

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE TOPOGRAFÍA, CATASTRO Y GEODESIA**



Trabajo Final de Graduación en la modalidad Proyecto de Graduación

**Evaluación del potencial de la técnica InSAR en Costa Rica con
datos Sentinel-1, a través del enfoque SBAS, con los softwares
científicos ISCE/MintPy, caso de estudio deslizamiento de
Santiago de Puriscal**

Celso Andrey Cortés Sánchez

CAMPUS OMAR DENGO
HEREDIA, COSTA RICA
SEPTIEMBRE, 2024

Trabajo Final de Graduación

Este trabajo fue _____ por el Tribunal Examinador de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Topografía y Geodesia.

MEd. Gabriela Cordero Gamboa
Presidente del Tribunal Evaluador

MSc. Sara Bastos Gutiérrez
Representante de la ETCG

PhD. Cyril Muller
Tutor

M.Sc. José Francisco Valverde Calderón
Asesor

M.Sc. Diana Paniagua Jiménez
Asesora

Ing. Celso Andrey Cortés Sánchez
Graduando

Dedicatoria

A mis padres y familia, por estar siempre presentes y ser el motor de mi crecimiento profesional. Y a mis profesores, por brindarme enseñanzas, herramientas y el conocimiento necesario para ejercer esta gran profesión.

Reconocimientos

Reconocimiento especial a todas las personas que han sido fundamentales en el proceso de mi tesis. A mi tutor, el PhD. Cyril Muller, por su colaboración invaluable, motivación constante y el conocimiento que compartió generosamente. A mis lectores, la M.Sc. Diana Paniagua Jiménez y el M.Sc. José Francisco Valverde Calderón, por sus valiosas enseñanzas, colaboración y disposición en este trabajo.

Índice de contenidos

Contenido	Página
Resumen.....	1
Capítulo 1: Introducción	2
Capítulo 2: Marco teórico	9
2.1. Zona de estudio: Santiago de Puriscal, San José	9
2.2. Deslizamientos.....	10
2.3. Radar de Apertura Sintética (SAR)	12
2.3.1. Geometría SAR.....	14
2.3.2. Sentinel-1	17
2.4. Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR).....	19
2.5. Series temporales	26
2.5.1. SBAS	26
2.6. Distribuciones GNU/Linux.....	30
Capítulo 3: Objetivos	32
Objetivo General	32
Objetivos específicos	32
Capítulo 4: Metodología	33
4.1. Linux, Ubuntu	34
4.2. Instalación de software ISCE y MintPy.....	36
4.2.1. Instalación ISCE	37
4.2.2. Instalación MintPy	39
4.3. Área de estudio	41
4.4. Descarga de imágenes SAR.....	43
4.5. Descarga de archivos de corrección: orbitas, DEM, datos atmosféricos.....	47
4.6. Procesamiento con ISCE usando el módulo de topsStack stackSentinel.py	50
4.7. Procesamiento de series temporales con MintPy usando smallbaselineApp.py...	56
4.8. Estudio de factibilidad de aplicación InSAR en Costa Rica.....	60
Capítulo 5: Análisis de resultados	65
5.1. Resultados InSAR de ISCE	65

Trabajo Final de Graduación

5.2.	Red de líneas base pequeñas de SBAS-MintPy.....	68
5.3.	Mapas de coherencia espacial y temporal de MintPy.....	70
5.4.	Punto de referencia en la zona y RMS de adquisiciones SAR	72
5.5.	Velocidades promedio de Santiago de Puriscal.....	73
5.5.1.	Descomposición de velocidades LOS a horizontal y vertical en Santiago...	77
5.6.	Serie temporal del punto de estudio.....	78
5.7.	Potencial InSAR en Costa Rica	82
5.8.	Descubrimiento de deslizamiento de Jaris.....	87
Capítulo 6:	Conclusiones	89
Capítulo 7:	Recomendaciones	92
Referencias	94
Anexos	105

Índice de cuadros

Contenido	Página
Cuadro 5.1. Resumen de los datos de insumo utilizados para el procesamiento.....	66
Cuadro 5.2. Datos del punto de referencia.....	72
Cuadro 5.3. Tabulación de datos para píxel de estudio	80
Cuadro 5.4. Tabla de atributos del mapa de coherencia temporal, con valores de coherencia media para las diferentes clases de cobertura de suelo.	85

Índice de figuras

Contenido	Página
Figura 2.1. Parte de ocurrencia de un deslizamiento	10
Figura 2.2. Tipos de deslizamiento	12
Figura 2.3. Esquema de trayectoria de órbitas de satélites SAR	13
Figura 2.4. Tipos de retrodispersión	13
Figura 2.5. Longitudes de onda y bandas	14
Figura 2.6. Geometría de adquisición SAR	15
Figura 2.7. Conformación de la imagen SAR.....	16
Figura 2.8. Modos de adquisición misión Sentinel-1, subswath = subfaja, busrt = ráfaga ..	17
Figura 2.9. Imagen SAR en el modo IW sobre Costa Rica	18
Figura 2.10. Combinación de órbitas (movimiento horizontal y vertical).....	19
Figura 2.11. Geometría InSAR de pase repetido	20
Figura 2.12. Esquema de procesamiento InSAR	21
Figura 2.13. Interferograma envuelto y desenvuelto	22
Figura 2.14. Apilamiento de interferogramas	25
Figura 2.15. Series de tiempo enfoque SBAS	27
Figura 2.16. Correcciones en la fase con series de tiempo enfoque SBAS en MintPy	29
Figura 2.17. Velocidad en LOS a través de los años	30
Figura 2.18. Estructura de sistema Linux	31
Figura 4.1. Diagrama del flujo de trabajo InSAR-SBAS	34
Figura 4.2. Captura de pantalla de visualización de Ubuntu	35
Figura 4.3. Captura de pantalla de error surgido durante la instalación de ISCE en Ubuntu	37
Figura 4.4. Captura de pantalla de instalación de ISCE	38
Figura 4.5. Captura de pantalla de edición del bash de instalación de ISCE.....	39
Figura 4.6. Captura de pantalla de visualización de la instalación de ISCE completada	39
Figura 4.7. Captura de pantalla de instalación de MintPy	40
Figura 4.8. Captura de pantalla de edición del bash de instalación de MintPy	41
Figura 4.9. Captura de pantalla de visualización de la instalación de MintPy y ERA5 completada	41
Figura 4.10. Captura de pantalla de Santiago de Puriscal con capa de deslizamientos de la CNE	42
Figura 4.11. Selección de imágenes desde página de Alaska Satellite Facility.....	44
Figura 4.12. Selección de parámetros desde página de Alaska Satellite Facility	45
Figura 4.13. Panel de descarga de imágenes en página de Alaska Satellite Facility	46
Figura 4.14. Números de subfajas en imágenes ascendente y descendente sobre Costa Rica	47

Trabajo Final de Graduación

Figura 4.15. Nombre de los archivos de imagen SAR SLC de Sentinel-1	47
Figura 4.16. Captura de pantalla de parámetros de script eof para la descarga de orbitas automática.....	48
Figura 4.17. Captura de pantalla de uso de la rutina eof para la descarga de orbitas	49
Figura 4.18. Nombre de los archivos de órbita de imágenes SAR	49
Figura 4.19. Captura de pantalla de conversión MDT en formato GeoTIFF a formato de ISCE.....	50
Figura 4.20. Diagrama de flujo de trabajo módulo topsStack	51
Figura 4.21. Captura de pantalla de flujos de trabajo módulo stackSentinel.....	52
Figura 4.22. Captura de pantalla de la ejecución del script stackSentinel con sus respectivos parámetros.....	54
Figura 4.23. Captura de pantalla de ejecución de archivos run-file automático con archivo bash	55
Figura 4.24. Captura de pantalla de archivos de insumo para MintPy	56
Figura 4.25. Diagrama de flujo de trabajo MintPy	57
Figura 4.26. Captura de pantalla de archivo de texto de insumo Puriscal_Desce.txt	58
Figura 4.27. Captura de pantalla de inicio de ejecución de MintPy	59
Figura 4.28. Captura de pantalla de finalización de ejecución con MintPy	59
Figura 4.29. Captura de pantalla de resultados MintPy en formato imagen dentro de la carpeta “pic”	60
Figura 4.30. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine	62
Figura 4.31. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine con capa de coherencia	63
Figura 4.32. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine	64
Figura 5.1. Fase de interferogramas envueltos generados por ISCE en ambas orbitas. En el lado (a) se muestra el interferograma en órbita ascendente. En el lado (b), el interferograma descendente.....	67
Figura 5.2. Fase de interferogramas desenvueltos generados por ISCE en ambas orbitas. En el lado (a) se presenta el interferograma desenvuelto en órbita ascendente. En el lado (b), el interferograma desenvuelto descendente.	68
Figura 5.3. Coherencia del interferograma generado por el script stackSentinel.py de ISCE En el lado (a) se presenta el archivo de coherencia en órbita ascendente. En el lado (b), el archivo de coherencia descendente.....	68
Figura 5.4. Coherencia espacial promedio de la pila de interferogramas determinada por MintPy	71
Figura 5.5. Coherencia temporal de la pila de interferogramas determinada por MintPy....	71
Figura 5.6. Velocidades promedio de desplazamiento en LOS. Órbita ascendente, con una dirección del satélite de -12,08° y un ángulo de incidencia en LOS de 34,08°.....	74
Figura 5.7. Velocidades promedio de desplazamiento en LOS. Órbita descendente, con dirección de -167, 92° y un ángulo de incidencia en LOS de 44,09°.....	75

Trabajo Final de Graduación

Figura 5.8. Velocidades promedio de desplazamiento en la componente horizontal.....	77
Figura 5.9. Velocidades promedio de desplazamiento en la componente vertical	78
Figura 5.10. Series temporales del desplazamiento LOS en la ciudad de Puriscal desde la fecha de referencia 1 de enero 2020..	79
Figura 5.11. Series temporales del desplazamiento LOS en la ciudad de Puriscal desde la fecha de referencia 1 de enero 2020..	79
Figura 5.12. Mapa de coberturas de suelo utilizado para la estimación de factibilidad InSAR..	82
Figura 5.13. Mapa de velocidad que abarca los deslizamientos de Puriscal y Jaris de Mora.	88

Índice de gráficos

Contenido	Página
Gráfico 5.1. Gráfica que muestra la red de interferogramas característica de SBAS (Descendente). El límite del umbral de coherencia para la red es de 0,4.	69
Gráfico 5.2. El gráfico muestra la red de interferogramas característica de SBAS (Ascendente). El límite del umbral de coherencia para la red es de 0,4.	70
Gráfico 5.3. Raíz media cuadrática de la fase Residual para cada adquisición SAR	73
Gráfico 5.4. Series temporales para un píxel específico de estudio (órbita descendente). Las líneas verticales corresponden a los meses en épocas de precipitaciones.	81
Gráfico 5.5. Series temporales para un píxel específico de estudio (órbita ascendente). Las líneas verticales corresponden a los meses en épocas de precipitaciones.	81

Índice de mapas

Contenido	Página
Mapa 2.1. Ubicación de la región de interés en Puriscal.....	9
Mapa 5.1. Desplazamiento acumulado junto con series temporales para un píxel específico (descendente)	76
Mapa 5.2. Desplazamiento acumulado junto con series temporales para un píxel específico (ascendente)	76
Mapa 5.3. Coherencia temporal de Costa Rica calculada de los resultados de Puriscal (Descendente)	84
Mapa 5.4. Factibilidad de aplicabilidad InSAR, zona noroeste de Costa Rica	86
Mapa 5.5. Porcentajes de probabilidad de aplicabilidad InSAR, zona central sur de Costa Rica	86
Mapa 5.6. Mapa de porcentajes de probabilidad de aplicabilidad InSAR, zona sur de Costa Rica	87

Índice de anexos

Contenido	Página
Anexo 1. Cuadro de valores de RMS para fecha de adquisición (descendente)	105
Anexo 2. Cuadro de datos de valores de coherencia espacial promedio, separación temporal de líneas base, separación en metros de línea base perpendicular y número de interferogramas (descendente).....	106
Anexo 3. Cuadro de valores de RMS para fecha de adquisición (ascendente)	110
Anexo 4. Cuadro de datos de valores de coherencia espacial promedio, separación temporal de líneas base, separación en metros de línea base perpendicular y número de interferogramas (ascendente).....	111
Anexo 5. Tabla de atributos del mapa de coherencia temporal, con valores de coherencia media para las diferentes clases de cobertura de suelo (ascendente).....	116
Anexo 6. Mapa de coherencia espacial promedio de Costa rica calculada de los resultados de Puriscal (Descendente).....	118
Anexo 7. Velocidades promedio con desviación estándar	119
Anexo 8. Cuadro de clases de cobertura de suelos	120
Anexo 9. Comparación de resultados SBAS entre 2 procesamientos diferentes con distinta área. Los resultados a la izquierda corresponden a los resultados finales, donde se redujo el área de procesamiento al máximo.....	121
Anexo 10. Comparación de resultados SBAS entre 2 procesamientos diferentes. Los resultados a la izquierda corresponden a los resultados finales, donde se redujo el área de procesamiento al máximo.	122
Anexo 11. Enlace de acceso a manual InSAR y otros archivos (scripts, enlaces).	123

Lista de acrónimos y siglas

ASTER:	Advanced Spaceborne Thermal Emission Radiometer Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Espacial
ASF:	Alaska Satellite Facility Facilidad de Satélites de Alaska
CNE:	Comisión Nacional de Emergencias
DEM:	Digital Earth Model Modelo Digital de Elevaciones
ECMWD:	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
ERA5:	Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis of the Global Climate Quinta Generación de Reanálisis Atmosférico del ECMWF del Clima Global
ETCG:	Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia
EDM:	Electronic Distance Meter Medición Electrónica de Distancias Medición Electrónica de Distancias
GACOS:	Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR Servicio en Línea de Corrección Atmosférica Genérica para InSAR
GEE:	Google Earth Engine Motor de Google Earth
GNSS:	Global Navigation Satellite System

Trabajo Final de Graduación

Sistemas Globales de Navegación por Satélite

GPS:	Global Positioning System Sistema de Posicionamiento Global
IGN:	Instituto Geográfico Nacional
InSAR:	Interferometric Synthetic Aperture Radar Interferometría Radar de Apertura Sintética
ISCE:	InSAR Scientific Computing Environment Entorno Computacional Científico InSAR
IW:	Interferometric Wide Amplia Banda Interferométrica
JPL:	Jet Propulsion Laboratory Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA
LiCSBAS:	Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor
LiDAR:	Light Detection and Ranging Sistema de Medición y Detección de Objetos con Láser
LOS:	Line of Sight Linea de Vista
MintPy:	Miami InSAR time-series software in Python Programa de series temporales InSAR de Miami en Python

Trabajo Final de Graduación

MDE:	Modelo Digital de Elevación
MDT:	Modelo Digital del Terreno
OVSICORI:	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica
PSI:	Persistent Scatterer Interferometry Interferometría de Dispersión Persistente
PyAPS:	Python based Atmospheric Phase Screen estimation Estimación de la Pantalla de Fase Atmosférica basada en Python
RMS:	Root Mean Square Raíz Media Cuadrática.
ROIPAC:	Repeat Orbit Interferometry Package Paquete de Interferometría de Órbita Repetida
RSN:	Red Sismológica Nacional
SAR:	Synthetic Aperture Radar Radar de Apertura Sintética
SRTM:	Shuttle Radar Topography Mission Misión Topográfica Shuttle Radar
SBAS:	Small Baseline Subset Subconjunto de Líneas Base Pequeñas
SLC:	Single Look Complex Complejo de Mirada Única

Trabajo Final de Graduación

SNAP:	Sentinel Application Platform Plataforma de Aplicaciones Sentinel
SNIT:	Sistema Nacional de Información Territorial
STaMPS/MTI:	Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR Método Stanford para Dispersores Persistentes / InSAR multitemporal
VRT:	Virtual Raster Format Formato Virtual Raster
WGS-84:	World Geodetic System 1984 Sistema Geodésico Mundial 1984
WSL:	Windows Subsystem for Linux Subsistema Windows para Linux

Lista de variables numéricas y constantes

Variable	Símbolo	Valor y Unidad
Área	A	m ²
Velocidad de la luz	c	299792458 ms ⁻¹
Longitud de onda	λ	m
Pi	π	3,141592

Resumen

La meta en este proyecto de graduación se basó en estimar el potencial de la técnica InSAR, como herramienta geodésica y de teledetección para la detección y monitoreo de deslizamientos en Costa Rica. Esto a través de su aplicación en el deslizamiento de mayor magnitud de Costa Rica, en Santiago de Puriscal. Los procesamientos InSAR se efectuaron usando las herramientas científicas ISCE y MintPy.

Todo el desarrollo de cómo llevar a cabo un procesamiento y generación de series temporales InSAR, en el país, se plasmó en un manual metodológico. En el manual se muestra parte del capítulo de metodología, pero con mayor detalle y con algunos de los errores comunes que aparecen al procesar. En el manual se plasmó todo el proceso para poder obtener series temporales que permitan describir el movimiento existente de una región, sin la necesidad de un conocimiento profundo en InSAR.

Para evaluar la capacidad de InSAR se procesaron imágenes SAR de enero de 2020 a enero de 2023. A partir de las cuales se generó un apilamiento de interferogramas usando ISCE y las series temporales usando MintPy. Santiago de Puriscal tiene un movimiento horizontal de aproximadamente ~5-15 cm/año según antecedentes. Con los interferogramas realizados se detectan movimientos claros de la superficie. Los desplazamientos detectados son en la Línea de Vista (LOS), del satélite con velocidades promedio de -6 cm/año en órbita descendente y de ~4 cm/año en órbita ascendente. Esto confirma la efectividad de la técnica para detectar el movimiento en deslizamientos activos. También, se extrajo de la combinación entre órbitas la velocidad horizontal y vertical. A parte de la detección de movimiento en Puriscal, los resultados fueron capaces de detectar otro deslizamiento en Jaris de Mora. El deslizamiento es detectable específicamente en la órbita en descendente.

Se hizo un mapa de factibilidad InSAR para Costa Rica donde se indican valores con rangos de coherencia para su aplicabilidad. El mapa se dividió en tres mapas que contemplan la totalidad de Costa Rica. El mapa de factibilidad está constituido a partir del mapa de coherencia obtenido en Puriscal, donde para cada píxel hay un valor de coherencia que es otorgado a cada uno de los píxeles de las distintas coberturas de suelo.

Capítulo 1: Introducción

Las técnicas geodésicas permiten monitorear movimientos de la corteza como los deslizamientos, actividad volcánica y tectónica, e infraestructuras civiles. Estas técnicas son, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés), la medición electrónica de distancias (EDM, por sus siglas en inglés) y triangulación con el uso de la estación total, nivelaciones, la fotogrametría, Sistema de Medición y Detección de Objetos con Láser (LiDAR por sus siglas en inglés), Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR por sus siglas en inglés), entre otros. El fundamento del monitoreo geodésico es determinar el movimiento de puntos o píxeles sobre la superficie terrestre entre diferentes épocas ([Muller, 2019](#)). Existen 2 grandes categorías de técnicas geodésicas, las llevadas a cabo in situ y las remotas. Las técnicas in situ necesitan que el operador visite el terreno para medir. Estas técnicas abarcan el GNSS, la triangulación y el EDM, con estaciones totales y niveles de precisión ([Gómez & Mendoza, 2021](#), [Françoso et al, 2019](#)). Al contrario, las técnicas remotas usan sensores instalados en satélites o en aeronaves con o sin tripulación, no se requiere que el operador recorra el objeto de seguimiento. Estas técnicas de monitoreo abarcan el InSAR, la fotogrametría y el LiDAR. Las técnicas remotas son en general menos precisas que las técnicas in situ. Sin embargo, suelen ser más seguras para el operador y proveer de desplazamientos de la superficie. En lugar de únicamente desplazamientos puntuales, gracias a su cobertura espacial de varios km². Desde que los datos de la constelación Sentinel-1 son gratuitas y disponible cada 12 o 24 días, el InSAR se volvió una técnica muy económica e interesante para el monitoreo geodésico de grandes fenómenos geológicos como los deslizamientos de terrenos.

La técnica InSAR consiste en calcular la diferencia de fase entre dos imágenes radar (SAR), que abarcan la misma área, pero tomadas en dos fechas diferentes. A diferencia de técnicas de observaciones puntuales como el GNSS o el EDM, la técnica InSAR posee una naturaleza superficial que le permite obtener mediciones de gran cobertura espacial de la superficie. La razón de esto es el rango que abarca la onda emitida por los satélites SAR. Los satélites SAR tienen sensores activos que envían una onda electromagnética con longitud entre 0.1 cm y 69.72 cm ([Xu, Lu, & Kim, 2021](#)), y frecuencias de entre 108 a 1011 MHz ([Ferrer, 2016](#)).

Esta onda tiene la particularidad de cruzar las nubes y operar de noche. De la reflexión sobre la superficie terrestre, a partir de la onda emitida, el sensor satelital recibe la amplitud y fase de la onda. En el procesamiento InSAR se usa la fase para hacer interferometría. El cálculo interferométrico se obtiene de la sustracción de la fase de un píxel entre las dos fechas. El desplazamiento en centímetros se calcula según la longitud de onda usada. La dirección del desplazamiento es en dirección de la línea de vista de los satélites (LOS por sus siglas en inglés), es decir, la dirección entre el satélite y el píxel.

InSAR provee resultados con gran cobertura espacial, sin embargo, cuenta con limitaciones importantes. Los resultados de InSAR se ven limitados por la vegetación, la actividad atmosférica, el fuerte relieve, su unidimensionalidad y el tiempo de muestreo, que depende de la órbita de los satélites (>12 días, para Sentinel-1) ([Acton et al., 2014](#)). Los terrenos con vegetación densa dificultan la penetración de los pulsos electromagnéticos, hasta el suelo. Esto provoca una decorrelación de las fases entre las 2 fechas de adquisición, e impide la obtención de un desplazamiento confiable en la superficie con fuerte cobertura vegetal. En la atmósfera, el vapor de agua provoca un retraso en el tiempo de viaje de la señal, y las variaciones del contenido de vapor entre fechas generan un desfase que se confunde con un movimiento de la superficie. Las zonas tropicales por su alta densidad de vegetación y fuerte actividad atmosférica representan un gran reto para los estudios InSAR ([Ebmeier, Biggs, Mather & Amelung, 2013](#)). Otra limitante en la fase es la topografía del terreno, las pendientes abruptas afectan en la geometría de adquisición reduciendo la capacidad de captura ([Sánchez, Monells, Manso, & Farías, 2016](#)). En general, todos los satélites SAR como Sentinel-1, TerraSAR-X, ERS-1/2 y ALOS realizan un escaneo oblicuo, que solo puede obtener la velocidad de desplazamiento en la dirección de la línea de vista del sensor (LOS). Por lo tanto, InSAR solo detecta movimiento unidimensional ([Albiol, Iglesias, Sánchez, & Duro, 2014](#)).

Para mitigar estas limitaciones, se utilizan los algoritmos de series temporales y la combinación de órbitas. Las series temporales usan el apilamiento de varias imágenes InSAR, para estimar los cambios de la corteza a largo plazo y reducir el efecto atmosférico. Los dos algoritmos principales en las series temporales InSAR, son PSI y SBAS ([Cigna,](#)

[Esquivel, & Tapete, 2021](#)). El PSI usa Dispersores Persistentes (PS, por sus siglas en inglés) para detectar reflectores naturales o artificiales, que reflejan una fase coherente en el tiempo. Los objetos con alta coherencia en el tiempo son las estructuras civiles, rocas grandes o superficies regulares, sin vegetación. El SBAS por otra parte, selecciona los interferogramas con las separaciones de líneas base espacio-temporales más pequeñas, para conseguir mayor calidad. Los objetos detectados por SBAS son Dispersores Distribuidos (DS), es decir objetos distribuidos abiertamente y de baja caracterización geométrica ([Yunjun, Fattahi, & Amelung, 2019](#)). Tanto el SBAS como PSI, contribuyen a la depuración en la fase, que permiten reducir el ruido generado por las condiciones atmosféricas. Adicionalmente, combinando las órbitas ascendente y descendente, se logra obtener una deformación en 2D de un plano definido perpendicularmente a la órbita, y en vertical. Las precisiones de las velocidades de deformación estimadas por los algoritmos de series temporales suelen ser hasta algunos mm/año ([Acton et al., 2014](#)).

El procesamiento InSAR se realiza por medio de programas científicos, entre los más usados se encuentran ISCE, SNAP y GAMMA. ISCE es un programa científico de código abierto, basado en Python. La programación de sus algoritmos presenta un alto grado de robustez y rendimiento, son heredados de antiguos paquetes de procesamiento SAR, como ROI_PAC ([Rosen, Gurrola, & Sacco, 2012](#)). El software libre SNAP es una herramienta que realiza varias funciones con datos Sentinel, entre estas el cálculo InSAR ([ESA, s.f.](#)). Posee un interfaz gráfico que facilita su uso, pero sus interferogramas pueden presentar falencias a la hora de desenvolver la fase con SNAPHU en zonas con alta decorrelación donde, ISCE si puede hacerlo ([Ferrer, 2016](#)). GAMMA es un software comercial desarrollado para el procesamiento InSAR. Permite realizar procesamientos de forma eficiente, automatizada y de calidad, pero adquirir una licencia tiene alto costo económico (20,000 USD aproximadamente). El procesamiento de series temporales InSAR usa de insumo los productos de ISCE, SNAP y GAMMA. Esto se hace por medio de otros programas como MintPy, GIANT y StaMPS. MintPy es un software libre que se basa en el enfoque SBAS para el procesamiento de series de temporales, muy utilizado actualmente ([Yunjun, Fattahi, & Amelung, 2019](#)). El software GIANT de código abierto utiliza el enfoque SBAS para su procesamiento, en la actualidad es un software sin mantenimiento por lo que se considera

obsoleto, pero fue muy utilizado un par de años atrás. StaMPS es otro software libre, aplica dos enfoques de series temporales, PSI y SBAS, pero el software tiene dependencias de otros programas como Matlab.

El InSAR ha sido aplicado en campos de minería, vulcanología, sismología y subsidencias del suelo en cascos urbanos. En Chile, Coldeco Mina Andina aplicó la metodología InSAR para la detección de deformación dentro del entorno minero y en un cráter de subsidencia, durante 6 meses ([Sánchez et al., 2016](#)). Los resultados mostraron desplazamientos de entre -4 mm y 4 mm en la mayoría de la zona, pero también valores de subsidencia alcanzando 400 mm en el fondo del cráter. En Ecuador, se aplicó InSAR para medir la evolución del sistema magmático del volcán Tungurahua ([Muller, et al, 2018](#)), donde se detectó la inflación de 10 mm/año atribuido al relleno de un reservorio magmático a 8 km por debajo del cráter activo. En Colombia, con InSAR se mapeo la subsidencia de la ciudad de Bogotá ([Mora, Díaz, & Cardona, 2020](#)), la causa de esta subsidencia era la explotación de la capa freática. Los valores de subsidencia obtenidos fueron del orden de 3.3 cm/año. Esto confirma la presencia de hundimiento de terreno en Bogotá. En Costa Rica, se usó InSAR enfocado en series temporales con PSI para medir las deformaciones en 3 ciudades de la provincia de Limón ([Paniagua, Valverde, Molina, & Barrantes 2021](#)). Las velocidades obtenidas en LOS, fueron desde -11 mm/año hasta +20 mm/año. Por otra parte, ([Ebmeier, Biggs, Mather, Wadge & Amelung, 2010](#)) aplicó SBAS para estudiar la deformación del flanco occidental del Arenal, con tasas de entre ~6 y 8 cm/año para un período de 2005-2009.

InSAR fue también usado para detectar deslizamientos ([Zhang et al, 2021](#)). Los deslizamientos, son movimientos de tierra o rocas inducidos por la gravedad. Las velocidades que caracterizan estos movimientos de tierra son de 0,3 m/año (lento) hasta velocidades +30m/segundo (muy rápido). El disparador principal es la pendiente del terreno, a mayor grado de pendiente, más propenso a desprendimiento. Luego, las precipitaciones, la actividad sísmica, volcánica y antrópica son otros factores que influyen en facilitar la ocurrencia de deslizamientos ([Highland & Bobrowsky, 2008](#)). Costa Rica posee todos los factores causantes de deslizamientos, por ser un país con mucha sismicidad, volcanes activos y fuertes temporadas de precipitaciones. El deslizamiento más grande del país se encuentra dentro de

la capital, en Santiago de Puriscal. Es un deslizamiento con velocidades de movimiento lento, con más de 100 años de existencia. El área abarca todo el centro de Santiago y ha causado daños en la infraestructura a lo largo de los años ([Peraldo & Molina, 1993](#)). Puriscal no tiene antecedentes InSAR y no se sabe exactamente las velocidades actuales de movimiento.

Este proyecto plantea aplicar la técnica geodésica InSAR en Costa Rica, por medio del enfoque SBAS de series temporales. El objetivo es probar el potencial de la técnica en base a la calidad de los resultados, esto por tratarse de una zona tropical, donde InSAR suele tener dificultades. Esta técnica permite estudiar eventos naturales como deslizamientos, actividad volcánica y sísmica, al igual que la mayoría de las técnicas in situ, pero con la ventaja de reducir los costos económicos y no exponer el operador a riesgos naturales. Así, la técnica podría representar cerca del 100% en la reducción de los gastos económicos, como planificación, logística y seguridad del personal que requiere una medición in situ. El procesamiento requiere mucha inversión de tiempo, por lo que se necesita un servidor, y si no hay un equipo de cómputo adecuado, se debe invertir en uno. A pesar de estos requerimientos a nivel computacional, el InSAR representa una opción para capturar y procesar información de grandes extensiones de terreno en km². Los sensores satelitales SAR como Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA), capturan imágenes radar de la Tierra y las habilitan de manera gratuita. En el caso de Costa Rica, dos imágenes de Sentinel-1 pueden cubrir más de un 50% del territorio. El InSAR trae enormes ventajas en términos de monitoreo geodésico, cada menos de 2 semanas se pueden detectar movimientos centimétricos de todo el país. Además, los estudios de factibilidad de InSAR+SBAS en Costa Rica son muy reducidos, por lo que realmente vale la pena aplicar este método y conocer el potencial para la detección de desplazamientos.

El InSAR por otra parte, se ve limitado en sus resultados a causa de los factores como la vegetación, las características del relieve y la fuerte actividad atmosférica, que introducen ruido en la fase. Todos estos son factores típicos en zona tropical y evitan la lectura clara de los interferogramas. Los desplazamientos detectados en una dimensión (LOS), es otra de las limitantes que tiene el InSAR. Por estas razones, es que se aplican los algoritmos de series temporales. Los algoritmos de series temporales son capaces de reducir el ruido en la fase,

ruido generado por estos factores. Principalmente reduce el ruido atmosférico, que influye bastante en una zona como Costa Rica. En este caso, con el enfoque SBAS se pueden obtener resultados con buena coherencia, aptos para analizar desplazamientos a precisiones del rango milimétrico. Las series temporales permiten monitorear eventos a largo plazo con InSAR, en períodos que pueden ir desde 1 a 3 años o más. De manera que, se logra observar una evolución en detalle y amplía temporalmente del evento de estudio. Finalmente, los satélites SAR como Sentinel-1 orbitan sobre dos trayectorias, ascendente y descendente. Con la combinación de órbitas se puede parcialmente eliminar la limitación de InSAR de solo detectar los movimientos en LOS, y detectarlos en la componente este-oeste y vertical. Se sigue sin poder detectar movimientos norte-sur. Si los resultados son exitosos, se podría tener una nueva herramienta que permita monitorear numerosos deslizamientos que existen en Costa Rica.

Para evaluar la capacidad de detección de movimiento del suelo con InSAR, usando los insumos del satélite Sentinel-1 en Costa Rica, se buscó un proceso natural que presentara un movimiento de algunos centímetros. El deslizamiento de Santiago de Puriscal presenta estas características. La presencia de objetos como casas, calles, pequeños edificios, y la alta capacidad retrodispersiva de la señal son factores favorables para InSAR. El deslizamiento se encuentra activo desde hace casi 150 años, es el más grande del país, y alcanza velocidades de centímetros por año ([Peraldo & Molina, 1993](#)). La consistencia del movimiento favorece un monitoreo a largo plazo, permitiendo anticipar de mejor manera cualquier evento importante como un colapso. Los movimientos de un deslizamiento traen consecuencias a largo y corto plazo, sin embargo, las consecuencias que llega a tener un colapso de tierra (movimiento rápido) son mucho más graves. Los movimientos de velocidades lentas, con el tiempo son proclives a causar daño estructural en obras civiles. Aun así, los movimientos rápidos son los que más se desean anticipar, estos causan grandes pérdidas en vidas humanas y grandes daños en infraestructura. El InSAR es una herramienta capaz de monitorear y anticipar estos eventos.

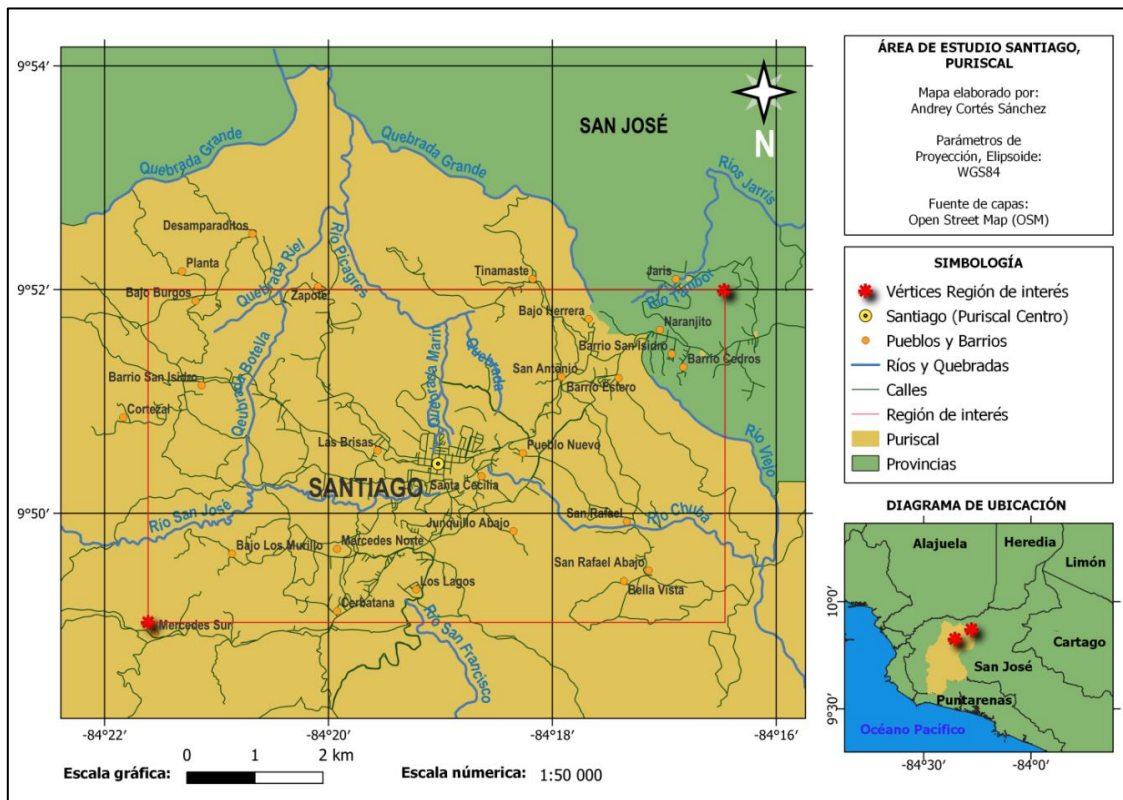
A pesar de existir desde hace varias décadas, dentro del país el número de estudios InSAR es reducido, uno de los factores principales es que el procesamiento InSAR representa un reto

tecnológico importante. La mayoría de los programas se basan en Python y funcionan en sistemas como Linux. No todos los profesionales están familiarizados con la programación y esto representa un paso complejo a dar, hacia este mundo de algoritmos, errores y comandos. En resumen, el InSAR es una técnica que todavía es poco explotada dentro del país, a pesar de tener varias décadas de existencia. Esta técnica tiene el potencial de ser una herramienta de monitoreo, para anticipar y evitar riesgos futuros en eventos de deslizamientos, tectónicos y volcánicos, e incluso a parte de la deformación en la corteza, la deformación en obras civiles. Por estas razones este proyecto plantea probar el potencial en el país del InSAR con datos gratuitos, softwares gratuitos, y va a ser aplicado al deslizamiento de Santiago de Puriscal.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Zona de estudio: Santiago de Puriscal, San José

Santiago de Puriscal, con aproximadamente 12.000 habitantes, es una ciudad ubicada unos 40 km al suroeste de San José, capital de Costa Rica (Mapa 2.1). Es una zona urbana con la presencia activa de un deslizamiento, con un área aproximada de 4-5 km². La ciudad presenta velocidades de desplazamiento entre 5-15 centímetros por año cuesta abajo, hacia el noroeste (Agnarsson & Dubois, 1993). Los sismos y épocas de lluvias provocan un mayor movimiento del lugar, esto ha influido en la infraestructura local. La infraestructura de la zona ha sido altamente impactada, por lo que algunos edificios se han tenido que demoler, se han agrietado, por ejemplo, la antigua iglesia fue declarada inhabitable por posibles derrumbes (Agnarsson & Dubois, 1993). Se encuentran documentos desde 1877 mencionando daños, indicando la existencia del movimiento desde hace más de un siglo (Peraldo & Molina, 1993).



Mapa 2.1. Ubicación de la región de interés en Puriscal
Fuente: elaboración propia

2.2. Deslizamientos

Los movimientos en masa de rocas y tierra se definen como deslizamientos, procesos geológicos producto de la acción de fuerzas gravitacionales e hidráulicas ([Chunga et al., 2016](#)). El disparador principal en los deslizamientos es la pendiente del terreno, a mayor grado de pendiente es más propensa a desprendimiento. Luego, las precipitaciones, la actividad sísmica, volcánica y antrópica son otros factores que influyen. Las lluvias saturan el subsuelo, bajando su resistencia mecánica y cediendo con mayor facilidad. Las aceleraciones generadas por la actividad sísmica causan la licuefacción de capas inferiores del suelo, más débiles y provocan deslizamientos. La actividad volcánica genera gran volumen de escombros que bajo fuertes lluvias son proclive a generar lahares (flujos), además produce inestabilidad y desprendimiento en laderas. La actividad antrópica como las construcciones de obras viales, el inadecuado corte de taludes, alteran las características del terreno provocando la inestabilidad del mismo ([Highland & Bobrowsky, 2008](#)). En la Figura 2.1 extraída de ([Suárez, 2009](#)), se describen las partes principales que componen un deslizamiento.

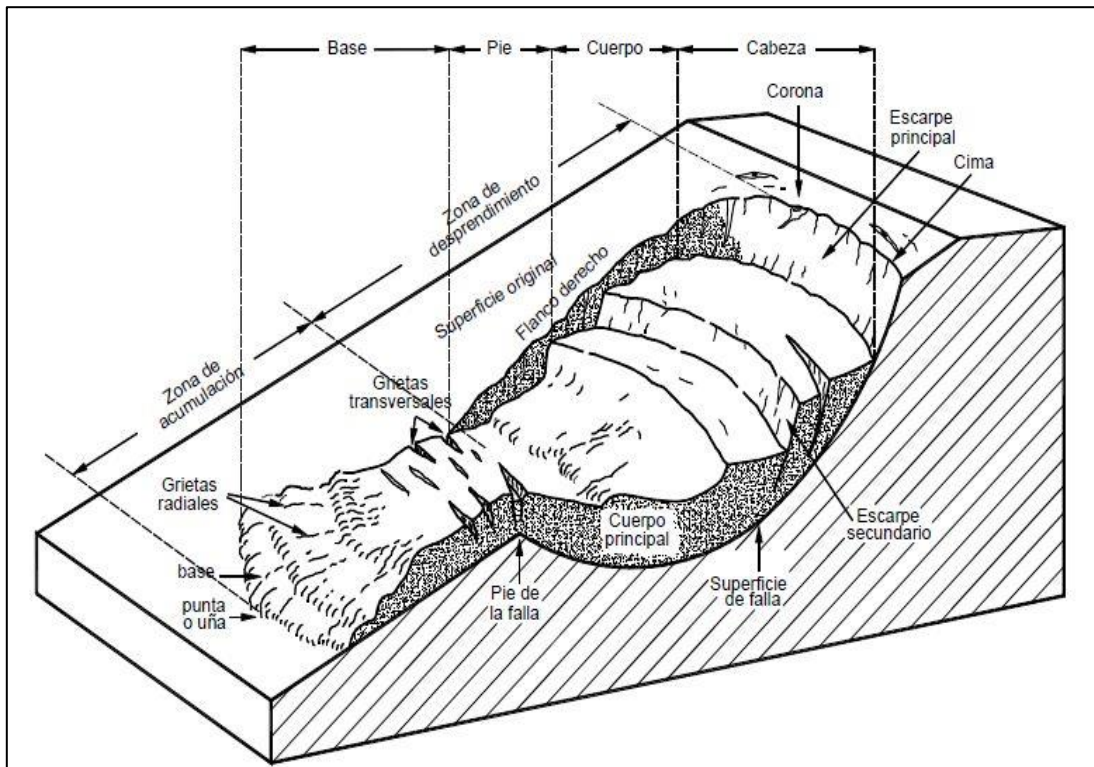


Figura 2.1. Parte de ocurrencia de un deslizamiento
Fuente: adaptado de (Suárez, 2009)

Las partes principales del deslizamiento según [\(Suárez, 2009\)](#), son la cabeza que describe como la parte superior del material (tierra) desplazado, ubicada bajo la corona. La corona se refiere al material que se encuentra en el sitio casi inalterado por encima de la cabeza. La superficie de falla es la que delimita el área del movimiento desplazado, el suelo por debajo de la superficie de falla que no se desliza. El cuerpo es la parte principal de la masa desplazada sobre la superficie de falla. El pie de la superficie de falla es la línea de intercepción inferior entre la superficie de rotura, y la superficie de terreno natural u original. Finalmente, la base es el área que queda cubierta por el material desplazado abajo del pie de la superficie de falla.

Los deslizamientos de tierra y rocas se pueden clasificar principalmente en tres tipos, los de movimiento rotacional, movimiento traslacional y los flujos (Figura 2.2). Los deslizamientos de tipo rotacional suceden cuando la ruptura de la superficie se curva hacia arriba, en forma de cuchara. El movimiento es casi rotacional alrededor de un eje paralelo al contorno de la pendiente, la masa desplazada se puede comportar como una masa coherente con poca deformación interna. La cabeza del deslizamiento se mueve verticalmente hacia abajo, dejando la parte superior del material desplazado inclinado hacia la escarpa. El tipo traslacional es un movimiento hacia afuera o abajo, que se da a lo largo de una superficie relativamente plana, con un mínimo movimiento de rotación o inclinación. El deslizamiento puede progresar mucho en distancia, si la superficie de ruptura es bastante inclinada. Generalmente se dan en discontinuidades geológicas como fallas. Finalmente, el flujo es un movimiento espacialmente continuo, se produce cuando el material (roca o tierra), generalmente saturado con agua, se desliza pendiente abajo en forma de fluido viscoso [\(Highland & Bobrowsky, 2008\)](#).

