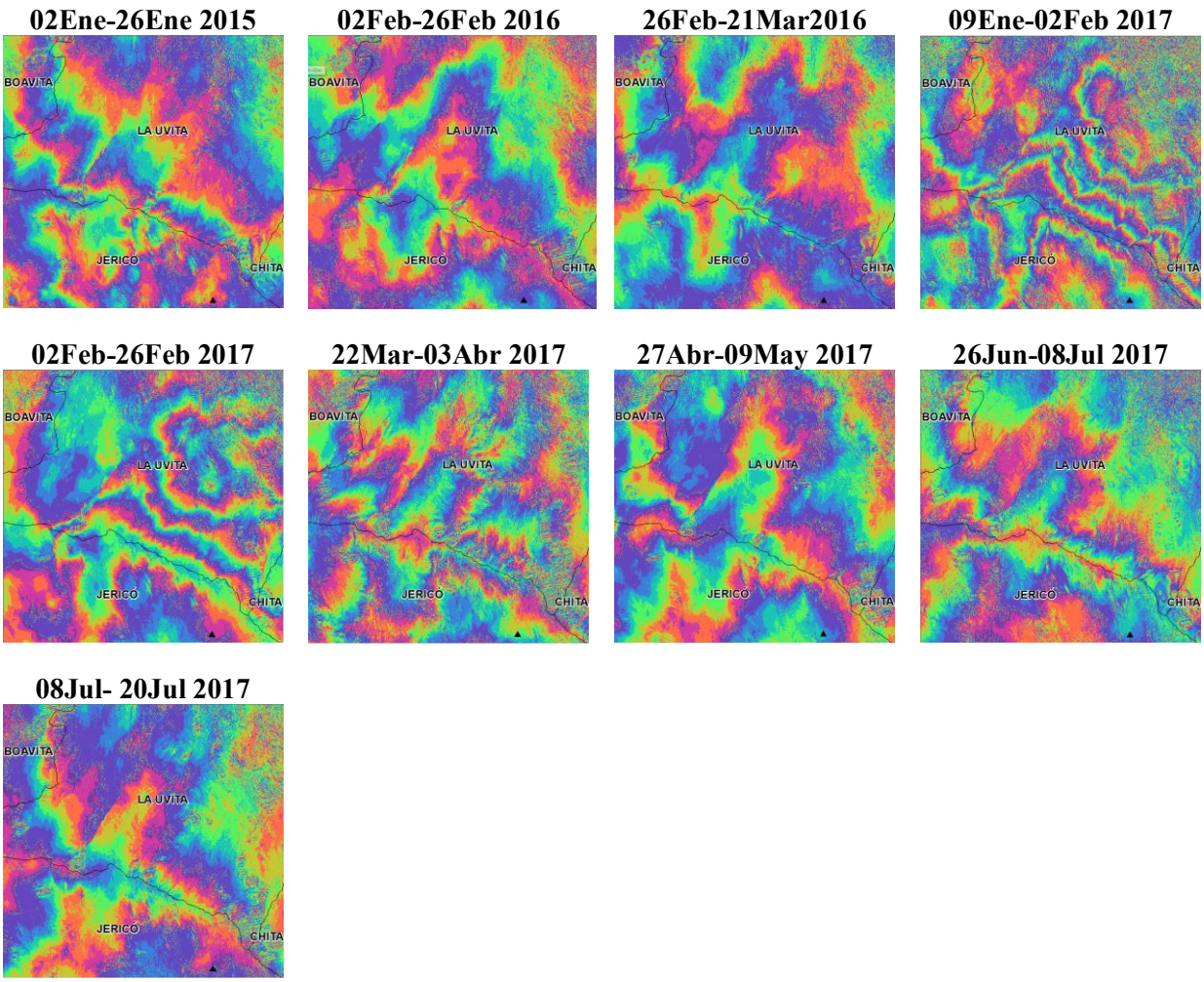
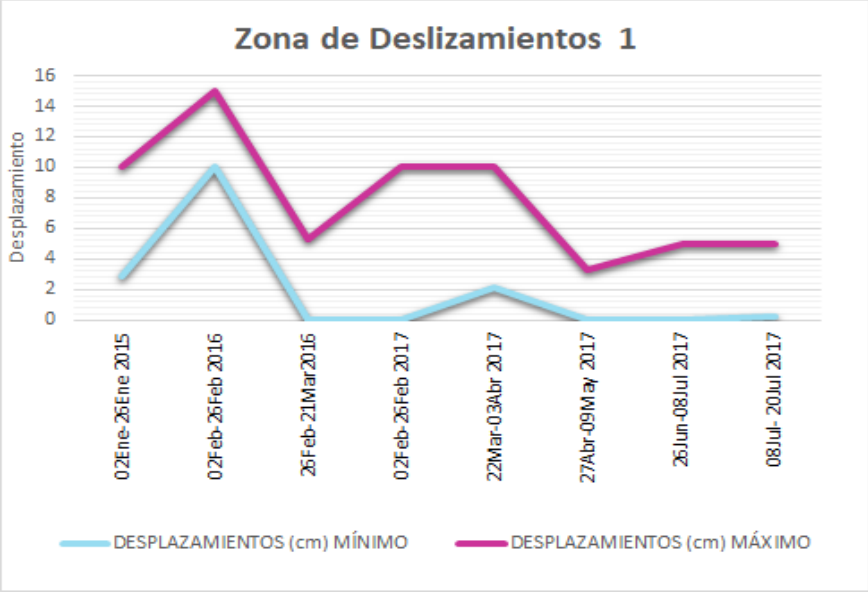


Ilustración 56. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 1. Fuente. Elaboración propia

El área del deslizamiento se compone de tres coberturas predominantes: Herbazal denso de tierra firme no arbolado y Bosque abierto alto de tierra firme (presente únicamente en la parte occidental) y Playa, arenales y dunas específicamente en la ronda del río Chitano. Posee en su interior varios cuerpos de agua permanentes, como lo son las quebradas Cañitas, la Vieja, Chorro de Tíntoba, el Alisal y Carbonera, que desembocan en el Río Chitano, este último ubicado exactamente en el centro de los patrones horizontales mostrados en la *Ilustración 56*.

Por otro lado, en relación con la *Gráfica 13* se puede ver una tendencia decreciente de los valores de desplazamientos siendo el pico más alto un valor de desplazamiento de 15 cm y los

valores más pequeños inferiores al milímetro. En cuanto al inventario de deslizamientos, se encuentra el reporte hecho por el medio de comunicación Excelcio de Boyacá y la UPTC, de tres fuertes deslizamientos en el año 2011 en las veredas de Tíntoba, Bacotá, la Estancia y la Ovejera, en los que se presentaron deslizamientos compuestos entre traslacionales y rotacionales, con flujos de roca, lodo, tierra y avalanchas que provocaron daños a 327 viviendas, 5 escuelas, redes de acueducto y energía, pérdidas de cientos de hectáreas de pastos y cultivos (en especial de alfalfa), alrededor de 1600 personas evacuadas y mallas viales destruidas. Lo anterior pudo ser consecuencia de la instalación masiva de cultivo de alfalfa, el cual necesita abundante agua y por lo tanto en múltiples casos se produce saturación hídrica, teniendo en cuenta también, que los deslizamientos se presentaron en el mes de Abril, fecha en la que se presentan altas precipitaciones y factor determinante en Colombia para la ocurrencia de este tipo de eventos.



Gráfica 13. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 1. Fuente. Elaboración propia

XII. Zona de Deslizamientos 2

Esta zona se compone de dos patrones de deslizamientos y se encuentra ubicada en el municipio de Susacón en la parte baja de la montaña que rodea el Río Chicamocha en el costado occidental,

dentro de la vereda Guayacanal. Tiene coordenadas aproximadas de 72°38’38” W 6°15’14” N y se encuentra en una zona donde la altura varía desde los 1550 msnm y los 1800 msnm.

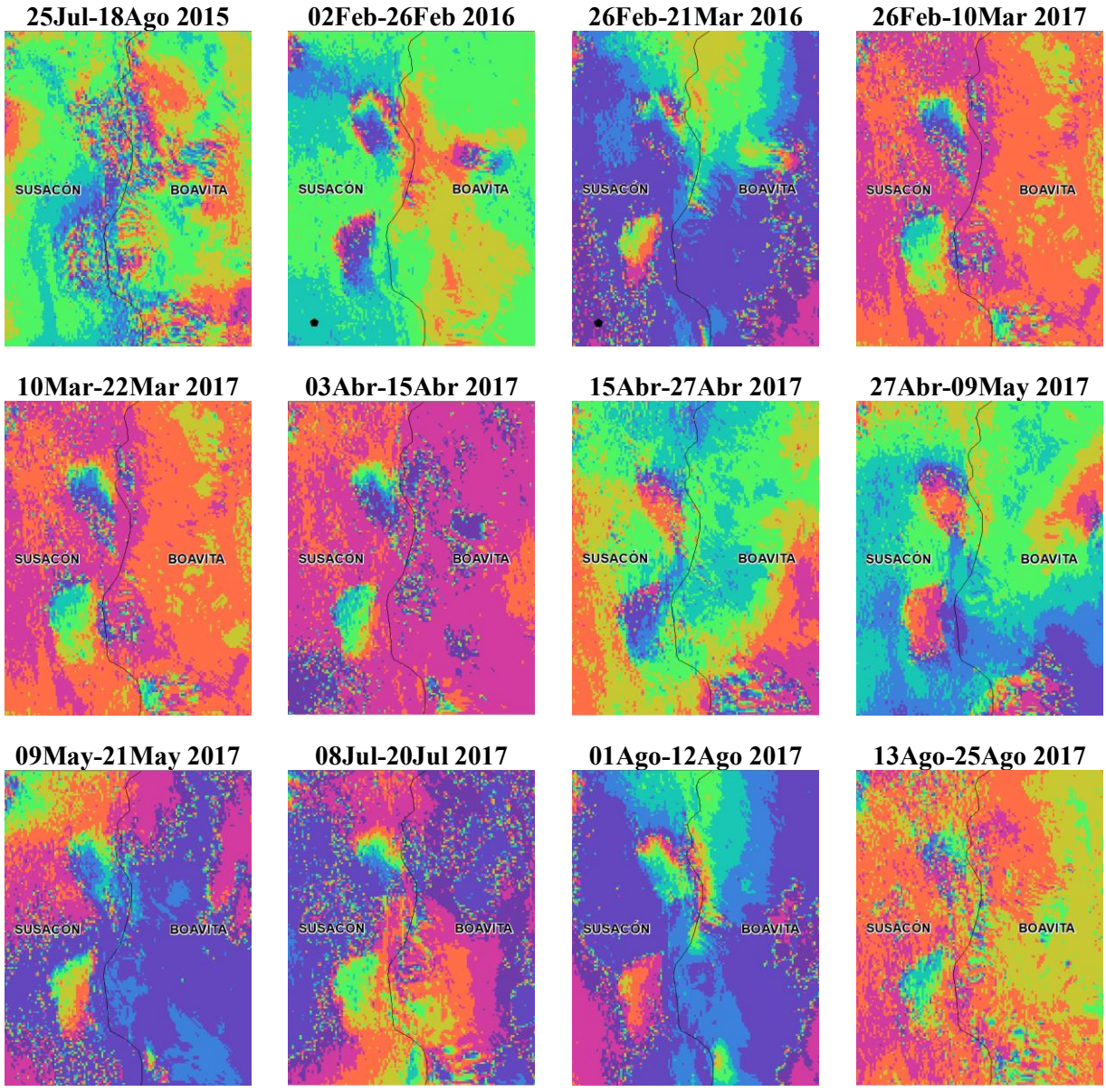
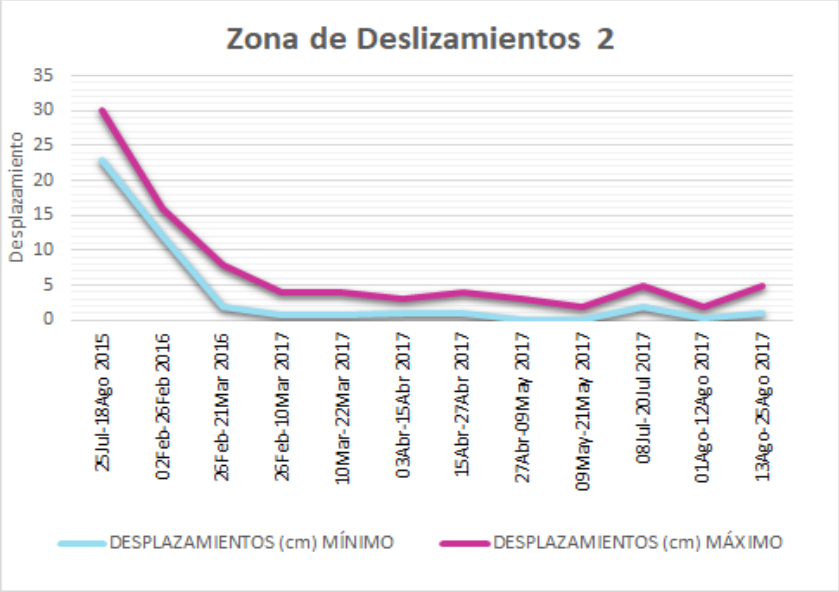


Ilustración 57. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 2. Fuente. Elaboración propia.

