



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE DEFORMACIÓN  
DE LA SUPERFICIE TERRESTRE USANDO LA TÉCNICA DE  
INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA  
SINTÉTICA (DInSAR) EN LAS MICROCUENCAS DE POTOSÍ,  
CRISTAL, PECHICHE Y BALSAS, UBICADAS ENTRE LAS  
PROVINCIAS DE LOS RÍOS Y BOLÍVAR.**

**AUTOR: JUMBO SANTÍN, ROMMEL SANTIAGO**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO, PADILLA**

**CODIRECTOR: ING. LEÓN, FRANCISCO**

**SANGOLQUÍ**

**30 MARZO, 2015**

## CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla

Ing. Francisco León

Certifican:

Que el trabajo titulado **“CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE TERRESTRE USANDO LA TÉCNICA DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (DInSAR) EN LAS MICROCUENCAS DE POTOSÍ, CRISTAL, PECHICHE Y BALSAS, UBICADAS ENTRE LAS PROVINCIAS DE LOS RÍOS Y BOLÍVAR”**, realizado por el Sr. ROMMEL SANTIAGO JUMBO SANTIN, ha sido revisado prolijamente y cumple con todos los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Ing. Wilson Jácome, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (PDF).

Sangolquí, 30 de marzo del 2015

---

Ing. Oswaldo Padilla A.  
DIRECTOR

---

Ing. Francisco León  
CODIRECTOR

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Rommel Santiago Jumbo Santín

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “**CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE TERRESTRE USANDO LA TÉCNICA DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (DInSAR) EN LAS MICROCUENCAS DE POTOSÍ, CRISTAL, PECHICHE Y BALSAS, UBICADAS ENTRE LAS PROVINCIAS DE LOS RÍOS Y BOLÍVAR**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al final de los párrafos citados, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 30 de marzo de 2015

---

Rommel Santiago Jumbo Santín

## AUTORIZACIÓN

Yo, Rommel Santiago Jumbo Santín

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “denominado **“CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE TERRESTRE USANDO LA TÉCNICA DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (DInSAR) EN LAS MICROCUENCAS DE POTOSÍ, CRISTAL, PECHICHE Y BALSAS, UBICADAS ENTRE LAS PROVINCIAS DE LOS RÍOS Y BOLÍVAR”**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 30 de marzo de 2015

---

Rommel Santiago Jumbo Santín

## DEDICATORIA

*Para mis padres José y Gloria.*

*Para mis hermanos Mauri y Roger.*

*Para mis sobrinos Damaris, Camila, Josué y Polet.*

*Para mis Abuelos Peregrina y Segundo.*

*Rommel Santiago Jumbo Santín*

## AGRADECIMIENTO

Bueno ha llegado por fin el momento, la verdad es que desde que comencé este proyecto, pensaba en que escribir (pero ahorita todo se me olvido), ya que hay infinidad de personas que se han cruzado en mi trayecto para la realización de este proyecto del que estoy orgulloso e infinitamente feliz y al fin convertirme en ingeniero. Ha sido un camino largo, nada fácil ni difícil tampoco, con alegrías, triunfos, tristezas y decepciones como cualquier ser humano, por eso no sé si exista manera de agradecer a cada uno de ustedes ya que son culpables de esto y espero que estas líneas que escribo sean amenas para ustedes.

Primero comencare con un gracias Dios, al igual que con ¡un gracias y mil gracias...! a mis amados padres. A mi padre José que me enseñó y me sigue enseñando con su ejemplo, que el esfuerzo, sacrificio, perseverancia y sobre todo la confianza en uno mismo es fundamental para triunfar. A mi madre Gloria que con su amor y su apoyo incondicional ilimitado me han levantado de muchos momentos de decepciones y tristezas, que me han motivado seguir adelante siempre. No vale olvidar de sus encubrimientos, caprichos y aguantes a mi persona (eres única). Seguidamente a mis hermanos. A Mauri que con su apoyo, carisma, y sobre todo su alegría infinita, que nos han unido tanto, gracias por compartir tantos momentos conmigo. A Roger con su apoyo y a pesar de ser menor me ha demostrado tener ideas claras, también no vale olvidar agradecer por aguantar mis regaños, enojos y bromas, el cual nos ha unido mucho últimamente y no me quiero olvidar de mi tía Ermita que también ha sido como una madre muchas gracias por tu alegría impartidas.

Segundo quiero agradecer al Instituto Geográfico Militar (IGM), por darme la oportunidad de la realización de la tesis dándome todas las facilidades correspondientes. Al departamento de la Gestión de Investigación y Desarrollo,

donde me sentí tan a gusto y como en familia. También quiero agradecer a Alicia por impartirme sus conocimientos y especialmente a mis dos mentores Tcrn. Carlos Estrella y Erith Muñoz por su sabiduría, apoyo y sobre todo su amistad muchas gracias.

Quiero agradecer a todos los profesores de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por impartirme sus conocimientos, especialmente a mi Director Ing. Oswaldo Padilla, Codirector Ing. Francisco León y por iniciarme en este proyecto al Ing. Eduardo Kirby.

No me pienso olvidar a todos mis amigos/amigas que me han brindado su apoyo en estos años. Quiero comenzar con Ricardo que ha estado en los buenos y malos momentos en toda esta trayectoria, donde a pesar de las anécdotas que ha pasado y siguen pasando hemos formado un lazo de hermandad muy fuerte, ¡gracias por tu apoyo hermano! Seguidamente quiero agradecer a mis otros hermanos de la universidad Mario, Pablo, Byron, Mateo que con nuestras locuras desde siempre ha sido una trayectoria muy amena. Tranquilos que no me olvido de ustedes amigas/amigos que no son menos importantes al contrario los quiero bastante, a Yoli, Joha, Eri, Karlita, Diana. Gracias por brindarme todo su apoyo y aprecio

Gracias también a ti que no has visto tú nombre escrito en estas páginas y perdonas mi descuido te lo agradezco de corazón.

*“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”*

*Albert Einstein*



## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	xv
LISTA DE SIMBOLOS .....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT .....	xix
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes.....	4
1.3 Justificación e Identificación del Problema .....	8
1.4 Objetivo.....	9
1.4.1 General .....	9
1.4.2 Específicos.....	9
1.5 Área de Estudio .....	10
CAPÍTULO II.....	11
2. MARCO TEORICO .....	11
2.1 RADAR .....	11
2.1.1 La Ecuación Radar.....	12
2.1.2 Parámetros que afecten la dispersión radar .....	12

2.1.3	Polarización .....	14
2.2	Radar de Apertura Sintética-SAR.....	15
2.2.1	Configuración de un SAR.....	18
2.2.2	Efectos geométricos debidos al relieve.....	20
2.3	Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) e Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR).....	22
2.3.1	Fase Interferométrica.....	24
2.3.2	Calculo del interferograma .....	27
2.3.3	Coherencia.....	28
2.4	Plataforma satelital (ALOS) .....	29
2.4.1	<i>AVNIR-2(Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2)</i> 30	
2.4.2	<i>PRISM (Sensing Instrument for Stereo Mapping)</i> .....	31
2.4.3	<i>PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar ....</i>	31
2.5	ESTADO DEL ARTE .....	33
2.5.1	Técnica Small Baseline DInSAR (SBAS) .....	33
2.5.2	Técnica Topo-DInSAR .....	36
2.5.3	Técnica de los Permanent Scatterers DInSAR (PS, Dispersores Permanentes).....	40
2.5.4	Técnica Time Series DInSAR (TS, Series de Tiempo).....	42
2.5.5	Técnica Coherent Pixels Technique DInSAR, (CPT, Técnica de Píxeles Coherentes).....	45
CAPÍTULO III.....		47
3.	METODOLOGÍA .....	47
3.1	Modelo Geodinámico Externo .....	47
3.1.1	Deslizamientos.....	50
3.1.2	Caídas.....	52

3.1.3	Flujos .....	54
3.2	Obtención de la Información Base para la aplicación de la metodología DInSAR.....	56
3.3	Modelo Digital de Elevación (DEM) .....	57
3.4	Flujograma de la Metodología DInSAR .....	59
3.5	Procesamiento de las Imágenes Radar para DInSAR.....	59
3.6	Corrección de Imágenes.....	60
3.6.1	<i>Focusing</i> .....	60
3.7	<i>Basic</i> .....	60
3.7.1	<i>Multilooking</i> .....	60
3.7.2	<i>Filtering</i> .....	62
3.8	Estimación de la Línea Base .....	62
3.9	Paso 1: “ <i>Interferogram Generation</i> ” .....	62
3.10	Paso 2: “ <i>Adaptive Filter and Coherence Generation</i> ” .....	64
3.11	Paso 3: “ <i>Phase Unwrapping</i> ” .....	67
3.12	Paso 4: “ <i>Refinement and Re-flattening</i> ”.....	69
3.13	Paso 5: “ <i>Phase to Displacement Conversion and Geocoding</i> ” .....	70
CAPÍTULO IV.....		72
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
4.1	Interpretación y Comparación con el Modelo Geodinámico Externo	72
4.1.1	Comparación con el Modelo de Deslizamientos .....	72
4.1.2	Comparación con el Modelo de Caídas .....	75
4.1.3	Comparación con el Modelo de Flujos .....	77
4.2	Desplazamientos mediante gráficos de dispersión de la Zona de Estudio .....	79
4.2.1	Julio-Agosto 2007 .....	79

4.2.2	Agosto 2007-Mayo 2008 .....	80
4.2.3	Mayo-Julio 2008.....	80
4.2.4	Mayo 2008- Julio 2009.....	81
4.2.5	Julio-Septiembre 2009 .....	82
4.2.6	Julio 2007-Septiembre 2009 .....	82
4.3	Evaluación con otra técnica enmarcada al desplazamiento .....	83
4.4	Propuesta de aplicación específica enmarcadas dentro de procesos de alerta y respuesta temprana a emergencias .....	87
4.4.1	¿Qué es un SAT (Sistema de Alerta Temprana)?.....	87
4.4.2	¿Cuál la importancia de un SAT? .....	87
4.4.3	¿Cuál es el objetivo de un SAT?.....	87
4.4.4	Procedimiento de implementación de un SAT .....	88
CAPÍTULO V.....		91
5.	CONCLUSIONES .....	91
5.1	Sobre la comparación de los mapas de desplazamientos VS modelo geodinámico externo .....	91
5.2	Sobre las muestras y sus gráficos de dispersión.....	92
5.3	Sobre la comparación con otra técnica.....	92
5.4	Sobre la propuesta de aplicación de un SAT.....	93
6.	RECOMENDACIONES .....	94
BIBLIOGRAFÍA.....		95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Mapa de Ubicación del Área .....	10
Figura 2. 1. Sistema Radar .....	11
Figura 2. 2. Tipos de Polarización.....	15
Figura 2. 3. Esquema de un Radar de visión lateral .....	15
Figura 2. 4. SAR .....	17
Figura 2. 5. Configuración de un SAR. ....	19
Figura 2. 6. Acotamiento .....	20
Figura 2. 7. Abatimiento .....	21
Figura 2. 8. Sombras .....	21
Figura 2. 9. Esquema de adquisición entre los dos pases de un Satélite .....	27
Figura 2. 10. Mapas de Coherencias .....	29
Figura 2. 11. Satélite ALOS .....	32
Figura 2. 12. Esquema del Algoritmo SBAS .....	34
Figura 3. 1. Tipos de Deslizamientos.....	50
Figura 3. 2. Flujograma del Modelo de Deslizamiento .....	51
Figura 3. 3. Mapa de Deslizamientos.....	52
Figura 3. 4. Tipos de Caídas.....	52
Figura 3. 5. Flujograma del Modelo de Caídas .....	53
Figura 3. 6. Mapa de Caídas.....	54
Figura 3. 7. Tipos de Flujos.....	54
Figura 3. 8. Flujograma del Modelo de Flujos .....	55
Figura 3. 9. Mapa de Flujos .....	56
Figura 3. 10. Modelo Digital de Elevación (DEM) .....	58
Figura 3. 11. Flujograma de DInSAR en ENVI .....	59
Figura 3. 12. Imágenes ALOS PALSAR Focusing .....	60
Figura 3. 13. Imágenes ALOS PALSAR Multilooking.....	61
Figura 3. 14. Interferogramas.....	64
Figura 3. 15. Interferogramas con Filtro Golstein.....	65

Figura 3. 16. Mapas de Coherencia.....	66
Figura 3. 17. Fase Verdadera, Enrollada en $2\pi$ .....	67
Figura 3. 18. Mapas de las Fase Desenrollada.....	68
Figura 3. 19. Mapas del Refinamiento y Reaplanamiento.....	70
Figura 3. 20. Mapas Geocodificados .....	71
Figura 4. 1. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Deslizamientos.....	74
Figura 4. 2. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Caídas.....	76
Figura 4. 3. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Flujos .....	78
Figura 4. 4. Muestras de Julio-Agosto 2007.....	79
Figura 4. 5. Muestras de Agosto 2007-Mayo 2008 .....	80
Figura 4. 6. Muestras de Mayo-Julio 2008.....	80
Figura 4. 7. Muestras de Mayo 2008- Julio 2009 .....	81
Figura 4. 8. Muestras de Julio-Septiembre 2009 .....	82
Figura 4. 9. Muestras de Julio 2007-Septiembre 2009 .....	82
Figura 4. 10. Plots Generados por la generación del grafico de conexión.....	84
Figura 4. 11. Interferogramas.....	85
Figura 4. 12. Refinamiento y Reaplanamiento.....	86
Figura 4. 13. Mapa de Desplazamientos.....	86
Figura 4. 14. Flujo del SAT .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 2. 1. Bandas del Radar y sus Aplicaciones .....	14
Cuadro 2. 2. Especificaciones del Satélite .....	30
Cuadro 2. 3. Resolución Espectral del AVNIR-2.....	30
Cuadro 2. 4. Resolución Espectral del PRISM.....	31
Cuadro 2. 5. Resolución Espectral del PALSAR.....	31
Cuadro 2. 6. Misiones Satelitales y Próximas Misiones.....	32
Cuadro 3. 1. Jerarquización de Variables .....	48
Cuadro 3. 2. Determinación de Pesos de las Variables para Deslizamientos...	49
Cuadro 3. 3. Determinación de Pesos de las Variables para Caídas .....	49
Cuadro 3. 4. Determinación de Pesos de las Variables para Flujos .....	49
Cuadro 3. 5. Imágenes de la Órbita Ascendente con su respectiva Polarización .....	57
Cuadro 3. 6. Imágenes de la Órbita Descendente con su respectiva Polarización .....	57
Cuadro 3. 7. Pares Interferométricos .....	60
Cuadro 3. 8. Ángulos de Incidencia ASAR Image Mode Swaths .....	61
Cuadro 3. 9. Estimación de la Línea Base.....	62

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**ACROSS TRACK:** Perpendicularmente a la traza desde la plataforma satelital

**AHP:** ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS; Es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios.

**ALONG TRACK:** A lo largo de la traza desde la plataforma satelital

**ALOS:** Satélite japonés de observación de la Tierra (Advanced Land Observation Satellite)

**ASI:** Agencia Espacial Italiana

**CONAE:** Comisión Nacional de Actividades Espaciales

**COSMO-SKYMED:** Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation

**CPT:** Técnica de Pixeles Coherentes

**DEM:** Modelo digital de elevaciones (Digital Elevation Model)

**ENVI:** Exelis Visual Information Solutions

**ENVISAT:** Satélite europeo de observación de la Tierra (Environmental Satellite)

**ERS-1:** Satélite europeo de observación de la Tierra (European Remote Sensing)

**ESA:** Agencia Espacial Europea

**GPS:** GNSS norteamericano (Global Positioning System)

**ICC:** Institut Cartogràfic de Catalunya

**InSAR:** Interferometría SAR (Interferometric SAR)

**JAXA:** La Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Aerospace Exploration Agency)



**JERS:** Satélite Japonés para Recursos de la Tierra (Japanese Earth Resources Satellite)

**PALSAR:** Colección de fases banda L de Radar de Apertura Sintética (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)

**PS:** Dispersores Permanentes (Técnica de los Permanent Scatterers DInSAR)

**RADARSAT:** Satélite canadiense de observación de la Tierra

**SAOCOM:** Satélite Argentino de Observación Con Microondas

**SAR:** Radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar)

**SAT:** Sistema de Alerta Temprana

**SBAS:** Técnica de procesamiento avanzado interferométrico (Small Baseline Subset)

**SIRC-1:** Plataforma de imágenes radar (Spaceborne Imaging Radar)

**SLC:** Imagen compleja de un sólo look, es decir, con máxima resolución espacial (Single Look Complex)

**SRTM:** Misión Espacial Topográfica de Radar (Shuttle Radar Topography Mission)

**SVD:** técnica de descomposición en valores singulares

**TS:** Series de Tiempo (Time Series DInSAR)

**USGS:** Servicio geológico de EE.UU. (US Geological Survey)

## LISTA DE SIMBOLOS

<b>A</b>	Amplitud
<b>P</b>	Potencia de la señal de la Antena
<b>G</b>	Ganancia de la señal recibida
<b><math>P_1 G_1</math></b>	Potencia del ángulo sólido
$\lambda$	Longitud de una onda electromagnética (SAR o GNSS)
<b>h</b>	Superficie
$\theta$	Ángulo de incidencia del haz
<b><math>R_r</math></b>	Resolución de rango
<b>c</b>	Velocidad de la luz
$\tau$	Duración del pulso
<b>H</b>	Altura de vuelo
$\Phi$	Fase interferométrica (SAR)
$\Phi_{Flat}$	Fase de la componente de la tierra plana
$\Phi_{Topo}$	Fase topográfica,
$\Phi_{Mov}$	Fase de la componente debido al desplazamiento del terreno en dirección del alcance [línea de visión (LOS)] entre ambas adquisiciones SAR,
$\Phi_{Atm}$	Fase atmosférica,
$\Phi_{Noise}$	Fase de ruido.

## RESUMEN

El objetivo del estudio es caracterizar los procesos de deformación de la superficie terrestre en las microcuencas de Potosí, Cristal, Pechiche y Balsas, ubicadas entre las provincias de Los Ríos y Bolívar para el periodo 2007 - 2009 utilizando imágenes satelitales ALOS-PALSAR, mediante la técnica de interferometría diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR), que se basa en la diferencia de fase entre dos imágenes más conocidos como interferogramas. A partir de modelos de geodinámica externa con variables de deslizamientos, caídas, flujos y con mapas de desplazamientos se pretende analizar subsidencias y acumulaciones terrestres. Adicionalmente se refina los mapas de desplazamientos con resultados arrojados mediante la Técnica Small Baseline DInSAR (SBAS) a fin de mejorar el análisis de subsidencias y velocidades puntuales de desplazamiento. Los resultados revelan considerables subsidencias en la parte alta de las microcuencas y una acumulación en la parte media y baja. En la misma línea los gráficos de dispersión de desplazamiento de la superficie muestran una tendencia significativa de subsidencias en la parte alta de la cuenca, con una alta velocidad de desplazamiento debido a que es una zona de alta pluviosidad. Se presenta una propuesta de diseño e implementación de un sistema de alerta temprana con interferometría diferencial con miras a prevenir próximas ocurrencias de fenómenos naturales.

### **PALABRAS CLAVES:**

- DInSAR
- RADAR
- DESPLAZAMIENTO
- INTERFEROGRAMA

## ABSTRACT

The objective of the study is to characterize the processes of deformation of the earth's surface in micro-watersheds in Potosí, Cristal, Pechiche and Balsas, located between the provinces of Los Ríos and Bolívar for the period 2007 - 2009 using ALOS-PALSAR satellite images. By the technique of differential interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR), based on the phase difference between two known images as interferograms. From external geodynamic models with variables of landslides, falls, flows and displacement maps, it is to analyze land subsidence and accumulations. Additionally, displacement maps with Small Target by the Technical Baseline DInSAR (SBAS) to improve the analysis of subsidence and timely travel speeds refined results. The results reveal considerable subsidence at the top of the micro and accumulation in the middle and bottom. In line scatter plots of displacement of the surface, a significant trend of subsidence in the upper part of the basin, with high travel speed because it is an area of high rainfall. A proposed design and implementation of an early warning system with differential interferometry in order to prevent future occurrences of natural phenomena is presented.

### KEYWORDS:

- DInSAR
- RADAR
- DISPLACEMENT
- INTERFEROGRAM

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1 Introducción

En los últimos años, la teledetección por radar ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para la extracción de información. Los datos adquiridos por los sistemas de radar son sustancialmente diferentes a los obtenidos por los sensores ópticos multiespectrales, de uso más frecuente, pudiendo ser considerados como una fuente de información complementaria, igualmente las imágenes radar pueden brindar información adicional de gran utilidad para el análisis geológico, cartografía estructural, entre otros, dada la geometría de observación de los sistemas de radar y las características de la señal.

En el presente proyecto se trata imperiosamente comprender la funcionalidad de la deformación de la superficie terrestre, entre ellos su dinamismo, movimiento y la maravillosa configuración del sistema que se rige, aplicando tecnologías para la comprensión de varios fenómenos de la naturaleza y los materiales que lo componen, abriendo así las puertas para la investigación en el área donde hay infinitud de material para ser descubierto, interpretado y procesado, por lo cual el objetivo de este trabajo es investigar como el escenario actual del sensor SAR está impactando en la capacidad de estudio de los deslizamientos de tierra y como se puede explotar de manera efectiva.

La deformación del suelo es difícil de prevenir y controlar, debido a la baja velocidad, larga duración y los complejos mecanismos de formación. Los medios tradicionales de monitoreo y mediciones (nivelación, mediciones GPS,

entre otros) son difíciles de satisfacer una amplia gama de monitorización continua de la deformación del terreno que están limitados por el largo intervalo y puntos de medición dispersos (Zhang et al., 2009).

Entender la cinemática de la superficie terrestre, es crucial para un apoyo de estrategias de prevención y de mitigación eficientes, las cuales pueden llegar con eficacia si la información es extensa, en temas de cobertura temporal y espacial. Mediciones convencionales basados en la tierra, por ejemplo: inclinómetros, extensómetros, levantamientos topográficos, a menudo no resultan sostenibles en largos periodos y áreas muy grandes (Berardino et al., 2002).

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es la principal herramienta, para las plataformas de radar aéreos y espaciales, que permite una rápida repetición de imágenes de gran parte de la superficie de la Tierra, que puede proporcionar la discriminación de alta resolución, pero es ambigua en la dirección vertical, (Sun and Li, 2003). Como consecuencia, los esquemas para discriminar entre la superficie y sus características se han basado en sistemas de tierra o satelitales, bajo Plataformas nadir que al futuro tendría una resolución suficientemente alta para ser capaz de separar las funciones verticalmente (Fruehauf et al., 2009).

Los datos recogidos por los sensores de radar en el espacio y procesados por el Radar de Apertura Sintética (SAR), que permite integrar eficazmente tales métodos de investigación tradicionales y ofrecer mejoras en términos de muestreo temporal y cobertura espacial. Tal capacidad de monitoreo está aumentando de manera significativa gracias a la llegada de los sistemas de búsqueda y salvamento de segunda generación, por ejemplo, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Radarsat-2. Los datos SAR adquiridos por estos satélites se caracterizan por la reducción del tiempo de revisita (4 días en el caso de la constelación COSMO-SkyMed) y una mejor resolución espacial (a pocos metros) (Bonano et al., 2012).

Una técnica que se ha ido utilizando hace varios años de medición es la tecnología de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) que tiene el potencial de monitoreo de deformaciones, ya que cuenta con ventajas como, las condiciones meteorológicas, cobertura amplia, alta resolución y entre otras. Sin embargo, las influencias de la decorrelación espacial, decorrelación temporal y efecto atmosférico degradan la calidad de la estimación de desplazamiento, es difícil obtener una alta precisión de medición de resultados en el seguimiento de la deformación lenta en secuencia de tiempo largo (Wu et al., 2008).

La interferometría diferencial (DInSAR) que utiliza imágenes radar de apertura sintética (SAR) es una técnica de teledetección que genera una nueva imagen (interferograma) a partir de dos imágenes SAR de una misma zona. Se trata de una técnica que sigue en desarrollo y de gran precisión, la cual combinada con datos geológicos, morfológicos, sismológicos, entre otros, se muestra muy eficaz en la cuantificación de deformaciones superficiales en el terreno.

Aplicada al estudio de movimientos de la superficie terrestre, esta técnica aporta la información necesaria para determinar la actividad de dichos movimientos (Fernández et al., 2005). La técnica DInSAR es único en el sentido de que es capaz de entregar una red densa de las mediciones de deformación del terreno de alta resolución, lo que permite al mismo tiempo una amplia zona y un seguimiento específico de ubicación (Ferretti et al., 2007).

La Geodinámica Externa de las microcuencas es ideal para los procesos para analizar de manera integral riesgos, que permitan pronosticar y reducir desastres naturales provocados por inestabilidad de laderas, erosión hídrica, crecidas torrenciales, sedimentación y desbordamiento de ríos (IEE, 2013).

## 1.2 Antecedentes

La tecnología SAR ha tenido varios cambios en los últimos años, puntualizando que la Interferometría SAR es una técnica de gran alcance para la cartografía y monitoreo de la superficie para cambios topográficos, en esto la coherencia de las imágenes es útil para la investigación de las características superficiales geológicas tales como litología y usos del suelo (Sang Wan et al., 2000). Donde los deslizamientos de tierra se han estudiado de diferente forma y se plantea una serie de retos para presentar las técnicas de interferometría SAR convencionales, debido a las condiciones generalmente asociadas a fenómenos de deslizamientos de tierra. Los más importantes son la frecuente pérdida de coherencia sobre el área de deslizamiento de tierra, por ejemplo debido a la vegetación gruesa, el fuerte componente topográfico de la fase interferométrica, y de la disponibilidad temporal a menudo demasiado escasa de las mediciones (Refice et al., 2001) .

Con la aparición de DInSAR, que tiene el potencial de detectar la deformación superficial milimétrica a lo largo del sensor - dirección de destino (Line-of-Sight, LOS) (Dehls et al., 2002). Sin embargo, DInSAR aún no se ha convertido en una herramienta plenamente operativa para el mapeo de desplazamiento de tierra, esto se debe principalmente a un par de factores limitantes:

- Decorrelación debido a variaciones en el complejo de la reflectividad de las células individuales de muestreo como una función de la geometría de adquisición (decorrelación geométrica) y / o tiempo (decorrelación temporal).
- Artefactos atmosféricos (pantalla fase atmosférica, APS) superpuestas en cada interferograma, debido principalmente al efecto del contenido de vapor de agua local en la fase de la señal SAR de propagación.



Pero en el artículo relacionado, Nolan and Fatland (2003) demuestra que la profundidad de penetración de la señal utilizando DInSAR en el campo de validación, la precisión vertical del modelo de elevación digital (DEM) utilizado para crear el interferograma sintético es la clave para hacer con éxito este tipo de mediciones sutiles.

El Radar de apertura sintética interferometría (InSAR) es una alternativa al método estereoscópico convencional para la extracción de información de la elevación. InSAR ha demostrado su capacidad en la producción de alta precisión los modelos digitales de elevación (DEM) y explota dos imágenes SAR complejas adquiridos sobre el mismo lugar de obtener la información de terreno. Sistemas de búsqueda y salvamento por satélite bordo de vehículos espaciales solo tienen una antena a bordo por lo tanto las imágenes adquiridas en dos visitas diferentes se utilizan para el proceso de InSAR (Hsing-Chung et al., 2005).

La aplicación avanzada de técnicas de interferometría diferencial (DInSAR) ha restringido a las mediciones de los desplazamientos del terreno. Estas técnicas funcionan con una pila de interferogramas diferenciales con el fin de minimizar los componentes de la fase no deseadas, tales como artefactos atmosféricos, y obtener una medición precisa del desplazamiento del terreno y el error topográfico (Mora et al., 2006).

Para este objetivo, Cascini et al. (2007) propone el uso de la interferometría SAR diferencial se puede complementar con técnicas tradicionales topográficas para obtener mediciones de los desplazamientos de la superficie del suelo en grandes áreas, proporcionando una precisión comparable, mientras que es menos costoso y tarda poco tiempo.

Entre estos enfoques avanzados, Casu et al. (2008) Se centra en el algoritmo de la pequeña línea base (SBAS) que se basa en la combinación de pares de datos de búsqueda y salvamento, que se caracteriza por una pequeña separación entre las orbitas de adquisición (línea de base), con el fin de generar series temporales de deformación del suelo, su velocidad y finalmente los mapas en el área investigada.

Recientemente, se ha desarrollado otra técnica, que también permite investigar los fenómenos de deformación de superficie en una escala milimétrica / centímetro. En este caso, la técnica explota la diferencia de fase (por lo general referido como el interferograma) de dos imágenes SAR relevante para observaciones temporalmente separada de la zona investigada. Un procedimiento eficaz para detectar y seguir la evolución temporal de la deformación es a través de la generación de series de tiempo: para lograr esta tarea la información disponible de cada par de datos interferométrico está adecuadamente relacionado con las incluidas en las otras adquisiciones mediante la generación de una secuencia apropiada de interferogramas DInSAR (Calamia et al., 2009).