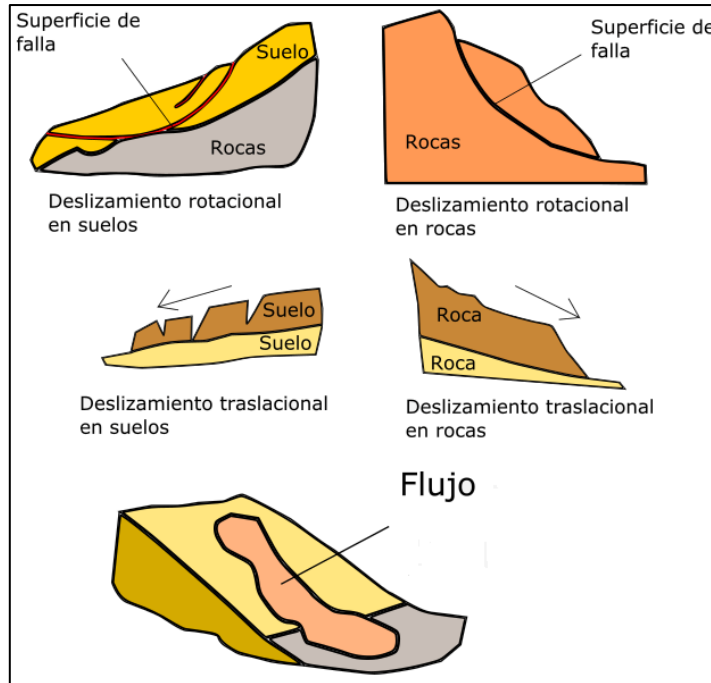


Figura 2.2. Tipos de deslizamiento

Fuente: adaptado de <https://geologiaweb.com/riesgos-naturales/deslizamientos/>

2.3. Radar de Apertura Sintética (SAR)

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es una técnica de sensores activos, su nombre de apertura sintética es debido a la antena artificial simulada por el sensor, para una captura de datos con mejor resolución. La antena emite un conjunto de pequeños pulsos electromagnéticos, con un grado de coherencia en dirección hacia el suelo. Se produce un rastro de tamaño proporcional a la antena principal, lo que se entiende como apertura. El procesamiento de estas señales es lo que permite la determinación de los pequeños cambios. Finalmente, se producen imágenes de mucho mejor resolución, como si se hubiesen capturado por un radar de mayor apertura, esto es lo que se define como apertura sintética (Gárces, 2020). Los satélites con sensores SAR rodean la Tierra en orbitas sub-polares cercanas, a una altitud de entre 500 y 800 Km sobre la superficie. La técnica SAR tiene origen a finales de los años 70 con el lanzamiento del primer satélite con sensor SAR (Hermosilla, 2016). Los satélites SAR durante la captura de datos, realizan dos trayectorias de órbita alrededor del planeta (Figura 2.3). La descendente con dirección de norte a sur y visión al oeste, y la ascendente de sur a norte con visión al este (Ferreti, 2014).

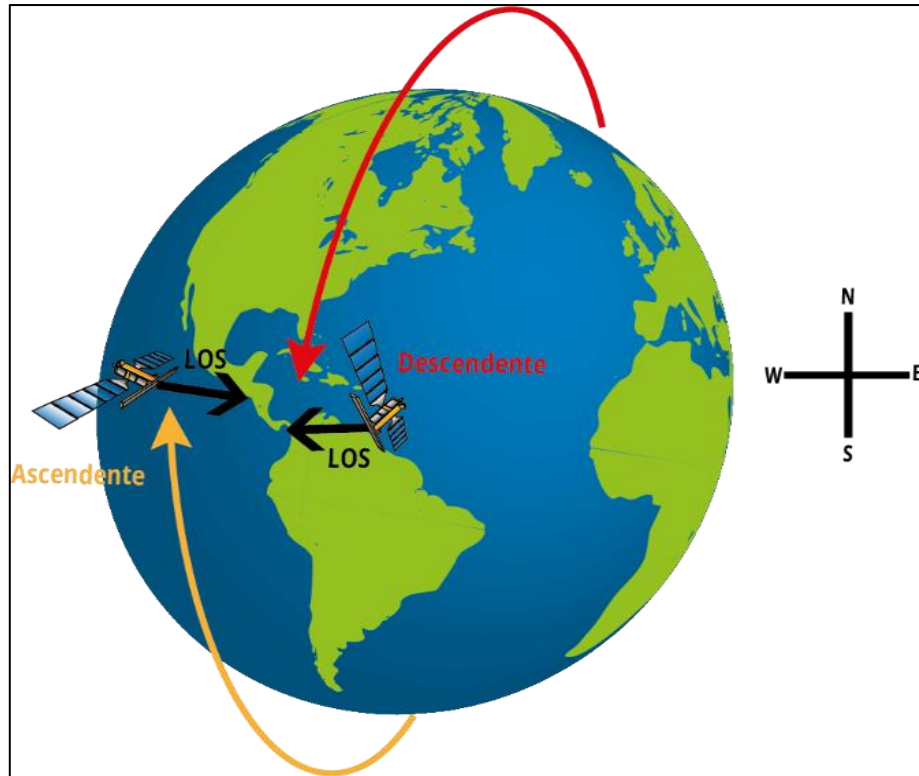


Figura 2.3. Esquema de trayectoria de órbitas de satélites SAR
Fuente: elaboración propia

Los pulsos electromagnéticos emitidos desde la antena hacia la superficie están dentro del rango de microondas. Cuando estos pulsos de energía rebotan en el suelo, lo hace en muchas direcciones, y una cantidad de pulsos se devuelven en dirección a la antena SAR. La antena se encarga de recibir esos pulsos, en un proceso denominado retrodispersión. Se registra la amplitud, fase, polarización y tiempo de regreso. Una buena retrodispersión depende de las características de la superficie y las estructuras presentes en la superficie (Figura 2.4) Finalmente, estos parámetros se procesan en conjunto, para conformar las imágenes de amplitud y de fase SAR ([Hermosilla, 2016](#)).

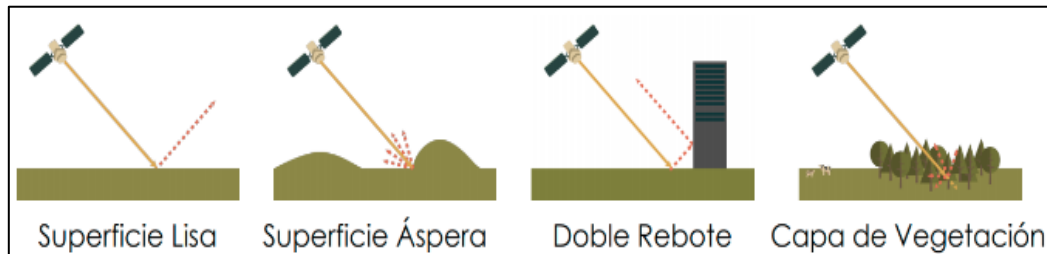


Figura 2.4. Tipos de retrodispersión
Fuente: <https://aguaysig.com/mecanismos-de-retrodispersion-de-las-imagenes-sar/>

La longitud de onda de los pulsos electromagnéticos es un factor que determina la penetración de la onda en la superficie. Estas ondas son capaces de penetrar las nubes, y al tratarse de un sensor activo posee la capacidad de tomar datos incluso de noche. Cuanto más grande es su longitud de onda más penetra la vegetación. En la Ecuación (2.1), λ representa la longitud de onda, c se refiere a la velocidad de la luz generalmente en metros por segundo (m/s). El valor de f es la frecuencia en unidades de Hertz, donde en función de la ecuación a menor frecuencia, mayor longitud de onda, lo que trae beneficios como mayor penetración de la onda. En el caso del radar, las bandas más aplicadas son la banda L con una longitud de onda de entre 15 a 30 cm, la banda C entre 3.8 a 7.5 cm y la banda X de entre 2.4 y 3.8 cm (Podest, 2017). En la Figura 2.5 se observan los tamaños de longitudes de onda en las bandas mencionadas, los tamaños más grandes ofrecen mayor calidad de penetración.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.1}$$

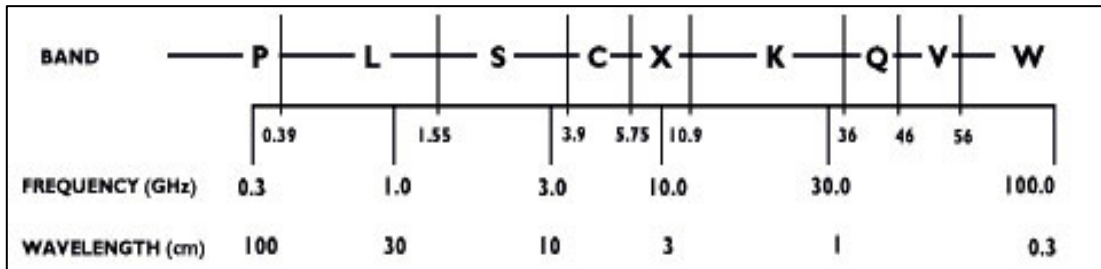


Figura 2.5. Longitudes de onda y bandas

Fuente: <https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-mapeo-deformacion-dinsar>

2.3.1. Geometría SAR

La adquisición de datos de la superficie para la generación de imágenes SAR, se da por medio de una geometría entre el sensor y el objetivo (terreno) (Figura 2.6). Las componentes de la imagen swath (faja) son la dirección o trayectoria del satélite (acimut), y la separación perpendicular entre el sensor y objetivo (rango). En la resolución espacial de las imágenes SAR, interviene la resolución de ambas componentes, rango y acimut. La Ecuación (2.2) para la resolución espacial en rango

terrestre para el rango oblicuo, se compone de c que es la velocidad de la luz, y B que se refiere a la frecuencia del ancho de banda. El ángulo θ se refiere al ángulo de incidencia, generado entre la perpendicular del sensor a la superficie y la dirección del rango oblicuo. La Ecuación (2.3), donde R_z se refiere a la resolución de acimut para las imágenes SAR, solo depende de L_a que representa la longitud de las antenas en dirección del acimut (Ferreti, 2014). LOS (Line of Sight), es la dirección en que se miden las deformaciones de la superficie, ver Ecuación (2.4) (Rosen et al, 2000). Lambda λ es la longitud de onda, ρ es la diferencia entre los objetivos medidos y ϕ el desplazamiento (ϕ) en LOS del objetivo o superficie.

$$R_r = \frac{c}{2B \sin(\theta)} \quad (2.2)$$

$$R_z = \frac{L}{2} \quad (2.3)$$

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d_{LOS} \quad (2.4)$$

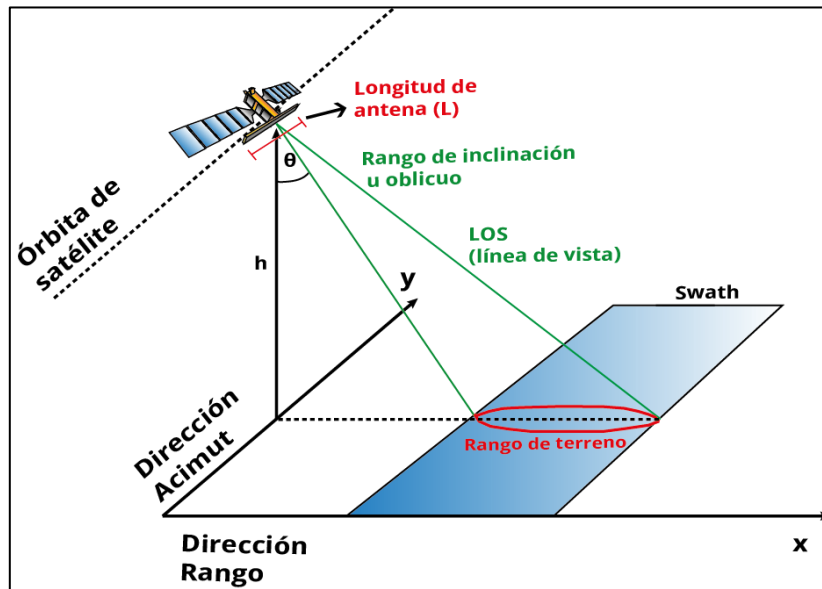


Figura 2.6. Geometría de adquisición SAR
Fuente: elaboración propia

Como argumenta Maitre et al., 2001, (como se citó en Villa, 2016) de las adquisiciones SAR se pueden adquirir imágenes SAR en tres niveles de tratamiento, el Nivel 0 de

datos crudos y comprimidos, el Nivel 1 de imágenes en formato complejo SLC y datos focalizados GRD. El Nivel 2 es de datos de amplitud corregidos, en este caso se usan para el procesamiento los productos Single Look Complex (SLC), son imágenes SAR que contienen información de fase y amplitud. Las mediciones SAR se componen de estas dos observables, la amplitud se refiere a la fuerza de la onda electromagnética dispersada, influenciada por la forma, orientación y propiedades eléctricas del objetivo medido. Conforme la onda se dispersa en el aire, esta cambia su fase de π a $-\pi$ por cada longitud de onda de la distancia recorrida ([Osmanoglu, Sunar, Wdowinski, Cabral-Cano, 2016](#)).

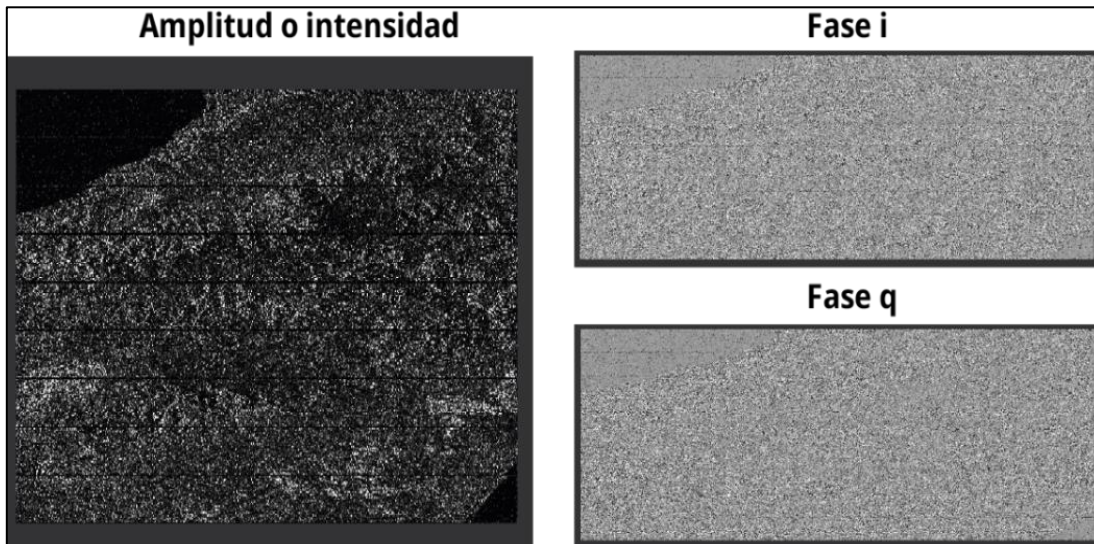


Figura 2.7. Conformación de la imagen SAR
Fuente: elaboración propia

La imagen SAR se conforma de un componente imaginario (q) y un componente real (i) (Figura 2.7). A partir de los componentes se determinan los valores de la amplitud o intensidad, y de la fase para las diferentes aplicaciones de análisis multitemporal o InSAR. A continuación, se muestra la representación polar, con la formulación matemática en la Ecuación (2.5) y Ecuación (2.6) ([Villa, 2016](#)).

Amplitud o intensidad (I):

$$I = A^2 = i^2 + q^2 \tag{2.5}$$

Fase (θ):

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{q}{i}\right) \quad (2.6)$$

2.3.2. Sentinel-1

Las misiones Sentinel-1 se basan en una constelación de satélites SAR idénticos, el lanzamiento del Sentinel-1A fue en el mes de abril de 2014 ([Yague, Prats, Rodríguez, Eineder, & Bamler, 2016](#)). Estas misiones se hicieron para renovar o sustituir antiguas misiones de monitoreo a la Tierra y asegurar la recolección continua de datos. El Sentinel-1A se mantiene en una órbita polar-cercana, y tiene un funcionamiento durante las 24 horas ([ESA, 2021](#)), y entre sus ventajas se encuentra el acceso gratuito a las imágenes SAR. En Costa Rica se tienen imágenes de la misión Sentinel-1A aproximadamente cada 12 días, de acuerdo con los datos de la página ASF. La plataforma Sentinel-1 posee diferentes modos de operación, el Strip Map Mode y el Interferometric Wide Swath Mode (Figura 2.8), donde para efectos de la investigación se trabaja con el tipo de adquisición Interferometric Wide Swath Mode (IW) ([Attema et al., 2007](#)).

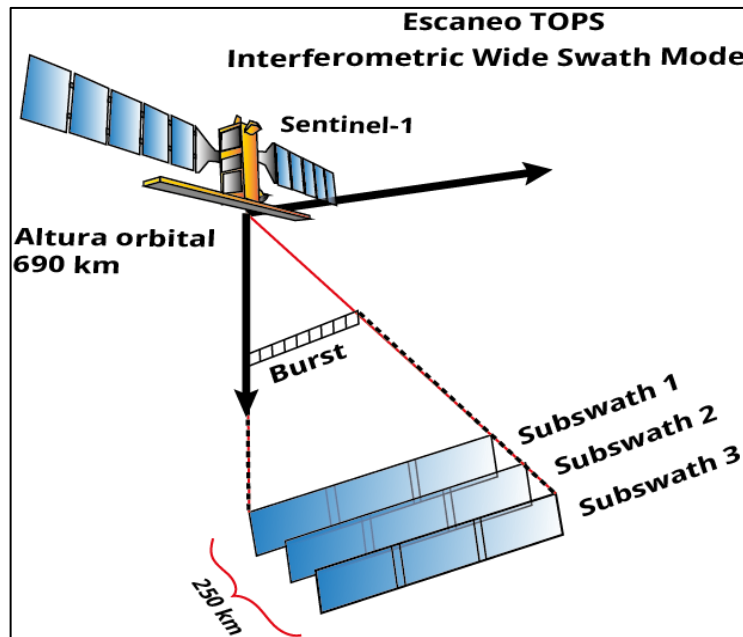


Figura 2.8. Modos de adquisición misión Sentinel-1, subswath = subfaja, busrt = ráfaga
Fuente: elaboración propia

La adquisición IW se conforma de una faja de 250 km, y una resolución espacial de 5 x 20 m (Attema et al., 2007). Se da bajo el modo de interferometría Observación al Terreno por Escaneos Progresivos (TOPSAR) (Figura 2.8). Este método captura a partir de los ecos de la apertura SAR, 3 imágenes llamadas subfajas, que juntas conforman la imagen o faja completa (Yague et al., 2016). Cada una de las 3 subfajas están conformadas de 8 ráfagas (Sakar, Brcic, Rodriguez, Yague, 2015) (Figura 2.9). El método TOPSAR utiliza un tipo de corrección llamado Diversidad Espectral Mejorada (ESD) que usa las regiones de solapamiento de ráfagas para la estimación del error de corrección (Prats et al., 2012). La ESD corrige un desplazamiento constante en el azimut debido a un error orbital/de sincronización luego de hacer un corrección geométrico a partir de la información orbital y un DEM externo (Sakar, et al., 2015).

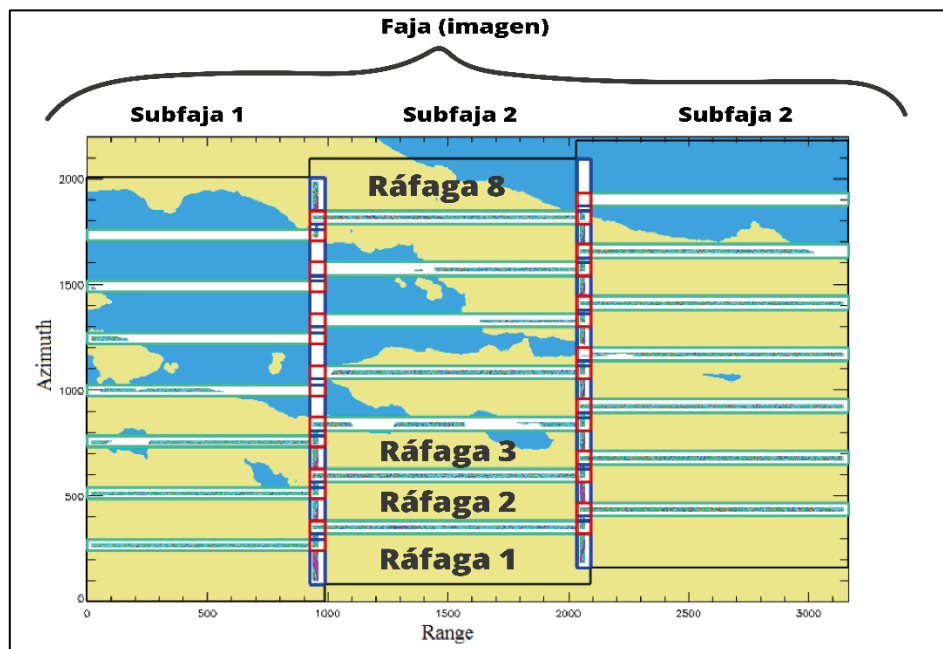


Figura 2.9. Imagen SAR en el modo IW sobre Costa Rica
Fuente: adaptado de (Sakar, et al, 2015)

Combinando orbitas ascendente y descendente es posible obtener desplazamientos en 2D y vertical. Esto se realiza a partir de la descomposición de la velocidad de LOS en las componentes horizontal (este-oeste) y vertical (arriba-abajo). Este proceso se lleva a cabo combinando los resultados en órbita ascendente y descendente (Figura 2.10). El requisito principal es que la superficie del suelo tenga una retrodispersión coherente y

constante dadas las geometrías de adquisición y las frecuencias de los sensores utilizados ([Mora, Ordoqui, & Iglesias, 2016](#)).

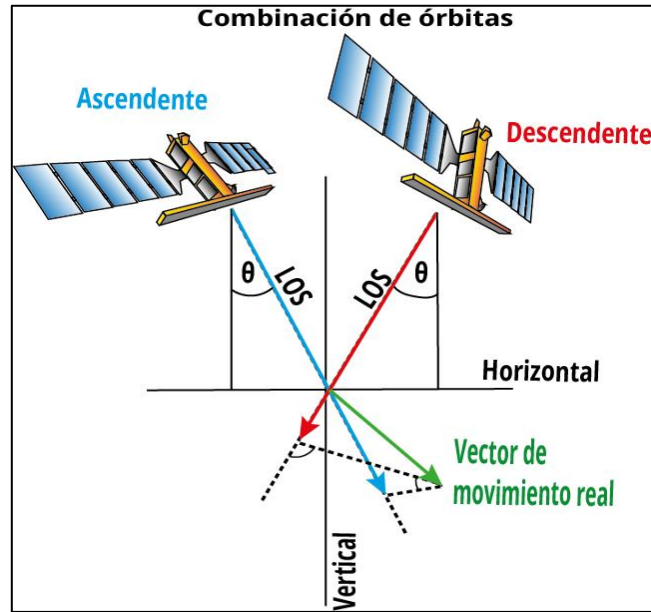


Figura 2.10. Combinación de órbitas (movimiento horizontal y vertical)
Fuente: elaboración propia

2.4. Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR)

El InSAR es el procesamiento digital de dos imágenes SAR, con fechas diferentes que cubren una misma área, donde una imagen se toma como referencia y la otra como imagen secundaria. La técnica conocida como InSAR de pase repetido permite obtener productos como mapas de topografía y desplazamientos de datos recolectados en dos fechas distintas por una plataforma SAR en órbita. La primera adquisición ocurre en un tiempo t_1 separada por un vector B , de la adquisición tomada en un tiempo t_2 . El vector B se trata de la línea base interferométrica (Figura 2.11). En el procesamiento InSAR se necesita saber de forma precisa la posición y velocidad de la plataforma SAR en el momento adquisición de un píxel en un rango y Doppler relativo a la plataforma ([Gurrola, et al., 2010](#)). La diferencia de fase entre las dos imágenes, tanto en posición de píxeles y tiempo es lo que se conoce como interferograma, con información de la geometría relativa y los patrones de interferencia ([Peñaloza & Tocasuche, 2018](#)). Los patrones de interferencia se refieren a contornos de fase que se repiten cada 2π radianes, cada ciclo de fase significa una diferencia de altura constante, conocido como altura de

ambigüedad ([Rosen & Hensley, 2021](#)). La Figura 2.11 explica gráficamente este proceso, donde el desplazamiento del suelo en LOS produce una diferencia en la posición del píxel. La Ecuación (2.7) extraída de [Rosen & Hensley, \(2021\)](#), se describe matemáticamente este proceso de interferometría para una deformación en la superficie. La componente topo es la ecuación de solución para la topografía a partir de fase interferométrica.

$$\phi_{int} = \phi_1 - \phi_2 = topo\phi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2.7)$$

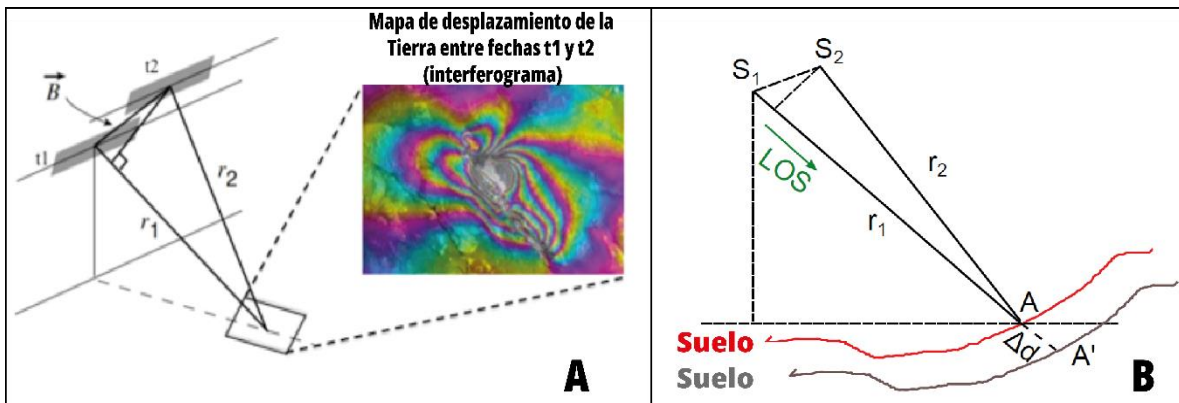


Figura 2.11. Geometría InSAR de pase repetido
Fuente: adaptado de (Gurrola et al, 2010; Rosen & Hensley, 2021).

En la Figura 2.12 se visualiza el esquema que explica en que consiste el procesamiento InSAR, es básicamente similar al esquema presentado por [Gurrola et al., \(2010\)](#). Se parte de dos imágenes SAR en formato SLC, donde una se emplea como máster y otra como secundaria. Luego se realiza el correregistro entre ellas que da formación al interferograma envuelto o enrollado, se determina la coherencia y se desenrolla la fase interferométrica (interferograma desenrollado). La geodificación es la georreferencia de los productos interferométricos debido a que estos se encuentran en sistema de coordenadas radar. Con el DEM se aplican las correcciones geométricas y compensación de la fase topográfica. Después de esto se obtiene la fase diferencial que permite observar la deformación existente.

Trabajo Final de Graduación

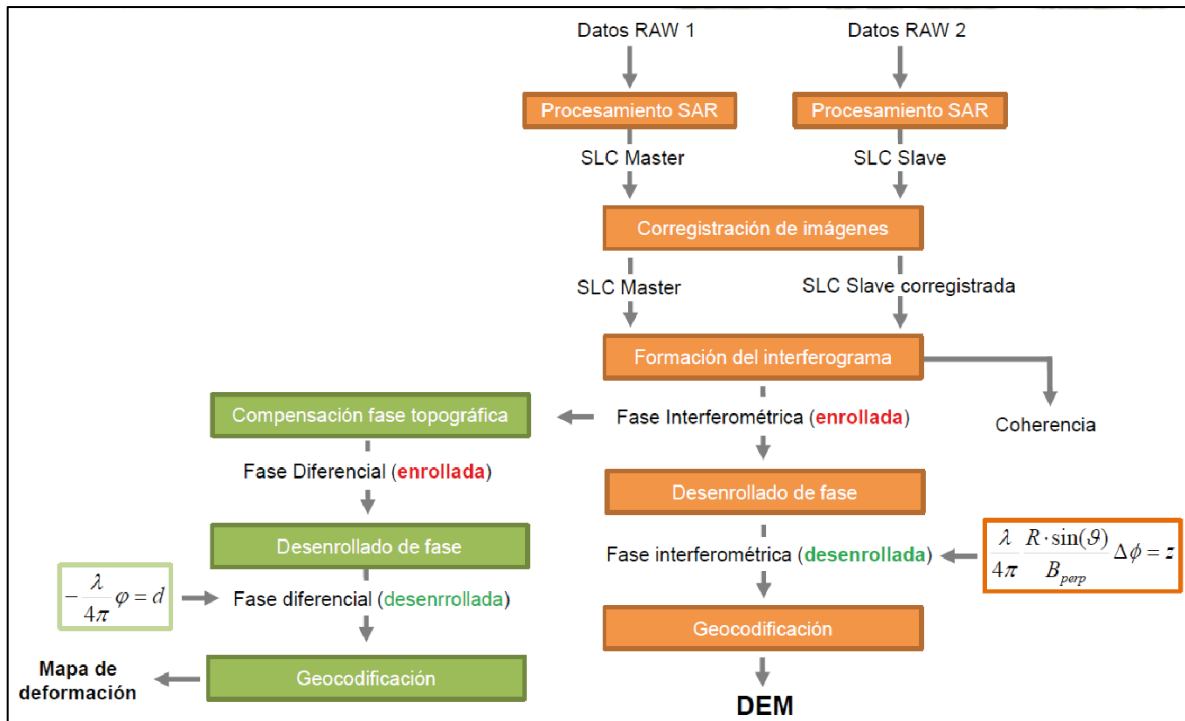


Figura 2.12. Esquema de procesamiento InSAR
Fuente: adaptado de GEOVOL, Instituto CEDIAC, FI, UNcuyu

El término de interferometría se debe a que el proceso consiste en la combinación o “interferencia” de dos imágenes SAR, que se mantienen temporalmente separadas (Hermosilla, 2016). La formación del interferograma, se basa entonces en la diferencia de fase entre dos imágenes SAR de la misma área, tomadas en el mismo paso orbital, pero en tiempos diferentes, y que se determina con una multiplicación compleja entre la imagen de referencia y la secundaria. Los datos en la fase del interferograma representan la diferencia de fase entre ambas imágenes empleadas, con valores de $-\pi$ a π . El rango de $-\pi$ a π hace referencia al interferograma envuelto o enrollado, sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones prácticas son requeridas los valores continuos de la fase, conocida como fase desenvuelta y alcanza valores mayores a este rango (Osmanoglu, et al., 2016). El interferograma desenvuelto permite determinar el desplazamiento o diferencias en la superficie de manera más precisa, esto al resolver las ambigüedades de la fase envuelta en donde predominan los saltos de fase. En la Figura 2.13 se observa un interferograma envuelto y desenvuelto, junto con la visualización gráfica de los valores de rangos π de cada uno.

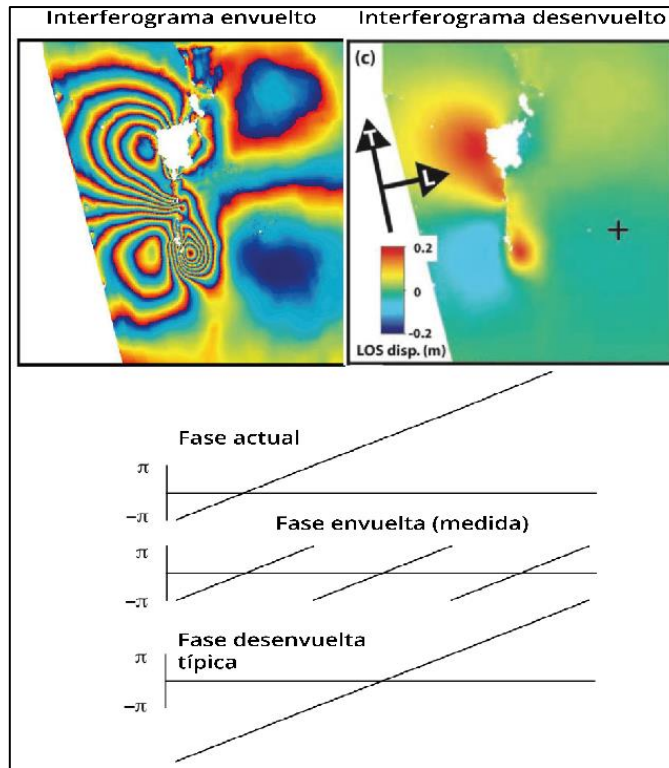


Figura 2.13. Interferograma envuelto y desenvuelto
Fuente: adaptado de (Rosen & Hensley, 2021).

Un parámetro muy importante dentro del interferograma es la coherencia, este valor nos indicará si los resultados son óptimos para ser analizados e interpretados, o de lo contrario contiene solo ruido en la fase interferométrica. Se le conoce como correlación cruzada normalizada entre dos imágenes SAR corregistradas. El valor absoluto de la coherencia se mantiene en el rango de 0 a 1, midiendo la estabilidad relativa de los mecanismos dentro una misma área espacial entre el par de imágenes SAR. Suele haber una alta coherencia para sitios de suelo desnudo o zonas urbanas, y una baja para zonas con vegetación (Nikaein, Lannini, Molijn, & López, 2021). Siguiendo a Rosen, et. al (2000), la relación entre dispersores y receptores interferométricos luego de la formación de la imagen se determina por la Ecuación (2.8) de correlación compleja. Donde g_1 y g_2 son los retornos SAR a la antena, el asterisco * representa el operador complejo conjugado, $\langle \rangle$ representa el promedio del conjunto realizaciones de moteado. La magnitud de correlación también se llama coherencia. En Rosen & Hensley 2021 se representa una correlación o coherencia como producto de tres componentes. La coherencia termal, que representa los cambios electrónicos del sistema radar, la

coherencia espacial que son los cambios de ubicación del sensor y la coherencia temporal, que es la decorrelación por cambios en la superficie entre observaciones.

$$\gamma = \frac{\langle g_1 g_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |g_1|^2 \rangle \langle |g_2|^2 \rangle}} \quad (2.8)$$

Las correcciones geométricas de fase se corrigen durante la construcción de los interferogramas utilizando la información de la órbita del satélite y los Modelos de Elevación Digitales ([Ebmeier et al., 2012](#)). La medición InSAR en LOS tiene una serie de fuentes de error que interfieren con la velocidad de desplazamiento real, la causa son las mediciones particularmente sensibles a la topografía, condiciones atmosféricas y propiedades eléctricas del suelo. La señal de fase InSAR consiste en la suma global de cambios por estas fuentes de errores ([Osmanoglu, et al., 2016](#)). Estos errores también influyen en los niveles de coherencia o correlación de los interferogramas. De acuerdo con la ecuación de [Rosen & Hensley \(2021\)](#), la Ecuación (2.9) contempla la deformación en dirección del satélite como $\frac{4\pi}{\lambda} \Delta dLOS$. Además, está compuesta básicamente por el error del DEM, los errores orbitales, errores troposféricos y ionosféricos, errores de decorrelación, error de desempaquetado de la fase y el ruido aleatorio en la fase.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta dLOS + \Delta\phi_{dem} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{iono} + \Delta\phi_{decor} + \Delta\phi_{unwrp} + \Delta\phi_n \quad (2.9)$$

En InSAR se usa un DEM de referencia que permite la extracción de puntos a utilizar para la conversión de fase a elevación ([O'Connor, 2020](#)). Las contribuciones topográficas a la fase $\Delta\phi_{dem}$ son corregidas utilizando un DEM ([Ebmeier, Biggs, Müller & Avard, 2014](#)). La contribución topográfica es definida como el resultado de la diferencia de ángulos de incidencia entre adquisiciones SAR. Además, escala la topografía y la línea base perpendicular, en pendientes escarpadas o líneas de base grandes, un solo píxel con diferencia de fase puede introducir decorrelación geométrica ([Biggs, Wright, Lu & Parsons, 2007](#)). La otra fuente de error es la atmósfera $\Delta\phi_{atm}$, donde la ionósfera $\Delta\phi_{iono}$ puede ocasionar unas capturas erróneas del acimut medido

en pixeles, debido a alguna gradiente TEC ([Rosen & Hensley, 2021](#)). En relación con los interferogramas uno de los factores más influyentes es la cantidad de vapor de agua contenido en la tropósfera ([Biggs, et al., 2007](#)). Los satélites sufren de perturbaciones en sus orbitas $\Delta\phi_{orb}$ por diferentes factores, a consecuencia de esto las distancias entre líneas base en las adquisiciones SAR generan diferencias que afectan el ángulo de incidencia, y también a la topografía, pero con un impacto menor ([Biggs, et al., 2007](#)). Esta fuente de error se puede reducir con la contribución orbital, a través de archivos orbitales similar a las efemérides en los GNSS.

Las últimas fuentes de error son la decorrelación $\Delta\phi_{decor}$ o falta de coherencia, los errores de desempaqueado $\Delta\phi_{unwrp}$ y el ruido aleatorio $\Delta\phi_n$. La decorrelación se suele definir como un presunto aumento en el ruido de la fase interferométrica estimada ([Rosen et al, 2000](#)). La correlación total está conformada de 3 componentes, la correlación termal, espacial y temporal. La termal relacionada a los cambios eléctricos del sistema radar, la correlación espacial vinculada a los cambios en la ubicación del satélite de una adquisición a otra y la correlación temporal referida a cambios en el suelo entre dos adquisiciones ([Rosen & Hensley, 2021](#)). Los niveles bajos de coherencia pueden deberse a decorrelación por pendientes escarpadas, líneas base muy grandes. También por de correlación temporal a causa de cambios en los dispersores de algún píxel entre diferentes adquisiciones SAR ([Biggs, et al., 2007](#)). La fase de un interferograma envuelto se encuentra dentro de un módulo de 2π que se desenvuelve para remover dicha ambigüedad 2π . De esta forma es posible producir mapas con valores de fase continuos ([Biggs, et al., 2007](#)). El problema acá se debe a la presencia de errores durante esta etapa de desenvolvimiento con la aparición de saltos de fase. Finalmente, se encuentra la componente de ruido aleatorio en la fase. Fuentes de error como el ruido atmosférico se pueden ser corregir por medio de modelos atmosféricos usando series temporales.

El programa ISCE fue realizado para el procesamiento InSAR, con un marco de trabajo basado en Python. Desde el principio el programa fue diseñado como una herramienta de la comunidad geofísica, que contribuyera a generar pilas de interferogramas usados

en diversas formas de análisis de series temporales con enfoque a la precisión, la extensibilidad y la modularidad (Rosen et al., 2012). Se desarrolló en el JPL de la NASA, en el Instituto Tecnológico de California, el paquete ISCE proporciona un software básico para procesar datos SAR de Nivel 0 o Nivel 1 en productos interferométricos con opciones de filtrado, desentvolutura y geocodificación de los interferogramas (Rosen et al., 2012). Con los operadores o rutinas de ISCE programados en Python, es posible procesar información de misiones SAR, como ALOS, ALOS2, COSMO-SkyMed, EnviSAT, ERS, KOMPSAT5, RadarSAT2, RISAT1 y Sentinel-1. El programa ISCE posee un flujo de trabajo específico para imágenes de Sentinel-1, que son adquiridas bajo el modo TOPS (Prats et al., 2012), donde las desviaciones de acimut finas o fine acimuts son más sensibles a la topografía.

El procesamiento de las series temporales puede hacerse utilizando como insumo el apilamiento de interferogramas. Una pila se basa en un principio donde la señal de los interferogramas sigue un patrón sistemático, pero el ruido atmosférico es aleatorio (Biggs, et al., 2007). La pila de fases interferométricas es posible representarla como un tensor de tres modos como se visualiza en la Figura 2.14. En este caso I_1 y I_2 hacen referencia a las dimensiones espaciales en rango y acimut, mientras que I_3 se refiere al número de imágenes SAR (Kang, Wang, Körner & Zhu, 2017). Softwares como ISCE poseen módulos de procesamiento como topsStack que permiten generar el apilamiento de interferogramas.

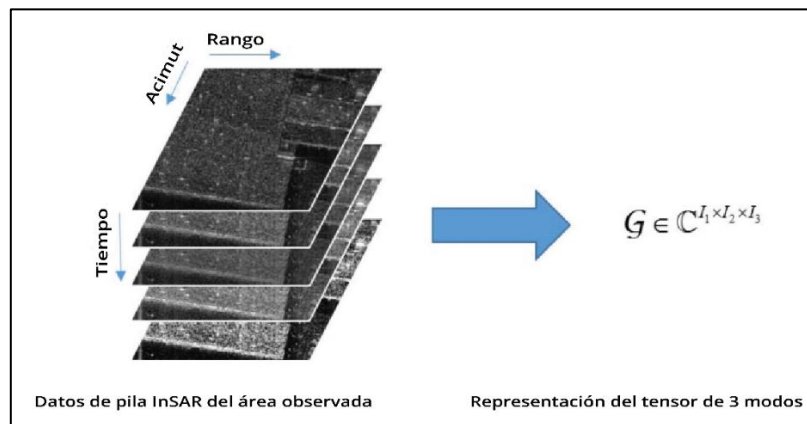


Figura 2.14. Apilamiento de interferogramas
Fuente: adaptado de (Kang, et. al, 2017)

2.5. Series temporales

En InSAR, las series temporales se tratan de algoritmos mejorados que depuran algunas limitaciones InSAR, y permiten el procesamiento de un conjunto de imágenes a través del tiempo. Como argumenta [Osmanoglu et al., \(2016\)](#), con el análisis de series temporales InSAR se puede observar los desplazamientos en una superficie de la Tierra dentro de un periodo de tiempo establecido, lo que es de ayuda crucial en diferentes campos en las ciencias de la tierra. Las series temporales usan como insumo productos de interferometría SAR, para realizar cálculos de desplazamiento en dirección de LOS. Los dos métodos más relevantes para realizar series temporales, es por medio de PSI ([Ferreti, Prati, & Rocca, 2001](#)) y SBAS ([Berardino et al., 2002](#)). Existen varios programas diseñados para el cálculo de este tipo de series como LiCSBAS, StaMPS, GIANT y MintPy entre otros.

2.5.1. SBAS

El método de series temporales SBAS tiene su aparición con [Bernardino et al., \(2002\)](#), como un nuevo algoritmo para el monitoreo en la evolución temporal de la deformación en la superficie terrestre. El algoritmo SBAS está basada en una combinación adecuada de un conjunto de interferogramas, los cuales se producen por pares de datos caracterizados por una pequeña separación orbital (B_{perp}). Esto a favor de reducir el fenómeno de la decorrelación espacial, como del error topográfico. Este método satisface dos requisitos muy importantes, como el aumento en la "tasa de muestreo temporal" usando todas las adquisiciones incluidas en los diferentes subconjuntos de la línea base. Las conexiones entre adquisiciones permiten formar un InSAR redundante, lo que es necesario para la red SBAS. Por ejemplo, se tiene un interferograma 1 para la conexión entre fecha 1-fecha 2, un interferograma 2 para la conexión fecha 1-fecha 3, un interferograma 3 para fecha 2- fecha 3 y así de manera sucesiva. El RMSE promedio disminuye con el aumento de las conexiones secuenciales, esto significa que una mayor redundancia en la red de interferogramas puede llevar a una óptima distinción de píxeles íntegros ([Yunjun et al., 2019](#)). El objetivo es preservar las capacidades del sistema y brindar mapas de deformación espacialmente densos, lo cual era un problema con InSAR convencional. Este último

requisito está relacionado con el uso de interferogramas de línea de base pequeña que limitan los fenómenos de decorrelación de la línea de base ([Bernardino et al., 2002](#)).

