

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



Trabajo Final de Graduación en la Modalidad de Proyecto de Graduación

**Estudio de los cambios espaciotemporales de la deformación del
flanco oeste del volcán Arenal entre 2017-2023, mediante la
formación de series temporales InSAR a partir de las imágenes
libres del satélite Sentinel-1**

Gloriana López Vizcaíno

CAMPUS OMAR DENGO
HEREDIA, COSTA RICA
NOVIEMBRE, 2025

Este trabajo fue _____ por el Tribunal Evaluador 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

Dr. Jorge Moya Zamora,
Presidente del Tribunal Evaluador

MSc. Sara Bastos Gutiérrez,
Director o representante de la ETCG

Dr. Cyril Muller
Tutor

Msc. Jose Francisco Valverde Calderón
Asesor

Dra. Olga Pimenova
Asesor

Gloriana López Vizcaíno
Graduando

Dedicatoria

Primeramente, agradezco a Dios y a mis padres, Henry López Gutiérrez y Yesenia Vizcaíno Chaves. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible. Siempre me impulsaron a ser constante, a dar lo mejor de mí en cada paso, tanto en los estudios como en la vida. Me enseñaron el valor del esfuerzo y la importancia de hacer todo con amor y dedicación.

A mis hermanos, Christopher y Gabriel López Vizcaíno. Durante este proceso, todos necesitamos un respiro, un momento para reír y desconectarnos del estrés, y ustedes fueron justamente eso. Gracias por estar ahí, por su alegría, su compañía y por recordarme que, incluso en medio del trabajo duro, siempre hay espacio para disfrutar.

A mi tutor de tesis, Cyril Müller, le agradezco profundamente por ser mi principal guía durante este trabajo. No solo me brindó su apoyo técnico y académico, sino que también, con usted descubrí lo fascinantes y complejos que pueden ser los volcanes.

Agradezco al OVSICORI-UNA por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de aprender de grandes profesionales. Mi paso por el observatorio fue, sin duda, una de las mejores etapas de mi vida universitaria.

Finalmente, gracias a la Universidad Nacional (UNA) y a la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia (ETCG). Me enorgullece llevar el sello UNA y haber recibido una formación de calidad de parte de docentes excepcionales en una institución de prestigio.

Reconocimientos

Durante el desarrollo de este proyecto de investigación, tuve la valiosa oportunidad de asistir a dos eventos académicos de gran relevancia en el ámbito de la vulcanología, los cuales aportaron significativamente a mi formación profesional y al enriquecimiento de este trabajo.

En primer lugar, participé en el congreso Cities on Volcanoes 12 (COV12), realizado en la Ciudad de Guatemala en febrero de 2024. Este evento internacional reunió a científicos, investigadores, estudiantes y profesionales de distintas partes del mundo, con el objetivo de compartir conocimientos y experiencias sobre la interacción entre volcanes y comunidades humanas. Además, asistí a diversas charlas y ponencias que abordaron temáticas fundamentales como la gestión del riesgo volcánico, el monitoreo instrumental y los procesos eruptivos.

En segundo lugar, en agosto de 2024 asistí a la reunión anual de la Asociación Latinoamericana de Geodesia Volcánica (GEOVOL), un encuentro técnico especializado que reunió a profesionales dedicados al estudio y monitoreo de la deformación volcánica en América Latina. Durante este evento se llevaron a cabo múltiples capacitaciones prácticas y teóricas orientadas al uso de técnicas geodésicas aplicadas al estudio volcánico, entre las cuales se destacó la técnica principal utilizada en esta investigación. Además, en el marco de este evento, tuve la oportunidad de realizar una presentación oral sobre los avances de la tesis y de exponer un póster científico que sintetizaba los principales hallazgos obtenidos hasta ese momento.

Ambas experiencias representaron hitos significativos dentro del proceso de formación profesional que implica la realización de este proyecto. Agradezco profundamente a todas las personas e instituciones que hicieron posible mi participación en estos eventos.

Índice de contenidos

Contenido	Página
Resumen	xi
Abstract	xii
Capítulo 1: Introducción.....	1
Capítulo 2: Marco teórico.....	3
2.1. Volcanes.....	3
2.2. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)	3
2.3. Volcán Arenal	6
2.4. Peligros volcánicos	9
2.4.1. Deslizamientos y colapsos.....	9
2.4.2. Flujos Piroclásticos.....	9
2.5. Técnicas InSAR	10
2.5.1. Sentinel-1.....	12
2.6. Órbitas Precisas.....	14
2.7. Modelos Digitales de Elevación	15
2.8. Corrección atmosférica	15
2.9. Procesamiento de datos.....	16
2.9.1. ISCE	16
2.9.2. MintPy	16
2.10. Análisis de Series Temporales	17
Capítulo 3: Objetivos	18
Capítulo 4: Metodología	19
4.1. Preparación de insumos	19
4.1.1. Imágenes SAR.....	19
4.1.2. Modelo Digital de Elevación.....	21
4.2. Procesamiento de imágenes	22
4.2.1. ISCE	23
4.2.2. MintPy	26
4.3. Deformación en función de la altura y en función del espesor de lava.....	29
4.4. Análisis de series temporales	30

4.5.2. Datos de la velocidad en función del espesor de lava.....	32
4.5.3. Datos de la velocidad en función de la altura	33
Capítulo 5: Análisis de resultados.....	35
5.1. DEM.....	35
5.2. InSAR	35
5.2.1. Red Interferogramétrica.....	36
5.3. Mintpy.....	37
5.4. Velocidad de la deformación	39
5.5. Series Temporales de puntos característicos.....	42
5.7. Procesos Geofísicos	48
5.7.1. Velocidad de la deformación en función del espesor de lava.....	49
5.7.2. Velocidad de la deformación en función de la altura	53
Capítulo 6: Conclusiones	56
Capítulo 7: Recomendaciones	58
Referencias.....	59

Índice de cuadros

Contenido	Página
Cuadro 1. Desglose de imágenes descargadas e interferogramas generados según fecha.....	36
Cuadro 2. Principales resultados de Ebmeier en estudios del 2010 y 2014..	46

Índice de figuras

Contenido	Página
Figura 1. Comportamiento de la retrodispersión en diferentes superficies.	5
Figura 2. Foco de deformación del volcán Arenal entre el 2005 y 2009.	7
Figura 3. Localización de deslizamientos en la zona occidental del volcán Arenal.....	8
Figura 4. Funcionamiento de InSAR.....	11
Figura 5. Viaje ascendente y descendente InSAR.....	12
Figura 6. Adquisición de imágenes mediante barrido interferométrico.	13
Figura 7. Interfaz de ASF Data Search para la descarga de imágenes SAR.	14
Figura 8. Delimitación del volcán Arenal en la interfaz ASF DATA SEARCH para la búsqueda de imágenes.....	20
Figura 9. Ventana de filtro de búsqueda de la interfaz ASF DATA SEARCH para la búsqueda de imágenes.....	20
Figura 10. Interfaz de Copérnico para la descarga de órbitas precisas.....	22
Figura 11. Archivos runfiles para el procesamiento de imágenes SAR con la metodología ISCE2.	26
Figura 12. Captura herramienta “Unir atributos por proximidad” en Qgis.	33
Figura 13. DEM SRTM30 con coordenadas: latitud norte 10°, latitud norte 11°, longitud oeste 86°, longitud oeste 84°.....	35
Figura 14. Interferograma en geometría radar generado a partir de las imágenes SAR del 15 de enero del 2017 y el 8 de febrero del 2017.....	37
Figura 15. Coherencia temporal resultante al aplicar los modelos atmosféricos ERA5 y GACOS.	38
Figura 16. Coherencia espacial resultante al aplicar los modelos atmosféricos ERA5 y GACOS.	39
Figura 17. Comparativa de la deformación del volcán Arenal según hallazgos por Ebmeier en el 2014 y el estudio actual 2017-2023.....	42
Figura 18. Series temporales de puntos específicos del 2020-2023.....	43
Figura 19. Comparativa de la deformación del volcán Arenal en el punto con coordenadas 10.46, -84.715, según hallazgos por Ebmeier en el 2014 y el estudio actual 2017-2023.....	47
Figura 20. Velocidad de la deformación del 2017-2023 con deslizamientos del 2014 según Ebmeier.	47
Figura 21. Velocidad de la deformación en función del espesor de lava.	51
Figura 22. Velocidad de la deformación en función de la altura.....	53

Índice de mapas

Contenido	Página
Mapa 1. Deformación del volcán Arenal en órbita descendente en un período del 2017 al 2023 con una coherencia mínima de 0,7 y puntos de interés.....	41
Mapa 2. Espesor de lava en el volcán Arenal según estudios realizados por Wadge et al. (2006)	50
Mapa 3. Velocidad residual de la deformación en función del espesor de lava, con deslizamientos resultantes del estudio Ebmeier 2014 (líneas negras).	52
Mapa 4. Velocidad residual de la deformación en función de la altura, con deslizamientos resultantes del estudio Ebmeier 2014 (líneas negras).	55

Lista de acrónimos y siglas

ASF:	Alaska Satellite Facility Facilidades Satelitales de Alaska
DEM:	Digital Elevation Model Modelo Digital de Elevación
ESA:	European Space Agency Agencia Europea Espacial
GNSS:	Global Navigation Satellite System, Sistema global de navegación por satélite
InSAR:	Interferometric Synthetic Aperture Radar Interferometría Radar de Apertura Sintética
ISCE:	InSAR Scientific Computing Environment Entorno informático científico InSAR
MINTPY	Miami InSAR Time-series Series temporal de Miami InSAR
OVSICORI:	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica
SAR:	Synthetic Aperture Radar Radar de Apertura Sintética
PSI	Persistent Scatterer Interferometry Interferometría de dispersión persistente

SBAS

Small Baseline Subsets

Pequeños subconjuntos de referencia

Resumen

El volcán Arenal, ubicado en La Fortuna de San Carlos, Alajuela (Costa Rica), es un estratovolcán activo de 1670 metros de altura, conocido tanto por su forma cónica como por ser un atractivo turístico. Su erupción más significativa ocurrió el 29 de julio de 1968, luego de más de 450 años de inactividad. A partir de entonces, mantuvo una actividad constante por unos 42 años, hasta 2010, cuando entró en reposo.

Desde el punto de vista científico, ha sido estudiado con tecnología InSAR, que permite monitorear deformaciones del terreno. Estudios en 2010 y 2014 revelaron deslizamientos en su flanco occidental, incluso sin erupciones. Sin embargo, no se han realizado estudios recientes, por lo que se desconoce el estado actual de estos movimientos.

El proyecto propuesto busca analizar la deformación del volcán entre 2017 y 2023 usando InSAR, con enfoque en el flanco occidental, donde se concentran los deslizamientos. El objetivo es detectar cambios en la velocidad y distribución de la deformación que puedan indicar riesgo de colapso. Además, busca entender los factores geológicos que influyen en esta inestabilidad, aprovechando el acceso a datos de satélite como Sentinel-1.

Los datos mostraron una deformación influenciada principalmente por la altitud ya que las zonas más elevadas presentaron mayores velocidades de desplazamiento. También se identificaron posibles deslizamientos en las zonas con mayor deformación, coincidiendo con laderas visibles en ortofotos. Adicionalmente, no se halló una relación significativa entre los flujos de lava y los patrones de deformación.

En conclusión, la deformación observada parece ser resultado de procesos estructurales y gravitacionales más que de actividad magmática interna. Aunque no hay señales de reactivación, el monitoreo de volcanes es una práctica que ayuda entender su comportamiento y prevenir posibles desastres. Por ello, se recomienda ampliar los estudios con imágenes satelitales desde distintas geometrías, ascendente y descendente, para una mejor caracterización del fenómeno, y reforzar los sistemas de monitoreo y vigilancia del volcán.

Palabras clave: Volcán Arenal, InSAR, deformación, flanco occidental, deslizamientos

Abstract

The Arenal Volcano, located in La Fortuna de San Carlos, Alajuela (Costa Rica), is an active stratovolcano standing about 1,670 meters tall, known both for its conical shape and as a major tourist attraction. Its last eruption started on July 29, 1968, after more than 450 years of inactivity. From then on, it maintained continuous activity for about 42 years, until 2010, when it entered a dormant state.

From a scientific perspective, it has been studied using InSAR technology, which allows monitoring ground deformation. Studies in 2010 and 2014 revealed landslides on its western flank, even without eruptions. However, no recent studies have been conducted, so the current state of these movements remains unknown.

The proposed project aimed to analyze the volcano's deformation between 2017 and 2023 using InSAR, focusing on the western flank where landslides are concentrated. The goal was to detect changes in the velocity and distribution of deformation that could indicate a risk of collapse. Additionally, it sought to understand the geological factors influencing this instability, taking advantage of access to satellite data such as Sentinel-1.

The data showed deformation mainly influenced by altitude, as the higher areas exhibited greater displacement velocities. Possible landslides were also identified in the zones with the most significant deformation, matching slopes visible in orthophotos. Furthermore, no significant relationship was found between lava flows and deformation patterns.

In conclusion, the observed deformation appears to result from structural and gravitational processes rather than internal magmatic activity. Although there are no signs of reactivation, volcano monitoring is a practice that helps understand their behavior and prevent potential disasters. Therefore, it is recommended to expand studies using satellite images from different geometries, both ascending and descending, for better characterization of the phenomenon, and to strengthen the volcano's monitoring and surveillance systems.

Keywords: Arenal volcano, InSAR, deformation, western flank, landslides

Capítulo 1: Introducción

El volcán Arenal se encuentra ubicado en el distrito de La Fortuna, del cantón de San Carlos, en la provincia de Alajuela. Tiene una altura de 1670 m s. n. m. y es un estratovolcán joven y pequeño, con forma cónica adosada y una estructura interna compuesta por capas de lava. Además, es considerado uno de los mayores atractivos turísticos de Costa Rica.

El 29 de julio de 1968 experimentó su primera actividad eruptiva en más de 450 años. Todo comenzó con una serie de temblores y una erupción explosiva que provocó graves desastres en las zonas cercanas ([Blanco, 2018](#)). Esa explosión marcó el inicio de aproximadamente 42 años de actividad volcánica continua y para el año 2010, el volcán presentó su última actividad con emisión de gases y algunas erupciones estrombolianas esporádicas, por lo que actualmente se encuentra en estado de reposo.

En la parte científica, el volcán Arenal ha sido objeto de estudios importantes con la técnica Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). El primero se realizó en 2010, con el objetivo de analizar su estado tras décadas de actividad, haciendo énfasis en la erupción de 1968. Luego, en 2014, se llevaron a cabo nuevos estudios también con InSAR, después del terremoto de Nicoya en 2012. En esta ocasión se identificaron 16 deslizamientos en el flanco occidental del volcán ([Ebmeier et al., 2014](#)).

Desde entonces, no se han vuelto a hacer estudios con esta metodología. Han pasado más de 10 años, por lo que actualmente se desconoce el comportamiento real de estos deslizamientos. Esto abre la necesidad de actualizar el análisis del flanco occidental del volcán en el periodo comprendido entre 2017 y 2023. Al conocer si hay cambios significativos en la tasa de deformación, se podría determinar si representa un riesgo latente de colapso o si, por el contrario, se mantiene estable.

Cuando se estudia la deformación de un volcán es necesario considerar tanto las variaciones espaciales como temporales, ya que ambas aportan información relevante sobre su comportamiento. Determinar los cambios espaciales en la velocidad mediante herramientas estadísticas puede ayudar a identificar procesos geológicos subyacentes y factores que influyen en

la deformación. Del mismo modo, analizar los cambios temporales, permite conocer si hay patrones estacionales desconocidos o si ha ocurrido alguna transformación importante durante ese tiempo.

Los volcanes son fuente de atractivo turístico, tal es el caso del Arenal, que con su forma cónica y su entorno natural diverso atrae a visitantes de distintas partes del mundo. Precisamente por su cercanía a zonas habitadas y su impacto económico, también se convierte en una fuente de riesgo. Estos riesgos no solo están relacionados con posibles erupciones, sino también con deslizamientos que pueden provocar diversidad de desastres ([Organización Panamericana de la Salud, s. f.](#)).

Dado que el último estudio fue en 2014, no se dispone de datos actuales sobre su estado. Esto genera una serie de incógnitas por resolver: ¿los deslizamientos siguen activos?, ¿su velocidad ha cambiado?, ¿afectan más zonas del volcán?. Todas estas preguntas pueden ser abordadas mediante un nuevo análisis utilizando InSAR, lo cual permitiría comparar con los estudios previos y obtener una visión clara de su evolución reciente.

Este proyecto pretende actualizar dicha información y centrarse en los últimos cinco años, que no han sido estudiados. Es importante recalcar que la deformación detectada en años anteriores se concentró en el flanco occidental del volcán ([Ebmeier et al., 2014](#)). Por esta razón, el análisis se centrará en esa área específica, que además presenta condiciones óptimas para el uso de InSAR por estar relativamente despejada.

Gracias a los avances tecnológicos, como las técnicas de teledetección, se ha logrado obtener una gran cantidad de información útil sobre los volcanes. Con estos datos es posible identificar patrones y tendencias en su comportamiento, diferenciar entre actividad normal y anormal, y tomar decisiones preventivas que ayuden a proteger a las comunidades cercanas. En el caso del Arenal, ya se ha demostrado que InSAR es una técnica efectiva, incluso con las condiciones climáticas y la vegetación propias de Costa Rica. El acceso gratuito a imágenes Sentinel-1, junto con su alta calidad, facilita el análisis de deformaciones y la elaboración de series temporales.

Además del aporte a la prevención de desastres, este estudio representa un avance significativo en el campo de la Geodesia y la Geomática. Muestra cómo la colaboración entre disciplinas puede llevar a descubrimientos importantes y a una mejor comprensión de los procesos volcánicos.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Volcanes

Los volcanes, según [Rodríguez \(2025\)](#), son básicamente una abertura o grieta en la corteza terrestre conectada a una cámara magmática y por la cual los materiales incandescentes en forma de magma del interior de un planeta emergen y se acumulan en la superficie de este.