Con nuevas misiones como TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Radarsat-2, hay nuevas formas de medición, una de estas es CRInSAR al igual que PSInSAR utiliza reflectores de esquina que son objetivos de radar coherentes y casi no es afectada por la geometría de adquisición de radar y decorrelación temporal. CRInSAR puede proporcionar información de fase fiable que se puede distinguir claramente en todas las imágenes y que tienen propiedades electromagnéticas invariables. En una palabra, la técnica CRInSAR puede analizar los píxeles correspondientes de las imágenes SAR, incluso con el afectamiento de decorrelación que son relativamente graves, para obtener mediciones de deformación de alta precisión (Fan et al., 2010). En esta multi-línea de base puede generar mapas temporales largos de deformación del suelo con alta

precisión mediante imágenes SAR conjuntamente estudiando apiladas de la misma zona (Li et al., 2011).

Los algoritmos de PS (dispersores permanentes) operan en buscar individuales interferogramas generados con respecto a la imagen SAR común seleccionado, sin restricción en la separación espacial y temporal (líneas de base) de los pares de datos SAR. Por el contrario, los enfoques SB (Bases Pequeñas) se basan en una combinación simple de interferogramas multi master generados a partir de una selección apropiada de los pares de datos de SAR que se caracterizan por pequeñas líneas de base; entre la SB los algoritmos de enfoque popular se conoce como pequeña línea de base (SBAS), que se utiliza sobre todo para analizar múltiples interferogramas antes ya mencionado (Yang et al., 2012).

Los avances, sin embargo, deben tener en cuenta la naturaleza del enfoque de procesamiento y de una manera más general para hacer frente a la cuestión clave de la vigilancia de las zonas urbanas. Debido a la gran densidad de estructuras verticales como edificios, las imágenes SAR de las zonas urbanas se ven afectados por una interferencia grave (escala) que surgen de dispersores situados a diferente altura. El multidimensional SAR (MDI-SAR), también conocida como tomografía por SAR, es una poderosa extensión de los conceptos de interferometría para la localización de destino (imágenes 3-D) y seguimiento (imágenes 4-D) terrestres (Reale et al., 2013).

### **1.3 Justificación e Identificación del Problema**

La deformación del suelo es un tipo de desastres geológicos irreversibles que afecta todas las provincias en diferente grado, causando la pérdida económica incalculable en el país cada año. Ecuador es un país propenso a peligros geológicos dado por su ubicación geográfica y su orogénesis, además la deformación de la superficie terrestre ha sido una las más inestables en los últimos años causado principalmente las lluvias, causando pérdidas para el desarrollo sostenible económico y social.

La carencia de conocimiento en la aplicación de nuevas metodologías aplicadas en el estudio de la deformación de la superficie terrestre, ha provocado la falta de insumos que alerten próximos movimientos de masa. En este contexto, las microcuencas de Potosí, Cristal, Pechiche y Balsas han sido objeto de eventos de esta naturaleza que perjudican la estabilidad de la población residente.

Este proyecto propone el desarrollo de una metodología para la caracterización de deformación de la superficie terrestre, la cual representa una herramienta de gran utilidad para describir la dinámica y estimación de su movimiento para tener una base para una propuesta de alerta temprana.

Es importante adquirir conocimiento de nuevas tecnologías y nuevos métodos que ayuden a entender mecanismos de estos fenómenos, que se presentan en varios sectores del país y han causado la pérdida de vidas humanas e infraestructura, que no se ha podido solucionar y tampoco alertar para una mejor prevención. Existen diversos trabajos que han tenido como objetivos la estimación de la deformación de la superficie terrestre que no han sido aplicadas en el país, por lo tanto la metodología propuesta que se utilizara es la interferometría radar por su amplia disponibilidad y accesibilidad a los datos. La selección de las cuatro microcuencas se debe a la existencia de zonas

vulnerables con asentamientos humanos y obras de infraestructura pública fundamentales en el desarrollo de la nación.

#### **1.4 Objetivo**

El objetivo de esta investigación es caracterizar procesos de deformación de la superficie terrestre. Se busca una metodología con la información recopilada usando la técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) para una base de alerta temprana en relación con su dinámica y movimiento.

##### **1.4.1 General**

Caracterizar procesos de deformación de la superficie terrestre usando la técnica de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) en las microcuencas de Potosí, Cristal, Pechiche y Balsas, ubicadas entre las provincias de Los Ríos y Bolívar.

##### **1.4.2 Específicos**

- Definir el estado del arte de aplicaciones de la técnica DInSAR en procesos de deformación de la superficie terrestre.
- Establecer un criterio para la conceptualización y caracterización de procesos de deformación de la superficie terrestre.
- Diseñar una metodología basada en DInSAR para la caracterización de deformaciones de superficie en la zona de estudio.
- Proponer aplicaciones específicas enmarcadas dentro de procesos de alerta y respuesta temprana a emergencias aplicadas a la zona de estudio.

## 1.5 Área de Estudio

La zona de estudio está conformada por una superficie de 519 km<sup>2</sup> aproximadamente, la misma comprende a las microcuencas de Potosí, Cristal, Pechiche y Balsas, ubicadas entre las provincias de Los Ríos y Bolívar.

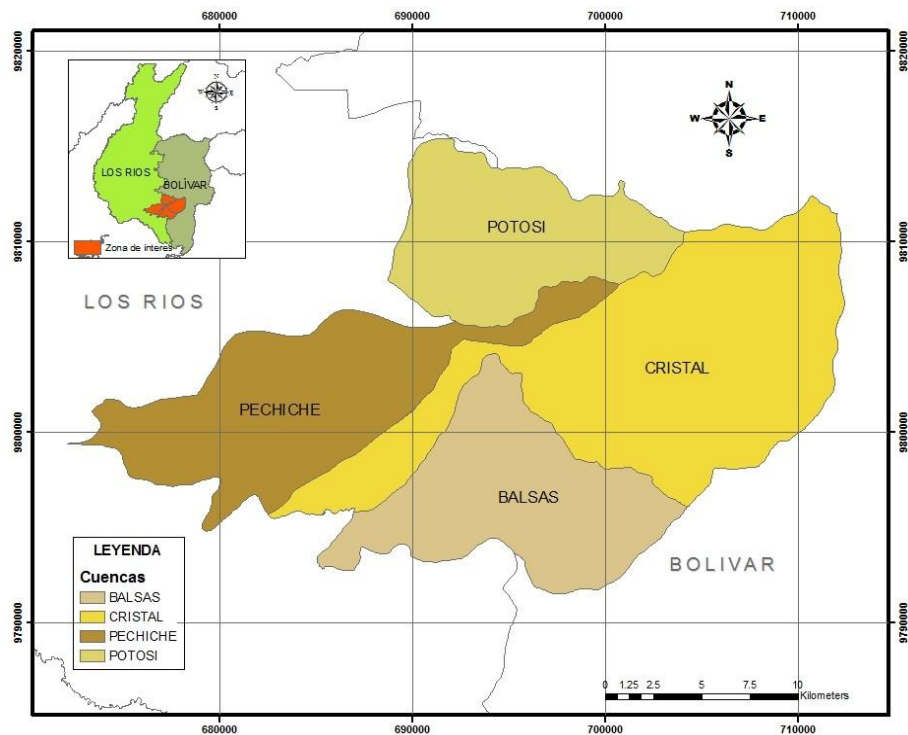


Figura 1. 1. Mapa de Ubicación del Área

## CAPÍTULO II

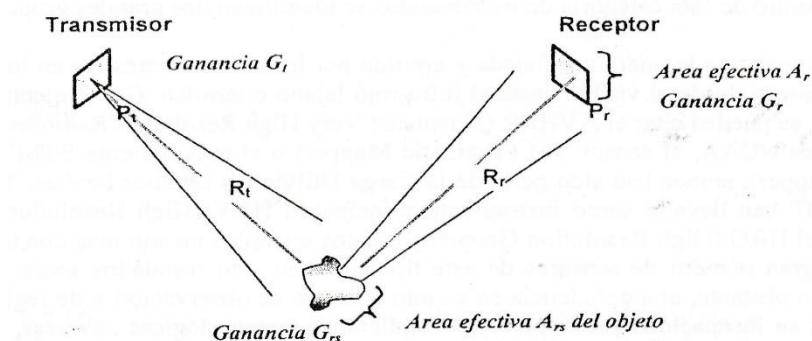
### 2. MARCO TEORICO

En este capítulo se va a tratar sobre las principales características del Radar y su funcionamiento, además se mencionara varias técnicas que ha trascendido en el estudio de las deformaciones de la superficie terrestre.

#### 2.1 RADAR

Los primeros registran la energía reflejada y emitida por los objetos terrestres en longitudes que van desde el visible hasta el infrarrojo, en segundo lugar tenemos los instrumentos que operan independientemente de los anteriores y además no requieren tampoco la iluminación de la escena por una fuente externa de energía externa como el sol como se muestra en la figura 2.1. A estos instrumentos se les denomina sistema de microondas o por el más conocido que es el “RADAR”.

Desde hace años se ha llevado la exploración de la superficie terrestre, mediante un número de instrumentos instalados a bordo de satélites artificiales, además de avances realizados en el campo de la informática, en el que cabe mencionar el tratamiento numérico de la señal, donde se incorporaron sensores capaces de convertir las señales analógicas en numéricas (Molina et al., 2006).



**Figura 2. 1. Sistema Radar**  
Fuente:(ESA, 2010)

### 2.1.1 La Ecuación Radar

”Ecuación Radar” es la relación fundamental entre el radar, el objeto y la señal recibida. Cuando una potencia  $P_t$  es transmitida por una antena con ganancia  $G_t$ , la potencia de ángulo sólido en la dirección del objeto es  $P_t G_t$ .

$$S_s = (P_t G_t) \frac{1}{4\pi R^2}$$

Dónde:

- $P$  = Potencia de la señal de la Antena
- $G$  = Ganancia de la señal recibida
- $P_t G_t$  = Potencia del ángulo sólido

### 2.1.2 Parámetros que afecten la dispersión radar

Primeramente se mencionara las dispersiones más relevantes:

Dispersión Mie: La dispersión Mie se aplica a la interacción entre la luz y las partículas de gran tamaño. Para ser llamadas partículas “grandes”, deben tener tamaño mayor que la longitud de onda de la luz. El comportamiento de las partículas grandes de la atmósfera en este caso es como si fuera un espejo, sin preferencia por ninguna componente de color de la luz blanca incidente.

Dispersión Rayleigh: Ocurre cuando la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión. Afecta por tanto a las longitudes de onda más cortas y causa el color azul del cielo.

Dispersión no selectiva: Se da cuando la longitud de onda es mucho menor que los objetos, la producen gotas de agua en la atmósfera (niebla o nubes).



A continuación se mencionará las influencias:

Influencia de la Rugosidad del Terreno: La rugosidad está estrechamente relacionada con la longitud de onda y el ángulo de incidencia, donde superficie rugosa se considera si su estructura tiene dimensiones comparables con la longitud incidente.

Rayleigh considera una superficie rugosa, si  $h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$  y suave, si  $h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$  donde h es la variación en altura de la superficie,  $\lambda$  la longitud de onda del sistema y  $\theta$  el ángulo de incidencia del haz.

Influencia del Ángulo de Incidencia: Este factor afecta directamente al coeficiente de dispersión, donde es característico para cada objeto.

Influencia de la Humedad: Se trata de dos partes, la conductividad y permisividad donde la constante dieléctrica que es una medida de las propiedades eléctricas de los materiales las cuales dependen en gran medida del contenido de humedad que provoca un cambio significativo de la propiedades dieléctricas.

Influencia de la Frecuencia: Como los radares suelen trabajar fundamentalmente con frecuencias específicas por letras, la frecuencia de la onda incidente determina la profundidad de penetración sobre la superficie y la rugosidad.

Los radares tienen frecuencias que operan en la región del espectro electromagnético entre 2 MHz ( $\lambda = 150\text{m}$ ) hasta 3000 GHz ( $\lambda = 0,1 \text{ mm}$ ). Cada una de las bandas del radar depende de la misión por la que ha sido diseñado. Las frecuencias más altas permiten lograr en esta región, utilizando antenas de pequeñas dimensiones, exactitudes y poderes resolutivos elevados y la utilización de las frecuencias más facilita obtener mayores potencias de

transmisión la cual puede extenderse los alcances de localización más allá del límite establecido por el horizonte de radio.

A continuación, las bandas radar más común resumido en la siguiente tabla:

**Cuadro 2. 1. Bandas del Radar y sus Aplicaciones**

BANDA	BANDA RANGO DE FRECUENCIA	UTILIZACIÓN EN RADAR
HF	3-30 MHz	Exploración de muy largo alcance
VHF	30-300 MHz	Exploración de mediano y largo alcance
UHF	300-1 GHz	Exploración de mediano y largo alcance
L	1-2 GHz	Exploración de largo alcance
S	2-4 GHz	Exploración de mediano alcance
C	4-8 GHz	Seguimiento de largo alcance
X	8-12 GHz	Seguimiento de corto alcance
K <sub>u</sub>	12-18 GHz	Cartografía de alta resolución
K	18-27 GHz	Muy poco empleado, por su gran cantidad de absorción de vapor de agua
K <sub>a</sub>	27-40 GHz	Cartografía de muy alta resolución

Fuente:(Chávez and Cabrera, 2012)

### 2.1.3 Polarización

Los sistemas radar según Lira (2010) transmiten comúnmente ondas planas polarizadas ya sea horizontal o verticalmente. La onda electromagnética es despolarizada en varios grados cuando interacciona con la superficie terrestre. Al medir la señal retro dispersa, la antena radar registra aquella porción de la energía electromagnética que presenta cierta polarización. De esta manera es factible generar imágenes radar con diferentes esquemas de polarización. Si la señal emitida tiene una polarización horizontal (H) y se mide la fracción de la polarización vertical (V) de la onda retro dispersada se dice entonces que el esquema es: HV. Los esquemas HH, VV y VH son también factibles. El contraste y detalles discernibles en la imagen radar dependen del esquema de polarización.

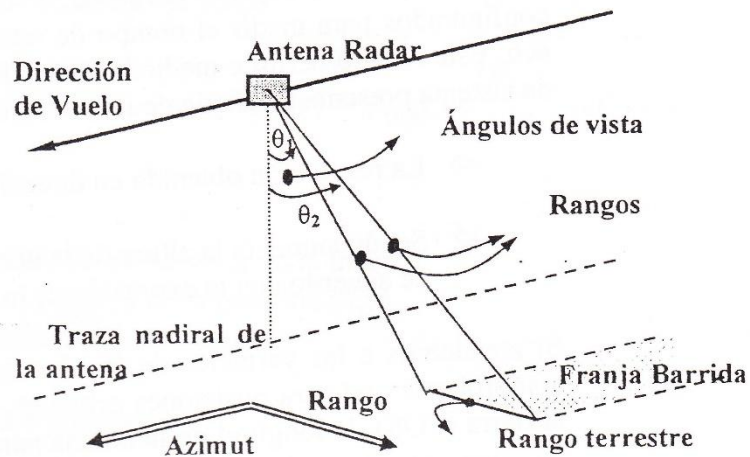


**Figura 2. 2. Tipos de Polarización**

**Fuente: Radar Corses (ESA)**

## 2.2 Radar de Apertura Sintética-SAR

Se trata de sistemas, instrumentos o antenas que operan en las bandas de radio del espectro electromagnético, que emiten la energía en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos, donde existen fundamentalmente dos sistemas radar: los Radares de Apertura Real (RAR) y los Radares de Apertura Sintética (SAR); ambos difieren en el principio y su manera de registrar la energía devuelta en el sentido de avance de la plataforma sobre la tierra.



**Figura 2. 3. Esquema de un Radar de visión lateral**

**Fuente:(Molina et al., 2006)**

Estas plataformas pueden ser aéreas, es decir aviones, o espaciales es decir satélites, en cualquier caso, estos instrumentos se disponen sobre estas

plataformas con un barrido que se realiza mediante una visión de tipo lateral, determinado ángulo de inclinación  $\theta_i$ .

Esta configuración de visión lateral (SL) se usa para mejorar la resolución perpendicular a la dirección de vuelo (resolución de rango) y así evitar también la señal, lo cual podría ocurrir con una visión nadir. Existen a su vez el “rango azimutal” y “rango inclinado”. La resolución viene dada por la expresión:

$$R_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta}$$

Donde,

- $R_r$  es la resolución de rango
- $c$  es la velocidad de la luz
- $\tau$  es la duración del pulso
- $\theta$  es el ángulo de vista

La dirección de avance se denomina Dirección Azimutal o simplemente la dirección perpendicular, los objetos observados tienen la siguiente resolución azimutal:

$$R_a = \frac{H}{\cos \theta} * \frac{\lambda}{1}$$

Donde,

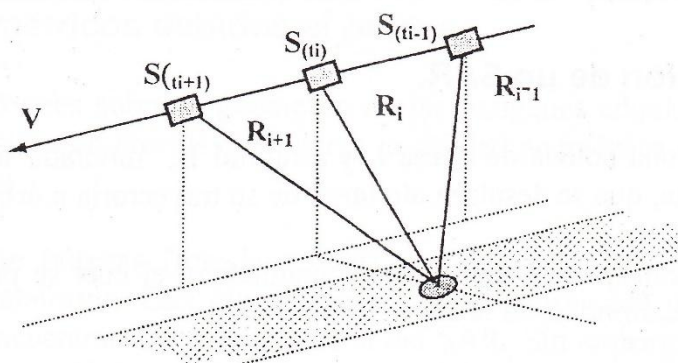
- $R_a$  es la resolución de rango
- $H$  es la altura de vuelo
- $\lambda$  es la longitud de onda
- $1$  es el la longitud de la antena

Los sistemas de apertura real alternan el envío de pulsos de ondas y el regreso devueltos por los objetos terrestres. Para ello, los circuitos de recepción

configurados para medir el tiempo de retraso entre la transmisión del pulso y el eco. Este retraso permite medir la distancia entre el receptor y el objeto. Sin esto el sistema presenta una serie de inconvenientes:

- La resolución obtenida en dirección azimutal no es buena.
- Según aumenta la altura de la plataforma, aumenta igualmente la longitud de acuerdo con la expresión de la resolución azimutal.

Dada a las variables de la ecuación correspondiente la resolución debe comprobarse para posiciones orbitales, tal como ocurre con los satélites de la tierra (EOS), la longitud de la antena para este tipo de alturas sería excesiva. Esto se resuelve con el empleo de antenas Radar de Apertura Sintética (SAR), las cuales el nombre lo indica, sintetizan la longitud excesiva del primer tipo de antenas basado en el principio del Efecto Doppler.



**Figura 2. 4. SAR**

**Fuente:(Molina et al., 2006)**

La frecuencia aumenta según el satélite se acerca al objeto y disminuye según se aleja, y expresa el cambio en el intervalo de tiempo aparente entre dos eventos producidos por el movimiento de un observador conjuntamente con la velocidad de transmisión de información. Cuando el vector que apunta de la antena al objeto y al vector velocidad son perpendiculares a esta frecuencia se denomina “frecuencia del centroide Doppler”. La importancia de la expresión anterior es que permite localizar cada respuesta (retro dispersión) elemental del

terreno respecto de la posición del satélite y de sus vectores velocidad (Olmsted, 1993).

El fenómeno ondulatorio en la respuesta de un objeto se caracteriza por dos variables, la amplitud y la fase.

- La amplitud depende de la fuerza con la que cada objeto elemental devuelve el pulso, que sobre el incide, hacia el radar; en esto interviene además la forma, tamaño, orientación y propiedades dieléctricas de estos objetos.
- La fase por su parte, depende adicionalmente del camino de ida y vuelta entre la posición del instrumento o antena y el objeto.

Así pues, en una imagen radar cada posición tendría dos componentes: amplitud y fase; lo cual se expresara en notación compleja como:

$$Z(x, y) = A_{(x,y)} * e^{i\varphi(x,y)}$$

**Fuente:(Olmsted, 1993)**

Donde,

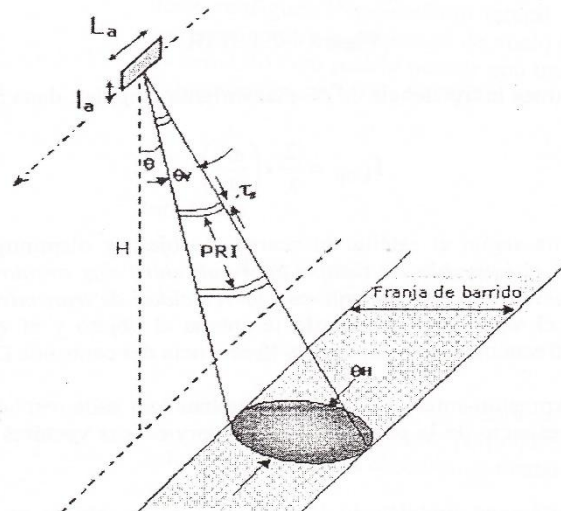
- $(x, y)$  es la posición de un valor en la imagen
- $Z$  es el valor complejo de la posición  $(x, y)$
- $A$  es la amplitud
- $\varphi$  es la fase
- $i$  es el número complejo

### **2.2.1 Configuración de un SAR**

Un SAR consiste en una antena de altura  $l_a$  y longitud  $L_a$  montada sobre la plataforma, en nuestro caso el satélite que se desplaza a lo largo de su trayectoria u órbita con velocidad  $V_s$  (La órbita está definida por su inclinación  $(i)$ , nodo ascendente  $(\Omega)$ , el semi-eje mayor  $(a)$ , la excentricidad  $(e)$ , y la

posición angular del satélite respecto de nodo ascendente ( $\varphi$ ) (Molina et al., 2006).

La antena del radar transmite un pulso electromagnético, el cual se propaga radialmente a lo largo en su camino hacia la superficie terrestre.



**Figura 2. 5. Configuración de un SAR.**  
Fuente:(Olmsted, 1993)

Este haz se caracteriza por dos ángulos o secciones que definen el ancho de este último

$$\text{Elevación} = \lambda / I_a (= \theta_v)$$

$$\text{Azimuth} = \lambda / L_a (= \theta_H)$$

El pulso se dirige hacia la superficie de la tierra con la dirección que forma un ángulo con la vertical del satélite, denominado ángulo de vista ( $\theta$ ). A su vez, los pulsos transmitidos tienen una duración ( $\tau_s$ ) y se repiten con un intervalo de tiempo constante denominado "Intervalo de Repetición del Pulso" (PRI), el inverso del PRI será por tanto la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) y es la que se utiliza para muestrear los ecos de cada pulso. Este muestreo se hará tanto en dirección se tendría una resolución diferente, tal como muestra la huella que deja un pulso sobre la superficie terrestre cuyo eje menor es:

$$\delta X = R * \lambda / L_a$$

Donde,

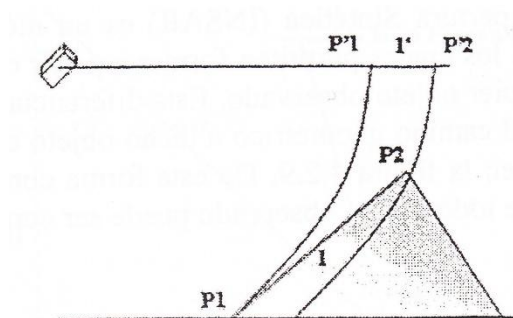
- R= Es el Rango de la resolución
- $\lambda$  =Longitud de Onda

El cual, puede comprobarse como varía el rango R, donde las resoluciones se denominan también resolución en azimut y resolución en rango.

### 2.2.2 Efectos geométricos debidos al relieve

El relieve del terreno provoca sobre la geometría de las imágenes adquiridas por una antena radar una serie de distorsiones o efectos que alteran la calidad geométrica de esta última. Estos efectos son los siguientes:

- Acortamiento de laderas (foreshortening): Las alturas del terreno disminuyen la distancia a la plataforma. El efecto produce la disminución de la longitud de las laderas que se encuentran frente a la antena SAR. Pero, las laderas que se encuentran en las caras opuestas, se alargarán.



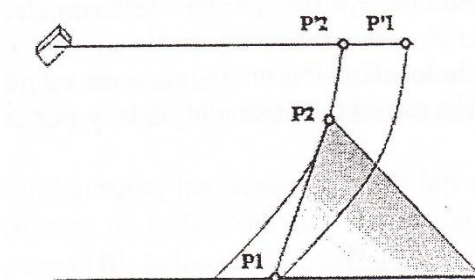
**Figura 2. 6. Acotamiento**

**Fuente: Alaska SAR Facility (ASF)**

- Abatimiento de laderas (layover): Se trata cuando la pendiente del terreno es mayor que el ángulo de la vista del haz, la parte superior de la ladera se encuentra más cerca de la antena SAR que la parte inferior. Esto causa un abatimiento de la parte superior sobre la inferior, de la



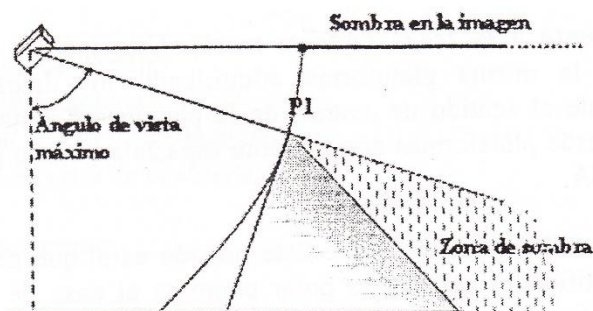
forma que en la imagen la parte superior aparece antes que la parte inferior de la ladera.



**Figura 2. 7. Abatimiento**

**Fuente: Alaska SAR Facility (ASF)**

- Sombras: Cuando la pendiente de las laderas opuestas a la iluminación de los ases de la antena SAR es mayor que los ángulos de vista de estos últimos, se produce un ocultamiento de estas zonas, por lo que estas laderas no quedan registradas en la imagen.



**Figura 2. 8. Sombras**

**Fuente: Alaska SAR Facility (ASF)**

De estos efectos, el abatimiento y las sombras, causan pérdidas de información, por lo que es posible recuperar esta última mediante cualquier proceso. Este es un problema que afecta directamente al proceso interferométrico. Sin embargo es posible resolver este problema con unas nuevas imágenes adquiridas desde una órbita con trayectoria distinta a la

primera. Por ejemplo, si las primeras imágenes se han adquirido desde una órbita descendente, las siguientes deben hacerse desde una órbita ascendente.

### **2.3 Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) e Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)**

El principio de la interferometría SAR es medir las diferencias de fase entre el satélite y la tierra en dos pases del satélite por la misma zona. Estas diferencias de fase están en función de la distancia y pueden ser debidas básicamente a dos motivos: en primer lugar, a la diferencia de posición entre las dos trayectorias del satélite, hecho que permite medir la topografía del terreno, como se explicara a continuación; en segundo lugar, a un desplazamiento de la zona observada entre las dos adquisiciones, que puede ser causado por varios fenómenos, como por ejemplo, un terremoto o una subsidencia del terreno. De esta forma, la interferometría SAR (InSAR) es una técnica que permite detectar movimientos y deformaciones de la superficie terrestre.

Las aplicaciones interferométricas fueron estimar la topografía, después se descubrió su potencial en el estudio de las deformaciones. Su inconveniente está en que la nueva técnica se encuentra mezclada con la señal topográfica. Para solucionar este problema se ha desarrollado la técnica de interferometría diferencial, donde la señal topográfica se saca del interferograma obteniendo el interferograma diferencial SAR.

DInSAR sirve para detectar y medir movimientos muy pequeños de la superficie. Estas medidas provienen de la información obtenida de varios interferogramas elaborados a partir de combinaciones de imágenes adquiridas de la misma zona, deshaciendo de la componente de topografía. Posteriormente de descomponer la fase se calcula la magnitud del movimiento. Donde la pequeña longitud de onda donde se opera, se detecta movimientos por debajo del centímetro.

*Métodos de Adquisición:* Existen fundamentalmente tres métodos para la adquisición de datos interferométricos desde plataformas aéreas o espaciales, estos son:

- A lo largo de la traza (Along Track). Este método requiere dos antenas montadas sobre la misma plataforma adquiriendo los datos simultáneamente a lo largo de líneas paralelas al sentido de avance de la plataforma. Esta configuración sólo se utiliza desde plataformas aéreas.
- Perpendicularmente a la traza (Across Track). Este método requiere dos antenas montadas sobre la misma plataforma adquiriendo los datos simultáneamente y perpendicularmente al sentido de avance de la plataforma. Esta configuración puede utilizarse tanto desde plataformas aéreas como espaciales, como por ejemplo la misión SRTM de la NASA.
- Repetición de pasadas (Repeat Pass). Este método es el que generalmente se utiliza desde satélites artificiales con órbita polar como es el caso de los satélites ERS1 y ERS2. Como ya fue adelantado en la memoria de este proyecto, esta configuración requiere únicamente una antena que registra los datos a partir de dos pasadas sucesivas sobre la misma área, cubriéndola con una geometría ligeramente diferente. En este procedimiento es imprescindible tener el conocimiento preciso de las posiciones de la plataforma, por lo que es especialmente adecuado para plataformas espaciales de las cuales se tienen perfectamente determinadas sus orbitas. Es el método utilizado en este proyecto.