La técnica SBAS está basada en una red redundante de pares de imágenes, con una línea base espacial corta y temporalmente moderada (Figura 2.15). Este algoritmo detecta la evolución temporal de las deformaciones en la superficie, aumenta la coherencia y en consecuencia aumenta la cobertura espacial de los movimientos detectables, especialmente sobre zonas no urbanas o áridas. El método utiliza Dispersores Distribuidos (DS), que corresponden áreas de escombros, tierras sin cultivar con poca vegetación o áreas desérticas ([Ferretti et al., 2011](#)). Dependiendo de la red de interferogramas, existen dos métodos DS, el primero es el clásico SBAS ([Bernardino et al., 2002](#)), que busca las pequeñas líneas base espaciales y temporales, y se resuelven con ecuaciones de observación lineal. El segundo, por ejemplo ([Ferretti et al., 2011](#)), usa la red que cuenta con todos los interferogramas posibles con pleno aprovechamiento de la redundancia de la red, y la solución proporciona un estimador de máxima verosimilitud con rendimiento cercano a la mayor precisión alcanzable ([Yunjun et al., 2019](#)). El enfoque SBAS permite aumentar la precisión a partir de la redundancia en la red de interferogramas aportando una mayor fiabilidad a las mediciones de deformación obtenidas de la superficie.

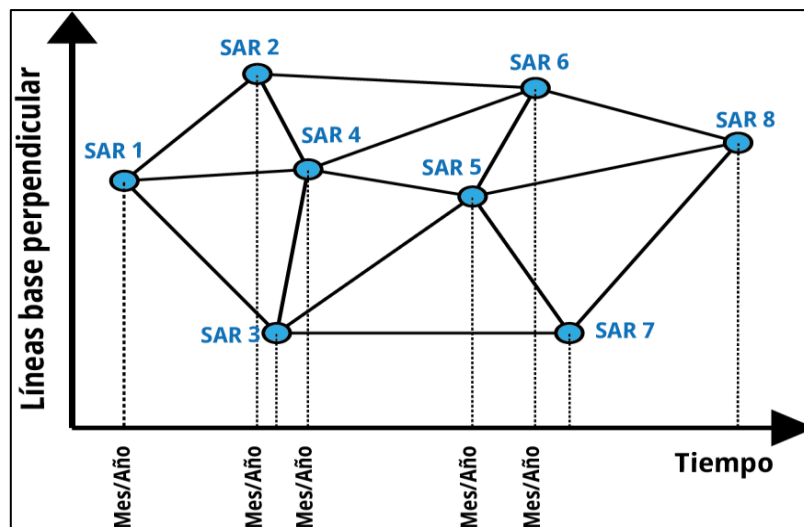


Figura 2.15. Series de tiempo enfoque SBAS
Fuente: elaboración propia

MintPy es un software que produce series temporales basadas en SBAS, al igual que ISCE no posee de un interfaz gráfico para su uso, se basa también en la ejecución de scripts de desarrollados en Python. El software parte de la lectura inicial de una pila de interferogramas corregistrados y desenvueltos (stack coregistered y unwrapped), provenientes de formatos como ISCE, ARIA, FRInGE, HyP3, GMTSAR, SNAP, GAMMA o ROI_PAC. Cuenta con mejoras en el algoritmo, utilizando Modelos Atmosféricos Globales (GAMs) que contribuyen a corregir el retraso troposférico. Mejorando la corrección troposférica de los métodos tradiciones PS y DS de series temporales, que usaban el filtrado espacio-temporal de la fase. MintPy hace una etapa de corrección atmosférica. Utiliza PyAPS para estimar mapas de retardo de fase diferencial debido a la atmósfera estratificada para corregir interferogramas de radar. Está reescrito en lenguaje Python 3 a partir del código fuente de PyAPS para las correcciones ERA-5 de ECMWF ([Jolivet, Grandin, Lasserre, Doin, & Peltzer, 2011](#)). La otra alternativa para la corrección atmosférica que permite MintPy es GACOS, un modelo genérico de corrección atmosférica para las observaciones InSAR. GACOS incorpora datos de alta resolución del ECMWF, junto con estimaciones continuas de retardo troposférico GPS. Esto aplicando un modelo iterativo de descomposición troposférica ([Yu, Li, Penna, & Crippa, 2018](#)). GACOS cuenta con su propio servicio en línea para la descarga gratuita de datos, sin embargo, a diferencia de PyAPS, la solicitud de datos se hace manualmente desde su web.

El software MintPy se encarga de la producción y análisis de series temporales de InSAR, basado en el enfoque de SBAS ([Berardino et al., 2002](#)). El programa invierte la pila de interferogramas para las series temporales de fase en bruto, y luego corrige los componentes deterministas de la fase (Figura 2.16): el retardo troposférico, el residuo topográfico y la rampa de fase. La Ecuación (2.10) representa como obtener el desplazamiento de las series temporales reducidas por el ruido ([Yunjun et al., 2019](#)). La rampa de fase es originada por retrasos atmosféricos por tropósfera, ionósfera, y en menor influencia los errores orbitales. Para deslizamientos de tierra se recomienda eliminar los movimientos lineales eliminando la rampa de fase. Por último, el residual de la fase topográfica hace referencia al error por DEM. MintPy corrige el retraso

troposférico con la ecuación (12), y realiza la corrección del residual topográfico con la ecuación (13) de [Yunjun et al., \(2019\)](#).

$$\hat{\phi}_{dis} = \hat{\phi} - \hat{\phi}_{tropo} - \hat{\phi}_{ramp} - \hat{\phi}^{\varepsilon}_{topo} \quad (2.10)$$

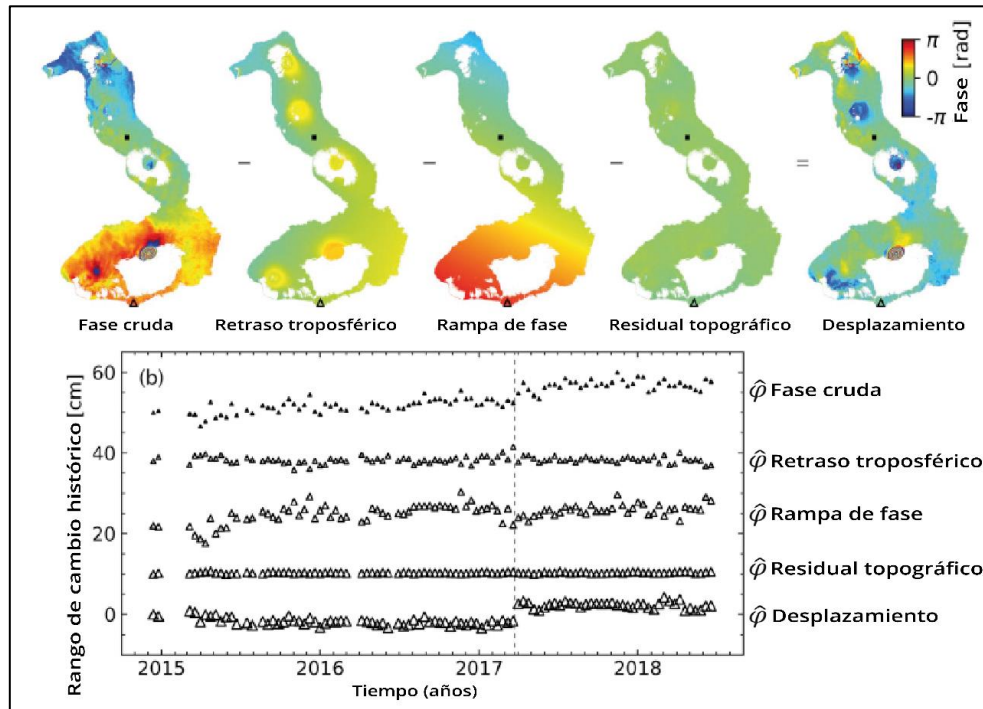


Figura 2.16. Correcciones en la fase con series de tiempo enfoque SBAS en MintPy
Fuente: adaptado de (Yujun et al, 2019)

Posteriormente MintPy estima la velocidad media excluyendo las adquisiciones SAR ruidosas. Las adquisiciones ruidosas se identifican usando el método de detección de valores atípicos basado en la raíz cuadrada de la fase residual como viene dado en la ecuación (14) de [Yunjun et al., \(2019\)](#). La velocidad del desplazamiento según [Yunjun, et al., \(2019\)](#), es estimada como la pendiente de mejor ajuste a la serie temporal de desplazamiento, y la representan con la Ecuación (2.11). La variable v de velocidad y la variable c de constante de compensación desconocida. La desviación estándar de la velocidad es calculada con la Ecuación (2.12) extraída del artículo de [Fattahi & Amelung \(2015\)](#). La variable σ_d es la incertidumbre del desplazamiento de la serie temporal InSAR, según [Fattahi & Amelung \(2015\)](#) específicamente σ_d es la

incertidumbre entre un píxel de estudio y un píxel de referencia, y σ_v la de los campos de velocidad. El software MintPy, además de obtener el desplazamiento 1D (Figura 2.17), posee un algoritmo capaz de obtener el desplazamiento en horizontal (este-oeste) y vertical, a partir de la combinación de órbitas (Fialko, Simons & Agnew., 2001; Wright, Parsons & Lu., 2004).

$$\frac{\phi^{dis\lambda}}{-4\pi} \Delta d = v * t_i + c; \quad i = 1, \dots, N \quad (2.11)$$

$$\sigma_v = \frac{\sigma_d}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - t)^2}} \quad (2.12)$$

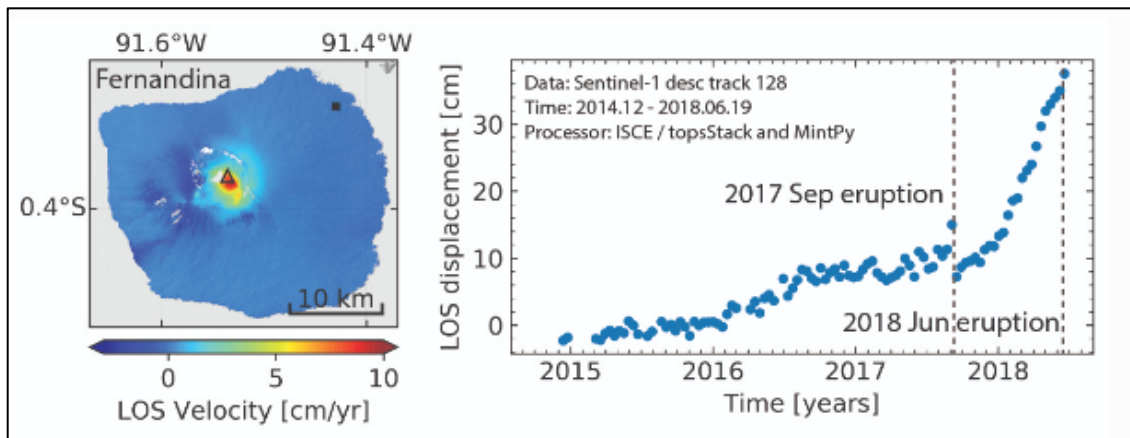


Figura 2.17. Velocidad en LOS a través de los años
Fuente: <https://github.com/insarlab/MintPy>

2.6. Distribuciones GNU/Linux

Una distribución es un conjunto específico de software de usuario con un núcleo del sistema operativo. Linux ofrece una gran variedad de distribuciones que se pueden agrupar en familias, totalizando alrededor de 600 distribuciones. Aquellas que aprovechan el núcleo o kernel de Linux junto con las herramientas de usuario proporcionadas por GNU se conocen como distribuciones GNU/Linux. El sistema operativo científico por excelencia se considera que es GNU/Linux. El núcleo o kernel del sistema operativo, es el programa esencial que se ejecuta en un modo privilegiado, el kernel, y se trata de un programa escrito generalmente en lenguaje C y en

ensamblador que tiene la capacidad de ejecutar todas las instrucciones de la CPU, implementar las políticas y mecanismos para repartir la CPU, memoria, disco y red. El resto de los programas son programas de usuario (Figura 2.18) que ejecutan en área de usuario (userland, userspace) (Soriano, & Guardiola, 2022). Esos programas sólo pueden ejecutar un subconjunto de las instrucciones de la CPU, y al requerir hacer algo que no pueden, tienen que pedirselo al núcleo del sistema. Algunas de las distribuciones de Linux más conocidas incluyen Debian, Ubuntu, Red Hat y SUSE. La distribución de Linux usada en este trabajo y muy usada por los científicos es Ubuntu.

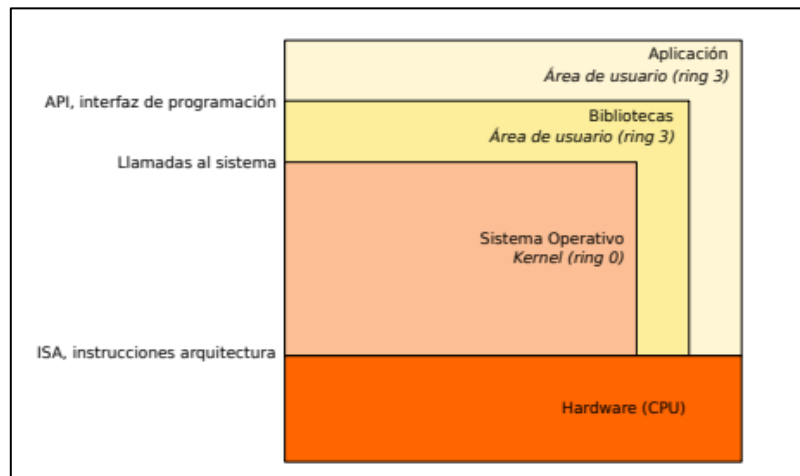


Figura 2.18. Estructura de sistema Linux
Fuente: adaptado (Soriano, & Guardiola, 2022)

Los programas en Linux dependen de bibliotecas de sistema, que proporcionan código de utilidad o de sistema utilizado por las aplicaciones. La ejecución de una aplicación puede depender de la existencia y la versión específica de estas bibliotecas. Un ejemplo común es la biblioteca GNU C (glibc). En los sistemas Linux es normal que se generen errores por el tema de las bibliotecas. Los errores surgen cuando se intenta ejecutar software antiguo en un sistema moderno o software nuevo, ya que pueden requerir versiones específicas de bibliotecas que ya no están disponibles en ese sistema. Por esta razón, se valora la compatibilidad de las bibliotecas al seleccionar una distribución de sistema operativo (Stallings, W., 2005). De igual manera, independiente a las distribuciones, es normal encontrarse errores durante la instalación de software en los sistemas Linux.

Capítulo 3: Objetivos

Objetivo General

Evaluar la técnica InSAR en Costa Rica con datos y herramientas científicas, usando el deslizamiento activo de Santiago de Puriscal como zona de prueba para la aplicación de una metodología en el estudio de deslizamientos que es económica, precisa y segura.

Objetivos específicos

1. Compilar conocimientos sobre los procesos de las herramientas científicas ISCE y MintPy, por medio de investigación de referencia bibliográfica y comunidades científicas, para su aplicación y la creación de una guía metodológica de procesamiento InSAR para Costa Rica.
2. Procesar los datos SAR del deslizamiento de Puriscal, usando las herramientas científicas ISCE y MintPy para la generación de interferogramas y series temporales de los desplazamientos del periodo 2020-2022.
3. Estimar el potencial de InSAR para deslizamientos en Costa Rica, usando los resultados InSAR-SBAS del deslizamiento de Santiago de Puriscal, para la extrapolación a todo el territorio nacional.

Capítulo 4: Metodología

En este capítulo se presentan los pasos para llevar a cabo un procesamiento InSAR en Costa Rica, usando los softwares ISCE y MintPy. En la metodología se presenta el sistema Linux como etapa inicial importante, ya que es el sistema requerido para instalar y usar ambos softwares. Se llevan a cabo las formas de instalación de cada programa, haciendo uso de un archivo ejecutable bash de extensión .sh. El archivo bash .sh permite escribir líneas de código que cumplan una función de interés, en este caso automatizar la instalación de cada programa. Posterior a la instalación se selecciona del área de estudio, generalmente una zona que cuenta con un evento geológico de interés. Tal es el caso de Santiago de Puriscal, con la presencia de su gran deslizamiento activo. Luego, se descargan los archivos de insumos para el procesamiento InSAR, como imágenes SAR que contienen la información de amplitud y fase. Fase que permite extraer la deformación al aplicar una comparación entre ellas. Las órbitas permiten introducir las correcciones a los errores de órbita en cada adquisición SAR, y la descarga del DEM para su uso en la etapa de remoción de la fase topográfica. Si ya se cuenta con un DEM solamente se hace la conversión entre formatos, acción que se hace en esta metodología.

La etapa del procesamiento InSAR inicia con el software ISCE que elige la imagen máster y secundarias, y realiza el procesamiento para la generación de los interferogramas. El módulo TopsApps de ISCE es el encargado de esta tarea, prepara y organiza un apilamiento de los interferogramas. La pila de interferogramas tiene su función posterior como insumo para la generación de series temporales. Después de esto, se usa MintPy para generar la pila de interferogramas, la red SBAS de interferogramas y las series temporales junto con el archivo de velocidades de desplazamiento. En la Figura 4.1 se muestra un diagrama de flujo general para hacer InSAR usando ISCE y el enfoque SBAS con MintPy. Con la elaboración de un manual, basado en dicho diagrama, detallará todo el proceso metodológico. La metodología a continuación resume dicho proceso.

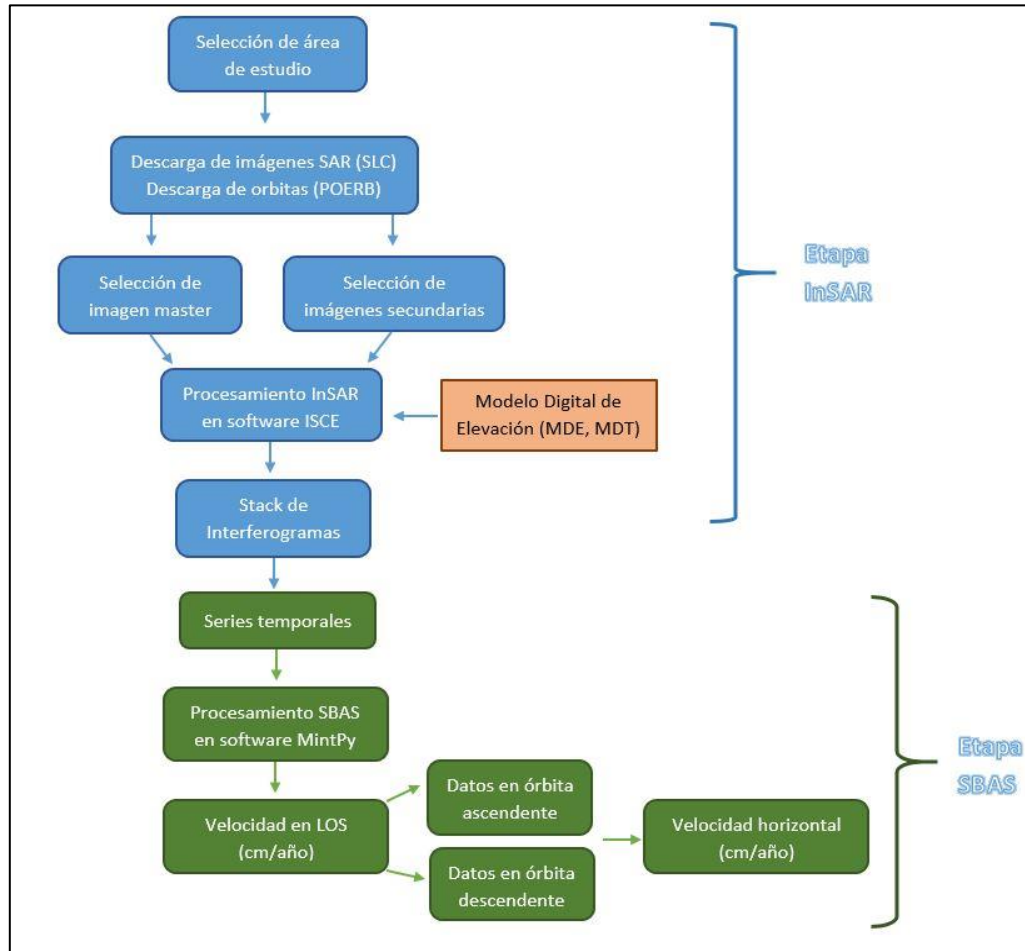


Figura 4.1. Diagrama del flujo de trabajo InSAR-SBAS
Fuente: elaboración propia

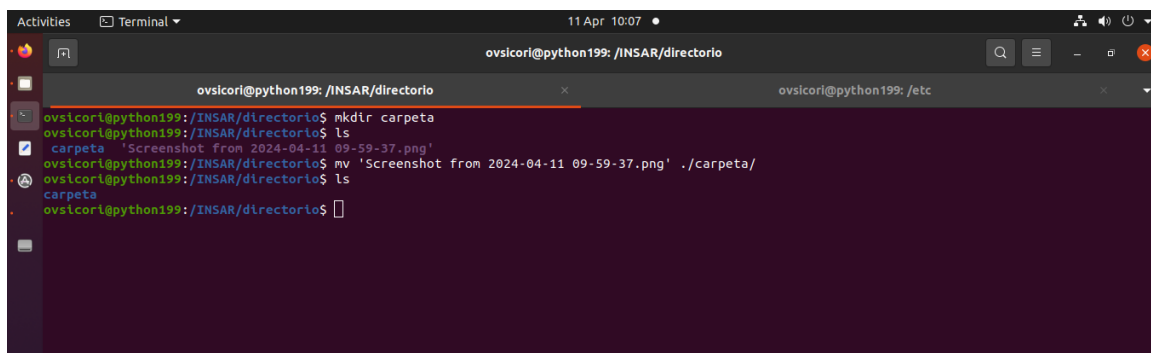
4.1. Linux, Ubuntu

Todo el procesamiento InSAR realizado con ISCE y MintPy se ejecutó directamente desde una terminal de comandos en una distribución Ubuntu 22.04 LTS. Esta metodología muestra el proceso, y como se debe escribir cada comando en la terminal. Para seguir esta metodología en cada paso, lo primordial es la instalación o tenencia de dicha distribución Ubuntu. La distribución Ubuntu puede instalarse en la Windows usando una máquina virtual, como por ejemplo Oracle. Se recomienda que la computadora tenga alta cantidad de memoria RAM, pues al instalarlo, la máquina requerirá cierto volumen de memoria RAM para el sistema Ubuntu. Si se tiene una computadora de 16 GB de RAM, se le puede ceder 8 GB a Ubuntu, de esta forma se podrán ejecutar más rápidos los procesos en el sistema. Esta opción ralentiza Windows

Trabajo Final de Graduación

mientras se tenga abierto la máquina virtual de Ubuntu. La otra opción es utilizando un WSL con Ubuntu en Windows. Esta modalidad descarga todas las características de dicha distribución en el subsistema de Windows y permite abrir una terminal de comandos de Ubuntu desde el CMD, y ejecutar desde ahí todos los comandos nativos de la distribución.

El entorno científico bajo el que se manejan o ejecutan los softwares de InSAR, obliga a que los usuarios cuenten con una noción básica de Linux. Con la distribución Ubuntu existe un gran dinamismo y facilidad de interactuar con el código de diferentes programas, así como la ejecución de procesamientos o cálculo de datos. Sin embargo, esto radica en que tan bien maneje el usuario la terminal de comandos. Por ejemplo, para crear o ver un directorio, mover o copiar un archivo, se deben utilizar ciertos comandos específicos. Para crear una carpeta se utiliza el comando “mkdir”, para visualizar el contenido de la carpeta “ls”, para mover un archivo de una carpeta a otra se usa “mv”, y a la par el nombre del archivo a mover. En la Figura 4.2 se da un ejemplo de estos comandos aplicados desde la terminal de comandos, donde se crea una carpeta, se visualiza su contenido y se mueve uno de los archivos contenidos a la carpeta creada. En el Anexo 11 se comparte el enlace a una guía que se ha realizado para ayudar a los principiantes a manejar Linux rápidamente.



```
ovsicori@python199: /INSAR/directorio
ovsicori@python199: /INSAR/directorio$ mkdir carpeta
ovsicori@python199: /INSAR/directorio$ ls
carpeta  'Screenshot from 2024-04-11 09-59-37.png'
ovsicori@python199: /INSAR/directorio$ mv 'Screenshot from 2024-04-11 09-59-37.png' ./carpeta/
ovsicori@python199: /INSAR/directorio$ ls
carpeta
ovsicori@python199: /INSAR/directorio$
```

Figura 4.2. Captura de pantalla de visualización de Ubuntu
Fuente: elaboración propia

4.2. Instalación de software ISCE y MintPy

La etapa de instalación de ISCE y MintPy es importante, debido a que no son programas sencillos de instalar. Generalmente se presentan dificultades por ser una instalación desde una terminal de comandos de Linux. Estos programas exigen por parte del usuario, un manejo básico del sistema operativo Linux y de su terminal de comandos. La instalación requiere de unos comandos y líneas de código que se deben ir corriendo paso a paso, secuencialmente desde la terminal, para evitar errores. En el sistema Windows solo se debe dar clic derecho y ejecutar, para instalar prácticamente cualquier programa, en Linux se sigue una receta específica de código que de no respetarse resulta una falla de la instalación.

En la instalación de ambos programas ISCE y MintPy normalmente se puede encontrar con problemas, mayormente con ISCE. Al inicio de este proyecto, algunas de las recetas de instalación encontradas en la web, no consideraban la instalación directa del módulo de apilamiento topsStack, que contiene el procesador interferométrico stackSentine.py que se usa en este proyecto. Por lo que se investigó para encontrar la exacta formulación de las líneas de comando. Sin embargo, actualmente hay más metodologías de uso e instalación a disposición, lo que facilita esta etapa. Pero es casi inevitable lidiar con errores que aparecen durante la instalación, causados por falta de algún paquete de alguna librería. Los errores por ser en la terminal suelen aparecer con algún número o descripción pequeña del error, similar a cuando se ejecuta mal una línea en un archivo de código (Figura 4.3). Pero de igual manera, muchas veces estos errores no dan una clara visión del fallo, significa todo un trabajo de investigación para solucionar dicho fallo y continuar.

```
Checking for C header file X11/Xlib.h... yes
Checking for C header file Xm/Xm.h... yes
Checking for C header file omp.h... yes
Checking for C library hdf5... yes
Checking for C library fftw3f... yes
Checking for C library Xm... yes
Checking for C library Xt... yes
Checking for F include fftw3 ... yes
GDAL version: 3.4.1

Checking for C++ header file gdal_priv.h... yes
Checking for C library gdal... yes
Scons appears to find everything needed for installation
Checking whether cython3 program exists.../usr/bin/cython3
User did not request CUDA support. Add ENABLE_CUDA = True to SConfigISCE to enable CUDA support
PermissionError: [Errno 13] Permission denied: '/usr/local/isce':
  File "/home/andrey/isce_temp/isce2/SConstruct", line 223:
    os.makedirs(inst)
  File "/usr/lib/python3.10/os.py", line 225:
    mkdir(name, mode)
andrey@Ubuntu:~/isce_temp/isce2$ sudo su
root@Ubuntu:/home/andrey/isce_temp/isce2# scons
scons: Reading SConscript files ...
```

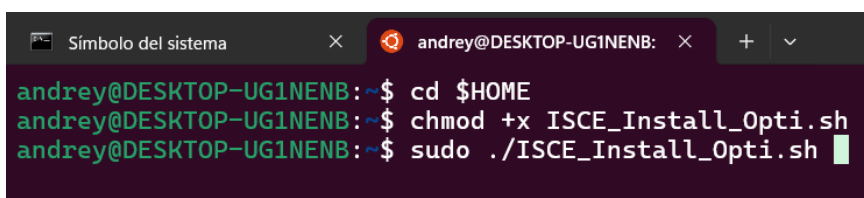
Figura 4.3. Captura de pantalla de error surgido durante la instalación de ISCE en Ubuntu
Fuente: elaboración propia

4.2.1. Instalación ISCE

En esta tesis, la instalación y ejecución de ISCE se realizó desde la terminal de Ubuntu 22.04 LTS. Para la descarga e instalación de ISCE se puede ir a la página de su repositorio en GitHub, en ella se encuentran las instrucciones de su implementación. GitHub es una plataforma digital que facilita el alojamiento de archivos en repositorios, favoreciendo la colaboración en proyectos y el seguimiento de las modificaciones en los archivos a lo largo del tiempo (GitHub, 2024). La implementación manual que sigue las instrucciones de GitHub, es un proceso que se torna difícil por la cantidad de errores que suelen aparecer. A raíz de esto, he creado un archivo ejecutable de extensión .sh que se encarga de implementar todo el proceso de construcción, configuración y compilación del software. El archivo .sh simplemente se ejecuta en la terminal y la instalación inicia automáticamente, tal y como se observa en la Figura 4.4.

Para la instalación se ubica el archivo ejecutable en el directorio \$HOME, se debe asegurar de ir a esta carpeta con “cd \$HOME”, luego se habilita los permisos de ejecución al archivo con “chmod +x”, y finalmente se ejecuta con “sudo ./”. El sudo quiere decir que la instalación se ejecutara como superusuario para evitar errores por

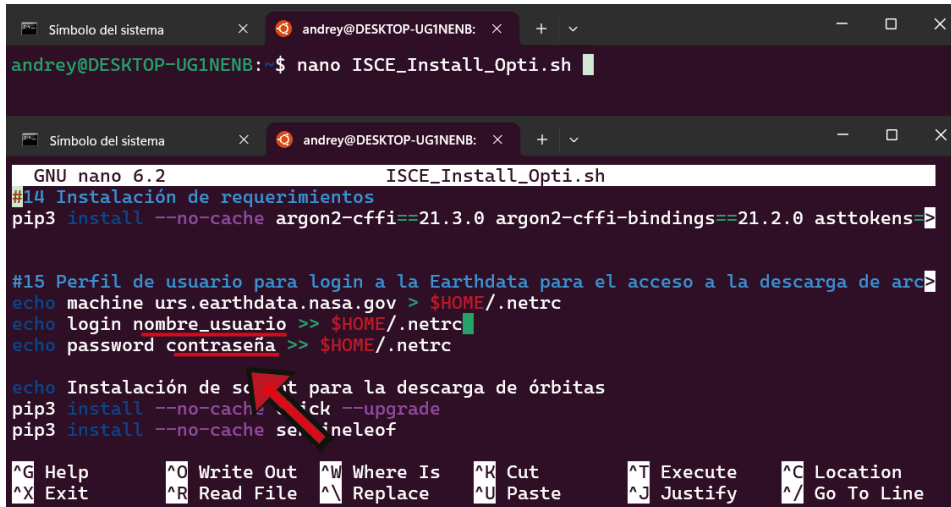
permisos de usuario en Ubuntu. El script del archivo ejecutable .sh llamado ISCE_Install_Opti.sh se comparte en mi página personal de GitHub, accediendo desde el enlace del Anexo 11. Dicho archivo se creó a partir de los manuales y archivos de instalación del curso de Interferometría SAR, compartidos al OVSICORI por parte de la Universidad de Ingeniería Uncuycu en Argentina. El archivo ejecutable .sh se terminó de complementar con la ayuda de IA para la redacción de su código de instalación. Este archivo se probó y ejecutó con resultados satisfactorios desde el subsistema Linux de Ubuntu 22.04 LTS en Windows.



```
Símbolo del sistema × andrey@DESKTOP-UG1NENB: × + v
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$ cd $HOME
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$ chmod +x ISCE_Install_Opti.sh
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$ sudo ./ISCE_Install_Opti.sh
```

Figura 4.4. Captura de pantalla de instalación de ISCE
Fuente: elaboración propia

Para que funcione correctamente, se deben hacer unos cambios a una pequeña parte del código dentro de los archivos ejecutables de instalación, antes de ejecutarlos. Esto porque durante la instalación, el código del archivo ejecutable automáticamente introduce los datos que permitirán en el caso de ISCE, descargar el DEM desde el servidor de la EarthData. Función conveniente si no cuenta con un DEM propio. Se requiere un registro previo en el servicio de la EarthData, para contar con una cuenta. De la cuenta, se extrae el nombre de usuario y contraseña, y se introducen en el ISCE_Install_bash.sh (Figura 4.5), usando el comando “nano”, las líneas a modificar corresponden exactamente a las del comentario #15.



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$ nano ISCE_Install_Opti.sh
GNU nano 6.2 ISCE_Install_Opti.sh
#14 Instalación de requerimientos
pip3 install --no-cache argon2-cffi==21.3.0 argon2-cffi-bindings==21.2.0 asttokens=>

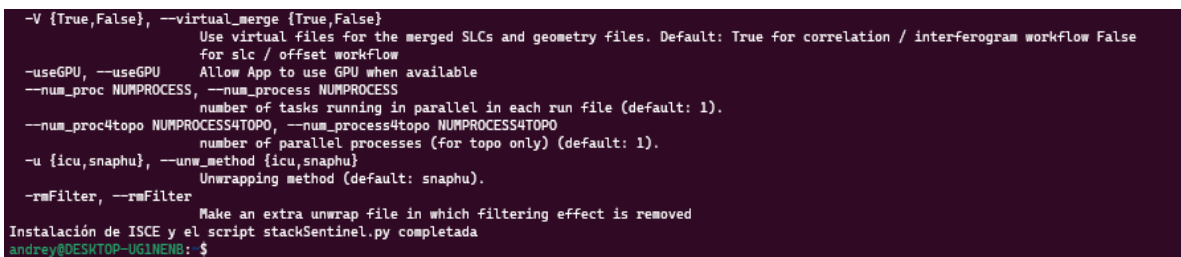
#15 Perfil de usuario para login a la Earthdata para el acceso a la descarga de arc
echo machine urs.earthdata.nasa.gov > $HOME/.netrc
echo login nombre_usuario >> $HOME/.netrc
echo password contraseña >> $HOME/.netrc

echo Instalación de script para la descarga de órbitas
pip3 install --no-cache stack --upgrade
pip3 install --no-cache selemioleof

^G Help      ^O Write Out ^W Where Is  ^K Cut       ^T Execute  ^C Location
^X Exit      ^R Read File ^N Replace   ^U Paste     ^J Justify  ^_/ Go To Line
```

Figura 4.5. Captura de pantalla de edición del bash de instalación de ISCE
Fuente: elaboración propia

Si el software se instaló correctamente, en la pantalla al final de la instalación aparecen una serie de opciones y parámetros del script stackSentinel.py. De último y posterior a estos parámetros saldrá un mensaje que indicará que la instalación de ISCE fue correcta (Figura 4.6). Para ver los parámetros de este script, simplemente se escribe en la terminal el nombre del script, y a la par de este dejando un espacio, se escribe la palabra “help” añadiendo un par de guiones por delante (stackSentinel.py --help). Este comando “--help sirve para” visualizar los parámetros de diferentes scripts tanto de ISCE como de MintPy.



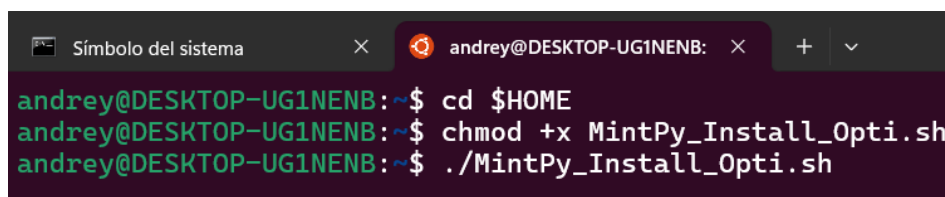
```
-V {True,False}, --virtual_merge {True,False}
    Use virtual files for the merged SLCs and geometry files. Default: True for correlation / interferogram workflow False
    for slc / offset workflow
--useGPU, --noGPU Allow App to use GPU when available
--num_proc NUMPROCESS, --num_process NUMPROCESS
    number of tasks running in parallel in each run file (default: 1).
--num_proc4topo NUMPROCESS4TOPO, --num_process4topo NUMPROCESS4TOPO
    number of parallel processes (for topo only) (default: 1).
-u {icu,snaphu}, --unw_method {icu,snaphu}
    Unwrapping method (default: snaphu).
--rmFilter, --noFilter
    Make an extra unwrap file in which filtering effect is removed
Instalación de ISCE y el script stackSentinel.py completada
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$
```

Figura 4.6. Captura de pantalla de visualización de la instalación de ISCE completada
Fuente: elaboración propia

4.2.2. Instalación MintPy

Después de instalado el programa ISCE, se procede con la instalación de MintPy para la etapa de generación de series temporales. El repositorio de MintPy igualmente se encuentra en su página de github. La instalación de MintPy requiere una instalación

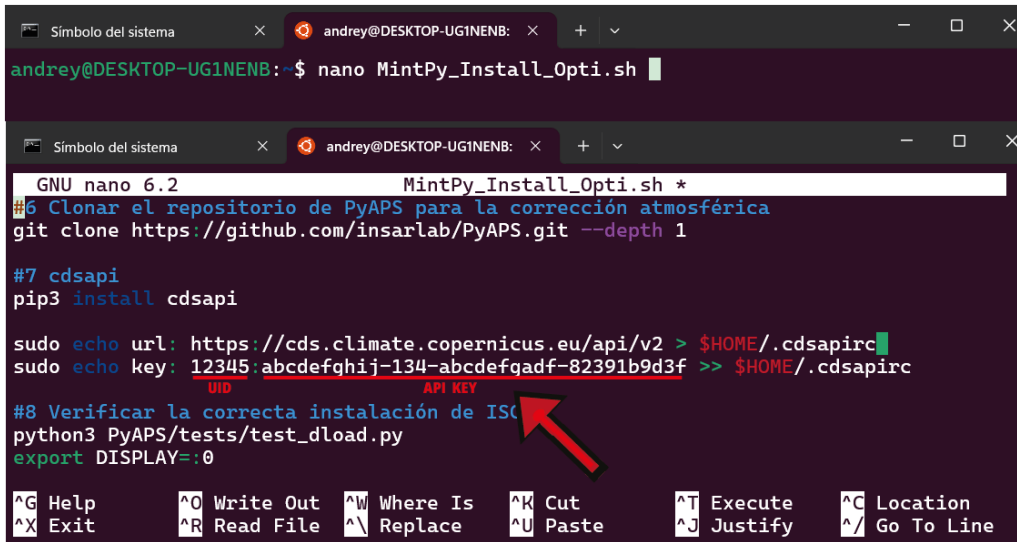
extra de un módulo de python3 llamado PyAPS. MintPy puede realizar el procesamiento de series temporales sin necesidad de instalar PyPAS, usando otra fuente de datos atmosféricos llamado GACOS. La diferencia del algoritmo de PyAPS es la descarga automática de los archivos atmosféricos. Con GACOS se debe hacer una descarga manual desde su servidor web, y esperar a que envíen los datos a nuestro respectivo correo electrónico. Se resumió todo el proceso de instalación en un script llamado MintPy_Install_bash.sh, este script fue realizado por el autor de esta tesis. Además, es novedoso porque resume todo el proceso de instalación en un archivo de instalación ejecutable, que ya deja instalado el script PyAPS para el uso inmediato con MintPy. Se instala siguiendo los mismos pasos que con el instalador de ISCE (Figura 4.7). La única diferencia es que, para el instalador de MintPy se omite el “sudo” delante del “./”, es decir que la instalación se hará como usuario normal, ya que el ejecutarlo como superusuario introduce errores en el proceso de instalación.



```
Símbolo del sistema x andrey@DESKTOP-UG1NENB: x + v
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~$ cd $HOME
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~$ chmod +x MintPy_Install_Opti.sh
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~$ ./MintPy_Install_Opti.sh
```

Figura 4.7. Captura de pantalla de instalación de MintPy
Fuente: elaboración propia

En MintPy también se debe modificar el archivo ejecutable de instalación (Figura 4.8). El algoritmo de PyAPS hace descarga automática de los archivos de corrección atmosférica, pero requiere también de un registro previo. Para usar datos de atmosféricos de ERA5 se debe registrar en la CDS de Copernicus y aceptar los términos, este servidor otorga a los usuarios una clave API y un UID. Ambos datos son los que se deben introducir en el archivo ejecutable de instalación para en las líneas del comentario # 7.



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB: $ nano MintPy_Install_Opti.sh

GNU nano 6.2 MintPy_Install_Opti.sh *
#6 Clonar el repositorio de PyAPS para la corrección atmosférica
git clone https://github.com/insarlab/PyAPS.git --depth 1

#7 cdsapi
pip3 install cdsapi

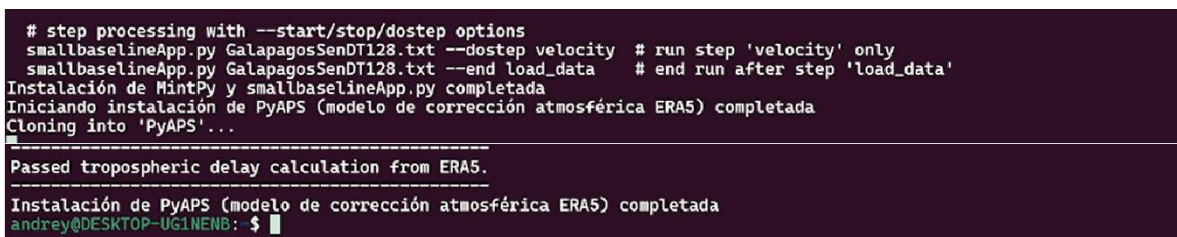
sudo echo url: https://cds.climate.copernicus.eu/api/v2 > $HOME/.cdsapirc
sudo echo key: 12345:abcdefghij-134-abcdefghijkl-82391b9d3f >> $HOME/.cdsapirc

#8 Verificar la correcta instalación de ISC
python3 PyAPS/tests/test_dload.py
export DISPLAY=:0

^G Help      ^O Write Out ^W Where Is  ^K Cut       ^T Execute  ^C Location
^X Exit      ^R Read File ^\ Replace   ^U Paste     ^J Justify  ^_ Go To Line
```

Figura 4.8. Captura de pantalla de edición del bash de instalación de MintPy
Fuente: elaboración propia

Si el software se instaló correctamente, en la pantalla al final de la instalación aparecen una serie de opciones y parámetros del script smallbaselineApp.py. De último y posterior a estos parámetros saldrá un mensaje que indicará que la instalación de MintPy fue completada. Luego, el bash prosigue con la instalación del algoritmo de corrección atmosférica PyAPS, una vez instalado aquí finaliza la función del bash (Figura 4.9). Para ver los parámetros de este script simplemente se escribe en la terminal “smallbaselineApp.py --help”.



```
# step processing with --start/stop/dostep options
smallbaselineApp.py GalapagosSendT128.txt --dostep velocity # run step 'velocity' only
smallbaselineApp.py GalapagosSendT128.txt --end load_data # end run after step 'load_data'
Instalación de MintPy y smallbaselineApp.py completada
Iniciando instalación de PyAPS (modelo de corrección atmosférica ERA5) completada
Cloning into 'PyAPS'...

-----
Passed tropospheric delay calculation from ERA5.
-----
Instalación de PyAPS (modelo de corrección atmosférica ERA5) completada
andrey@DESKTOP-UG1NENB: $
```

Figura 4.9. Captura de pantalla de visualización de la instalación de MintPy y ERA5 completada
Fuente: elaboración propia

4.3. Área de estudio

En el caso de Costa Rica, sensores como el Sentinel-1, hace un recorrido sobre la superficie del país tanto en órbita ascendente como descendente, permitiendo generar insumos SAR de todo el territorio nacional. El inconveniente se debe a las condiciones atmosféricas del país y a la extensa cobertura vegetal que posee. Por lo tanto, solo parte

del territorio nacional exhibe valores de coherencia suficiente para ser útiles para detectar movimiento. Se delimita una zona de estudio más específica para el análisis de los InSAR, dado que una imagen SAR abarca aproximadamente un 75% de Costa Rica. La delimitación se hace para el área de Santiago de Puriscal debido a que existen antecedentes de deslizamiento en esta región, con estudios cuantitativos como el de [Agnarsson & Dubois, \(1993\)](#) del desplazamiento. En Santiago de Puriscal, se encuentra uno de los deslizamientos de mayor magnitud en el país (Figura 4.10), incluso parte de la infraestructura de la ciudad se ha visto gravemente afectada. Estas características presentan un escenario adecuado para la aplicación de InSAR.