La estructura de un volcán se compone por una cámara magmática, la cual es un gran depósito de roca fundida (magma) que se encuentra bajo la corteza terrestre a una gran presión. La chimenea volcánica es un conducto que generalmente es vertical y que conecta la cámara magmática de algunos volcanes con la superficie de la corteza terrestre. El cráter que es la abertura del volcán, es decir, el punto donde la chimenea volcánica entra en contacto con la superficie y por el que emerge el magma del interior de la Tierra. Finalmente, el cono volcánico, se trata del edificio de materiales que se conforma en las márgenes del cráter debido a la acumulación de lava, piroclastos y ceniza expulsados ([Rodríguez, 2025](#)).

Cuando suceden erupciones, materiales como flujos piroclásticos y magma salen expulsados desde el cráter; el movimiento de estos obedece principalmente la acción de la gravedad y su velocidad depende fuertemente del ángulo de la pendiente en la cual se moviliza. Si la pendiente es fuerte, el flujo tendrá un efecto principalmente erosivo sobre el cono ([Infante, s.f](#)). De igual modo, fenómenos sísmicos de gran intensidad pueden influir sobre la estabilidad de estas estructuras, modificando su estructura geomorfológica, generando deslizamientos, grietas y cañadas en el volcán.

2.2. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), por sus siglas en inglés, es una técnica de medición remota que mide la interferencia causada por la diferencia de fase de los pulsos electromagnéticos emitidos por un Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés). La toma de las imágenes se realiza en dos escenas con tiempo de adquisición diferente, esto permite la detección de cambio en la superficie terrestre con precisión milimétrica ([Cardi, 2022](#)). El producto de la aplicación de InSAR es un mapa de deformación conocido como

interferogramas, esta muestra el cambio de fase producto de movimientos superficiales como por ejemplo un terremoto o actividad volcánica ([Delgado, 2022](#)).

InSAR es una técnica altamente utilizada en análisis de deformación. Esta técnica permite medir desplazamiento en zonas inaccesibles o peligrosas, puede abarcar grandes áreas de estudio, y operar de día, de noche, así como a través de las nubes, por lo que se logran obtener una cantidad de insumos significativos en un amplio lapso temporal. Sin embargo, la técnica puede presentar limitantes como ruido debido a la influencia de la atmosfera, decorrelación debido a la retrodispersión y *foreshortening* (ver Figura 1) debido a pendientes del terreno.

La fiabilidad y la precisión de las mediciones InSAR están influenciadas por los retrasos atmosféricos, las ondas electromagnéticas se retrasan cuando viajan a través de la troposfera y pueden introducir “ruido” ([Ding et al., 2008](#)). Estos efectos pueden ser mitigados con modelos de corrección de retardo troposférico como por ejemplo modelos ERA5 o GACOS. Estos modelos contienen estimaciones de variables atmosféricas como la temperatura del aire, la presión y el viento a diferentes altitudes, así como variables de superficie como la lluvia, el contenido de humedad del suelo y la altura de las olas del océano y permiten corregir el valor de la fase de una imagen SAR ([León, 2024](#)).

Asimismo, existe una distorsión geométrica que no se pueden evitar en las imágenes SAR adquiridas sobre áreas montañosas debido a las geometrías laterales de los sensores SAR. A medida que aumenta la pendiente del terreno con respecto a una superficie horizontal plana, aumenta la dimensión de la celda por lo que se vuelve muy grande y se pierden los detalles, a este efecto se llama *foreshortening* ([European Space Agency, 2007](#)).

Adicionalmente, otro factor que puede impedir la detección de movimiento con la técnica InSAR es la cubierta vegetal denso. Cuando la vegetación es densa, provoca cambios rápidos en las propiedades de dispersión de la superficie, lo que resulta en una dispersión de la señal de radar con múltiples rebotes y reflexiones en los diferentes componentes o capas dentro del volumen, lo que ocasiona pérdida de correlación de la señal. ([Ebmeier et al., 2013](#))

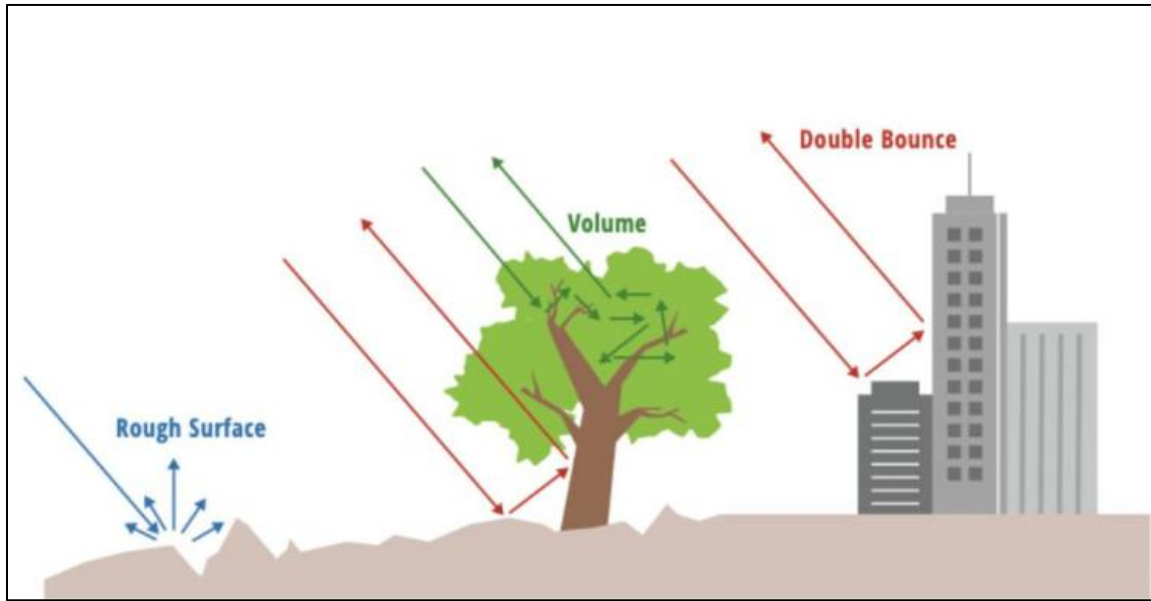


Figura 1. Comportamiento de la retrodispersión en diferentes superficies.

Fuente: <https://detektia.com/insar/scatterers-permanentes-distribuidos/>

[Osmanoglu et al. \(2016\)](#) señala que realizando series temporales se pueden superar algunos de estos factores limitantes, de igual manera, con ello se puede analizar la variabilidad de los datos a través del tiempo y conocer el comportamiento actual del volcán. Señala que actualmente se han desarrollado varios algoritmos diferentes para el análisis de series temporales de datos InSAR para resolver ambigüedades como por ejemplo Persistent Scatterer InSAR (PSI) y Small Baseline Subsets (SBAS).

InSAR ha sido implementado en diversos estudios de deformación volcánica. Un ejemplo de ello es un estudio en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán en Chile (temática de tesis de pregrado en la Universidad de Concepción de Chile), donde se analizó la deformación vertical de este. Con observaciones InSAR de la misión Sentinel-1, fueron obtenidos 5 interferogramas que permitieron interpretar las deformaciones superficiales del macizo en la componente vertical, determinando que el volcán presentaba una deformación máxima de aproximadamente 23 mm por deflación y de 15mm por actividades volcánicas ([Bustos, 2018](#)).

Debido a que se puede abarcar gran cantidad de área con técnicas satelitales, [Pritchard et al. \(2004\)](#) llevaron a cabo un estudio en los Andes Centrales, abarcando aproximadamente 900 volcanes y descubriendo diversos comportamientos en varios de ellos:

- Los estratovolcanes Uturuncu (Bolivia) y Hualca Hualca (Perú) se están inflando
- Hay una fuente de inflación en la frontera entre Chile y Argentina que no está obviamente asociada con el edificio volcánico Lazufre.
- Una caldera llamada Cerro Blanco (también llamado Robledo) en el noroeste de Argentina está disminuyendo.

2.3. Volcán Arenal

El volcán Arenal es un estratovolcán con estructura cónica adosada de aproximadamente 1670 m.s.n.m y el más joven de los volcanes de Costa Rica, descubierto hace cuatro mil años. Se llama estratovolcán a la variedad de volcán cónico de gran altura, formado por varias cantidades de estratos de lava solidificada, piroclastos alternantes y de cenizas volcánicas ([Guerrero, 2012](#)).

El Arenal ocupó por más de cuarenta años el estatus de ser uno de los dieciséis volcanes más activos del mundo, está ubicado dentro de los cien volcanes más conocidos a nivel global, y es uno de los más estudiados a nivel latinoamericano; a escala nacional, es el volcán que más muertes ha causado ([Red Sismológica Nacional, 2012](#)). En su pasado, al ser uno de los volcanes más activos del mundo, su peligro era inminente, provocando pérdidas humanas, en infraestructura y vegetación.

El 29 de julio de 1968, experimentó su primera actividad eruptiva en 450 años, comenzó con una serie de temblores y una erupción explosiva, lo cual causó desastres en las zonas circundantes. La catástrofe fue tal que, arrasó en tres días con un área de 15 km², dejando un saldo de 78 personas fallecidas por quemaduras, asfixia y golpes ocasionados por los bloques o rocas incandescentes que el coloso lanzó. Los pequeños poblados de Pueblo Nuevo y Tabacón, localizados cerca del volcán fueron destruidos; además, hubo pérdidas significativas en agricultura y ganadería ([Blanco, 2018](#)).

Esta explosión fue el comienzo de aproximadamente 42 años de actividad. Durante la cual se destacan eventos como la actividad eruptiva de junio de 1975, cuando hubo cuatro fuertes explosiones, en 1984 experimentó una nueva fase de explosiones continuas y en 1998 una serie de grandes erupciones donde el volcán arrojó grandes cantidades de lava, roca y ceniza en los pueblos cercanos. Ya para el 2010 fue su última actividad con la emisión de gases y esporádicas erupciones estrombolianas, por lo que en este momento se encuentra en estado de reposo.

En el Volcán Arenal se realizaron diversidad de estudios con técnicas InSAR, entre ellos se llevó a cabo un estudio entre el 2005 al 2009 denominado *Movimiento constante cuesta abajo en el flanco occidental del volcán Arenal* (Ebmeier et al., 2010), donde encontraron que los flancos occidentales del volcán se mueven cuesta abajo en un ángulo de aproximadamente 55° por debajo del plano horizontal, con una tasa constante de al menos 7 cm/año y hacia el oeste de alrededor de 12 cm/año (ver Figura 2), donde el movimiento más pronunciado y de menor magnitud se encuentra en la base de las laderas del Arenal.

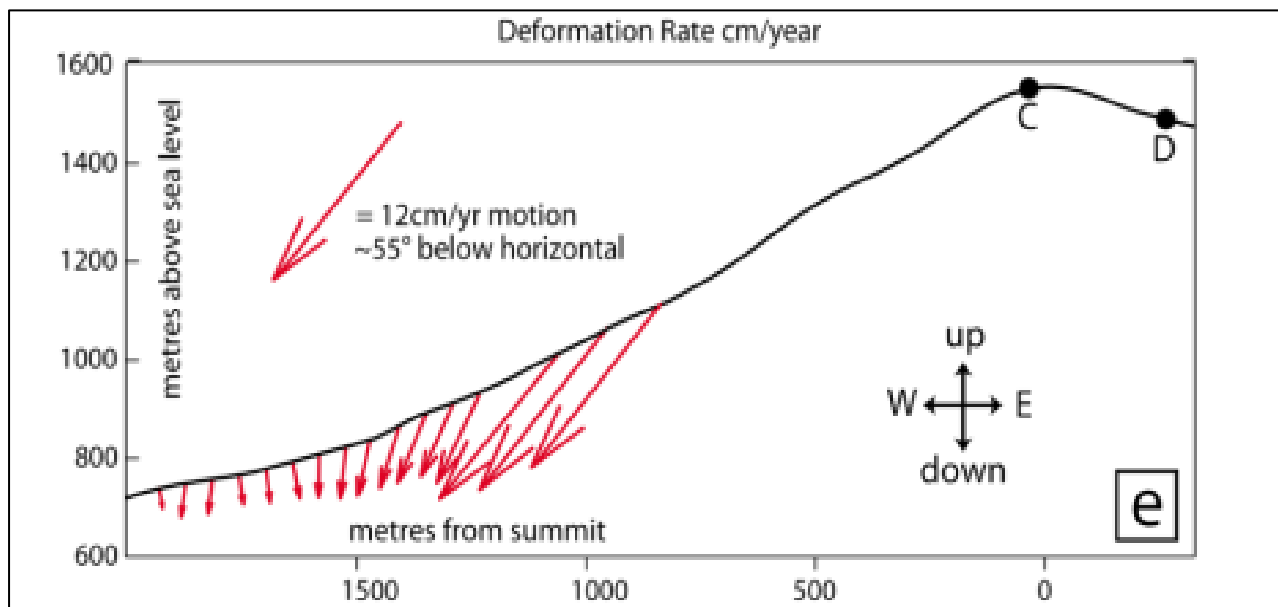


Figura 2. Foco de deformación del volcán Arenal entre el 2005 y 2009.

Fuente: Ebmeier et al., 2010

Así mismo, en setiembre del 2012 ocurrió un gran temblor ubicado debajo de la placa subyacente de la Península de Nicoya, con una magnitud momento $MW= 7.6$ y un total de 6400 réplicas que fueron registradas y localizadas por la red sísmica del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) (Chaves et al., 2017). Este terremoto generó una serie de temblores y micro temblores alrededor del volcán, los cuales produjeron una serie de cambios visibles en la superficie de este, despertando el interés de distintos investigadores.

Gracias a mediciones InSAR, realizaron estudios con imágenes de radar satelital de alta resolución del período 2011-2013 para analizar el impacto del terremoto. En sus resultados se evidencia frecuentes caídas de rocas y de al menos 16 deslizamientos de tierra lentos y poco profundos (ver

Figura 3), con ello, concluyeron que el terremoto de Nicoya de 2012 causó una extensión inusualmente grande de desprendimientos de rocas (Ebmeier et al., 2014).

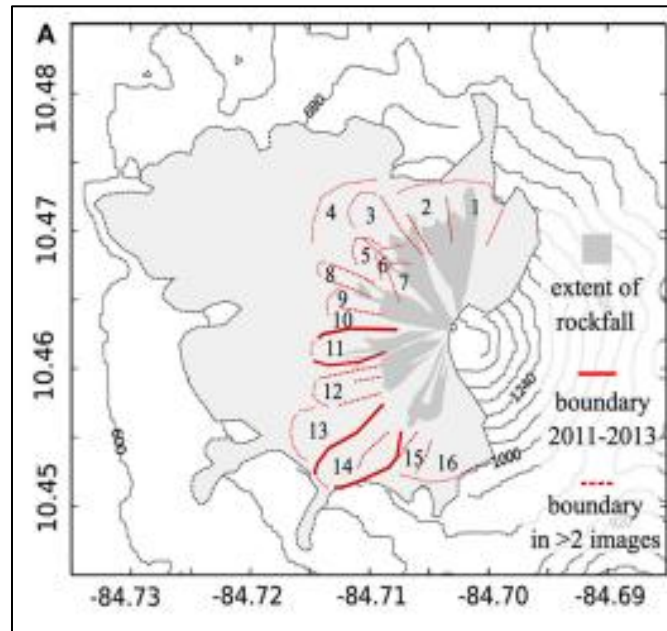


Figura 3. Localización de deslizamientos en la zona occidental del volcán Arenal.

Fuente: Ebmeier et al., 2014

Durante este estudio, los resultados mostraron que estos deslizamientos son deslizamientos de tierra "lentos" de hasta 10 cm/año, y que alrededor del 7% de la superficie del Arenal está cubierto por deslizamientos de tierra activos. También se demostró que las altas tasas de deformación pueden ser causadas por procesos de edificios poco profundos y, por lo tanto, deben considerarse en la interpretación de las mediciones geodésicas de hundimiento post eruptivo. (Ebmeier et al., 2014).

Actualmente, el volcán se encuentra en reposo, lo cual no significa que se deba bajar la guardia. Una erupción sucede sin previo aviso, por lo que también existe la posibilidad de reactivación, por ello, el monitoreo constante de estas estructuras es de suma importancia, ya que la detección temprana de la variación en su comportamiento puede alertar sobre posibles desastres.

2.4. Peligros volcánicos

2.4.1. Deslizamientos y colapsos

Uno de los desastres a los que está sujeto un volcán son los deslizamientos, los cuales son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades; sin embargo, muy pocas personas son conscientes del peligro que representan, además cabe destacar que el 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control ([Suarez, 1998](#)).

Los deslizamientos suelen suceder por diversas causas, entre ellas, el clima, terremotos, meteorización, erosión, incendios forestales, por la topografía, por gravedad y por volcanes, siendo esta última la causa de mayor interés para este proyecto. [Portillo \(2012\)](#) señala que los estratovolcanes son un ejemplo clásico de un volcán responsable de la mayoría de los deslizamientos de tierra del mundo, por su forma cónica y las alturas que pueden llegar a alcanzar, son importantes focos de deslizamientos.

Muchos edificios volcánicos están formados por la acumulación de los materiales de sucesivas erupciones sin cohesión entre ellos. La superposición de materiales duros y blandos da lugar a una estructura que, en algunos casos, puede resultar inestable y producir el colapso de una parte del edificio. Las capas de materiales blandos y el agua pueden facilitar el movimiento del conjunto. Asimismo, la intrusión de un gran volumen de magma en el edificio volcánico puede desestabilizarlo y producir el deslizamiento de una de sus laderas. El deslizamiento de una ladera volcánica puede disparar una erupción u ocurrir como consecuencia de ella ([Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2022](#)).