El deslizamiento identificado en la parte superior de la secuencia de imágenes de la *Ilustración 57*, cubre un área de 15 Has y el que se ubica en la parte inferior un área de 17 Has. En la zona predominan tres tipos de coberturas: Bosque abierto bajo de tierra firme, Arbustal denso y Afloramientos Rocosos, se presenta además un régimen bimodal de lluvias en los meses de Abril

a Mayo y de Septiembre a Noviembre con valores promedio mensuales de precipitación entre los 100 y 150 mm. En relación con el inventario de deslizamientos se evidencia que en el mes de Mayo de 2016 existió un deslizamiento en la vereda Guayacanal reportado por el CREPAD de Boyacá, el cual se ocasionó por altas precipitaciones y poca estabilidad del terreno, posiblemente por ser una zona de alta erosión en la que predomina la ausencia de vegetación.

Se puede ver, de acuerdo a la *Gráfica 14*, que el patrón se presenta en 12 de los 28 interferogramas y muestra una tendencia decreciente en cuanto a valores de desplazamiento, iniciando con sus valores más altos en el interferograma del 25 de Julio al 18 de Agosto del año 2015 que varían entre 23 a 30 cm y con valores constantes en las demás fechas que varían en sus valores mínimos entre 0,01 cm y 2 cm, y en sus valores máximos entre 2 cm y 5 cm.



Gráfica 14. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 2. Fuente. Elaboración propia

XIII. Zona de Deslizamientos 3

En esta zona se identificaron dos deslizamientos, que se presentan más definidos en cuatro interferogramas de los 28 que conforman el stack, los dos se encuentran en la vereda Tíntoba de Jericó, aproximadamente en la coordenada 72°33’39” W 06°09’39” N. Como se puede ver en la

Ilustración 58 la zona contiene dos deslizamientos, el deslizamiento de la izquierda que cubre un área de 146 Has aproximadamente y el deslizamiento de la derecha que cubre un área de 124 Has, ambos con alturas entre los 2.150 msnm y los 3.250 msnm.

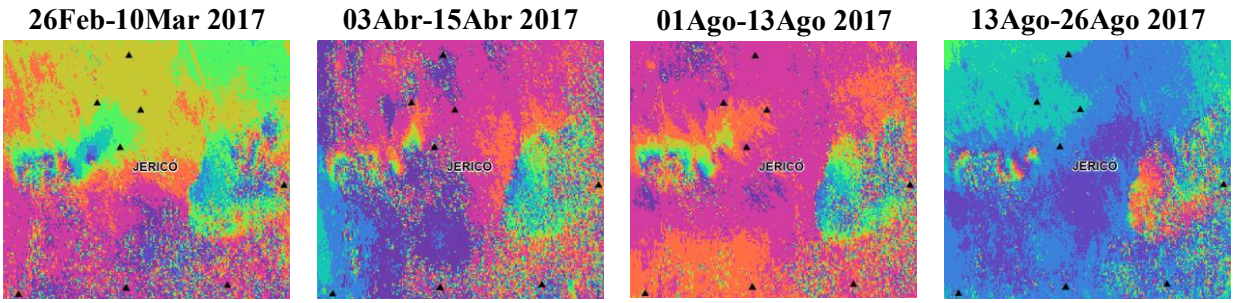


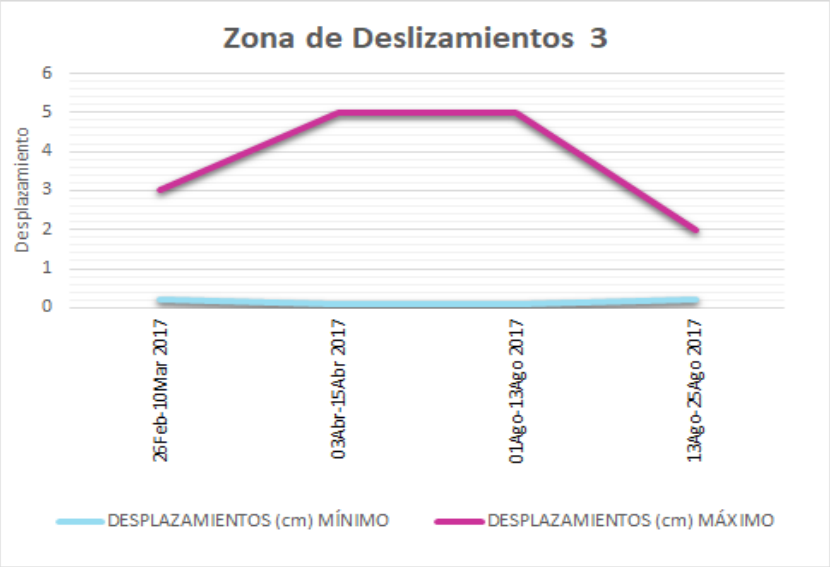
Ilustración 58. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 3. Fuente. Elaboración propia

A pesar de ser dos patrones de deslizamiento, ambos presentan valores similares de desplazamiento y las mismas características generales, por lo que a continuación se describe el conjunto de la zona presentada en la *Ilustración 58.* Las coberturas presentes allí son: Afloramientos rocosos, Bosque plantado, Mosaico de cultivos y Bosque alto abierto de tierra firme y la precipitación más alta se presenta en los meses de Abril a Mayo y de Septiembre a Octubre, con valores entre 150 y 200 mm. En relación con el inventario de deslizamientos es importante mencionar tres deslizamientos ocurridos en el año 2011 que causaron daños a tres veredas de Jericó, en las que se incluye Tíntoba. Los deslizamientos se presentaron en la época de invierno de Abril y fueron de tipo compuesto, entre rotacional y traslacional, según el reporte hecho por la Universidad Industrial de Santander UIS y la entidad de Vigilancia de Salud Pública de Jericó.

Teniendo en cuenta el tipo de coberturas y las épocas de lluvias, se puede concluir que la zona es más propensa a deslizamientos cuándo existen cultivos y ausencia de vegetación, ya que, como se ha evidenciado en repetidos casos, el suelo se satura de agua debido al invierno y se empieza a desprender la cobertura, complementariamente es válido resaltar la presencia de las quebradas

Carbonera y Zanjón Llanteras y varios cuerpos de agua de tipo intermitente, que pueden presentar crecientes en aquellas épocas de invierno y aportar a la inundación de los suelos.

Respecto a la *Gráfica 15* podemos ver que no existe una tendencia sobresaliente de acuerdo a los valores de desplazamiento, sin embargo, se puede decir que los valores más altos se presentan en los meses de invierno o cerca a ellos. Estos valores rondan en los mínimos entre 1 mm y 2 mm y en los máximos entre 2 cm y 5 cm, siendo en comparación a otras zonas, valores constantes y sin atípicos.



Gráfica 15. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 3. Fuente. Elaboración propia

XIV. Zona de Deslizamientos 4

Esta zona de deslizamientos se encuentra en la vereda el Juncal en el municipio de Jericó, con coordenadas aproximadas 72°35’49” W 06°10’04” N. Cubre un área aproximada de 830 Has y presenta variación de alturas entre los 2.250 msnm y dos picos de montaña con alturas de 2.500 msnm y 3.050 msnm. El patrón de deslizamientos se puede identificar de manera definida en seis interferogramas, sin embargo, su forma cambia en casi todos los interferogramas, como se puede ver en la *Ilustración 59.*

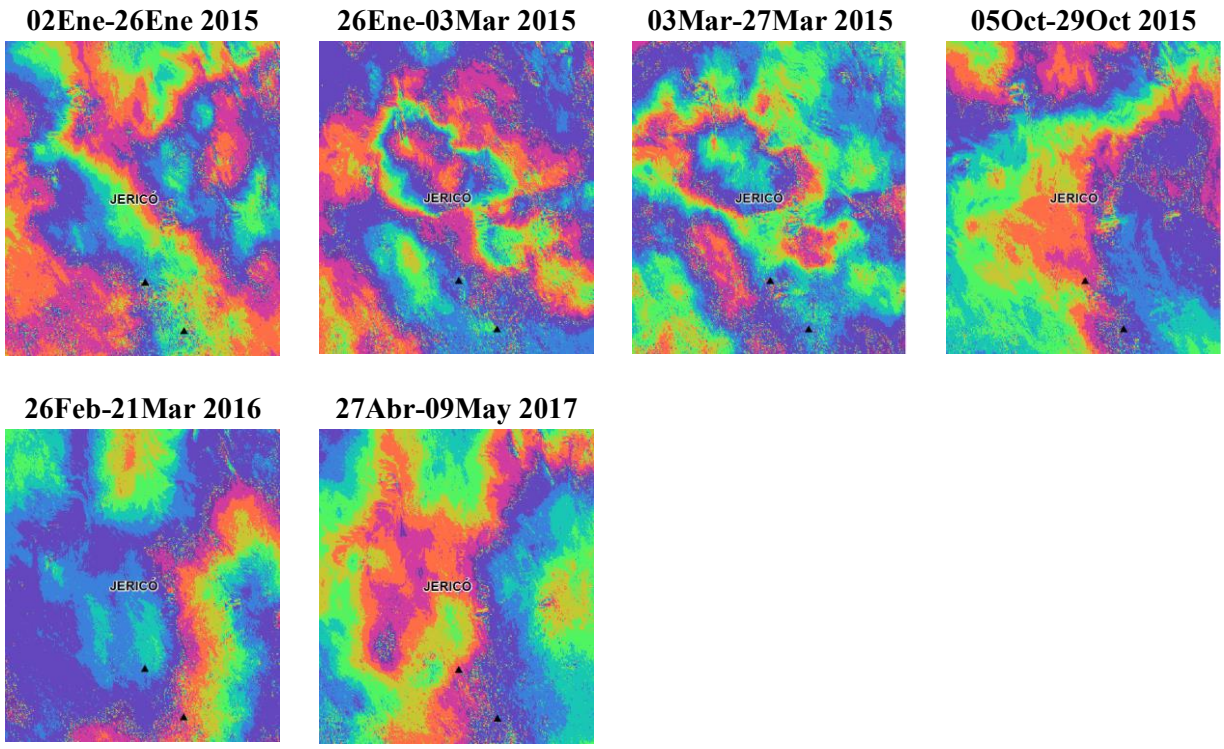
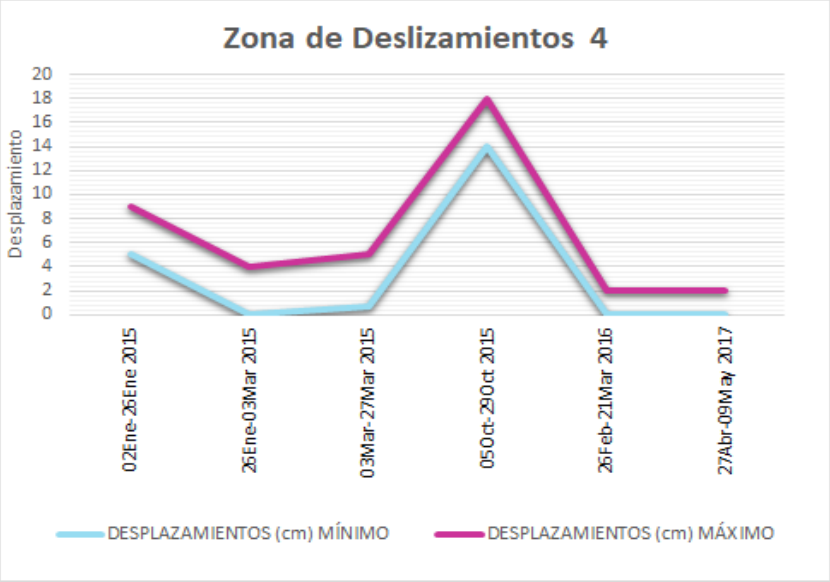


Ilustración 59. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 4. Fuente. Elaboración propia

En esta zona se presentan tres coberturas predominantes: Bosque abierto alto de tierra firme, Herbazal denso de tierra firme y Tierras desnudas o degradadas, además se encuentra cerca al centro urbano de la vereda el Juncal y por su interior pasan las quebradas el Juncal, Zanjón Tortuga y Bebedero, de las que se desprenden varios cuerpos de agua de tipo intermitente. Se presenta régimen bimodal de lluvias en los meses de Abril y Octubre con valores máximos de precipitación de 100 a 150 mm. Conforme al inventario de deslizamientos, existe un antecedente de deslizamiento en la zona cercana al centro urbano. Este evento ocurrió, según el reporte de INVIAS, en el mes de Febrero del año 2006 y presentó dos movimientos, un deslizamiento de tipo traslacional y un deslizamiento con flujo de lodos.