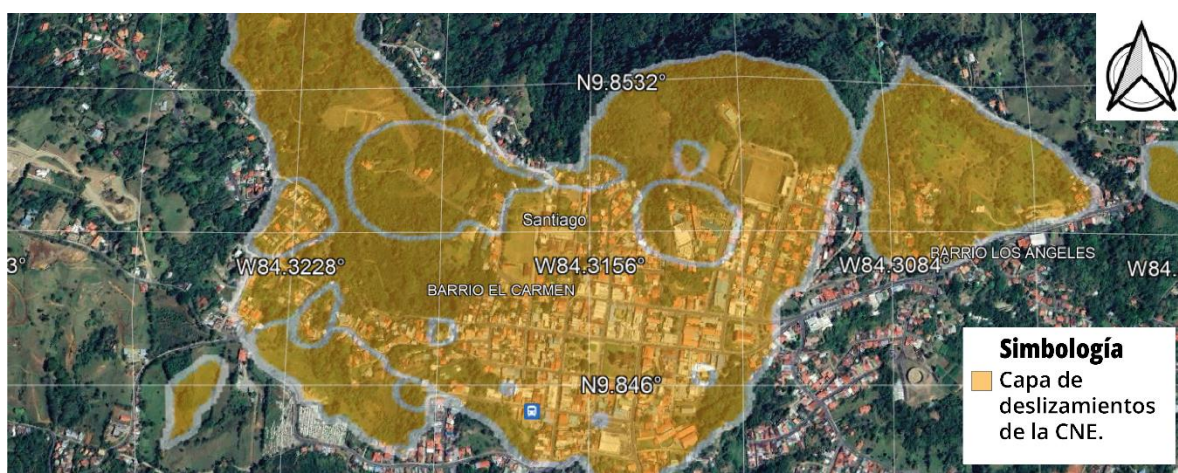


Figura 4.10. Captura de pantalla de Santiago de Puriscal con capa de deslizamientos de la CNE
Fuente: elaboración propia por medio del programa Google Earth Pro

El movimiento existente en la superficie de Santiago tiene siglos de conocerse, y se manejan tasas superiores a los 5 cm/año ([Agnarsson & Dubois, 1993](#)). Estas velocidades tienen altas probabilidades de ser detectadas con InSAR, permitiendo así observar la evolución del desplazamiento a largo plazo. Además, Puriscal no cuenta con estudios InSAR que facilitan una medición superficial de gran cobertura, a diferencia de las mediciones GNSS que solo ofrecen una medición puntual del movimiento. Para poder definir esta zona como área de estudio en la imagen SAR, se debe especificar la subfaja de la imagen SAR que componen la zona donde se localiza Puriscal. Estas son la subfaja número 3 de la imagen SAR en ruta descendente y subfaja número 1 para la ruta ascendente (ver Figura 4.14).

4.4. Descarga de imágenes SAR

Las imágenes SAR son el insumo principal del procesamiento InSAR, a partir de la resta de fase entre ellas es posible obtener valores de deformación de la superficie. Para la descarga de las imágenes SAR en formato complejo (SLC), se debe elegir un portal web con la disponibilidad de estos productos. La ASF es una página que permite la descarga de datos de las misiones Sentinel-1, además de varios otros satélites. Pertenece al Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska que, adquiere, procesa, archiva y distribuye datos de radar de apertura sintética de satélites y sensores aerotransportados. Los datos son de libre acceso para los usuarios (EARTHDATA, NASA). Es importante dirigirse a la opción de iniciar sesión para poder crear una cuenta, así se podrá continuar con la descarga de datos. ASF Data Search: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

Lo primero es señalar el área a trabajar, esto por medio de un rectángulo o cuadrado color amarillo que se dibuje sobre el área deseada. Posterior a esto se presiona en “buscar” e inmediatamente aparecerán las imágenes disponibles para ese sitio. Estas imágenes tanto ascendentes como descendentes estarán representadas como rectángulos de color celeste, y tomarán el tono rojo al seleccionarlas (Figura 4.11). Luego se elige la imagen a descargar, y se añade en la opción del icono de carrito para posteriormente descargar una carpeta comprimida de las imágenes, se señala en un círculo rojo la opción para añadir.

Trabajo Final de Graduación

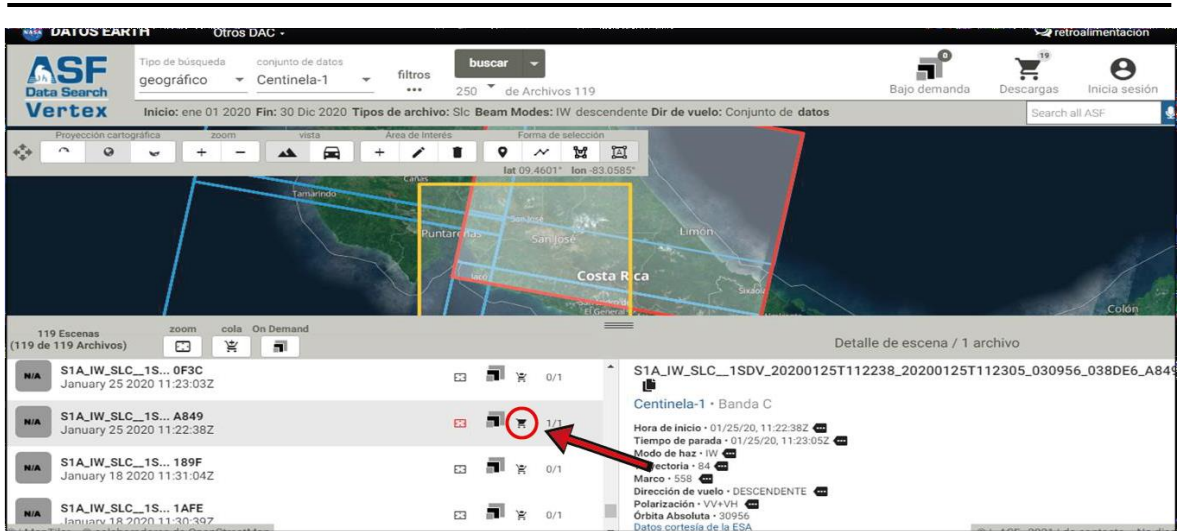


Figura 4.11. Selección de imágenes desde página de Alaska Satellite Facility
Fuente: elaboración propia

Para poder tener una búsqueda más específica de las imágenes SAR, se debe dirigir a filtros que se ubica en la parte superior, se desplegará el cuadro que se ve en la Figura 4.12. Aquí se podrán indicar los parámetros que se desean de la imagen. En “tipo de archivo” por lo general y en este caso se elige la opción de Single Look Complex L1 (SLC). Para modo de haz o escaneo se elige la opción de Interferometric Wide (IW). En polarización se escoge el tipo de polarizado en la onda, en este caso se deja en blanco. La dirección hace referencia a la toma de la imagen si es ascendente o descendente con respecto a la órbita del satélite. En subtipo se escoge el satélite Sentinel-1, del que desea obtener sus datos SA o SB. En ruta y marco se colocan los valores numéricos de las imágenes SAR, la ruta corresponde a la dirección de la trayectoria del satélite al capturar la imagen, y el marco se refiere a la imagen seleccionada en esa ruta. En la parte superior de la Figura 4.12, se comparte los parámetros usados para la descarga de imágenes. En el lado izquierdo se ven los datos para la órbita ascendente y en el lado derecho para descendente. Debajo se observa la imagen SAR que corresponde a estos parámetros.

Trabajo Final de Graduación

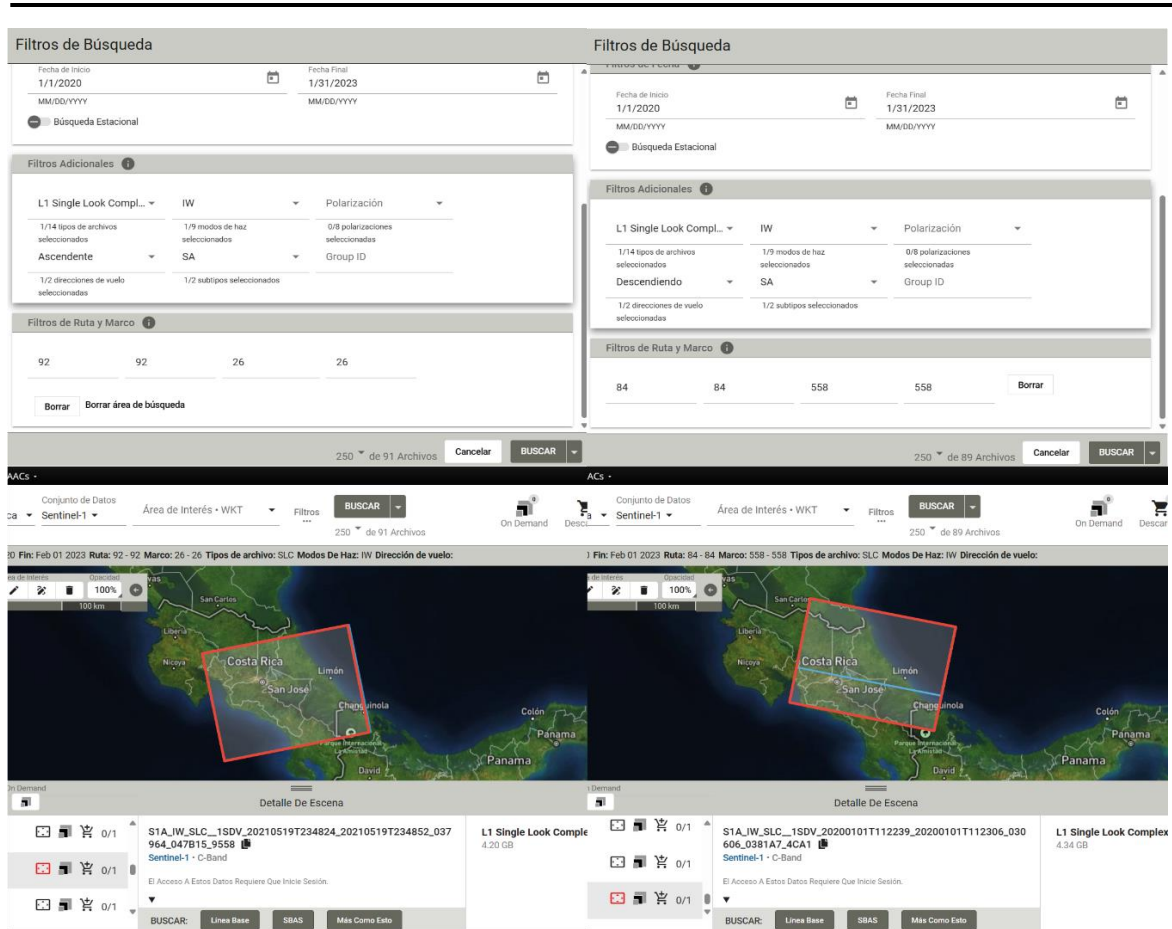


Figura 4.12. Selección de parámetros desde página de Alaska Satellite Facility
Fuente: elaboración propia

Cuando se escojan las imágenes de interés se dirige al icono del carrito de compras en la parte superior derecha de la pantalla, para acceder a la descarga. Se desplegará un menú con todo el historial de descargas. Para descargar la imagen deseada se presionará sobre la nube que contiene la flecha blanca en la parte derecha de la Figura 4.13, es importante remarcar que estos archivos tienen un peso de 4.25GB promedio. Sin embargo, para 2024 las imágenes poseen un peso de 7 GB aproximadamente. Una red consistente SBAS requiere de decenas de fechas SAR. En esta tesis se descargaron total de 172 imágenes SAR, contemplando ambas órbitas, con fechas entre 2020 y 2023.

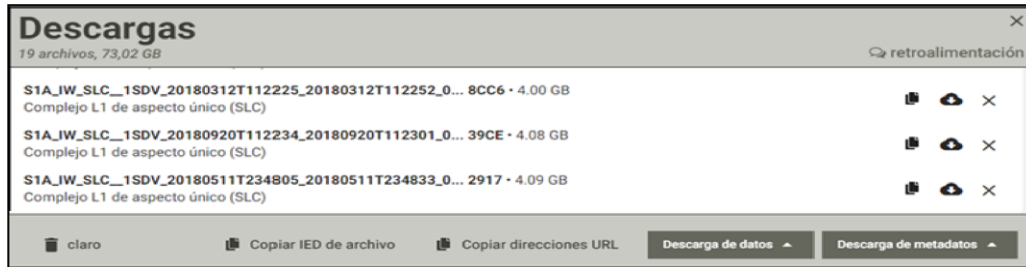


Figura 4.13. Panel de descarga de imágenes en página de Alaska Satellite Facility
Fuente: elaboración propia

La imagen SAR en formato Single Look Complex (SLC), se conoce también como faja en español. La misma se divide en tres subfajas, de las que es necesario conocer la numeración para indicar en el parámetro -n según la zona de interés. La numeración de las subfajas cambia según se la órbita de la imagen. A continuación, se muestra la Figura 4.14 donde se señalan los números de las subfaja para las imágenes SAR usadas en este proyecto. La imagen SAR que se descarga no se procesa en su totalidad. El procesar sus tres subfajas y todas las ráfagas que las componen requieren de mayor tiempo y exige mayores capacidades de memoria para procesamiento y almacenamiento. Por esta razón se escoge una única subfaja que abarque la zona de interés, además con la delimitación del área a partir de las coordenadas de latitud y longitud, ISCE se encarga de delimitar o escoger solo las ráfagas necesarias para cubrir la zona. Esto permite que el procesamiento requiera de menos tiempo y menos capacidades de memoria para procesamiento y almacenamiento. En el lado izquierdo se observa la imagen SAR ascendente y sus números de subfajas, y en el lado derecho la imagen descendente y su numeración respectiva.

Trabajo Final de Graduación

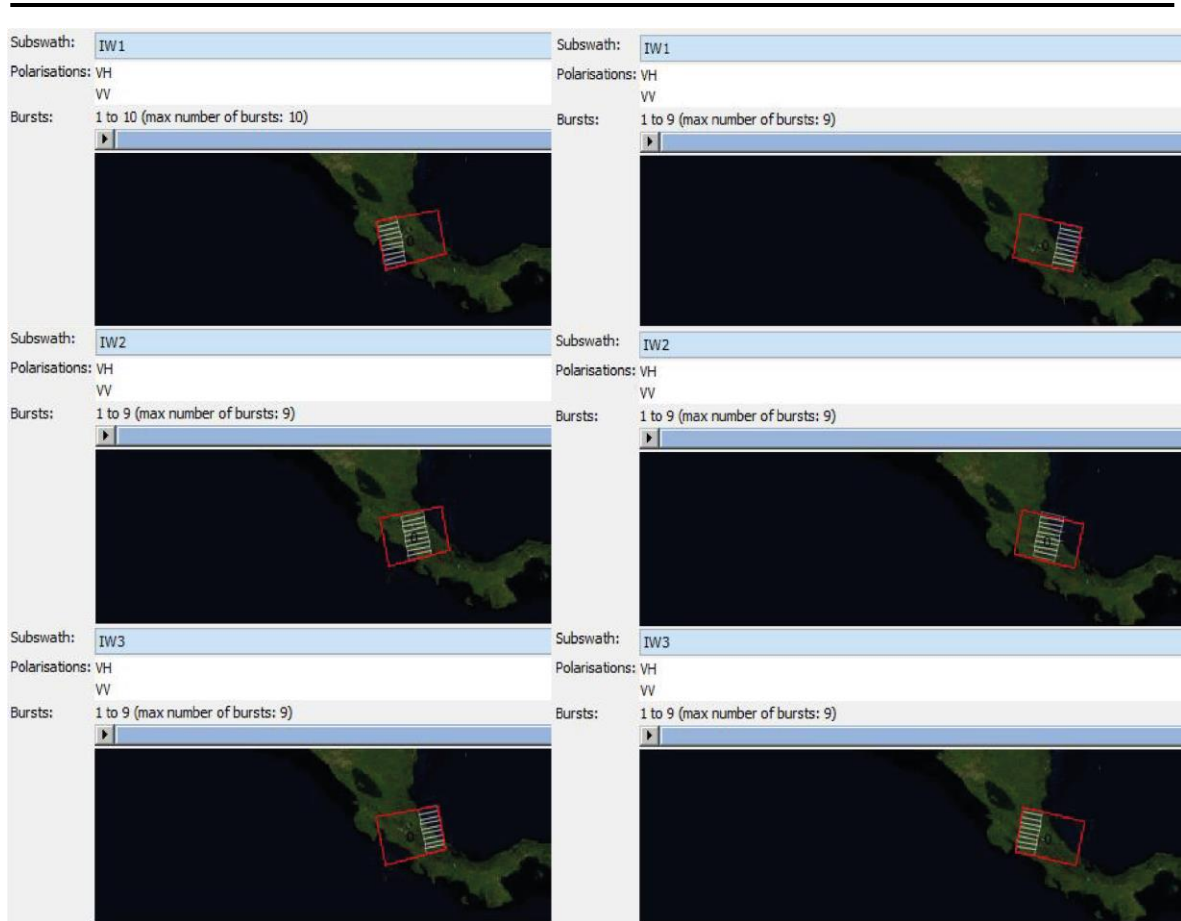


Figura 4.14. Números de subfajas en imágenes ascendente y descendente sobre Costa Rica
Fuente: elaboración propia por medio de programa SNAP

Las imágenes SAR de Sentinel-1 se nombran de la siguiente manera (Figura 4.15):

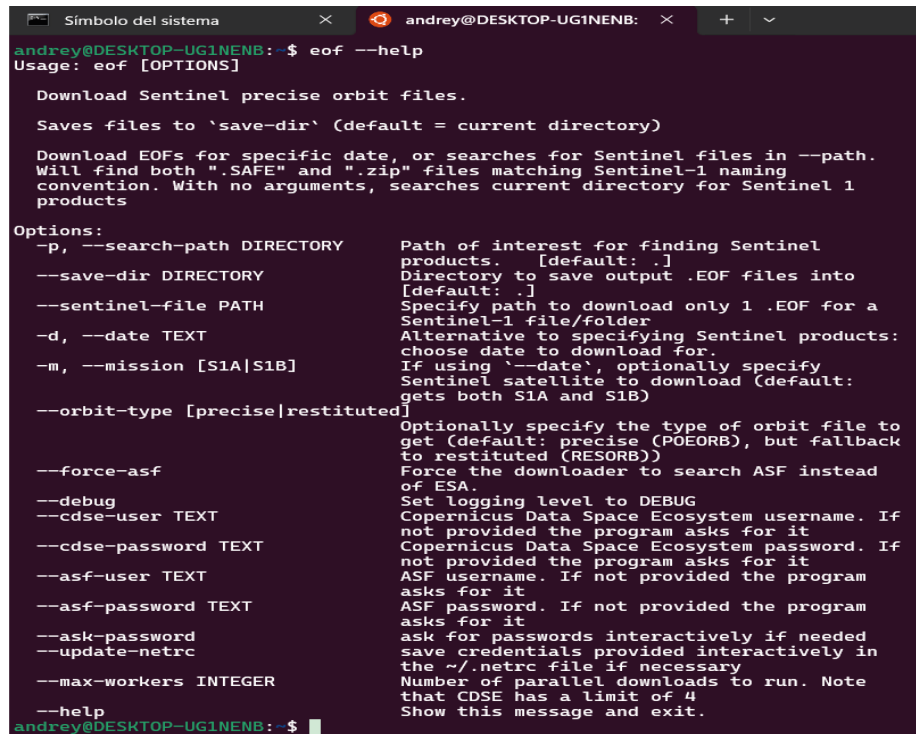
```
sensor      Formato
           imagen      año mes día hora min
S1A_IW_SLC__1SDV_20200605T234819_20200605T234847_032889_03CF3F_FB4E.zip
           modo de
           escaneo
```

Figura 4.15. Nombre de los archivos de imagen SAR SLC de Sentinel-1
Fuente: elaboración propia

4.5. Descarga de archivos de corrección: orbitas, DEM, datos atmosféricos

Los archivos de órbitas son archivos independientes a las imágenes SAR SLC, se pueden descargar de un servidor web usando un navegador, o desde la terminal con algún script adecuado para esto. Los archivos de órbita permiten introducir correcciones a las imágenes SAR, a causa de las perturbaciones en el satélite durante

su trayecto. Estas perturbaciones afectan negativamente las líneas base entre adquisiciones. La descarga de órbitas se realiza de manera manual desde la página de Copernicus Open Acces Hub. En este trabajo se utilizó el script llamado “eof” que hace todo este proceso de descarga de forma automática. Esta rutina se descarga e implementa durante la instalación de ISCE con el archivo ISCE_Install_bash.sh. En la Figura 4.16 se muestra las opciones y parámetros para utilizar eof, consultando con el comando --help.



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~$ eof --help
Usage: eof [OPTIONS]

Download Sentinel precise orbit files.

Saves files to 'save-dir' (default = current directory)

Download EOFs for specific date, or searches for Sentinel files in --path.
Will find both ".SAFE" and ".zip" files matching Sentinel-1 naming
convention. With no arguments, searches current directory for Sentinel 1
products

Options:
  -p, --search-path DIRECTORY  Path of interest for finding Sentinel
                               products. [default: .]
  --save-dir DIRECTORY        Directory to save output .EOF files into
                               [default: .]
  --sentinel-file PATH        Specify path to download only 1 .EOF for a
                               Sentinel-1 file/folder
  -d, --date TEXT             Alternative to specifying Sentinel products:
                               choose date to download for.
  -m, --mission [S1A|S1B]    If using '--date', optionally specify
                               Sentinel satellite to download (default:
                               gets both S1A and S1B)
  --orbit-type [precise|restituted]
                               Optionally specify the type of orbit file to
                               get (default: precise (POEORB), but fallback
                               to restituted (RESORB))
  --force-asf                 Force the downloader to search ASF instead
                               of ESA.
  --debug                     Set logging level to DEBUG
  --cdse-user TEXT            Copernicus Data Space Ecosystem username. If
                               not provided the program asks for it
  --cdse-password TEXT       Copernicus Data Space Ecosystem password. If
                               not provided the program asks for it
  --asf-user TEXT            ASF username. If not provided the program
                               asks for it
  --asf-password TEXT       ASF password. If not provided the program
                               asks for it
  --ask-password             ask for passwords interactively if needed
  --update-netrc             save credentials provided interactively in
                               the ~/.netrc file if necessary
  --max-workers INTEGER      Number of parallel downloads to run. Note
                               that CDSE has a limit of 4
  --help                     Show this message and exit.
```

Figura 4.16. Captura de pantalla de parámetros de script eof para la descarga de órbitas automática
Fuente: elaboración propia

Para usar esta rutina, solo se debe ir al directorio en donde están ubicadas las imágenes SAR, y ejecutar la descarga desde ese directorio. Solamente se debe indicar la ruta en donde se quiere que se descarguen las órbitas (Figura 4.17).

```
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~$ cd SLC_2020_2023/
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/SLC_2020_2023$ ls
S1A_IW_SLC__1SDV_20200101T112239_20200101T112306_030606_0381A7_4CA1.zip
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/SLC_2020_2023$ chmod 777 *
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/SLC_2020_2023$ eof --save-dir /home/andrey/InSAR/orbits
[05/16 23:35:00] [INFO download.py] Downloading precise orbits for S1A on 2020-01-01
[05/16 23:35:00] [WARNING dataspaces_client.py] No CDSE credentials found in netrc file. Please create one using https://da
taspaces.copernicus.eu/
[05/16 23:35:00] [WARNING download.py] Dataspace failed, trying ASF
[05/16 23:35:04] [INFO asf_client.py] Using cached EOF list
[05/16 23:35:05] [INFO asf_client.py] Downloading https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316
T161714_V20191231T225942_20200102T005942.EOF
[05/16 23:35:23] [INFO asf_client.py] Saving to /home/andrey/InSAR/orbits/S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T161714_V201912
31T225942_20200102T005942.EOF
[05/16 23:35:23] [INFO download.py] Finished https://s1qc.asf.alaska.edu/aux_poeorb/S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T1617
14_V20191231T225942_20200102T005942.EOF, saved to /home/andrey/InSAR/orbits/S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210316T161714_V2019
1231T225942_20200102T005942.EOF
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/SLC_2020_2023$
```

Figura 4.17. Captura de pantalla de uso de la rutina eof para la descarga de orbitas
Fuente: elaboración propia

Los archivos de órbita se nombran de la siguiente manera (Figura 4.18):

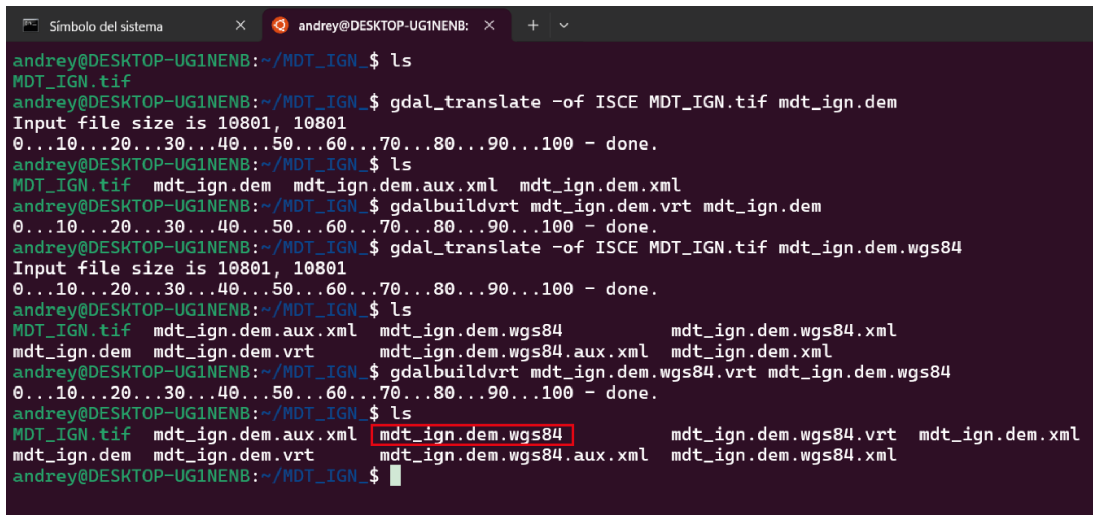
sensor	Fecha de ingestión de órbita	Fecha de escaneo 2
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20210318T200737_V20200604T225942_20200606T005942.EOF		
Tipo de archivo orbital	Fecha de escaneo 1	

Figura 4.18. Nombre de los archivos de órbita de imágenes SAR
Fuente: elaboración propia

El DEM contribuye al procesamiento InSAR en etapas como la eliminación de la fase topográfica. Por defecto, el software ISCE utiliza el DEM del sensor satelital SRTM, este DEM posee una resolución espacial en píxel de 30x30 metros. En este trabajo se usó para esta etapa el MDT del IGN, el cual se solicitó de manera formal a través de correo electrónico. El MDT del IGN a diferencia del SRTM (satelital) es resultado de un vuelo fotogramétrico sobre el país, por lo que su resolución espacial de píxel es de 10x10 metros. Este archivo se solicitó por medio de un correo electrónico al IGN, el MDT fue entregado en las instalaciones del IGN y en formato GeoTiff. Si el DEM es propio u otro diferente al SRTM, es necesario que se encuentren en formato GeoTiff.

El software ISCE solo lee DEMs en su propio formato, de lo contrario generará errores. En la Figura 4.19 se muestra el proceso para convertir el MDT_IGN.tif a archivos con formato legible por ISCE. El primer paso es pasar el archivo .tif a archivo .dem usando gdal_translate, luego se crea un archivo VRT usando gdalbuildvrt. Esta herramienta construye un archivo .vrt a partir del archivo .dem, el archivo .vrt contiene la metadata del DEM usado. Posteriormente, se aplican de nuevo las mismas dos herramientas de

gdal, esto para crear un archivo .dem con extensión WGS84, es decir .wgs84. El formato aceptado en entrada en ISCE para leer los DEM. El archivo encerrado en el rectángulo rojo es el producto final que genera gdal_translate a partir del DEM en formato .tif. El mdt_ign.dem.wgs84 (cuadro rojo) es el principal insumo para ISCE, este es el que se debe indicar en los parámetros del script stackSentinel.py.



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ ls
MDT_IGN.tif
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ gdal_translate -of ISCE MDT_IGN.tif mdt_ign.dem
Input file size is 10801, 10801
0..10..20..30..40..50..60..70..80..90..100 - done.
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ ls
MDT_IGN.tif mdt_ign.dem mdt_ign.dem.aux.xml mdt_ign.dem.xml
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ gdalbuildvrt mdt_ign.dem.vrt mdt_ign.dem
0..10..20..30..40..50..60..70..80..90..100 - done.
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ gdal_translate -of ISCE MDT_IGN.tif mdt_ign.dem.wgs84
Input file size is 10801, 10801
0..10..20..30..40..50..60..70..80..90..100 - done.
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ ls
MDT_IGN.tif mdt_ign.dem.aux.xml mdt_ign.dem.wgs84 mdt_ign.dem.wgs84.xml
mdt_ign.dem mdt_ign.dem.vrt mdt_ign.dem.wgs84.aux.xml mdt_ign.dem.xml
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ gdalbuildvrt mdt_ign.dem.wgs84.vrt mdt_ign.dem.wgs84
0..10..20..30..40..50..60..70..80..90..100 - done.
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$ ls
MDT_IGN.tif mdt_ign.dem.aux.xml mdt_ign.dem.wgs84 mdt_ign.dem.wgs84.vrt mdt_ign.dem.xml
mdt_ign.dem mdt_ign.dem.vrt mdt_ign.dem.wgs84.aux.xml mdt_ign.dem.wgs84.xml
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/MDT_IGN_$
```

Figura 4.19. Captura de pantalla de conversión MDT en formato GeoTIFF a formato de ISCE
Fuente: elaboración propia

Los datos atmosféricos son los últimos archivos por descargar, estos datos permiten en el procesamiento de series temporales realizar una corrección al ruido generado por estas influencias. Como, por ejemplo, el retraso troposférico en la onda que corrige MintPy. En este trabajo, se utilizó el algoritmo de PyAPS que usa los datos del modelo atmosférico ERA5, para el paso de la corrección troposférica (Jolivet et al., 2011). Los datos se descargan automáticamente dentro del directorio llamado ERA5, que también es creado de manera automática durante la ejecución de smallbaselineApp.py. El directorio ERA5 se crea dentro de la carpeta donde se hace el procesamiento de series temporales. También se pueden utilizar los datos atmosféricos del servidor de GACOS (Yu, et al., 2018), pero estos requieren de una descarga manual.

4.6. Procesamiento con ISCE usando el módulo de topsStack stackSentinel.py

Cuando se tienen listos todos los archivos de insumos, se procede con iniciar el procesamiento InSAR, haciendo uso de ISCE. El script stackSentinel.py es el principal

dentro del módulo topsStack de ISCE, es el encargado de realizar el procesamiento de pila, tiene varios flujos de trabajo como pila de interferogramas y pila de SLC. En la Figura 4.20 se visualiza el diagrama de trabajo de topsStack, partiendo de los productos SAR de SLC en el modo de escaneo TOPSAR. Por medio del stackSentinel.py se indican las variables de insumo al momento de invocar el comando, entre los principales están el directorio de imágenes SLC, directorio de órbitas precisas, directorio del DEM a utilizar, número de subfaja a procesar y área de interés por medio de coordenadas geodésicas. Es necesario verificar que el área de interés este dentro de la faja seleccionada.

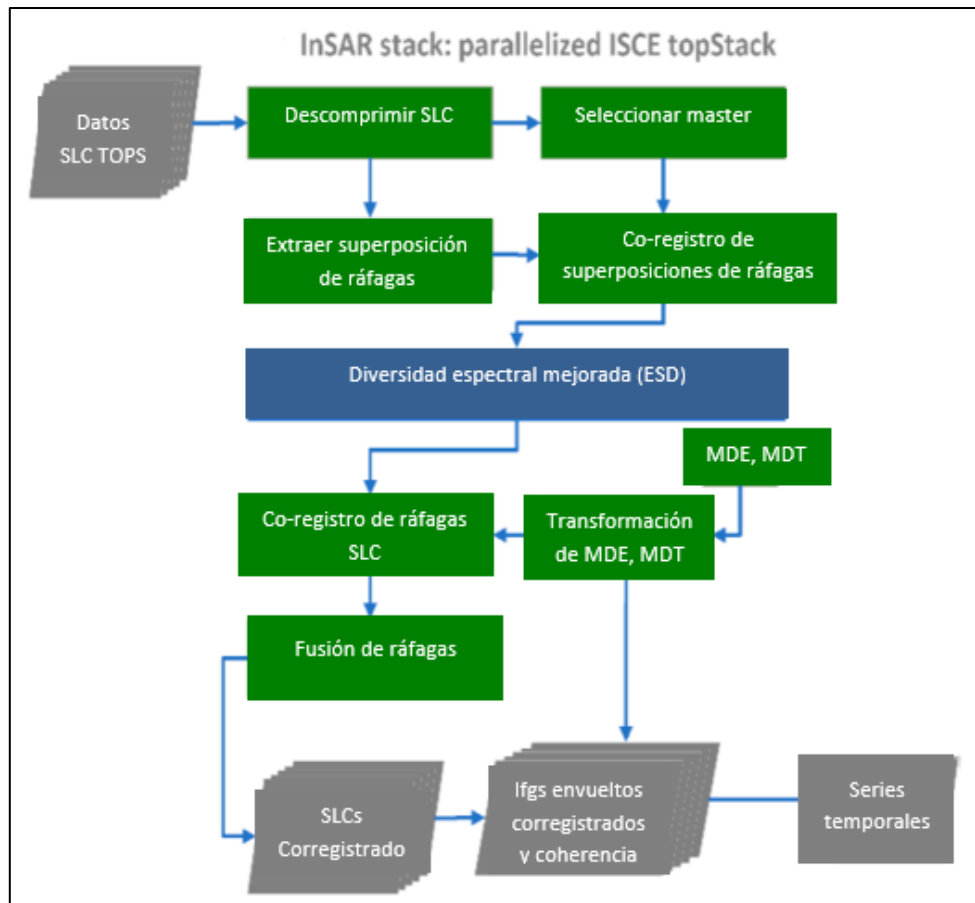


Figura 4.20. Diagrama de flujo de trabajo módulo topsStack
Fuente: adaptado de (Papoutsis, Kontoes, Alatzá, Apostolakis, Loupasakis, 2020)

Otros variables que se pueden indicar en comando antes de ser ejecutado, son la geometría, la imagen máster, el número de conexiones entre imágenes, las resoluciones

Trabajo Final de Graduación

para rango y acimut (range look, acimuth look) entre otros. Los diferentes flujos de trabajo existentes son SLC, interferograma, correlación y compensación. Las distintas formas de invocar estos flujos de trabajo desde la terminal se observan con la ejecución en la terminal de “stackSentinel.py -H” (Figura 4.21). A continuación, se indica el significado de los parámetros principales para este script.

- s: se refiere al directorio donde se encuentran las imágenes SAR.
- o: indica el directorio donde están las orbitas.
- a: carpeta con archivos auxiliares (opcional, se usa para imágenes antiguas de Sentinel-1).
- d: carpeta donde se ubica el Modelo Digital de Elevaciones que se va a utilizar.
- r: Mirada o resolución en rango.
- a, -z: Mirada o resolución en acimut.
- c: Número de conexiones entre imágenes SAR.
- n: Número de fajas o swaths.
- b, -bbox: Delimitación del área de interés en latitud y longitud.

```
andrey@DESKTOP-UQJNEHB:~$ stackSentinel.py -H
Using default ISCE Path: /usr/local/isce
This is the Open Source version of ISCE.
Some of the workflows depend on a separate licensed package.
To obtain the licensed package, please make a request for ISCE
through the website: https://download.jpl.nasa.gov/ops/request/index.cfm.
Alternatively, if you are a member, or can become a member of WinSAR
you may be able to obtain access to a version of the licensed software at
https://winsar.unavco.org/software/isce

Stack processor for Sentinel-1 data using ISCE software.

For a full list of different options, try stackSentinel.py -h

stackSentinel.py generates all configuration and run files required to be executed for a stack of Sentinel-1 TOPS data.

Following are required to start processing:

1) a folder that includes Sentinel-1 SLCs,
2) a DEM (Digital Elevation Model)
3) a folder that includes precise orbits (use dloadOrbits.py to download/ update your orbit folder. Missing orbits downloaded on the fly.)
4) a folder for Sentinel-1 Aux files (which is used for correcting the Elevation Antenna Pattern).

Note that stackSentinel.py does not process any data. It only prepares a lot of input files for processing and a lot of run files. Then you need to execute all those generated run files in order. To know what is really going on, after running stackSentinel.py, look at each run file generated by stackSentinel.py. Each run file actually has several commands that are independent from each other and can be executed in parallel. The config files for each run file include the processing options to execute a specific command/function.

Note also that run files need to be executed in order, i.e., running run_03 needs results from run_02, etc.

#####

#Examples:

stackSentinel.py can be run for different workflows including: a stack of interferogram, a stack of correlation files, a stack of offsets or a coregistered stack of SLC. Workflow can be chosen with -W option.

#####
Example 1:
# interferogram workflow with 2 nearest neighbor connections (default coregistration is NESD):

stackSentinel.py -s ../SLC/ -d ../MexicoCity/demLat_N18_N20_Lon_W100_W097.dem.wgs84 -b '19 20 -99.5 -98.5' -a ../AuxDir/ -o ../Orbits -c 2

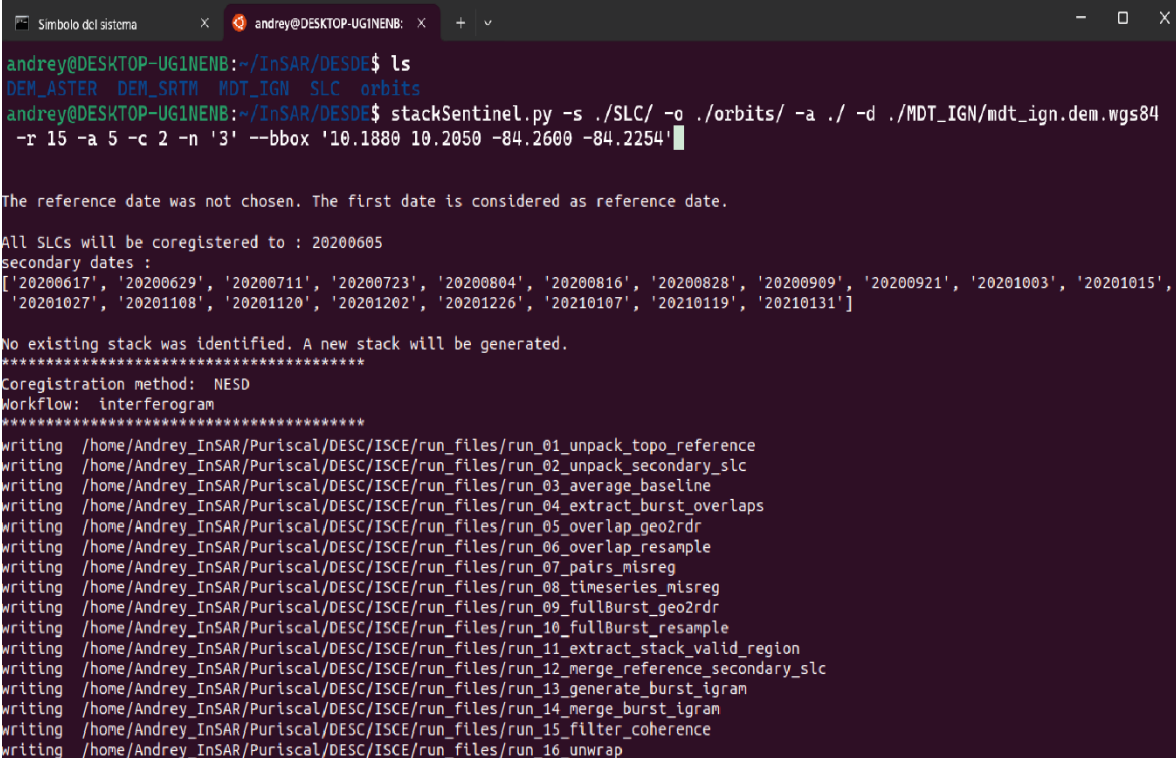
#####
Example 2:
# interferogram workflow with all possible interferograms and coregistration with only geometry:

stackSentinel.py -s ../SLC/ -d ../MexicoCity/demLat_N18_N20_Lon_W100_W097.dem.wgs84 -b '19 20 -99.5 -98.5' -a ../AuxDir/ -o ../Orbits -C geometry -c all
```

Figura 4.21. Captura de pantalla de flujos de trabajo módulo stackSentinel
Fuente: elaboración propia

Si no se señalan estas variables, el procesamiento usará los valores que trae por defecto para cada parámetro, para la imagen máster el guion elige la imagen de la primera fecha, la más antigua. Finalmente, el código extrae las ráfagas de interés de los subfajas de las imágenes para el solapamiento entre ellas, donde el número de ráfaga a procesar dependerá del área abarcada por el sitio de estudio. Generalmente se ocupa de un mínimo de 3 ráfagas para llevar a cabo el procesamiento, del total de 8 que posee cada subfaja. Entre más ráfagas y subfajas más tiempo conlleva el procesamiento. Se realiza la corrección geométrica que por defecto es a través del ESD, más las contribuciones del DEM, remoción topográfica, y las correcciones posteriores. El producto principal obtenido finalmente del cálculo es una carpeta llamada merged. En ella se almacenan los interferogramas, las imágenes SLC y la geometría de referencia.