2.4.2. Flujos Piroclásticos

Los flujos piroclásticos son flujos compuestos por gases y material sólido (ceniza y rocas de diverso tamaño). Las avalanchas de alta velocidad de ceniza caliente, fragmentos de roca y gas pueden descender por los flancos de un volcán durante erupciones explosivas o cuando un domo de lava que está creciendo se colapsa y se rompe en pedazos. Estos flujos piroclásticos pueden alcanzar temperaturas de 900 °C y moverse a velocidades de 160 a 240 kilómetros por hora. Estos flujos

tienden a seguir el curso de los valles, cauces, barrancas y quebradas, y son capaces de derribar y quemar todo en su camino. Los flujos piroclásticos de densidad menor, llamados surgencias u oleadas piroclásticas, pueden cubrir o saltar fácilmente crestas de más de 100 metros de altura ([U.S. Department of the Interior Geological Survey, 2000](#)).

Según [Bordino \(2022\)](#), dependiendo del tamaño que posean los fragmentos, el piroclasto se puede clasificar en cenizas que son partículas menores a los 2 milímetros de diámetro, lapilli que son partículas cuyo diámetro varía entre los 2 y 64 milímetros de diámetro y bombas o bloques que son fragmentos de más de 64 milímetros de diámetro. Por su parte, el tamaño de las partículas condiciona la velocidad y extensión que alcanza el flujo piroclástico. Aquellos flujos compuestos por bloques presentan una baja movilidad y, por lo general, quedan restringidos a pocas decenas de kilómetros desde el centro de emisión. Mientras que aquellos flujos formados por cenizas y lapilli pueden alcanzar un radio de 200 kilómetros desde su centro de emisión.

Resulta importante mencionar que el flujo piroclástico representa uno de los mayores peligros de un volcán en erupción debido a que, por la gran velocidad con la que avanza el flujo, puede afectar a una enorme extensión de terreno en un corto plazo. Además, no solo afecta a las vidas humanas e infraestructuras, sino que provoca efectos adversos prolongados en el clima, el suelo y el agua de la zona ([Bordino, 2022](#)).

2.5. Técnicas InSAR

Las técnicas de Interferometría de Radars de Apertura Sintética combinan dos o más imágenes SAR sobre la misma región para revelar la topografía o el movimiento de la superficie. Si las imágenes SAR combinadas se originan en posiciones ligeramente diferentes, se puede mapear la topografía de la superficie. Por el contrario, si se combinan imágenes de la misma posición, pero tomadas en diferentes momentos, la diferencia entre ellas mostrará el movimiento, o deformación, de la superficie en el tiempo entre las dos imágenes ([NASA-ISRO SAR Mission, s.f](#)).

InSAR amplía en gran medida la capacidad de los científicos para monitorear volcanes porque, a diferencia de otras técnicas que se basan en mediciones en unos pocos puntos, InSAR produce un mapa de deformación del suelo que cubre un área espacial muy grande con una precisión de escala centimétrica. Esta técnica es especialmente útil en volcanes remotos de difícil acceso y en lugares

donde las condiciones peligrosas impiden o limitan el monitoreo de volcanes en tierra ([U.S. Geological Survey, s.f.](#)).

Según De Souza (2004) esta metodología opera de la siguiente manera (ver Figura 4):

1. La antena transmite un pulso de radiación hacia el suelo
2. Cuando el pulso toca el suelo, se extiende en todas las direcciones
3. Una parte de esta señal regresa en la dirección del radar y, por lo tanto, se denomina retrodispersión
4. La antena capta la señal de retrodispersión, registrando su amplitud, fase, polarización y tiempo de retorno
5. Las señales capturadas se procesan, juntas, para formar una imagen de la superficie.

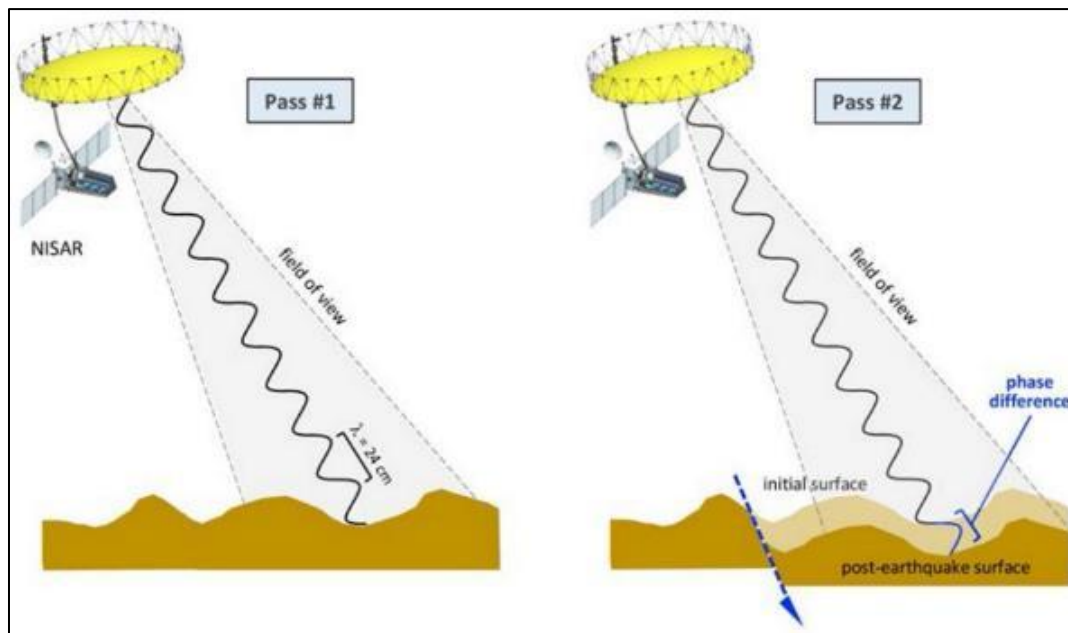


Figura 4. Funcionamiento de InSAR.

Fuente: <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/>

El ángulo que se forma entre Norte-Sur y la órbita que describe el sensor varía ligeramente dependiendo del satélite, pero en general lo hace en el rango de los 10° . La órbita polar de los satélites SAR permite que durante la mitad de su trayectoria hayan viajado en dirección al polo Norte hasta el polo Sur, cada vez que así lo hace se dice que el satélite va en descenso, y cada vez

que el satélite recorre del polo Sur al polo Norte se dice que va en ascenso, como se puede apreciar en la Figura 5 ([Hermosilla, 2016](#)).

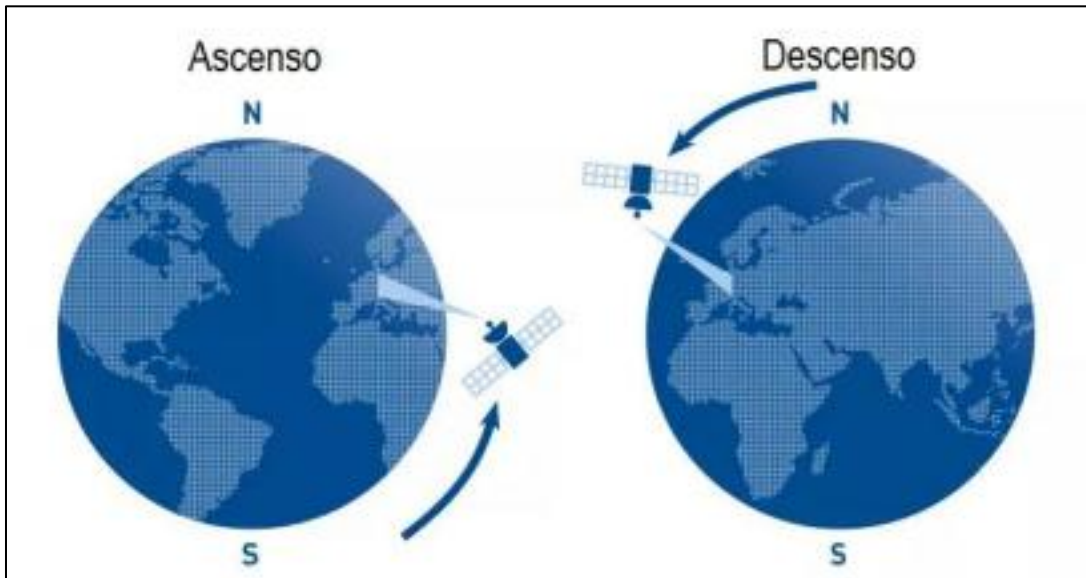


Figura 5. Viaje ascendente y descendente InSAR.

Fuente: Hermosilla, 2016

2.5.1. Sentinel-1

En el estudio se usaron datos InSAR de la misión Sentinel-1, la cual es una constelación de 2 satélites de órbita polar, capaz de capturar datos tanto de día como de noche, destinados a servicios terrestres y oceánicos. Además, cabe destacar que los dos satélites de la constelación (Sentinel-1A y Sentinel-1B) orbitan alrededor de la Tierra con un desfase de 180° , capturando imágenes sobre la totalidad de la Tierra cada doce días ([Instituto Geográfico Nacional de España, s.f.](#)).

En diciembre de 2021, Sentinel-1B experimentó una anomalía relacionada con la alimentación de la electrónica de instrumentos proporcionada por la plataforma satelital, lo que le impidió entregar datos de radar. La misión fue reemplazada por Sentinel-1C, que se lanzó en diciembre de 2024. Por lo que en la actualidad se encuentran en órbita la misión Sentinel-1A y Sentinel-1C ([European Space Agency, s.f.](#)).

Las principales aplicaciones del uso de imágenes Sentinel-1 se basan en diversos monitoreos de estructuras de hielo, de tierra y agua, también se utilizan en análisis de usos de la tierra como en

agricultura y deforestación, para estudios de apoyo ante emergencias como inundaciones o terremotos, y como en este caso, en estudios de deformaciones. Este método de adquisición de la información resulta beneficioso para trabajos donde la obtención a los datos es de difícil acceso, además, con el alto volumen de información disponible se pueden realizar estudios de gran lapso temporal, siendo este de días, meses o incluso de años.

El principal modo de adquisición de la información es el barrido interferométrico, este satisface la mayoría de los servicios que ofrece Copérnico y adquiere datos con una franja de 250 km a una resolución espacial de 5 m por 20 m (ver Figura 6). Este posee varios productos, de los cuales se destaca el Simple Look Complex (SLC) el cual tiene la información de la fase y la amplitud, esenciales para realizar cálculos con interferometría.

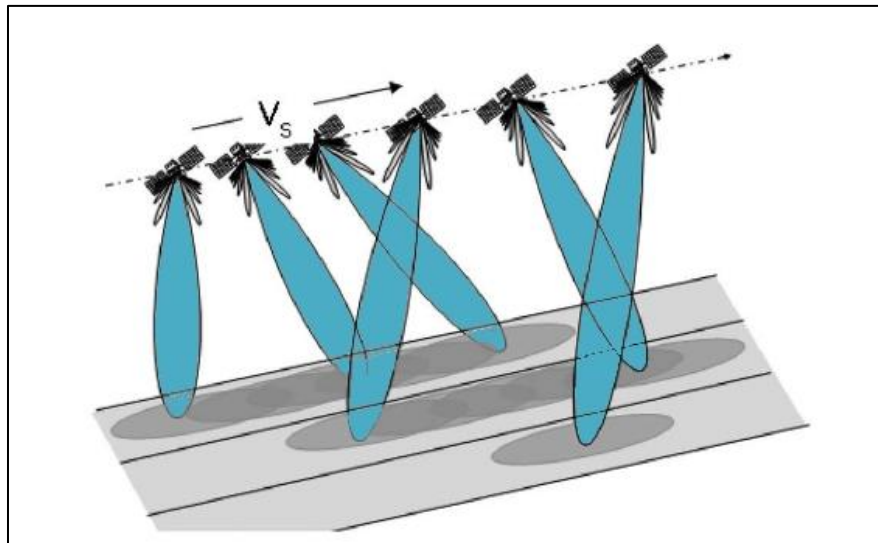


Figura 6. Adquisición de imágenes mediante barrido interferométrico.

Fuente: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>

Para la descarga de estas imágenes se utiliza el ASF DATA Search de la NASA (ver Figura 7) el cual opera el archivo de la NASA de datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) de varios satélites y aeronaves, proporcionando estos datos y servicios asociados a los investigadores en apoyo del proyecto del Sistema de Información y Datos de Ciencias de la Tierra de la NASA. ([Alaska Satellite Facility, 2023](#)). Para ingresar a la interfaz se accede al siguiente enlace: [ASF Data Search \(alaska.edu\)](#). Una vez ahí aparecerá el interfaz que se observa en la Figura 7.

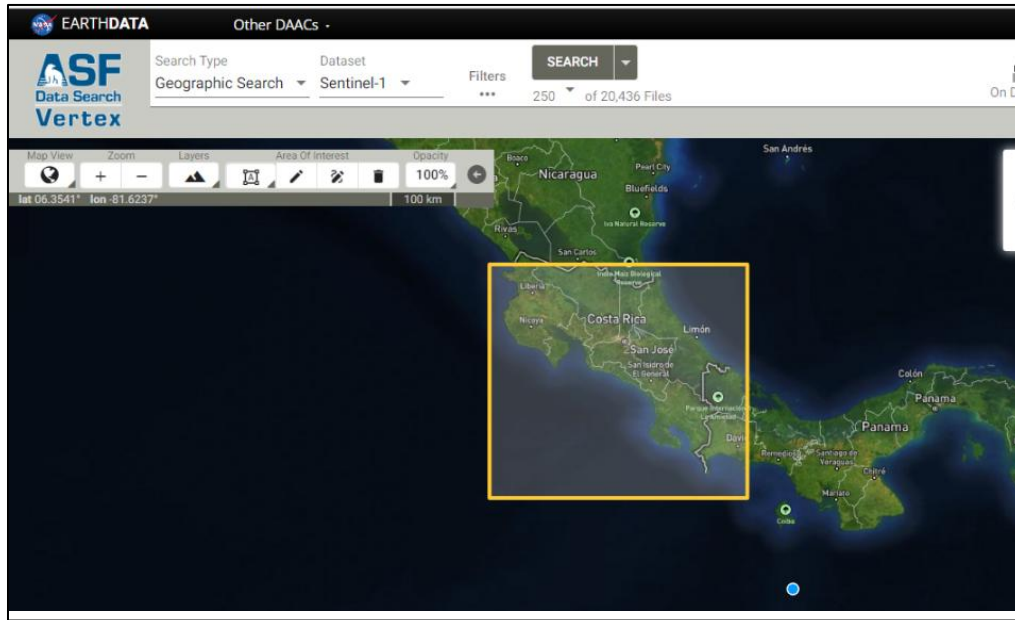


Figura 7. Interfaz de ASF Data Search para la descarga de imágenes SAR.

Fuente: [ASF Data Search \(alaska.edu\)](http://ASFDataSearch.alaska.edu)

2.6. Órbitas Precisas

Las órbitas precisas son, según [Duarte \(2015\)](#), trayectorias en las que se coloca un satélite para cumplir su misión. Estas trayectorias están definidas por leyes matemáticas precisas que dependen de las fuerzas que actúan sobre el satélite, entre las que predomina la gravedad de la Tierra, gracias a estas se obtiene información importante como la posición exacta del satélite en cada momento, así como su velocidad y dirección de movimiento; también se pueden obtener otros datos, como la inclinación de la órbita, la excentricidad y la orientación del satélite. Estas resultan ser importantes para la geodesia ya que permiten medir con precisión la forma y tamaño de la Tierra, además, se pueden realizar estudios de alturas, monitoreos y cambios de la superficie terrestre y brindar mayor precisión a las mediciones GNSS.

El programa Copérnico, administrado por la Unión Espacial Europea (ESA), brinda acceso completo, gratuito y abierto a los productos de usuario Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 y Sentinel-5, que sirven para el monitoreo de diversidad de fenómenos. A la interfaz de descarga para las Órbitas precisas se accede desde el siguiente enlace:

<https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE>

2.7. Modelos Digitales de Elevación

Los Modelos Digitales de Elevación o MDE, son altamente utilizados en diversidad de estudios geográficos, ingenieriles y cartográficos, ya que estos brindan información espacial muy útil respecto al relieve del terreno; [Felicísimo \(s.f\)](#) menciona que es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie de un terreno, que puede ser representada en formato vectorial o en formato ráster y suelen ser obtenidos mediante diversos métodos como:

1. Métodos directos: quiere decir que son medidos directamente sobre el terreno utilizando metodologías altimétricas (radar o laser en plataformas aéreas o satélites), GNSS o levantamientos topográficos.
2. Métodos indirectos: que se toman a partir de fuentes secundarias como imágenes satelitales, fotografías convencionales o interferometría radar.
3. Digitalización de mapas topográficos.

Los MDE se utilizan en diversos análisis de deformación de terreno. Permiten detectar cambios en la topografía en diferentes momentos, para llevar a cabo este tipo de análisis, se utilizan técnicas de interferometría SAR, que permiten medir la distancia entre la antena del satélite y la superficie terrestre en diferentes momentos, posteriormente, los datos obtenidos se procesan y se comparan con los datos de un MDE, lo que permite identificar las deformaciones que se han producido. Además, el MDE en un análisis SAR permite realizar la corrección geométrica de las imágenes, el DEM ayuda a restar el efecto de la altura del terreno, para que solo quede la deformación real.

2.8. Corrección atmosférica

Según [Yu et al. \(2020\)](#), el error atmosférico es un efecto combinado que proviene de la troposfera y de la ionosfera. En el caso del retraso ionosférico, en SAR de onda corta es moderado y poco significativo. Por ejemplo, el efecto en Sentinel-1 de banda C es de aproximadamente 5,5 % del efecto en los satélites de banda L dada una geometría de órbita similar. Esto significa que los

satélites de banda C experimentan mucho menos retraso ionosférico en comparación con los satélites de banda L.

El retraso de fase causado por efectos atmosféricos debido a variaciones espaciales y temporales de presión, temperatura y contenido de vapor de agua es una de las principales fuentes de error en la estimación de la deformación del suelo mediante InSAR. La precisión de la medición de la deformación del suelo depende de la solidez de las técnicas de corrección atmosférica. Estas técnicas se basan en datos auxiliares como los modelos meteorológicos numéricos o en el análisis de la propia fase interferométrica ([Darvishi et al., 2020](#)).