DInSAR utiliza globalmente para sus aplicaciones datos de los satélites ERS-1 y ERS-2 propiedad de la Agencia Espacial Europea (ESA). Estos satélites realizan una cobertura global en la observación de la Tierra y su cantidad de datos es muy grande. Para realizar una aplicación en el estudio de deformación se tiene ciertos criterios a la hora de elegir las imágenes SAR adecuadas. Un parámetro importante es el tiempo transcurrido en los dos pases. Las

deformaciones se pueden obtener (al menos las pequeñas) con una base temporal suficientemente grande. Los cambios en las propiedades físicas y geométricas de la escena entre las dos adquisiciones generan una pérdida de coherencia.

### 2.3.1 Fase Interferométrica

Se menciona anteriormente que DInSAR se base en la explotación de la información adquirida en dos adquisiciones de satélite, sin tomar en cuenta la separación física entre los dos puntos de vista en el momento de adquirir la imagen, si existe un desplazamiento, el cual quedara reflejado en el interferograma y se mide como fracción de la longitud de onda. Un problema común se da cuando la línea de base no es cero, esto implica una cierta sensibilidad a la topografía, pero cabe mencionar si la línea de base fuera cero, la diferencia de fase entre dos señales recibidas daría directamente la información del desplazamiento.

La interferometría diferencial SAR, se centra principalmente en el estudio de la fase Interferométrica de dos imágenes SAR es decir un interferograma, donde se quiere explotar esta característica eliminando los efectos de la topografía de terreno introducidos en el interferograma que pueden influir en la medida de deformación.

Se puede eliminar el efecto de la topografía ( $\Phi_{\text{Topo}}$ ) simulando un interferograma sintético ( $\Phi_{\text{Topo-Sim}}$ ) con DEM (Modelo Digital de Elevación) y los parámetros orbitales de dos imágenes SAR. De esta forma se obtiene la fase diferencial Interferométrica ( $\Phi_{\text{D-Int}}$ ), donde ( $\Phi_{\text{Res-Topo}}$ ) representa la componente residual debida a los errores del DEM.

$$\Phi_{\text{D-Int}} = \Phi_{\text{Int}} - \Phi_{\text{Topo-Sim}} = \Phi_{\text{Mov}} + \Phi_{\text{Atm}} + \Phi_{\text{Res-Topo}} + \Phi_{\text{Noise}}$$

**Fuente:(Olmsted, 1993)**

Donde,

- $\Phi_{\text{Noise}}$  componente debido al ruido,
- $\Phi_{\text{Mov}}$  componente debido al movimiento o la deformación,
- $\Phi_{\text{Atm}}$  es la contribución de la atmosfera,
- $\Phi_{\text{Res-Topo}}$  componente debido al error topográfico.

La limitación del método está relacionada con los efectos en el interferograma diferencial debido a la precisión del DEM utilizado. El DEM necesita una precisión necesaria para estimar los movimientos, que es inversamente proporcionalmente a la longitud de la línea base. Los interferogramas con pequeña una línea de base son menos susceptibles a los errores del DEM. Para reconocerlos se utiliza el hecho de que aparecen en la misma posición en cada interferograma de la escena, que no depende del periodo de tiempo que se cubra.

El componente  $\Phi_{\text{Atm}}$  representa otra importante fuente de error, que puede dar un falso efecto diferencial debido a la atmósfera, dado que estas imágenes no fueron adquiridas en condiciones atmosférica iguales debido al tiempo de toma, por lo cual varía la concentración de vapor de agua, puesto que al ser un fenómeno de carácter local, es más difícil corregir.

Conseguir la componente de fase de movimiento, atmósfera, residuos topográficos y el ruido son difíciles de aislar. Está componente nos da información importante, entonces la componente  $\Phi_{\text{Topo}}$  es función de la base perpendicular:

$$\Phi_{\text{Topo}} = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}}$$

Mientras que  $\Phi_{\text{Mov}}$  es independiente de la base perpendicular:

$$\Phi_{Mov} = \frac{SP^1 - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}}$$

Donde,

- SP es la distancia del satélite slave al punto P,
- SP1 es la distancia del satélite slave al punto P',
- MP es la distancia del satélite master al punto P,
- $\lambda$  es la longitud de onda radar.

$\Phi_{Mov}$  Es independiente de la base perpendicular, lo cual hace diferente sensibilidad de la fase interferométrica a la topografía y sus movimientos. La fase diferencial interferométrica se obtiene con valores comprendidos entre  $-\pi$  y  $+\pi$ , es decir tiene un módulo de  $2\pi$ , la que se conoce como fase enrollada. Este procedimiento se utiliza para recuperar la fase original de la señal que se llama phase unwrapping y consiste en desenrollar la fase. El sentido de la técnica es encontrar el número entero de ciclos  $2\pi$  que se han de sumar a la fase original para obtener el verdadero valor de la fase:

$$\Phi(i, j) = \Psi(i, j) + 2\pi k(i, j)$$

**Fuente:(Olmsted, 1993)**

Donde,

- $\Phi(i, j)$  es la fase desenrollada,
- $\Psi(i, j)$  es la fase enrollada ,
- $k(i, j)$  es una función entera.

Obtener el valor de k (número entero de ciclos) implica una gran dificultad, por lo que existen diferentes métodos los cuales podemos mencionar los más importantes:

- Residue-cut: también conocido como branch-cut, ghost-lines o minimum spanning tree. Algoritmos basados en la integración directa de las diferencias de fase evitando determinados caminos (Wicks et al., 2001) (Ching et al., 1992) (Goldstein and Werner, 1988).
- Least squares (LS): algoritmos basados en mínimos cuadrados (Ghiglia and Romero, 1994).
- Minimum cost flow (MCF): métodos basados en flujos sobre redes (Flynn, 1997) (Chen and Zebker, 2000).

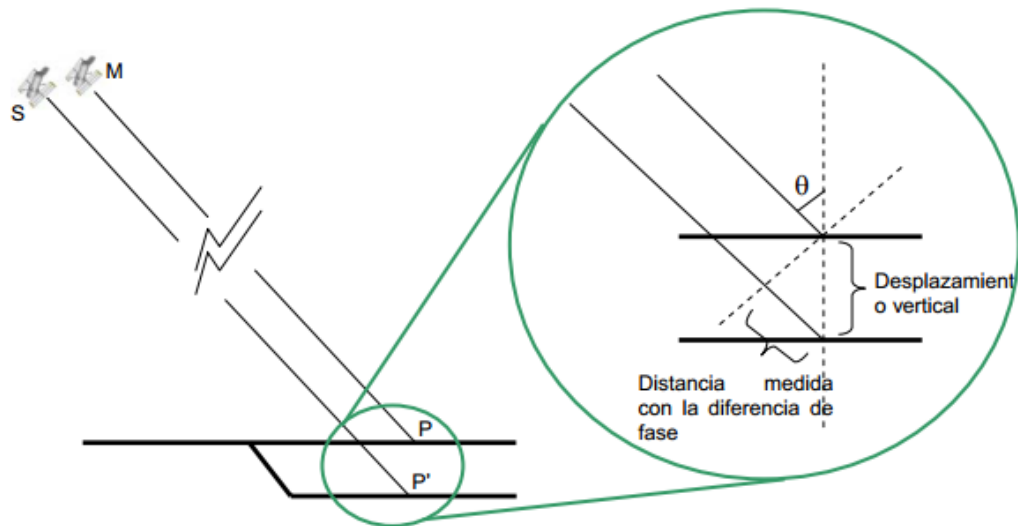


Figura 2. 9. Esquema de adquisición entre los dos pases de un Satélite

Fuente:(Olmsted, 1993)

### 2.3.2 Cálculo del interferograma

Se calcula a partir de las dos señales complejas adquiridas respectivamente de las antenas SAR, donde se obtiene multiplicando la primera señal por la compleja conjugada de la segunda, como se indica a continuación:

$$\begin{aligned}
 Z_1(x, y) &= Z_1(x, y) * Z_2^*(x, y) \\
 &= A_1(x, y) * A_2(x, y) * e^{i[1(x,y)-2(x,y)]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_1(x, y) * e^{i_1(x,y)} &= A_1(x, y) * e^{i\delta(x,y)} \\
 &= A_1(x, y) * (\cos \delta + i \sin \delta) A_1(x, y) * \cos \delta + i A_1(x, y) \sin \delta \\
 &= Z_{Ireal}(x, y) + i Z_{Iim}(x, y)
 \end{aligned}$$

**Fuente:(Olmsted, 1993)**

Donde

- $Z_1(x, y)$  es el valor del interferograma en una posición de la imagen,
- $A_1(x, y)$  es la amplitud del interferograma,
- $(x, y)$  es la posición de la imagen,
- $i$  es el número complejo,
- $*$  indica el complejo conjugado.

### 2.3.3 Coherencia

InSAR tiene el procesamiento de los datos como mínimo de dos imágenes SAR que cubran la misma área. Se hallan numerosos parámetros que influyen perjudicialmente en la imagen que adquirimos dando lugar a una pérdida de correlación entre las dos imágenes. La coherencia nos mide el grado de correlación entre las dos imágenes SAR, el cálculo para dos imágenes SAR complejas  $s_1$  y  $s_2$  se muestra a continuación:

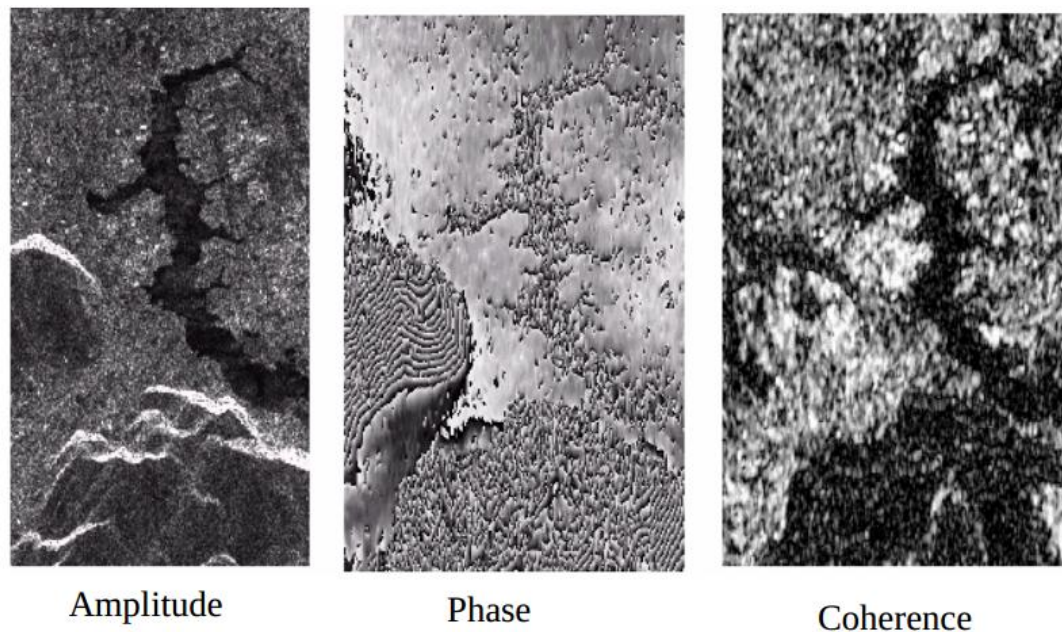
$$\gamma = \frac{E[s_1 * s_2^*]}{\sqrt{E[|s_1|^2] * E[|s_2|^2]}}$$

Donde,

- $E [ ]$  representa el valor esperado (esperanza)
- El símbolo  $*$  es el conjugado del número complejo



La coherencia interferométrica está comprendido entre 0 (las dos imágenes están totalmente decorreladas) y 1 (no ha habido cambios entre los dos pases del satélite). A continuación ejemplos de mapas de coherencias:



**Figura 2. 10. Mapas de Coherencias**

**Fuente:(ESA, 2010)**

#### **2.4 Plataforma satelital (ALOS)**

El satélite ALOS (Advance Land Observing Satellite) de la agencia espacial japonesa (JAXA), cuenta con 3 sensores a bordo, uno de mapeo estéreo de alta resolución (PRISM), radiómetro de espectro visible e infrarrojo (AVNIR-2) y radar de apertura sintética en banda L (PALSAR). PALSAR es un instrumento polarimétrico que puede operar en modo fine-beam con polarización cuádruple, doble y simple y modo Scan-SAR con polarización simple. La frecuencia central que se utiliza para el modo Scan-SAR es de 14 MHz.

Estos sensores deben adquirir imágenes con posicionamiento compatible con escala de 1:25.000, su uso de puntos de control en el terreno (según JAXA), debido al avanzado sistema de control de órbita y actitudes de ALOS, basado en un receptor GPS de doble frecuencia y rastreador de estrellas, entre otros

dispositivos. Se estima que la posición del satélite pasa a ser determinada con precisión de 1 m. El Satélite ALOS entra a una fase operacional el 24 de octubre de 2006.

**Cuadro 2. 2. Especificaciones del Satélite**

<b>Especificaciones</b>	
Tiempo de Vida útil	De 3 a 5 años
Tipo de órbita	Sincronizada con el sol
Ciclo Completo	46 días
Altitud	691.65 Km
Polarización	HH+VV+HV+VH
Resolución	24 - 89 m
Ancho de barrido	20 - 65 Km

**Fuente:(CONAE, 2013)**

### *Sensores del Satélite*

#### **2.4.1 AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2)**

Es un sensor multiespectral avanzado que detecta imágenes en el espectro visible e Infrarrojo cercano para la obtención de datos sobre uso de suelo y vegetación, con una resolución espacial de 10 metros. Cada imagen tiene una extensión de 70x70 Km<sup>2</sup>. AVNIR -2 es un sensor multiespectral de 4 bandas dotado de una capacidad de visualización de +/-44 grados que permite una revisita de hasta 2 días. Tiene aplicación en el área medioambiental, clasificación de suelos y seguimiento de desastres naturales.

**Cuadro 2. 3. Resolución Espectral del AVNIR-2**

<b>Banda</b>	<b>Longitud de Onda (micras)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
1	0.42-0.50 (azul)	10
2	0.52-0.60 (verde)	10
3	0.61-0.69 (rojo)	10
4	0.76-0.89 ((Infrarrojo - Infrarrojo cercano)	10

**Fuente:(Lau, 2011)**

### 2.4.2 *PRISM (Sensing Instrument for Stereo Mapping)*

Es un sensor pancromático para mapeo estéreo compuesto de tres sistemas ópticos (telescopios) con vista adelante, atrás y al nadir (forward, back y nadir), para la obtención de datos tridimensionales de la superficie terrestre, con una resolución espacial de 2,5 metros. Con una superficie común de 35x35 Km<sup>2</sup>, de manera que permite hacer estereoscopia y generar modelos digitales de elevación de alta precisión.

**Cuadro 2. 4. Resolución Espectral del PRISM**

<b>Banda</b>	<b>Longitud de Onda (micras)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
PAN	0.52-0.77	2.5

**Fuente:(Lau, 2011)**

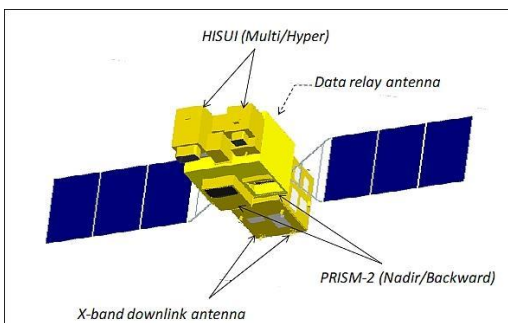
### 2.4.3 *PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)*

Es un sistema avanzado de radar de apertura sintética en la banda L, para la captura de imágenes a través de microondas ideal para detectar cambios topográficos y geológicos a partir de señales reflejadas en la superficie de la Tierra. Con estos instrumentos, ALOS tiene una capacidad de obtención de imágenes de alta resolución de la cubierta

**Cuadro 2. 5. Resolución Espectral del PALSAR**

<b>Modalidad PALSAR</b>	<b>Resolución (metros)</b>	<b>Polarización</b>	<b>Cobertura transversal</b>
Resolución Fina	10	HH	70 Km
Resolución Fina	20	HH+HV	70 Km
SL Scan SAR	100	HH	350 Km
P Fine Polarimetría	30	HH+HV+VH+ VV	30 Km

**Fuente:(Lau, 2011)**



**Figura 2. 11. Satélite ALOS**

**Fuente:(ESA, 2010)**

En la siguiente tabla se presenta las misiones satelitales Radar y próximas a realizarse, la que contiene diferente información.

**Cuadro 2. 6. Misiones Satelitales y Próximas Misiones**

Satélites	Banda	Polarización	Angulo de Incidencia (grados)	Resolución(metros)	Ancho de Barrido(km)	Lanzamiento
ERS-1	C	VV	24	25	100	1991
SIR-C	C,L	FULL	17-60	25	15-40	1994
JERS-1	L	HH	35	18	76	1992
ERS-2	C	VV	24	25	100	1995
ENVISAT	C	HH+H V;VV+ VH;HH +VV	20-45	30	50-400	1999
RADARSAT-1	C	HH	10-60	10-100	50-500	1995
RADARSAT-2	C	FULL	10-60	3-100	10-500	2008
COSMO-SKYMED	C	HH+H V;VV+ VH;HH +VV	20-60	1-100	10-200	2005
SAOCOM	L	FULL	11-48	10-100	31-126	2015
SMAP	L	FULL	40	40	1000	2015

**Fuente: CONAE (2013)**

## 2.5 ESTADO DEL ARTE

Con la invención del Radar, han surgido varios campos de investigación respecto a la aplicación para poder comprender un poco más la dinámica de la tierra. Aunque el avance de la técnica DInSAR ha sido amplia, en este prefacio vamos a caracterizar a las más sobresalientes, que en una u otra forma contribuye al estudio de la deformación de la superficie terrestre.

Con estas técnicas se puede conseguir las diferencias de las técnicas DInSAR clásicas, las cuales son las siguientes:

- Estimación de la evolución temporal de deslizamiento
- Precisión del orden del milímetro,
- Minimización de error topográfico y efectos atmosféricos,
- Monitorización de desplazamientos lentos.

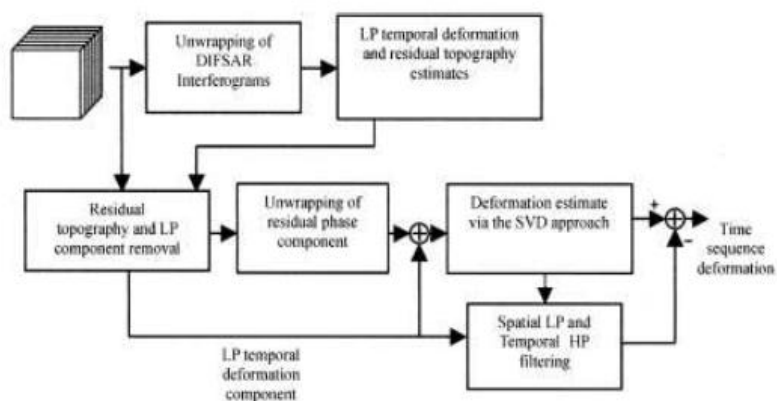
A continuación se describe las técnicas multi interferogramas más trascendentales y usadas. En cada una de ellas se expone con mayor detalle cómo funciona cada metodología.

### 2.5.1 Técnica Small Baseline DInSAR (SBAS)

Es un algoritmo el cual trata de producir mapas de velocidad de deformación y series de tiempo mediante la explotación de los datos SAR, adquiridos específicamente en banda C a través de la aplicación del enfoque del subconjunto de línea base pequeño (SBAS). Esta técnica da un enfoque que permite detectar la deformación de la superficie de la tierra y su evolución temporal.

El concepto principal del enfoque se basa en la selección de los pares de datos utilizados para calcular los interferogramas; no todas las combinaciones se consideran; se seleccionan los pares de tal manera que se minimice la separación espacial y temporal entre las orbitas de adquisición. Esto es útil para

reducir el ruido relacionado con fenómenos de decorrelación y para garantizar una alta densidad espacial de píxeles mensurables dentro del área de interés. Sin embargo, estas limitaciones pueden causar que los datos se agrupan en varios subconjuntos (Pequeños Subconjuntos de Línea Base) que no están conectados entre sí y están separados por grandes líneas de base (Berardino et al., 2002). Al darse la combinación del interferograma posterior, que conduce al producto de series de tiempo y la deformación del suelo. A partir de mínimos cuadrados, la inversión no es adecuada debido a que el hecho de que los pequeños subconjuntos de línea de base son independientes implica que el sistema de ecuaciones lineal asociado es indeterminado y, por lo tanto, la solución no es única. Esta es la razón por la que el algoritmo selecciona todas las posibles soluciones de mínimos cuadrados el que toma también la muestra de norma mínima; El cual se logra con el uso de la técnica de descomposición en valores singulares (SVD). Debido a la complejidad del procedimiento global y el impacto que la selección de la selección subconjunto (y de los otros parámetros que se detallan en la siguiente) puede tener en la solución final, el algoritmo no puede funcionar de una manera completamente automática y necesita muchas interacciones con un operador experto (ASI, 2010).



**Figura 2. 12. Esquema del Algoritmo SBAS**

**Fuente:(Berardino et al., 2002)**

Al tener en cuenta una serie M+1 de imágenes adquiridas sobre la misma área en diferentes momentos, podemos calcular una serie de M interferogramas

diferenciales. Cada interferograma DInSAR se calibra respecto a un punto de referencia, dando un pixel genérico de  $j$ -th situado en el azimut y el alcance de las coordenadas  $(x, y)$ , donde obtenemos la siguiente componente de fase topográfica:

$$\delta\phi_j(x, y) = \phi(tB, x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(tB, x, y) - d(tA, x, y)] + \delta\phi_{Topo} + \delta\phi_{atm}$$

Donde,

- $\lambda$  es la longitud de onda de radar,
- $\phi(t_i, x, y)$  es la fase desconocida de la imagen utilizada para la formación y el interferograma ,
- $d(t_i; x, y)$  es el LOS, proyección del tiempo de deformación acumulada,
- $\delta\phi_{Topo}$  es la fase topográfica,
- $\delta\phi_{atm}$  es la fase de la atmósfera.

Los valores de deformación asociados con el píxel considerado se pueden obtener mediante el uso de la siguiente representación forma de matriz:

$$A\phi = \delta\phi$$

Reemplazando la ecuación anterior con las actuales variables desconocidas con la velocidad media entre las adquisiciones adyacentes, dando lo siguiente:

$$V^T = [v_1 = \frac{\phi_1}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\phi_N - \phi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}$$

Sustituyendo está ecuación en la primera:

$$B_V = \delta\phi$$

La matriz no implica la presencia de grandes discontinuidades en la solución final, pero el paso posterior es una integración adicional para obtener el resultado final.

## 2.5.2 Técnica Topo-DInSAR

Es una técnica que presenta una nueva metodología para una generación de modelos digitales de elevación (DEM) por medio de la interferometría diferencial (DInSAR) sin necesidad de la clásica fase de desenvolver.

La aplicación de esta metodología es con el fin de minimizar los componentes de la fase no deseados, tales como la fase atmosférica, obtener una medición precisa del desplazamiento del terreno y su error topográfico. Se ha aplicado en la mayoría de los casos un modelo lineal para calcular la velocidad de desplazamiento media y su error digital del DEM que se utiliza para eliminar la topografía de los interferogramas originales.

Al obtener puntos redundantes permite mejorar la precisión de las diferencias topográficas, pero en aquellos puntos con alta calidad de fase. Para esto se requiere una metodología con un algoritmo DInSAR avanzado, el cual se desarrolló en el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) para obtener un DEM preciso a través de una pila de interferogramas topográficos altamente coherentes al contrario de los clásicos interferogramas diferenciales DInSAR, la ventaja de TopoDInSAR es que no requiere DEM externo, porque la reconstrucción de la topografía cubre casi todos los píxeles de la escena debido a las diferencias temporales cortas entre interferogramas.

La metodología usada se basa en la estimación de la velocidad media y los residuos topográficos a partir de una pila de fases interferométricas (Mora et al., 2005), que al generar el interferograma mediante la combinación de imágenes SAR, la variación de fase entre los píxeles vecinos puede expresarse como:

$$\Phi_{D-Int} = \Phi_{Flat} + \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise}$$

Donde,



- $\Phi_{\text{Flat}}$  es el componente de la tierra plana relacionados con una distancia de alcance,
- $\Phi_{\text{Topo}}$  es la fase topográfica,
- $\Phi_{\text{Mov}}$  es el componente debido al desplazamiento del terreno en dirección del alcance [línea de visión (LOS)] entre ambas adquisiciones SAR,
- $\Phi_{\text{Atm}}$  es la fase atmosférica,
- $\Phi_{\text{Noise}}$  es la fase de ruido.

Al retirar la Tierra plana, obtenemos la siguiente fase TopoDInSAR:

$$\Phi_{\text{Topo-DInSAR}} = \Phi_{\text{Topo}} + \Phi_{\text{Mov}} + \Phi_{\text{Atm}} + \Phi_{\text{Noise}}$$

Al utilizar un conjunto de interferogramas TopoDInSAR de la misma zona, este modelo considera la deformación de velocidad lineal al igual que la topografía (Mora et al., 2005), se puede acumular interferogramas con diferentes líneas de base espaciales y temporales.

En todos los píxeles no puede ser aplicado el modelo TopoDInSAR dentro de la zona de estudio, ya que sólo una parte de ellos tiene la calidad suficiente debido a la decorrelación. Se utilizan interferogramas cortos de mucho alcance para que el porcentaje de píxeles útiles sea alta y suficiente para los propósitos topográficos.

En todos los casos la deformación será bastante baja en comparación con uno topográfico. Sin embargo el movimiento del terreno es muy fuerte, los interferogramas con bases temporales cortos presentara franjas de deformación y será necesario calcular el movimiento por estimación precisa de la topografía.

Primeramente la selección del píxel se basa en la calidad de fase antes de calcular la velocidad de la topografía y la deformación. Esta selección se puede hacer con el método basado en una coherencia espacial (Mora et al., 2005). La coherencia espacial se utiliza para obtener el estimador de máxima probabilidad de la magnitud coherencia y proporcionar una estimación de la exactitud de la

fase del píxel para cada interferograma que no depende del número de imágenes disponibles. Los píxeles en imágenes multilooking se seleccionan de su estabilidad coherencia utilizando la imagen significa la coherencia generada a partir de toda la pila de mapas de coherencia.

Posteriormente con el fin de obtener datos de alta calidad, independientemente de desplazamientos de fase conocidos, estos píxeles están relacionados por medio de la triangulación de Delaunay. Este tipo de triangulación se refiere a todos los píxeles vecinos de datos irregularmente cuadrículas que generan triángulos no traslapados (Delaunay, 1934). Otra ventaja de relacionar los píxeles vecinos es que el componente atmosférica se reduce al mínimo para cada relación debido a su proximidad espacial (Mora et al., 2005). Hay que tener en cuenta que cuando se utiliza pequeños interferogramas de referencia temporal, la distancia entre píxeles vecinos coherentes será normalmente un píxel. Como la topografía y la velocidad lineal son constantes en todo el conjunto de interferogramas diferenciales, es posible recuperar una buena estimación de ellos, ajustando el modelo de fase siguiente a los datos:

Dónde:

$$\begin{aligned} & \delta_{model}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} * T_i * [V_{model}(x_m, y_m) - V_{model}(x_n, y_n)] + \frac{4\pi}{\lambda} * \frac{b(T_i)}{r(T_i) * \sin \theta_i} \\ & \quad * [h_{model}(x_m, y_m) - h_{model}(x_n, y_n)] \end{aligned}$$

- $\lambda$  es la longitud de onda,
- $T_i$  es la brecha temporal para cada interferograma,
- $b$  es la línea de base espacial,
- $r$  es la distancia entre el satélite y el terreno,
- $\theta_i$  es el ángulo de incidencia,
- $h_{model}$  es la topografía,
- $(x, y)$  la posición del píxel en el interior del interferograma.

A continuación, el ajuste se realiza al maximizar la siguiente función de modelo de coherencia (Ferretti and Prati Rocca, 2000):

Dónde:

$$\begin{aligned} & \gamma_{model}(x_m, y_m, x_n, y_n) \\ &= \frac{1}{N} * \left\| \left[ \sum_{i=0}^N \exp(j * (\phi_{Topo-DInSAR}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \delta_{model}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i)) \right) \right] \right\| \end{aligned}$$

- N es el número de interferogramas.

Cuando el ajuste de los datos es perfecta es igual a uno, y cero en caso de decorrelación total. Al terminar el proceso de maximización para cada relación, el resultado es un conjunto de incrementos de la topografía y velocidad (Mora et al., 2005).

El siguiente paso es una integración necesaria para obtener los valores absolutos de altura para cada píxel. La integración se inicia desde diferentes puntos de origen, que se elige entre aquellos que presentan vínculos con mejores coherencias y calcula la topografía absoluta para cada píxel.

Donde el índice

$$\begin{aligned} & h_{estimated}(x, y) \\ &= \frac{1}{\sum_i \gamma_{model}(x, y, x_i, y_i)} \\ & \quad * \sum_i [h_{estimated}(x_i, y_i) + \Delta h_{estimated}(x, y, x_i, y_i)] * \gamma_{model}(x, y, x_i, y_i) \end{aligned}$$

- i corresponde a los píxeles vecinos conectados a la que se está integrando.