En relación con la *Gráfica 16,* podemos decir que existe variabilidad en los valores de desplazamientos, presentando picos en valores de 9 a 18 cm y con valores mínimos constantes de 0,08 mm a 1 mm. En el interferograma del 5 al 29 de Octubre se presentaron valores máximos de

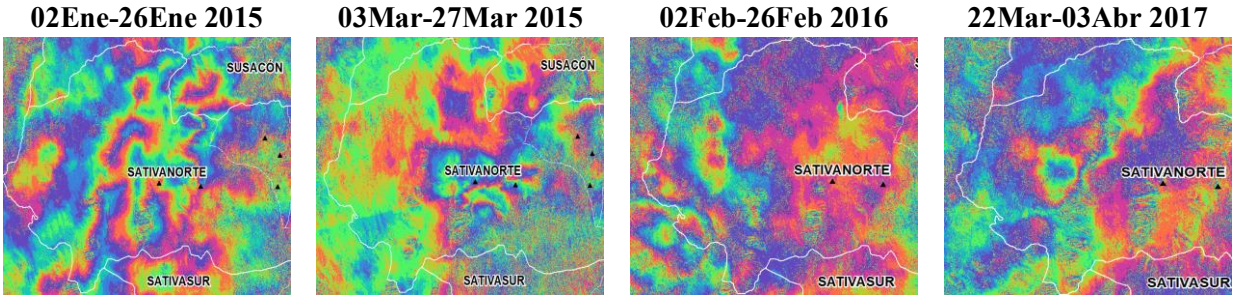
18 cm y mínimos de 14 cm, justamente en época de invierno en esta zona. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que la zona presenta baja estabilidad debido a la alta presencia de tierra desnuda o degradada, ya que, al no tener vegetación alguna, el terreno se vuelve más susceptible a deslizamientos de flujo de escombros o rocas, en épocas de invierno.



Gráfica 16. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 4. Fuente. Elaboración propia

3.2.14. Zona de Deslizamientos 5

Esta zona se ubica al occidente del municipio de Sativanorte, en la vereda Tequita, en las coordenadas aproximadas 72°47’20” W 06°08’24” N, los patrones se presentan durante los primeros meses de los años 2015, 2016 y 2017 en diferentes zonas de la vereda en cuestión como se observa en la *Ilustración 60*.



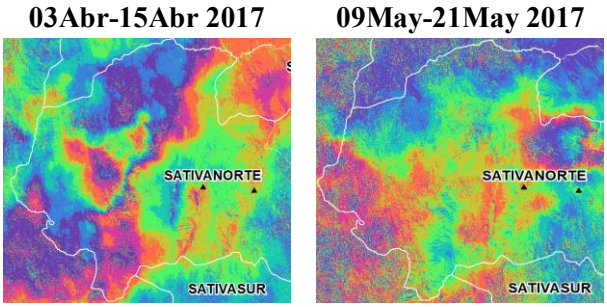
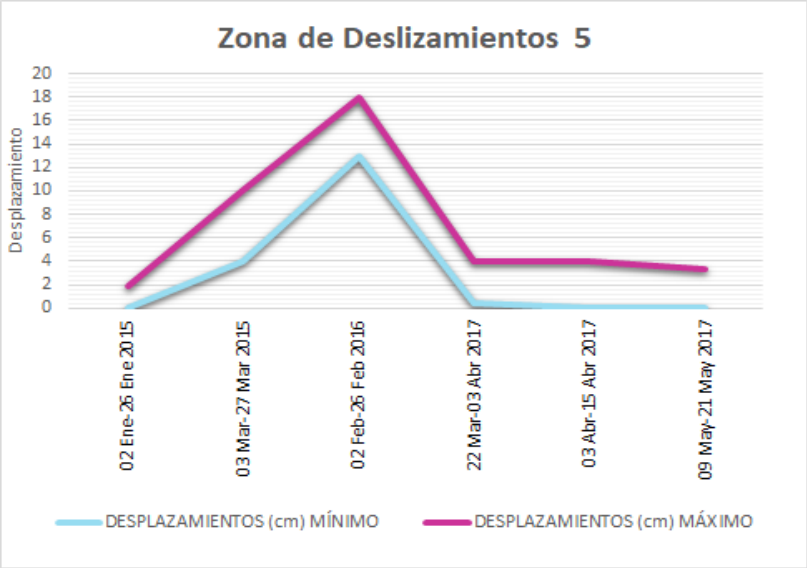


Ilustración 60. Patrones de franjas interferogramas enrollados, Zona de Deslizamientos 5. Fuente. Elaboración propia.

La vereda donde se presentan los patrones de franjas tiene alturas que varían desde los 2.600 hasta los 3.400 msnm, por lo que él relieve es de montaña y presenta altas pendientes. Las coberturas que se ubican en la vereda corresponden a herbazal denso de tierra firme no arbolado, zonas arenosas naturales, mosaico de pastos y cultivos, herbazal abierto arenoso y otras. Por otro lado, la vereda cuenta con la presencia de varios drenajes sencillos permanentes muy importantes, la zona por tanto tiene algunas características que indican susceptibilidad a deslizamientos.

Como se observa en la *Ilustración 60* los patrones de franjas se localizan en diferentes áreas de la zona en cuestión por lo que varían según su ubicación y la fecha en que se presenta, es importante mencionar que la precipitación en las fechas donde el patrón es visible varía desde los 50 hasta los 200 mm, en meses como abril y marzo la precipitación alcanza los 200 mm.

La *Gráfica 17* indica que los mayores valores de desplazamiento máximos se presentaron en los interferogramas del 03 de Marzo al 27 de Marzo de 2015 con un valor máximo de desplazamiento de 10 cm y del 2 de Febrero al 26 de Febrero de 2016 con un valor máximo de desplazamiento de 18 cm, los valores de precipitación en estas fechas fueron de 150 mm y 100 mm respectivamente. Por otro lado, los valores de desplazamientos mínimos de la zona no fueron inferiores a 0,02 mm.



Gráfica 17. Valores de Desplazamiento Zona de Deslizamientos 5. Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con el inventario de deslizamientos, veredas como Tequita presentan de manera constante movimiento de remoción en masa, reptación y pequeños deslizamientos, de igual forma se indica que los deslizamientos, caída de rocas y bloques involucrados en el material, reptación y erosión se presentan en la zona más productiva del municipio, por lo que veredas como Tequita se encuentran en amenaza por remoción en masa debido a factores como la geología, pendientes, factor hídrico y acción antrópica.

9.3.Análisis con estaciones continuas GPS

El análisis con estaciones GNSS tuvo como objetivo principal verificar los valores de desplazamiento generados a partir del procesamiento realizado con interferometría diferencial de radar, por lo que fue necesario utilizar las estaciones de la red MAGNA ECO del IGAC cercanas a la zona de estudio, estas estaciones realizan un rastreo continuo dado que reciben información satelital en tiempo real y forman parte de la Red SIRGAS "Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas" de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON). El IGAC cuenta con 46

estaciones a lo largo del país, la información de las estaciones es procesada semanalmente por los centros locales de procesamiento de SIRGAS, los cuales generan coordenadas de precisión milimétrica (X, Y, Z) y esta información rastreada es publicada por el IGAC en el formato universal RINEX, el cual contiene los datos GPS de cada estación continua.

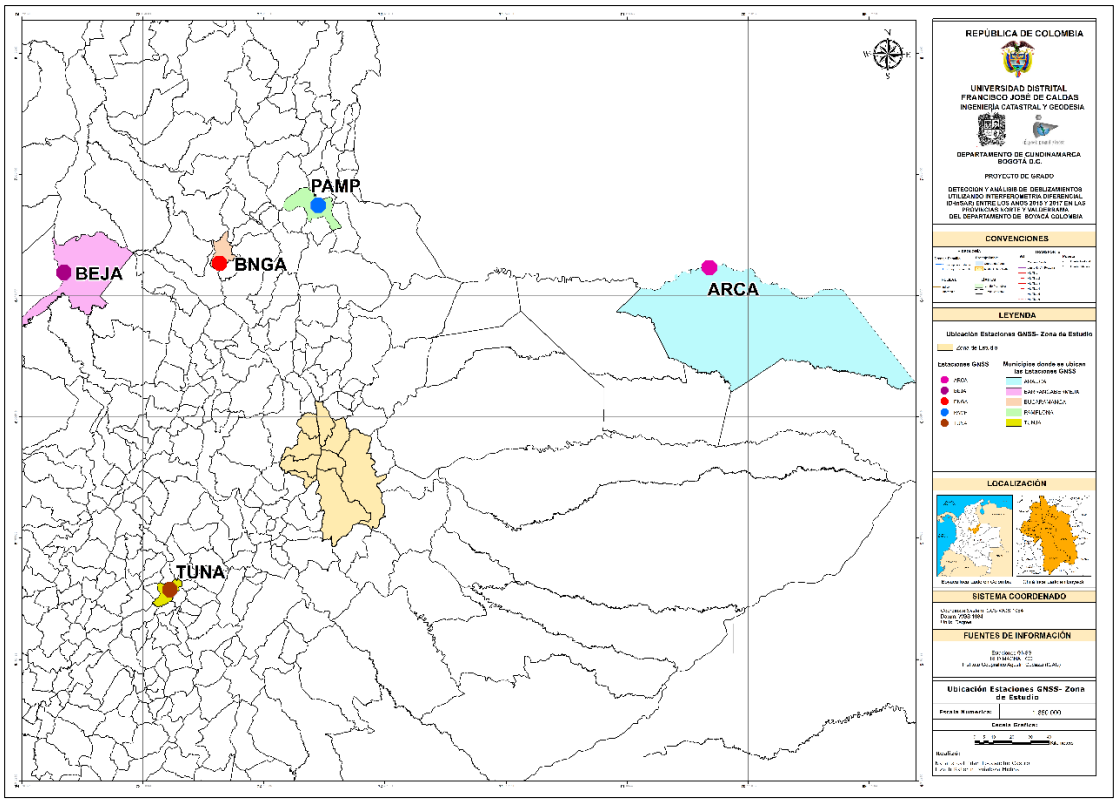


Ilustración 61. Ubicación de las estaciones GNSS con respecto a la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia

Las estaciones continuas cercanas a la zona de estudio son cinco (5): ARCA, BEJA, BNGA, PAMP y TUNA, las cuales se ubican en Arauca, Barrancabermeja, Bucaramanga, Pamplona y Tunja respectivamente, como se muestra en la *Ilustración 61*.

Fueron solicitados al IGAC los datos RINEX de las anteriores estaciones para el periodo de tiempo establecido en este proyecto, por lo que fueron suministrados alrededor de 767 archivos, con los cuales se conoció la altura (coordenada Z) de las estaciones antes y después de las fechas de los interferogramas con la versión de prueba del software Topcon Tools. Asimismo, se hallaron

las alturas a las que se encuentran los picos de las montañas del área de estudio y la altura de las zonas donde se encuentran los drenajes, a partir de la cartografía base suministradas por el IGAC, estas alturas se mantienen estables a través del tiempo por lo que contribuyeron a tener más información en la zona, debido a que las estaciones se encuentran lejanas al área de estudio.