Antes de ejecutar el script se debe verificar que todos los insumos que utilizara `stackSentinel.py` están en los directorios o rutas correctos. En la Figura 4.22, se muestra el directorio donde se organizaron todos archivos de insumo para la ejecución. Estos corresponden a la carpeta con el DEM, en esta ocasión se usó el del IGN, la carpeta con las imágenes SAR en formato SLC, y la carpeta con las orbitas de las imágenes SAR. Posteriormente se escribe `stackSentinel.py` junto con los parámetros correspondientes a cada archivo de insumo y su ruta respectiva de ubicación. Por esta razón, se recomienda ubicar los archivos de insumos en la misma carpeta o en rutas de fácil acceso. Cuando se termina el proceso inicial de `stackSentinel.py`, se crean varios archivos ejecutables llamados “`run_files`”, esos son archivos ejecutables que se deben ir corriendo uno por uno desde la terminal.



```
andrey@DESKTOP-UGINENB: ~/InSAR/DESC$ ls
DEM_ASTER DEM_SRTM MDT_IGN SLC orbits
andrey@DESKTOP-UGINENB: ~/InSAR/DESC$ stackSentinel.py -s ./SLC/ -o ./orbits/ -a ./ -d ./MDT_IGN/mdt_ign.dem.wgs84
-r 15 -a 5 -c 2 -n '3' --bbox '10.1880 10.2050 -84.2600 -84.2254'

The reference date was not chosen. The first date is considered as reference date.

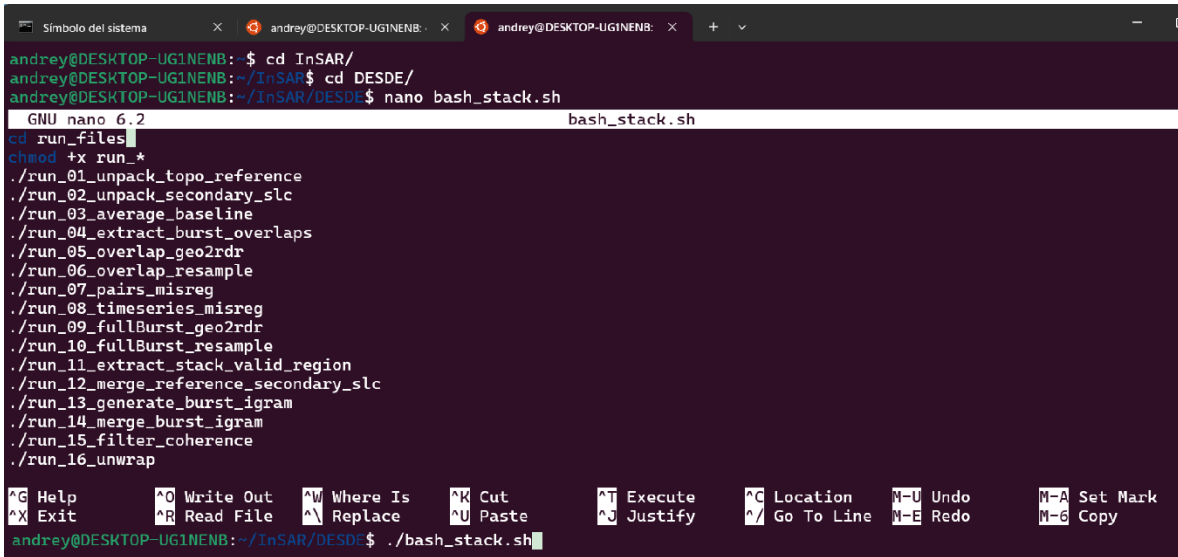
All SLCs will be coregistered to : 20200605
secondary dates :
['20200617', '20200629', '20200711', '20200723', '20200804', '20200816', '20200828', '20200909', '20200921', '20201003', '20201015',
'20201027', '20201108', '20201120', '20201202', '20201226', '20210107', '20210119', '20210131']

No existing stack was identified. A new stack will be generated.
*****
Coregistration method: NESD
Workflow: interferogram
*****
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_01_unpack_topo_reference
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_02_unpack_secondary_slc
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_03_average_baseline
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_04_extract_burst_overlaps
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_05_overlap_geo2rdr
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_06_overlap_resample
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_07_pairs_misreg
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_08_timeseries_misreg
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_09_fullBurst_geo2rdr
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_10_fullBurst_resample
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_11_extract_stack_valid_region
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_12_merge_reference_secondary_slc
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_13_generate_burst_igram
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_14_merge_burst_igram
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_15_filter_coherence
writing /home/Andrey_InSAR/Puriscal/DESC/ISCE/run_files/run_16_unwrap
```

Figura 4.22. Captura de pantalla de la ejecución del script `stackSentinel` con sus respectivos parámetros
Fuente: elaboración propia

Los archivos ejecutables llamados “run_files” son los encargados de realizar el procesamiento InSAR, son el paso a paso del procesamiento InSAR que utiliza `stackSentinel.py`. Para acelerar el proceso manual de ejecución de los archivos ejecutables llamados “run_files”, es posible hacer una automatización dejando programada la ejecución continua de cada run file dentro de un archivo bash. Inicialmente se crea un archivo ejecutable bash y se introduce el nombre en orden de cada uno de los archivos “run_files”, con un “./” delante del nombre de cada uno. El archivo de instalación al igual que los archivos ejecutables para la instalación se crean con el comando “nano”, el nombre y la extensión SH. Después de crear y guardar el archivo bash, se habilitan los permisos de ejecución en caso de ser necesario, de lo contrario se ejecuta directamente (Figura 4.23).

Trabajo Final de Graduación



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~$ cd InSAR/
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/InSAR$ cd DESDE/
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/InSAR/DESDE$ nano bash_stack.sh
GNU nano 6.2 bash_stack.sh
cd run_files
chmod +x run_*
./run_01_unpack_topo_reference
./run_02_unpack_secondary_slc
./run_03_average_baseline
./run_04_extract_burst_overlaps
./run_05_overlap_geo2rdr
./run_06_overlap_resample
./run_07_pairs_misreg
./run_08_timeseries_misreg
./run_09_fullBurst_geo2rdr
./run_10_fullBurst_resample
./run_11_extract_stack_valid_region
./run_12_merge_reference_secondary_slc
./run_13_generate_burst_igram
./run_14_merge_burst_igram
./run_15_filter_coherence
./run_16_unwrap
^G Help      ^O Write Out  ^W Where Is   ^K Cut         ^T Execute    ^C Location   M-U Undo      M-A Set Mark
^X Exit      ^R Read File  ^\ Replace    ^U Paste       ^J Justify    ^_ Go To Line  M-E Redo      M-B Copy
andrey@DESKTOP-UG1NENB: ~/InSAR/DESDE$ ./bash_stack.sh
```

Figura 4.23. Captura de pantalla de ejecución de archivos run-file automático con archivo bash
Fuente: elaboración propia

Cuando stackSentinel.py ha terminado de procesar resultaran en el directorio de ejecución varias carpetas nuevas y un archivo de texto véase la siguiente lista.

- | | | |
|-----------------|-----------------------|-------------------|
| -reference | -baselines | -coreg_secondarys |
| -secondarys | -configs | -stack |
| -interferograms | -run_files | -geom_reference |
| -ESD | -misreg | -SAFE_files.txt |
| -merged | coarse_interferograms | |

En la carpeta merged se encuentran los resultados finales del procesamiento, esta contiene 3 productos en 3 directorios diferentes interferogramas, SLC y geom_referenc. Los productos principales están dentro del directorio interferograms, estos son filt_fine.unw, filt_fine.cor y filt_fine.unw.conncomp. Estos interferogramas se visualizan ejecutando el comando mdx.py. Del directorio geom_reference MintPy usa de insumo los archivos hgt.rdr, lat.rdr, lon.rdr, los.rdr y shadowMask.rdr. Los archivos corresponden a metadatos de la geometría de referencia de los interferogramas, como la latitud, la longitud, los datos de la línea de visión del satélite (LOS) y la máscara de sombra. El software MintPy usa otros tres directorios como

datos de insumo para la generación de series temporales de SBAS, los cuáles son el directorio baseline, reference y secondarys.

En la Figura 4.24 se marcan en rojo estos tres principales resultados de ISCE, sin embargo, para efectos de mejor visualización, se georreferenciaron a WGS84 usando el script geocode.py. La razón de la transformación en el sistema WGS84 es que inicialmente están en coordenadas radar, los mismos archivos georreferenciados se ven al lado derecho con prefijo geo.

```
andrey@DESKTOP-UGINEB:/mnt/c/Users/Andrey Cortes/Onedrive/Tesis_2023/Serie_desce_Puris/merged/interferograms/20220818_20220918$ ls
filt_fine.cor          filt_fine.unw.conncomp    fine.cor.full.vrt      fine.int.vrt           geo_filt_fine.int.rsc
filt_fine.cor.vrt     filt_fine.unw.conncomp.vrt fine.cor.full.xml      fine.int.xml          geo_filt_fine.int.vrt
filt_fine.cor.xml     filt_fine.unw.conncomp.xml fine.cor.vrt           geo_filt_fine.cor     geo_filt_fine.int.xml
filt_fine.int         filt_fine.unw.rsc        fine.cor.xml          geo_filt_fine.cor.rsc
filt_fine.int.vrt     filt_fine.unw.vrt        fine.int              geo_filt_fine.cor.vrt
filt_fine.int.xml     filt_fine.unw.xml        fine.int.full.vrt     geo_filt_fine.cor.xml
filt_fine.unw        fine.cor                 fine.int.full.xml     geo_filt_fine.int
```

Figura 4.24. Captura de pantalla de archivos de insumo para MintPy
Fuente: elaboración propia

4.7. Procesamiento de series temporales con MintPy usando smallbaselineApp.py

Se parte de la pila de interferogramas desenvueltos generada por ISCE, tal y como lo indica el diagrama de flujo de la Figura 4.25. Con respecto al topsStack, MintPy utiliza las siguientes carpetas como insumo baselines, merged, reference y secondarys. Con un archivo de texto se indican las direcciones de las carpetas, y se indican los parámetros de interés como el punto de referencia, a partir del cual MintPy calcula las diferencias de elevación. La máscara de agua es un parámetro opcional pero recomendado para la corrección del error en fase unwrapped. Para el parámetro de la corrección por retraso troposférico, el método se hace usando insumos de modelos atmosféricos globales, como los pueden ser datos de GACOS, o datos de ERA5 por medio de PyAPS. Posterior a las evaluaciones de ruido en las adquisiciones, la corrección topográfica, y las series temporales se obtiene el promedio de velocidad en el desplazamiento de la superficie para la dirección en LOS y en unidades de cm/año.

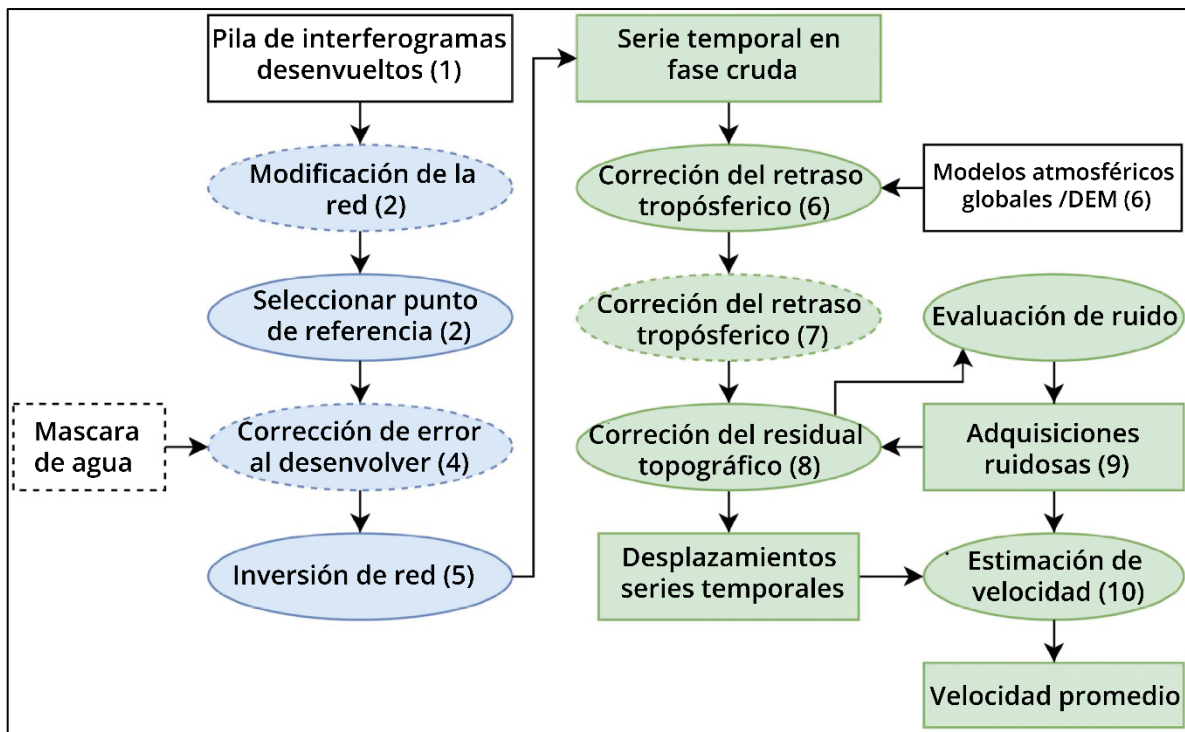
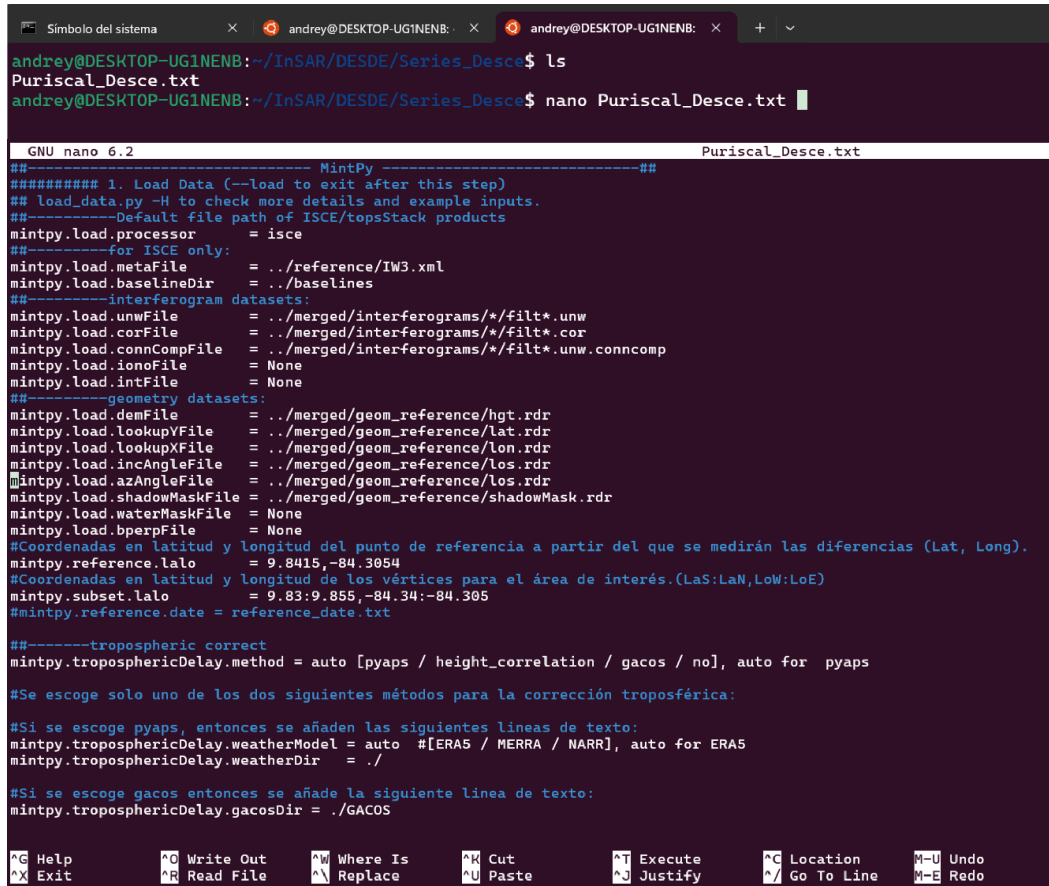


Figura 4.25. Diagrama de flujo de trabajo MintPy
Fuente: adaptado de (Yunjun et al, 2019)

Para la ejecución del script `smallbaselineApp.py` se utiliza un archivo de texto “Puriscal_Desce.txt”, en este archivo de texto se indican los parámetros y rutas de los archivos de insumo. Este archivo de texto se ejecuta desde el directorio donde se guardarán todos los productos de MintPy. Se recomienda crear esta carpeta dentro del directorio donde se generaron los resultados de ISCE. En la Figura 4.26, se muestran los pasos a realizar antes de iniciar el procesamiento con MintPy, donde lo primero es crear el directorio donde se ejecutará el script. Se le denominó a la carpeta “Series_Desce”, dentro de ella debe estar el archivo de texto con las rutas y parámetros. Este formato de datos de insumo dentro del TXT se puede encontrar en la página de github de MintPy, o en la carpeta de “configs” dentro del directorio MintPy que se encuentra en \$HOME. Para editar el archivo de texto se ejecuta el comando `nano` y se configura cada uno de los parámetros que se observan en la Figura 4.26.



```
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/InSAR/DESDE/Series_Desce$ ls
Puriscal_Desce.txt
andrey@DESKTOP-UG1NENB:~/InSAR/DESDE/Series_Desce$ nano Puriscal_Desce.txt

GNU nano 6.2 Puriscal_Desce.txt
##### 1. Load Data (--load to exit after this step)
## load_data.py -H to check more details and example inputs.
##-----Default file path of ISCE/topsStack products
mintpy.load.processor = isce
##-----for ISCE only:
mintpy.load.metaFile = ../reference/IW3.xml
mintpy.load.baselineDir = ../baselines
##-----interferogram datasets:
mintpy.load.unwFile = ../merged/interferograms/*/filt*.unw
mintpy.load.corFile = ../merged/interferograms/*/filt*.cor
mintpy.load.connCompFile = ../merged/interferograms/*/filt*.unw.conncomp
mintpy.load.ionoFile = None
mintpy.load.intFile = None
##-----geometry datasets:
mintpy.load.demFile = ../merged/geom_reference/hgt.rdr
mintpy.load.lookupYFile = ../merged/geom_reference/lat.rdr
mintpy.load.lookupXFile = ../merged/geom_reference/lon.rdr
mintpy.load.incAngleFile = ../merged/geom_reference/los.rdr
mintpy.load.azAngleFile = ../merged/geom_reference/los.rdr
mintpy.load.shadowMaskFile = ../merged/geom_reference/shadowMask.rdr
mintpy.load.waterMaskFile = None
mintpy.load.bperpFile = None
#Coordenadas en latitud y longitud del punto de referencia a partir del que se medirán las diferencias (Lat, Long).
mintpy.reference.lalo = 9.8415,-84.3054
#Coordenadas en latitud y longitud de los vértices para el área de interés.(LaS:LaN,LoW:LoE)
mintpy.subset.lalo = 9.83:9.855,-84.34:-84.305
#mintpy.reference.date = reference_date.txt

##-----tropospheric correct
mintpy.troposphericDelay.method = auto [pyaps / height_correlation / gacos / no], auto for pyaps

#Se escoge solo uno de los dos siguientes métodos para la corrección troposférica:

#Si se escoge pyaps, entonces se añaden las siguientes líneas de texto:
mintpy.troposphericDelay.weatherModel = auto #[ERA5 / MERRA / NARR], auto for ERA5
mintpy.troposphericDelay.weatherDir = ./

#Si se escoge gacos entonces se añade la siguiente línea de texto:
mintpy.troposphericDelay.gacosDir = ./GACOS