Con la contribución alcanzada de cada píxel, se pondera con el modelo de coherencia para reducir la contribución de los nexos menos confiables.

Al concluir se obtiene una distribución homogénea de las líneas de base espaciales para calcular correctamente la topografía, y cabe mencionar que los mejores resultados para la generación de un DEM es con la selección de línea de bases temporales pequeñas que permiten generar interferogramas con una decorrelación temporal inferior, y por lo tanto seleccionar un mayor número de píxeles coherentes.

La idea de utilizar nuevos algoritmos avanzados DInSAR para estimar desplazamientos se ha extendido a la generación de mapas completos topográficos, tomando en cuenta que el algoritmo DInSAR implementado en el ICC (El Instituto Cartográfico de Cataluña) se puede obtener DEM precisos a partir de la acumulación de interferogramas topográficos clásicos. Su ventaja se ve en la reducción al mínimo de las fases atmosféricas debido a una redundancia de datos y triangulaciones y a los innecesarios desenrollados clásicos de fase, ya que el modelo de fase se aplica directamente sobre las fases envueltos topográficos entre los píxeles adyacentes.

### **2.5.3 Técnica de los Permanent Scatterers DInSAR (PS, Dispersores Permanentes)**

La técnica PS-DInSAR se basa en la acumulación de imágenes SAR sobre una misma área, que pueden superar limitaciones de decorrelación espacial y temporal (Ferretti and Prati Rocca, 2000) (Bert and Nico, 2003). Los resultados de la técnica PS-DInSAR pueden ser de forma general en las mediciones de deformación más precisas y fiables. Diferentes estudios han demostrado que las técnicas típicamente pueden alcanzar una precisión milimétrica en la detección de deformaciones de la tierra, y la precisión inferior al metro en el cálculo de la corrección de altura (Liu et al., 2007).

Este método es de gran utilidad cuando se aplica para detectar largos periodos y movimientos de tierra lentos, como el hundimiento del suelo provocando por los deslizamientos de tierra a gran escala, y el movimiento tectónico. A pesar de

diversos estudios de la precisión entre la relación de la medición y el nivel de ruido de base, la técnica red PS se basa en el cálculo de las tasas de deformación lineales y correcciones de altura (Liu, 2003). El estado actual de la técnica proporciona varias ventajas en el método de la extracción de PS. Se analizado varias técnicas utilizando varios algoritmos basado en estadísticas con la amplitud y la coherencia (Ferretti et al., 2001).

Primeramente el algoritmo que se utiliza es para determinar un primer grupo de candidatos PS mediante la comparación de los valores de los pixeles del mapa de la coherencia con un umbral predeterminado. La primera adversidad es la selección del umbral, así como el uso de mapas adecuados, es decir lo que no son afectados por el ruido de decorrelación.

El primer comportamiento para ser seleccionados como candidatos idóneos es ser persistentes al no ser afectados por la decorrelación temporal y geométrica, dando lugar a amplitud estables. El siguiente índice se puede utilizar como medida de estabilidad de fase:

$$D_A = \frac{\sigma A}{m_A}$$

Donde,

- $\sigma A, m_A$  son la desviación estándar y la media de los valores de amplitud correspondientes a cada área de interés.

En general un comienzo de  $DA < 0,25$  se utiliza para seleccionar candidatos PS adecuados.

La amplitud puede ser analizada para cada píxel en cada vecindad considerada, y hay que tomar en cuenta la elección del tamaño de la ventana de estimación de cada uno de los problemas.

### 2.5.4 Técnica Time Series DInSAR (TS, Series de Tiempo)

Time-Series DInSAR es una técnica que utiliza imágenes de series para la recuperación de la deformación del terreno en secuencia de mucho tiempo, la cual sirve para mejorar las influencias de descorrelación espacial, temporal y efecto atmosférico con puntos que mantienen la coherencia en la serie de tiempo, donde se puede separar la fase de deformación lineal y no lineal.

En varios estudios TS-DInSAR se selecciona puntos en imágenes para series de tiempo, donde se obtiene un gran número de interferogramas diferenciales de acuerdo a la combinación para mantener la coherencia, para luego ser recogidos y conectados a la red triangular Delaunay. El modelo de la fase de velocidad de deformación se genera de acuerdo con la diferencia de fase de dos puntos cercanos en la red. Por lo tanto, desde un punto de velocidad conocida y error de altura, la velocidad absoluta y error de altura de todos los puntos conectados pueden ser integrados. Para obtener este resultado se restan las fases del modelo de fase diferencial inicial.

#### *Interferogramas*

Para la metodología de la técnica, hay que suponer que hay  $m+1$  imágenes SAR con respecto a la misma zona y ordenarlos según la adquisición y obtendremos  $n$  interferogramas de acuerdo con las condiciones de combinación.

$$(M + 1) \leq N \leq [M (M + 1)]/2$$

Las imágenes no requieren una imagen en común. La línea base temporales y espaciales son limitados en un cierto rango para mantener la suficiente coherencia. Dada estas condiciones se puede obtener un gran número de posibles interferogramas diferenciales a partir de un pequeño número de imágenes SAR.

La eliminación de la mayor parte de la fase topográfica se da usando un DEM de mayor resolución para obtener interferogramas diferenciales, la siguiente formula muestra cómo puede expresarse.

$$\Phi_{Int} = \Phi_{Topo} + \Phi_{Orb} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise}$$

Donde

- $\Phi_{Mov}$  es el cambio de fase debido al movimiento del píxel en dirección del satélite de línea de vista,
- $\Phi_{Atm}$  es la fase atmosférica,
- $\Phi_{Orb}$  es la fase de orbita debido a la inexactitudes,
- $\Phi_{Topo}$  es la fase topográfica residual debido a un error del DEM ,
- $\Phi_{Noise}$  es la fase de ruido.

Este método tiene un algoritmo que requiere otros procesos consultivos regionales conocidos como parches circulares centrados en el pixel. Así que se hace una selección inicial de candidatos de los parches basados en la dispersión de amplitud con alto valor del acceso, y luego se utiliza un algoritmo iterativo para identificar los procesos consultivos regionales finales (Hooper et al., 2004).

#### *Inversión de la Velocidad de Deformación Lineal y Error de Altura*

Para establecer los modelos de los PCR (parche circular centrado en píxeles) adyacentes y los parámetros desconocidos, necesitan conectarse por una red triangular, para esto se establece la de Delaunay, que hace que la diferencia de fase de (n) y puntos vecinos (m) es:

$$\begin{aligned} \delta_{\phi_{diff}}(m, n, T_i) &= \delta_{\phi}(m, n, T_i) + \delta_w(m, n, T_i) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} * T_i * \delta_V(m, n) + \frac{4\pi}{\lambda} * \frac{B_{\perp}(T_i)}{rT_i \sin \theta_i} * \delta\varepsilon(m, n) \end{aligned}$$

Donde,

- $\delta_V$  es que los incrementos de velocidad,
- $\delta\varepsilon$  es los incrementos de error de altura,
- $\delta_w$  es errores residuales, incluyendo la fase atmosférica, fase de error orbita, fase de deformación no lineal y la fase de ruido.

Pero la fase de error de orbita puede ser ignorada cuando los datos de la órbita son precisos. Cuando dos puntos vecinos están dentro de la distancia de correlación, la fase atmosférica puede suponerse igual. Por lo tanto, hay que suponer que  $\delta_w$  sólo contiene fase de deformación no lineal y la fase de ruido (Wu et al., 2008). Al obtener los incrementos de la velocidad de deformación lineal y error de altura la coherencia se establece:

$$\gamma_{model}(x_m, y_m, x_n, y_n) = \frac{1}{N} * \left\| \left[ \sum_{i=0}^N \exp(j * (\phi_{Diff}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) - \delta_{model}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i))) \right] \right\|$$

El valor de la función es el grado de ajuste entre las fases modelo medidos entre 0 y 1. Cuando el valor es cerca de 1, la estimación de los incrementos será cercanos al valor real. Sin embargo, cuanto mayor interferogramas se realice mejor será la estimación de incrementos.

#### *Deformación no lineal y Estimación de Fase Atmosférica*

Posteriormente de calcular la velocidad de deformación lineal es posible obtener la parte no lineal para concluir el estudio del desplazamiento. El primer paso es el cálculo de la fase residual que se puede obtener restando la deformación lineal estimado previamente y el error de altura a partir de las fases interferométricas diferenciales originales. Después de este paso, la fase residual contiene la fase de deformación no lineal, fase atmosférico y la fase de ruido (Yinghui and Yonghong, 2011). Teniendo en cuenta que el interferograma



se forma a partir de las fases de dos imágenes SAR separados en el tiempo, la fase interferométrica residual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\phi_{residue}(x, y, T_i) = \phi_{residue}(x, y, t_j) + \phi_{residue}(x, y, t_k)$$

- $t_j, t_k$  son los tiempos de adquisición de las dos imágenes SAR.

La Ecuación anterior se puede resolver con el método SVD (Descomposición en Valores Singulares) para recuperar la fase de cada imagen, pero antes la fase residual tiene que ser desvuelto antes de la resolución de la ecuación.

La fase atmosférica no se relacionada con en series de tiempo, pero es una señal de alta frecuencia en el tiempo y su relación está dentro del alcance y su baja frecuencia en el espacio (Ferretti and Prati Rocca, 2000). Por lo tanto, la fase atmosférica puede ser la estimación mediante el filtrado y por tiempo separado.

Al terminar toda la metodología anterior se puede decir que la técnica TS-DInSAR es una medida importante para la deformación terrestre lenta ideal para zonas urbanas, que reduce la gran acumulación de influencia atmosféricas, descorrelación espacial y temporal que sirve para superar las limitaciones de la técnica DInSAR.

### **2.5.5 Técnica Coherent Pixels Technique DInSAR, (CPT, Técnica de Píxeles Coherentes)**

El algoritmo que usa esta técnica estima las componentes lineal y no lineal del desplazamiento, ya que no necesita una imagen master común donde el error del DEM usado y los efectos atmosféricos para los conjuntos de interferogramas se tratan de forma conjunta. Los píxeles candidatos se seleccionan conforme a un modelo mediante el criterio de la coherencia, de ahí el nombre de la técnica porque los píxeles presenten en todas los interferogramas una coherencia por encima de un umbral son considerados para el análisis (Mora et al., 2006).

La metodología usada en esta técnica tiene las siguientes características:

- Selección del conjunto de imágenes que cubren en intervalo temporal deseado,
- Formación de pares de imágenes óptimos para el cálculo de los interferogramas según la línea base espacial máxima permitida,
- Identificación de los píxeles candidatos (aquellos que presentan una buena calidad de fase) con el criterio basado en la estabilidad de su coherencia a lo largo de la pila de interferogramas,
- Triangulación de los píxeles seleccionados para establecer relaciones de la fase entre ellos, y el ajuste del modelo lineal y el error del DEM a partir de estas relaciones para el conjunto completo de interferogramas.

Al estimar la deformación lineal se pasa a la estimación de la componente no lineal del desplazamiento, quitando esta componente de los efectos atmosféricos aplicando filtros sucesivos espacial y temporal. Los resultados son integrados e interpolados para generar los mapas de desplazamiento.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo primeramente se describirá el modelo geodinámico externo donde se caracteriza la conceptualización de los procesos de la deformación de la superficie terrestre.

A continuación se va utilizar la metodología DInSAR, la cual será nueva en los procesos de análisis de la explotación de datos SAR en el país, la que tendría una aplicación en el enfoque a combinaciones de imágenes adquiridas de la misma zona.

#### 3.1 Modelo Geodinámico Externo

El presente modelo geodinámico permite analizar los agentes o fuerzas que interviene en la geodinámica externa, que define las modificaciones de la superficie de la corteza terrestre. La geodinámica externa estudia la acción de los agentes atmosféricos externos, que van originando una lenta destrucción y modelación del paisaje rocoso y del relieve sobre la capa superficial de la Tierra, cuya actividad se desprenden materiales que una vez depositados forman rocas sedimentarias.

Para la obtención de los modelos de desplazamientos, caída y flujos, se ponderó los atributos de la cartografía temática, los que se menciona a continuación:

- ✓ Geología,
- ✓ Geomorfología,
- ✓ Cobertura y Uso del Suelo,
- ✓ Geopedología,
- ✓ Mapa Climático
- ✓ Pendientes

La aplicación del método AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS) donde se modela mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal criterio y los demás criterios se encuentran en los niveles intermedios, que base a ellos se hace la toma de decisión (Estrella et al., 2014).

Es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios y está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso. Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión (Gómez, 2008).

A continuación se aplica el método Thomas Saaty para eliminar el grado de subjetividad:

### Cuadro 3. 1. Jerarquización de Variables

ORDEN	INSUMOS	JERARQUIZACIÓN DESLIZAMIENTOS	JERARQUIZACIÓN CAÍDAS	JERARQUIZACIÓN FLUJOS
1	Litología	2	2	1
2	Geomorfología	5	6	6
3	Geopedología	4	5	2
4	Sistemas Productivos	3	4	5
5	Pendientes	1	1	4
6	Clima	6	3	3
Sumatoria		21	21	21

Fuente:(Estrella et al., 2014)

$$W_1 = \frac{N - O_i + 1}{\sum(N - O_i + 1)}$$

Dónde:

- $O_i$  = Grado de importancia
- $N$  = # de variable

**Cuadro 3. 2. Determinación de Pesos de las Variables para Deslizamientos**

DESLIZAMIENTOS				
1	6-2+1=	5/21=	0.24	Litología
2	6-5+1=	2/21=	0.09	Geomorfología
3	6-4+1=	3/21=	0.14	Geopedología
4	6-3+1=	4/21=	0.19	Sistemas Productivos
5	6-1+1=	6/21=	0.29	Pendientes
6	6-6+1=	1/21=	0.05	Clima
Sumatoria=			1.00	

Fuente:(Estrella et al., 2014)

**Cuadro 3. 3. Determinación de Pesos de las Variables para Caídas**

CAÍDAS				
1	6-2+1=	5/21=	0.24	Litología
2	6-6+1=	1/21=	0.05	Geomorfología
3	6-5+1=	2/21=	0.09	Geopedología
4	6-4+1=	3/21=	0.14	Sistemas Productivos
5	6-1+1=	6/21=	0.29	Pendientes
6	6-3+1=	4/21=	0.19	Clima
Sumatoria=			1.00	

Fuente:(Estrella et al., 2014)

**Cuadro 3. 4. Determinación de Pesos de las Variables para Flujos**

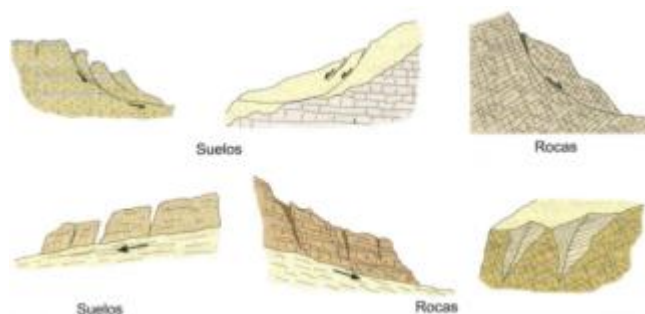
FLUJOS				
1	6-1+1=	6/21=	0.29	Litología
2	6-6+1=	1/21=	0.05	Geomorfología
3	6-2+1=	5/21=	0.24	Geopedología
4	6-5+1=	2/21=	0.09	Sistemas Productivos
5	6-4+1=	3/21=	0.14	Pendientes
6	6-3+1=	4/21=	0.19	Clima
Sumatoria=			1.00	

Fuente:(Estrella et al., 2014)

A continuación se describirá rápidamente de que se trata cada uno de los Modelos de la Geodinámica Externa antes mencionado:

### 3.1.1 Deslizamientos

Este tipo de movimiento de ladera es el desplazamiento del terreno que se produce en varias superficies de rotura bien definidas. La masa de desplaza en conjunto, es decir comportándose como una unidad. Su velocidad suele ser variable e implican a volúmenes grandes en general, pero no aplicándose siempre. La geometría de la superficie de rotura se puede discernir entre varios deslizamiento como la translacional o planar, cuando la superficie es un plano con una inclinación constante, y el deslizamiento rotacional, cuando la superficie de rotura es de superficie cóncava. Los deslizamientos rotacionales se producen fundamentalmente entre materiales homogéneos. Por otra parte los deslizamientos traslacionales suelen producirse sobre materiales heterogéneos con superficie de discontinuidad bien definida.



**Figura 3. 1. Tipos de Deslizamientos**

**Fuente:(González De Vallejo et al., 2002)**

A continuación se muestra el flujograma para la obtención de deslizamientos:

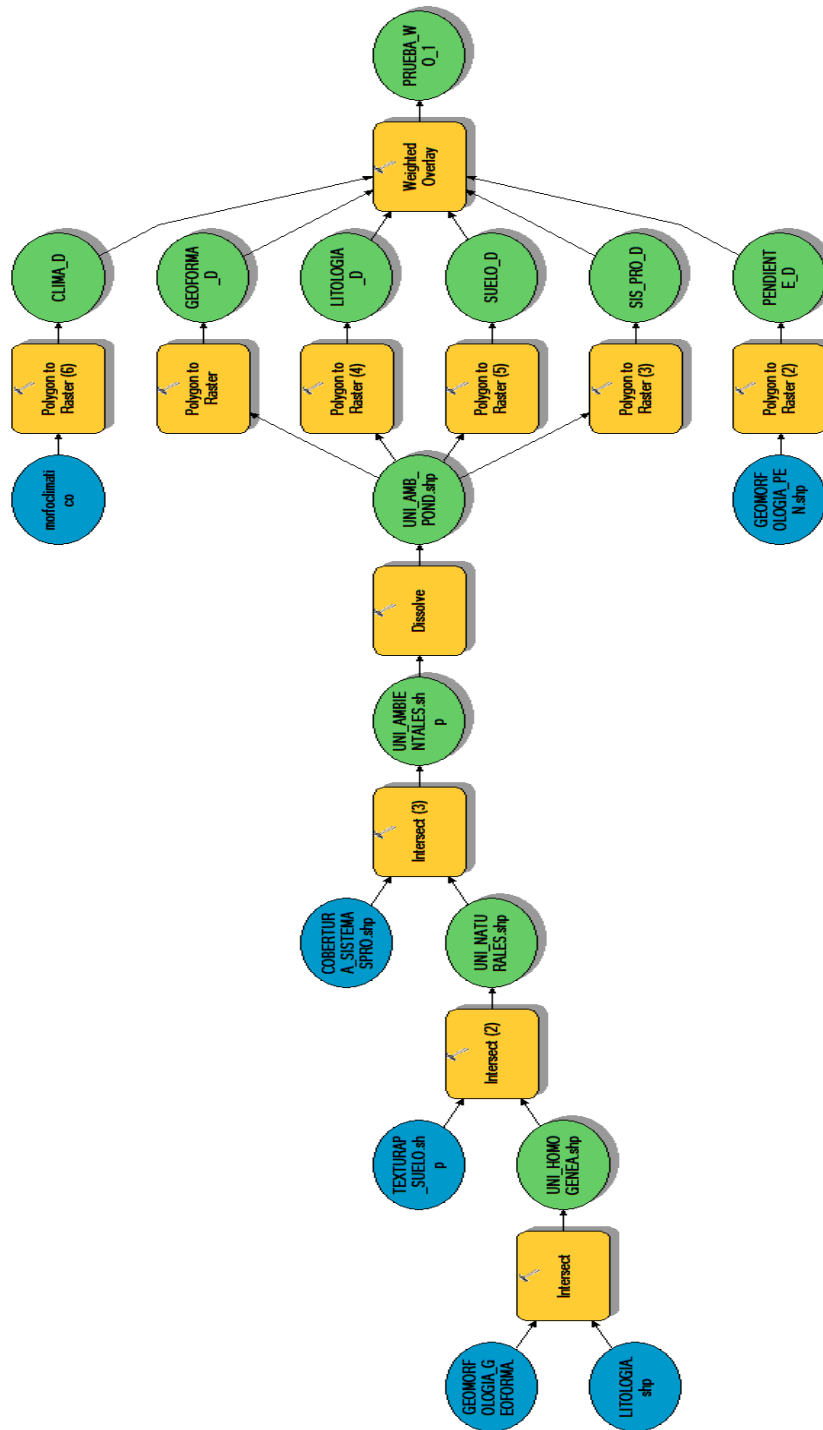
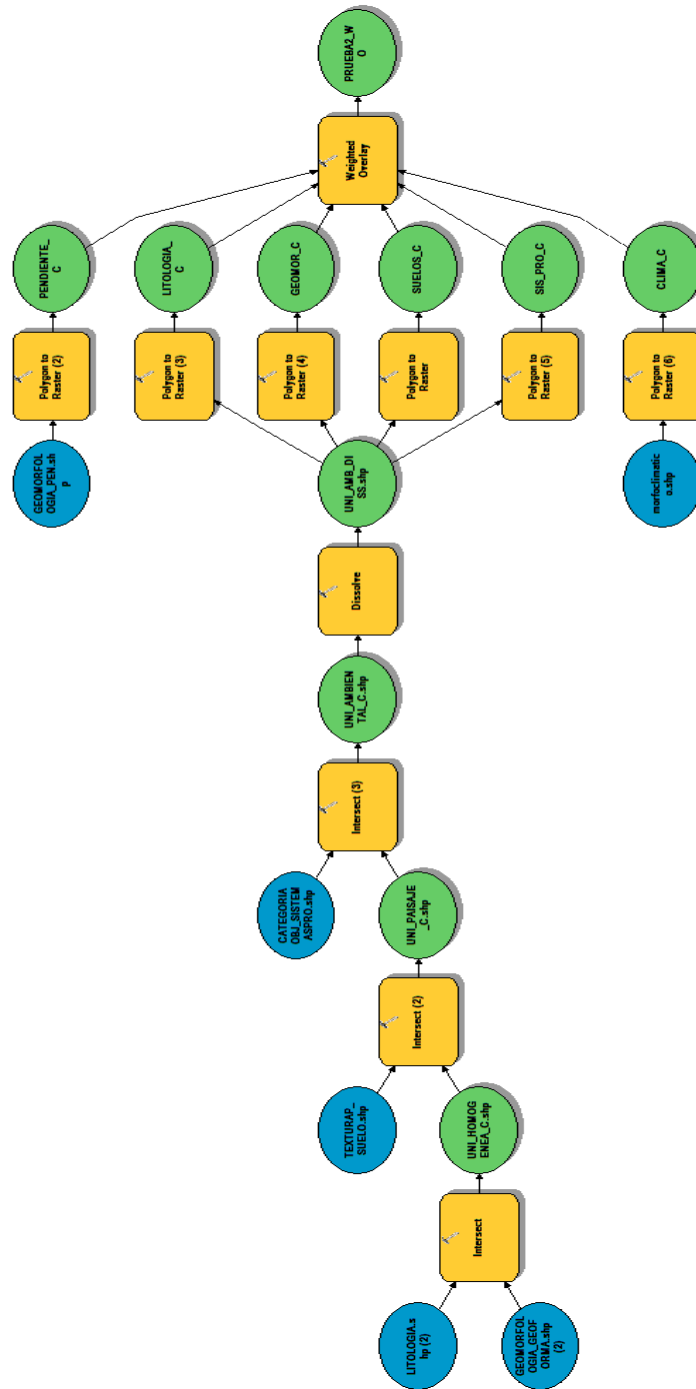


Figura 3. 2. Flujograma del Modelo de Deslizamiento

A continuación se muestra el Mapa de Deslizamiento para la Geodinámica Externa:

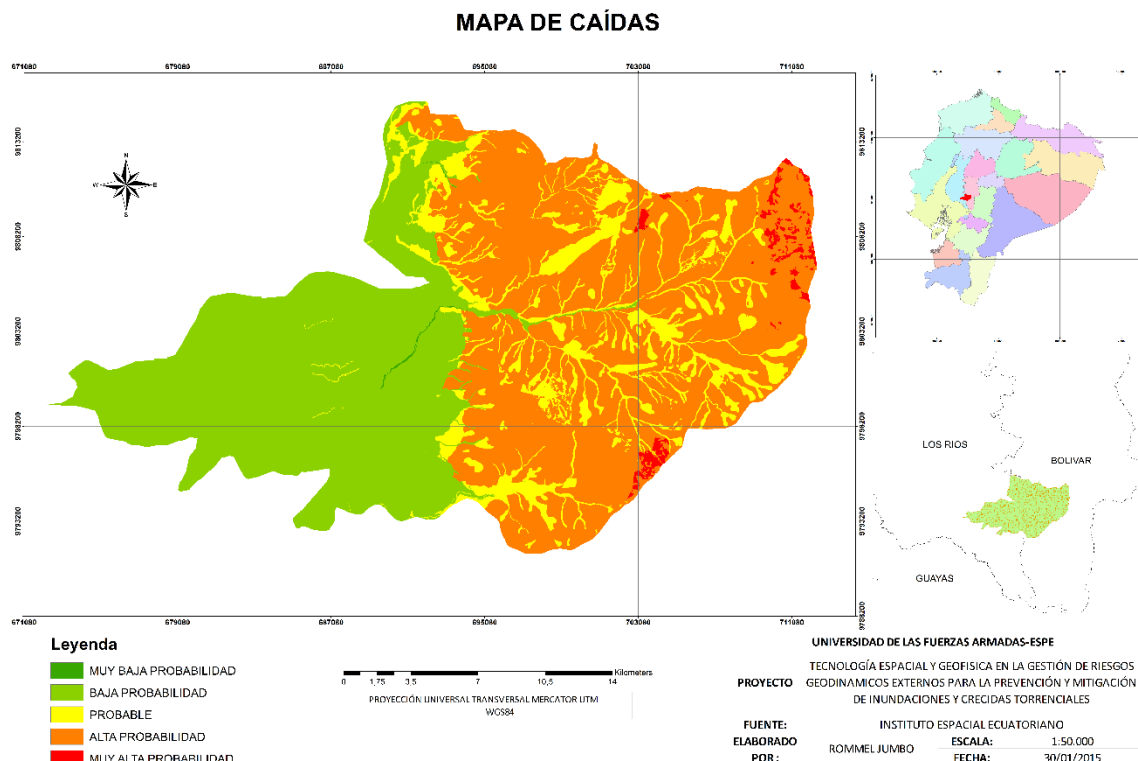






**Figura 3. 5. Flujograma del Modelo de Caídas**

A continuación se muestra el Mapa de Caídas para la Geodinámica Externa:



**Figura 3. 6. Mapa de Caídas**

### 3.1.3 Flujos

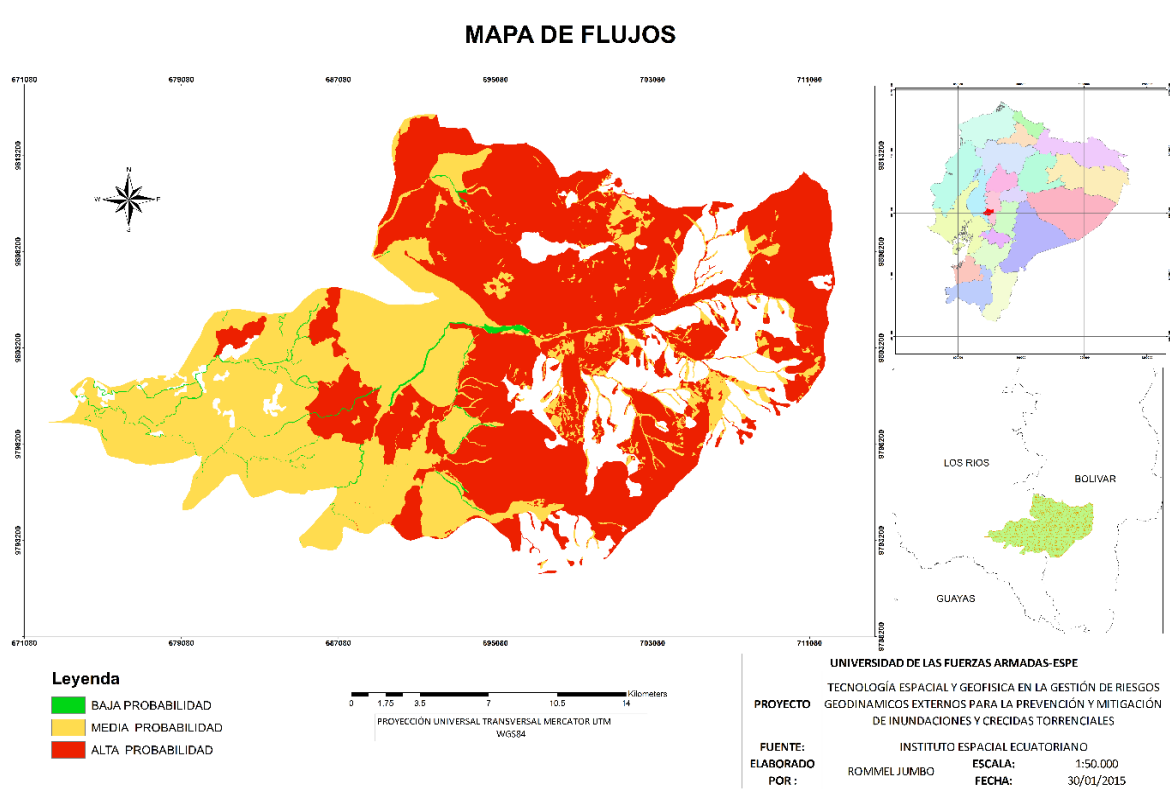
Los flujos son movimientos espacialmente continuos y su velocidad es rápida en las distribuciones de masa, ya que se parece a un fluido viscoso. La masa movida no se conserva la forma en su movimiento descendente, adoptando formas lobuladas, produciéndose especialmente en rocas, escombros y suelos. Existe una gradualidad en los flujos dependiendo del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento



**Figura 3. 7. Tipos de Flujos**

**Fuente:(González De Vallejo et al., 2002)**





**Figura 3. 9. Mapa de Flujos**

### 3.2 Obtención de la Información Base para la aplicación de la metodología DInSAR

Las imágenes SAR ALOS-PALSAR están disponibles en órbita ascendente y descendente para la zona de estudio, donde algunas tienen una sola polaridad y otras dobles polaridades debido a la característica de la toma y el satélite.