Con los datos mencionados, se buscaba realizar interpolaciones en la zona para cada conjunto de datos de las estaciones GNSS antes y después de los 28 interferogramas escogidos para este estudio y la información de alturas de los drenajes y picos de las montañas, los cuales eran los mismos para cada conjunto de datos. Luego de realizar las interpolaciones se obtuvieron las diferencias entre ellas antes y después de cada interferograma para así saber los cambios de altura en la zona y posteriormente hacer la validación con los mapas de desplazamiento obtenidos mediante interferometría diferencial.

Los resultados logrados mediante interpolación para las alturas antes y después de uno de los interferogramas fue el siguiente:

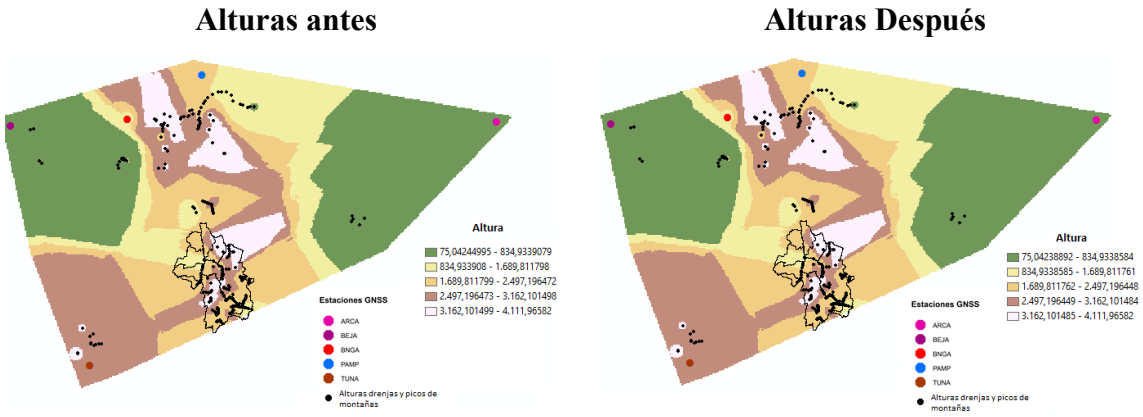


Ilustración 62. Ejemplo de interpolación para un conjunto de datos de datos GNSS antes y después con alturas constantes- Zona de estudio. Fuente. Elaboración propia.

Las diferencias obtenidas a partir de las interpolaciones resultantes como se evidencia en la *Ilustración 63*, es la siguiente:

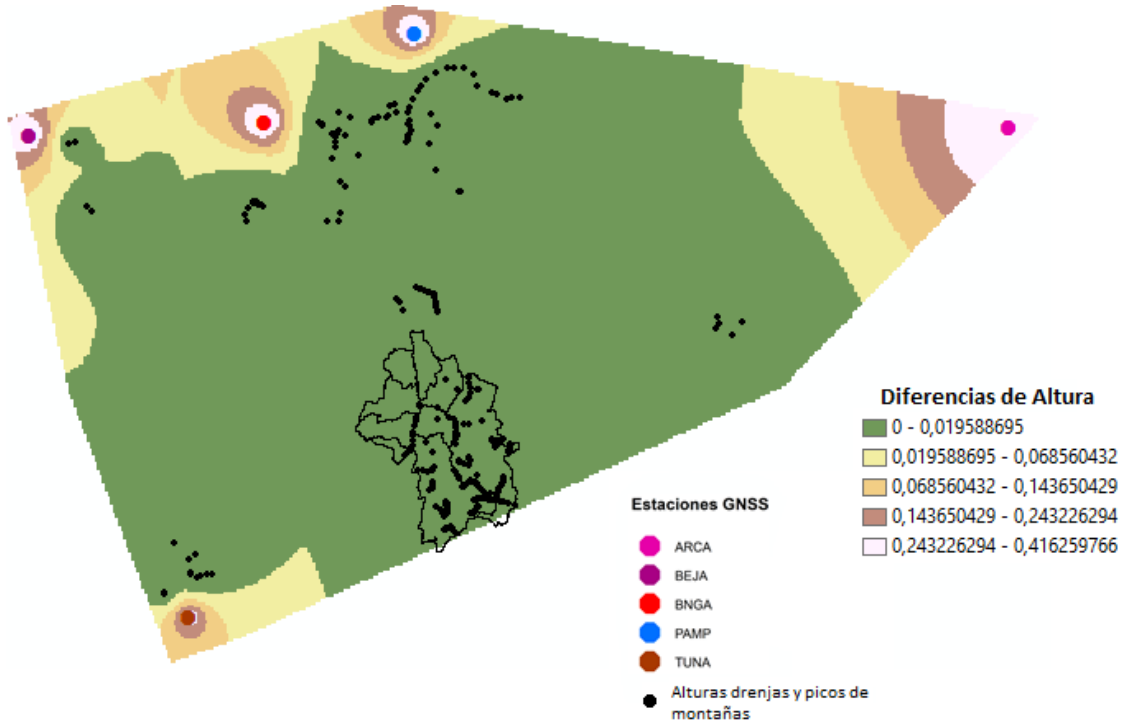


Ilustración 63. Ejemplo diferencia de alturas a partir de las interpolaciones antes y después de las fechas de un interferograma utilizando datos GNS y alturas constantes. Fuente. Elaboración propia.

Es posible observar en la *Ilustración 62* y la *Ilustración 63* que las estaciones se encuentran bastante alejadas de la zona de estudio, por lo tanto al realizar la interpolación estas ejercen influencia sobre las zonas cercanas a las mismas, mientras que las alturas de drenajes y picos de las montañas ubicadas en la zona de estudio presentan influencia en el momento de la interpolación, es por esto que al realizar la diferencia de alturas, estas solo se ubican alrededor de las estaciones y en la zona de estudio las diferencias serán las mismas debido a que las alturas son iguales para todos los casos y la zona no es sensible a los cambios de las alturas encontradas en las estaciones en las fechas antes y después de cada interferograma.

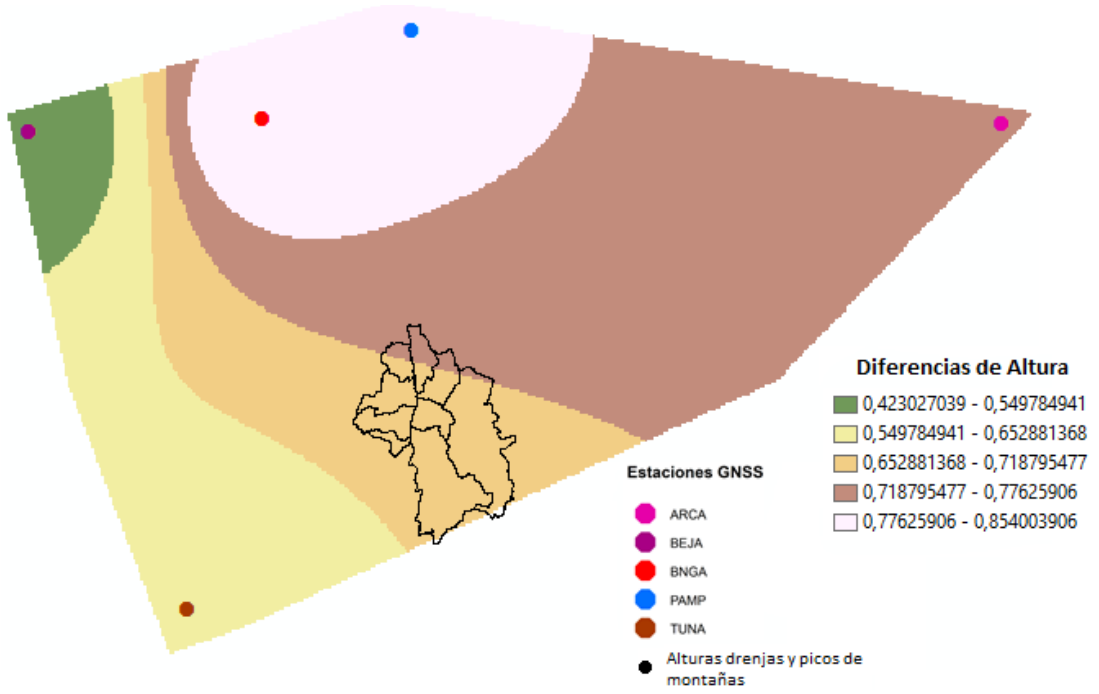


Ilustración 64. Ejemplo diferencia de alturas a partir de las interpolaciones antes y después de las fechas de un interferograma utilizando solamente datos GNSS. Fuente. Elaboración propia

Por otro lado, como se muestra en la *Ilustración 64* se intentó realizar la interpolación y por tanto el cálculo de las diferencias, contando solo con los datos de las estaciones GNSS, sin influencia de las alturas de los picos de las montañas y los drenajes, sin embargo los resultados son muy generales para la zona de estudio, debido a la distancia de las estaciones con los municipios, por lo tanto la comparación con el mapa de desplazamiento obtenido por medio de interferometría diferencial no tuvo mucho sentido.

En correspondencia con los resultados previos conseguidos para varias de las interpolaciones con los datos suministrados por el IGAC, se resalta la importancia de estaciones continuas con datos GPS más cercanas a la zona de estudio o dentro de la misma para analizar la calidad de los productos obtenidos por medio de interferometría diferencial y para analizar los desplazamientos o movimientos que se pueden generar en la zona dada la correlación de patrones de franjas

mostrada durante este proyecto con las fallas geológicas y deslizamientos, lo cual daría certeza de movimientos activos o desplazamientos constantes en el área de estudio.

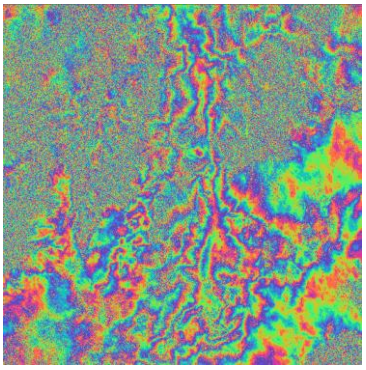
9.4.Comparación de interferogramas de diferentes zonas del país

A continuación, se presentarán interferogramas de diferentes zonas de Colombia, para poder realizar una comparación con base en parámetros como Línea Base Perpendicular (LBP), Línea Base Temporal (LBT), Coherencia (teniendo en cuenta que las imágenes son banda X de RADAR) y mejor calidad visual de patrones interferométricos, en relación con tipos de cobertura y clima. Para realizar este análisis se escogieron los tres mejores interferogramas generados para la zona de estudio, un interferograma de la ciudad de Bogotá del año 2016, un interferograma de la Guajira del año 2017, uno del Nevado del Cocuy y seis de la Mesa de los Santos, municipio de Santander.

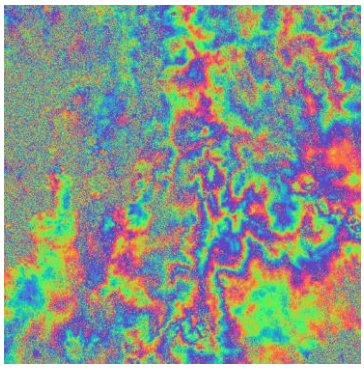
9.4.1. Zona de estudio

La zona de estudio que se ha definido en el proyecto, se compone de nueve municipios pertenecientes al departamento de Boyacá que hacen parte de la cuenca media del Río Chicamocha y por lo tanto componen el Cañón del Chicamocha. Como anteriormente ya se ha hablado de las características generales de la zona, no se hará énfasis en esto, sino únicamente en los parámetros a comparar.