2.9. Procesamiento de datos

2.9.1. ISCE

InSAR Scientific Computing Environment (ISCE) es un marco diseñado para procesar datos de radar de apertura sintética y SAR interferométrico. Actualmente, ISCE admite el procesamiento de datos adquiridos por las siguientes plataformas: ALOS, ALOS2, COSMO-SkyMed, EnviSAT, ERS, KOMPSAT5, RadarSAT2, RISAT1, Sentinel-1, TerraSAR-X, Tandem-X y UAVSAR. ISCE también puede leer algunos datos en formato SICD ([Anaconda, 2023](#)).

Este software de código abierto fue desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA y se encuentra disponible para Linux, macOS y Windows, mezcla una serie de lenguajes de programación de Python, C y C++ para crear rutinas que procesan datos de radar para poder obtener los interferogramas a partir de las imágenes SAR, el MDE y las órbitas precisas de la zona de interés. La precisión de este depende en gran medida de la calidad de los datos SAR que se utilizan como entrada, así como de la precisión de la información del satélite y algunos parámetros que se utilizan en el procesamiento.

2.9.2. MintPy

El software Miami InSAR Time-series en Python (MintPy) es un paquete de software de código abierto diseñado para el análisis de series temporales de datos InSAR. Este programa permite procesar pilas de interferogramas corregistrados y desenrollados en formatos como ISCE, ARIA, FRInGE, HyP3, GMTSAR, SNAP, GAMMA o ROI_PAC. A partir de estos datos, genera

mediciones tridimensionales del desplazamiento de la superficie terrestre (2D en el espacio y 1D en el tiempo) en la dirección de la línea de visión. Además, MintPy incluye herramientas para análisis rutinarios de series temporales, así como un conjunto de utilidades independientes. ([GitHub, 2023](#)).

2.10. Análisis de Series Temporales

Una serie temporal es una colección de observaciones de una variable realizadas de forma secuencial en el tiempo, en las que el orden de observación es importante. Los valores de una serie temporal van ligados a instantes de tiempo, de manera que el análisis de una serie implica el manejo conjunto de dos variables; la variable en estudio propiamente dicha y la variable tiempo.

Las series pueden tener una periodicidad anual, semestral, trimestral, mensual, etc, según los periodos de tiempo en los que están recogidos los datos que la componen. Además, incorpora un conjunto de técnicas estadísticas que permiten no solo estudiar y modelar el comportamiento de fenómenos que evolucionan en el tiempo, sino también realizar proyecciones o predicciones sobre los valores que podrían alcanzarse en el futuro. ([Esparza, s.f](#)).

[Molinero \(2003\)](#) destaca que la metodología tradicional para el estudio de series temporales es bastante sencilla de comprender, y fundamentalmente se basa en descomponer las series en varias partes:

- Tendencia: es la dirección general de la variable en el periodo de observación, es decir el cambio a largo plazo de la media de la serie.
- Estacionalidad: corresponde a fluctuaciones periódicas de la variable, en periodos relativamente cortos de tiempo.
- Otras fluctuaciones irregulares: después de extraer de la serie la tendencia y variaciones cíclicas, quedará una serie de valores residuales, que pueden ser o no totalmente aleatorios.

El análisis de series temporales es una herramienta fundamental en el monitoreo de volcanes. Permite estudiar y comprender el comportamiento de diferentes parámetros volcánicos a lo largo del tiempo, como la deformación del terreno, la actividad sísmica, las emisiones de gases y la temperatura.

Capítulo 3: Objetivos

Objetivo General:

Estudiar los cambios espaciotemporales de la deformación del flanco oeste volcán Arenal entre 2017-2023, mediante la formación de series temporales InSAR a partir de las imágenes del satélite Sentinel-1 generando así información sobre el estado de deformación de dicho flanco.

Objetivos Específicos:

1. Procesar las imágenes SAR del satélite Sentinel-1 con el software científico ISCE y MINTPY determinando la velocidad de la actual deformación del flanco oeste del volcán Arenal.
2. Determinar los cambios espaciotemporales de la velocidad obtenida utilizando herramientas estadísticas, de forma que se obtenga información para el posterior estudio de los procesos geológicos actuales en el flanco oeste del volcán Arenal.
3. Identificar la evolución de la deformación del flanco oeste del volcán mediante la comparación de la deformación obtenida con los estudios anteriores determinado los cambios en los deslizamientos y el hundimiento del material volcánico acumulado.

Capítulo 4: Metodología

4.1. Preparación de insumos

4.1.1. Imágenes SAR

Para el estudio de la deformación del volcán Arenal, entre 2017-2023, se necesita las imágenes SAR con un set de parámetros que van a ser insumos para detectar deformación. Las imágenes SAR son la imagen compuesta de la amplitud y de la fase. Es a partir de la diferencia de la fase de dos imágenes que se genera un interferograma en el cual se podría observar deformación. El Arenal es observado por dos órbitas; la ascendente y descendente, sin embargo, la ascendente no da resultado concluyente lo que fue observado por [Ebmeier et al. \(2010\)](#).

Al ingresar al interfaz de ASF Data Search se puede realizar la adquisición de las imágenes, donde se debe considerar el tipo de imagen, en este caso, las destinadas a la geometría de radar son las SLC o Simple Look Complex por sus siglas en inglés, también se deben ingresar las fechas de interés, que brindará la temporalidad del estudio. Finalmente, los parámetros de polarización que se indica con dos letras, la primera corresponde a la polarización transmitida y la segunda corresponde a la polarización recibida.

Inicialmente se realiza una primera búsqueda de información a partir de la delimitación de la zona de interés, esto sirve para poder discriminar la información y delimitarla únicamente a los datos que sirven para el proyecto. Como se puede observar en la Figura 8, se realiza un acercamiento grosso modo del área.

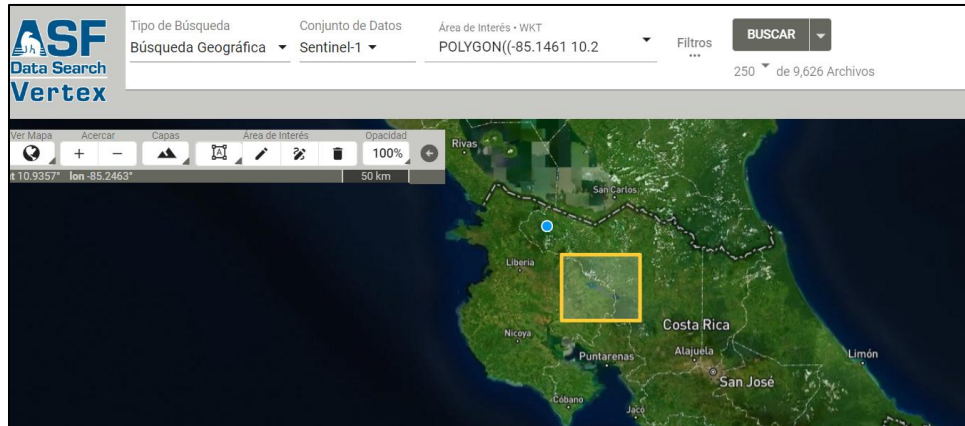


Figura 8. Delimitación del volcán Arenal en la interfaz ASF DATA SEARCH para la búsqueda de imágenes.

Fuente: [ASF Data Search \(alaska.edu\)](https://alaska.edu)

Una vez delimitada la zona de interés, se procede a establecer los filtros que desplegarán las imágenes. ASF Data Search muestra un cajetín de opciones que brindan una interacción amigable con el usuario (ver Figura 9), donde se establecen los parámetros anteriormente mencionados que brindarán el insumo principal para el proyecto. Se estableció un tipo de archivo SLC en órbita descendente en fechas que abarcan de enero del 2017 a mayo del 2023.

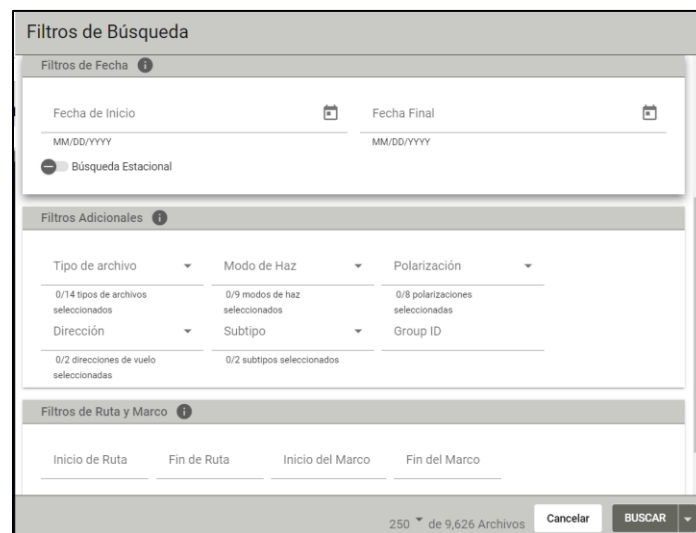


Figura 9. Ventana de filtro de búsqueda de la interfaz ASF DATA SEARCH para la búsqueda de imágenes.

Fuente: [ASF Data Search \(alaska.edu\)](https://alaska.edu)

La descarga de los datos se realiza mediante un archivo .csv obtenido de la página web ASF Data Search. Después de lograr visualizar los datos con los filtros y delimitados al área de interés, ASF Data Search brinda la opción de generar un archivo .csv que contiene un listado con la información de las imágenes que se desean descargar. Esta herramienta resulta de gran utilidad al momento de descargar grandes volúmenes de información, como es el caso de este proyecto.

Con el archivo generado anteriormente, se procede a la descarga de las imágenes mediante un script llamado Download.py. Este script descarga de datos de las misiones Sentinel-1 de forma gratuita.

4.1.2 Modelo Digital de Elevación

El MDE es un insumo fundamental en un análisis de InSAR, ya que permite realizar la corrección geométrica de las imágenes. Dado que las imágenes SAR son altamente sensibles a la topografía por su adquisición de información mediante microondas, pueden presentar distorsiones por efectos topográficos. En terrenos con relieves pronunciados, las imágenes pueden presentar distorsiones geométricas como efectos de brillo excesivo o sombras.

Existe variedad de MDE que abarcan la zona del volcán Arenal, uno de ellos es el MDE SRTM30. El MDE SRTM30 posee una resolución espacial de 30 metros, significa que cada píxel representa un área de 30 x 30 metros en el terreno lo que proporciona un nivel de detalle suficiente para muchos estudios científicos. Además, proporciona cobertura entre las latitudes 60°N y 56°S, cubriendo la mayoría de las áreas terrestres habitadas del mundo.

La descarga de este MDE se puede realizar de forma automatizada mediante el uso del script dem.py. Este script permite la descarga del MDE SRTM30 para la región delimitada por coordenadas geográficas específicas. Una vez descargado, el MDE se ajusta al sistema de referencia WGS84, esto garantiza que los datos puedan ser integrados fácilmente con otros tipos de información geoespacial.

4.1.3 Órbitas Precisas

Las órbitas precisas brindan información esencial de los satélites que ayudan a determinar su posición y trayectoria, en procesamientos con imágenes SAR funcionan como un insumo importante para poder corregir errores orbitales. Estas órbitas se encuentran disponibles a los

usuarios de forma gratuita en la página web de Copérnico, que brinda soluciones para diversos productos, entre ellos Sentinel-1.

Para la descarga manual de los datos se debe filtrar la información con las características de la órbita que se desea descargar (Figura 10). Este buscador discrimina los datos principalmente por las fechas de interés, por lo que por cada imagen va a haber 2 productos de órbita por descarga. De igual modo, en un estudio con InSAR se debe considerar la órbita de trabajo, ya que las hay productos para órbita ascendente y descendente.

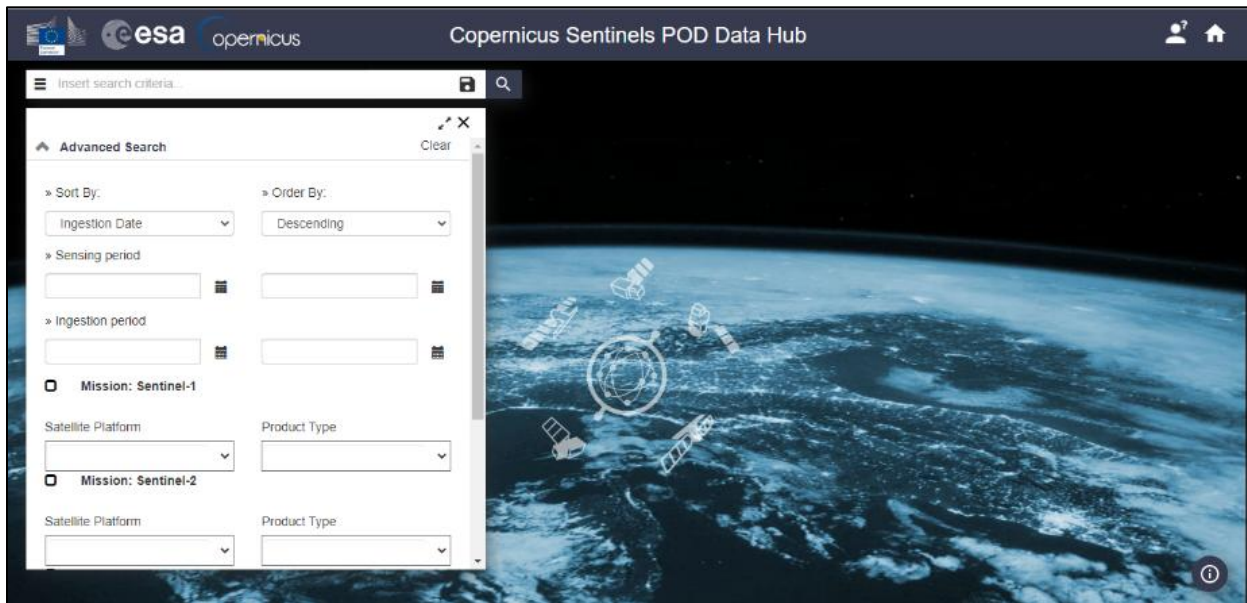


Figura 10. Interfaz de Copérnico para la descarga de órbitas precisas.

Fuente: <https://scihub.copernicus.eu/gnss/#/home>

El script de ISCE cuenta con las herramientas para realizar la descarga automática de las órbitas, lo cual resulta muy beneficioso por la cantidad de imágenes por analizar, además optimiza el proceso de adquisición de los insumos. Al momento de ejecutar el programa, este accede a las librerías de Copernicus y crea una carpeta con el conjunto de órbitas que se requieren para posteriormente ser utilizados en el procesamiento de las imágenes SAR.

4.1. Procesamiento de imágenes

4.1.1. ISCE

Las imágenes SAR deben ser procesadas debido a que están capturadas con geometría de radar, esta geometría influye en la forma en que las imágenes se registran por lo que deben ser procesadas para su correcta interpretación. Existen programas de procesamiento de imágenes SAR como ISCE, este es un software diseñado para el procesamiento de datos SAR para generar productos derivados de estas imágenes, como interferogramas y mapas de deformación, que se emplean para estudios geofísicos, como el monitoreo de terremotos, volcanes, y movimientos de terreno.

A grandes rasgos, el flujo de trabajo que emplea ISCE incluye la descarga y preprocesamiento de los datos SAR, la generación de interferogramas y la corrección de distorsiones geométricas y atmosféricas. Para crear interferogramas, ISCE toma dos imágenes SAR de la misma zona, obtenidas en diferentes momentos y las registra o alinea geométricamente, de modo que ambos conjuntos de datos coincidan en posición. Esto es fundamental para comparar cambios en la superficie terrestre, a esto se le conoce como corrección de las imágenes. Las señales de radar miden la fase, para obtener información de desplazamiento absoluto en la superficie terrestre, se realiza el desenvolvimiento de fase, un proceso que corrige estas ambigüedades y permite obtener desplazamientos continuos y precisos.

Después de que se han generado los interferogramas y se ha corregido la fase mediante el desenvolvimiento, los datos aún están en coordenadas de "rango" y "azimut", que son las coordenadas del sistema de radar basadas en la distancia y el ángulo de visión desde el satélite.

ISCE, al ser un código de Python, este debe ser descargado con las dependencias necesarias para la correcta ejecución de este, en la interfaz Linux. Asumiendo que ya se ha descargado el código correctamente, para continuar con el procesamiento de las imágenes es necesario configurar qué herramienta de ISCE que se va a utilizar. Estas dependen del modo en que se adquirieron las imágenes por procesar, en este caso se está trabajando con imágenes Sentinel-1 adquiridas en modo TOPSAR por lo que configura el paquete topsStack. Cabe destacar que estos archivos de rutinas, para procesar imágenes mediante ISCE, fueron brindados por Leonardo Euillades y Pablo Euillades, miembros de la Asociación de Latinoamericana de Geodesia Volcánica (GEOVOL).

Para comenzar con el proceso, en la terminal de linux se ejecuta el siguiente comando:

```
sudo -s  
  
echo export  
  
PATH=/usr/local/isce/components/contrib/stack/topsStack:$PATH >>  
  
/etc/bash.bashrc  
  
exit
```

A continuación, se ingresa a la carpeta donde se va a trabajar y se verifica que contenga las siguientes carpetas:

1-data que contiene las imágenes SAR,

2-dem con el Modelo Digital de Elevación

3-órbitas que contendrá las órbitas.