Las imágenes se clasificarán respecto al cubrimiento de la zona de estudio y se elegirá respectivamente pares para la generación de interferogramas las cuales se va a señalar más adelante.

El tiempo de toma va desde el año 2007 hasta el año 2009, en los siguientes cuadros se enumera las imágenes de órbita ascendente y descendente con su respectiva polaridad.

**Cuadro 3. 5. Imágenes de la Órbita Ascendente con su respectiva Polarización**

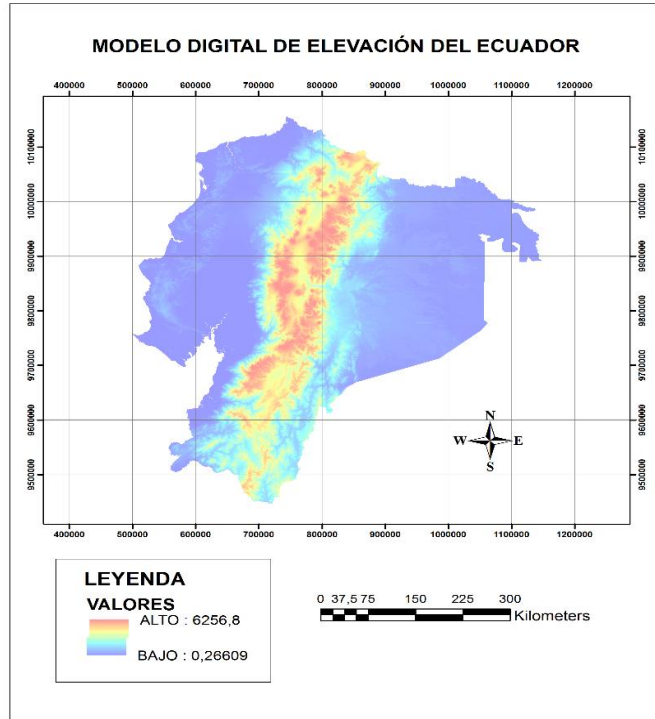
<b>Ascendente</b>	<b>Polarización</b>
PALSAR 20070109-140	HH
PALSAR 20070109-150	HH
PALSAR 20070712-140	HH+HV
PALSAR 20070712-150	HH+HV
PALSAR 20070827-140	HH+HV
PALSAR 20070827-150	HH+HV
PALSAR 20080112-140	HH
PALSAR 20080112-150	HH
PALSAR 20080529-140	HH+HV
PALSAR 20080529-150	HH+HV
PALSAR 20080714-140	HH+HV
PALSAR 20080714-150	HH+HV
PALSAR 20080829-140	HH+HV
PALSAR 20080829-150	HH+HV
PALSAR 20090114-140	HH
PALSAR 20090114-150	HH
PALSAR 20090717-140	HH+HV
PALSAR 20090717-150	HH+HV
PALSAR 20090901-140	HH+HV
PALSAR 20090901-150	HH+HV

**Cuadro 3. 6. Imágenes de la Órbita Descendente con su respectiva Polarización**

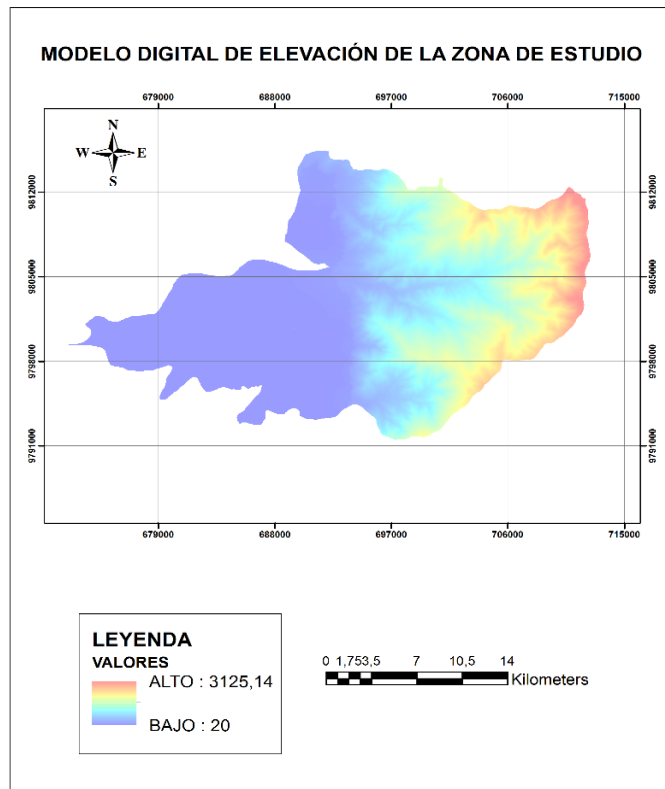
<b>Descendente</b>	<b>Polarización</b>
PALSAR 20071013-650	HH
PALSAR 20071013-660	HH
PALSAR 20071128-650	HH
PALSAR 20071128-660	HH
PALSAR 2008113-650	HH
PALSAR 2008113-660	HH

### **3.3 Modelo Digital de Elevación (DEM)**

El Modelo Digital de Elevación que se obtuvo por los datos de la Misión Espacial Topográfica de Radar (SRTM), el cual está disponible desde el 2003 por medio del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Los datos adquiridos para los Estados Unidos están disponibles en un 1 segundo de arco (30m), y para el resto del mundo está en 3 segundos de arco (90m) (USGS, 2003). El DEM que se va utilizar en nuestro caso es de 1 segundo de arco (30m).



(a) DEM del Ecuador



(b) DEM de la Zona de Estudio.

Figura 3. 10. Modelo Digital de Elevación (DEM)

### 3.4 Flujoograma de la Metodología DInSAR

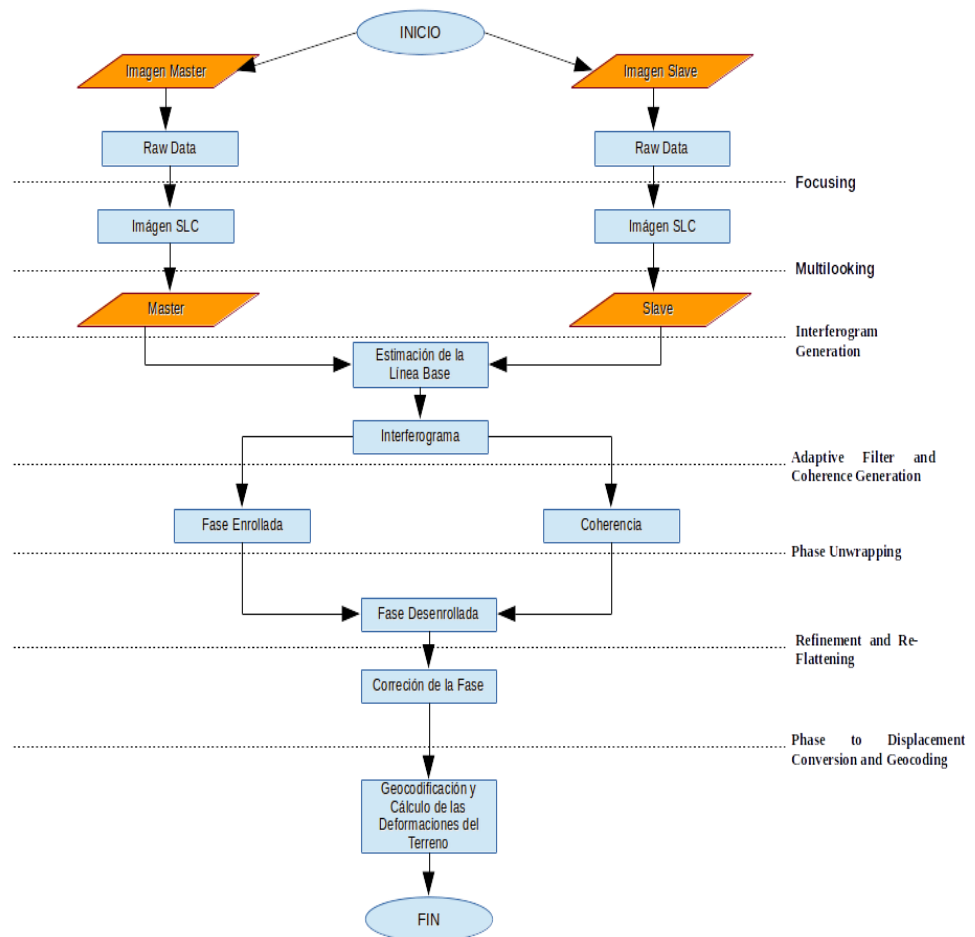


Figura 3. 11. Flujoograma de DInSAR en ENVI

### 3.5 Procesamiento de las Imágenes Radar para DInSAR

Para comenzar esta parte donde se realizará la metodología DInSAR, a partir de 6 pares de imágenes ALOS PALSAR ascendentes 2007 a 2009, presentando un nivel 1.0 es decir, son datos con señal reconstruida. Para el procedimiento y generación de interferogramas se utilizó el software ENVI 4.8.

**Cuadro 3. 7. Pares Interferométricos**

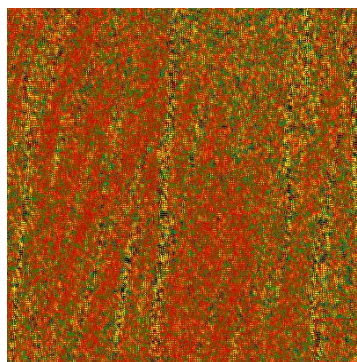
<b>Pares Interferométricos</b>	<b>Polarización</b>
PALSAR 20070712-140-20070827-140	HH+HH
PALSAR 20070712-150-20070827-150	HH+HH
PALSAR 20070827-140-20080529-140	HV+HV
PALSAR 20080529-150-20080714-150	HH+HH
PALSAR 20080829-140-20090717-140	HH+HH
PALSAR 20090717-140-20090901-150	HV+HV

### 3.6 Corrección de Imágenes

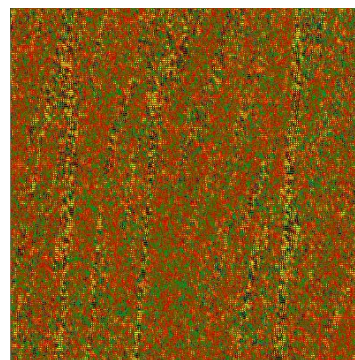
#### 3.6.1 *Focusing*

La herramienta Focusing permitirá a los datos adquiridos centrarse para generar datos Single Look Complex (SLC), que deben ser utilizados como primera entrada para el procesamiento de datos en cualquier otro módulo SARscape.

Se generara 2 archivos de salida, porque se utiliza imágenes de doble polaridad.



(a) Focusing HH



(b) Focusing HV

**Figura 3. 12. Imágenes ALOS PALSAR Focusing**

### 3.7 *Basic*

#### 3.7.1 *Multilooking*

Las imágenes del área de estudio se encuentran en Single Look Complex (SLC), que tienen la generalidad de presentar diferentes resoluciones espaciales en azimut como en range ground. A continuación se observa en la imagen SLC ENVISAT del 2012 presenta las siguientes dimensiones.



Resolution range: 13.1159200375

Resolution azimuth: 3.9858478707636116

Para realizar el proceso de multilooking, se considera el ángulo de incidencia que corresponde a la toma de la imagen, en nuestro caso el ángulo es 38.700000000000003, mostrando que la imagen es de tipo IS5, como se muestra a continuación:

**Cuadro 3. 8 Ángulos de Incidencia ASAR Image Mode Swaths**

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

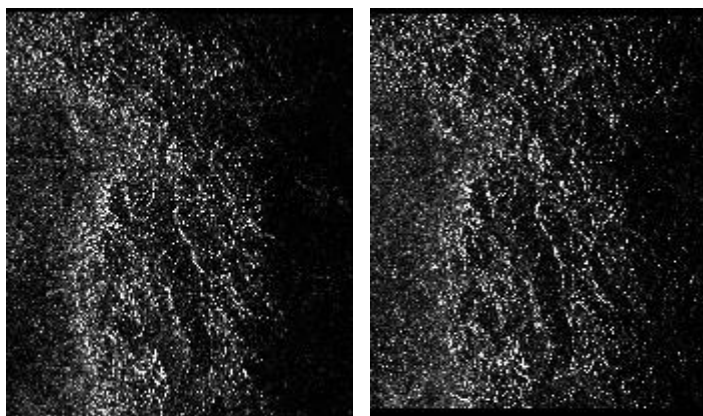
**Fuente: ESA 2007**

El proceso de multilooking es utilizar el procesador de señal SAR para restaurar la imagen y pasar los píxeles de forma rectangular a píxeles de forma cuadrada, asimilando la geometría a la realidad del terreno invirtiendo las medidas de los píxeles en azimuth y rango.

En la herramienta de SARscape automáticamente arroja los siguientes valores:

Azimuth=5

Range=1



(a) Multilooking HH

(b) Multilooking HV

**Figura 3. 13. Imágenes ALOS PALSAR Multilooking**

### 3.7.2 Filtering

Esta realiza una segunda registración de las imágenes, en esta ocasión espectral. Los pixeles de las imágenes Master y Slave, aunque ahora se superponen, tienen un espectro de frecuencia de respuesta retro dispersada proveniente de diversos dispersores de la tierra a causa de la diferente geometría de la adquisición. Tal proceso necesita de un doble filtrado específico, de acuerdo a la dirección: uno en rango y uno en acimut (Torlai, 2010).

### 3.8 Estimación de la Línea Base

La Estimación de la Línea Base permite obtener información acerca de los valores de referencia y otros parámetros relacionados con el par interferométrico, asimismo de medidas aproximadas destinadas a una caracterización preliminar de los datos y evaluación de la calidad interferométrica.

**Cuadro 3. 9. Estimación de la Línea Base**

Imagen Master	Imagen Slave	Normal Línea Base (m)
20070712-140	20070827-140	165.559
20070827-140	20080529-150	-667.054
20080529-150	20080714-150	424.277
20080714-150	20090717-140	420.688
20090717-140	20090901-150	167.205
20070712-140	20090901-150	357.015

### 3.9 Paso 1: "Interferogram Generation"

Para la generación de Interferogramas se requiere dos imágenes SAR donde la diferencia entre un punto en la Tierra y la posición del sensor en las dos adquisiciones puede ser medida por la diferencia de fase  $\varphi$ , co-registrado primeramente. El proceso se realiza multiplicando por una imagen y la conjugada compleja de la otra.

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

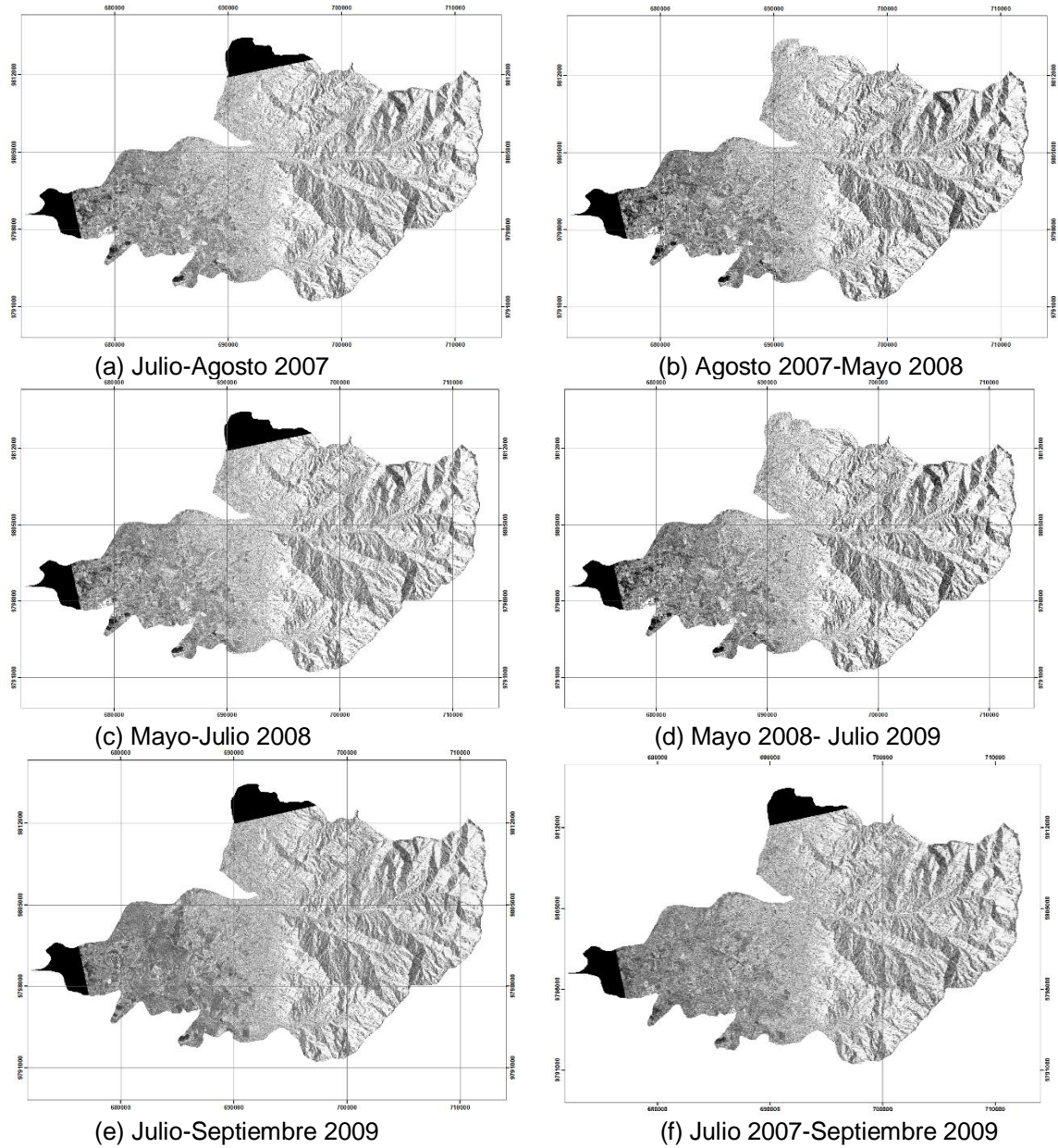
Una imagen SAR compleja está compuesta por un valor complejo representado por dos componentes representado por  $Z_1(x, y) = Z_{\text{real}}(x; y) + iZ_{\text{lim}}(x; y)$  y es determinada por el valor de amplitud y la fase, donde el valor de píxel se obtiene mediante la suma de cientos de señales recibidas.

Las posiciones de las imágenes Master y Slave son ligeramente diferentes debido a la trayectoria orbital. Pero para la generación del interferograma se procede a la multiplicación compleja de las Imágenes Master y Slave, después del alineamiento y re muestreo de la imagen Slave a los correspondientes píxeles de la imagen Master.

Obteniendo para cada píxel el valor absoluto de la amplitud y el valor de la diferencia de fase, que corresponderá a la diferencia de la fase entre dos píxeles homólogos.

Además este valor de diferencia puede ser adicionado el desplazamiento de fase causados por las señales reflejadas del objeto y el retraso de la propagación de la señal resultante de la atmósfera o la ionosfera. Generalmente el valor de la diferencia de fase siempre está asociado con un grado de incertidumbre, inherente al propio procesamiento de los datos de las imágenes y a la topografía de la superficie, que influye en la estimación de los valores de la altura (Piedra, 2012).

A continuación los interferogramas obtenidos:



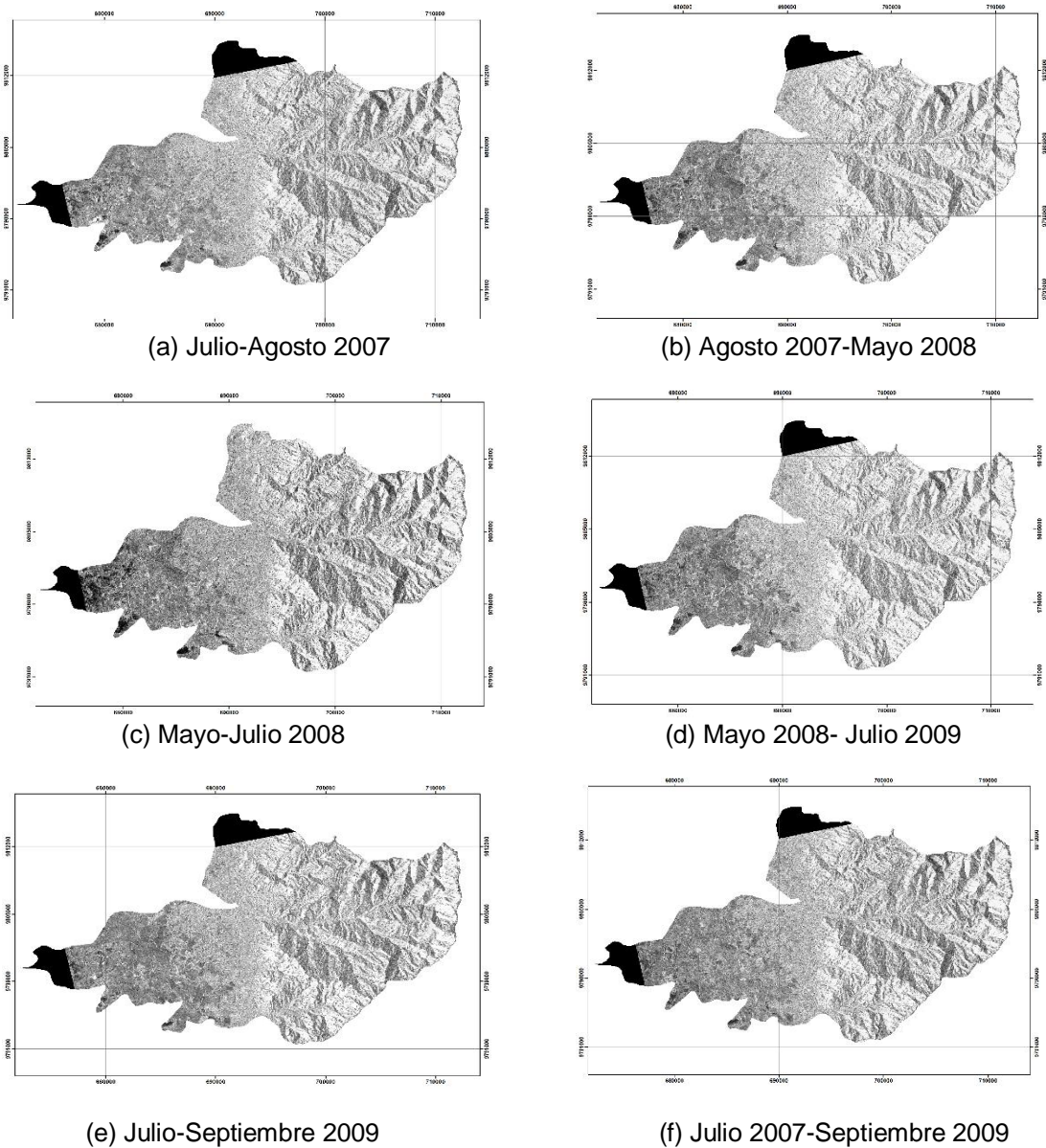
**Figura 3. 14. Interferogramas**

### **3.10 Paso 2: “Adaptive Filter and Coherence Generation”**

El interferograma realizado necesita un proceso de filtro. El filtro a utilizar es el Golstein, el cual utiliza un sistema que se adapta a la imagen, teniendo en cuenta el espectro de potencia presente en la escena, esto quiere decir que en altas zonas de concentración de franjas el sistema empareja los valores de los

píxeles, y en el caso de inexistencia de franjas el filtro no realiza ninguna modificación.

A continuación se muestra los interferogramas adaptados al filtro Golstein:

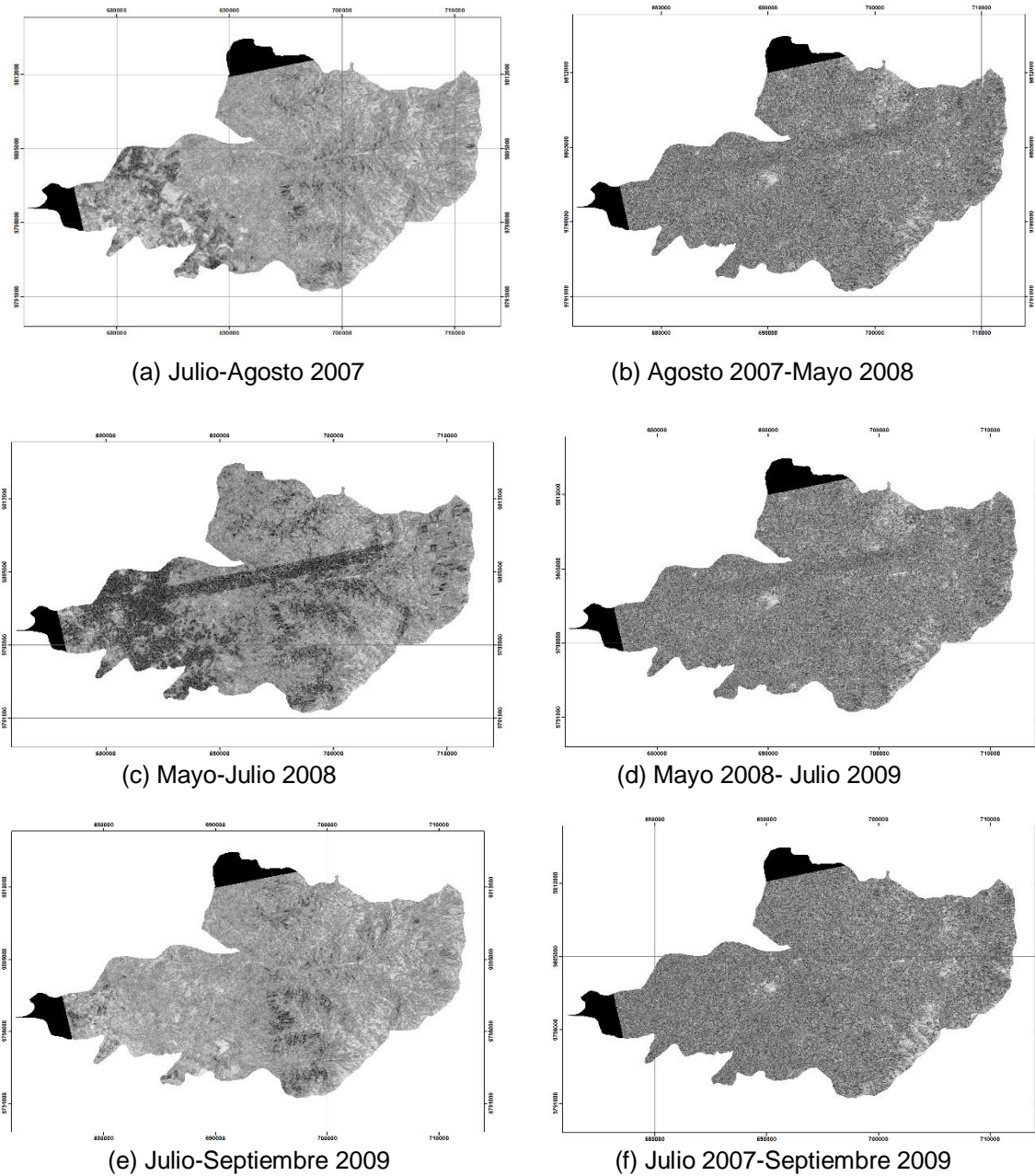


**Figura 3. 15. Interferogramas con Filtro Golstein**

La Coherencia compara dos imágenes y detecta los porcentajes de coherencia entre píxel y píxel. Este proceso presenta valores de 0 y 1, donde 0 no hay

coherencia (píxeles de color negro) y 1 donde existe coherencia (píxeles de color blanco).