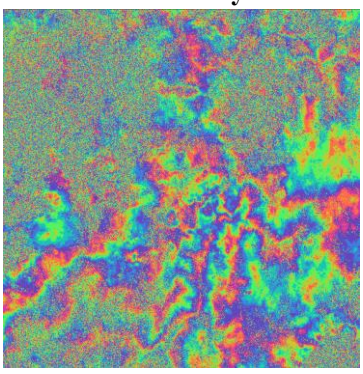
2 Enero - 26 de Enero 2015



26 Febrero - 21 Marzo 2016



27 Abril - 9 Mayo 2017



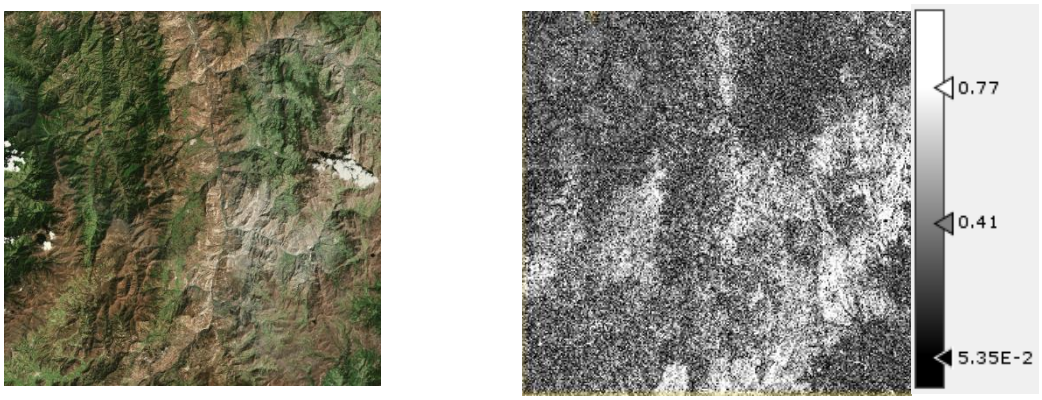


Ilustración 65. Mejores interferogramas de la zona de estudio, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018)

Los interferogramas escogidos cuentan con los mejores valores de coherencia general, los cuales son cercanos a 0,95, sin embargo, en la zona de estudio específicamente se cuenta con valores de 0,6 a 0,7, que aun así y como se menciona en la sección *6.5.2.*, clasifica a los interferogramas como buenos para trabajar. Complementario a esto los interferogramas poseen LBP de 21, 15 y 48 m (en orden cronológico) lo que permite clasificarlos como buenos, ya que con base en lo desarrollado en el proyecto se ha logrado caracterizar el uso de las imágenes Sentinel 1 para interferometría y uno de los parámetros que se encontró que cambia drásticamente, en comparación con imágenes ERS y TERRASAR, es la LBP que para Sentinel 1 presenta mejores resultados cuanto más se acerque a los 15 m. En cuanto a LBT los tres interferogramas cuentan con valores bastante buenos, siendo el mejor el del año 2017 con 12 días, mientras que los otros dos tienen 24 días.

La zona de estudio cuenta con un factor a favor muy importante para realizar estudios interferométricos, que corresponde al tipo cobertura que presenta, ya que como se puede ver en la imagen satelital óptica de la *Ilustración 65* tiene bastante terreno desprovisto de vegetación, lo que permite que existan altos valores de coherencia y por tanto buenos resultados interferométricos. Esto se puede confirmar al visualizar la imagen de coherencia, que muestra en las zonas de

montaña con menos vegetación, tonos blancos, mientras que, en las zonas con mayor cantidad de vegetación, tonos oscuros. Por otro lado en la mayor parte del territorio que ocupan los nueve municipios son clasificados, según la Zonificación Climática (Corpoboyacá, 2016), como **Frío seco** predominantemente y **Templado seco** específicamente en el área que cubre el Cañón del Chicamocha, en cuanto a precipitación promedio anual, la zona presenta una de las precipitaciones más bajas con valores entre 1000 y 1500 mm, sin embargo debido a su clasificación geomorfológica de tipo de relieve, Montaña Estructural Erosional, es bastante afectada por Erosión Laminar (escurrimiento difuso) principalmente en laderas sin vegetación y por Erosión Hídrica.

9.4.2. Bogotá D.C.

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en el Centro del país, en la cordillera oriental, es la capital del país y tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente, su temperatura promedio es de 14°C y presenta dos temporadas de lluvia al año, específicamente en los meses de Marzo a Mayo y de Agosto a Noviembre. (Alcaldía de Bogotá D.C., 2017)

Para fines de la comparación se usará un interferograma proporcionado por (Guerrero & Hernández, 2017) quienes en su proyecto de grado seleccionaron el interferograma del 11 al 17 de Octubre de 2016 como uno de los mejores. Como se puede ver en la *Ilustración 66*, este interferograma posee alta coherencia, ya que presenta valores que rondan el 0,9 en la zona urbana y valores entre 0,4 y 0,6 en las zonas circundantes. Es importante recordar que este parámetro en zonas urbanas siempre es bastante alto debido a que la cobertura presenta poca variabilidad. Las coberturas presentes alrededor del casco urbano también permiten tener una buena coherencia, con valores medios, por lo que es posible identificar patrones de franjas interferométricas a simple

vista. Esto se ve principalmente en la zona de los Cerros Orientales en la que debido a que no se sustrajo el aporte de fase por topografía, se presentan más estos patrones.

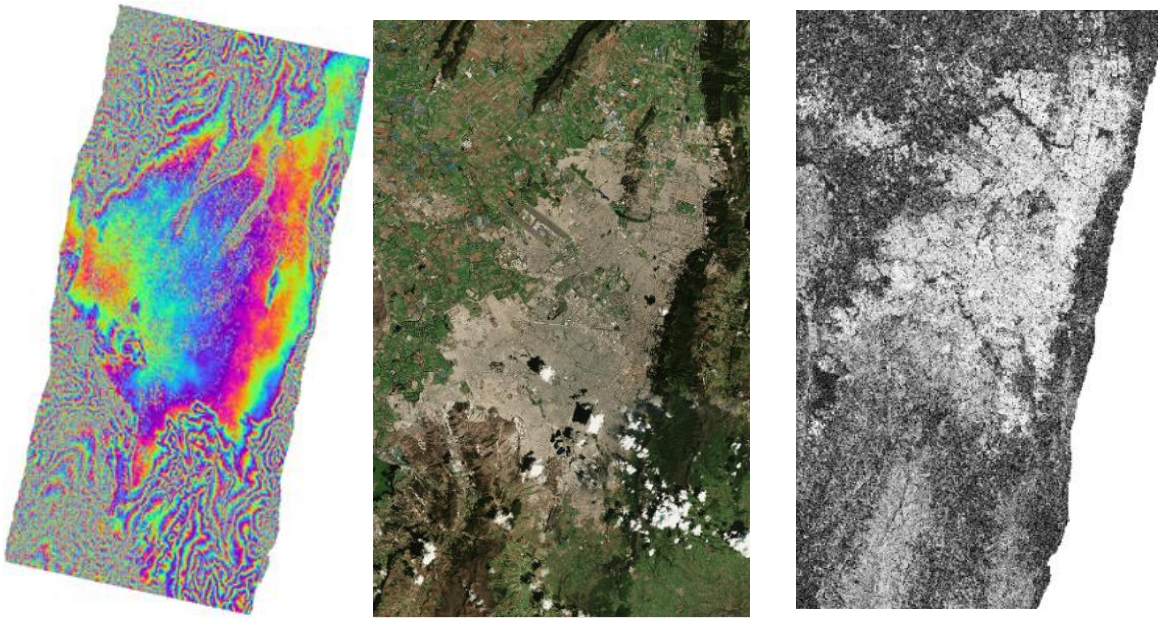


Ilustración 66. Interferograma Bogotá, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (Guerrero & Hernández, 2017), (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018)

Para terminar, es importante decir que la imagen cuenta con una LBT de 6 días, hecho que incrementa su calidad de manera general y que en comparación con los valores de LBT de los interferogramas de la zona de estudio, es mucho mejor. El valor de LBP no fue posible incluirlo en este análisis, pero es importante mencionar que el interferograma fue creado a partir de imágenes Sentinel 1B, por lo que seguramente tendrá valores cercanos a los mencionados anteriormente.

9.4.3. Riohacha

El municipio de Riohacha es la capital del departamento de La Guajira, se encuentra ubicado sobre la costa Caribe en el centro del Departamento. En este municipio la mayor parte del territorio se compone de zonas áridas y semiáridas que presentan bastantes problemas por erosión,

ocasionada por los fuertes vientos y arrastre en los cortos períodos de invierno que ocasionan lluvias de corta frecuencia, pero de alta intensidad. Según CORPOGUAJIRA, el clima de la región se caracteriza por presentar escasas precipitaciones con valores de 150 mm al año, temperaturas promedio de 32ºC y vientos con velocidades que oscilan entre 20 y 40 Km/hora (Corpoguajira, 2014).

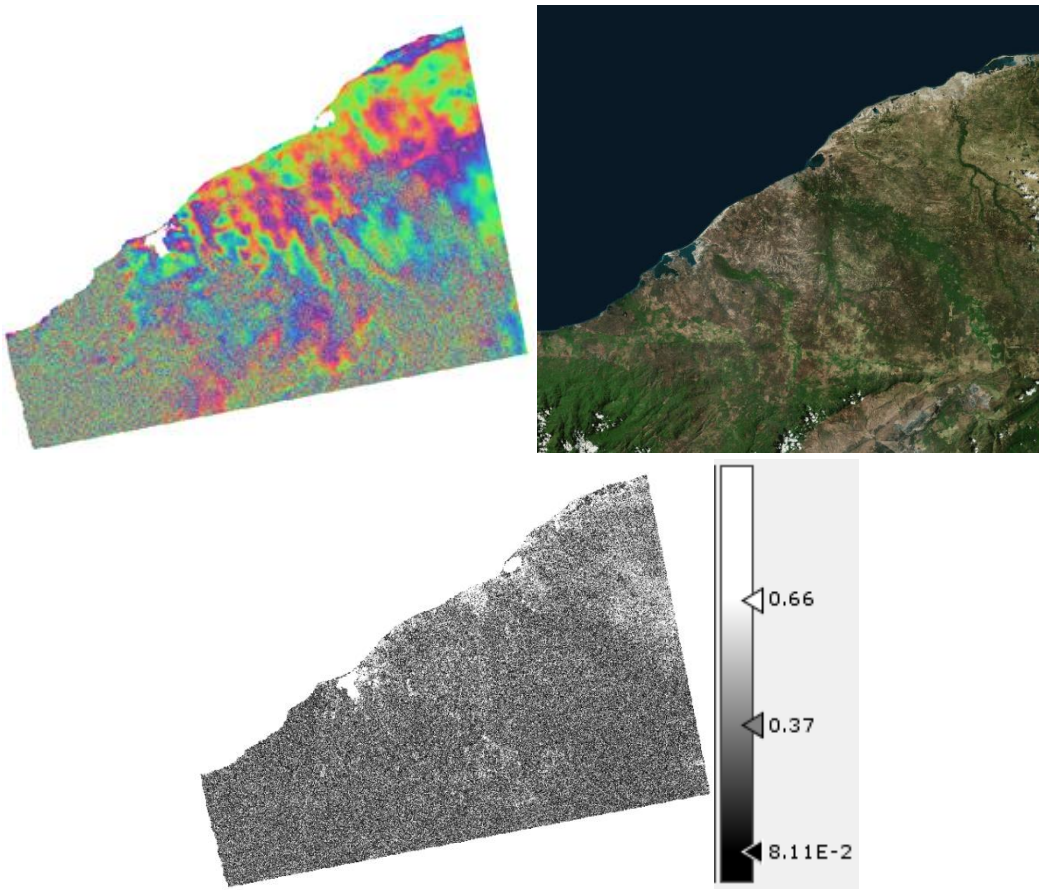


Ilustración 67. Interferograma Riohacha Guajira, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (Montaño & Orozco, 2018), (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018)

Este interferograma del 3 al 15 de Abril de 2017 presenta valores de coherencia entre 0,4 y 0,7, teniendo los mejores valores, las zonas con menor contenido de vegetación y los más bajos corresponden a la parte baja de la Sierra nevada de Santa Marta, ubicada en el extremo izquierdo. Su LBT es de 12 días y su LBP de 18 m, aclarando que también fue creado a partir de imágenes Sentinel 1B.

9.4.4. Nevado del Cocuy

El Nevado del Cocuy perteneciente al Parque Nacional Natural el Cocuy se encuentra ubicado en el límite departamental entre Boyacá y Arauca, con una extensión aproximada de 306.000 Has. Dentro de la jurisdicción del parque se encuentra la Sierra Nevada del Cocuy, Chita o Güicán una formación montañosa localizada sobre el norte de la cordillera Oriental en el departamento de Boyacá que consiste de dos subcordilleras paralelas orientadas de norte a sur con una longitud de aproximada 30 km. El parque cuenta con todos los pisos térmicos que se pueden hallar dentro del territorio colombiano, desde la selva húmeda ecuatorial a 700 msnm, por bosques de niebla entre los 1.500 y los 3.000 msnm, luego por la zona de páramo y súper páramo hasta los 4.200 msnm a las nieves perpetuas desde los 4.800 hasta los 5.330 msnm (Ministerio de Ambiente, 2002-2009).