Dentro de esta carpeta principal se deben copiar los archivos `cb_parametros.txt` y `generar_stack.py` que contienen:

-cb_parametros.txt: es un archivo de texto que contiene parámetros de procesamiento, en este se definen aquellos parámetros vinculados con, por ejemplo, el multilook a usar, área para procesar, filtrado, etc. La plantilla que se debe adecuar es la siguiente:

```
[default]  
  
#Parámetros para definir el proyecto y generar el stack de interferogramas con  
ISCE:  
  
prjPath =/INSAR/ISCE/Arenal/Gloriana/DES/  
  
images = /INSAR/ISCE/Arenal/Gloriana/DES/data  
  
dem =  
/INSAR//ISCE/Arenal/Gloriana/DES/dem/demLat_N10_N11_Lon_w086_w084.dem.wgs84  
  
aux = /INSAR/ISCE/Arenal/Gloriana/DES/aux  
  
orbits = /INSAR/ISCE/Arenal/Gloriana/DES/órbitas  
  
bbox = 10.41 10.51 -84.75 -84.66 # South North West East
```

swath = 1

rlooks = 15

alooks = 5

connections = 2

nproc = 2

- **generar_stack.py**: script Python que tomará el archivo de parámetros y ejecutará la rutina que arma el stack de imágenes y genera los interferogramas. Cada línea del código describe una característica para el procesamiento de las imágenes. Inicialmente, hay que colocar las rutas de las carpetas para que el código encuentre en insumo con el cual se va a trabajar. Seguidamente, en la línea bbox, se colocan las coordenadas que delimitan la zona de interés, escribiéndolas en el orden Sur, Norte, Oeste y Este. Posteriormente, las líneas swath, rlooks, alooks, connections y nproc describen la precisión del resultado, ya describen las direcciones, radios y conexiones para el procesamiento.

Una vez que todas estas características se cumplen, se puede proceder a la generación del stack, mediante la ejecución del siguiente comando en la terminal:

```
python3 generar_stack.py cb_parametros.txt
```

De este modo el procesador comenzará a ejecutar la cadena de procesamiento para la generación de interferogramas a partir del correregistro de todas las imágenes contenidas en la carpeta data. Los interferogramas que se generarán en esta oportunidad serán todas las combinaciones posibles con las imágenes disponibles. Esto es controlado por la variable connections en el archivo de parámetros. En total se ejecutan 16 pasos en forma secuencial (ver Figura 11) para realizar toda la cadena de procesamiento ([Euillades, 2023](#)).

```
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
```

Figura 11. Archivos runfiles para el procesamiento de imágenes SAR con la metodología ISCE2.
Fuente: Euillades et al., 2023.

Al finalizar correctamente el procedimiento aparecerá la leyenda “El proceso finalizó satisfactoriamente” y como resultado principal de este procedimiento se habrán generado los productos interferométricos como coherencia, interferogramas, interferograma filtrado, entre otros. Los cuales pueden ser visualizados con diversas herramientas de visualización instaladas como dependencias de la aplicación, como mdx.py ([Euillades, 2023](#)).

4.2.2. MintPy

El software de series temporales Miami InSAR en Python (MintPy) es un paquete de código abierto para el análisis de series temporales de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR). Lee la pila de interferogramas corregistrados y produce un desplazamiento de la superficie del suelo en la dirección de la línea de visión del satélite. Además, incluye un análisis de series temporales de rutina y algunas herramientas independientes ([GitHub, 2023](#)).

Inicialmente, esta rutina lee los interferogramas y los referencia todos a un mismo píxel, para después calcular el cierre de fase y estimar errores, después calcula la coherencia temporal para evaluar la calidad de este. La rutina también realiza diversas correcciones, entre ellas la troposférica para finalmente estimar la velocidad. Este código suele ser utilizado en análisis de monitoreos de deformaciones y de movimientos tectónicos, ya que permite analizar cambios de terreno mediante el uso de series temporales.

Adicionalmente, MintPy tiene la posibilidad de descargar datos meteorológicos del modelo ERA5 para la corrección del retardo troposférico en forma automática. El algoritmo de corrección que utiliza es PyAPS, el cual es un módulo, o bien, se puede descargar de manera manual el modelo GACOS.

Ante ambas posibilidades, cabe destacar que:

1. GACOS: incorpora la presión superficial, la temperatura y la humedad específica del modelo meteorológico numérico del modelo meteorológico numérico del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas de Media Resolución (HRES-ECMWF) para calcular los retrasos atmosféricos en cada punto de la cuadrícula de 0,125 grados espacialmente (es decir, un espaciamiento de aproximadamente 9-12 km) y 6 h temporalmente ([Yu et al., 2020](#)).
2. ERA5: Es la reanálisis de quinta generación del ECMWF (Centro Europeo de Predicción a medio Plazo) para el clima global durante las últimas 8 décadas. Se basa en el método utilizado por los centros de predicción numérica del tiempo, donde cada número de horas (12 horas en el ECMWF) se combina un pronóstico anterior con nuevas observaciones disponibles para producir una mejor estimación del tiempo, el estado de la atmósfera, denominado análisis, desde el que se emite una previsión actualizada y mejorada. La información presentada por esta aplicación para ubicaciones específicas no son observaciones específicas del sitio, sino que se basan en el punto de la cuadrícula más cercano, a 1 grado más cercano ([León, 2024](#)).

Como insumo principal, se requieren los interferogramas desenvueltos que se obtuvieron en el paso anterior, por lo que se debe considerar la carpeta de procesamiento contenga los productos ISCE. Partiendo del hecho que ya se realizó la instalación del software disponible en:

[GitHub - insarlab/MintPy: Miami InSAR time-series software in Python](#)

Se procede a la configuración de los parámetros para el procesamiento. Al igual que en la ejecución del ISCE, se debe configurar un archivo de parámetros que se muestra a continuación:

```
[mintpy]
```

```
#Parámetros para generar las series temporales con MintPy:
```

```
#subset.lalo= 10.784540:10.841237,-85.385250:-85.330306

waterMask = None

minCohNet = 0.7

minCoh = 0.7

maskTresh = 0.7

CohTem = 0.7

subsetlaloNet = 10.433758:10.487369,-84.737271:-84.676454

refLatLon = 10.4665,-84.7163

#eventDate = 20221209 #earthquake date

troposphericDelay = height_correlation

deramp = linear
```

Entre las variables que se observan, caben destacar las variables:

- “refLatLon”, que indica el punto a considerar como referencia del procesamiento, que puede ser elegido de forma aleatoria por el software con un parámetro mínimo de coherencia.
- “troposphericDelay” este brinda la instrucción de cuál será el método atmosférico para el procesamiento.

Dentro de esta carpeta principal se debe copiar el archivo `generar_serie.py` que es un script de Python que tomará el archivo de parámetros y ejecutará la rutina que calcula la series temporal de deformación y el mapa de velocidad media entre otros productos.

Una vez que están estos archivos en la carpeta de procesamiento, se ejecuta en la terminal el siguiente comando:

```
python3 generar_serie.py cb_parametros.txt
```

De este modo, comenzará el procesamiento para la generación de series temporales de deformación partiendo del conjunto de interferogramas. El software también posee diversas herramientas de

visualización, que permite interactuar de distintas maneras con los resultados y realizar distintos análisis a partir de estos.

4.2. Deformación en función de la altura y en función del espesor de lava

Existen diversos factores que influyen en las deformaciones volcánicas, estos son el reflejo de distintos procesos de origen tectónico, magmático e hidrotermal, de difícil observación y registro, que se producen en el interior del medio. En este sentido, el desarrollo de modelos para la predicción de deformaciones permite establecer una relación directa con los procesos observados en superficie ([Lumbreras, 2017](#)). Ante ello, se establece que los dos principales factores por los que podría verse influenciada la deformación del volcán Arenal es la altura, debido a la forma cónica del volcán lo cual da cabida a posibles deslizamientos y el espesor de lava. En los pasos anteriores se obtuvieron estos datos, que funcionan como insumo principal para estos análisis.

Una vez obtenidos los datos, se procede a realizar un gráfico de dispersión que mostrará el comportamiento de la deformación en función de la altura y en función del espesor de lava mediante una ecuación lineal, la cual utiliza la ecuación de la recta. Esta forma de la ecuación es muy utilizada en álgebra y en análisis de datos para describir una relación lineal entre dos variables. Con los datos, se generan gráficos de dispersión para visualizar el comportamiento de la deformación en función de la altura y el espesor de la lava.

Estos gráficos se ajustan mediante una ecuación lineal, utilizando la fórmula de la recta, la cual es ampliamente empleada en álgebra y análisis de datos para describir relaciones lineales entre dos variables. Además, del gráfico, se obtiene el factor R^2 que permite conocer la calidad del modelo.

$$y = a + bx \tag{1}$$

Donde

y: es la variable dependiente o la variable predecir.

x: es la variable independiente o la variable que se utiliza para predecir.

a: es la intersección o el punto donde la línea de regresión cruza el eje y.

b: es la pendiente de la línea de regresión.

Seguidamente, se efectúa una regresión lineal de los datos y de igual forma, se calculan los errores, de modo que se logren observar con mayor detalle las relaciones donde hay mayor deformación, esto sirve para analizar la relación de las variables e identificar tendencias.

$$error = y - \hat{y} \quad (2)$$

Donde

y: es la variable original

\hat{y} : es la variable estimada de la regresión lineal

4.3. Análisis de series temporales

Las series temporales son conjuntos de datos que se recopilan y registran a lo largo del tiempo, por lo general en intervalos regulares. Pueden representar una amplia gama de fenómenos, permite hacer predicciones, identificar tendencias y patrones, y tomar decisiones informadas ([ESIC University, s. f.](#)). En este contexto, se realizan análisis de series temporales para examinar la variación de los datos de la velocidad de la deformación a lo largo del tiempo.

Se realizaron análisis de series temporales para analizar la variación de los datos a través del tiempo, para ello, primero se observan de forma gráfica los datos. Lo que permite identificar visualmente posibles patrones en la línea temporal, como tendencias o estacionalidades, que podrían influir en la deformación del volcán.

Luego, se descompone la serie temporal en sus componentes principales: tendencia, estacionalidad y ruido. La tendencia brinda información de hacia dónde se dirige el fenómeno en general, la estacionalidad muestra si hay algún tipo de repetición o ciclo, y el ruido son esas pequeñas fluctuaciones que no siguen ningún patrón claro.

Finalmente, mediante un modelo de regresión lineal, se relacionan los datos a lo largo del tiempo. Este permite realizar comparaciones con los resultados de estudios anteriores y conocer la evolución del volcán.

Con el objetivo de caracterizar los patrones de desplazamiento en distintas zonas del volcán, se desarrolló una rutina en Octave orientada al ajuste y análisis de tendencias en las series temporales.

Los datos fueron extraídos de un archivo de texto que contiene registros en formato columna correspondientes a la fecha de adquisición (en formato yyymmdd) y los desplazamientos medidos en tres ubicaciones clave: el cráter del volcán, una zona asociada a deslizamientos y una zona base que actúa como referencia estable.

Cada serie de desplazamiento fue sometida al ajuste de tres modelos: lineal, polinomial y sinusoidal; con el fin de identificar la función que mejor representa su comportamiento a lo largo del tiempo.

El modelo senoidal se definió mediante la función:

$$f(x) = A * \sin(\omega t + \emptyset) + C \quad (3)$$

Donde:

A: es la amplitud

ω : es la frecuencia angular (ciclo anual)

\emptyset : es la fase

C: constante media

Cada serie temporal fue representada gráficamente junto con su modelo óptimo. Adicionalmente, se incorporó un análisis visual de la estacionalidad, mediante el sombreado de los meses correspondientes a la estación lluviosa en Costa Rica (de mayo a noviembre). Esta visualización buscó identificar posibles correlaciones entre los desplazamientos y las variaciones climáticas anuales.

4.4. Análisis de deformación usando Qgis

Qgis es una aplicación altamente utilizada en diversos análisis geoespaciales ya que permite la interacción del usuario con diversos formatos, herramientas de análisis espacial y estadístico,

integración de bases de datos, programación de scripts, entre otros. En el caso de este proyecto, Qgis se utilizará como un medio de extracción y compatibilización de la información.

4.4.1. Insumos

Antes de proceder a trabajar desde Qgis, se deben transformar algunos formatos para un mejor manejo de la información. MintPy permite realizar diversos cambios de formato de los resultados obtenidos ya que contempla esta posibilidad de trabajar en Qgis. El formato de salida que se genera del del paso anterior, es un archivo con formato .h5 que contiene los resultados de la velocidad de la deformación, principal resultado por analizar, este archivo posee una geometría raster, por lo que puede ser leído fácilmente.

Otro formato de interés es el shapefile (.shp), este tipo de formato es de tipo vectorial y almacena información geográfica. Este formato es de mucha utilidad para la compatibilización de la información, permite ejecutar diversas herramientas para la intersección de la información como por ejemplo en este caso, la velocidad de la deformación con los datos de espesor de lava. Para pasar los datos a formato shp, se utiliza el script `save_qgis.py timeseries.h5 -g inputs/geometryRadar.h5 -o ts.shp`. Este algoritmo transforma el archivo .h5 de la deformación en un archivo de puntos desde el cual se realizarán diversos análisis vectoriales posteriormente en Qgis.

4.4.2. Datos de la velocidad en función del espesor de lava

El espesor de lava puede influir de forma significativa en los patrones de deformación de un volcán debido a su peso, la contracción térmica, su interacción con la estructura volcánica o la presión que ejerce sobre el magma, por lo que ha de ser considerado en este proyecto. Los datos del espesor de lava, en formato shape, se obtuvieron gracias al estudio “El balance de magma del Volcán Arenal, Costa Rica de 1980 a 2004” por [Wadge et al. \(2006\)](#), los cuales fueron compartidos al tutor a cargo de este proyecto, Cyril Muller.

A pesar de que los archivos rondan hasta el 2004, por la poca actividad eruptiva del volcán Arenal en los últimos años, se puede asumir que los niveles de los espesores de lava no han tenido cambios significativos.

Para obtener los datos primarios para la función, se ejecuta con el comando de la caja de herramientas llamada “unir atributos por proximidad” (ver Figura 12). El algoritmo toma una capa vectorial como entrada y genera una nueva capa vectorial, en la cual se unen los objetos de ambas capas encontrando aquellos que se localizan más cercanos entre sí. Con este procedimiento, se logra encontrar la relación que existe entre ambas variables de modo que por cada punto de velocidad se asocia a un valor de espesor de lava. En este procedimiento, la unión de los atributos se ejecuta con capas de naturaleza shape, por lo que las capas por unir son la del espesor de lava con el archivo .shp de la velocidad generado en el paso anterior.

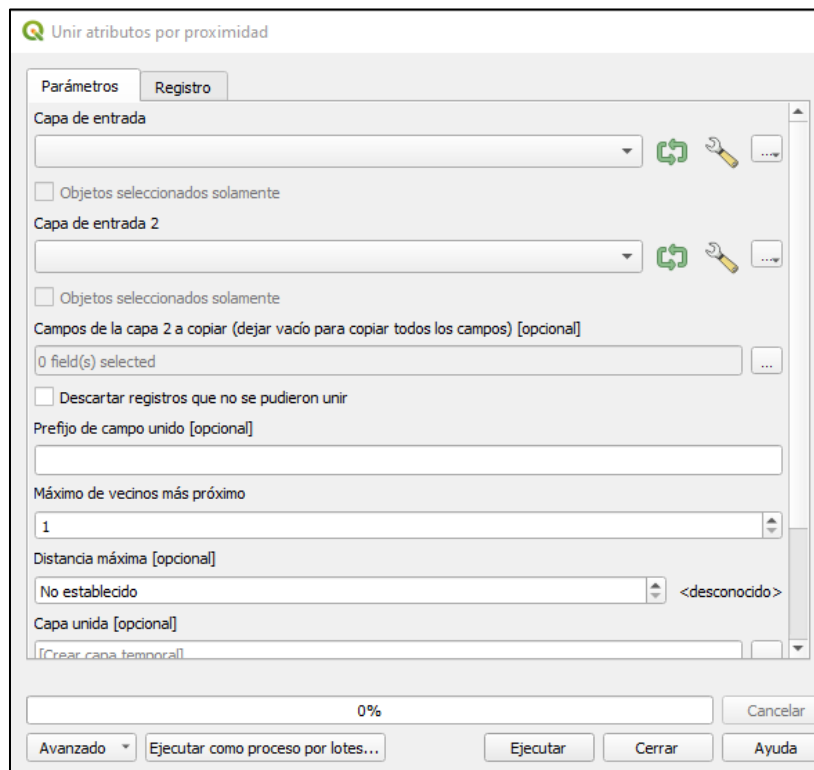


Figura 12. Captura herramienta “Unir atributos por proximidad” en Qgis.

Fuente: Qgis

4.4.3. Datos de la velocidad en función de la altura

La altura en análisis de deformación volcánica es un factor que podría influir significativamente en la deformación del coloso, esto por la forma estructural, presión gravitacional que ejerce las lavas recientes sobre las antiguas lavas. A diferencia de la obtención de los datos de espesor de lava, los datos de altura se encuentran directamente en la tabla de atributos del paso 4.3.1. La facilidad de

obtención de estos datos se debe a que, para el procesamiento de las imágenes un de los insumos principales es el DEM, que funciona para mejorar la precisión del alineamiento y las correcciones geométricas, por ello, en la tabla de atributos de la exportación de dicho archivo, se genera un espacio de altura para cada valor de velocidad de deformación.

Con base en lo mencionado, es posible realizar una exportación directa de los datos crudos, ya sea en formato Excel o como un archivo de texto, para su posterior análisis. Esta exportación facilitará la ejecución de análisis estadísticos más detallados, permitiendo identificar patrones que podrían contribuir a comprender el comportamiento del volcán. Dichos patrones podrían ofrecer una mayor claridad sobre la relación entre variables como el espesor de la lava, la altura y la velocidad de deformación.

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1.DEM

Se descargaron los modelos pertinentes al área de interés, con una latitud que comprende 10° a 11° y una Longitud de 86° a 84° . Como resultado principal a la aplicación del comando pertinente, se generaron varios archivos, entre los cuales hay uno denominado demLat_N10_N11_Lon_W086_W084.dem.wgs84, que corresponde al DEM corregido al elipsoide WGS84 y que le software científico ISCE puede leer. En la Figura 13 se puede observar el DEM anteriormente mencionado, donde la barra de color define la altura según la escala a la derecha.