A continuación los Mapas de Coherencia:

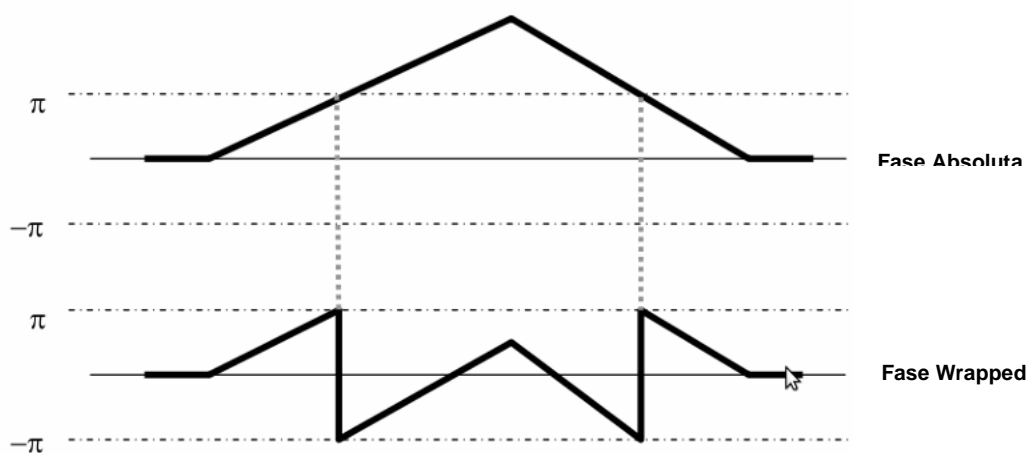


**Figura 3. 16. Mapas de Coherencia**

### 3.11 Paso 3: “Phase Unwrapping”

El Phase Unwrapping (Fase Desenrollada) trata de transformar la verdadera fase (la cual puede ser representada en cualquier diferente sistema de coordenadas) en una nueva fase definida en un intervalo  $[-\pi, \pi]$ , la cual está en un intervalo de  $2\pi$  llamada Wrapping (Fase Enrollada) (ASI, 2010).

Con este proceso las discontinuidades de fase  $2\pi$  son eliminadas añadiendo o restando un múltiplo entero de  $2\pi$  a cada píxel de la imagen con las fases interferométricas originales a lo que llamaremos Phase Unwrapping como se muestra en la figura 3.17.



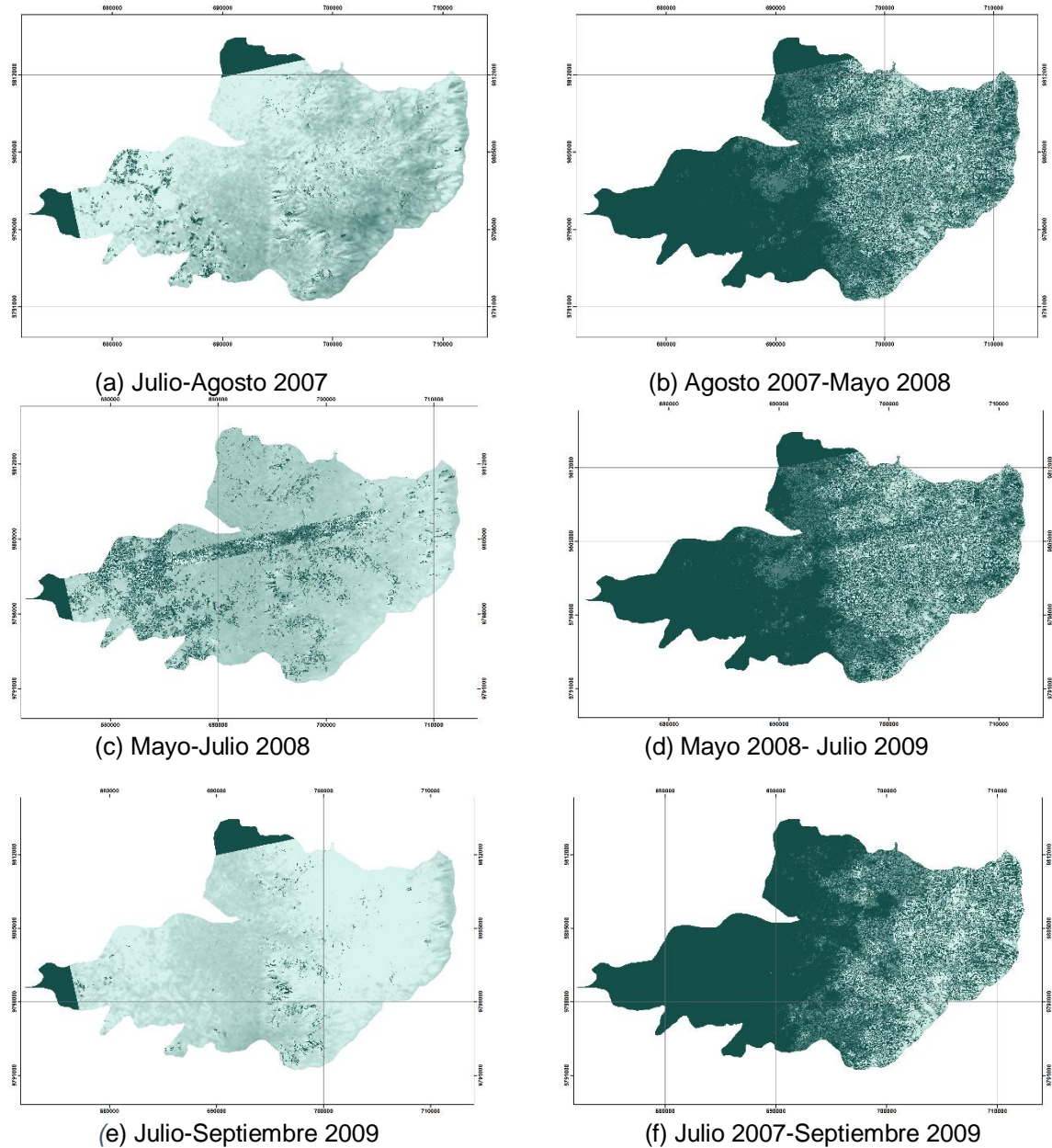
**Figura 3. 17. Fase Verdadera, Enrollada en  $2\pi$**

**Fuente: Agencia Espacial Italiana (ASI)**

El proceso utilizado es de “Flujo del Costo Mínimo”, ya que hace difícil debido a la presencia de grandes áreas de baja coherencia. Este algoritmo permite obtener mejores resultados que con otros métodos. El enfoque que realiza es a una cuadrícula en todos los píxeles de la imagen cuya coherencia es el más bajo.

El proceso se ejecuta tomando píxeles originales (-1) y de descomposición mínimo (1), este último se destina a multilooking y undersample de una manera iterativa: El interferograma se desenvuelve en la resolución más baja y luego reconstruida de vuelta en la resolución original, lo cual ayudara a reducir los errores al desenvolver y reducirá el tiempo de procesamiento.

A continuación los mapas de fase desarrollada:



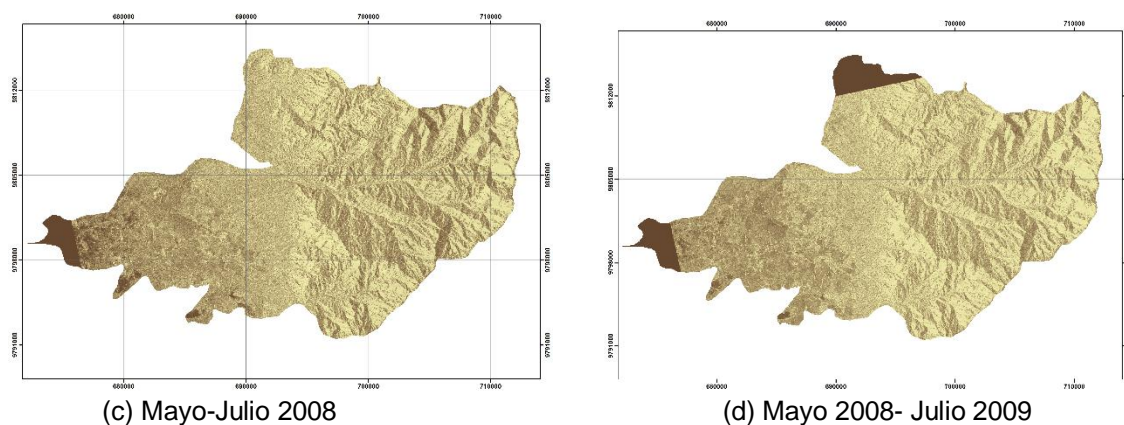
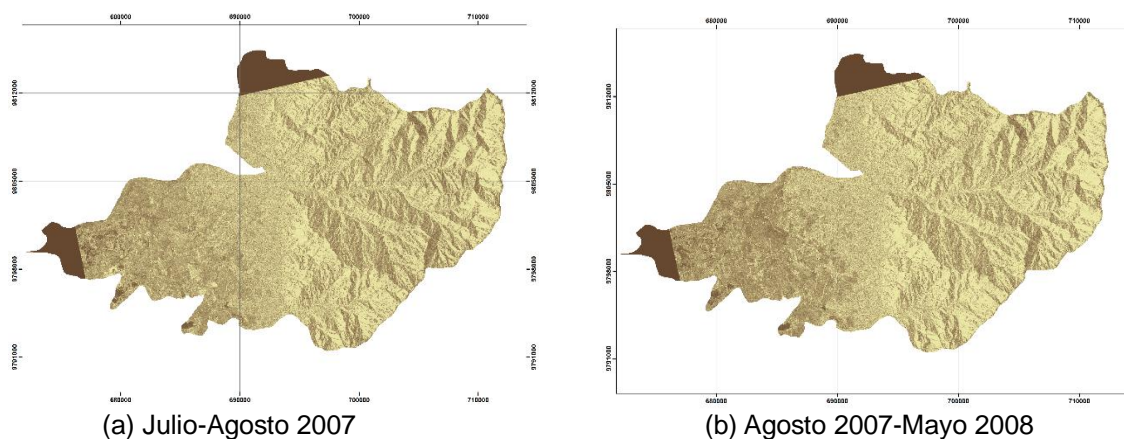
**Figura 3. 18. Mapas de las Fase Desenrollada**

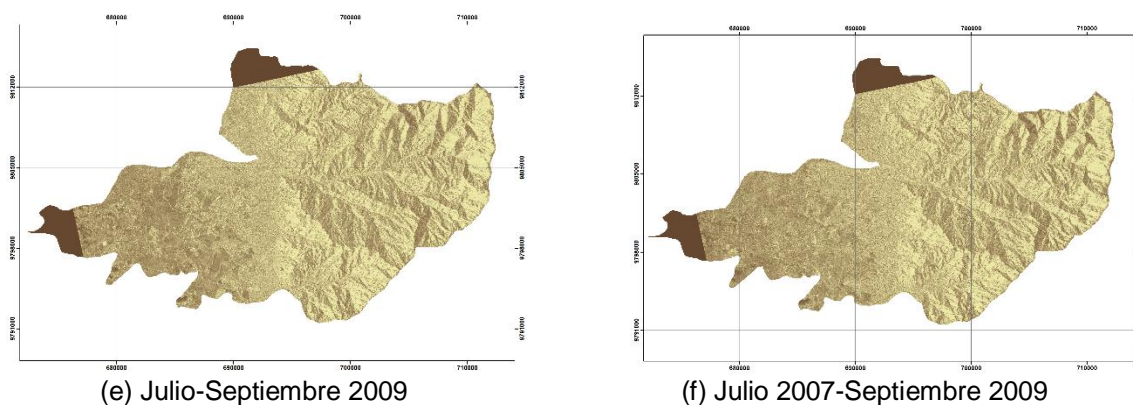


### 3.12 Paso 4: “Refinement and Re-flattening”

Este proceso es vital para una correcta transformación de la información de fase desenvuelta en valores de altura. Permite tanto afinar las orbitas es decir, la corrección de posibles inexactitudes y calcular el desplazamiento de fase mediante los valores de fase absolutos o eliminar posibles rampas de fase. Se utiliza puntos de control para los parámetros de corrección, que se seleccionaran para la entrada del aplanamiento del interferograma con el fin de evitar que zonas de franjas topográficas. Los puntos de control deben estar bien distribuidos a lo largo de toda la escena y su importancia radica en que pondera sobre cada valor de la coherencia. Si existen errores en la ‘Phase Unwrapping’ se debe corregir, de lo contrario se debe evitar las zonas erróneamente de los puntos de ubicación.

A continuación se muestra los mapas con refinamiento y reaplanamiento:





**Figura 3. 19. Mapas del Refinamiento y Reaplanamiento**

### **3.13 Paso 5: “Phase to Displacement Conversion and Geocoding”**

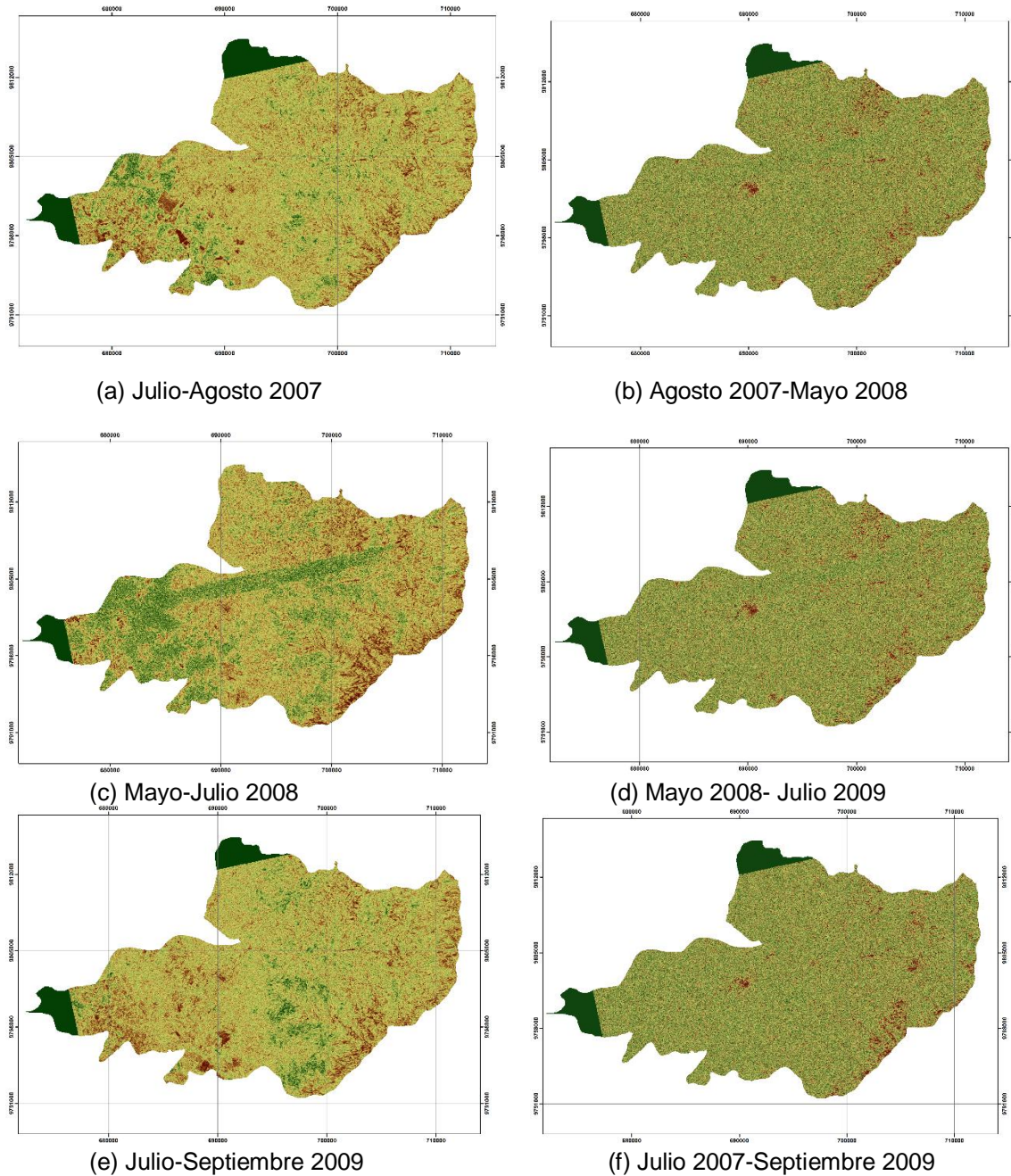
En este paso los valores de fase absolutos calibrados se convierten en desplazamientos y son directamente geocodificados en una proyección cartográfica. Este proceso se realiza considerando el enfoque Range-Doppler con las transformadas geodésicas y cartográficas relacionadas (The SAR-Guidebook, 2007).

Este proceso es importante, porque la diferencia fundamental es el efecto Range- Doppler y la geocodificación, que son aplicadas simultáneamente en las dos antenas, dando como resultado el desplazamiento, vale recalcar que la imagen de coherencia se geocodifica. El mapa como resultado tiene una magnitud de desplazamientos en metros.

Cada ciclo de  $2\pi$  (franja interferométrica) de fase diferencial corresponde a la mitad de longitud de onda de desplazamiento a lo largo de la dirección distancia oblicua (SAR dirección de visualización). Es posible especificar cualquier vector (es decir, dirección e inclinación), donde el desplazamiento medido distancia oblicua - se proyectará al componente de la deformación en la dirección de la visión por satélite. Por lo tanto este vector representa la re-proyección del componente de deformación alcance inclinado en una dirección en la planta que se conoce a priori y especificado por el usuario (es decir, “vertical “en caso de

hundimiento; “pendiente”. En caso de deslizamientos de tierra; medida en cualquier otro caso).

A continuación los mapas geocodificados con sus desplazamientos:



**Figura 3. 20. Mapas Geocodificados**

## CAPÍTULO IV

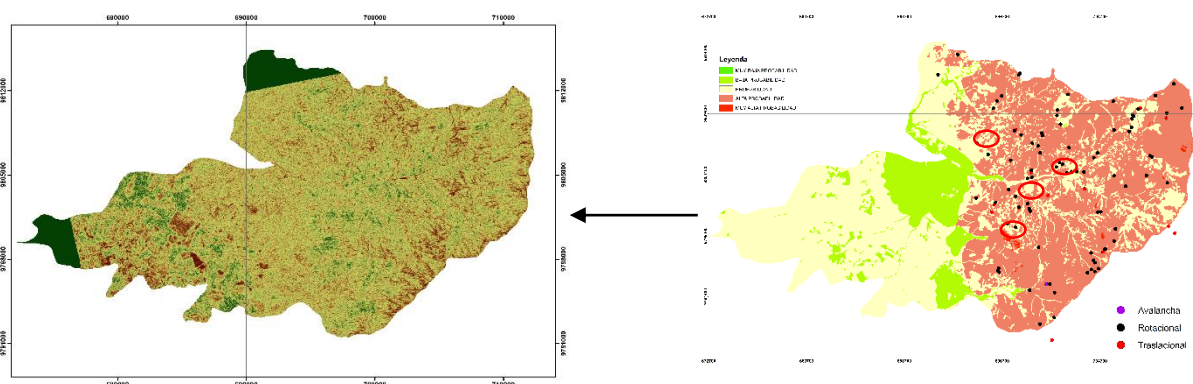
### 4. ANALÍISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrará los resultados más sobresalientes, con diferentes series de tiempo de los años de los interferogramas. Los mismos que incluyen un modelo geodinámico externo de comparación. Los resultados se relacionaran con la deformación de la superficie terrestre.

#### 4.1 Interpretación y Comparación con el Modelo Geodinámico Externo

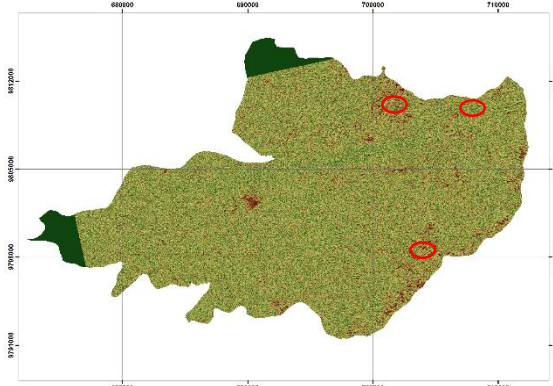
Con la finalidad de discernir la deformación de la superficie terrestre con el modelo geodinámico externo, a continuación se proporciona la comparación de los interferogramas con las diferentes variables de mapas de caídas, deslizamientos y flujos con el fin de justificar la metodología de DInSAR.

##### 4.1.1 Comparación con el Modelo de Deslizamientos

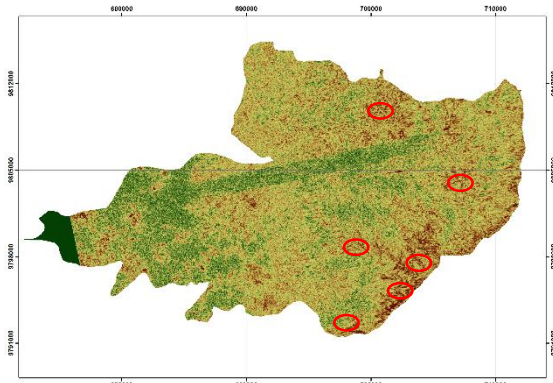


(a) Julio-Agosto 2007

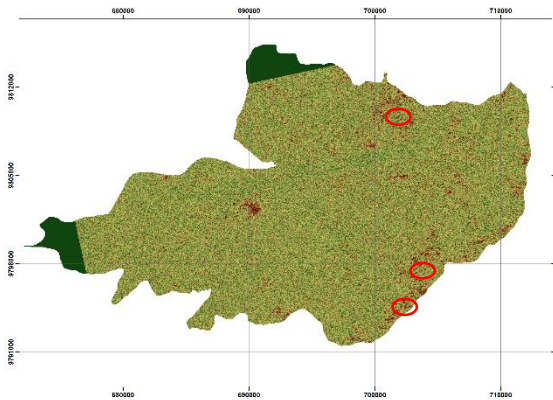
Mapa de Deslizamientos



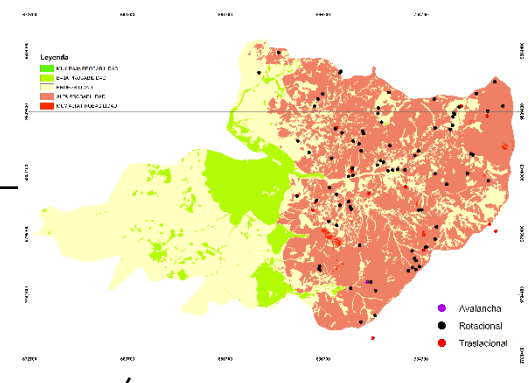
(b) Agosto 2007-Mayo 2008



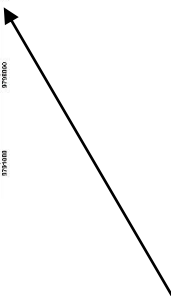
(c) Mayo-Julio 2008

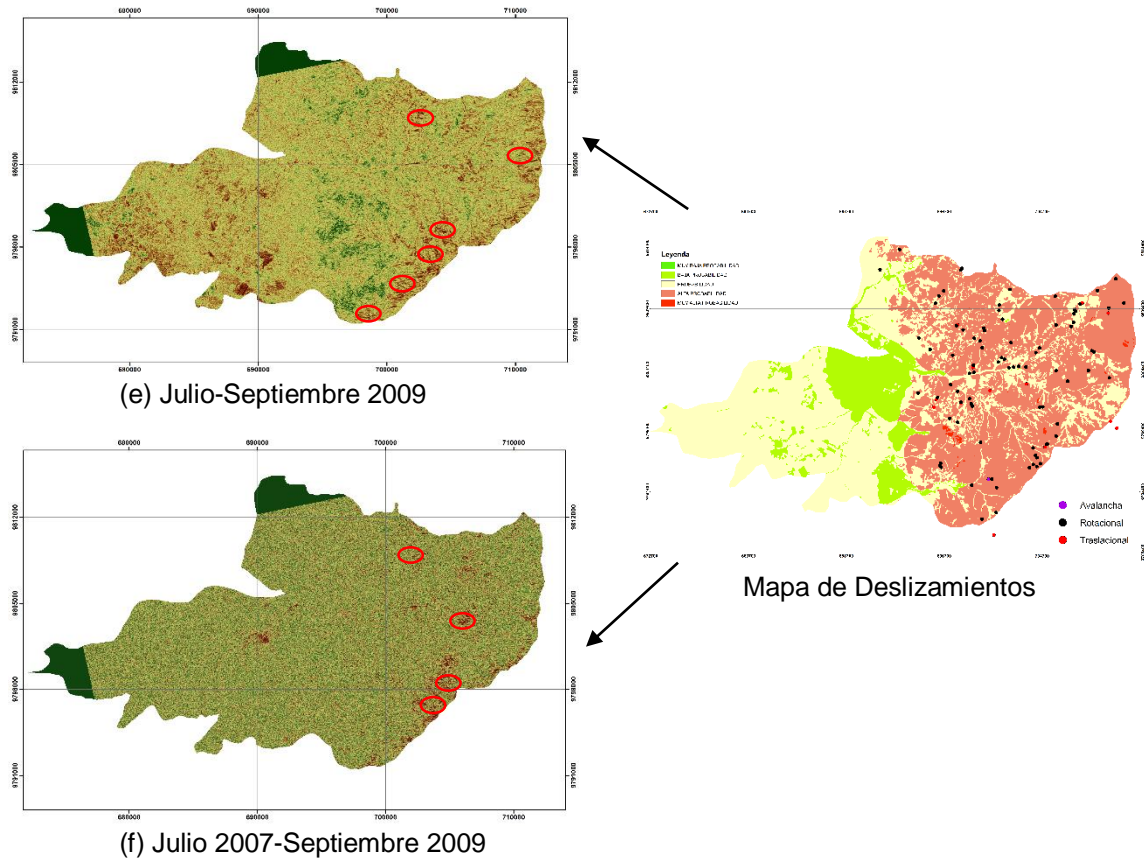


(d) Mayo 2008- Julio 2009



Mapa de Deslizamientos





**Figura 4. 1. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Deslizamientos**

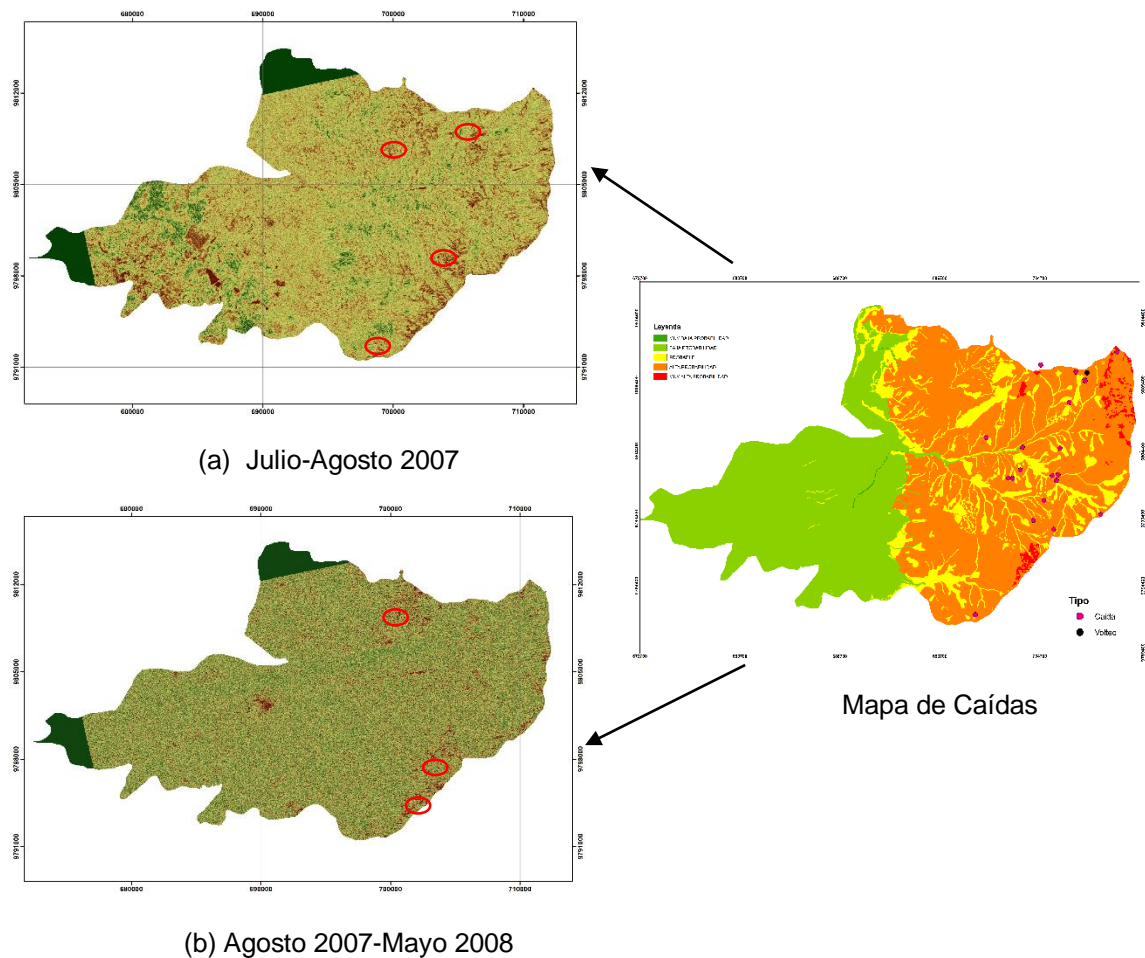
Analizando individualmente los desplazamientos sin necesidad de un modelo geodinámico externo se puede predecir las subsidencias ocurridas en la cuenca durante las series de tiempo analizadas, pero para una mayor veracidad se compara con el modelo de geodinámica externa, además de puntos levantados en campo referentes a los movimientos como avalancha, rotacional y translacional ocurridos en la zona de estudio. Para esto el cambio de tonalidad de los píxeles en los mapas de desplazamientos es fundamental para una coherencia en los procesos de comparación.