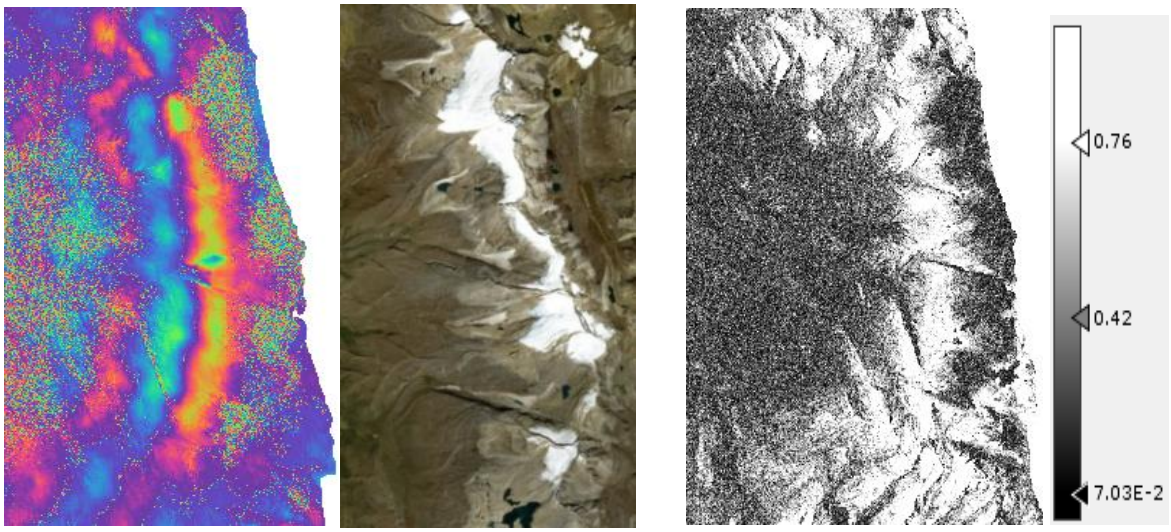


Ilustración 68. Interferograma PNN del Cocuy, imagen óptica y de coherencia. Fuente. (ESRI, DigitalGlobe & GeoEye,2018)

Para la comparación se escogió un interferogramas en el cual el Parque Nacional se visualiza muy bien, este corresponde al del 1 al 25 de Julio del 2017 y fue creado y trabajado en el presente proyecto. En cuanto a LBP este interferograma tiene un valor de 14,10 m, cercano al promedio de los interferogramas con mejores resultados de Sentinel 1 y su LBT es de 24 días. En este

interferograma es posible identificar muy bien la zona de ladera de montaña, ya que presenta gran uniformidad de colores, además posee los mejores valores de coherencia que rondan alrededor de 0,75 y 0,94. En la zona donde está presente la nieve, existen valores entre 0,3 y 0,5 de coherencia, marcando una diferencia importante con relación a la zona de montaña, sin embargo, se puede identificar de manera fácil en el interferograma. Es válido recordar que la interferometría es bastante usada para realizar monitoreo de cambios en hielo y en el manto de nieve de nevados y glaciares.

9.4.5. Mesa de los santos

Este municipio se encuentra ubicado al Oriente del Departamento de Santander sobre la Cordillera oriental, hace parte de la cuenca alta del Río Chicamocha, su territorio presenta en su mayoría tierras agrestes y rocosas con erosión crítica, especialmente en los farallones y laderas del Cañón, es una zona de escasa cobertura vegetal que se encuentra a una altura aproximada de 1310 msnm con temperatura promedio de 21°C.

Este municipio es reconocido en el mundo por su actividad sísmica permanente, tanto así que es considerado el segundo nido sísmico del mundo, después de la región del Hindu kush (Afganistán), y de acuerdo con Carlos Alberto Vargas, presidente de la Sociedad Colombiana de Geología y profesor del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional, la región registra hasta 40 movimientos telúricos diarios, aunque en magnitudes muy pequeñas. Según Vargas, aún no se ha logrado explicar por completo el porqué de los temblores diarios, pero la teoría más aceptada es que se debe a la presencia de la Placa Caribe, una placa litosférica de más de 100 km de espesor que subyace el norte de Colombia, pero que a su paso por La Mesa de Los Santos presenta un comportamiento anómalo “asociado a la propagación de una fractura o la transformación de su composición” (El Tiempo, 2015).

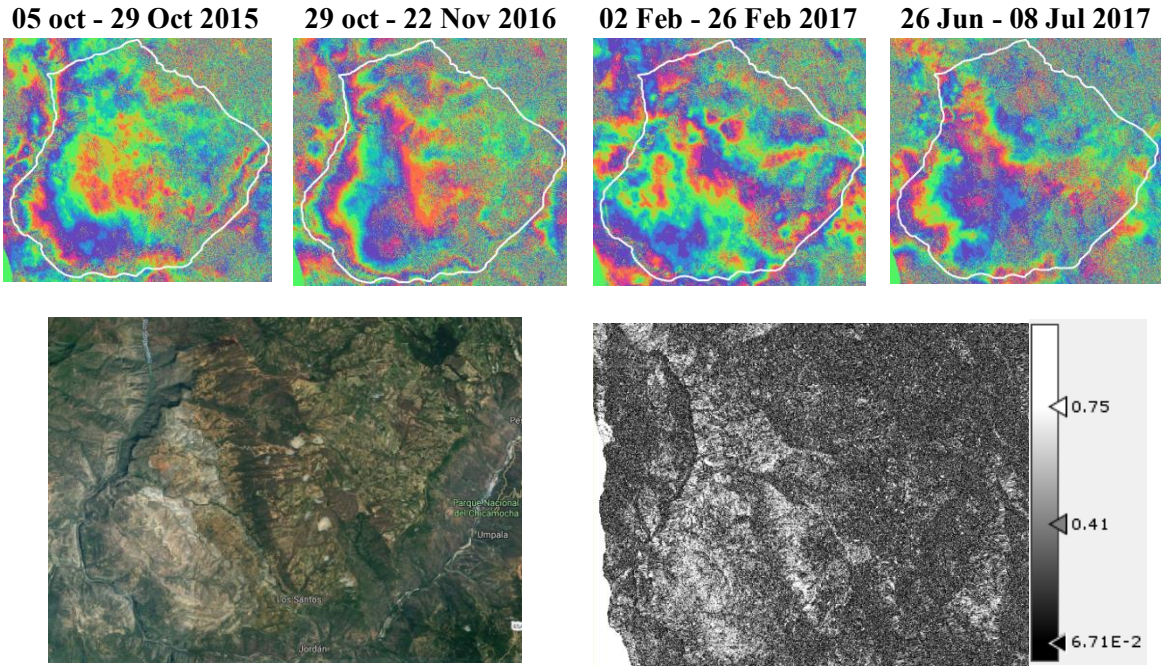


Ilustración 69. Interferogramas Mesa de los santos. Fuente. Elaboración propia.

En la *Ilustración 69* se puede ver en tono blanco el límite municipal de la Mesa de los Santos, que por el costado izquierdo se representa por el río Sogamoso y al sur lo separa del Parque Nacional Natural del Chicamocha. Como se mencionó anteriormente este municipio se encuentra en una zona bastante erosionada y desprovista de vegetación, hecho que contribuye a calidad de los interferogramas y su coherencia. Sus valores de coherencia rondan entre 0,4 y 0,8, siendo los más altos (0,5 y 0,85), los correspondientes al interferograma del 2 al 26 de Febrero de 2017.

De acuerdo al análisis realizado se puede concluir que al utilizar imágenes Sentinel 1 que trabajan en Banda C, se encuentra una gran limitación en su uso para interferometría en la presencia de vegetación (debido a la longitud de onda de la banda C, que no penetra en vegetación), ya que en todos los casos, pero especialmente en los de Bogotá y la zona del Cañón del Chicamocha los valores de coherencia fueron bastante altos debido a que las coberturas eran principalmente roca y construcciones, que presentan cambios mínimos. Es por esto que, aunque la interferometría es de gran utilidad para identificar deslizamientos, hundimientos y monitoreo de

cambios, entre otros, la banda del espectro que maneje la plataforma satelital es determinante para saber en qué zonas es posible trabajar con valores altos de precisión.

9.5.Series de Tiempo

Es importante mencionar que las series de tiempo fueron generadas mediante el software SNAP, ya que se presentaron bastantes problemas con el módulo de interferometría de ERDAS Imagine y no se pudo realizar el proceso. Sin embargo, se implementó un análisis basado en la detección de cambios de coherencia a través de los veintiocho interferogramas del stack escogido, que se explica a continuación.

El siguiente análisis se realizará con base en series de tiempo generadas a partir de información de los mapas de coherencia, para cada uno de los municipios. Estos mapas se obtuvieron en el proceso de creación del interferograma, ya que SNAP Toolbox crea simultáneamente una banda de tipo ráster con los valores de coherencia. Estos valores de coherencia varían de 0 a 1 y de acuerdo con (Austin & Beacon, 2004) y (Herrera, 2017) los interferogramas se pueden clasificar según su valor de coherencia, así:

- Entre 0 y 0,2 no utilizable (pérdida total de coherencia);
- entre 0,3 y 0,5 es utilizable pero ruidosa;
- entre 0,5 y 0,7 es buena;
- entre 0,7 y 1 es excelente.

Las series de tiempo se obtuvieron a partir del módulo “Time Series” del software SNAP versión 6.0, esta herramienta únicamente permite el ingreso de datos tipo SAR si están dentro de un Stack corregistrado, ya que es necesario que los productos estén alineados de acuerdo a su órbita y track para poder realizar la comparación simultánea de los valores de coherencia en cada

banda del stack. La comparación se puede realizar por valores de píxel o calculando la media y la desviación estándar de un conjunto de píxeles dentro de un polígono definido. El resultado obtenido es una gráfica que tiene en su eje vertical los valores de coherencia y en su eje horizontal las fechas de los interferogramas, organizados temporalmente.

En la *Ilustración 70 s*e muestran las series de tiempo generadas a partir del cálculo de la media aritmética de los valores de coherencia al interior de los polígonos que representan el área geográfica de cada municipio.