^G Help      ^O Write Out  ^W Where Is   ^K Cut        ^T Execute    ^C Location   M-U Undo
^X Exit      ^R Read File  ^_ Replace    ^U Paste      ^J Justify    ^_ Go To Line M-E Redo
```

Figura 4.26. Captura de pantalla de archivo de texto de insumo Puriscal_Desce.txt
Fuente: elaboración propia

En la generación de series se debe seleccionar un punto de referencia porque la fase interferométrica es inherentemente una observación relativa. Las fases de cada interferograma desenvuelto son relativas a un píxel arbitrario. Por consiguiente, es necesario referenciar todos los interferogramas a este píxel de referencia común (Yunjun et al., (2019)). El punto de referencia se define en el archivo de texto de insumos de MintPy que se ve en la Figura 4.26. La estrategia ideal es utilizar las mismas coordenadas de referencia en ascendente y descendente para el respectivo píxel de referencia. Si el procesamiento de MintPy inicia de forma correcta, entonces en la pantalla aparecerá lo mostrado en la Figura 4.27. En este inicio se observa la ubicación del directorio de ejecución, seguido de la rutina de pasos que sigue y ejecuta smallbaselineApp.py.

El directorio de “ERA5” es donde se guardan los archivos para la corrección atmosférica, en el directorio “geo” se guardan los archivos HDF georreferenciados como la velocidad de desplazamiento. En la carpeta “inputs” se guarda el stack interferogramas en extensión HDF. Por último, la carpeta “pic” contiene los resultados convertidos de extensión HDF a imágenes png. La carpeta de ejecución con los resultados vista de manera gráfica se ve en la Figura 4.29, en la parte superior se observan los resultados en la carpeta de ejecución. En la parte inferior se ven los resultados en formato PNG dentro de la carpeta “pic”.

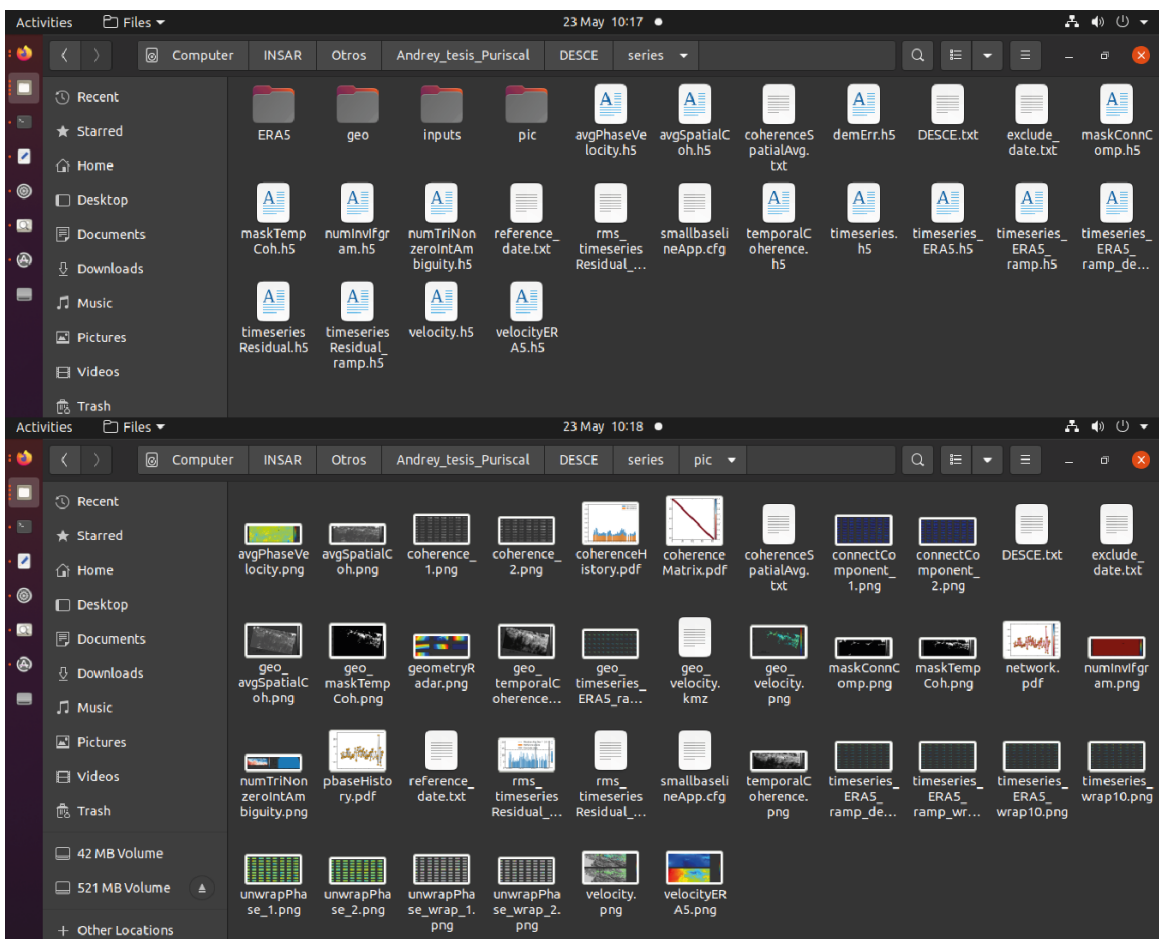


Figura 4.29. Captura de pantalla de resultados MintPy en formato imagen dentro de la carpeta “pic”
Fuente: elaboración propia

4.8. Estudio de factibilidad de aplicación InSAR en Costa Rica

El último objetivo de la tesis es evaluar el potencial de la aplicación InSAR en Costa Rica, para su potencial como herramienta de monitoreo geodésico de deslizamientos

en el país. La exitosa aplicabilidad de InSAR tiene una relación intrínseca con la coherencia de los píxeles en las imágenes. Por lo tanto, se inicia utilizando como insumo los archivos de coherencia resultantes del procesamiento hecho para la región de Puriscal. Lo que se busca es el análisis de la coherencia en función de la cobertura del suelo. De los resultados preliminares, se desarrolla un mapa de coherencia que realiza una correlación entre la coherencia del píxel y los distintos tipos de cobertura del suelo, como, por ejemplo, vegetación cultivada, urbano-construido, bosque cerrado, vegetación desnuda, entre otras. Puriscal abarca la mayoría de los tipos de cobertura, sin embargo, se decidió realizar el mapa con uno de los archivos de coherencia procesados previamente. En este procesamiento previó se abarca un área mucho mayor a la delimitada en los resultados finales. Esto con el objetivo de abarcar coberturas que no se encuentran dentro de Puriscal. El mapa sirve como modelo de aproximación que permite extender el análisis de una coherencia integral a todo el territorio de Costa Rica. En el siguiente paso se establece un valor mínimo de coherencia óptimo, para que las mediciones de InSAR sean efectivas y los valores de píxel confiables en el monitoreo de un deslizamiento. A partir de los valores de coherencia se crea un mapa de potencial de aplicabilidad InSAR, que identifica las áreas donde la tecnología InSAR se podría aplicar con factibilidad de resultados en Costa Rica.

Se aplica un cálculo de extrapolación a partir de los resultados obtenidos por MintPy, en la región de Puriscal. Se utilizaron los archivos que emplea MintPy como medida de confiabilidad para sus resultados. Estos archivos corresponden al archivo de coherencia temporal y coherencia espacial promedio. Para aplicar coherencia a todo el territorio se optó por la herramienta de Google Earth Engine, debido a que se intentó hacerlo con QGIS y no se tuvo éxito. Primeramente, se creó una cuenta en GEE usando el correo universitario, y posteriormente esto permitió crear un proyecto. Luego se cargó un mapa de cobertura de suelos a través del editor (Figura 4.30).

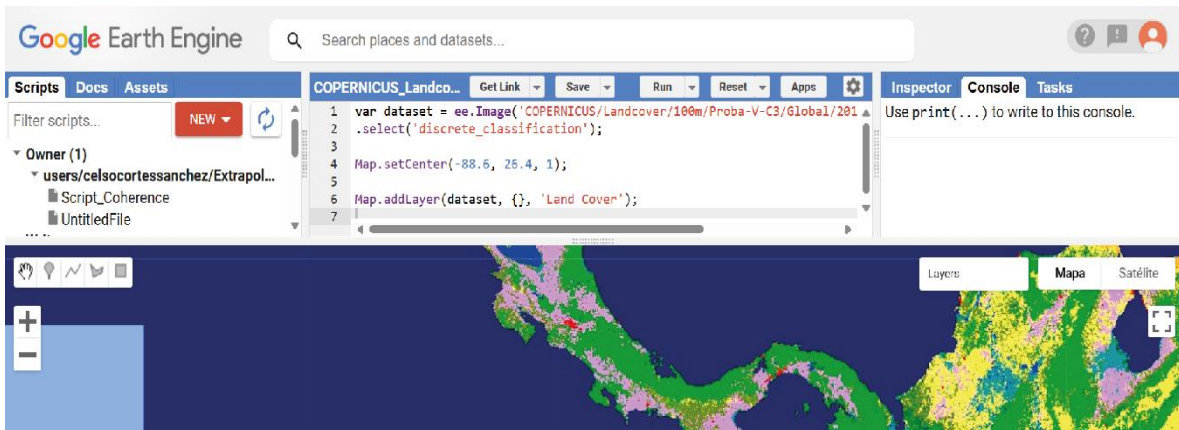


Figura 4.30. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine
Fuente: elaboración propia por medio de Google Earth Engine

El mapa de cobertura suelos, extraído del proveedor de datos de [Copernicus](#), se utilizó como medio para desarrollar la extrapolación de valores de coherencia. Esto se hace relacionando los píxeles del archivo de coherencia con los píxeles del mapa de cobertura de suelos. Las clases de categorías de la cobertura de suelos se observan en el Anexo 8, en total el mapa usado cuenta con 23 clases de coberturas de suelos. Por lo tanto, usando la región de Puriscal se brindan valores medios de coherencia para cada clase que se encuentra dentro de la cobertura del archivo de coherencia. Después, los valores medios de coherencia determinados para cada clase se extrapolan para el resto de las clases que cubren el país. Se debe cargar inicialmente a GEE los archivos de coherencia (Figura 4.31), esto se hace desde el panel de “Assets”, y luego dando clic en “NEW”. Para visualizar la capa en el interfaz, se escribe la línea que se observa en el editor y se ejecuta.

Trabajo Final de Graduación

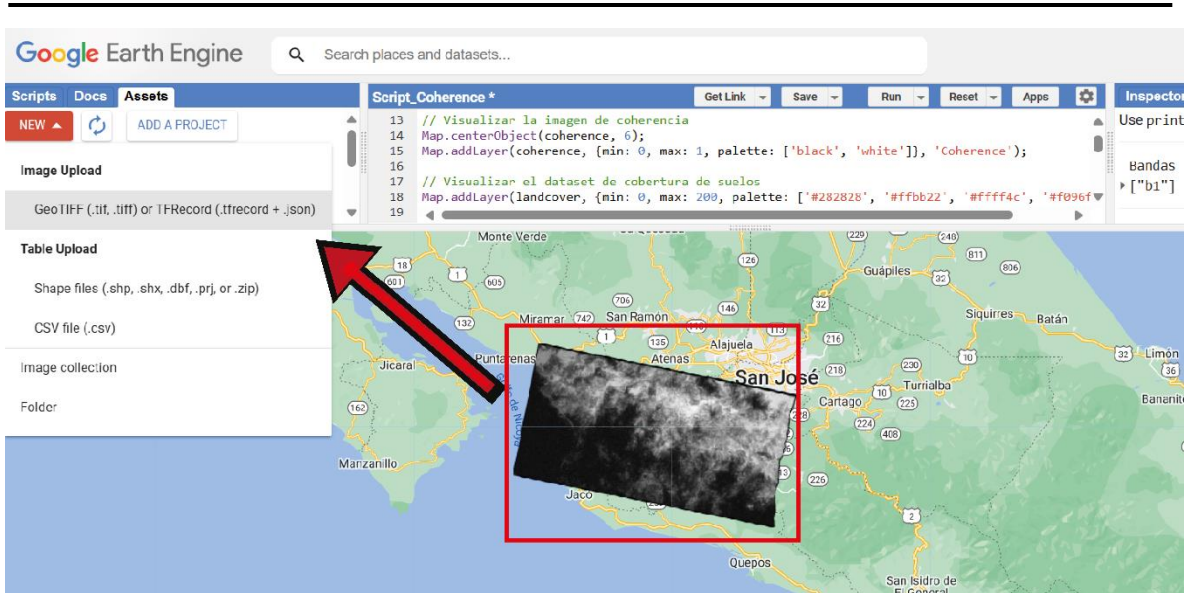


Figura 4.31. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine con capa de coherencia
Fuente: elaboración propia por medio de GEE

La elaboración del método de aplicación de la coherencia InSAR se lleva a cabo a través de un código programado con la ayuda de IA, este código se observa completo en el Anexo 11. El código realiza la extrapolación con el archivo de coherencia observado sobrepuesto al mapa de cobertura de suelos en la Figura 4.32 (a). El cálculo de extrapolación requiere de un par de líneas de programación, para hacer una excepción con ciertas clases de la cobertura de suelo. La excepción corresponde a las clases de bosque cerrado y cuerpos de agua, en las que realmente InSAR tiene nula correlación. Esto debido a que la extrapolación inicialmente brindaba valores un poco altos que no correspondían con la realidad de la coherencia InSAR en zonas boscosas.

Así, el código realiza una excepción con estas clases de bosque cerrado y les da el valor mínimo de coherencia de 0,1. Además, al final del código se programaron unas líneas que crean a partir de la imagen de coherencia resultante una tabla de atributos en formato CSV, donde se indican los números de las clases, su color, descripción y valor de coherencia medio. La imagen de coherencia resultante se encuentra en formato GeoTIFF, esto con el objetivo de luego abrir los resultados en QGIS y realizar el respectivo mapa de coherencia. Después de la ejecución del código los resultados se visualizan en la interfaz. En el panel de “Tasks” se encuentran los dos productos

Trabajo Final de Graduación

(Figura 4.32 (b)). A ambos se les debe de dar clic en la opción de “RUN”, de manera que sean exportados a alguna carpeta de Google Drive para su posterior descarga y apertura en QGIS.

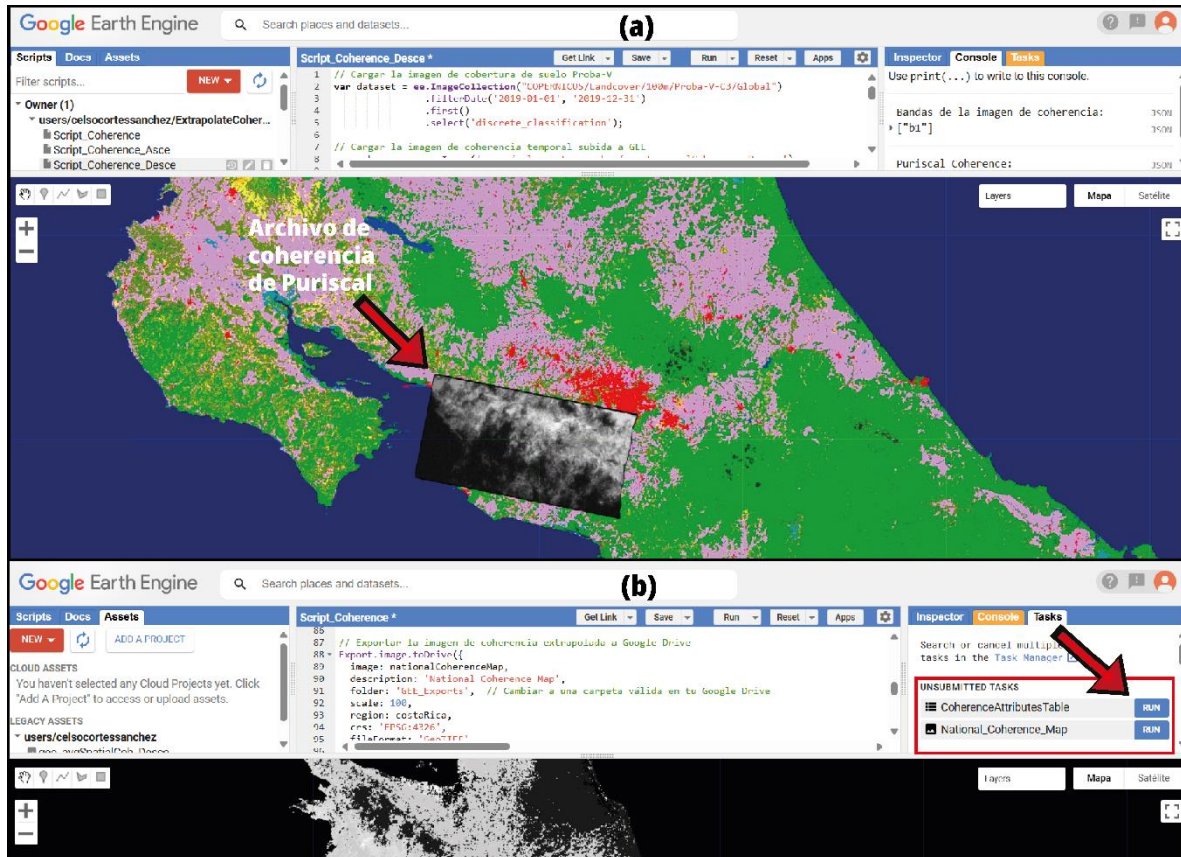


Figura 4.32. Captura de pantalla de interfaz de Google Earth Engine
Fuente: elaboración propia por medio de GEE

Capítulo 5: Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento InSAR-SBAS, llevado a cabo usando ISCE y MintPy para la zona de Santiago de Puriscal. También se presentan los resultados de la estimación de aplicabilidad InSAR en Costa Rica, por medio de mapas de factibilidad. De la primera parte, se obtuvo un total de 338 interferogramas a partir del software ISCE, luego se generó una serie temporal de 01 de enero 2020 hasta 21 enero 2023. De la serie temporal se obtienen las velocidades en cm/año en línea de vista del satélite. Una serie temporal en órbita ascendente conformada por 173 interferogramas y una serie temporal en órbita descendente conformada por 165 interferogramas, que cubre la totalidad de la ciudad de Santiago de Puriscal. Con MintPy se obtuvieron series temporales que describen cuantitativamente la evolución de los píxeles InSAR en la superficie de Puriscal. Las series temporales de MintPy brindan la red de interferogramas con valores de coherencia espacial promedio, y brinda archivos de velocidad promedio. MintPy utiliza la coherencia temporal y espacial promedio como medidas de calidad InSAR. Al final, se presentan los mapas de factibilidad de aplicabilidad InSAR en Costa Rica, calculados de los archivos de coherencia

5.1. Resultados InSAR de ISCE

En ISCE se realizó un procesamiento InSAR de apilamiento con el procesador stackSentinel, usando el flujo de trabajo de interferograma. Los resultados principales son los interferogramas envueltos, interferogramas desenvueltos y archivos de coherencia. Se utilizaron en total 172 imágenes SAR, 88 en órbita ascendente y las otras 84 en órbita descendente. El total de las imágenes requiere un espacio de almacenamiento de aproximado de 700 GB. La diferencia de adquisición entre imágenes es de 12 días entre cada una, y van de enero de 2020 a enero 2023. Se utilizaron específicamente la ruta 92 marco 26 para las imágenes ascendentes, y ruta 84 marco 558 para las imágenes descendentes, ambas con modo de haz IW.

Trabajo Final de Graduación

Para la corrección troposférica de MintPy se utilizaron datos del modelo ERA5 a través del CDS. Del programa ISCE se obtuvieron una serie de interferogramas, envueltos y desenvueltos, de los cuales se puede observar su magnitud y fase en el caso de los interferogramas envueltos, como amplitud y fase para los interferogramas desenvueltos. Del programa MintPy, usando los interferogramas de ISCE, se obtuvieron las series temporales, así como los mapas de coherencia, red de interferogramas y mapas de velocidad. Los mapas de velocidad y series temporales nos brindan la precisión del movimiento existente en el deslizamiento de Santiago de Puriscal. Se resumió la información de las imágenes SAR de insumo en el Cuadro 5.1.

Dirección de Órbita	Ruta	Marco	Modo de Haz	Misión Satelital Sentinel1	Tipo de imágenes SAR	Número imágenes SAR	Fecha de primer imagen SAR	Fecha de última imagen SAR
Ascendente	92	26	IW	SA	SLC	88	20200101	20230121
Descendente	84	558	IW	SA	SLC	84	20200101	20230121

Cuadro 5.1. Resumen de los datos de insumo utilizados para el procesamiento

Fuente: elaboración propia

Las herramientas de ISCE directamente no permiten visualizar una escala de color para cada uno de los productos. Por ejemplo, el interferograma en su fase desenvuelta, sus valores van de $-\pi$ hasta π . Para visualizar la escala de valores de los interferogramas envueltos producidos por ISCE se puede utilizar la herramienta de MintPy llamado `view.py`. En la Figura 5.1 se visualiza uno de los interferogramas envueltos, resultantes que corresponde a las fechas 20220818_20220911 de ambas orbitas. El archivo del interferograma desenvuelto se nombra como `filt_fine.unw` (Figura 5.2). Este interferograma desenvuelto permite ver los valores más allá del rango de $-\pi$ a π , y es el insumo principal para las series temporales. ISCE genera otro producto de interés que es el mapa de coherencia espacial, llamado `filt_fine.cor` (Figura 5.3). Este insumo permite un primer análisis de la calidad de los resultados obtenidos.

Lo destacable en los interferogramas de ISCE (Figura 5.1) es la cantidad de ruido o decorrelación que contiene su fase envuelta, a causa los factores típicos como la vegetación e influencia atmosférica. También se observa franjas que podría ser

desplazamiento (Figura 5.1 (a)). Sin embargo, por la magnitud, la ausencia de evento geológico importante (terremoto) entre estas dos fechas y la inconsistencia entre la órbita ascendente y descendente, estas franjas probablemente son generadas por diferencia de vapor de agua en la atmósfera entre estas fechas.

Un evento geológico puede generar un desplazamiento de varios centímetros en entre 2 imagen SAR (12 días), pero sin cambios abruptos entre fechas, la información en los interferogramas resultantes no se puede usar directamente. Por lo que estos interferogramas deben juntarse formando un periodo de tiempo que permita ver la evolución de los cambios. Al ser procesados por MintPy se mitigan los factores de ruido, y los interferogramas son más legibles.

En el mapa de coherencia (Figura 5.3) se puede observar una predominancia en los niveles bajos de coherencia por debajo de 0,2, pero también pequeñas zonas con coherencia arriba de los 0,8 en la ciudad de Santiago de Puriscal. Los mapas de coherencia denotan la clara correlación para las zonas urbanas, siendo estas las que poseen los valores más elevados de coherencia.

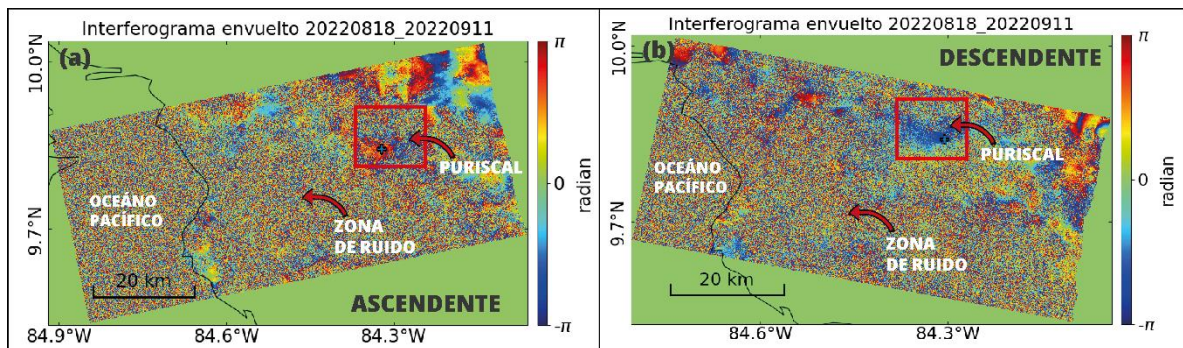


Figura 5.1. Fase de interferogramas envueltos generados por ISCE en ambas orbitas. En el lado (a) se muestra el interferograma en órbita ascendente. En el lado (b), el interferograma descendente.

Fuente: elaboración propia por medio de ISCE y MintPy

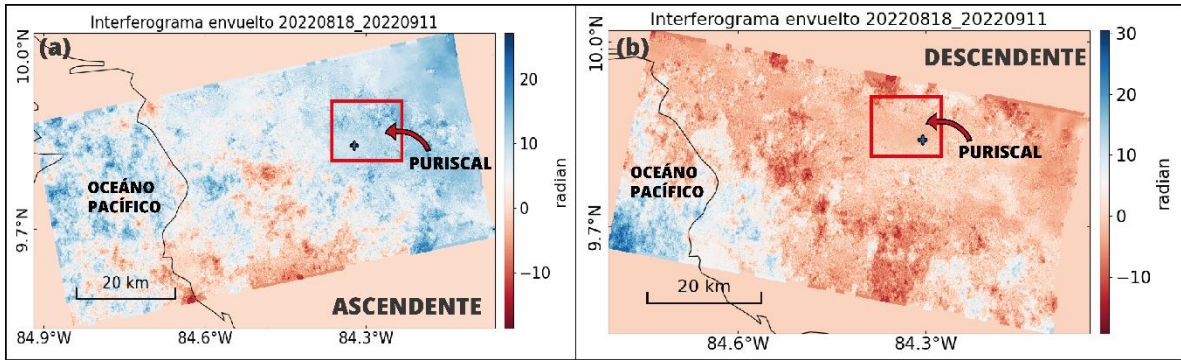


Figura 5.2. Fase de interferogramas desenvueltos generados por ISCE en ambas orbitas. En el lado (a) se presenta el interferograma desenvuelto en órbita ascendente. En el lado (b), el interferograma desenvuelto descendente.

Fuente: elaboración propia por medio de ISCE y MintPy

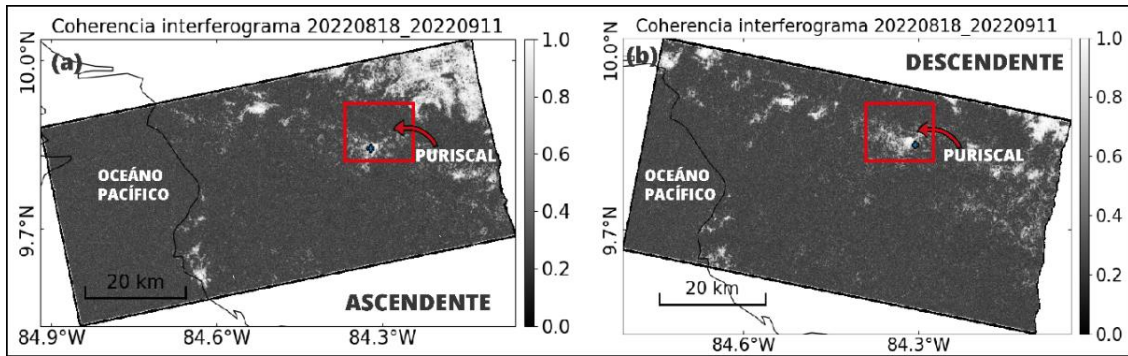


Figura 5.3. Coherencia del interferograma generado por el script stackSentinel.py de ISCE En el lado (a) se presenta el archivo de coherencia en órbita ascendente. En el lado (b), el archivo de coherencia descendente.

Fuente: elaboración propia por medio de ISCE y MintPy

5.2. Red de líneas base pequeñas de SBAS-MintPy

La red de líneas base pequeña (SBAS) reflejan el interferograma formado entre las adquisiciones SAR. La red SBAS es uno de los principales resultados para asegurar la calidad de la serie temporal. El programa MintPy brinda como producto un gráfico SBAS (Gráfico 5.1 y Gráfico 5.2) que relaciona la serie temporal con la red de interferogramas. El gráfico SBAS, en el eje Y brinda las distancias perpendiculares de separación entre adquisiciones SAR y en el eje X la línea de tiempo de la primera hasta la última adquisición. En la parte derecha se observa la escala de coherencia espacial promedio, donde por defecto MintPy utiliza 0,7 como umbral mínimo de coherencia temporal, y 0,4 como umbral mínimo de coherencia espacial. En esta visualización de resultados el umbral de coherencia se bajó 0,4 utilizando uno de los códigos de ploteo

de MintPy. Los valores que están arriba de 0,3 todavía son utilizables, pero por debajo de este valor no es recomendable utilizarlo.

Los gráficos vinculados con la red de líneas base pequeñas muestran valores relacionados a la coherencia. El Gráfico 5.1 y Gráfico 5.2 son los que contiene la red SBAS para cada órbita. Aquí se observa que el promedio de separación entre línea base perpendicular es de entre 100 y -100 metros. Sin embargo, se observa unas separaciones mayores entre tres imágenes SAR a finales de 2022. Las distancias pequeñas entre líneas base favorecen, brindando resultados con mejor correlación. En cada uno de los gráficos es mínima la cantidad de interferogramas o líneas base con valores de coherencia por debajo del umbral. Los gráficos (a) y (b) del Anexo 9 y Anexo 10 muestran los valores de coherencia máxima y mínima para todos los pares de interferogramas, donde se indica que los valores mínimos están entre 0,3 y 0,4 mientras que los valores máximos entre 0,4 y 0,5.

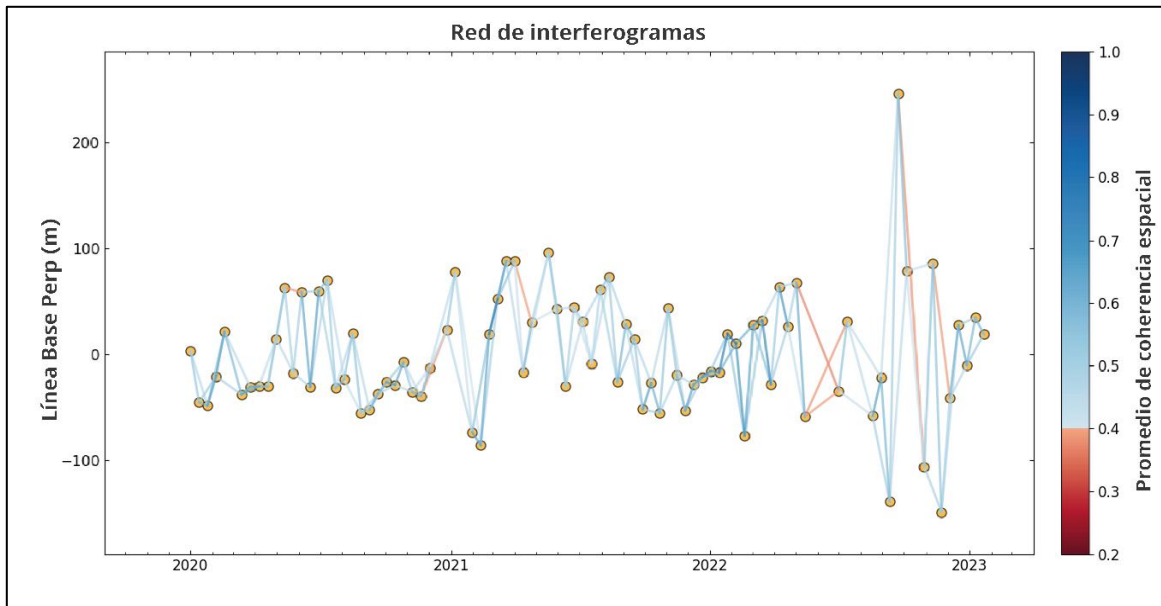


Gráfico 5.1. Gráfica que muestra la red de interferogramas característica de SBAS (Descendente). El límite del umbral de coherencia para la red es de 0,4.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

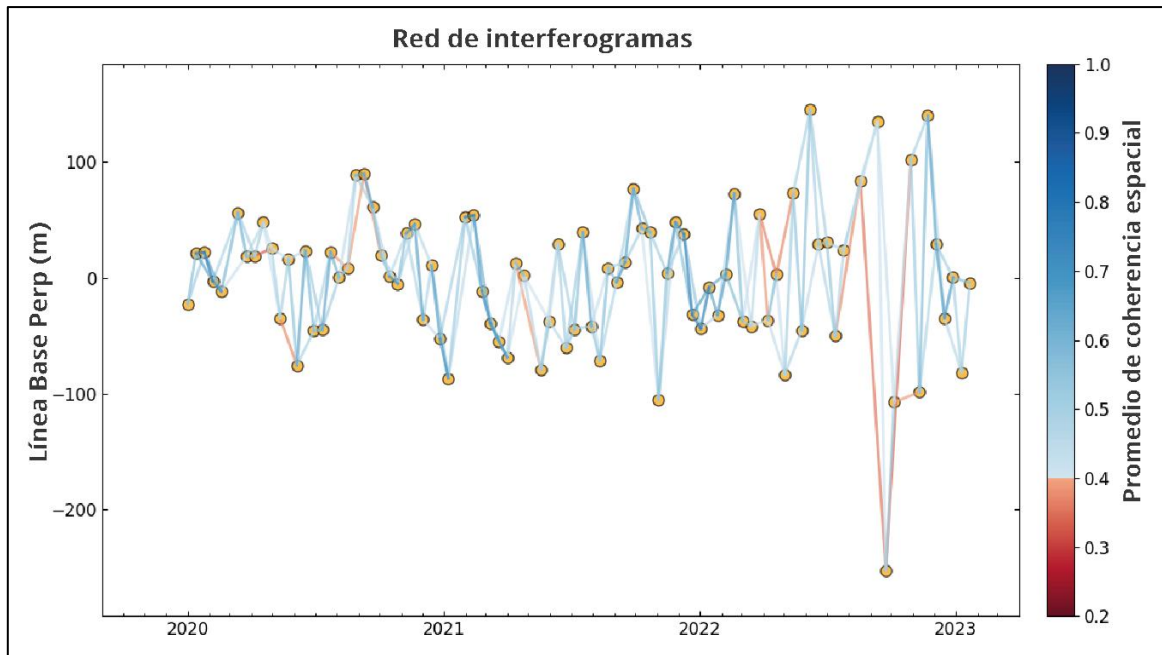


Gráfico 5.2. El gráfico muestra la red de interferogramas característica de SBAS (Ascendente). El límite del umbral de coherencia para la red es de 0,4.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

5.3. Mapas de coherencia espacial y temporal de MintPy

Los mapas de coherencia permiten determinar una estimación de la calidad de los valores de fase interferométrica. La diferencia con los archivos de coherencia obtenidos en MintPy y los obtenidos en ISCE, es el período que los compone. La Figura 5.3 corresponde solo a la coherencia entre dos fechas distintas, y los de MintPy corresponde a un promedio de la serie temporal. Del software MintPy se obtienen la coherencia espacial promedio (Figura 5.4) y la coherencia temporal (Figura 5.5). La coherencia espacial y temporal son parámetros utilizables que nos pueden brindar información acerca de la calidad en la medición.

intPy determina el promedio temporal de coherencia espacial de toda la pila de interferogramas, después de la inversión de series temporales. De esta manera la coherencia temporal representa la consistencia entre las series temporales y la red de interferogramas (Pepe & Lanari, 2006). El cuadro rojo que contiene la zona de Puriscal indica valores mayores a 0.8 en la coherencia de promedio espacial, tanto en ascendente como descendente, esto significa altos niveles de retrodispersión. Los valores son

óptimos para tener resultados confiables. A nivel comparativo se observa que los archivos de coherencia temporal (Figura 5.5) coherencia temporal de indica en rasgos generales mayores niveles en los valores de coherencia, con respecto a los archivos de coherencia espacial promedio (Figura 5.4).

En el Anexo 2 y Anexo 4 se adjunta un cuadro con los valores tabulados de coherencia espacial promedio para cada interferograma, además de los datos de línea base temporal, línea base perpendicular y número de interferograma. Los mapas de coherencia pueden otras aplicaciones en el ámbito de la teledetección, como la de detectar zonas de deforestación o la estimación de troncos en bosques boreales (Ferreti, 2014).

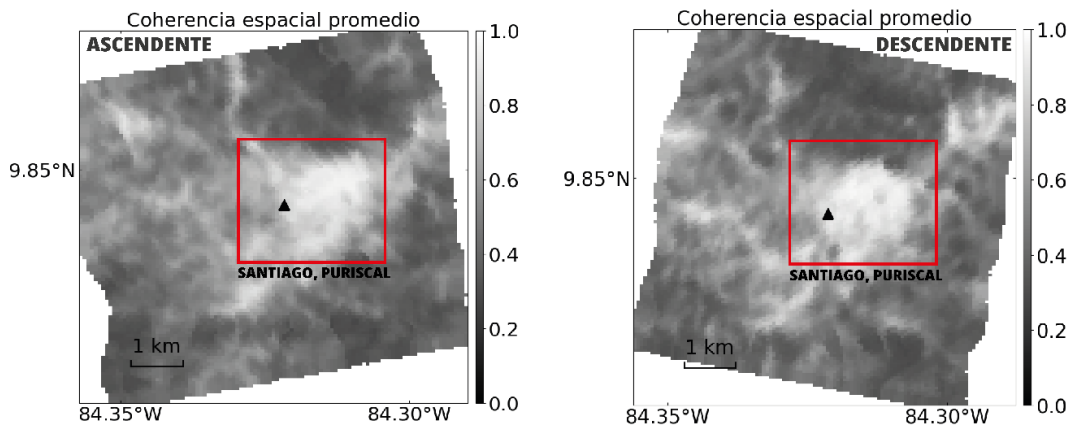


Figura 5.4. Coherencia espacial promedio de la pila de interferogramas determinada por MintPy
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

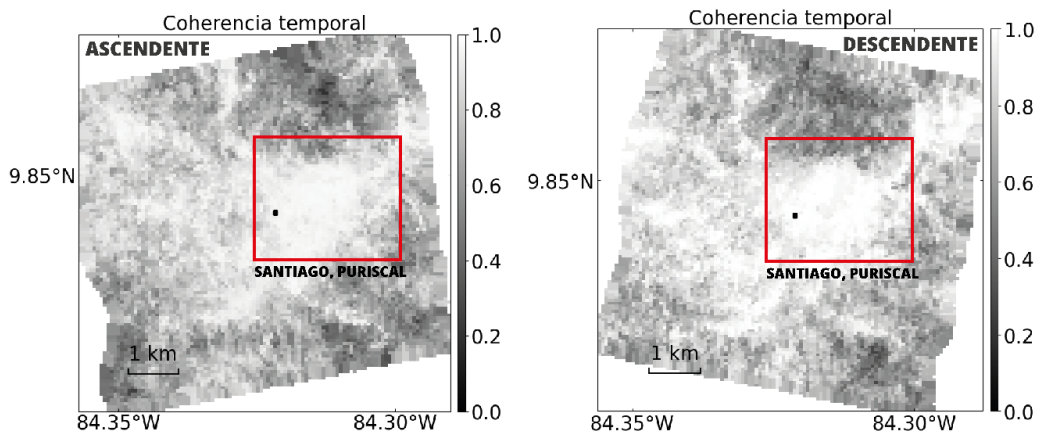


Figura 5.5. Coherencia temporal de la pila de interferogramas determinada por MintPy
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

5.4. Punto de referencia en la zona y RMS de adquisiciones SAR

Para determinar el punto de referencia es importante realizar un análisis previo de la zona de trabajo, con el objetivo de conocer las áreas relativamente estables. Además, debe asegurarse que el punto se encuentra en una zona con píxeles de confianza, y que tenga valores de coherencia óptimos. En el Cuadro 5.1 se tabularon los valores de coherencia del punto de referencia para cada órbita.

Órbita	Píxel de referencia		Coherencia temporal	Coherencia espacial promedio
	Latitud	Longitud		
Descendente	9,8436	-84,3214	1,00	0,86
Ascendente	9,8436	-84,3214	0,96	0,81

Cuadro 5.2. Datos del punto de referencia

Fuente: elaboración propia

Definir un mismo punto de referencia evita que el desplazamiento determinado sea relativo para cada órbita. Cuando se visualiza el píxel o punto de referencia en el Mapa 5.1, se observa que se encuentra ubicado en un área por fuera de la capa de deslizamientos (oscura) de la CNE. En el Cuadro 5.2 se puede observar que los valores de coherencia son elevados para el píxel de referencia, siendo por ende un punto de referencia apto para medir la deformación.

Después de la inversión de la red de interferogramas, MintPy genera el archivo timeseries.h5. El archivo timeseries.h5 permite observar la evolución en el desplazamiento de los píxeles a lo largo del periodo de estudio. En el Gráfico 5.3 se muestra la evolución para cada fecha utilizada usando la máscara de coherencia temporal, que cumple la función de filtrar los píxeles a visualizar. Las diferencias parten del píxel de referencia definido por las coordenadas de referencia, pero la deformación observada es a partir de una fecha de referencia que MintPy selecciona automáticamente. Además, el RMS detecta las adquisiciones con mayor ruido usando el umbral de detección de valores atípicos con la desviación absoluta media multiplicada por 3 (Yunjun & Fattahi, 2023). En el Anexo 1 y Anexo 3 se adjunta el cuadro de valores RMS tabulados para cada fecha.

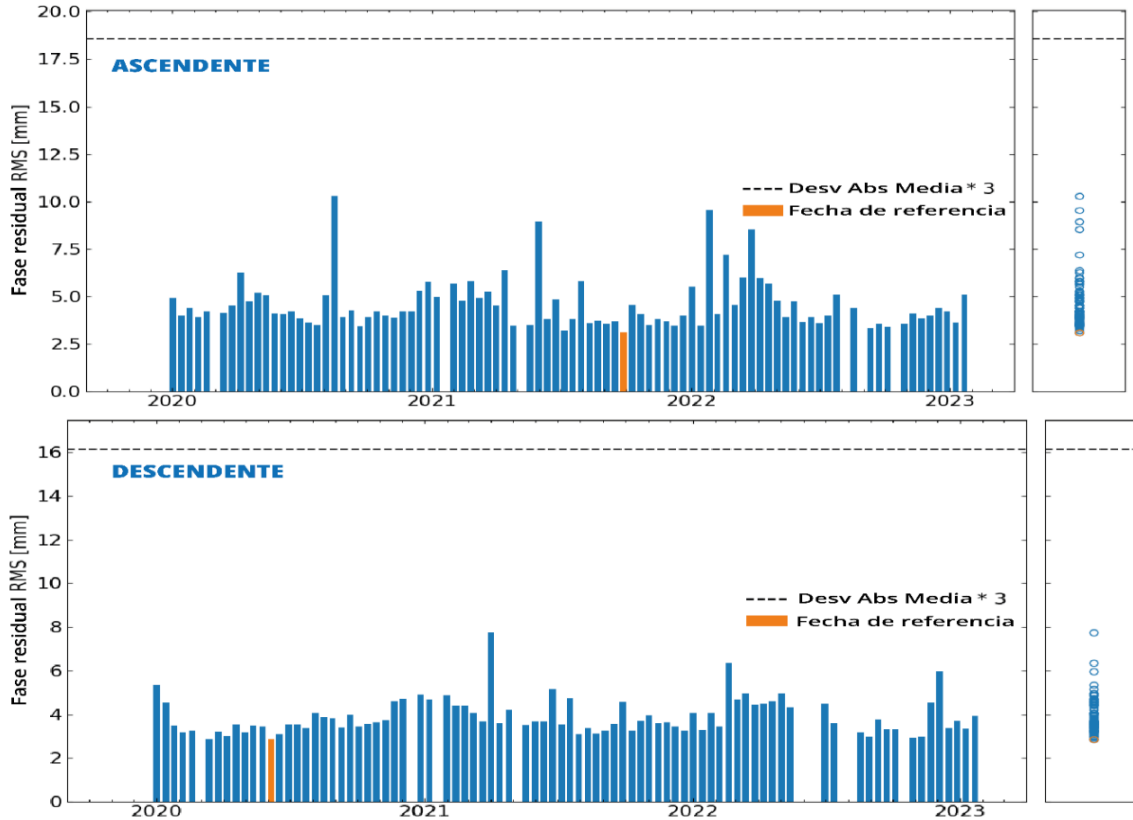


Gráfico 5.3. Raíz media cuadrática de la fase Residual para cada adquisición SAR
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

5.5. Velocidades promedio de Santiago de Puriscal

Las series temporales permiten observar la deformación o cambios de la superficie para cada fecha de adquisición a partir de la fecha de referencia. Posterior a la generación de series temporales, es posible convertir dichas series a un archivo de velocidad de deformación o desplazamiento, permitiendo determinar una velocidad acumulada en cm/año. La deformación del suelo por procesos geofísicos y antropogénicos suele tener una tendencia lineal (Yunjun & Fattahi, 2023), MintPy determina la velocidad como la pendiente de mejor ajuste lineal a la serie temporal de desplazamiento (Figura 5.6 y Figura 5.7). La desviación estándar de la velocidad estimada se determina con la ecuación 10 del artículo de Fattahi y Amelung de 2015 sobre el sesgo e incertidumbre de InSAR debido al retraso troposférico sistemático y estocástico (Yunjun et al, 2019). Las velocidades se mapearon a detalle para la zona central de Santiago, esto permite observar las zonas más afectadas, o con los pixeles de mayor velocidad (Mapa 5.1 y Mapa 5.2).

En la Figura 5.6 y Figura 5.7 se muestran las velocidades de desplazamiento a partir de las series temporales, sobrepuesta al DEM y georreferenciadas a WGS84. Los archivos de velocidades permiten observar el movimiento existente en centímetros por año. Para la órbita ascendente se observa que el movimiento en LOS tiene un acercamiento hacia el satélite con una tasa de velocidad de hasta $\sim 4 \text{ cm/año} \pm 2\text{mm}$. Por otra parte, el movimiento en LOS para la órbita descendente indican que el deslizamiento se aleja del satélite a una tasa de $-6 \text{ cm/año} \pm 2\text{mm}$ en su velocidad máxima. La velocidad en LOS para descendente confirman el movimiento del deslizamiento en dirección oeste. El satélite en órbita descendente se desplaza en dirección suroeste opuesto al deslizamiento, y se nota una tendencia de mejor detección del movimiento en esta órbita con respecto a la ascendente. En el Anexo 7 se complementan las velocidades con sus desviaciones estándar respectivas.

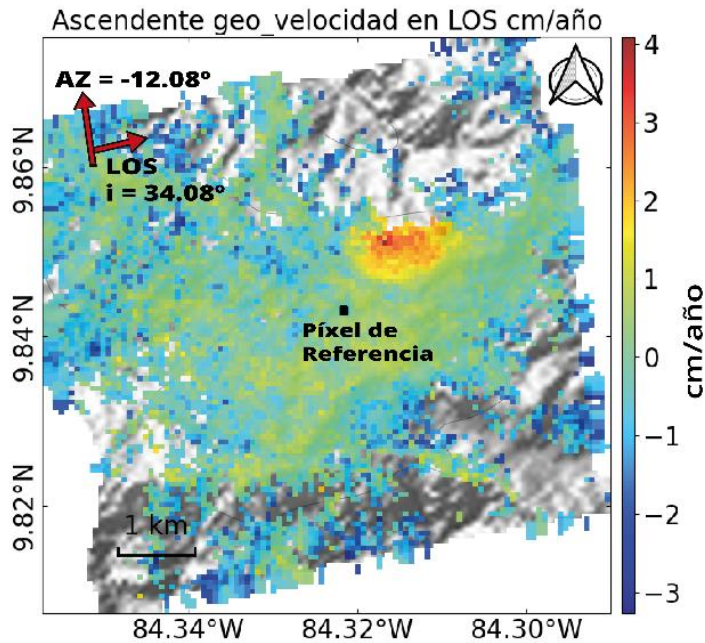


Figura 5.6. Velocidades promedio de desplazamiento en LOS. Órbita ascendente, con una dirección del satélite de $-12,08^\circ$ y un ángulo de incidencia en LOS de $34,08^\circ$.

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

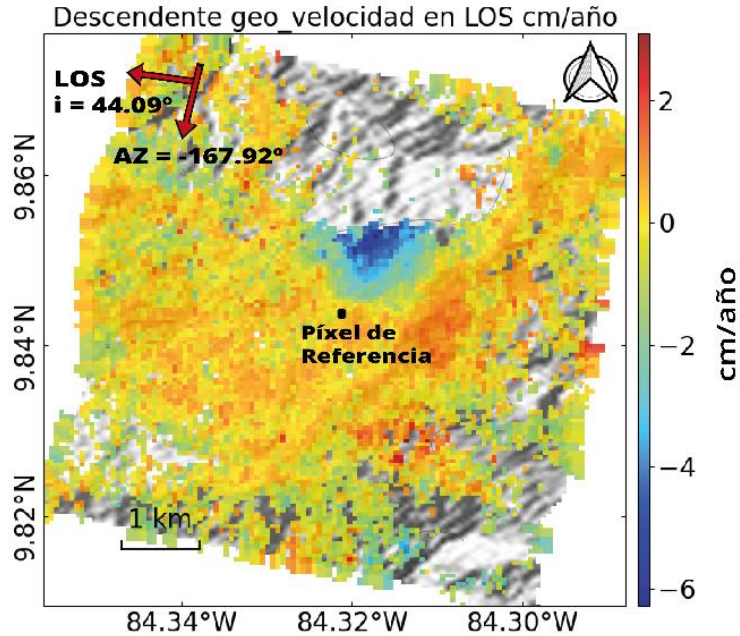
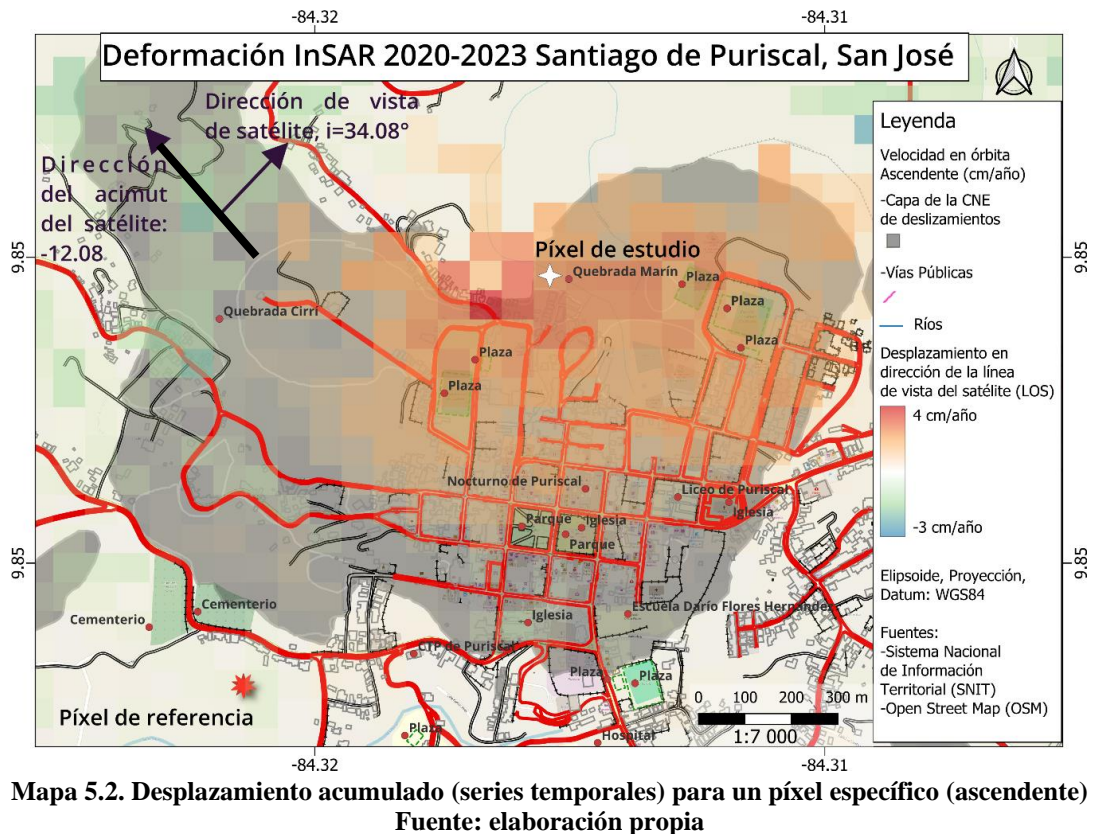
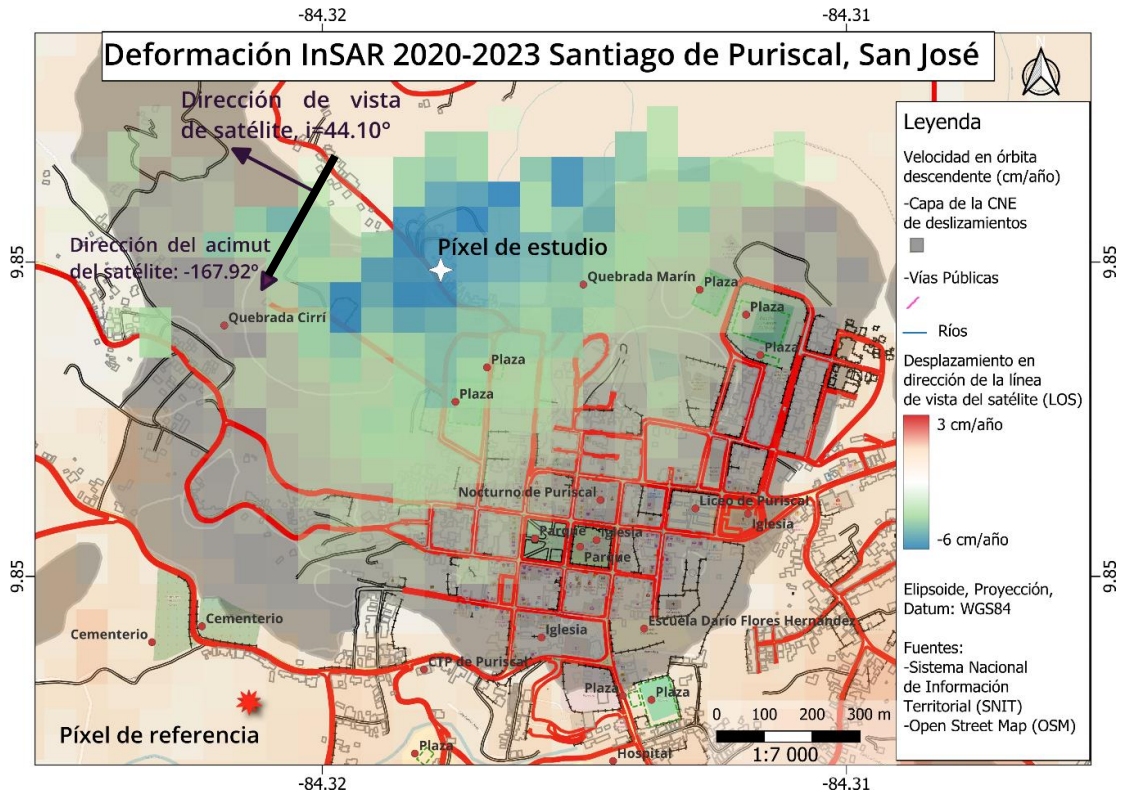


Figura 5.7. Velocidades promedio de desplazamiento en LOS. Órbita descendente, con dirección de $-167,92^\circ$ y un ángulo de incidencia en LOS de $44,09^\circ$.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

Los mapas de las velocidades permiten visualizar los píxeles directamente sobre la ciudad de Santiago de Puriscal. Estos mapas muestran más a detalle el desplazamiento en LOS para esta región. Para la órbita descendente (Mapa 5.1) se puede notar que en la zona sureste de Santiago las velocidades de movimiento permanecen entre -4 y -2 $\text{cm} \pm 2\text{mm}$. La parte noroeste de Santiago por otra parte indica una gran sensibilidad al satélite en descendente, y es donde se concentran los píxeles con mayor velocidad de desplazamiento. En el mapa de velocidad ascendente (Mapa 5.2) se observa que el InSAR tuvo mayor alcance de detección en la zona sureste con respecto a la órbita descendente. Esto se puede visualizar por la mayor presencia de píxeles coherentes que cubren en esta parte de Santiago. Esto confirma que existen un movimiento en toda la ciudad. Al igual que en la órbita descendente los mayores valores de velocidad promedio se localizan en la zona noroeste.



5.5.1. Descomposición de velocidades LOS a horizontal y vertical en Santiago

La limitación InSAR de solo presentar información de desplazamientos en 1D, se elimina al descomponer los datos InSAR de la órbita ascendente y descendente. Utilizando uno de los algoritmos presentes en MintPy ([Fialko, et al., 2001](#); [Wright, et al., 2004](#)), se logró descomponer las velocidades obtenidas en LOS, a velocidades en el componente vertical y horizontal (este-oeste). En la Figura 5.8 se observan los resultados de velocidad para la componente horizontal y en la Figura 5.9 los resultados de velocidad para la componente vertical.

Con respecto a las velocidades en horizontal y vertical resultado de la combinación de orbitas, se obtuvieron ambas velocidades con MintPy. Sin embargo, el tema 3D en InSAR conlleva una matemática más compleja y conocimientos que permitan comprender e interpretar mejor la descomposición de LOS. La Figura 5.8 muestra un movimiento horizontal bastante demarcado, con velocidades negativas de hasta -6 cm/año y hasta -7.5 cm/año. De acuerdo con las velocidades por año, estas coinciden bastante o se mantienen en el rango, con velocidades determinadas en estudios anteriores como en [Agnarsson & Dubois, 1993](#), donde determinan velocidades de entre 5-15 cm/año en dirección noroeste. Por su parte, la Figura 5.9 de la componente vertical indica un movimiento de hundimiento mínimo, con pixeles máximos de entre -2 y -3.30 cm/año. la mayoría de la zona presenta valores de hundimiento menores de entre -2 y -1 cm/año.

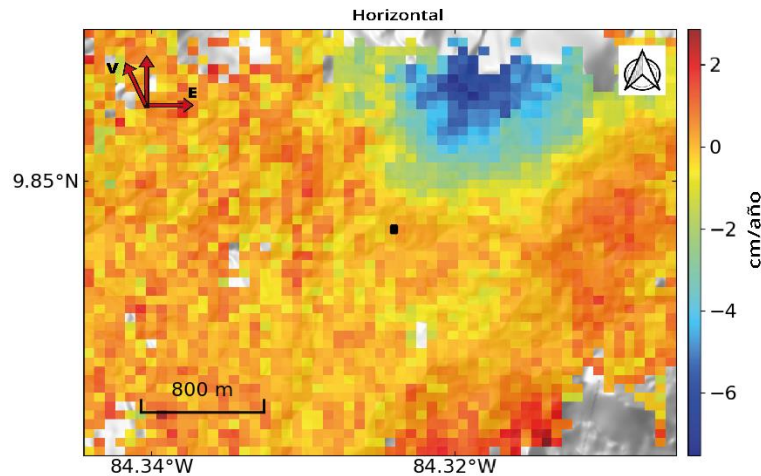


Figura 5.8. Velocidades promedio de desplazamiento en la componente horizontal
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

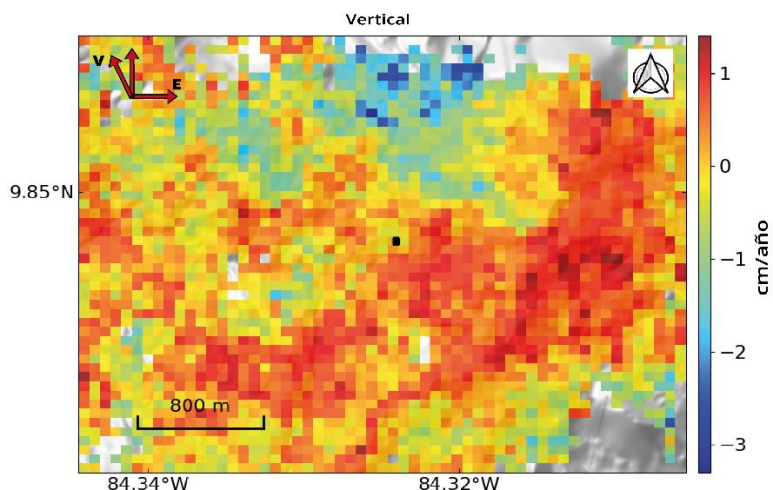


Figura 5.9. Velocidades promedio de desplazamiento en la componente vertical
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

5.6. Serie temporal del punto de estudio

En la Figura 5.10 y Figura 5.11 se marca con un triángulo rojo la primera fecha de referencia y el punto negro corresponde al punto o píxel de referencia. Para la órbita descendente los resultados muestran una notable deformación correspondiente al deslizamiento de Santiago de Puriscal. Este deslizamiento se visualiza en la Figura 5.10 con los pixeles de azul que empieza a aparecer más notablemente a partir de la fecha 2020-09-09, donde inicia la época más fuerte de la estación lluviosa. El movimiento observado es negativo al satélite, inicia con valores cercanos a los -5cm y termina con valores de hasta -10cm para la última fecha de adquisición. Lo que significa un alejamiento de la superficie con respecto al satélite.

La serie temporal de la órbita ascendente se visualiza en la Figura 5.11, el color que representa el movimiento en Santiago de Puriscal cambia para la órbita ascendente. El desplazamiento inicia con un color amarillo que se va tornando rojo conforme avanzan las fechas de adquisición. Esto significa un movimiento opuesto al de la órbita descendente, por ende, el movimiento detectado es positivo. La aparición de movimiento para la serie temporal ascendente inicia más notablemente en la fecha 2020-10-03. En la órbita ascendente la superficie contraria a alejarse del satélite tiene una tendencia de acercamiento hacia él debido acimut de su órbita. Los dos

movimientos de cada órbita al ser opuestos son sinónimo de un movimiento principalmente horizontal.

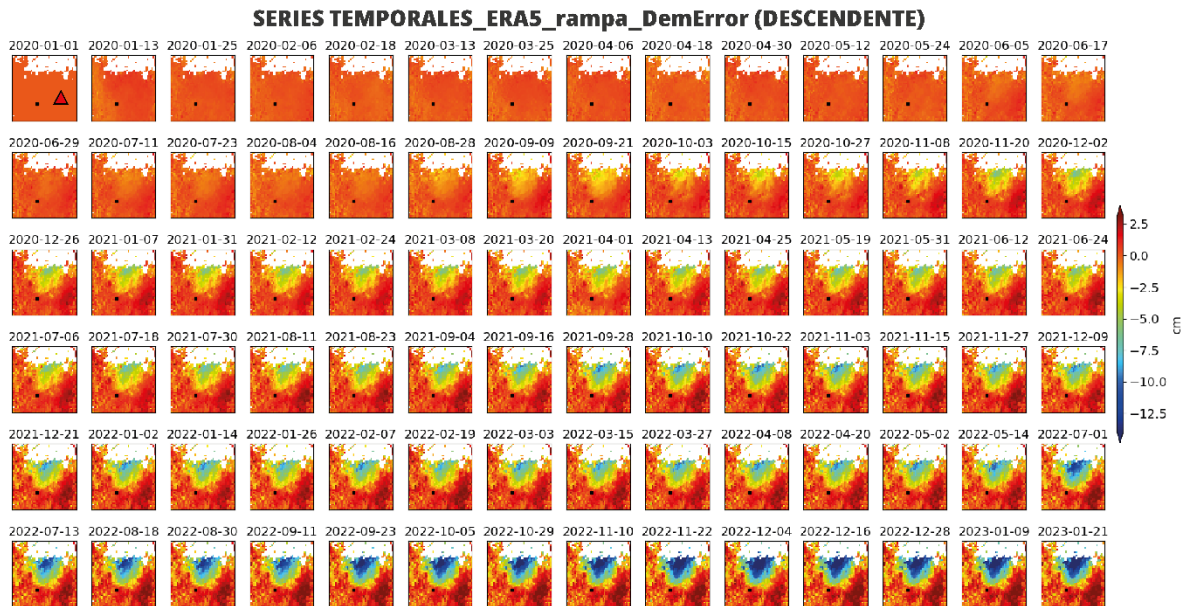


Figura 5.10. Series temporales del desplazamiento LOS en la ciudad de Puriscal desde la fecha de referencia 1 de enero 2020. Los 84 mapas muestran el desplazamiento LOS acumulado entre 1 enero 2020 y el 21 de enero 2023.

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

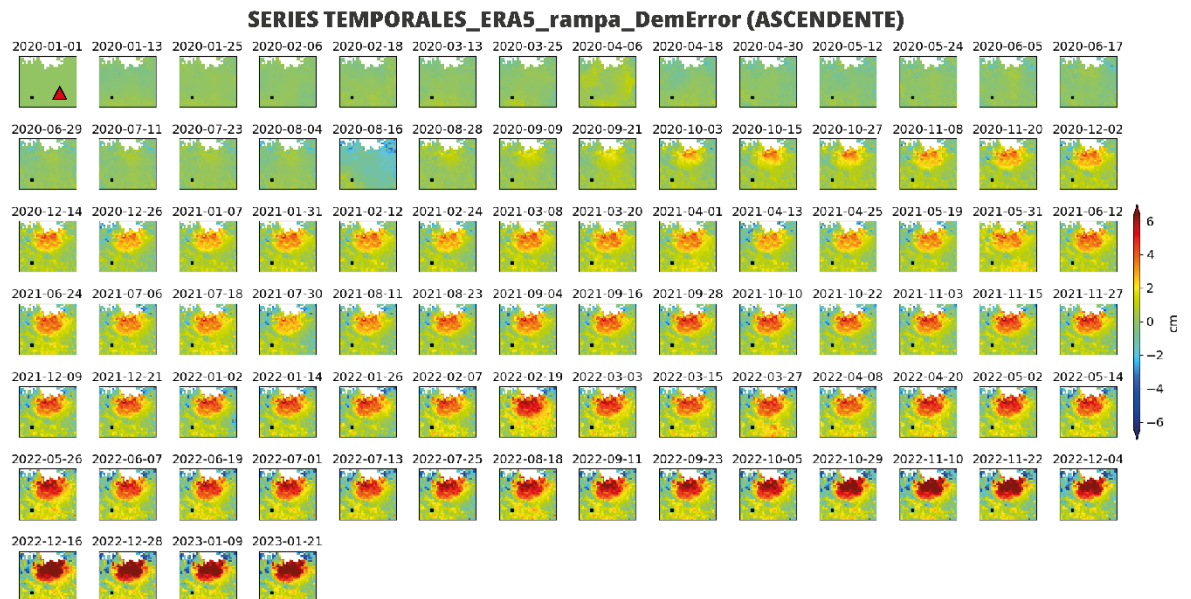


Figura 5.11. Series temporales del desplazamiento LOS en la ciudad de Puriscal desde la fecha de referencia 1 de enero 2020. Los 88 mapas muestran el desplazamiento LOS acumulado entre 1 enero 2020 y el 21 de enero 2023.

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

Trabajo Final de Graduación

Los Gráfico 5.4 y Gráfico 5.5 muestran la evolución de la deformación para el punto de estudio, el valor de la velocidad de desplazamiento de este píxel y su respectiva desviación estándar. Se toma como referencia nuevamente la primera fecha 2020-01-01 para visualizar la evolución completa de la deformación, por lo que se escoge un píxel de la última fecha 2023-01-09. En el Cuadro 5.3 se resumen los datos para los pixeles de estudio.