En la figura 4.1 los mapas de desplazamientos (a), (c) y (e), al comparar con los puntos de avalancha no tienen una subsidencia, ni elevación evidente ya que existe un cambio mínimo en la tonalidad de los píxeles, pero los mapas (b) y (d) tienen una subsidencia y elevación media-alta (zona café). Finalmente en (f)

que tiene una serie de tiempo de 2 años existe una subsidencia progresiva de media-alta, y su elevación es igual por ser un sitio de cono de deyección.

Para los puntos de deslizamientos translacionales y rotacionales los mapas de desplazamientos (a),(c) y (e), presenta una mínima subsidencia en la parte noroeste y suroeste, pero en la parte noreste presenta una subsidencia alta debido a que es una zona fluvial y presenta varios conos de deyección, al contrario de los mapas (b) y (d), en la parte noroeste presenta una elevación media y en la parte noreste tiene una subsidencia alta-muy alta por lo que se puede atribuir a una época lluviosa. Finalmente en (f) existe una subsidencia progresivamente alta en la parte noreste, y su elevación al noroeste no varía mucho para una zona fluvial alta.

#### 4.1.2 Comparación con el Modelo de Caídas



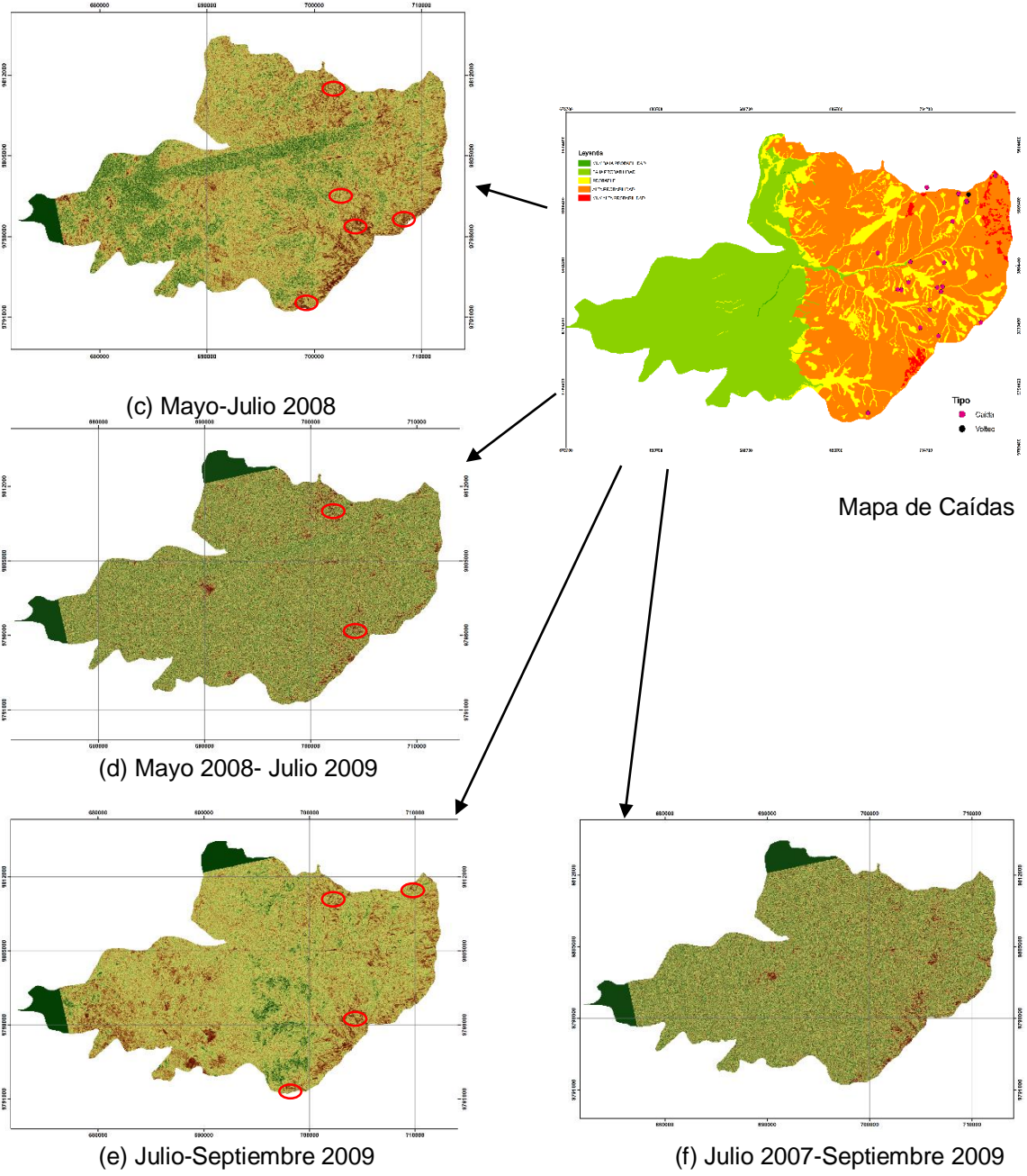


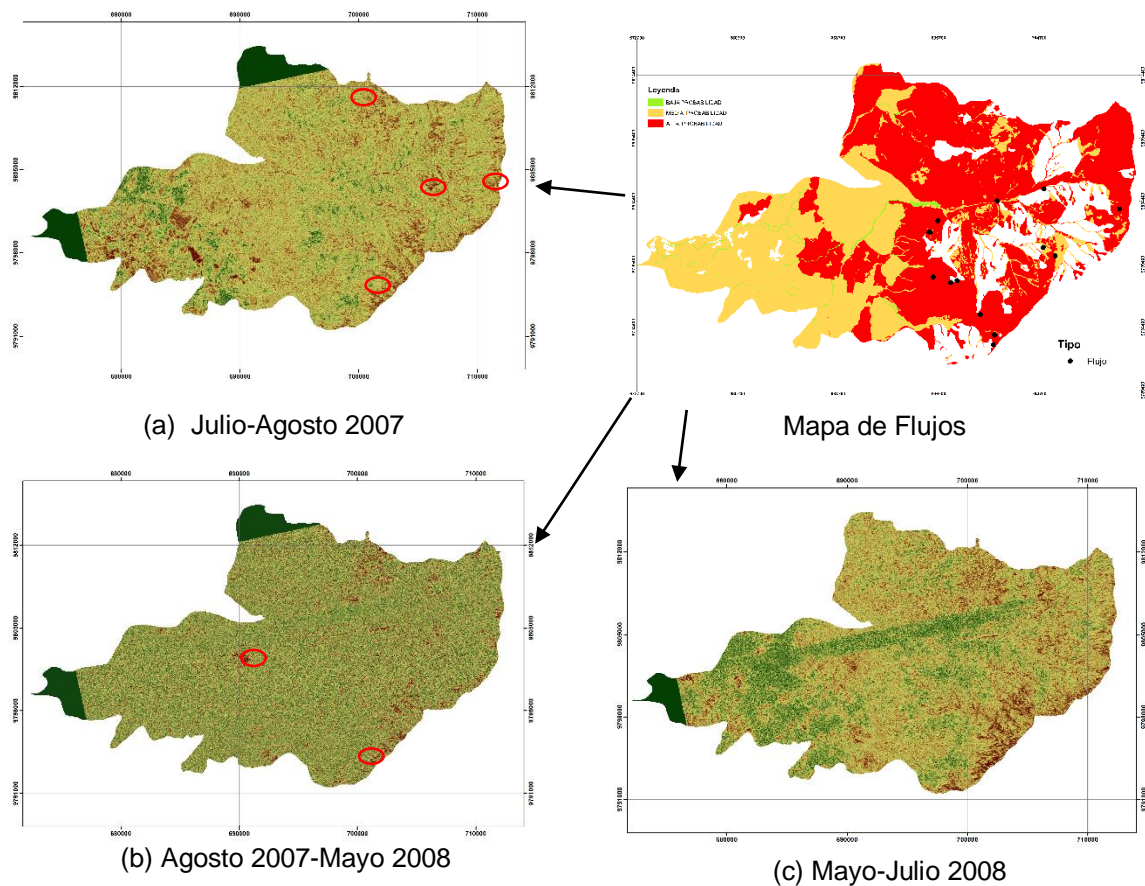
Figura 4. 2. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Caídas

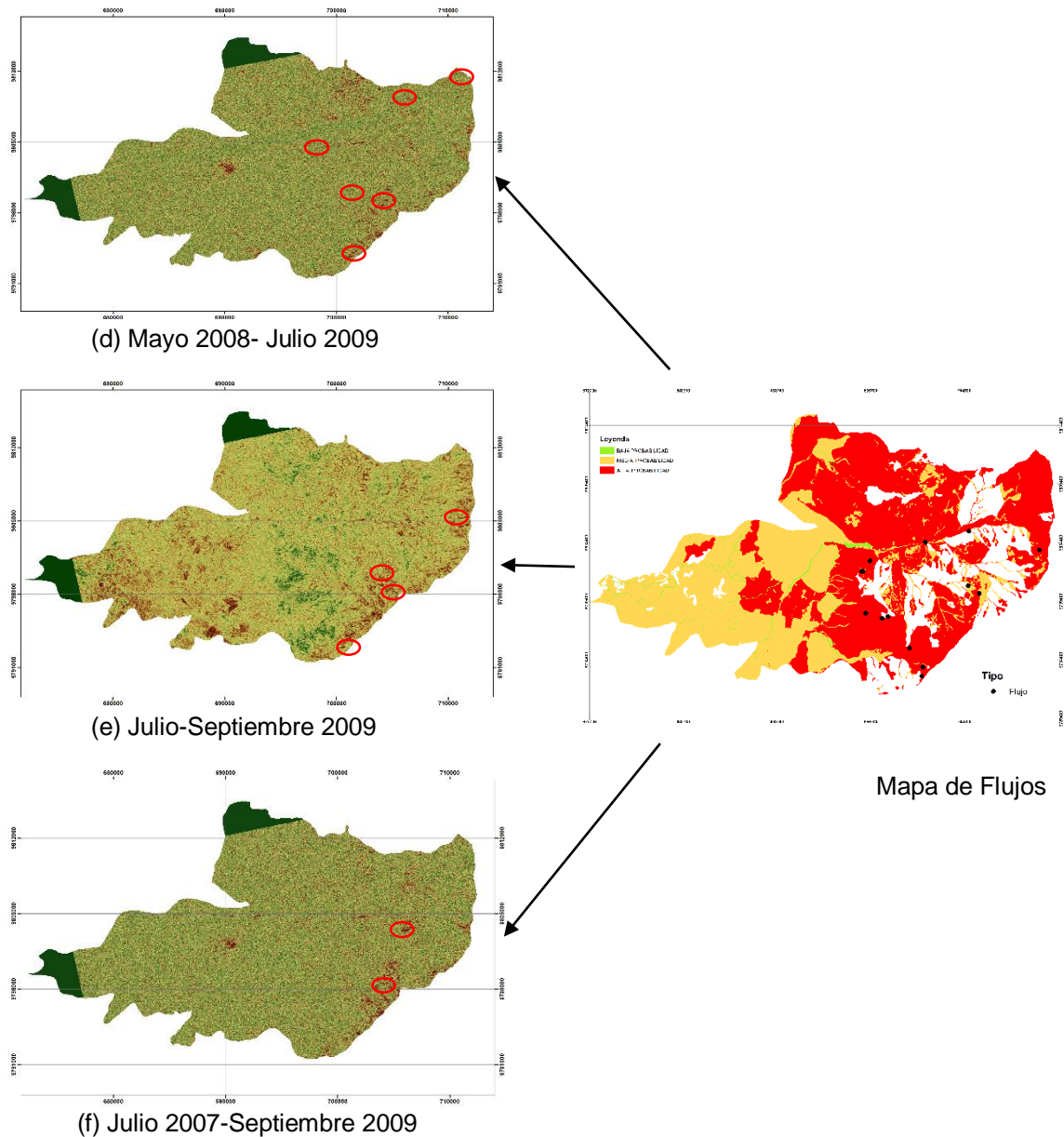


En la figura 4.2 los mapas de desplazamientos (a), (c) y (e), al comparar con los puntos de volteo no existe subsidencia alguna, debido a la articulación del movimiento y la elevación es constante. Al contrario con los mapas (b) y (d) que presenta una elevación media-alta. Finalmente (f) no presenta subsidencia y tiene una elevación constate pero cabe mencionar que la zona noreste y sureste tiene alta probabilidad de ocurrencia.

Para los puntos de caída los mapas de desplazamientos (a), (b) y (e), la parte sureste presenta una subsidencia media-alta y ninguna elevación con una ocurrencia media. Pero los mapas (c) y (f) presenta elevación alta con una probabilidad de ocurrencia media. Y (g) presenta el mismo comportamiento que (a), (b) y (e).

#### 4.1.3 Comparación con el Modelo de Flujos





**Figura 4. 3. Mapa de Desplazamientos VS Mapa de Flujos**

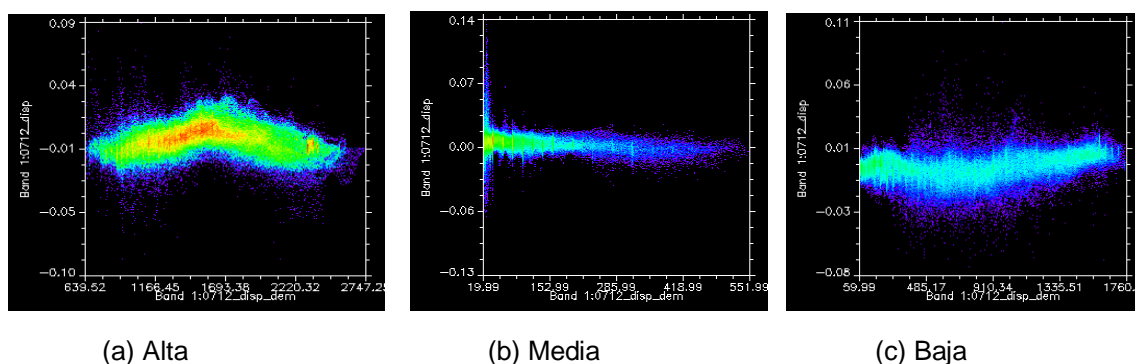
En la figura 4.3 los mapas de desplazamientos (a), (c) y (e), al comparar con los puntos de flujos presenta un comportamiento de baja subsidencia, con una elevación media en toda la parte sureste de media-alta probabilidad de ocurrencia. Los mapas (b) y (f) presentan una subsidencia baja, al contrario de la elevación que tiende alta- muy alta debido a que es un depósito fluvial. En la

misma línea el mapa (f) presenta baja subsidencia y tiene una elevación media-alta donde la zona sureste es la más vulnerable con probabilidad de ocurrencia media-alta.

## 4.2 Desplazamientos mediante gráficos de dispersión de la Zona de Estudio

Seguidamente se hará más real y dinámico la apreciación de los desplazamientos, en nuestro caso se tomara tres muestras de cada año, con un patrón de ubicación en alto, medio y bajo de la cuenca, donde se podrá analizar sistemáticamente la tendencia de los desplazamientos. El grafico de dispersión tiene en X: el DEM y en Y: deformación del terreno.

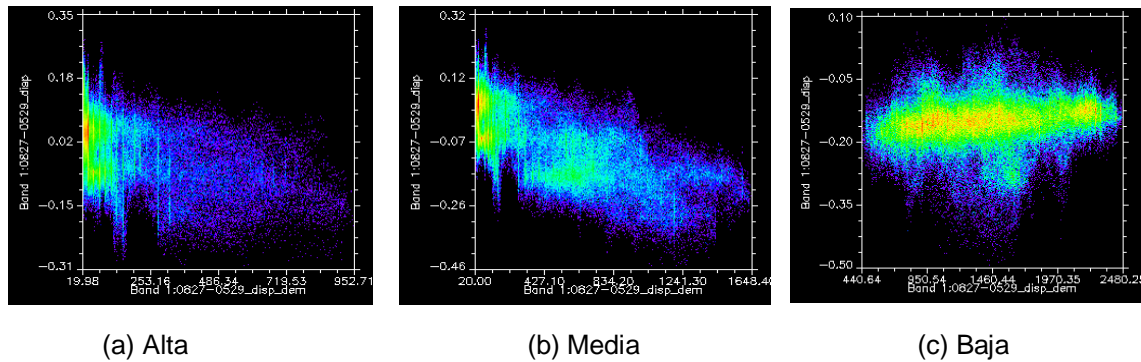
### 4.2.1 Julio-Agosto 2007



**Figura 4. 4. Muestras de Julio-Agosto 2007**

En la Figura 4.4, es posible observar que en la parte alta de la muestra tiene una densidad de puntos tendencial constante de 0.01 metros, en la parte media la densidad de los puntos está oscilando entre -0.01 a 0.03 metros donde la elevación es mediamente tendencial hasta los 1693.38 m.s.n.m a partir de esta altura tiene una subsidencia levemente baja oscilando entre 0.03 a 0 metros , y en la parte baja la densidad de los puntos presenta una oscilación constantemente tendencial entre 0 a 0.01 metros.

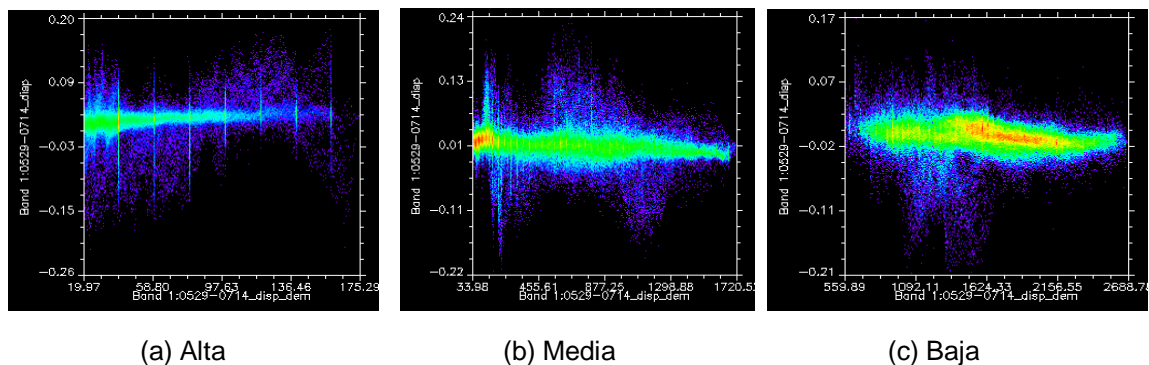
### 4.2.2 Agosto 2007-Mayo 2008



**Figura 4. 5. Muestras de Agosto 2007-Mayo 2008**

En la Figura 4.5, es posible observar que en la parte alta de la muestra tiene una densidad de puntos oscilando entre -0.05 a -0.20 metros, donde tiene una subsidencia representativa, en la parte media la densidad de los puntos oscila entre 0.12 a -0.27 metros donde la subsidencia es mucho mayor que en la parte alta, y en la parte baja a los 98 m.s.n.m a partir de esta altura la densidad de los puntos oscila entre -0.15 a 0.28 metros donde la elevación es impulsivamente alta debido a lechos fluviales o movimientos de la parte alta y media.

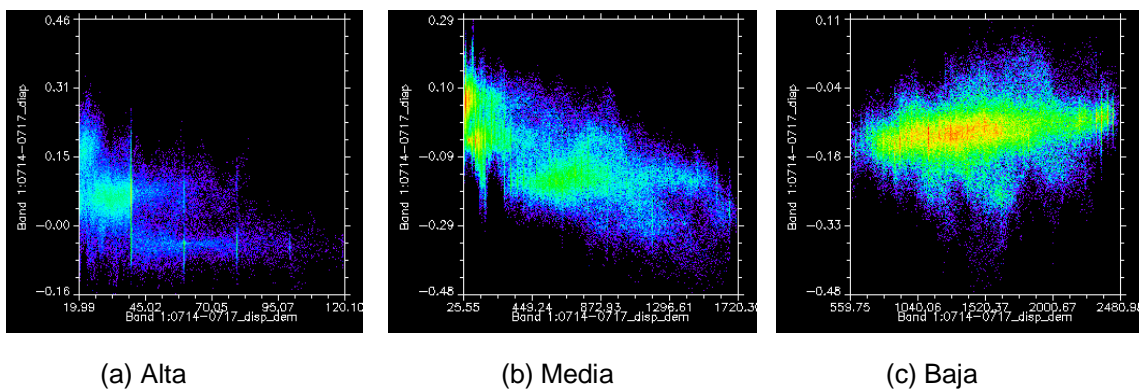
### 4.2.3 Mayo-Julio 2008



**Figura 4. 6. Muestras de Mayo-Julio 2008**

En la Figura 4.6, es posible observar que en la parte alta de la muestra tiene una densidad de puntos es constante oscilando entre 0 a -0.02 metros, donde la subsidencia no es representativa, en la parte media la densidad de los puntos tiene una leve elevación para luego ser constante oscilando entre 0 a 0.01 metros donde la subsidencia es nula, y en la parte baja la densidad de los puntos oscila entre -0.02 a 0 metros donde la elevación es tenue.

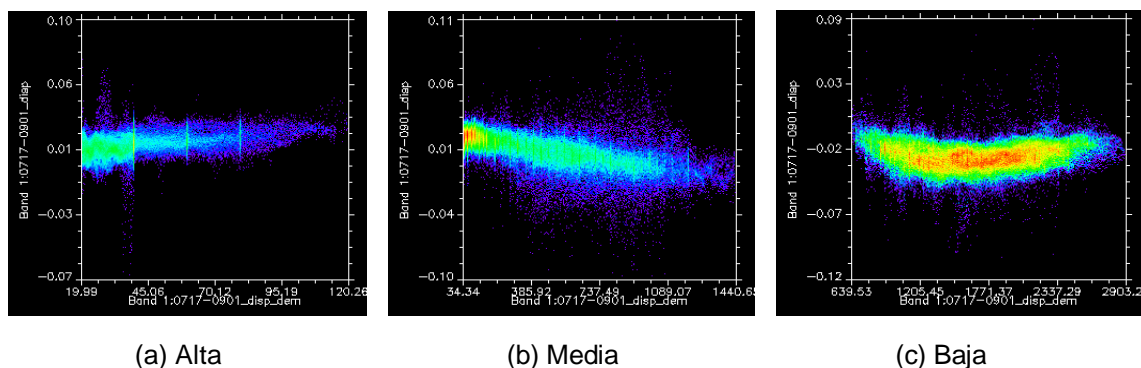
#### 4.2.4 Mayo 2008- Julio 2009



**Figura 4. 7. Muestras de Mayo 2008- Julio 2009**

En la Figura 4.7, es posible observar que en la parte alta de la muestra tiene una densidad de puntos que oscila entre -0.18 a -0.03 metros, donde la elevación presenta una correlación directa, en la parte media la densidad de los puntos está oscilando entre 0.10 a -0.28 metros donde la subsidencia es altamente tendencial, y en la parte baja la densidad de los puntos no presenta un patrón tendencial.

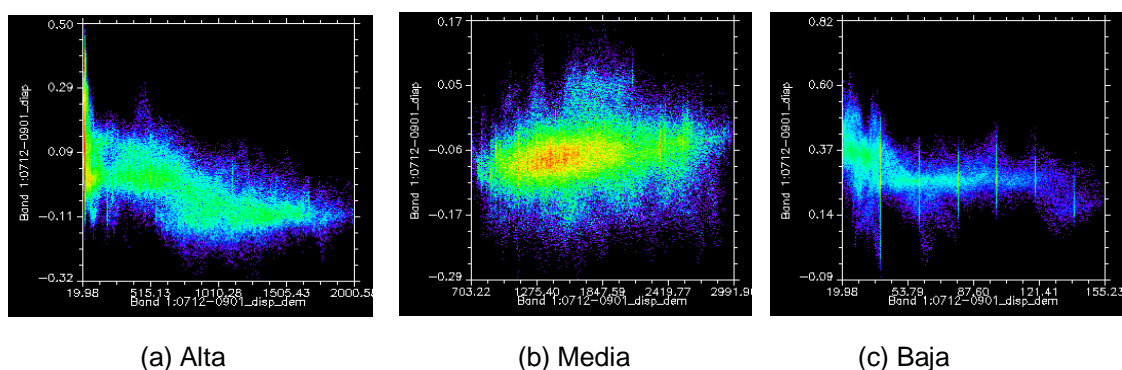
### 4.2.5 Julio-Septiembre 2009



**Figura 4. 8. Muestras de Julio-Septiembre 2009**

En la Figura 4.8, es posible observar que en la parte alta de la muestra tiene una densidad de puntos que oscila entre -0.01 a -0.03 metros habiendo una tenue subsidencia hasta los 1771.37 m.s.n.m y partir de esta altitud hay una leve elevación oscilando entre -0.03 a -0.02 metros, en la parte media la densidad de los puntos está oscilando entre 0.02 a -0.02 metros donde la subsidencia es mediamente tendencial, y en la parte baja la densidad de los puntos presenta un patrón constante de 0.01 metros.

### 4.2.6 Julio 2007-Septiembre 2009



**Figura 4. 9. Muestras de Julio 2007-Septiembre 2009**

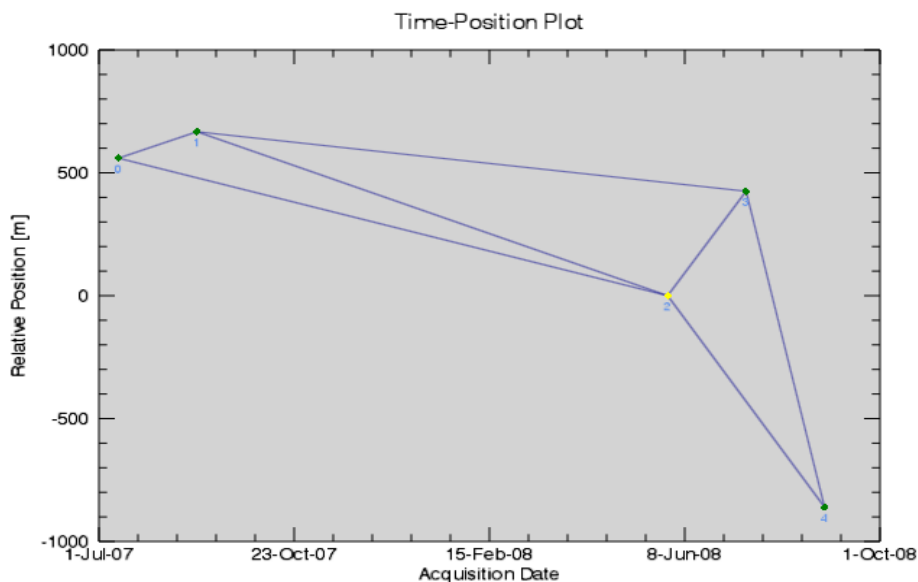
En la Figura 4.9, es posible observar que en la parte alta de la muestra no tiene una densidad de puntos tendencial, en la parte media la densidad de los puntos

está oscilando entre -0.16 a -0.05 metros donde la elevación es altamente tendencial, y en la parte baja la densidad de los puntos presenta una oscilación entre 0.08 a 0.01 metros, habiendo una subsidencia.

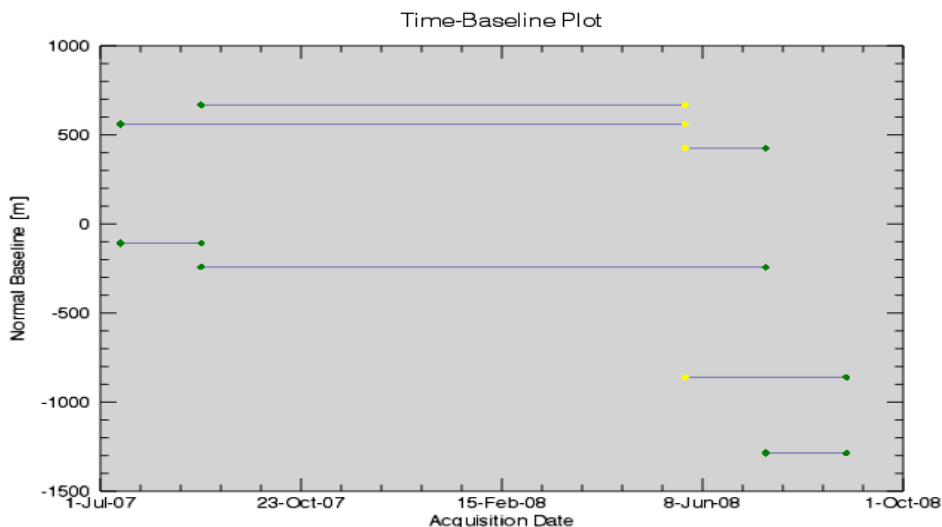
### 4.3 Evaluación con otra técnica enmarcada al desplazamiento

La evaluación con otra técnica permitirá diferenciar de mejor manera los desplazamientos de la superficie terrestre. La técnica a utilizar es la SBAS (subconjunto de pequeña línea base) donde el algoritmo produce mapas de velocidad de deformación y series de tiempo. Su enfoque se basa en la selección de los pares de datos utilizados para calcular los interferogramas; no todas las combinaciones se consideran; se seleccionan los pares de tal manera que se disminuya la separación espacial y temporal entre las orbitas de adquisición.