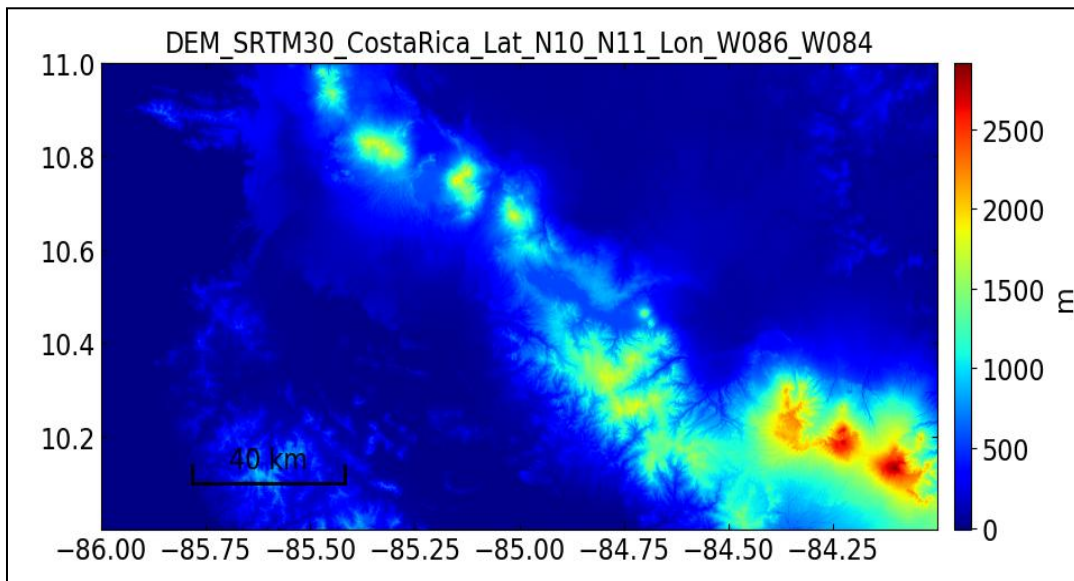


Figura 13. DEM SRTM30 con coordenadas: latitud norte 10° , latitud norte 11° , longitud oeste 86° , longitud oeste 84° .

Fuente: e4ftl01.cr.usgs.gov/MEASURES/SRTMGL1.003/2000.02.11/

5.2.InSAR

Se descargaron 183 imágenes SAR cubriendo un periodo entre el 15 de enero del 2017 y el 14 de mayo de 2023 en la órbita descendente con ruta número 157. Ante la gran cantidad de imágenes adquiridas se optó por generar 2 conexiones para cada imagen SAR, es decir que cada imagen SAR se utiliza para la generación de dos interferogramas, con dos fechas posteriores, lo que llevó a la generación de 363 interferogramas obtenidos del subswath primero.

Año	Fecha Inicio	Fecha Final	Número de Imágenes	Número de Interferogramas
2017	15/01/2017	23/12/2017	27	54
2018	04/01/2018	30/12/2018	31	62
2019	11/01/2019	25/12/2019	29	58
2020	06/01/2020	31/12/2020	31	62
2021	12/01/2021	26/12/2021	29	58
2022	07/01/2022	21/12/2022	26	52
2023	02/01/2023	14/05/2023	10	17
TOTAL			183	363

Cuadro 1. Desglose de imágenes descargadas e interferogramas generados según fecha.
Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 1 se observa la distribución de las imágenes SAR y los interferogramas resultantes por año, donde la mayor cantidad de imágenes e interferogramas fueron en los años 2018 y 2020. El año con menor número de imágenes e interferogramas es el 2023 con solo 17 interferogramas generados.

5.2.1. Red Interferogramétrica

Como se explicó anteriormente, el ruido atmosférico y los movimientos lentos dificultan la detección de desplazamientos en una sola imagen InSAR. Por esta razón, se construyeron 363 interferogramas con MintPy para generar una red interferométrica que permita un análisis más robusto y preciso.

En la Figura 14 se observa un ejemplo de un interferograma resultante de la conexión de las imágenes SAR con fechas del 15/01/2017 y el 8/02/2017. Esta es una imagen en geometría radar por lo que la apariencia de los objetos en las imágenes puede parecer invertida o distorsionada

debido a la disposición espacial y angular entre el radar y el terreno, además sus colores van en una escala de $-\pi$ a π , la cual es una particularidad de la interferometría. Las franjas presentes en la imagen no son el desplazamiento, sino que muestra el efecto atmosférico influyente, el cuál será resuelto en procesos posteriores. En la imagen se muestra un enfoque a la zona del volcán Arenal donde se observan ambos cráteres y la alta influencia del foreshortening presente en la zona oeste del volcán.

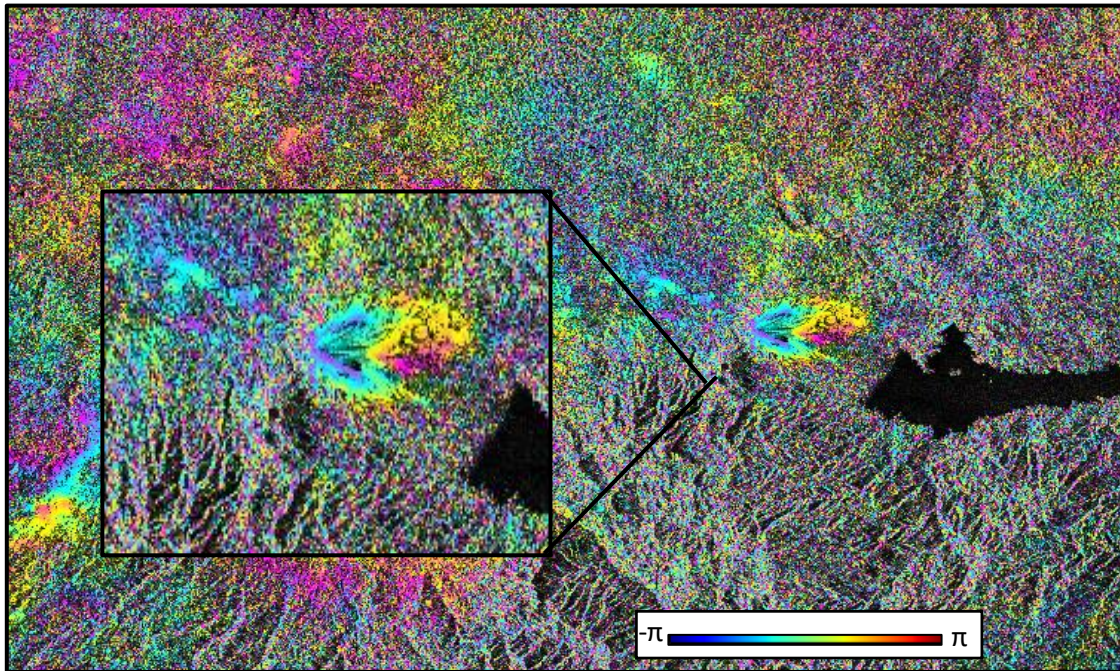


Figura 14. Interferograma en geometría radar generado a partir de las imágenes SAR del 15 de enero del 2017 y el 8 de febrero del 2017.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.Mintpy

La configuración de los parámetros de procesamiento contempló un área de interés que abarca las coordenadas (10.433758:10.487369,-84.737271: -84.676454) y un punto de referencia que se escogió aleatoriamente por el programa. Los procedimientos de selección de los diversos parámetros se realizaron con una mínima coherencia de 0.7, ante esta premisa, se obtuvo una a fecha de referencia aleatoria (2017/01/15). El punto fue escogido de forma aleatoria ya que el programa por sí solo encuentra el mejor punto de referencia con la mejor calidad según los parámetros que se le ingresen.

Durante el procesamiento se excluyó una única fecha, la correspondiente a 2018/02/21. Las fechas se excluyen en el procesamiento InSAR por razones relacionadas con la calidad de los datos, la coherencia temporal, y el control de calidad. Esto se hace para garantizar que se obtengan mediciones precisas y confiables de deformación de la superficie terrestre a partir de las imágenes SAR utilizadas en el análisis.

Al observar los resultados obtenidos de ambos procesamientos, se encontró una similitud en la coherencia temporal al aplicar el modelo ERA5 y el modelo GACOS (ver Figura 15). Según se observa, con las pruebas realizadas, se obtuvo una coherencia, donde se muestran resultados directamente sobre el área de interés (el flanco occidental del volcán). Las coherencias tanto temporal como espacial son de interés en un análisis con InSAR ya que afecta directamente la calidad y confiabilidad de los resultados.

Una alta coherencia espacial indica que la superficie no ha cambiado mucho entre adquisiciones, lo cual permite medir desplazamientos con precisión. Mientras que la coherencia temporal se refiere a la estabilidad del terreno a lo largo del tiempo entre cada par de imágenes usadas. Una buena coherencia temporal permite generar series de tiempo confiables y detectar tendencias. Las áreas blancas indican regiones con alta coherencia temporal, lo que posiblemente se deba a la recién indica que la superficie no ha cambiado mucho entre adquisiciones, lo cual permite medir desplazamientos con precisión.

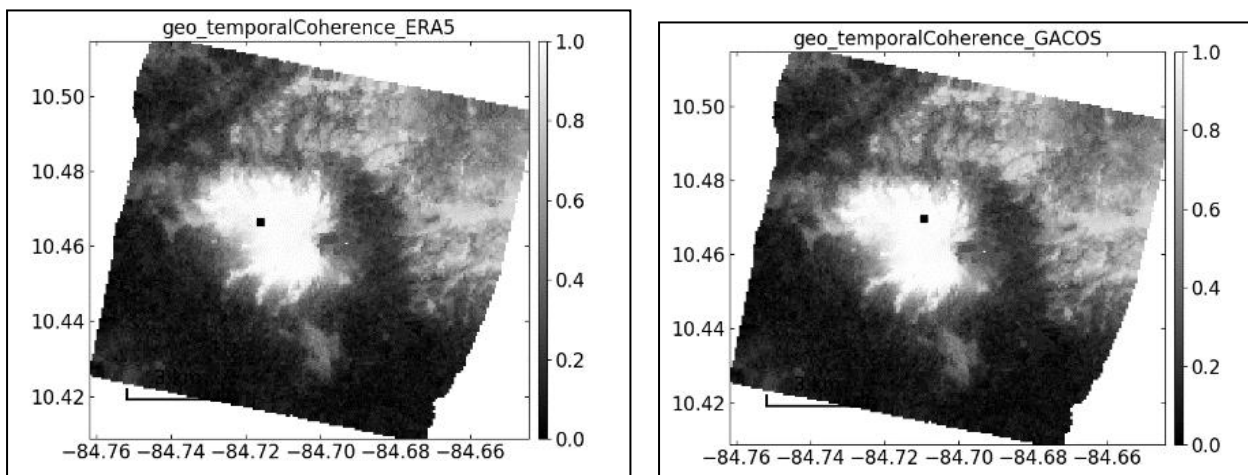


Figura 15. Coherencia temporal resultante al aplicar los modelos atmosféricos ERA5 y GACOS.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la coherencia espacial (ver Figura 16) sucede lo mismo que el caso anterior, se observa una alta similitud en los resultados de los procesamientos al implementar los diferentes modelos atmosféricos, se puede notar una alta coherencia en la zona occidente del volcán, la cuál es una superficie rocosa o desnuda sin mucha vegetación, lo cual brindaría una posible explicación a la alta coherencia de esa área, mientras que las zonas más bajas y en los alrededores del volcán se muestra una menor coherencia espacial posiblemente por la gran densidad de vegetación.

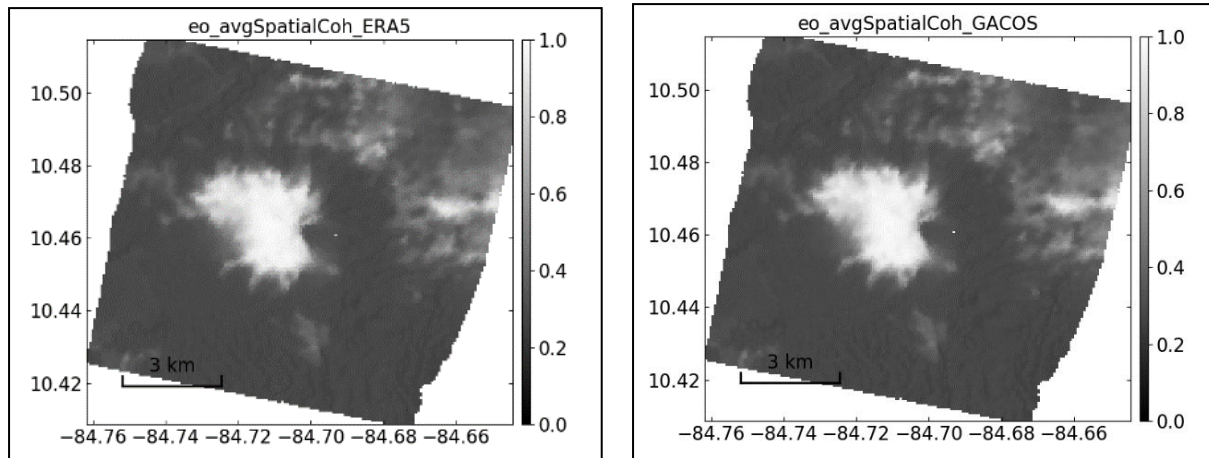


Figura 16. Coherencia espacial resultante al aplicar los modelos atmosféricos ERA5 y GACOS.

Fuente: Elaboración propia.

Al consultar fuentes de información se encontró un estudio de comparación de modelos atmosféricos en la aplicación de InSAR, donde se concluyó que ERA5 superó a otros modelos meteorológicos con una reducción de la desviación estándar de fase del 77,7 % (con respecto a la fase InSAR), un coeficiente de correlación de 0,86 (entre la fase InSAR y el retraso troposférico estimado) y un error menos significativo en la velocidad estimación del deslizamiento de tierra ([Darvishi et al., 2020](#)).

Ante los resultados obtenidos y la investigación científica que lo respalda, se decidió proceder con el resto del proceso con los datos obtenidos mediante la corrección atmosférica con el modelo ERA5.

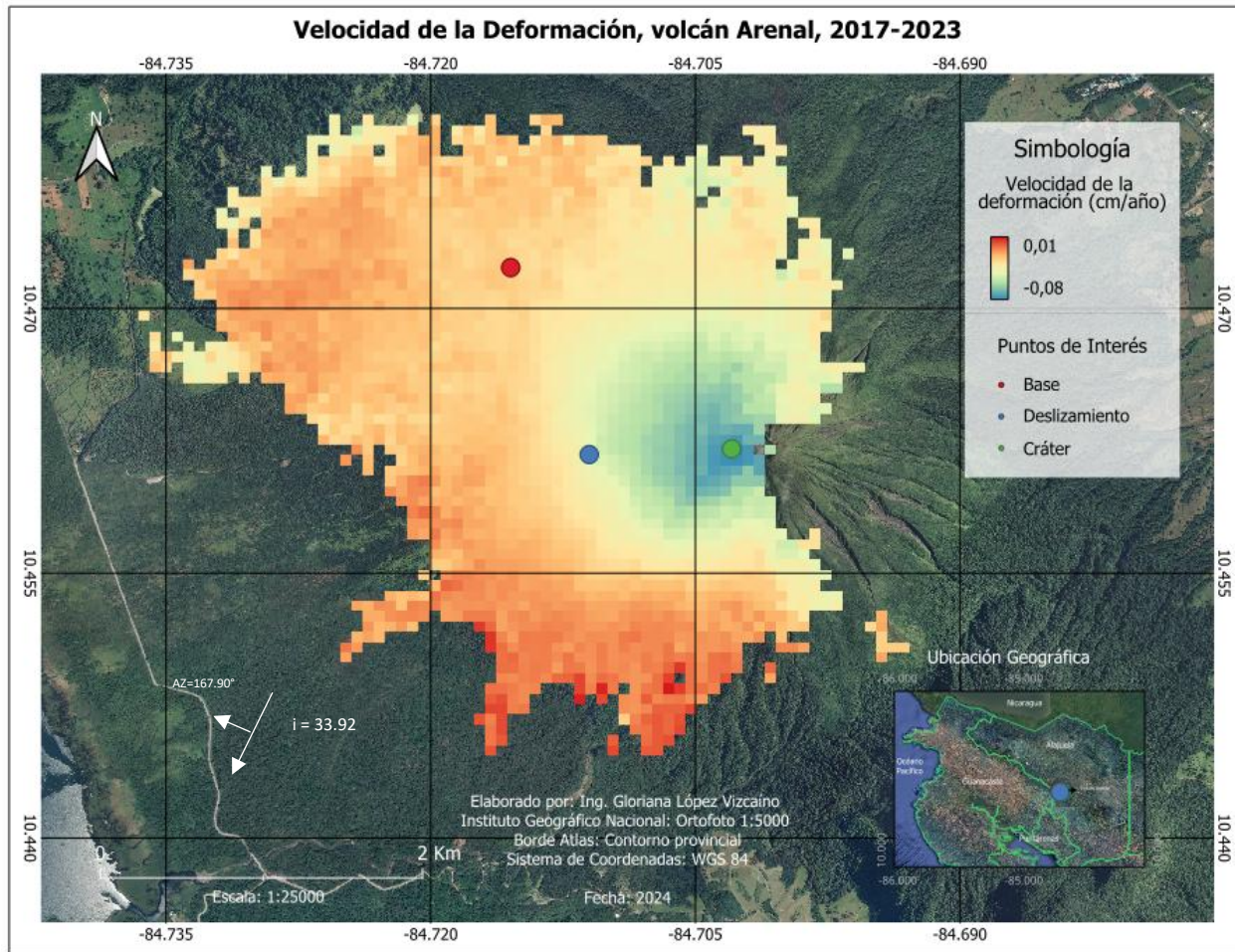
5.4. Velocidad de la deformación

Uno de los principales resultados que se obtienen con Mintpy es la velocidad de deformación, este se refiere a la tasa de cambio en la posición de la superficie terrestre a lo largo del tiempo, medida en términos de desplazamientos en milímetros o centímetros por año.