Número de fecha	Órbita de satélite	Píxel de estudio		Velocidad (cm/año)	Desviación estándar (cm/año)	Coherencia temporal	Coherencia espacial promedio
		Latitud	Longitud				
0 - 82	Descend	9,8518	-84,3177	-5,79	$\pm 0,16$	0,93	0,66
0 - 86	Ascend	9,8516	-84,3153	2,55	$\pm 0,09$	0,95	0,69

Cuadro 5.3. Tabulación de datos para píxel de estudio

Fuente: elaboración propia

En el Gráfico 5.4 se observa la evolución temporal del píxel de estudio en la ciudad de Puriscal para la órbita descendente. Este píxel indica un desplazamiento en LOS negativo, opuesto al satélite y con velocidades de $-5,79 \pm 0,16$ cm/año, estos valores se encuentran según [Agnarsson & Dubois, 1993](#) dentro de los rangos determinados en este estudio del deslizamiento. Además de la tendencia lineal, se detecta deformación transitoria de aceleración positiva o negativa. Estas aceleraciones coinciden las épocas lluviosas, lo que podría significar que el deslizamiento se activa mayormente para estas épocas de precipitaciones, lo que fue documentado en otros deslizamientos, así como en este deslizamiento ([Agnarsson & Dubois, 1993](#)). En la época seca el deslizamiento presenta relativa estabilidad.

En el Gráfico 5.5 se observa la evolución temporal del píxel de estudio en la ciudad de Puriscal para la órbita ascendente. Este píxel indica un desplazamiento en LOS positivo, con acercamiento al satélite y con velocidades de $\sim 2,55 \pm 0,09$ cm/año. Por su parte, al analizar la tendencia lineal de serie temporal son notables ciertos patrones muy interesantes. En este caso la tendencia lineal posee un movimiento positivo, debido que el movimiento en órbita ascendente realiza un acercamiento. La serie temporal en órbita ascendente posee una aceleración significativa para finales de 2020.

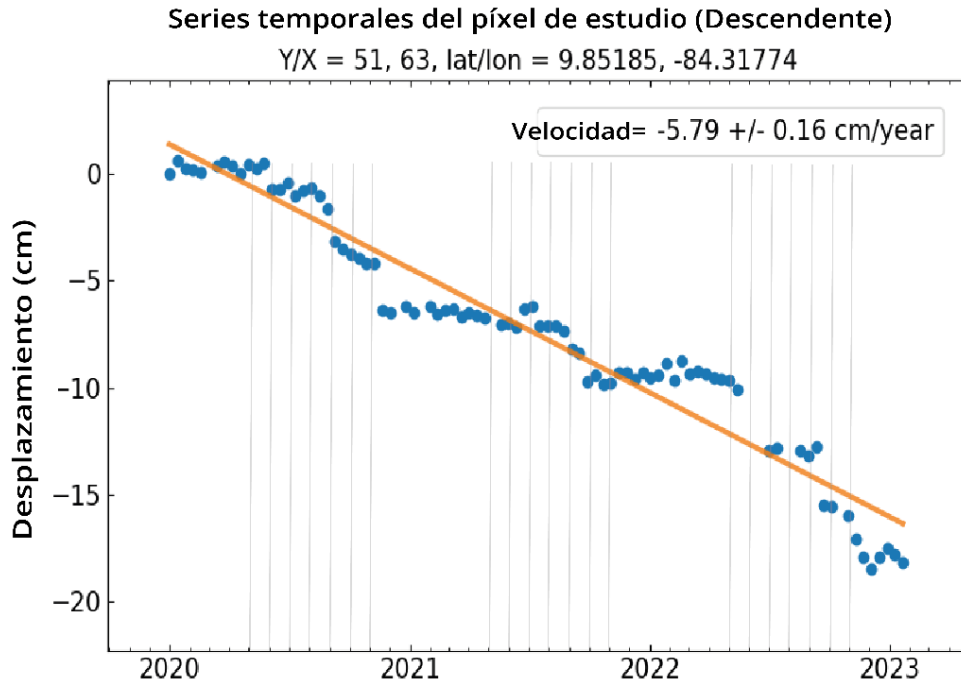


Gráfico 5.4. Series temporales para un píxel específico de estudio (órbita descendente). Las líneas verticales corresponden a los meses en épocas de precipitaciones.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

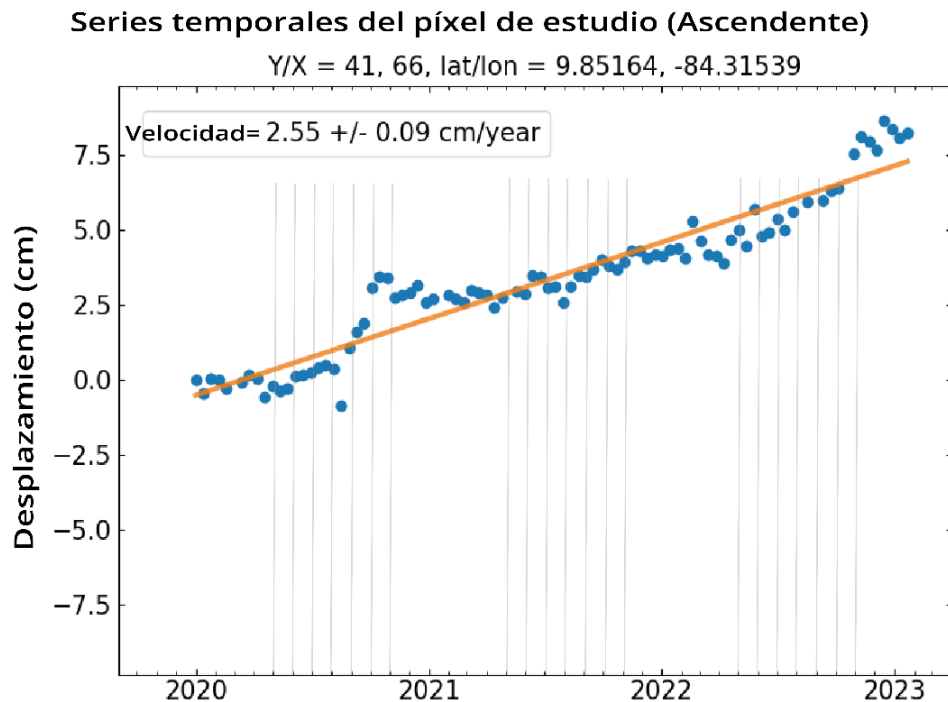


Gráfico 5.5. Series temporales para un píxel específico de estudio (órbita ascendente). Las líneas verticales corresponden a los meses en épocas de precipitaciones.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

5.7. Potencial InSAR en Costa Rica

La coherencia obtenida de lo procesado para la zona de Puriscal se utiliza como herramienta para determinar la factibilidad de aplicar InSAR en diferentes partes de Costa Rica. Principalmente es la coherencia temporal la que puede evaluar inversión de la red, esta es una de medida de fiabilidad más confiable para las series temporales de fase cruda con respecto a la coherencia espacial promedio. Esto debido a que indica el ruido general de decorrelación y el nivel general de tríos de interferogramas no cerrados por residual de fase interferométrica (Yunjun et al., 2019). A pesar de esto se decidió estimar la probabilidad de hacer InSAR con ambas coherencias a razón de su característica de correlación entre ellas. Sin embargo, en resultados se brinda más énfasis en la coherencia temporal. En la Figura 5.12 (a) se muestra el mapa de coberturas de Costa Rica, utilizado para el cálculo de la coherencia al resto del país y en la Figura 5.12 (b) el archivo de coherencia utilizado. La coherencia utilizada abarca más área que la de Puriscal porque tiene el objetivo de contemplar la mayor cantidad de clases de cobertura, y realizar un cálculo de extrapolación con la mayor información espacial posible.

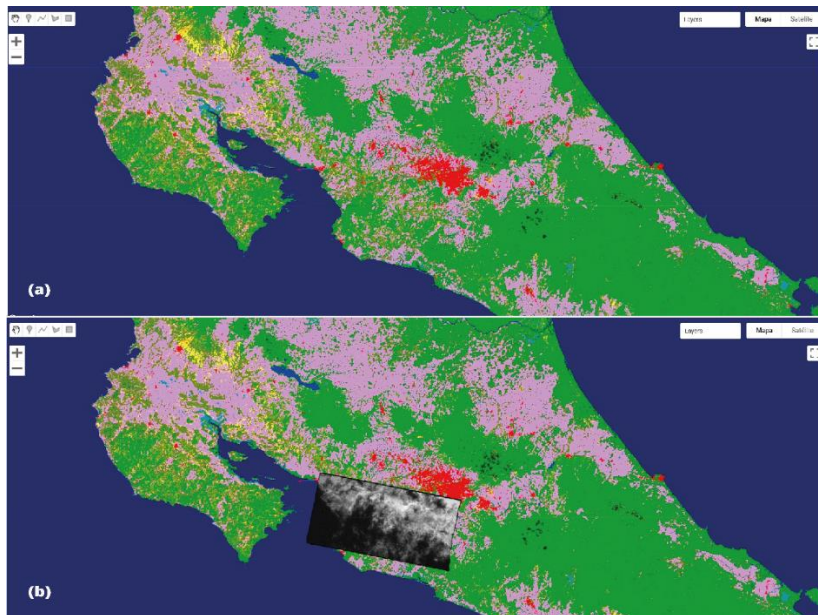


Figura 5.12. Mapa de coberturas de suelo utilizado para la estimación de factibilidad InSAR. En el cuadro superior se presenta el mapa de coberturas usado, extraído de Copernicus y visualizado a través de GEE. En el inferior se visualiza el archivo de coherencia usado para el cálculo.

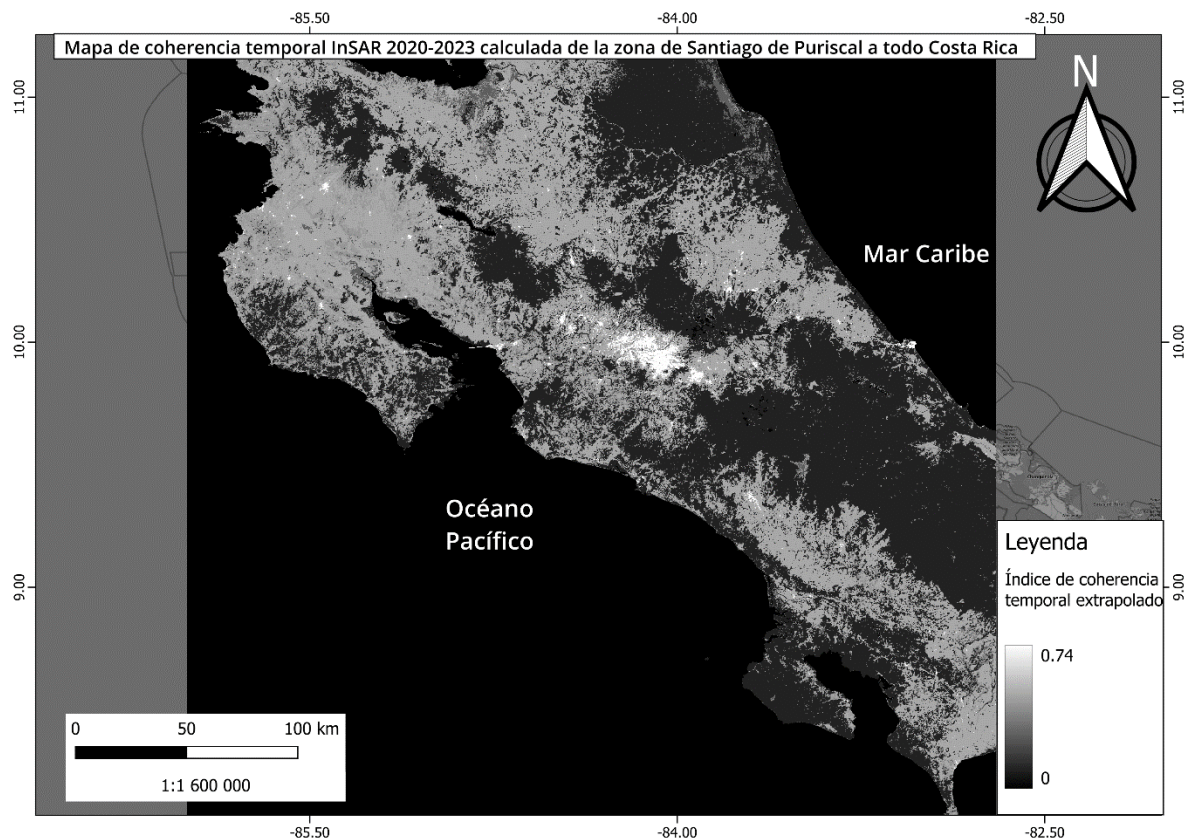
Fuente: elaboración propia

En el Mapa 5.3 se muestra el mapa de coberturas Costa Rica realizado utilizando la coherencia temporal generada por MintPy. Los valores y descripción de píxel para cada clase de suelo en Costa Rica se tabularon en el Cuadro 5.3. Este mapa señala las zonas de bosques cerrados y zonas de abundante vegetación como lugares con nula coherencia por lo que es difícil obtener buenos resultados de InSAR. Por su parte, las zonas de vegetación abierta y zonas de sabana indican valores de coherencia que pueden tener gran factibilidad. Finalmente, las zonas de ciudades y poblaciones con presencia de edificaciones son las que cuentan con los valores más altos de coherencia InSAR.

Para estimar el potencial de hacer InSAR dentro del territorio de Costa Rica, se requiere de un mapa que indique la factibilidad sobre la aplicabilidad de esta técnica. Lo que permite conocer las regiones del país con menores o nulas probabilidades de obtener resultados significativos con InSAR, así como las zonas con regular o elevado potencial de aplicación. Esto sin necesidad de procesar InSAR en todo el país, situación que demandaría elevadas capacidades y requerimientos a nivel computacional. En el Mapa 5.4, Mapa 5.5 y Mapa 5.6 se visualizan los mapas de estimación del potencial InSAR.

En el archivo de coherencia temporal de órbita descendente (Mapa 5.3) el mayor valor fue 0,74 y corresponde a la clase de urbano y edificaciones. Para la órbita ascendente el valor más alto fue de 0.84 en las zonas urbanas. En el Anexo 5 se encuentra el cuadro con los valores de coherencia tabulados para la órbita ascendente. También, como complemento se realizó un mapa de coherencia espacial promedio (Anexo 6). En el Mapa 5.4, Mapa 5.5 y Mapa 5.6 se visualizan los mapas de estimación del potencial InSAR. A nivel general los valores más altos se reducen en comparación con la temporal, esto da como resultado un mapa con tonos más oscuros. La excepción se encuentra en el valor para las zonas urbanas, en la coherencia espacial promedio dicha clase tiene un valor de 0,8. En [Peñaloza & Tocasuche, 2018](#) mencionan una clasificación para los valores de coherencia. En esta clasificación los valores de 0 a 0,2 no son utilizables, los de 0,3 a 0,5 son ruidosos pero factibles, los de 0,5 a 0,7 son factibles y los de 0,7 a 1 muy factibles.

Trabajo Final de Graduación



Mapa 5.3. Coherencia temporal de Costa Rica calculada de los resultados de Puriscal (Descendente)
Fuente: elaboración propia

Clase	Descripción	Coherencia_media
0	"Desconocido. No hay o no hay suficientes datos satelitales disponibles."	0,00
20	"Arbustos. Plantas leñosas perennes con tallos persistentes y leñosos y sin ningún tallo principal definido que tenga menos de 5 m de altura. El follaje de los arbustos puede ser de hoja perenne o caducifolia."	0,52
30	"Vegetación herbácea. Plantas sin tallo persistente o brotes por encima del suelo y careciendo de una estructura firme definida. La cobertura de árboles y arbustos es menor superior al 10 %."	0,50
40	"Vegetación cultivada y manejada / agricultura. Tierras cubiertas con cultivos temporales seguidos de cosecha y un período de suelo desnudo (por ejemplo, sistemas de cultivo simple y múltiple). Tenga en cuenta que los cultivos leñosos perennes se clasificarán como los Tipo de cobertura de suelo forestal o arbustivo."	0,49
50	"Urbano / construido. Terreno cubierto por edificios y otras estructuras hechas por el hombre."	0,74
60	"Vegetación desnuda / escasa. Tierras con suelo, arena o rocas expuestas y nunca a más del 10 % de cubierta vegetal durante cualquier época del año."	0,00
70	"Nieve y hielo. Aterriza bajo la nieve o la capa de hielo durante todo el año."	0,00

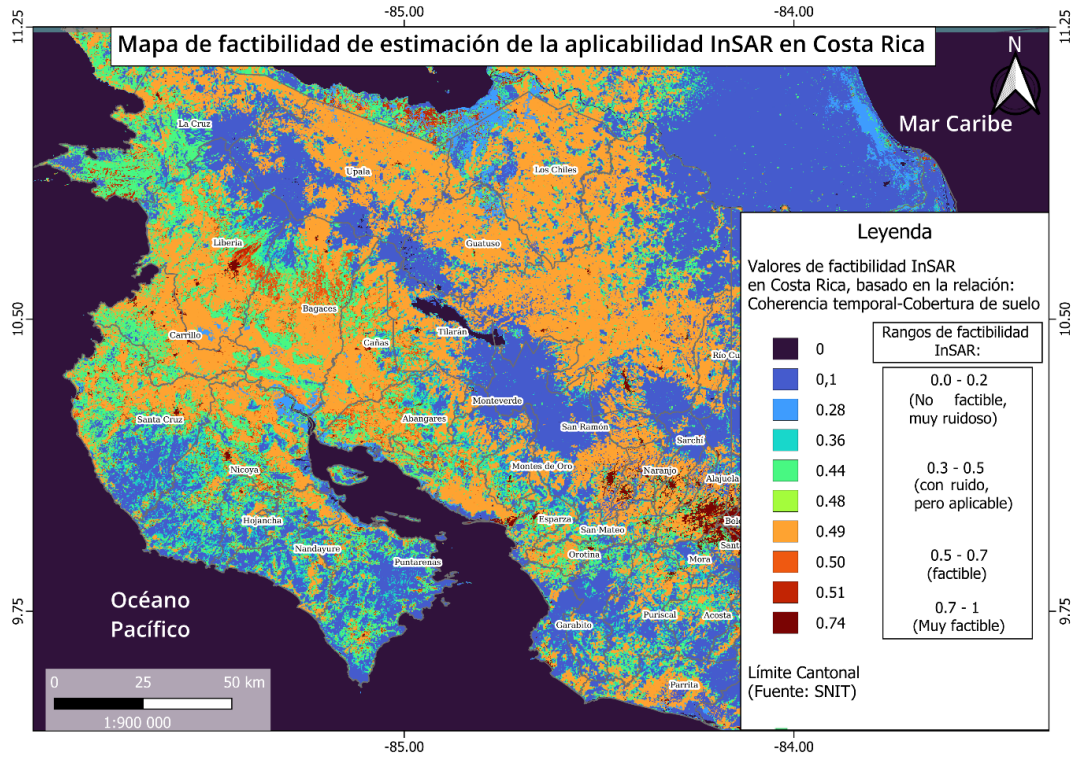
Trabajo Final de Graduación

80	"Cuerpos de agua permanentes. Lagos, embalses y ríos. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada."	0,00
90	"Humedal herbáceo. Tierras con una mezcla permanente de agua y herbáceas o vegetación leñosa. La vegetación puede estar presente tanto en la sal, como en la agua salobre o dulce."	0,28
100	"Musgo y líquenes."	0,00
111	"Bosque cerrado, hoja de aguja de hoja perenne. Dosel arbóreo >70 %, quedan casi todos los árboles de hoja de aguja Verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,00
112	"Bosque cerrado, hoja ancha siempre verde. Dosel arbóreo >70 %, permanecen casi todos los árboles de hoja ancha verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,10
113	"Bosque cerrado, hoja de aguja caducifolia. La copa de los árboles >70 %, consiste en hojas de aguja estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de hoja-on y leaf-off Períodos."	0,10
114	"Bosque cerrado, hoja ancha caducifolia. El dosel arbóreo >70 %, consiste en hojas anchas estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de períodos de arranque y apagado de hojas."	0,10
115	"Bosque cerrado, mixto."	0,10
116	"Bosque cerrado, que no coincide con ninguna de las otras definiciones."	0,10
121	"Bosque abierto, hoja de aguja de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja de aguja permanecen verdes todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,00
122	"Bosque abierto, hoja ancha de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja ancha permanecen verdes durante todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,36
123	"Bosque abierto, hoja de aguja caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja de aguja con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado."	0,00
124	"Bosque abierto, hoja ancha caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja ancha con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado."	0,49
125	"Bosque abierto, mixto."	0,48
126	"Bosque abierto, que no coincide con ninguna de las otras definiciones."	0,44
200	"Océanos, mares. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada."	0,00

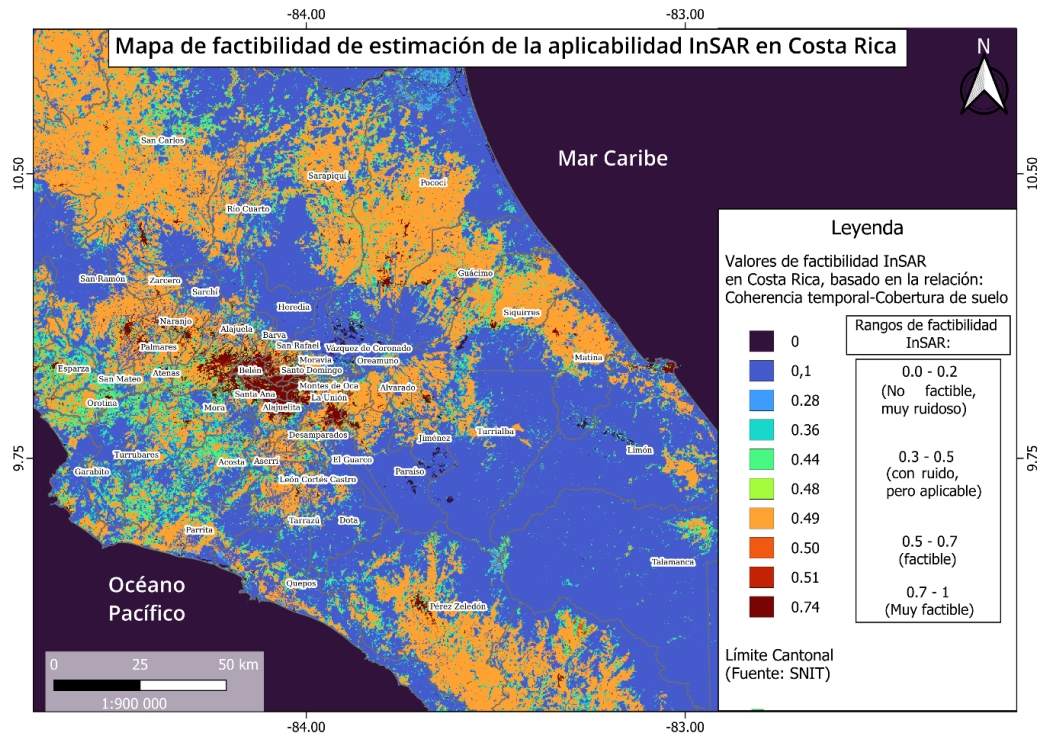
Cuadro 5.4. Tabla de atributos del mapa de coherencia temporal, con valores de coherencia media para las diferentes clases de cobertura de suelo.

Fuente: elaboración propia

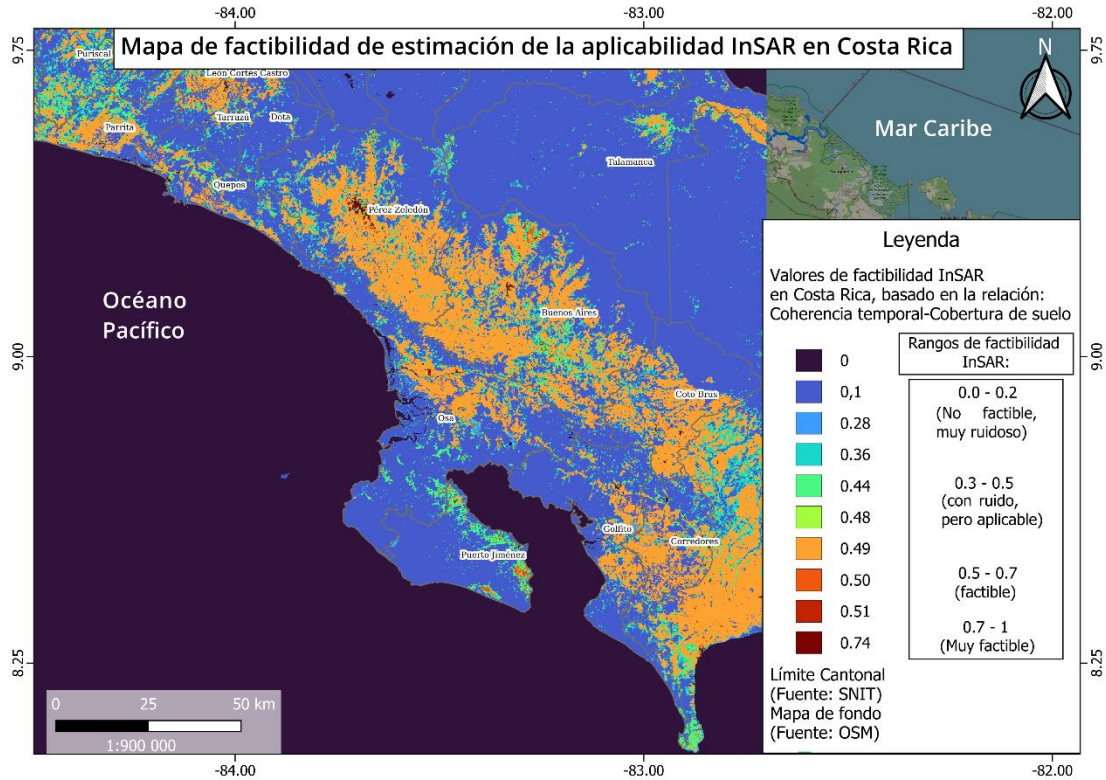
Trabajo Final de Graduación



Mapa 5.4. Factibilidad de aplicabilidad InSAR, zona noroeste de Costa Rica
Fuente: elaboración propia



Mapa 5.5. Porcentajes de probabilidad de aplicabilidad InSAR, zona central sur de Costa Rica
Fuente: elaboración propia



Mapa 5.6. Mapa de porcentajes de probabilidad de aplicabilidad InSAR, zona sur de Costa Rica
Fuente: elaboración propia

5.8. Descubrimiento de deslizamiento de Jaris

Finalmente, como parte del apartado de estimación del potencial InSAR en Costa Rica, se presenta acá su gran capacidad para el monitoreo de deslizamientos. Durante este trabajo de tesis, se llevó a cabo varios procesamientos en la zona de estudio, alguno de estos procesamientos abarcó un área mayor que la Puriscal, como se puede ver en los mapas de coherencia. Para obtener mapas de coherencia extrapolados con valores más cercanos a la realidad, se amplió la zona procesada, con tal de abarcar la mayor cantidad de clases de cobertura suelo. Resultado de estos procesamientos, específicamente para la órbita descendente, se detectó una mancha roja al noreste Puriscal (Figura 5.13), justo donde se ubica el distrito Jaris del cantón de Mora.

Contrario a Puriscal, que muestra un alejamiento de la superficie con respecto al satélite para la órbita descendente, en Jaris se presenta un movimiento con tendencia de acercamiento al satélite (Figura 5.13). Se encontraron velocidades positivas de hasta 8

cm \pm 0,14 cm. Si bien para la órbita ascendente este movimiento no fue perceptible, la órbita descendente si pudo capturar perfectamente este deslizamiento. Posterior a conversaciones con la CNE y la Municipalidad del cantón de Mora, se confirmó la existencia de dicho deslizamiento. Además de que hubo gran congruencia entre los datos InSAR, y los datos recabados por el geólogo de la Municipalidad de Mora.

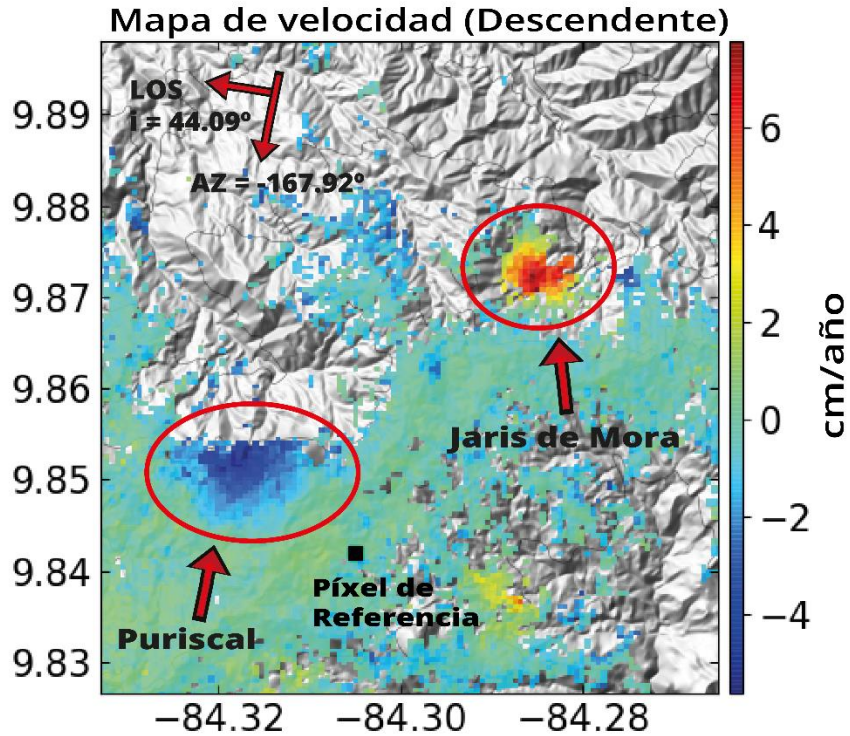


Figura 5.13. Mapa de velocidad que abarca los deslizamientos de Puriscal y Jaris de Mora.
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

Capítulo 6: Conclusiones

En este trabajo se buscó estimar el potencial de aplicar InSAR en Costa Rica para el monitoreo de deslizamientos, usando como prueba de estudio el deslizamiento de Santiago de Puriscal. Buscando así, obtener resultados congruentes que confirmen el desplazamiento existente en la superficie de Santiago de Puriscal. Todo este proceso InSAR se realizó utilizando dos herramientas científicas que corresponden a los softwares ISCE y MintPy. Por lo tanto, el proceso metodológico de como instalar y utilizar ambos softwares quedó plasmado en un manual.

Los resultados de investigación, y compilación de información se materializan en el manual realizado, que resume una metodología InSAR-SBAS usando ISCE y MintPy. Este manual permite que cualquier persona con pocos o nulos conocimientos efectúe con éxito un procesamiento InSAR. Los resultados obtenidos de este manual son unas series temporales que pueden ser utilizadas para monitorear el desplazamiento de la superficie en Costa Rica. El manual facilita el proceso de procesar un enfoque de series temporales InSAR desde cero. Las series temporales InSAR son una herramienta que puede determinar la velocidad de movimiento en deslizamientos, la inflación o subsidencia de la superficie. Esto será posible para toda superficie que tenga elevada correlación.

A través del procesamiento InSAR-SBAS llevado a cabo en Santiago de Puriscal se demuestra que esta tecnología es efectiva para el monitoreo de deslizamientos dentro del territorio nacional. A pesar de las condiciones que presenta Costa Rica por su ubicación en zona tropical, el InSAR logra detectar movimiento real, si se eliminan las fuentes de ruido a través de series temporales. Los buenos resultados en la detección del deslizamiento de Puriscal, y la detección de uno nuevo en Jaris de Mora son prueba de la eficacia que posee esta técnica.

Las velocidades en Santiago de Puriscal demuestran que se mantienen entre los -6 y -2 cm/año ± 2 mm en la órbita descendente, mientras que las velocidades en la órbita

ascendente se mantienen entre los 1,5 y 4 cm/año \pm 2mm. Las características de velocidades opuestas entre orbitas es una señal clara de que se estudia un deslizamiento de movimiento principalmente horizontal. Los resultados obtenidos al descomponer las velocidades en componentes horizontal y vertical coinciden con lo indicado. El archivo de velocidades horizontales muestra velocidades negativas de hasta -7,5 cm/año, mientras que el movimiento en vertical presente menor movimiento. Las velocidades en la componente vertical muestran un pequeño hundimiento en la superficie con pixeles de valores negativos de entre -3,30 y -1 cm/año. Al eliminar la limitante de 1D en InSAR, el conjunto de todos los resultados de MintPy permiten determinar un estudio cuantitativo con bastante precisión sobre el comportamiento de un deslizamiento a largo plazo.

Los mapas de coherencia para todo el país son resultado del cálculo de extrapolación de los pixeles de coherencia temporal y espacial, hacia los pixeles de la capa de cobertura de suelos. Los resultados mostraron un cálculo coherente donde se refleja una distribución de valores de coherencia esperada. El mapa de coherencia refleja las zonas aplicables y no aplicables con InSAR utilizando los rangos de factibilidad elegidos, y basado en los resultados de Puriscal. El tema de factibilidad de monitoreo en cuanto a deslizamientos queda confirmado con los resultados obtenidos en Puriscal y el deslizamiento de Jaris deslizamiento fue detectable. Ambos se encuentran en zonas de factibilidad InSAR, sin embargo, Jaris tiene menor sensibilidad en la órbita descendente.

Algo muy interesante surge al comparar los valores mínimos y máximos de coherencia entre los resultados finales donde se acorto al máximo el área abarcada. Con respecto a uno de los resultados previos cuando se utilizó un área más amplia, como en el caso del archivo de coherencia, que fue el utilizado para el cálculo de los mapas de factibilidad. El hecho de que abarcará más área beneficia el abarcar más cantidad de coberturas de suelo, que las que abarca la delimitación específica para Santiago de Puriscal. El punto, es que los resultados de coherencia disminuyeron cuando el área procesada fue más grande. En el Anexo 9 y Anexo 10 presentan los gráficos

comparando los resultados de la red SBAS y del gráfico con los valores mínimos y máximos. Ambos gráficos revelan valores por arriba de 0,4 para los resultados cuando se delimitó un área más pequeña y valores promedio menores a 0,4 para cuando se abarco más área.

Capítulo 7: Recomendaciones

-El manejo de sistemas Linux y distribuciones como Ubuntu, otorga a los usuarios que deseen iniciar a procesar InSAR, una ventaja que facilita el aprendizaje de uso con diferentes programas que funcionan desde una terminal de comandos. Estos conocimientos no solo favorecen el uso de programas InSAR, sino que cualquier otro tipo de software científico.

-Se recomiendo continuar procesando con los softwares de ISCE y MintPy, debido a que los resultados para el monitoreo de eventos geológicos, se ha demostrado que son factibles. El manual realizado permite a cualquier usuario llevar a cabo un procesamiento InSAR.

-Al realizar un procesamiento InSAR es importante delimitar bien el área de la zona de estudio, se demostró que entre más pequeña la zona, mejores resultados de coherencia son obtenidos. Lo que beneficia la consistencia de la red SBAS.

-Se deben conocer los diferentes números de subfajas en las diferentes imágenes SAR que cubren Costa Rica, para prevenir errores a la hora de indicar los datos y parámetros del procesamiento, con respecto al área de estudio.

-Para seleccionar el punto de referencia para el cálculo de velocidades, se recomienda buscar un punto que posea valores elevados de coherencia, y ubicado en zonas que menor afectación atmosférica.

-Cuando las capacidades computacionales lo permiten, es de gran conveniencia realizar el procesamiento del objeto de estudio en las dos órbitas, con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información sobre el movimiento existente.

-Es recomendable procesar en computadoras con capacidades elevadas de procesamiento, debido a que procesar solo algunas imágenes SAR puede requerir horas

Trabajo Final de Graduación

con una memoria RAM de 8GB, por lo que se considera importante utilizar computadoras de 16 RAM, o más en caso de ser posible.

Referencias

- Acton, S., Singh, C. (2014). Sinkhole Detection, Landslide and Bridge Monitoring for Transportation Infrastructure by Automated Analysis of Interferometric Synthetic Aperture Radar Imagery. Obtenido de <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/37956>
- Agnarsson, M., & Dubois, T. (1993). Deformation analysis of the Puriscal landslide. Obtenido de <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20V4/pdf/eng/doc2291/doc2291.htm>
- Albiol, D., Iglesias, R., Sánchez, F., & Duro, J. (2014). Improved characterization of slow-moving landslides by means of adaptive NL-InSAR filtering. Obtenido de <https://doi.org/10.1117/12.2067357>
- Attema, E., Bargellini, P., Edwards, P., Levrini, G., Lokas, S., Moeller, L., Rosich-Tell, B., Secchi, P., Torres, R., Davidson, M., & Snoeij, P. (2007). Sentinel-1: The radar mission for GMES operational land and sea services. ESA Bulletin, 131. Obtenido de https://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin131/bul131a_attema.pdf
- Aversa, S., Cascini, L., Picarelli, L., & Scavia, C. (2016). Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Obtenido de <https://doi.org/10.1201/9781315375007>
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/263058382_Synthetic_Aperture_Radar_Interferometry
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1166596>

- Burgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. Obtenido de <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Biggs, J., Wright, T., Lu, Z., & Parsons, B. (2007). Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1165–1179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2007.03415.x>
- Chen, X., Tessari, G., Fabris, M., Achilli, V., & Floris, M. (2021). Comparison Between PS and SBAS InSAR Techniques in Monitoring Shallow Landslides. Obtenido de *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk Vol. 3. Monitoring and Early Warning*: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-60311-3>
- Chunga, K., Quiñónez, M. F., Huaman, F., Besenzon, D., Mulas, M., Gárces, D., Michetti, A. M. (2016). *Geología de Terremotos y Tsunamis*. Obtenido de 978-9942-9927-7-2
- Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., & Tapete, D. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. Obtenido de *Remote Sensing*: <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
- Comisión Nacional de Emergencia. (s.f.). AMENAZAS DE ORIGEN NATURAL CANTON DE PURISCAL.
- De Zan, F., & Monti Guarnieri, A. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>
- Ebmeier, S. K., Biggs, J., Mather, T. A., Elliott, J. R., Wadge, G., & Amelung, F. (2012). Medición de grandes cambios topográficos con InSAR: espesores de lava, tasa de extrusión y tasa de hundimiento en el volcán Santiaguito, Guatemala. Obtenido de

Cartas de Ciencias de la Tierra y Planetarias, 335-336. págs. 216-225. ISSN 0012-821X: <https://centaur.reading.ac.uk/34473/>

- Ebmeier, S. K., Biggs, J., Mather, T. A., & Amelung, F. (2013). Applicability of InSAR to tropical volcanoes: insights from Central America. *Geological Society Special Publication*, 380(1), 15–37. <https://doi.org/10.1144/sp380.2>
- Ebmeier, S. K., Biggs, J., Mather, T. A., Wadge, G., & Amelung, F. (2010). Steady downslope movement on the western flank of Arenal volcano, Costa Rica. Obtenido de *Geochemistry Geophysics Geosystems*: <http://dx.doi.org/10.1029/2010GC003263>
- Ebmeier, S. K., Biggs, J., Muller, C., & Avard, G. (2014). Thin-skinned mass-wasting responsible for widespread deformation at Arenal volcano. *Frontiers in earth science*, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00035>
- ESA, Agencia Espacial Europea. (2021). Sentinel misiones, Sentinel-1. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- ESA, A. E. (s.f.). Descripción de software SNAP. Obtenido de <https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>
- Fattahi, H., & Amelung, F. (2015). InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 120(12), 8758–8773. <https://doi.org/10.1002/2015jb012419>
- Ferrer, L. (2016). Deformacion Observada a Través de Radar Interferométrico de Apertura Sintética InSAR del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/1992/15500>

- Ferretti, A. (2014). Satellite InSAR Data Reservoir Monitoring from Space. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/260986568_Satellite_InSAR_Data_Reservoir_Monitoring_from_Space
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remot Sen.* Obtenido de <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
- Fialko, Y., Simons, M., & Agnew, D. (2001). The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 MW7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 28(16), 3063–3066. <https://doi.org/10.1029/2001gl013174>
- Francoso, M., Pizarro, I., de Almeida, L., & da Silva, M. (2019). Nivelación Geométrica de Precisión para el Control de Desplazamientos Verticales en la Recuperación y Refuerzo de una Viga de Concreto, Estudio de Caso. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732019000200205>
- Gárces Muñoz, M. (2020). Aplicación de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) y análisis de series de tiempo SBAS, para tres casos de estudio en Chile Central. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177567>
- Garcia Meza, I. F. (2021). Desplazamientos superficiales 3D del Centro de Dispersión Cerro Prieto usando InSAR. Obtenido de Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3530>

- Gómez Vázquez, Á., & Mendoza Rosas, A. T. (2021). Geodesia aplicada al monitoreo de desplazamientos de una ladera inestable y la influencia de la precipitación, durante el período 2008-2011, Teziutlán, Puebla. Obtenido de <https://doi.org/10.35830/cn.vi82.559>
- Gurrola, E., Rosen, P. A., Sacco, G. F., Seliga, W., Zebker, H., Simons, M., & Sandwell, D. (2010). InSAR scientific computing environment. American Geophysical Union Meeting. Obtenido de https://esto.nasa.gov/conferences/estf2011/papers/Gurrola_ESTF2011.pdf
- Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.-P., & Peltzer, G. (2011). Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data: CORRECTING INSAR WITH ERA-INTERIM. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011gl048757>
- JPL/Caltech, ISCE team (2016). Overview of S1A TOPS processing with ISCE-topsApp.py. Obtenido de https://github.com/isce-framework/isce2-docs/blob/unavco2020/topsApp_ISCE_20160418.pdf
- Kang, J., Wang, Y., Körner, M., & Zhu, X. (2017). Robust Object-Based Multipass InSAR Deformation Reconstruction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55, 4239-4251. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2684424>
- Hermosilla Diaz, D. E. (2016). Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) Aplicada al Estudio del Movimiento en Laderas Aledañas al Volcán Calbuco con Ayuda de Imágenes Sntinel-1A. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/22701>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>

- Hormazábal Maluenda, J. A. (2021). Evolución espacio-temporal de la deformación posterior al terremoto de Illapel 2015 (Mw 8.3) mediante datos GNSS, INSAR y el Método EPIC. Obtenido de https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2021/05/Tesis_Joaquin_Hormazabal_v_final-wecompress.com.pdf
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2021). Monitoreo geodésico y fotogramétrico del deslizamiento de Alto Siguan a octubre 2021. Distritos Majes y San Juan de Siguan, provincias Caylloma y Arequipa, departamento de Arequipa. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3494>
- Li, S., Xu, W., & Li, Z. (2021). Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. Obtenido de *Geodesy and Geodynamics*: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>
- Mora Páez, H., Díaz Mila, F., & Cardona, L. (2020). Mapping Land Subsidence in Bogotá, Colombia, Using the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Technique with TerraSAR-X Images. Obtenido de <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.16>
- Mora, O., Ordoqui, P., & Iglesias, R. (2016). Earthquake rapid mapping using ascending and descending Sentinel-1 TOPSAR interferograms. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.266>
- Muller, C. (2019). Topógrafos aumentan sus ganancias con el monitoreo geodésico. Obtenido de Geodesta: <https://geodesta.com/monitoreo-geodesico/>
- Muller, C., Biggs, J., Ebmeier, S. K., Mothes, P., Palacios, P. B., Jarrín, P., Edmonds, M., & Ruiz, M. (2018). Temporal evolution of the magmatic system at Tungurahua Volcano, Ecuador, detected by geodetic observations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 368, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.004>

- Nikaein, T., Lannini, L., Molijn, R. A., & López Dekker, P. (2021). Sobre el valor de sentinel-1 InSAR Coherence Time-Series para la clasificación de la vegetación. Obtenido de Remote Sensing: <https://doi.org/10.3390/rs13163300>
- O'Connor, P. J. G. (2020). "Metodología para ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas con datos GNSS". Edu.Ar. Retrieved June 24, 2024, from https://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2020/11/Guille-OConnor-Tesis_compressed.pdf
- Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing: Official Publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 115, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Pacheco, J. F., Martínez, M., Muller, C., & Avar, G. (2014). Estado de los Volcanes de Costa Rica 2014 Resumen Anual Oficial. Obtenido de OVSICORI: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/descargas/category/5-ev2014>
- Paniagua Jiménez, D. N., Valverde Calderón, J., Molina Calderón, P., & Barrantes Castillo, G. (2021). Aplicación del método Persistent Scatterer Interferometry (PSI) en la ciudad de Limón, Costa Rica. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/14328>
- Papoutsis, I., Kontoes, C., Alatza, S., Apostolakis, A., & Loupasakis, C. (2020). InSAR Greece with parallelized persistent scatterer interferometry: A national ground motion service for big Copernicus Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 12(19), 3207. <https://doi.org/10.3390/rs12193207>