Se seleccionó imágenes desde julio 2007 hasta octubre del 2008 donde se hace la generación del grafico de conexión, haciendo la combinación de pares (interferogramas) que serán procesados por el SBAS. Dadas N conexiones, las teóricas disponibles son  $(N * (N-1)) / 2$  y se generar gráficos que permite las conexiones más fiables.



(a) Posición Relativa



(b) Línea de Base Normal

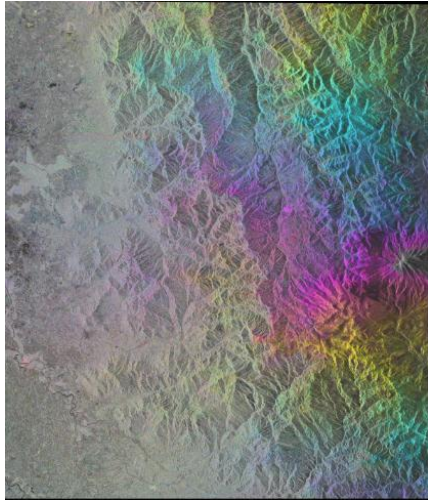
#### Figura 4. 10. Plots Generados por la generación del grafico de conexión

Estos gráficos de posiciones es útil para entender si la red está bien comunicada, la cual debe ser homogéneo y debe conectarse con otros con una alta redundancia. Si un grupo de adquisición no se puede conectar a la red principal, todas las adquisiciones que pertenecen a este grupo se descartan. El uso estándar de SBAS necesita todo el grafico para ser completamente conectado. Por esta razón, es sugerirle la recopilación de imágenes en un intervalo de tiempo regulares, y pequeñas líneas de base.

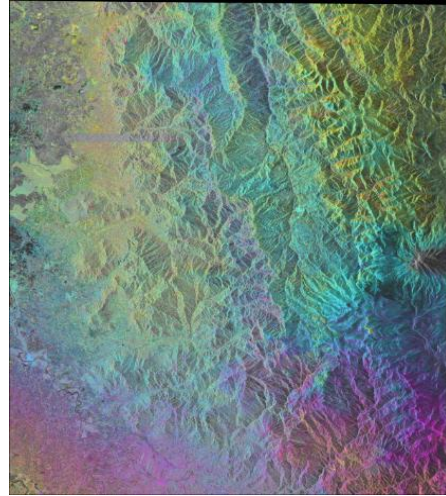
Seguidamente se realiza el Flujo Interferométrico, que tiene como objetivo generar una pila de interferogramas como se muestra en la figura 4.11. En esta etapa es importante para definir el rango de inclinación multilooking para a generación interferogramas, que es calculado típicamente con el fin de obtener un pixel casi cuadrado de la misma resolución sensor.

Continuando, los resultados del paso anterior se refinaran y replanara, que servirá para estimar y eliminar el restante de las fases constantes como se muestra en la figura 4.12.

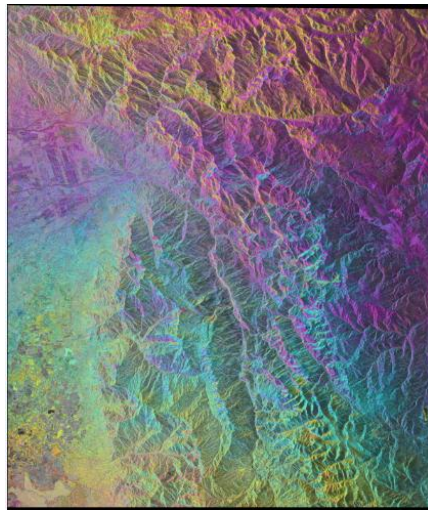




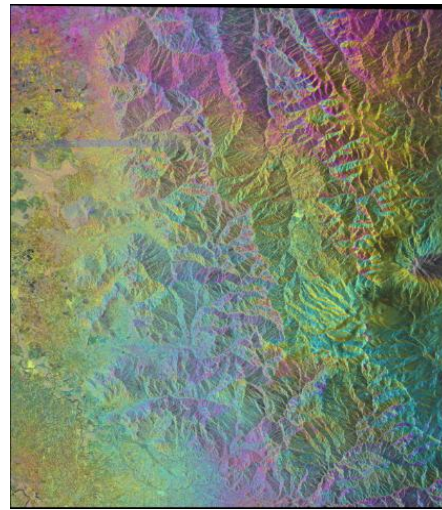
(a)



(b)

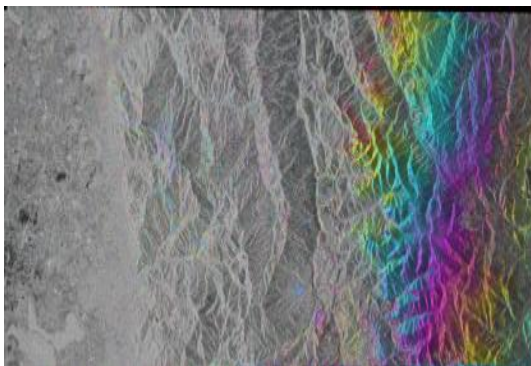


(c)

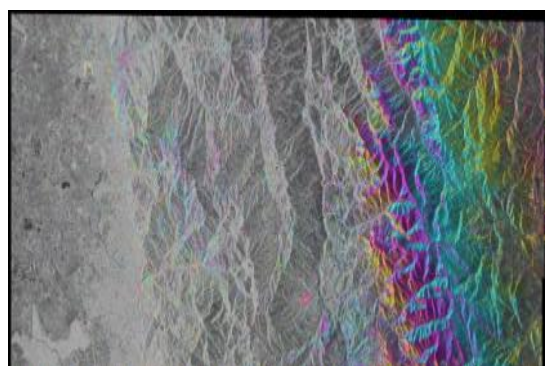


(d)

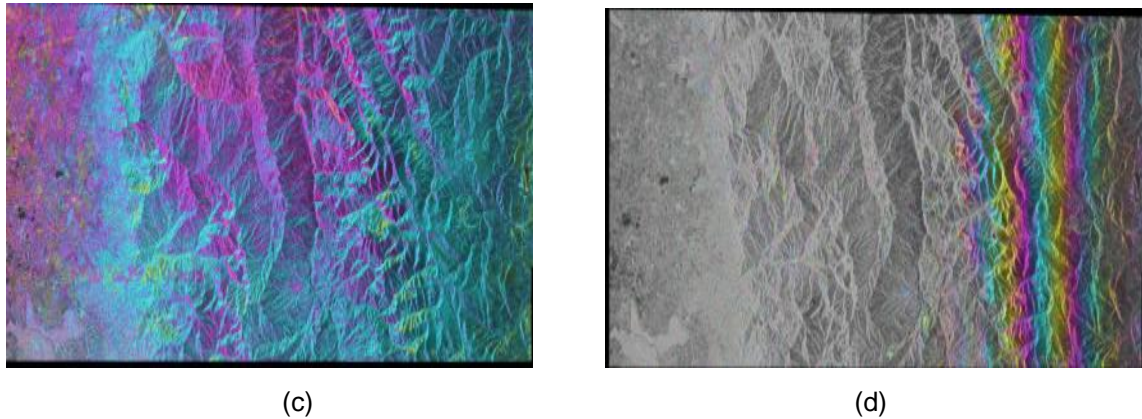
**Figura 4. 11. Interferogramas**



(a)



(b)



**Figura 4. 12. Refinamiento y Reaplamiento.**

Se realizara dos pasos de inversión a continuación, el primero implementa la inversión de Kernel SBAS que sirve para la recuperación de la primera estimación de la tasa de desplazamiento y de la topografía residual. La segunda implementa la inversión de Kernel SBAS para recuperar las series de tiempo del desplazamiento.

Por último se geocodifica es decir los desplazamientos y las velocidades pueden se re proyectan en una dirección a medida definida por el usuario. También podemos convertirla en datos raster para poder visualizar en Google Earth con una mejor temática para el usuario.



**Figura 4. 13. Mapa de Desplazamientos**

Analizando el resultado obtenido, se puede observar que es una técnica bastante temática donde se puede apreciar debidamente los desplazamientos de la superficie terrestre, que en su mayoría son puntos de subsidencia que de elevación, además se puede distinguir que estos puntos se encuentran ubicados en superficies fluviales y el único punto de elevación se encuentra en una parte de concentración de lechos fluviales.

#### **4.4 Propuesta de aplicación específica enmarcadas dentro de procesos de alerta y respuesta temprana a emergencias**

A partir de los resultados anteriores se propondrá procesos para una aplicación dentro de los procesos de alerta y respuesta temprana, que sirve como base para mayor comprensión desde una perspectiva de multi amenaza.

##### **4.4.1 ¿Qué es un SAT (Sistema de Alerta Temprana)?**

Los Sistemas de Alerta Temprana, es una agrupación de procedimientos e instrumentos, que monitorean una amenaza de carácter previsible, donde se recolectan información que se procesa ofreciendo pronósticos o predicciones temporales sobre su acción y posibles efectos (Sinchi Runa, 2010).

##### **4.4.2 ¿Cuál la importancia de un SAT?**

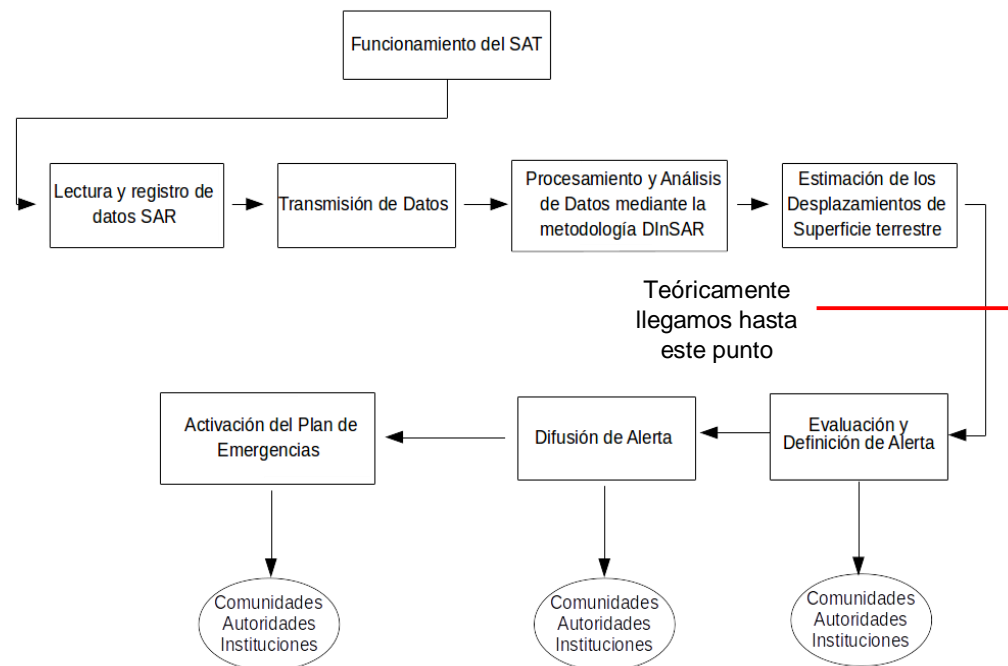
La importancia de un SAT, permite conocer anticipadamente y con visible nivel de certeza, en que tiempo y espacio, una amenaza o evento adverso puede desencadenar situaciones potencialmente peligrosas (Sinchi Runa, 2010).

##### **4.4.3 ¿Cuál es el objetivo de un SAT?**

Su objetivo fundamental es reducir o evitar las posibles pérdidas de vidas, daños a los bienes y al ambiente, mediante la aplicación de medidas de protección y reducción de riesgos (Sinchi Runa, 2010).

#### 4.4.4 Procedimiento de implementación de un SAT

Se pretende construir la propuesta del SAT con el aporte de los resultados anteriores y experiencias en otras implementaciones. Pero el proceso mencionado a continuación, no se trata de una fórmula que se cumplirá de forma estricta, sino es una ruta que se puede seguir como una guía de orientación que realiza un análisis, estudio, diagnóstico o evaluación de los desplazamientos de la superficie terrestre (UNESCO, 2010)



**Figura 4. 14. Flujo del SAT**

Lectura y Registro de datos SAR. Cuando el fenómeno monitoreado produce alguna alteración y manifestación de peligro, se procede a tomar las lecturas del Instituto Geofísico, Inamhi o datos SAR, manteniendo una vigilancia pormenorizada, continua para conocer sus cambios y transformación. Estas lecturas pueden realizarse con equipos especializados o imágenes, operados por instituciones y comunidades o combinadas entre ambas.

Transmisión de Datos. Seguidamente que las lecturas han sido registradas, son transmitidas inmediatamente, para que los gestores o especialistas efectúen un análisis cualitativo y se realicen los pronósticos respectivos, sobre la ocurrencia o no de un evento desfavorable.

Si se trata de una institución, la transmisión puede hacerse mediante equipos tecnológicos como satélites, teléfonos móviles, sistemas computarizados, entre otros. Y si es un sistema comunitario se utilizara equipos que estén a su alcance y se ajuste a las condiciones económicas o cultura. Se puede utilizar en la mayoría de los casos sistemas radiocomunicación, radioemisoras, teléfonos o cualquier otro sistema que sea óptimo en él envío de datos.

Procesamiento y Análisis de Datos mediante la metodología DInSAR. Los datos llegan a manos de expertos de procesarlos mediante la metodología DInSAR, quienes realizan sus pasos y establecen si estos indican la posibilidad o no de manifestarse un evento desfavorable. Los datos pueden ser analizados mediante programas pagados o libres dependiendo de la disponibilidad de recursos de la institución o comunidad.

Estimación de los Desplazamientos de Superficie terrestre. Al concluir los procesos anteriores se obtiene mapas de desplazamiento donde se puede establecer la evolución del desplazamiento de la superficie terrestre que indican la posibilidad o no de manifestarse un evento desfavorable.

Si los datos son operados por la comunidad, se sugiere automatizar los procesos para llegar a conclusiones rápidas y entendibles para que responsables de los comités locales analicen la situación y defina el nivel y el tipo de alerta declarar.

Evaluación de la Situación y Definición de la Alerta. Las instituciones o comités de emergencias de las comunidades, evalúan la información de los datos procesos y sus mapas adyacentes y lo contrastan con mapas de riegos,

pudiendo determinar el daño potencial, nivel y tipo de alerta que se debe declarar y emitir.

Nuestro país utiliza colores de alertar cada una con un significado y acciones definidas, las cuales describimos a continuación:

Verde: indica que se debe estar atento al comportamiento y evolución del evento monitoreado, y de las alertas que se continúen emitiendo. Esta alerta debe dirigirse a los especialistas de las instituciones, los encargados del Plan de Emergencia y los habitantes de las comunidades en peligro.



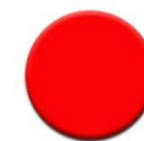
Amarilla: aumenta la alerta y los diferentes equipos e instituciones inician sus preparativos para ejecutar las acciones correspondientes, dirigidas a enfrentar el impacto del evento y sus consecuencias.



Alerta Naranja: que significa cuando se han concretado las condiciones necesarias para que se presente el fenómeno y solo sea cuestión de minutos y horas para que se manifieste el fenómeno.



Alerta Roja: significa que es inminente la llegada o materialización del evento, esta alerta es emitida a través de las instituciones responsables o entidades autorizadas, tanto nacionales como locales.



**Difusión de la Alerta.** Si se cuenta con la alerta oficial debidamente definida, emitida y comprobada, se procede a notificar a la población, la cual debe ser fidedigna y oportuna, garantizando la confianza de las comunidades.

La alerta se podrá difundir utilizando medios de comunicación como televisión, radiodifusoras, radios parlantes, sirena o cualquier otro instrumento que permita informar rápidamente a la comunidad (Sinchi Runa, 2010).

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

La interferometría diferencial DInSAR diferencia las deformaciones verticales del terreno sin que interfiera los limitantes de la técnica considerando el bajo presupuesto, cuando hay impedimentos con otro tipo de técnicas.

#### 5.1 Sobre la comparación de los mapas de desplazamientos VS modelo geodinámico externo

La zona alta de la cuenca es bastante conflictiva por las sustanciales subsidencias evidenciadas, debido a que es una zona alta de precipitación saturando las capas del suelo ocasionando un mayor peligro al colisionar o rebosar con otros movimientos adyacentes, además que la geología es inestable, produciendo considerables acumulaciones en las zonas medias y bajas de la cuenca.

Al analizar los mapas de desplazamientos con los mapas del modelo geodinámico externo, primeramente en la mayoría del modelo geodinámico externo, existe una alta probabilidad de ocurrencias de desplazamientos rotacionales, translacionales y avalanchas de la superficie terrestre y los puntos en campo demuestran la realidad de subsidencias y acumulación cada año, pero existe un patrón en los mapas [(a), (c) y (e)] donde no existe una subsidencia de mayor consideración, al contrario de los mapas [(b) y (d)] que existe significativas subsidencias críticas con un alto índice de ocurrencia en las partes altas de la cuenca.

En el caso de los mapas de caídas, la ocurrencia de caídas y volteos en los mapas [(a), (c) y (e)] es debido a que se encuentran en la parte alta y media de las cuencas donde existe mayor precipitación y elevación de agua en la tierra al igual que los mapas [(b) y (d)].

En el caso de los mapas de flujos, la ocurrencia es constante debido a que este movimiento se precipita al final de las cuencas donde no son frecuentes en nuestro caso.

El mapa [(f)] muestra una constante presencia de movimientos translacionales, rotacionales, caídas, volteos y flujos durante este tiempo, en las partes altas es debido a la presencia de conos de deyección o precipitaciones y en las partes bajas no muestra presencia crítica.

## **5.2 Sobre las muestras y sus gráficos de dispersión**

Se concluye que el análisis en meses no muestra diferencias en los desplazamientos de la superficie terrestre, al contrario del análisis de un año o varios años que muestra diferencias por el tiempo transcurrido.

Los gráficos de dispersión son más dinámicos en las representaciones de las deformaciones terrestres y ayudan a discernir de manera puntual cada una de ellas, para esto la tendencia de la muestra obtenida será fundamental para predecir próximas deformaciones en una zona determinada. Las muestras de diferencia de un mes del 2007 presenta una tendencia constante sin muchos subsidencias oscilando desde -0.01 a 0.01 metros. En el 2007-2008 tiene diferencias altas de subsidencia al igual que en el 2008-2009 muestra en la parte media una subsidencia alta y finalmente en dos años de diferencia 2007-2009 tiene una acumulación grande en la parte media debido a las subsidencias ocurridas en la parte alta de la cuenca.

## **5.3 Sobre la comparación con otra técnica**

La técnica no logro resultados consistentes, debido a las características de las imágenes además del sensor, pero en términos generales los resultados obtenidos describen una subsidencia con diferentes promedios según el periodo abarcado.



La técnica SBAS tiene una gran diferencia con DInSAR, y es que SBAS a la hora de generar mapas de desplazamientos utiliza N imágenes que pueden ser de cualquier año y utiliza una imagen súper mater, donde conecta a todas las imágenes para realizar el análisis del desplazamiento y así descartar cualquier imagen que no tenga una conexión buena es decir una pequeña línea base. Al contrario de DInSAR que utiliza pares interferométricos y el análisis se realiza más puntualmente.

Los desplazamientos obtenidos por DInSAR son bastante definibles en toda la cuenca, ya que están rasterizados y usando una tonalidad en los pixeles se puede apreciar inequívocamente su cambio, en cambio SBAS muestra puntos vectorialmente aleatorios, faltando información en la mayoría de sectores de la cuenca para predecir un movimiento.

#### **5.4 Sobre la propuesta de aplicación de un SAT**

La zona de la cuenca se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes altas-muy altas y se asocian con la forma del terreno característica del lugar: campos de depósitos aluviales de origen denudacional (flujos de deslizamientos).

En forma general la propuesta generadora de un SAT, en sus principios enfrenta limitaciones para garantizar un funcionamiento adecuado, de acuerdo a los procesos de construcción del riesgo. Existe un riesgo adyacente proveniente de eventos adversos que originan desplazamientos de personas y asentamientos temporales. Constituyendo nuevos asentamientos, pero es posible reducir el riesgo anticipado a partir de promover un proceso de planificación y desarrollo urbano.

De lograrse una efectiva aplicación a la propuesta, que implica mejoras significativas en la comunicación, coordinación y cooperación de las comunidades o instituciones, esto ayudara a controlar un poco la vulnerabilidad que existe en la zona.

## 6. RECOMENDACIONES

A continuación se presenta una lista de recomendaciones que al juicio del autor contribuirían a mejorar los resultados presentados en este trabajo.

- Realizar mapas de desplazamientos con varios años de diferencia para obtener una deformación terrestre más evidente.
- Alternar los resultados con los diferentes modelos geodinámicos analizados de la cuenca.
- Probar los algoritmos del estado del arte para alternar los resultados y así poder tomar una acertada decisión en la propuesta del SAT.
- Realizar la comparación de resultados obtenidos utilizando otras imágenes de satélites actuales como por ejemplo COSMO-SKYMED, RADARSAT-2.
- Investigar las nuevas técnicas SAR para la estimación de la deformación de la superficie terrestre.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASI. (2010). Agencia Espacial Italiana.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansoti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms.
- Bert, M., & Nico, A. (2003). Velocity field retrieval from long term coherent points in Radar interferometric. *IGARSS*, 941-943.
- Bonano, M., Manunta, M., Marsella, M., & Lanari, R. (2012). Long Term ERS/ENVISAT Deformation Time-Series Generation at Full Resolution via the Exyended SBAS Technique. *Journal Remote Sensing*.
- Calamia, M., Franceschetti, G., Lanari, R., Casu, F., & Manzo, M. (2009). Comparison and integration of GPS and DInSAR deformation time-series. *Aerospace conference*.
- Cascini, L., Ferlisi, S., Peduto, D., Di Nocera, S., Fornaro, G., & Serafino, F. (2007). A land subsidence study via DInSAR technique over large urbanised areas. *Urban Remote Sensing*.
- Casu, F., Manunta, M., Lanari, R., Sansoti, S., Cossu, R., Fusco, L., & Mazzarella, G. (2008). SBAS-DInSAR GRID processing on-demand: A case study. Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas.
- Chávez, N., & Cabrera, M. (2012). Fundamentos de Radar. *Universidad Nacional de Tucuman, Argentina*.
- Chen, C., & Zebker, H. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms.

- Ching, N., Rosenfeld, D., & Braun, M. (1992). Two-dimensional phase unwrapping using a minimum spanning tree algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing*, 355-365.
- CONAE. (2013). Comisión Nacional de Actividades Espaciales.
- Dehls, J., Basilico, M., & Colesanti, C. (2002). Ground deformation monitoring in the Ranafjord area of Norway by means of the permanent scatterers technique.
- Delaunay, B. (1934). Sur la sphere vide. *Bull. Acad. Sci.*
- ESA. (2010). Agencial Espacial Europea.
- Estrella, C., Caizaluisa, A., & Muñoz, E. (2014). Modelo Matemático de Geodinámica Externa en Microcuencas del Guayas. *IEE*.
- Fan, J., Zhao, H., Tu, P., Wang, Y., Guo, X., Ge, D., & Liu, G. (2010). CRInSAR for landslide deformation monitoring: A case in three gorge area. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Fernández, J., Romero, R., Carrasco, D., Tiampo, K., Rodríguez-Velasco, G., Aparicio, A., & González-Matesanz, F. (2005). Detection of displacements on Tenerife Island, Canaries, using Radar Interferometry. *Geophysical Journal International*, 33-45.
- Ferreti, A., Rocca, F., & Prati, C. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry.
- Ferreti, A., Savio, G., Borghi, A., Barzaghi, R., Musazzi, S., Novali, F., . . . Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 1142-1153.
- Ferretti, C. P. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry.

- Flynn, T. (1997). Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *Optical Society of America*, 2693-2701.
- Fruehauf, F., Heilig, A., Schneebeli, M., Fellin, W., & Cherzer, O. (2009). Experiments and algorithms to detect snow avalanche victims using airborne groundpenetrating Radar. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*.
- Ghiglia, D., & Romero, L. (1994). Robust two-dimensional weighted and phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *Journal of the optical Society of America*.
- Goldstein, R., Zebker, H., & Werner, C. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping.
- González De Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, L23611.
- Hsing-Chung, C., Linlin, G., & Rizos, C. (2005). ERS tandem DInSAR: the change of ground surface in 24 hours. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- IEE. (2013). Instituto Espacial Ecuatoriano.
- Lau, S. (2011). . Comparison and Fusion of space borne L- , C- and X- Band SAR Images for Damage Identification in the 2008 Sichuan Earthquake.
- Li, T., Chao, W., Yixian, T., & Fan, W. (2011). Dynamic deformation retrieval for DInSAR data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Lira, J. (2010). Tratamiento digital de Imágenes Multiespectrales.
- Liu, G. (2003). Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances.

- Liu, G., Chen, Q., & Ding, X. (2007). . Detecting Ground Deformation with Permanent-Scatterer Network in Radar Interferometry: Algorithm and Testing Results. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*.
- Mather, P. (2004). Computer Processing of Remotely Sensed Images. *West Sussex*.
- Molina, I., Papí, F., & Villa, G. (2006). Curso de Teledetección aplicada a la observación e información territorial. Madrid.
- Mora, O., Arbiol, R., De Pala, V., Adell, A., & Torre, M. (2006). Generation of Accurate DEMs Using DInSAR Methodology (TopoDInSAR). *Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- Mora, O., De Pala, V., Arbiol, R., Adell, A., & Torre, M. (2005). Medidas de deformación del Terreno una vista de satélite. *Congreso Nacional de Teledetección*.
- Nolan, M., & Fatland, D. (2003). New topographic maps may stimulate significant advancements in the remote sensing of soil moisture. *EOS trans*.
- Olmsted, C. (1993). Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide. *ASF Publicación Interna*.
- Piedra, J. (2012). Interferometría de radar en erupciones volcánicas caso de estudio: Erupción volcán puyehue. *CONAE*.
- Reale, D., Fornaro, G., & Pauciuolo, A. (2013). Extension of 4-D SAR Imaging to the Monitoring of Thermally Dilating Scatterers. *Geoscience and Remote Sensing*.
- Recife, A., Bovenga, F., Wasowski, J., & Guerriero, L. (2001). Institution Using InSAR Data for Landslide Monitoring: a Case Study from Southern Italy. *Proceedings of ESA ERS-ENVISAT Symposium*.

- Recife, A., Bovenga, F., Wasowski, J., & Guerriero, L. (2004). Assessment of multitemporal DInSAR stepwise processing. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- RUNA, P. S. (2010). Sistema de Alerta Temprana por Deslizamientos. Chimborazo,. *Comisión Europea VI Plan DIPECHO*.
- San Wan, K., Joong-Sun, W., Hyo Jae, L., & Wooil, M. (2000). SAR INVESTIGATION OVER THE BAEGDU STRATOVOLCANIC MOUNTAIN.
- SAR-Guidebook, T. (2007). Examples based on SARscape. sarmap. *Slide presentation*.
- SINCHI, R. (2010). Sistema de Alerta Temprana por Deslizamientos. Chimborazo,Ecuador. *Comisión Europea VI Plan DIPECHO*.
- Sun, Y., & Li, J. (2003). Time–frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating Radar. *Proc. Inst. Elect. Radar Sonar Navig.*, 253-261.
- Torlai, D. (2010). Aplicaciones de la interferometría de radar por satélite para la generación de mapas de desplazamiento en el análisis de los fenómenos dinámicos.
- UNESCO. (2010). CONCEPTOS Y HERRAMIENTAS SOBRE SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA Y GESTIÓN DEL RIESGO PARA LA COMUNIDAD EDUCATIVA. *Apoyo al Ministerio de Educación para la Elaboración de material educativo en el tema SAT*.
- USGS. (2003). Servicio Geológico de los Estados Unidos.
- Wicks, C., Thatcher, W., Monastero, F., & Hasting, M. (2001). Steady-state deformation of the Coso Range, East-Central California, inferred from satellite radar interferometry. *Journal of Geophys*, 13769-13780.

- Wu, T., Zhang, H., Wang, C., Tang, Y., & Wu, H. (2008). Chinese Science Bulletin (in Chinese)". Retrieval of urban slow deformation using the multi-baseline DInSAR technique. 3705-3714.
- Yang, Y., Manzo, M., Pepe, A., & Lanari, R. (2012). A new SBAS-DInSAR approach based on a redundant set of small baseline interferograms. *Geoscience Sensing Symposium*.
- Yinghui, L., & Yonghong, Z. (2011). The research on deformation monitoring using Multi-Temporal InSAR. Remote Sensing. *Environment and Transportation Engineering (RSETE)*, 3701-3704.
- Zhang, H., Wang, C., & Tang, Y. (2009). Research of Coherent Target Interferometry. Beijing: Science Press (in Chinese).