En el Mapa 1 se observa la velocidad de la deformación. Con esta, se puede evaluar el tipo de desplazamiento que hay presente en la zona y su magnitud. Los colores de la figura obtenida muestran un patrón consistente de franjas en los flancos occidentales del Arenal junto a un aumento en la fase interferométrica, indicativo de que hay un alejamiento del terreno al sensor, sin embargo, cabe destacar que hay que analizar los comportamientos geológicos adyacentes a la zona para poder determinar con certeza la naturaleza del cambio. Por ejemplo, [Ebmeier et al. \(2014\)](#) comentan que, aunque el patrón promedio de deformación es relativamente constante entre sus análisis, la tasa instantánea de movimiento variado en el espacio a través de los edificios del Arenal es alto o las pendientes son demasiado empinadas.

Ahora bien, los resultados del procesamiento muestran una deformación máxima de 8 cm/año (ver Mapa 1). Adicionalmente, se puede discriminar la forma concéntrica particular de las franjas que delimitan la deformación, donde en los puntos más bajos se observa que hay un menor movimiento en comparación con las partes más cercanas al cráter, donde se observa que el mayor desplazamiento (-8 cm/año).

Por otro lado, destaca que, por la dirección, casi polar de la órbita resulta difícil determinar los movimientos norte-sur. Desde un satélite en órbita casi polar, se puede medir mejor un punto se mueve hacia el este o el oeste, pero será difícil detectar si ese punto se mueve hacia el norte o hacia el sur, esto por temas de sensibilidad del sensor.



Mapa 1. Deformación del volcán Arenal en órbita descendente en un período del 2017 al 2023 con una coherencia mínima de 0,7 y puntos de interés.

Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto interesante por destacar es que es la primera vez que se puede obtener una deformación sobre el entero del flanco oeste. En estudios pasados los resultados obtenidos se limitaban casi los alrededores del cráter y extendiéndose por el flanco occidental (ver Figura 17), en contraste con este estudio que generó resultados que pasaron del cráter hasta cercanías del flanco oriental.

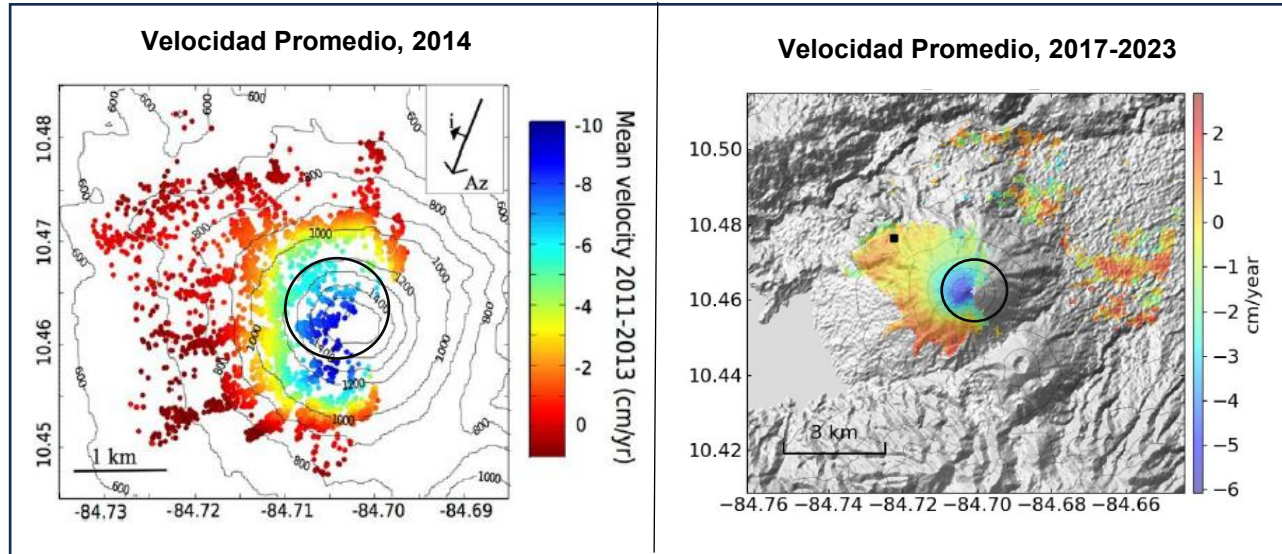


Figura 17. Comparativa de la deformación del volcán Arenal según hallazgos por Ebmeier en el 2014 y el estudio actual 2017-2023.

Fuente: Elaboración propia

5.5. Series Temporales de puntos característicos

Las series temporales en un análisis de deformación se refiere a un conjunto de datos que consisten en mediciones repetidas de la superficie terrestre tomadas en diferentes momentos a lo largo del tiempo. Para analizar el comportamiento del volcán se escogieron tres puntos en diferentes zonas de interés como el cráter, deslizamientos y zonas bajas del volcán, estos se pueden observar geográficamente en el Mapa 2.

Se puede observar que los puntos fueron escogidos de forma tal que se tomara en cuenta los diferentes escenarios posibles que se describen a continuación:

1. Punto 1: Cráter
2. Punto 2: Deslizamiento
3. Punto 3: Base del volcán

Los puntos presentan diferentes velocidades, el punto azul, correspondiente al cráter posee una mayor altura y una velocidad que indica que la superficie del volcán es -8 cm/año, lo que indica que la superficie del volcán se deforma de manera negativa en una tasa constante o bien. Por otro lado, se observa que el punto naranja está localizado en una altura media del volcán y posee valores

más bajos de velocidad, con 4 cm/año aproximadamente. En contraposición, el punto amarillo se encuentra en la base del volcán con valores alrededor de 1 cm/año, siendo un indicador de estabilidad en esa zona.

Para poder conocer el comportamiento temporal de estos puntos se realizó un gráfico de las series temporales que se muestra en la Figura 18. El gráfico muestra la velocidad de deformación (en mm) en función del tiempo (en años) para tres puntos diferentes (Punto 1, Punto 2 y Punto 3).

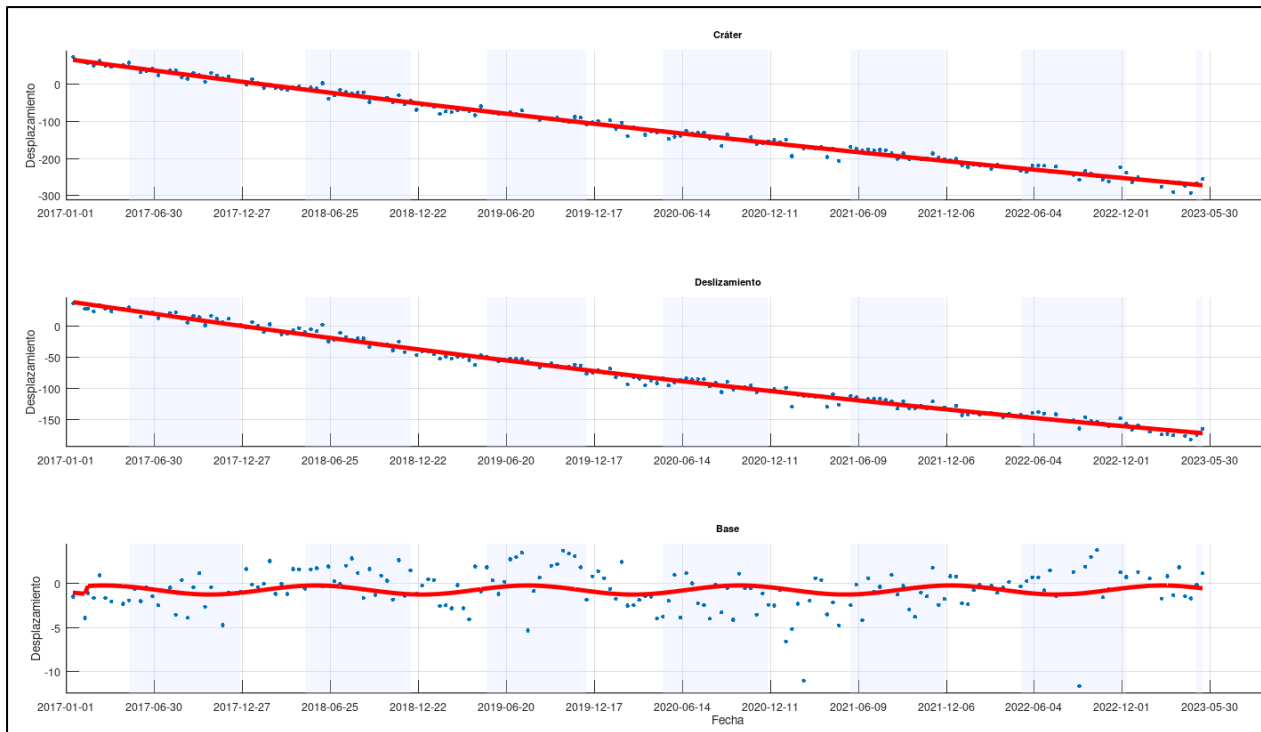


Figura 18. Series temporales de puntos específicos del 2020-2023.

Fuente: Elaboración propia.

El punto 1 presenta una tasa de deformación de aproximadamente -5 cm/año, llegando a una deformación de hasta -30 cm/año en el año 2023. El punto 2 tiene una velocidad de -3,18 cm/año, alcanzando una deformación de hasta -18 cm/año en el año 2023. Finalmente, el punto 3 es el más estable, con una velocidad de deformación de 0,1 cm/año, fluctuando entre -0,5 cm y 0,5 cm a lo largo de los años. Adicionalmente, en la Figura 18 se señala el cambio entre época seca y época lluviosa (polígonos celestes). Las series temporales muestran variaciones cíclicas, con una tendencia estacional en la que la deformación se acelera durante las estaciones lluviosas. Se observan periodos casi estables y otros con aceleración.

El punto correspondiente al cráter, se observa una tendencia descendente, esto indica que el terreno en esa zona ha estado moviéndose de forma continua durante todo el periodo de estudio. La línea de tendencia roja muestra un patrón lineal, lo que sugiere que la velocidad de deformación ha sido prácticamente constante y relativamente alta.

El punto del deslizamiento evidencia una deformación progresiva, al igual que el cráter, con una pendiente descendente menos pronunciada que en el cráter. Esto sugiere un desplazamiento continuo, pero a una velocidad más moderada. Es posible que esta zona esté relacionada con un proceso de inestabilidad gravitacional del terreno.

Por último, en la base del volcán, los datos indican que el desplazamiento es mínimo y que no hay una tendencia clara de hundimiento o levantamiento. La línea roja muestra una tendencia sinusoidal asociadas a efectos estacionales. Los datos apuntan que el patrón de deformación disminuye desde el cráter hacia la base.

Estos efectos estacionales se pueden asociar a las lluvias intensas que aumentan en la época lluviosa, de igual forma, Costa Rica es un país tropical. En una deformación, las lluvias intensas pueden acelerar la deformación en ese momento específico, ya sea por aumento de la infiltración de agua en la estructura que puede aumentar la presión en la superficie, por ejemplo. En contraposición, en la época seca, el suelo puede estabilizarse debido a una disminución de la presión en la superficie y drenaje de agua en esa temporada.

A raíz de esto, es que se observa mayor fluctuación de la deformación de la base. La base sufre más de los efectos estacionales ya que cuando llueve mucho, el peso del agua acumulada influye en la deformación. Caso contrario con la deformación que se observa en el cráter, que es una deformación menos sensible a las lluvias, siendo esta continua.

5.6. Comparación 2017-2023 con estudios previos

Como se mencionó anteriormente, se han realizado diversos análisis de deformación en el volcán Arenal como: Desgaste de masa de piel delgada responsable de la deformación generalizada en el volcán Arenal por [Ebmeier et al. \(2010\)](#) y Movimiento constante cuesta abajo en el flanco occidental del volcán Arenal por [Ebmeier et al. \(2014\)](#). Estos marcan un hito de comparación para conocer el comportamiento del volcán a lo largo del tiempo.

Ambos trabajos se centran en analizar la deformación y en identificar sus posibles causas. ¿Está el movimiento relacionado con procesos magmáticos, con fallas estructurales o con el propio peso y geometría del edificio volcánico? ¿Se trata de una deformación influenciada por la actividad volcánica posterior a la última erupción del Arenal?. Estas son algunas de las preguntas que plantean los autores y que motivaron la realización de estos estudios.

Para poder solventar estas preguntas, realizaron estudios con InSAR descubriendo que el volcán se deforma con una tasa constante, de máximo 12cm/año ([Ebmeier et al., 2010](#)) mientras que, en 2014, el principal hallazgo fue la presencia de hasta 16 deslizamientos marcados y localizados en la zona oeste del volcán.

A partir del análisis de ambos estudios, se demuestra que el volcán Arenal presenta procesos de deformación que no están directamente asociados a la actividad magmática. Por un lado, el estudio de 2010 identifica un movimiento constante del flanco occidental, que parece estar controlado por la gravedad y por la estructura interna del edificio volcánico. Por otro lado, el trabajo del 2014 complementa esta visión al demostrar que también existen procesos más superficiales, como deslizamientos de tierra poco profundos y caídas de rocas.

En el cuadro 2 se detallan los principales hallazgos de cada estudio mencionado:

Resultado	Ebmeier et al., 2010	Ebmeier et al., 2014	Estudio Actual, 2023
Periodo de estudio	2005–2009	2011–2013	2017-2023
Imágenes	InSAR ALOS, Radarsat	InSAR TerraSAR-X	InSAR, Sentinel-1
Tasa de desplazamiento	Hasta 12 cm/año	Hasta 10 cm/año	Hasta 8 cm/año
Dirección del movimiento	Cuesta abajo hacia el oeste, ~50–55° bajo la horizontal	Este-Oeste + vertical (línea de visión)	~33° bajo la horizontal

Resultado	Ebmeier et al., 2010	Ebmeier et al., 2014	Estudio Actual, 2023
Zona de estudio	Flanco occidental (altura de entre los ~1400 m.s.n.m)	Flanco occidental (altura de entre ~1400 m.s.n.m)	Flanco occidental (altura de entre ~1500-1670m)
Deslizamientos	No especificado	16 unidades poco profundas	Coincidente con las zonas de los deslizamientos del 2014

Cuadro 2. Principales resultados de Ebmeier en estudios del 2010 y 2014.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, ¿cómo ha sido la evolución de esta deformación anteriormente encontrada?. Según los estudios realizados en esta investigación, entre los principales resultados se detecta una velocidad máxima de deformación de hasta -8cm/año en la actualidad, por lo que, en comparación con los años anteriores, se observa una diferencia aproximadamente 2-4 cm/año (es importante recalcar que los estudios utilizaron puntos de referencia diferentes, lo que puede influir en el resultado de los valores de deformación).

Al analizar la temporalidad de los estudios, se muestra que las investigaciones de Ebmeier son en una línea temporal de 3-4años, mientras que esta investigación se basó en avanzar desde la última fecha de estudio hasta la actualidad, abarcando 7 años, por lo que el volumen de información es mayor. Durante este tiempo hubo variación en la velocidad de la deformación, mostrando una disminución de esta con forme pasa el tiempo, lo que podría indicar que el volcán se está estabilizando.

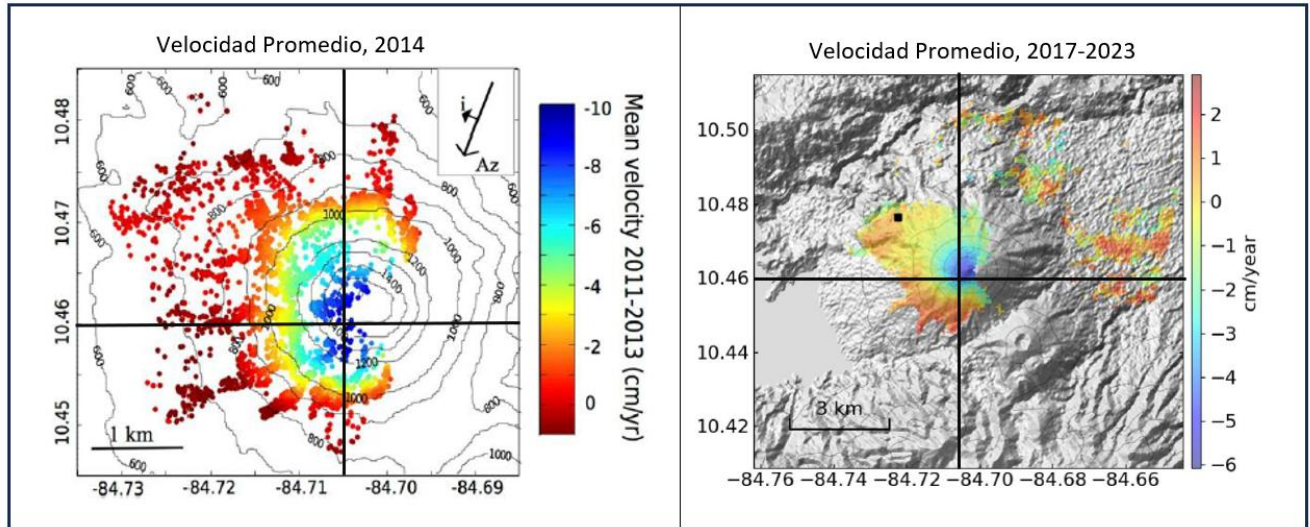


Figura 19. Comparativa de la deformación del volcán Arenal en el punto con coordenadas 10.46, -84.715, según hallazgos por Ebmeier en el 2014 y el estudio actual 2017-2023.

Fuente: Elaboración propia

Gráficamente, se puede observar en la Figura 19 una comparativa de los resultados. La cruz indica las coordenadas 10.46, -84.715 que se encuentra a una altura aproximada de 1400 msnm. En este punto específicamente, se muestra que en estudios del 2014 sus valores de velocidad de deformación eran de -10 cm/año, en contraste, los estudios actuales mostraron una deformación en ese punto de aproximadamente -6 cm/año, indicando una disminución de la velocidad de la deformación. Además, al considerar la cobertura temporal de los estudios comparados, se evidenciando un comportamiento más estable y una deformación más lenta en el presente.