- Pepe, A., & Lanari, R. (2006). On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing: A Publication of the IEEE
Geoscience and Remote Sensing Society, 44(9), 2374–2383.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2006.873207>

- Peñaloza, L. K., & Tocasuche, N. D. (2018). Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias norte y valderrama del departamento de Boyacá Colombia. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13777>
- Peraldo, G., & Molina, F. (1993). Reconstrucción historica del deslizamiento de Santiago de Puriscal. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/13273/12543>
- Podest, E. (2017). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. Programa de Entrenamiento de Teledetección Aplicada de la NASA (ARSET). Obtenido de <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session1-SAR-Spanish.pdf>
- Poreh, D., & Cabral Cano, E. (2021). Evaluación de hundimientos de la Ciudad de México de InSAR y LandSat ETM+ con CGPS y SVM. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00179-x>
- Prats-Iraola, P., Scheiber, R., Marotti, L., Wollstadt, S., & Reigber, A. (2012). TOPS Interferometry With TerraSAR-X. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178247>
- Ramón Escolano, N., & López Espín, J. (2016). Econometría. Series Temporales y Modelos de Ecuaciones Simultáneas. Obtenido de 978-84-16024-42-1
- Rosen, P. A., Gurrola, E., Sacco, G. F. & Zebker. H (2012). The InSAR Scientific Computing Environment. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6217174>

- Rosen, P. (2021). EarthScope2023/1.3_InSAR_theory/InSAR.ipynb at main · parosen/Geo-SInC. Obtenido de https://github.com/parosen/Geo-SInC/blob/main/EarthScope2023/1.3_InSAR_theory/InSAR.ipynb
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodríguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/838084>
- Sakar, N., Brcic, R., Gonzalez, F. R., & Yague-Martinez, N. (2015). An advanced co-registration method for TOPSAR interferometry. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- Sánchez, C., Monells, D., Manso, A., & Farías, E. (2016). Aplicación de metodología InSAR en la detección de deformaciones en el cráter de subsidencia y entorno minero. Caso de Estudio: Codelco Mina Andina. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/316787763_Aplicacion_de_metodologia_InSAR_en_la_deteccion_de_deformaciones_en_el_crater_de_subsidencia_y_entorno_minero_Caso_de_Estudio_Codelco_Mina_Andina
- Soriano Salvador, E., & Guardiola Múzquiz, G. (2022). Fundamentos de sistemas operativos: una aproximación práctica usando Linux. Universidad Rey Juan Carlos Obtenido de <http://hdl.handle.net/10115/20175>
- Stallings, W. (2005). Sistemas operativos: aspectos internos y principios de diseño. 5ª ed. Madrid: Pearson Educación. ISBN 84-205-4462-0. http://ingenio.upm.es/permalink/f/1r9qcid/34UPM_ALMA2167791630004212
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos: análisis geotécnicos. V. 1. Universidad de Santander. Obtenido de 9789588504032

- UNESCO. (2012). Guía para la implementación y sostenibilidad de Sistemas de Alerta Temprana ante Deslizamientos (SATD) en América Central. Obtenido de <https://dipecholac.net/docs/files/144-guiasatdeslizamientos.pdf>

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

- Wright, T. J., Parsons, B. E., & Lu, Z. (2004). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, 31(1). <https://doi.org/10.1029/2003gl018827>

- Xu, Y., Lu, Z., & Kim, J.-W. (2021). P-Band InSAR for Geohazard Detection over Forested Terrains: Preliminary Results. Obtenido de Remote Sens: <https://doi.org/10.3390/rs13224575>

- Yunjun, Z., Fattahi, H. (2023). EarthScope2023/1.3_InSAR_theory/InSARtheory.pdf at main · parosen/Geo-SInC. Obtenido de https://github.com/parosen/Geo-SInC/blob/main/EarthScope2023/5.2_Intro_to_MintPy/smallbaselineApp_aria.ipynb.

- Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>

- Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., & Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 123(10), 9202–9222. <https://doi.org/10.1029/2017jb015305>

- Yague-Martinez, N., Prats-Iraola, P., Rodríguez Gonzalez, F., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>

- Zebker, H., Hensley, S., Shanker, P., & Worthan, C. (2010). Geodetically Accurate InSAR Data Processor. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2051333>
- Zhang, L., Dai, K., Deng, J., Ge, D., Liang, R., Li, W., & Xu, Q. (2021). Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR. Obtenido de Remote Sens: <https://doi.org/10.3390/rs13183662>

Anexos

Anexo 1. Cuadro de valores de RMS para fecha de adquisición (descendente)

Fuente: elaboración propia

Fecha	RMS (m)
20200101	0,0054
20200113	0,0045
20200125	0,0035
20200206	0,0032
20200218	0,0032
20200313	0,0029
20200325	0,0032
20200406	0,0030
20200418	0,0035
20200430	0,0032
20200512	0,0035
20200524	0,0034
20200605	0,0028
20200617	0,0031
20200629	0,0035
20200711	0,0035
20200723	0,0034
20200804	0,0041
20200816	0,0038
20200828	0,0038
20200909	0,0034
20200921	0,0040
20201003	0,0034
20201015	0,0036
20201027	0,0036
20201108	0,0037
20201120	0,0046
20201202	0,0047

Fecha	RMS (m)
20201226	0,0049
20210107	0,0047
20210131	0,0049
20210212	0,0044
20210224	0,0044
20210308	0,0040
20210320	0,0037
20210401	0,0077
20210413	0,0036
20210425	0,0042
20210519	0,0035
20210531	0,0036
20210612	0,0037
20210624	0,0051
20210706	0,0035
20210718	0,0047
20210730	0,0031
20210811	0,0034
20210823	0,0031
20210904	0,0032
20210916	0,0036
20210928	0,0046
20211010	0,0032
20211022	0,0037
20211103	0,0040
20211115	0,0036
20211127	0,0036
20211209	0,0034

Fecha	RMS (m)
20211221	0,0033
20220102	0,0041
20220114	0,0033
20220126	0,0041
20220207	0,0034
20220219	0,0064
20220303	0,0046
20220315	0,0049
20220327	0,0044
20220408	0,0045
20220420	0,0046
20220502	0,0050
20220514	0,0043
20220701	0,0045
20220713	0,0036
20220818	0,0032
20220830	0,0030
20220911	0,0037
20220923	0,0033
20221005	0,0033
20221029	0,0029
20221110	0,0030
20221122	0,0045
20221204	0,0060
20221216	0,0034
20221228	0,0037
20230109	0,0033
20230121	0,0039

Trabajo Final de Graduación

Anexo 2. Cuadro de datos de valores de coherencia espacial promedio, separación temporal de líneas base, separación en metros de línea base perpendicular y número de interferogramas (descendente)

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

Fecha	Promedio	Btemp/días	Bperp/m	Número
20200101_20200113	0,531	12	-48,1	0
20200101_20200125	0,448	24	-51	1
20200113_20200125	0,592	12	-3	2
20200113_20200206	0,511	24	24,5	3
20200125_20200206	0,657	12	27,5	4
20200125_20200218	0,524	24	69,4	5
20200206_20200218	0,649	12	41,9	6
20200206_20200313	0,485	36	-16,9	7
20200218_20200313	0,570	24	-58,8	8
20200218_20200325	0,442	36	-51,6	9
20200313_20200325	0,627	12	7,1	10
20200313_20200406	0,617	24	7,7	11
20200325_20200406	0,633	12	0,6	12
20200325_20200418	0,488	24	0,3	13
20200406_20200418	0,592	12	-0,2	14
20200406_20200430	0,429	24	44,3	15
20200418_20200430	0,511	12	44,5	16
20200418_20200512	0,475	24	92,9	17
20200430_20200512	0,532	12	48,4	18
20200430_20200524	0,444	24	-31,9	19
20200512_20200524	0,489	12	-80,3	20
20200512_20200605	0,388	24	-4,2	21
20200524_20200605	0,502	12	76,1	22
20200524_20200617	0,455	24	-13	23
20200605_20200617	0,629	12	-89,1	24
20200605_20200629	0,496	24	1,1	25
20200617_20200629	0,652	12	90,1	26
20200617_20200711	0,468	24	100,7	27
20200629_20200711	0,549	12	10,6	28
20200629_20200723	0,485	24	-91,3	29
20200711_20200723	0,509	12	-101,8	30
20200711_20200804	0,437	24	-93,8	31
20200723_20200804	0,582	12	8	32
20200723_20200816	0,446	24	50,9	33
20200804_20200816	0,541	12	42,8	34
20200804_20200828	0,420	24	-31,8	35
20200816_20200828	0,539	12	-74,6	36
20200816_20200909	0,446	24	-71,3	37

Trabajo Final de Graduación

20200828_20200909	0,517	12	3,3	38
20200828_20200921	0,464	24	18,4	39
20200909_20200921	0,611	12	15,1	40
20200909_20201003	0,437	24	25,9	41
20200921_20201003	0,594	12	10,8	42
20200921_20201015	0,477	24	8,3	43
20201003_20201015	0,666	12	-2,5	44
20201003_20201027	0,519	24	18,5	45
20201015_20201027	0,628	12	21	46
20201015_20201108	0,448	24	-6,5	47
20201027_20201108	0,528	12	-27,5	48
20201027_20201120	0,433	24	-31,6	49
20201108_20201120	0,602	12	-4,2	50
20201108_20201202	0,433	24	22	51
20201120_20201202	0,577	12	26,2	52
20201120_20201226	0,392	36	62,3	53
20201202_20201226	0,438	24	36,1	54
20201202_20210107	0,433	36	90,6	55
20201226_20210107	0,520	12	54,5	56
20201226_20210131	0,461	36	-96,5	57
20210107_20210131	0,422	24	-151	58
20210107_20210212	0,405	36	-163,3	59
20210131_20210212	0,642	12	-12,3	60
20210131_20210224	0,541	24	92,4	61
20210212_20210224	0,620	12	104,7	62
20210212_20210308	0,495	24	137,9	63
20210224_20210308	0,783	12	33,2	64
20210224_20210320	0,512	24	69,1	65
20210308_20210320	0,640	12	35,9	66
20210308_20210401	0,539	24	35,9	67
20210320_20210401	0,549	12	0	68
20210320_20210413	0,455	24	-104,8	69
20210401_20210413	0,420	12	-104,8	70
20210401_20210425	0,395	24	-58,1	71
20210413_20210425	0,575	12	46,7	72
20210413_20210519	0,413	36	113,1	73
20210425_20210519	0,466	24	66,3	74
20210425_20210531	0,408	36	13	75
20210519_20210531	0,531	12	-53,4	76
20210519_20210612	0,442	24	-126,1	77
20210531_20210612	0,539	12	-72,8	78
20210531_20210624	0,443	24	1,3	79
20210612_20210624	0,491	12	74	80

Trabajo Final de Graduación

20210612_20210706	0,436	24	60,6	81
20210624_20210706	0,497	12	-13,5	82
20210624_20210718	0,414	24	-52,9	83
20210706_20210718	0,454	12	-39,4	84
20210706_20210730	0,462	24	30,2	85
20210718_20210730	0,469	12	69,6	86
20210718_20210811	0,442	24	82,2	87
20210730_20210811	0,546	12	12,6	88
20210730_20210823	0,480	24	-86,8	89
20210811_20210823	0,519	12	-99,4	90
20210811_20210904	0,468	24	-45,4	91
20210823_20210904	0,585	12	54	92
20210823_20210916	0,512	24	39,7	93
20210904_20210916	0,573	12	-14,3	94
20210904_20210928	0,449	24	-79,8	95
20210916_20210928	0,527	12	-65,4	96
20210916_20211010	0,458	24	-40,5	97
20210928_20211010	0,656	12	24,9	98
20210928_20211022	0,499	24	-3,5	99
20211010_20211022	0,600	12	-28,4	100
20211010_20211103	0,455	24	70,3	101
20211022_20211103	0,532	12	98,7	102
20211022_20211115	0,458	24	35,7	103
20211103_20211115	0,524	12	-63	104
20211103_20211127	0,449	24	-96,3	105
20211115_20211127	0,576	12	-33,3	106
20211115_20211209	0,460	24	-8,7	107
20211127_20211209	0,645	12	24,6	108
20211127_20211221	0,507	24	31,4	109
20211209_20211221	0,638	12	6,8	110
20211209_20220102	0,501	24	12,3	111
20211221_20220102	0,690	12	5,6	112
20211221_20220114	0,539	24	4,4	113
20220102_20220114	0,661	12	-1,2	114
20220102_20220126	0,519	24	35,1	115
20220114_20220126	0,748	12	36,3	116
20220114_20220207	0,598	24	27	117
20220126_20220207	0,785	12	-9,3	118
20220126_20220219	0,531	24	-95,8	119
20220207_20220219	0,688	12	-86,5	120
20220207_20220303	0,603	24	17,5	121
20220219_20220303	0,640	12	104	122
20220219_20220315	0,523	24	108,5	123

Trabajo Final de Graduación

20220303_20220315	0,641	12	4,4	124
20220303_20220327	0,553	24	-55,5	125
20220315_20220327	0,730	12	-59,9	126
20220315_20220408	0,451	24	31,9	127
20220327_20220408	0,508	12	91,8	128
20220327_20220420	0,493	24	54,5	129
20220408_20220420	0,674	12	-37,3	130
20220408_20220502	0,453	24	3,9	131
20220420_20220502	0,479	12	41,1	132
20220420_20220514	0,426	24	-85,1	133
20220502_20220514	0,610	12	-126,2	134
20220502_20220701	0,369	60	-101,8	135
20220514_20220701	0,393	48	24,5	136
20220514_20220713	0,387	60	89,4	137
20220701_20220713	0,547	12	64,9	138
20220701_20220818	0,414	48	-23,7	139
20220713_20220818	0,434	36	-88,6	140
20220713_20220830	0,429	48	-52,6	141
20220818_20220830	0,646	12	36	142
20220818_20220911	0,491	24	-81,2	143
20220830_20220911	0,580	12	-117,2	144
20220830_20220923	0,427	24	267,9	145
20220911_20220923	0,503	12	385,1	146
20220911_20221005	0,445	24	217,7	147
20220923_20221005	0,566	12	-167,4	148
20220923_20221029	0,384	36	-351,9	149
20221005_20221029	0,419	24	-184,5	150
20221005_20221110	0,423	36	7,3	151
20221029_20221110	0,551	12	191,8	152
20221029_20221122	0,488	24	-43,1	153
20221110_20221122	0,549	12	-234,9	154
20221110_20221204	0,392	24	-126,7	155
20221122_20221204	0,481	12	108,2	156
20221122_20221216	0,471	24	176,3	157
20221204_20221216	0,597	12	68,1	158
20221204_20221228	0,456	24	30,5	159
20221216_20221228	0,622	12	-37,6	160
20221216_20230109	0,498	24	7,2	161
20221228_20230109	0,576	12	44,8	162
20221228_20230121	0,511	24	29	163
20230109_20230121	0,581	12	-15,7	164

Trabajo Final de Graduación

Anexo 3. Cuadro de valores de RMS para fecha de adquisición (ascendente)

Fuente: elaboración propia

Fecha	RMS (m)
20200101	0,0049
20200113	0,0040
20200125	0,0044
20200206	0,0039
20200218	0,0042
20200313	0,0041
20200325	0,0045
20200406	0,0063
20200418	0,0047
20200430	0,0052
20200512	0,0051
20200524	0,0041
20200605	0,0041
20200617	0,0042
20200629	0,0038
20200711	0,0036
20200723	0,0035
20200804	0,0051
20200816	0,0103
20200828	0,0039
20200909	0,0043
20200921	0,0034
20201003	0,0039
20201015	0,0042
20201027	0,0040
20201108	0,0039
20201120	0,0042
20201202	0,0042
20201214	0,0053

Fecha	RMS (m)
20201226	0,0058
20210107	0,0050
20210131	0,0057
20210212	0,0048
20210224	0,0058
20210308	0,0049
20210320	0,0053
20210401	0,0045
20210413	0,0064
20210425	0,0035
20210519	0,0035
20210531	0,0089
20210612	0,0038
20210624	0,0048
20210706	0,0032
20210718	0,0038
20210730	0,0058
20210811	0,0036
20210823	0,0037
20210904	0,0035
20210916	0,0037
20210928	0,0031
20211010	0,0045
20211022	0,0040
20211103	0,0035
20211115	0,0038
20211127	0,0037
20211209	0,0035
20211221	0,0040

Fecha	RMS (m)
20220102	0,0055
20220114	0,0035
20220126	0,0095
20220207	0,0041
20220219	0,0072
20220303	0,0046
20220315	0,0060
20220327	0,0086
20220408	0,0060
20220420	0,0057
20220502	0,0048
20220514	0,0039
20220526	0,0047
20220607	0,0036
20220619	0,0039
20220701	0,0036
20220713	0,0040
20220725	0,0051
20220818	0,0044
20220911	0,0033
20220923	0,0035
20221005	0,0034
20221029	0,0036
20221110	0,0041
20221122	0,0038
20221204	0,0040
20221216	0,0044
20221228	0,0042
20230109	0,0036
20230121	0,0051

Trabajo Final de Graduación

Anexo 4. Cuadro de datos de valores de coherencia espacial promedio, separación temporal de líneas base, separación en metros de línea base perpendicular y número de interferogramas (ascendente)

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

Fecha	Mean	Btemp/días	Bperp/m	Número
20200101_20200113	0,560	12	44,3	0
20200101_20200125	0,501	24	45,1	1
20200113_20200125	0,741	12	0,8	2
20200113_20200206	0,623	24	-24,1	3
20200125_20200206	0,763	12	-24,9	4
20200125_20200218	0,598	24	-33,8	5
20200206_20200218	0,692	12	-8,9	6
20200206_20200313	0,478	36	58,9	7
20200218_20200313	0,581	24	67,8	8
20200218_20200325	0,418	36	30,3	9
20200313_20200325	0,598	12	-37,5	10
20200313_20200406	0,495	24	-37,2	11
20200325_20200406	0,526	12	0,3	12
20200325_20200418	0,436	24	29,3	13
20200406_20200418	0,495	12	29	14
20200406_20200430	0,339	24	6,5	15
20200418_20200430	0,414	12	-22,5	16
20200418_20200512	0,411	24	-82,5	17
20200430_20200512	0,479	12	-60	18
20200430_20200524	0,406	24	-9,1	19
20200512_20200524	0,490	12	50,9	20
20200512_20200605	0,380	24	-40,8	21
20200524_20200605	0,545	12	-91,7	22
20200524_20200617	0,442	24	7,1	23
20200605_20200617	0,633	12	98,8	24
20200605_20200629	0,484	24	29,8	25
20200617_20200629	0,570	12	-69,1	26
20200617_20200711	0,510	24	-68,1	27
20200629_20200711	0,555	12	0,9	28
20200629_20200723	0,477	24	68,1	29
20200711_20200723	0,632	12	67,2	30
20200711_20200804	0,502	24	45,1	31
20200723_20200804	0,599	12	-2,1	32
20200723_20200816	0,392	24	-14,3	33
20200804_20200816	0,465	12	7,8	34
20200804_20200828	0,427	24	88,3	35
20200816_20200828	0,476	12	80,5	36
20200816_20200909	0,395	24	81,6	37

Trabajo Final de Graduación

20200828_20200909	0,615	12	1,1	38
20200828_20200921	0,487	24	-27,5	39
20200909_20200921	0,632	12	-28,6	40
20200909_20201003	0,388	24	-70,1	41
20200921_20201003	0,534	12	-41,5	42
20200921_20201015	0,456	24	-60	43
20201003_20201015	0,549	12	-18,4	44
20201003_20201027	0,444	24	-24,7	45
20201015_20201027	0,696	12	-6,3	46
20201015_20201108	0,446	24	37,2	47
20201027_20201108	0,555	12	43,5	48
20201027_20201120	0,458	24	51,4	49
20201108_20201120	0,667	12	7,8	50
20201108_20201202	0,468	24	-74,6	51
20201120_20201202	0,647	12	-82,4	52
20201120_20201214	0,448	24	-35,5	53
20201202_20201214	0,469	12	46,9	54
20201202_20201226	0,424	24	-16,3	55
20201214_20201226	0,639	12	-63,2	56
20201214_20210107	0,553	24	-97,5	57
20201226_20210107	0,704	12	-34,3	58
20201226_20210131	0,489	36	104,9	59
20210107_20210131	0,510	24	139,1	60
20210107_20210212	0,434	36	140,8	61
20210131_20210212	0,770	12	1,6	62
20210131_20210224	0,513	24	-63,7	63
20210212_20210224	0,647	12	-65,3	64
20210212_20210308	0,591	24	-93,2	65
20210224_20210308	0,698	12	-27,8	66
20210224_20210320	0,485	24	-43,6	67
20210308_20210320	0,646	12	-15,7	68
20210308_20210401	0,674	24	-29,5	69
20210320_20210401	0,598	12	-13,8	70
20210320_20210413	0,421	24	67,8	71
20210401_20210413	0,461	12	81,7	72
20210401_20210425	0,411	24	70,8	73
20210413_20210425	0,573	12	-10,9	74
20210413_20210519	0,395	36	-92,3	75
20210425_20210519	0,460	24	-81,4	76
20210425_20210531	0,407	36	-39,4	77
20210519_20210531	0,541	12	42	78
20210519_20210612	0,437	24	108,9	79
20210531_20210612	0,435	12	67	80

Trabajo Final de Graduación

20210531_20210624	0,441	24	-23	81
20210612_20210624	0,501	12	-89,9	82
20210612_20210706	0,480	24	-73,7	83
20210624_20210706	0,536	12	16,2	84
20210624_20210718	0,499	24	99,7	85
20210706_20210718	0,560	12	83,5	86
20210706_20210730	0,497	24	2,6	87
20210718_20210730	0,639	12	-80,9	88
20210718_20210811	0,429	24	-110,5	89
20210730_20210811	0,537	12	-29,6	90
20210730_20210823	0,414	24	50,3	91
20210811_20210823	0,559	12	79,9	92
20210811_20210904	0,471	24	67,4	93
20210823_20210904	0,560	12	-12,5	94
20210823_20210916	0,496	24	4,8	95
20210904_20210916	0,668	12	17,3	96
20210904_20210928	0,471	24	80,7	97
20210916_20210928	0,636	12	63,4	98
20210916_20211010	0,482	24	29,3	99
20210928_20211010	0,606	12	-34,1	100
20210928_20211022	0,547	24	-37,5	101
20211010_20211022	0,591	12	-3,4	102
20211010_20211103	0,407	24	-148,1	103
20211022_20211103	0,536	12	-144,7	104
20211022_20211115	0,498	24	-35,2	105
20211103_20211115	0,550	12	109,4	106
20211103_20211127	0,438	24	153,3	107
20211115_20211127	0,655	12	43,8	108
20211115_20211209	0,489	24	33,8	109
20211127_20211209	0,682	12	-10	110
20211127_20211221	0,559	24	-79,8	111
20211209_20211221	0,731	12	-69,8	112
20211209_20220102	0,537	24	-81,7	113
20211221_20220102	0,742	12	-12	114
20211221_20220114	0,651	24	23,8	115
20220102_20220114	0,753	12	35,7	116
20220102_20220126	0,449	24	11,7	117
20220114_20220126	0,633	12	-24,1	118
20220114_20220207	0,616	24	11,5	119
20220126_20220207	0,651	12	35,6	120
20220126_20220219	0,448	24	105	121
20220207_20220219	0,658	12	69,4	122
20220207_20220303	0,563	24	-40,8	123

Trabajo Final de Graduación

20220219_20220303	0,560	12	-110,2	124
20220219_20220315	0,404	24	-114,4	125
20220303_20220315	0,499	12	-4,2	126
20220303_20220327	0,410	24	92,1	127
20220315_20220327	0,452	12	96,3	128
20220315_20220408	0,410	24	5,1	129
20220327_20220408	0,385	12	-91,2	130
20220327_20220420	0,369	24	-51,8	131
20220408_20220420	0,577	12	39,4	132
20220408_20220502	0,428	24	-46,9	133
20220420_20220502	0,419	12	-86,4	134
20220420_20220514	0,374	24	70,2	135
20220502_20220514	0,502	12	156,5	136
20220502_20220526	0,465	24	38,3	137
20220514_20220526	0,541	12	-118,2	138
20220514_20220607	0,483	24	71,7	139
20220526_20220607	0,551	12	189,9	140
20220526_20220619	0,436	24	73,9	141
20220607_20220619	0,487	12	-116	142
20220607_20220701	0,488	24	-114,1	143
20220619_20220701	0,546	12	1,9	144
20220619_20220713	0,462	24	-79	145
20220701_20220713	0,536	12	-80,9	146
20220701_20220725	0,465	24	-7,1	147
20220713_20220725	0,475	12	73,8	148
20220713_20220818	0,379	36	133,9	149
20220725_20220818	0,485	24	60,1	150
20220725_20220911	0,405	48	110,8	151
20220818_20220911	0,446	24	50,7	152
20220818_20220923	0,359	36	-336,1	153
20220911_20220923	0,411	12	-386,8	154
20220911_20221005	0,421	24	-241,9	155
20220923_20221005	0,508	12	144,9	156
20220923_20221029	0,339	36	354,3	157
20221005_20221029	0,418	24	209,4	158
20221005_20221110	0,394	36	8,7	159
20221029_20221110	0,508	12	-200,7	160
20221029_20221122	0,482	24	38	161
20221110_20221122	0,571	12	238,7	162
20221110_20221204	0,470	24	127,8	163
20221122_20221204	0,627	12	-110,9	164
20221122_20221216	0,438	24	-174,6	165
20221204_20221216	0,654	12	-63,8	166

Trabajo Final de Graduación

20221204_20221228	0,499	24	-29	167
20221216_20221228	0,670	12	34,7	168
20221216_20230109	0,454	24	-46,9	169
20221228_20230109	0,482	12	-81,6	170
20221228_20230121	0,550	24	-4,5	171
20230109_20230121	0,498	12	77,1	172

Trabajo Final de Graduación

Anexo 5. Tabla de atributos del mapa de coherencia temporal, con valores de coherencia media para las diferentes clases de cobertura de suelo (ascendente).

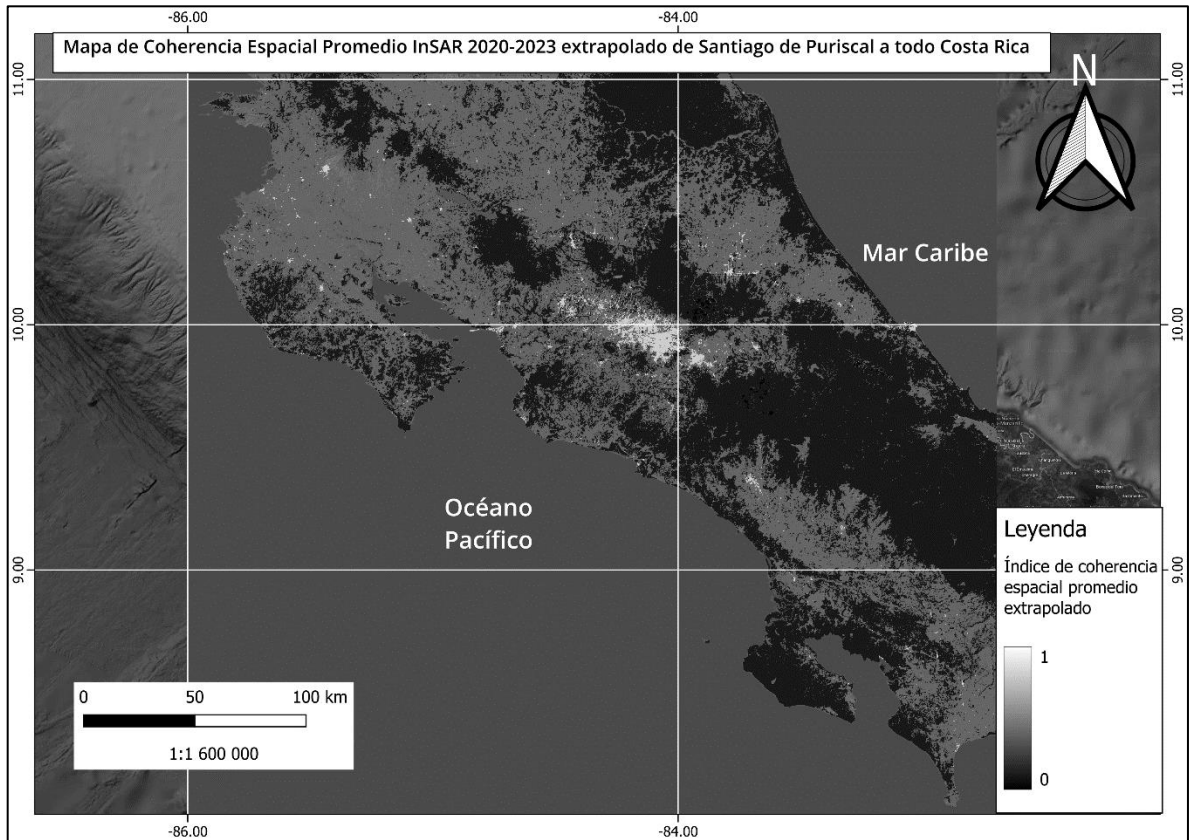
Fuente: elaboración propia

Clase	Descripción	Coherencia_media
0	"Desconocido. No hay o no hay suficientes datos satelitales disponibles."	0,00
20	"Arbustos. Plantas leñosas perennes con tallos persistentes y leñosos y sin ningún tallo principal definido que tenga menos de 5 m de altura. El follaje de los arbustos puede ser de hoja perenne o caducifolia."	0,63
30	"Vegetación herbácea. Plantas sin tallo persistente o brotes por encima del suelo y careciendo de una estructura firme definida. La cobertura de árboles y arbustos es menor superior al 10 %."	0,55
40	"Vegetación cultivada y manejada / agricultura. Tierras cubiertas con cultivos temporales seguidos de cosecha y un período de suelo desnudo (por ejemplo, sistemas de cultivo simple y múltiple). Tenga en cuenta que los cultivos leñosos perennes se clasificarán como los Tipo de cobertura de suelo forestal o arbustivo."	0,50
50	"Urbano / construido. Terreno cubierto por edificios y otras estructuras hechas por el hombre."	0,84
60	"Vegetación desnuda / escasa. Tierras con suelo, arena o rocas expuestas y nunca a más del 10 % de cubierta vegetal durante cualquier época del año."	0,00
70	"Nieve y hielo. Aterriza bajo la nieve o la capa de hielo durante todo el año."	0,00
80	"Cuerpos de agua permanentes. Lagos, embalses y ríos. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada."	0,00
90	"Humedal herbáceo. Tierras con una mezcla permanente de agua y herbáceas o vegetación leñosa. La vegetación puede estar presente tanto en la sal, como en la agua salobre o dulce."	0,21
100	"Musgo y líquenes."	0,00
111	"Bosque cerrado, hoja de aguja de hoja perenne. Dosel arbóreo >70 %, quedan casi todos los árboles de hoja de aguja Verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,00
112	"Bosque cerrado, hoja ancha siempre verde. Dosel arbóreo >70 %, permanecen casi todos los árboles de hoja ancha verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,10
113	"Bosque cerrado, hoja de aguja caducifolia. La copa de los árboles >70 %, consiste en hojas de aguja estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de hoja-on y leaf-off Períodos."	0,10
114	"Bosque cerrado, hoja ancha caducifolia. El dosel arbóreo >70 %, consiste en hojas anchas estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de períodos de arranque y apagado de hojas."	0,10
115	"Bosque cerrado, mixto."	0,10
116	"Bosque cerrado, que no coincide con ninguna de las otras definiciones."	0,10

Trabajo Final de Graduación

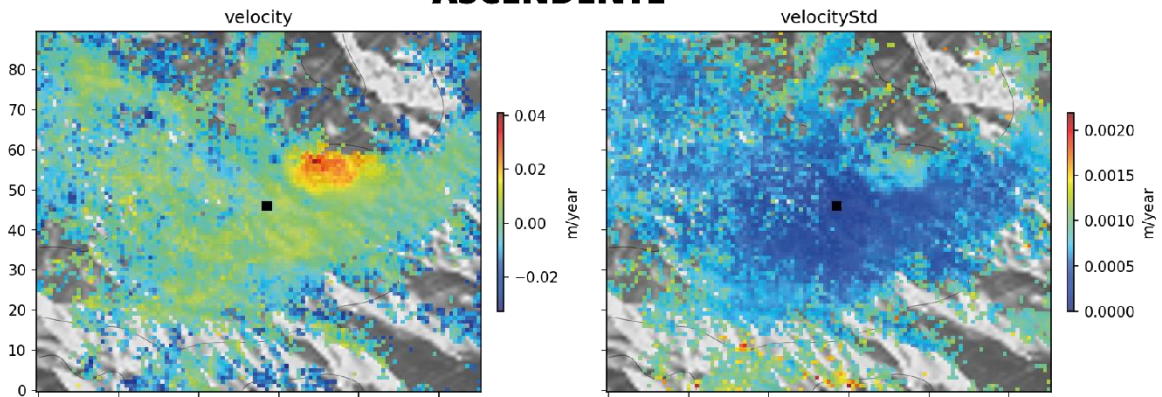
121	"Bosque abierto, hoja de aguja de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja de aguja permanecen verdes todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,00
122	"Bosque abierto, hoja ancha de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja ancha permanecen verdes durante todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde."	0,36
123	"Bosque abierto, hoja de aguja caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja de aguja con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado."	0,00
124	"Bosque abierto, hoja ancha caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja ancha con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado."	0,27
125	"Bosque abierto, mixto."	0,17
126	"Bosque abierto, que no coincide con ninguna de las otras definiciones."	0,48
200	"Océanos, mares. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada."	0,00

Anexo 6. Mapa de coherencia espacial promedio de Costa Rica calculada de los resultados de Puriscal (Descendente)
Fuente: elaboración propia

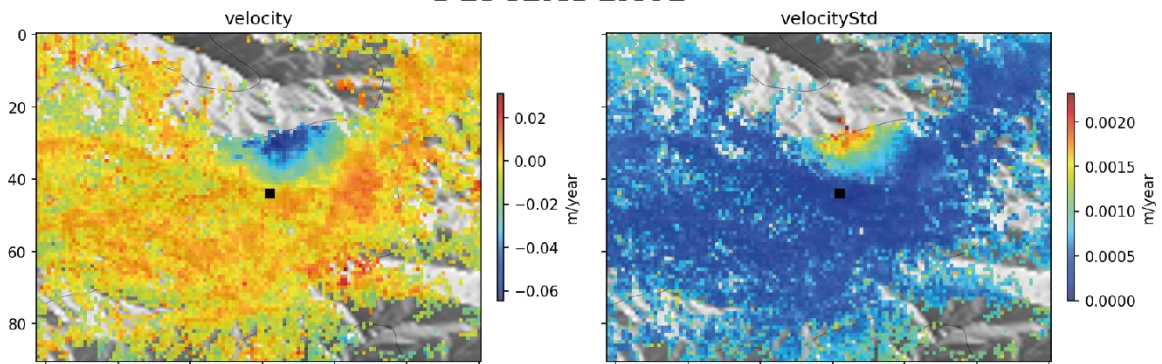


Anexo 7. Velocidades promedio con desviación estándar
Fuente: elaboración propia por medio de MintPy

ASCENDENTE

























DESCENDENTE



Trabajo Final de Graduación

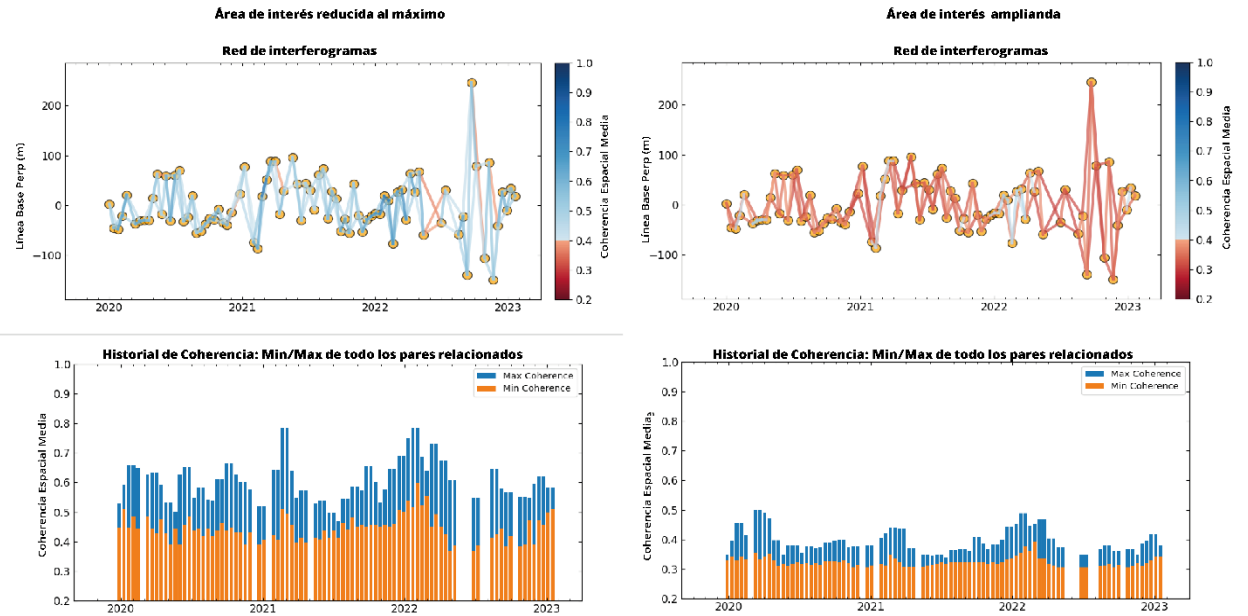
Anexo 8. Captura de pantalla de cuadro de clases de cobertura de suelos

Fuente: adaptado de Copernicus en GEE

discrete_classification Tabla de clases		
Valor	Color	Descripción
0		Desconocido. No hay o no hay suficientes datos satelitales disponibles.
20		Arbustos. Plantas leñosas perennes con tallos persistentes y leñosos y sin ningún tallo principal definido que tenga menos de 5 m de altura. El El follaje de los arbustos puede ser de hoja perenne o caducifolia.
30		Vegetación herbácea. Plantas sin tallo persistente o brotes por encima del suelo y careciendo de una estructura firme definida. La cobertura de árboles y arbustos es menor superior al 10 %.
40		Vegetación cultivada y manejada / agricultura. Tierras cubiertas con cultivos temporales seguidos de cosecha y un período de suelo desnudo (por ejemplo, sistemas de cultivo simple y múltiple). Tenga en cuenta que los cultivos leñosos perennes se clasificarán como los Tipo de cobertura de suelo forestal o arbustivo.
50		Urbano / construido. Terreno cubierto por edificios y otras estructuras hechas por el hombre.
60		Vegetación desnuda / escasa. Tierras con suelo, arena o rocas expuestas y nunca ha Más del 10 % de cubierta vegetal durante cualquier época del año.
70		Nieve y hielo. Aterrizo bajo la nieve o la capa de hielo durante todo el año.
80		Cuerpos de agua permanentes. Lagos, embalses y ríos. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada.
90		Humedal herbáceo. Tierras con una mezcla permanente de agua y herbáceas o vegetación leñosa. La vegetación puede estar presente tanto en la sal, como en la agua salobre o dulce.
100		Musgo y líquenes.
111		Bosque cerrado, hoja de aguja de hoja perenne. Dosel arbóreo >70 %, quedan casi todos los árboles de hoja de aguja Verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
112		Bosque cerrado, hoja ancha siempre verde. Dosel arbóreo >70 %, permanecen casi todos los árboles de hoja ancha verde todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
113		Bosque cerrado, hoja de aguja caducifolia. La copa de los árboles >70 %, consiste en hojas de aguja estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de hoja-on y leaf-off Periodos.
114		Bosque cerrado, hoja ancha caducifolia. El dosel arbóreo >70 %, consiste en hojas anchas estacionales comunidades arbóreas con un ciclo anual de períodos de arranque y apagado de hojas.
115		Bosque cerrado, mixto.
116		Bosque cerrado, que no coincide con ninguna de las otras definiciones.
121		Bosque abierto, hoja de aguja de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja de aguja permanecen verdes todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
122		Bosque abierto, hoja ancha de hoja perenne. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, casi todos los árboles de hoja ancha permanecen verdes durante todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
123		Bosque abierto, hoja de aguja caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja de aguja con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado.
124		Bosque abierto, hoja ancha caducifolia. Capa superior: árboles 15-70 % y segunda capa: mezcla de arbustos y pastizales, consiste en comunidades estacionales de árboles de hoja ancha con Un ciclo anual de períodos de hoja-encendido y apagado.
125		Bosque abierto, mixto.
126		Bosque abierto, que no coincide con ninguna de las otras definiciones.
200		Océanos, mares. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada.

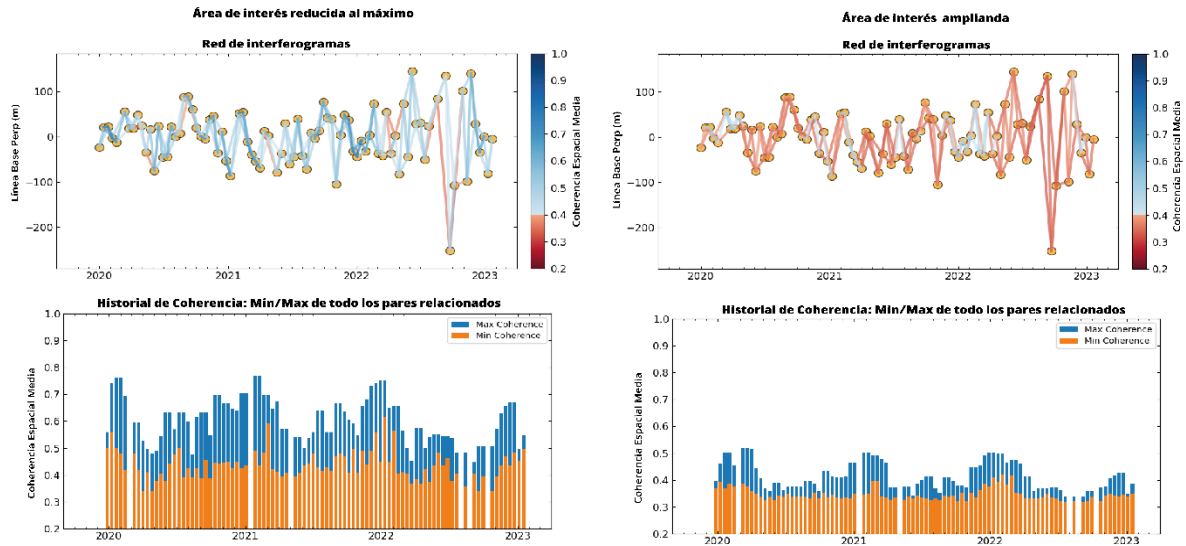
Anexo 9. Comparación de resultados SBAS entre 2 procesamientos diferentes con distinta área. Los resultados a la izquierda corresponden a los resultados finales, donde se redujo el área de procesamiento al máximo.

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy



Anexo 10. Comparación de resultados SBAS entre 2 procesamientos diferentes. Los resultados a la izquierda corresponden a los resultados finales, donde se redujo el área de procesamiento al máximo.

Fuente: elaboración propia por medio de MintPy



Anexo 11. Enlace de acceso a manual InSAR y otros archivos (scripts, enlaces).

Fuente: elaboración propia

https://github.com/Corsan97/Repo-InSAR_ISCE-MintPy_CR