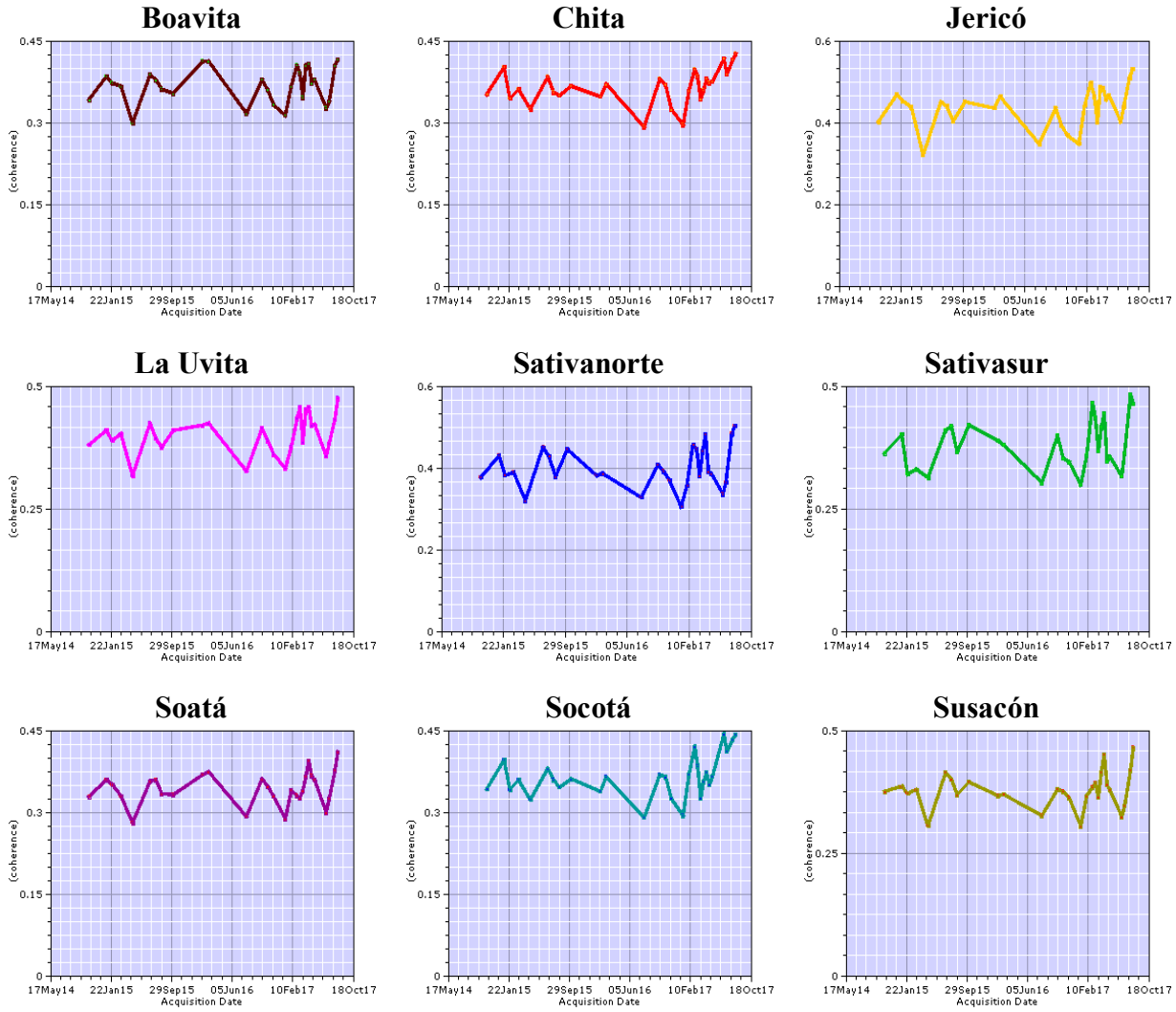


Ilustración 70. Series de Tiempo del mapa de coherencia realizadas para cada municipio de la zona de estudio. Fuente. Elaboración propia

En la *Ilustración 70* se puede observar que en todos los municipios se presentan los valores más bajos de coherencia en los interferogramas del 20 de Abril al 7 de Junio de 2015, del 21 de Marzo al 31 de Julio de 2016 y del 9 de Enero al 2 de Febrero de 2017 con valores alrededor de 0.3, estos valores con relación al valor de Coherencia Modelada proporcionado por la herramienta Stack Overview, tienen una alta correlación ya que en estas fechas la coherencia estuvo alrededor de 0.84 a 0.86, siendo estos los más bajos de todos los interferogramas.

Durante el año 2017 en los municipios Susacón, la Uvita, Jericó, Chita, Socotá y Sativasur se presentó un incremento del promedio de coherencia, con valores cercanos a 0.5 y 0.6. Así mismo, en todos los municipios se presenta el valor más alto de coherencia promedio en el interferograma del 13 al 25 de Agosto de 2017, lo cual se evidencia en el crecimiento abrupto del último valor de las series. Así mismo es posible ver un patrón muy similar en las series de todos los municipios, que nos puede indicar que la zona es bastante homogénea en cuanto a sus tipos de cobertura y por lo tanto sus valores de coherencia se mantienen parecidos.

Es muy importante tener en cuenta que los valores acá presentados son el resultado de un promedio de la coherencia para cada municipio y que, en la mayoría de los casos, los interferogramas presentaron coherencias alrededor de 0,8 en las zonas donde fue posible la identificación de patrones con mayor definición. Estas zonas por lo general estaban ubicadas en cañón del Chicamocha y en municipios como Jericó y Chita.

También se identificó que la serie que presentó los valores más bajos de coherencia fue la del municipio de Soatá al norte de la zona de estudio, con un intervalo de coherencia entre 0,27 y 0,42. Por otro lado al analizar el comportamiento de los dos municipios con mayor extensión, Chita y Susacón, se encontró que su coherencia promedio pudo verse afectada por la presencia de

vegetación frondosa, ya que sus valores fueron de 0,27 como mínimo y promedio de 0,37 para Chita y para Susacón de 0,3 como valor mínimo y 0,4 como promedio.

Por último, también se puede evidenciar que en los municipios Susacón, Sativanorte, Sativasur, la Uvita y Boavita se presenta un gran cambio de coherencia en el paso del año 2015 al 2016, que se ve representado en la diferencia de casi una décima, con cambios de 0.3 a 0.4 entre una o dos fechas.

10. CONCLUSIONES

En Colombia está técnica si puede ser implementada para mejorar la gestión del riesgo, ya que, con el cubrimiento total y el constante paso de los satélites por el país, resultaría económico realizar estudios como estos, los cuales además de proporcionar gran precisión, contribuyen al diagnóstico territorial en temas correspondientes con movimientos del terreno como deslizamientos, avalanchas, terremotos y demás. De igual forma estudios como estos, representan la oportunidad de realizar un seguimiento a las zonas que presentan fallas geológicas para conocer la dinámica del territorio y el estado actual de las mismas.

La técnica D-InSAR usada para realizar monitoreos, proporciona mejores resultados en aquellos casos en los que se utiliza una mayor cantidad de interferogramas, esto debido a que es más fácil explicar un evento y sus características, cuando se analiza en varias épocas, bajo condiciones distintas y constantemente. En consecuencia, para tener gran cantidad de interferogramas es necesario tener varias imágenes de Radar y su adquisición puede representar costos muy altos y volver inviable un estudio. Sin embargo, el uso de imágenes Sentinel-1 proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) representa una respuesta a ese obstáculo, ya que permite descargar imágenes SAR de manera gratuita y adicionalmente se pueden procesar por medio del software SNAP también gratuito y desarrollado por la ESA.

Las imágenes Sentinel 1 que proporciona la ESA por medio de la plataforma Copernicus Open Access Hub, arrojan muy buenos resultados en estudios interferométricos para Colombia, ya que su resolución temporal permite tener imágenes, en promedio cada doce días, de una zona ubicada en el Ecuador, hecho que contribuye bastante a tener altos valores de coherencia y por tanto buenos interferogramas. En cuanto a Línea Base Perpendicular, se obtuvo que, de los 40 interferogramas generados a partir de imágenes Sentinel 1, los mejores 28 correspondieron a valores de LBP que

rondaron alrededor de 15 y 18 metros, es decir que, contrario a los valores establecidos en interferometría con imágenes ERS y ALOS PALSAR, se alcanza un resultado óptimo con valores más pequeños. Sin embargo, la calidad del interferograma respecto a su coherencia depende en gran medida del tipo de cobertura predominante, ya que en zonas con vegetación abundante la coherencia es muy baja y en zonas con ausencia de vegetación o urbanas, es muy alta. Esto se debe a que la longitud de onda de la Banda C de Radar no alcanza a penetrar en vegetación, y esta cobertura presenta constantes cambios superficiales (incluso por factores climáticos como el viento) que se reflejan en un interferograma con bastante ruido.

Al realizar la comparación de los interferogramas se pudo evidenciar que, en las zonas de montaña con cobertura boscosa o vegetación frondosa, como por ejemplo al noroccidente del municipio de Susacón, al sur del municipio de Chita o la parte baja de la Sierra Nevada de Santa Marta, los interferogramas presentaron demasiado ruido e impidieron realizar alguna interpretación del terreno. Por el contrario, en la zona que corresponde al Cañón del Río Chicamocha, el municipio Mesa de los Santos y Riohacha, los interferogramas presentaron valores de coherencia de medios a altos que permitieron identificar muy bien patrones de franjas. Por último, es importante resaltar que en las zonas urbanas y específicamente en la ciudad de Bogotá, los interferogramas tienen los valores más altos de coherencia.

El módulo Coherence Change Detection de ERDAS Imagine 2017, no fue utilizado para obtener las series de tiempo debido a que presentó bastantes fallas en la mayoría de sus procesos, tales como: el ingreso de las imágenes Sentinel 1, el corregistro con todas las imágenes seleccionadas, la aplicación del Spectral Shift y por lo tanto la generación de la imagen que proporcionaba los cambios de coherencia a través del tiempo. Adicionalmente este módulo no era compatible con los resultados de los procesos de corregistro, creación de interferogramas y filtrado

generados a partir del software SNAP, por lo que realizaba un gasto doble de tiempo, memoria y máquina al volver a aplicar los procedimientos.

Las series de tiempo, desarrolladas con el módulo de SNAP Time Series Analysis, arrojaron resultados bastante interesantes en cada uno de los municipios, ya que permitieron comprobar cuáles fueron los mejores interferogramas en cada caso por medio del cálculo del valor promedio de coherencia y correspondieron, en la mayoría de los casos, con los resultados de detección de deslizamientos. Sin embargo, ya que realiza un promedio general de todos los valores de píxeles dentro del área de cada municipio, se logra afectar un poco el valor de la zona propiamente del cañón del Chicamocha, donde se presentaban los valores más altos de coherencia y por lo tanto, dónde se identificaron la mayoría de patrones de deslizamiento.

La aplicación de la técnica D-InSAR puede tener un gran complemento en el uso de estaciones continuas GPS, ya que permitirían realizar una validación de la calidad de los datos obtenidos y ayudarían a determinar las direcciones exactas de los desplazamientos. Así mismo, D-InSAR podría, mediante estudios preliminares, alertar sobre la posible deformación del terreno por presencia de fallas geológicas para que se realice un monitoreo constante con estaciones continuas GPS, también se podrían realizar estudios en el caso de ocurrencia de sismos y complementar con datos GPS monitoreos en zonas de constantes movimientos de ladera diagnosticados por la técnica, los cuales podrían ocasionar grandes deslizamientos, avalanchas y demás.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Distrital de Bogotá D.C. (2017). Información general de la ciudad de Bogotá D.C. Recuperado Enero 2018, de http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion

Alcaldía Municipal de Boavita. (2002). Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Boavita, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Chita. (2012). Plan de desarrollo de Chita, Boyacá. Chita. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/chitaboyacápd20122015.pdf

Alcaldía Municipal de Jericó. (2012). Plan de desarrollo del Municipio de Jericó Boyacá. Jericó. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/jericóboyacápd20122015_parte3.pdf

Alcaldía Municipal de Nuestra señora de Guadalupe de la Uvita. (2003). Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de la Uvita, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Sativanorte. (2000). Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Sativanorte, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Soatá. (2000). Documento Diagnóstico del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Soatá, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Socotá. (2004). Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Socotá, Boyacá.

Alcaldía Municipal de Susacón. (2013). Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Susacón, Boyacá.

Angarita, M. (2016). Deformation Processes in the Region of Chiles-Cerro Negro and Galeras Volcanoes using InSAR images. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Ardila, D., & Fajardo, A. (2015). ANÁLISIS SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN BOYACÁ. Recuperado de http://virtual.uptc.edu.co/memorias/index.php/sig/sig/paper/viewFile/1614/1613

Austin, A., & Beacon, P. (2004). Comparación de Modelos Digitales del Terreno realizados con diferentes técnicas IGM vs SRTM. Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de ftp://agrimensura.efn.uncor.edu/pub/trabajosfinales/Trabajo Final MARTINEZ GARCIA/Disco 1/09 - Bibliografía/MDE/Tesis IGM vs SRTM.pdf

Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones geográficas*, (41), 7-25.

Blanco, P. & Barreto, G. (2009). La Interferometría Diferencial D-InSAR – Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. Instituto Cartográfico de Cataluña, Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (DPAE) y Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE)

Blanco, P., Barreto, G., & Ortiz, D. (2010). La Interferometría Diferencial D-InSAR – Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D. C. (Conocimiento y Reflexión). Boletín de la Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Bohórquez, H. (2016). Subsidencia en zonas de minería en Boyacá. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Cabral, E., Solano, D., Wdowinski, S., & Chaussard, E. (2014). InSAR detection of Land subsidence in South American metropolitans. UNAVCO Science Workshop.

Casagli, C., Ferreti, G., & Righini. (2008). Case Study on Local Landslide Risk Management During Crisis by Means of Remote Sensing.

Castillo, N. (2016). Modelamiento Interferométrico de los volcanes Chiles y Cerro Negro. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Centro de salud nuestra señora de la natividad, E. social del estado. (2015). Análisis de situación

de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud. Jericó. Recuperado de https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis_2015/asis-jerico-2015.pdf

Chen, Q., Cheng, H., Yang, Y., Liu, G., & Liu, L. (2014). Quantification of mass wasting volume associated with the giant landslide Daguangbao induced by the 2008 Wenchuan earthquake from persistent scatterer InSAR. Remote Sensing of Environment, 152, 125–135. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.002

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid, España: Ediciones RIALP S.A.

Colesanti, C., Wasowski J. (2006). "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry." Engineering Geology 88(173-199): 28.

Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres CMGRD. (5 de Julio de 2013). Plan Municipal de Gestión del Riesgo - Municipio de Boavita, Boyacá.

Copernicus. (s.f.). Earth Observation Satellites - Copernicus In Brief. Recuperado de: http://www.copernicus.eu/

Corpoboyacá (2016). Capítulo II, Elementos del medio natural. Atlas Geográfico y ambiental del departamento de Boyacá. Boyacá, Colombia.

Corpoguajira (2014). Plan de Gestión Ambiental Regional. Guajira, Colombia. Recuperado de http://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments_Joom/article/57/PGAR.pdf

Departamento Administrativo de Planeación de Boyacá. (2011). Susceptibilidad del Departamento de Boyacá a Inundaciones y Deslizamientos, 38. Recuperado de https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/publicaciones/susceptibilidad_inundaciones.pdf

Ebmeier, S., Elliott, J., Nocquet, J., Biggs, J., Mothes, P., Jarrín, P., Yépez, M., Aguaiza, S., Lundgren, P., & Samsonov, S. (2016). Shallow earthquake inhibits unrest near Chiles–Cerro Negro volcanoes, Ecuador–Colombian border. Earth and Planetary Science Letters. (450), p.283-291.

El Tiempo. (2015). Vivir en La Mesa de Los Santos, el segundo nido sísmico del mundo. Recuperado de http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15372897

ESRI, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, & GIS User Community. (2018). World Imagery.

European Space Agency ESA. (s.f.-a). Radar de apertura sintética (SAR), EduSpace. Recuperado de: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMVKXF64RH_0.html

European Space Agency ESA. (s.f.-b). InSAR principles: Guidelines for SAR Interferometry processing and interpretation. Recuperado de:

http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19

European Space Agency ESA (2013). Sentinel-1 User Handbook. Recuperado de https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook

European Space Agency ESA (2015). SNAP (Version 5.0) Copyright © 2015 Array Systems Computing Inc. Recuperado de http://www.array.ca/ http://step.esa.int

European Space Agency (ESA). (2017). SNAPHU. Francia, Paris. Science Toolbox Exploitation Platform –STEP. Recuperado de http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/snaphu/.

Ferretti A., Massonet D., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F., 2007, InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA TM-19

Fournier, T., Pritchard, M., & Riddick, S. (2010). Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. (11)

Forigua, O. (2016). Introducción a la Percepción Remota de Radar. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Geospatial Information Authority of Japan (GSI). (2003). *Monitoring the Earth Deformation from Space.* Recuperado de http://web.archive.org/web/20151004232737/http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda-e.html#Q2-1

GlobeSAR & Natural Resources Canada. (s..f.). Introducción a la percepción remota mediante radar. Centro Canadiense de Percepción Remota, Ministerio de Recursos Naturales de Canadá.

Gong, W. ., Zhang, J. ., & Zhang, Y. . (2008). Ground Deformation Detection Along the Qinghai-Tibet Railway. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII(B6b), 4.

Guerrero, C., & Hernandez, P. (2017). Determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría SAR. Universidad Distrital F.J.C. Recuperado de http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5915/1/HernandezCardenasPaolaAndrea2017.pdf

Hanssen, R. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Delft University of Technology, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

He, L., Wu, L., Liu, S., & Su, C. (2014). Landslide Displacement Monitoring Using Multi-aperture InSAR and D-InSAR. PIERS Proceedings, 4.

Hexagon Geospatial. (s. f.-a). Differential InSAR — ERDAS IMAGINE Help — Documentation Portal. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/#/reader/~P7L4c0T_d3papuwS98oGQ/iTYzsgIytyIndRwn6CDT0w

Hexagon Geospatial. (s. f.-b). Radar Interferometry User Guide Contents — ERDAS IMAGINE Help — Documentation Portal. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/#/reader/~P7L4c0T_d3papuwS98oGQ/2jmZ38R51813yv3WciEjxw

Hexagon Geospatial. (s. f.-c). Differential InSAR — ERDAS IMAGINE Help — Documentation Portal. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de 21 https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/#/reader/~P7L4c0T_d3papuwS98oGQ/iTYzsgIytyIndRwn6CDT0w

Hexagon Geospatial. (s. f.-d). Radar Interferometry Concepts — ERDAS IMAGINE Help — Documentation Portal. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/reader/~P7L4c0T_d3papuwS98oGQ/ojWcZmp06z_Zkv_GraXz1Q

Hexagon Geospatial. (s.f.) Time Series CCD — ERDAS IMAGINE Help — Documentation Portal. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de

https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/#/reader/w8Z0hY0p3pUhCQJLApTTvw/iq7q1Rij~Q866v4h8c~cYA

Hill, E. (2001). Introducción a Interferometría de Radar INSAR. Spring, USA.

IDEAM, U. N. de C. (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. Recuperado a partir de http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745

IGAC, & UPTC. (2005). *Estudio General de Suelos y Zonifi cación de Tierras del Departamento de Boyacá*. Tunja. Recuperado de ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/users/apantoja/london/Colombia/Suelos/00_shape_suelos/PROYECTO_DNP/MEMORIAS_SUELOS_OFICIALES/BOYACA/94864-Suelos Tomo I.pdf

Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-mineras, I. (1986). Reconocimiento Geotécnico de los deslizamientos en las zonas rurales del municipio de Chita, Boyacá. Bogotá. Recuperado de http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/18920/1247.pdf?sequence=1

Instituto Nacional de Prevención Sísmica -INPRES. (n.d.). *Fallas Geológicas*. Argentina. Retrieved from http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas Geológicas.pdf

Irwin, T. (2017). Rapid, Robust Characterization of Subduction Zone Earthquakes. University of California Riverside. Recuperado de https://escholarship.org/content/qt92r3h83j/qt92r3h83j.pdf

Jensen, J. (2006). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.

Karszenbaum, H., & Barrazza, V. (s.f.). Introducción a la Teledetección Cuantitativa, Teledetección de Radar. Instituto de Astronomía y Física del Espacio IAFE, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Lira, J. (2002). Sistemas de Radar de Imágenes. Geofísica UNAM. Mexico.

Lowry, B., Gomez, F., Zhou, W., Mooney, M. A., Held, B., & Grasmick, J. (2013). High resolution displacement monitoring of a slow velocity landslide using ground based radar interferometry. Engineering Geology, 166, 160–169.

Lundgren, P., Samsonov, S., López, C., & Ordoñez, M. (2015). Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. Geophysical Research Letters. (42), p. 4816-4823.

Maitre, H. (2001). Traitement des images de RSO. Éditions Hermes Science Europe, Ltd.

Mangla, R., & Kumar, S. (2014). DEM Construction using DINSAR. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(8)*, 817-820.

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of geophysics, 36(4), 441–500.

Mayorga, T. M. (2013). *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética)*. Universidad Nacional de Córdoba. Cordoba, Ecuador.

Ministerio de Ambiente. (2002-2009). Parques Nacionales Naturales de Colombia: Parque Nacional Natural el Cocuy. Recuperado de http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/region-andina/parque-nacional-natural-el-cocuy-3/

Montaño, D. & Orozco, Y.. (2018). Interferograma 3 al 15 de Abril de 2017 de la Guajira, Colombia.

Mora, H., Chaussard, E., Wdowinski, S., & Cabral, E. (2013). Space Geodetic Techniques For Assessing Land Subsidence In Bogota City. XIV Congreso Colombiano de Geología. Bogotá, Colombia.

Morales, A., Amelung, F., & Mothes, P. (2016). Volcano deformation survey over the Northern and Central Andes with ALOS InSAR time series. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. (17), p. 2869-2883.

Naranjo, M. (2016). Módulo I. Fundamentos de Telecomunicaciones. Recuperado de: http://slideplayer.es/slide/5432396/

Panozzo, M. (2013). Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Parks, M., Biggs, J., Mather, T., Pyle, D., Amelung, F., Monsalve, M., & Medina, L. (2011). Co-eruptive subsidence at Galeras identified during an InSAR survey of Colombian volcanoes (2006-2009). Journal of Volcanology and Geothermal Research. (202), p. 228-240.

Pérez, C., & Mu oz, A. L. (2006). *Teledetección : nociones y aplicaciones*. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Teledetección.html?id=SfrGxbO1DT0C&redir_esc=y

Piedra, J. (2016). *Estudio de erupciones volcánicas a través de imágenes satelitales caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile*. Universidad Nacional de Córdoba.

Pritchard, M., & Fielding, E. (2013). *InSAR practical considerations.* Cornell University. Jet Propulsion. Ithaca, Nueva York USA.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), p. 333–382.

Sativasur, A. M. de. Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Sativasur (2001). Sativasur. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/acuerdo_urbano_sativasur_(34_pag_97_kb).pdf

Secretaria de salud de Boyacá, D. T. de S. P. (2014). Mapa de Riesgo de calidad del agua para consumo humano en el nacimiento el Robla, fuente abastecedora del casco urbano del municipio de Sativanorte-Boyacá. Recuperado de https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/Salud_Publica/Ano_2014/AGUA_CONSUMO_HUMANO/MAPA_RIESGO/MAPA DE RIESGO DE SATIVANORTE.pdf

Servicio Geológico Colombiano SGC. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Recuperado de http://www2.sgc.gov.co/Noticias/archivos/Guia-Metodologica-Servicio-Geologico.aspx

Servicio Geológico Colombiano SGC. (2017). Mapas Departamentales de Amenaza: Mapa de Amenazas por Movimientos en Masa 2015. Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/Im%C3%A1genes-de-amenazas-.aspx.

Seppi, S. (2016). Uso de Interferometría Diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia. Universidad Nacional de Córdoba.

Seymour, M., & Cumming, I. (1994). *Maximum likelihood estimation for SAR interferometry*. Pasadena, Canada: IEEE.

Skolnik, M. (1990). Radar Handbook. McGraw-Hill. Boston, Massachusetts.

Suarez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. (L. Silva & C. Acevedo, Eds.), Julio de 1998 (Ingeniería). Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS. Recuperado de http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html

Subdirección Nacional de Agrologia, I. (2016). De las 53 millones de hectáreas intervenidas en Colombia, el 61% presenta un uso inadecuado del suelo. Retrieved April 13, 2018, from http://noticias.igac.gov.co/es/contenido/de-las-53-millones-de-hectareas-intervenidas-en-colombia-el-61-presenta-un-uso-inadecuado

Tarbuck, E. & Lutgens, F., 2001: *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* [6ª ed.].- 540 págs. Prentice Hall, Madrid España.

UNGRD. (s. f.). Reporte de Emergencias. Recuperado 7 de mayo de 2017, a partir de http://www.gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/emergencias/temporada/Bitacora.aspx

Universidad de Murcia. (2003). Tema 3. Plataformas, sensores y canales. En Teledetección (p. 22). España. Recuperado de http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf

Universidad Nacional. (2010). Deslizamientos, producto de los cambios climáticos - UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado Septiembre 23 de 2017, de http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/deslizamientos-producto-de-los-cambios-climaticos.html

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC & Corpoboyacá. (2011). Determinación de zonas de amenaza y escenarios de riesgo por deslizamiento en el Municipio de Jericó, Boyacá.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC & Corpoboyacá. (2015). Determinación de zonas de amenaza y escenarios de riesgo por deslizamiento en el municipio de Jericó, Departamento de Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Recuperado de http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/941

Valle, H. (2010). Teledetección con Radar: Fundamentos de Radar y formación de la imagen. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) & Ecología Terrestre, Centro Nacional Patagónico (CENPAT). Punta Arenas, Chile.

Villa, L. (2016). Introducción a la Teledetección Radar y al Análisis Multitemporal. Recuperado de: http://luciovilla.blogspot.pe/2016/06/introduccion-la-teledeteccion-radar-y.html

Wang, C., Zhang, H., Shan, X., Ma, J., Liu, Z., Chen, S., Lu, G., Tang, Y., & Guo, Z. (2004). Applying SAR Interferometry for Ground Deformation Detection in China. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 70, No. 10, October 2004, pp. 1157–1165.

Zebker, H., & Chen, C. (2002). Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 1709–1719.