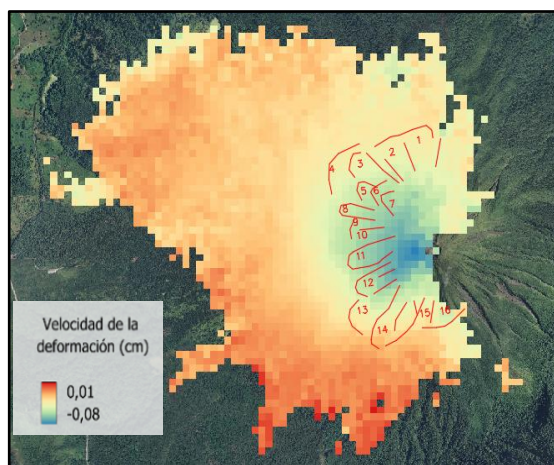


Figura 20. Velocidad de la deformación del 2017-2023 con deslizamientos del 2014 según Ebmeier.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 se muestran los deslizamientos del 2014 en conjunto con la deformación encontrada en el periodo del 2017 al 2023. Como se logra apreciar. En 2014, se descubrió la presencia de 16 deslizamientos localizados en las zonas aledañas al cráter nuevo. Con los nuevos hallazgos, los resultados mostraron que la mayor deformación se localiza en las áreas cercanas al cráter, comportamiento coincidente con los deslizamientos encontrados en 2014.

Ante estos detalles, se plantea la premisa de si la deformación actual está influenciada por factores geofísicos como la altura, la gravedad y el peso o por factores magmáticos. Esta distinción es fundamental, ya que cada escenario implica mecanismos físicos distintos y tiene implicaciones diferentes para la evaluación del riesgo volcánico.

5.7. Procesos Geofísicos

Al estudiar la deformación de un volcán, es importante tener en cuenta que no todo se reduce a lo que se ve en la superficie. Existen factores menos evidentes, como la altura del volcán o el espesor de la lava, que pueden influir significativamente en estos cambios. Las variaciones en la deformación son señales clave que permiten entender mejor el comportamiento del volcán y evaluar su nivel de actividad o estabilidad. También hay procesos que ocurren alrededor del volcán que pueden provocar deformaciones, como los deslizamientos, los hundimientos o la compactación de la lava.

El volcán Arenal, por ejemplo, ha sido escenario de varios eventos importantes a lo largo del tiempo, como la erupción del 29 de julio de 1968. Su forma cónica y su considerable altura aumentan la probabilidad de deslizamientos, especialmente durante la temporada lluviosa, cuando el terreno tiende a volverse más inestable. En 2012, según el informe del [OVSICORI-UNA \(2012\)](#), tras el terremoto de Nicoya, habitantes de la zona reportaron avalanchas de rocas que descendían desde la cima del volcán.

Este tipo de episodios demuestra que la deformación de un edificio volcánico no depende únicamente de la actividad volcánica, sino también de su estructura, su morfología y la naturaleza de los materiales que lo componen ([Ebmeier et al., 2010](#)). Ante esto surge la premisa de si esta deformación está influenciada por procesos geofísicos que llevan miles de años afectando el volcán o si es por influencia de las anteriores erupciones volcánicas que afectaron la estabilidad del coloso.

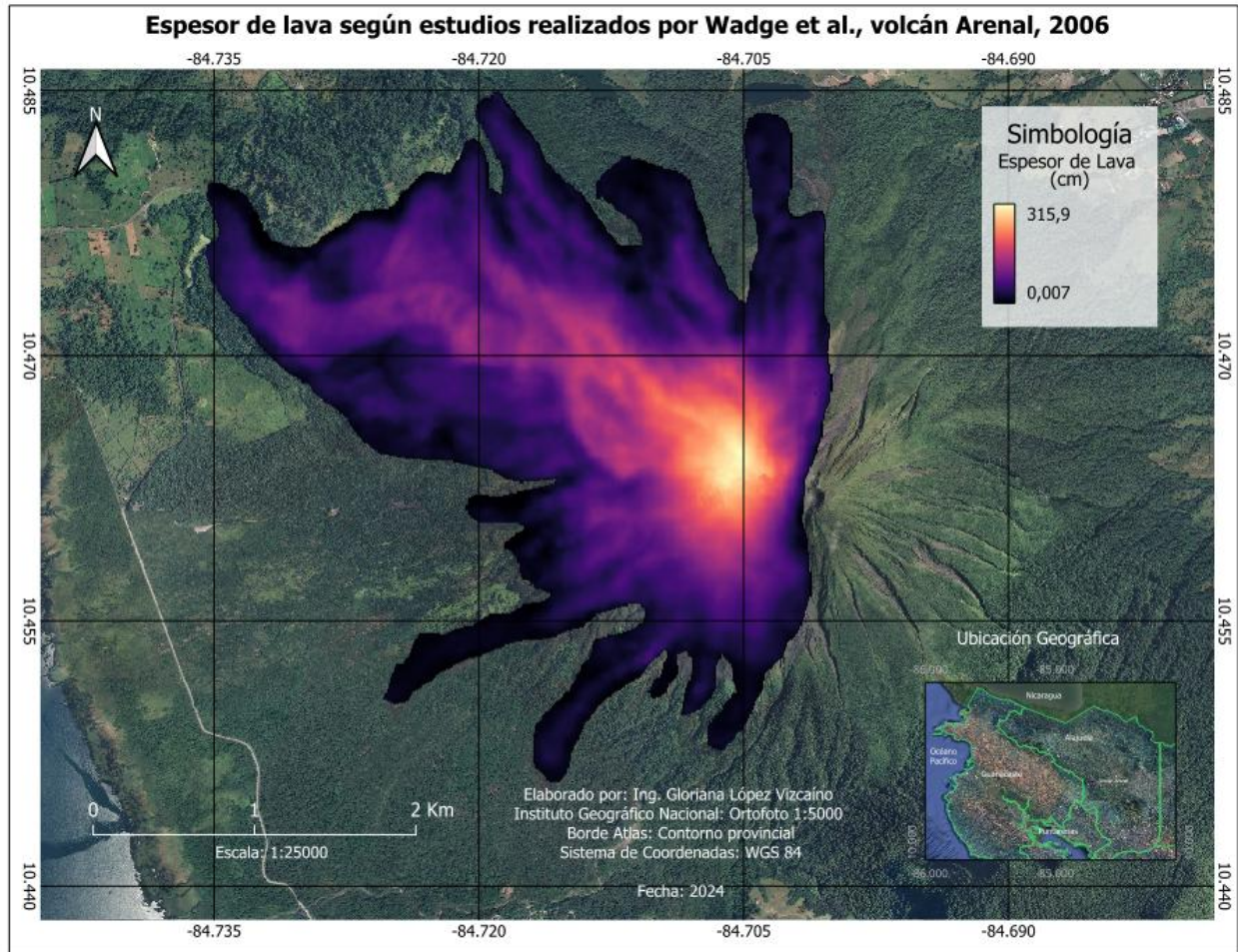
Por ello se establecieron dos parámetros principales para analizar para evidenciar el proceso principal que está generando esta deformación:

- 1- La velocidad en función del espesor de lava: lo que podría indicar que el proceso detrás de la deformación es la compactación lenta debido al peso adicional que generó la erupción de 1968-2010.
- 2- La velocidad en función de la altura: lo que podría indicar que el proceso detrás de la deformación es la compactación lenta de todo el edificio bajo su propio peso a lo largo de los milenios.

5.7.1. Velocidad de la deformación en función del espesor de lava

La importancia del análisis del espesor de lava recae en que los peligros asociados con un edificio inestable son más extremos donde la eliminación de una sobrecarga podría causar una rápida descompresión de un cuerpo de magma y desencadenar una erupción ([Ebmeier et al., 2010](#)).

En el caso del Arenal, al ser un volcán poco activo, en los últimos años el cambio de este fenómeno es poco significativa. Si el principal factor que afecta la deformación es el espesor de lava, indica que el nuevo depósito de lava se está asentando o compactando, causando una deformación localizada.



Mapa 2. Espesor de lava en el volcán Arenal según estudios realizados por Wadge et al. (2006).

Fuente: Elaboración propia

Al igual que el caso anterior se llevó a cabo una programación para la automatización del proceso para la obtención de la función donde se analizaron un total de 1684 puntos (mismos puntos que el caso anterior), en este caso para poder obtener el valor del espesor de lava (ver Mapa 2) se obtuvo el modelo [Wadge et al. \(2006\)](#) del cual se derivó la intersección de los elementos.

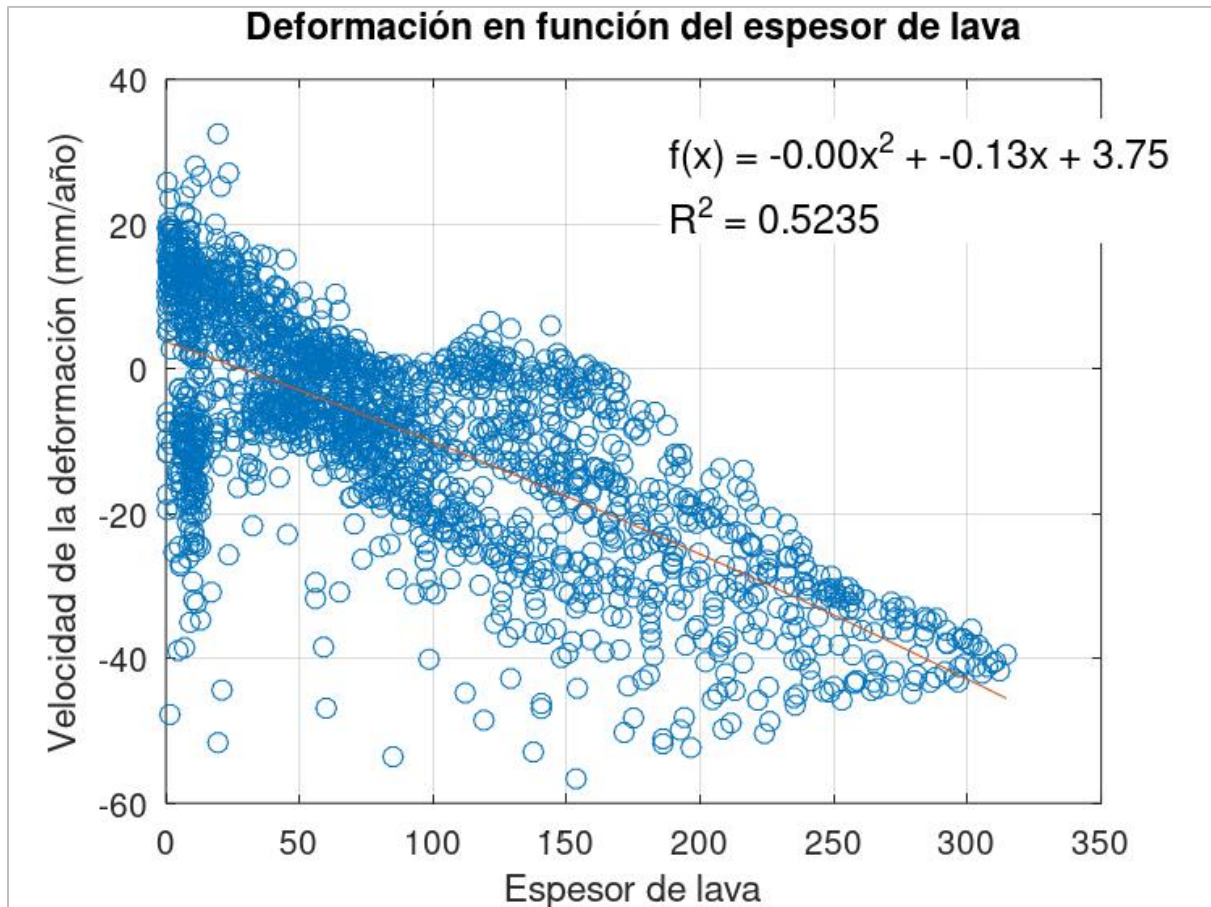
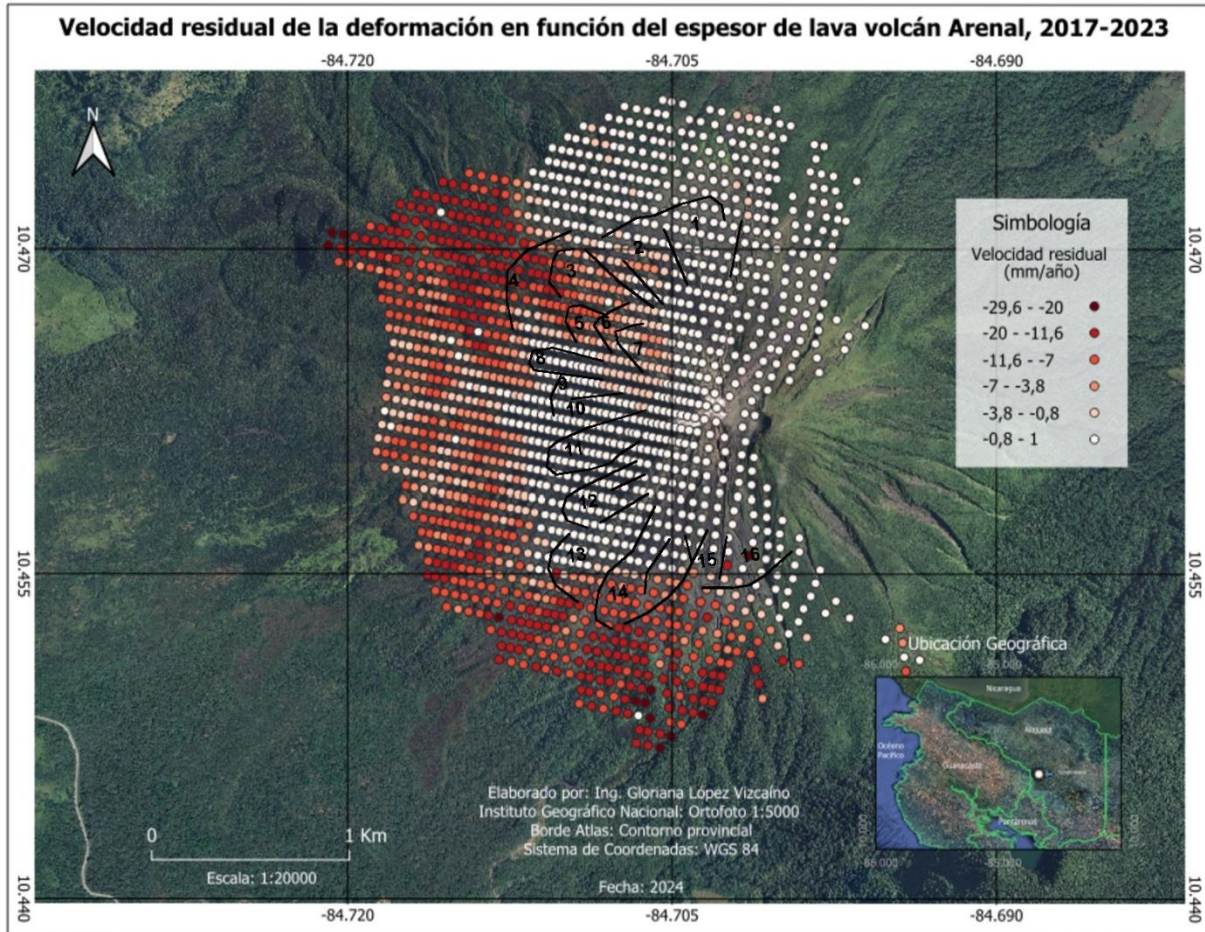


Figura 21. Velocidad de la deformación en función del espesor de lava.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra la relación entre el espesor de lava en metros y la velocidad de una deformación en milímetros por año (ver Figura 21). La línea de regresión ajustada sigue la fórmula $y = -0,13x + 3,75$ lo que significa que por cada unidad que aumenta el espesor de lava, la velocidad de la deformación aumenta en aproximadamente 0,15 m. Por otro lado, el coeficiente de determinación R^2 es de 0,52; al comparar este valor con el brindado en la velocidad en función de la altura se observa que hay mejor relación de la velocidad con la altura que con el espesor de la lava, por lo que la altura influye de manera más significativa en cómo se deforma el terreno por razones físicas como la carga gravitacional. Esta influencia de decorrelación se puede observar geográficamente en la regresión lineal calculada y prevista en el Mapa 3. Se identificaron zonas geográficas con menor deformación, lo que sugieren que esta deformación se debe principalmente a procesos de compactación y deslizamientos superficiales en la estructura del edificio volcánico.



Mapa 3. Velocidad residual de la deformación en función del espesor de lava, con deslizamientos resultantes del estudio Ebmeier 2014 (líneas negras).

Fuente: Elaboración propia

Las zonas donde geográficamente se distinguen por tener mayor velocidad de deformación asociada a los valores de lava se localizan en las bases del volcán, áreas que suelen tener mayor estabilidad, lo que podría sugerir un posible ruido en los datos (ver Mapa 3) o que el proceso principal no es debido al peso de nuevo material sino al peso del material sobre milenario. Se observa que en las zonas aledañas al cráter hay menor velocidad de la deformación lo que podría indicar poca actividad volcánica.

Cabe recordar que el último periodo de actividad volcánica del Arenal fue en el año 2010 y que el volcán lleva aproximadamente 15 años de inactividad, situación que se refleja en los resultados obtenidos ante la poca influencia de la lava en el desplazamiento. En este sentido, el modelo más apropiado para la descripción de la deformación es el de la velocidad en función de la altura, ya

que este presenta un mejor ajuste de los datos. Esto implica que la altura actúa como un mejor predictor del comportamiento del terreno.

5.7.2. Velocidad de la deformación en función de la altura

La programación de la función se realizó en Matlab, esto ayudó a automatizar el proceso, de esta programación se obtuvo el gráfico que se muestra en la Figura 22, donde se utilizaron 1684 puntos resultantes de la intersección entre la altura (DEM) y la velocidad de la deformación. En estos datos se excluyeron aquellos con una altura menor a 800m ya que se puede observar en procesos anteriores que la mayor deformación se establece en las zonas más altas y cercanas al cráter.

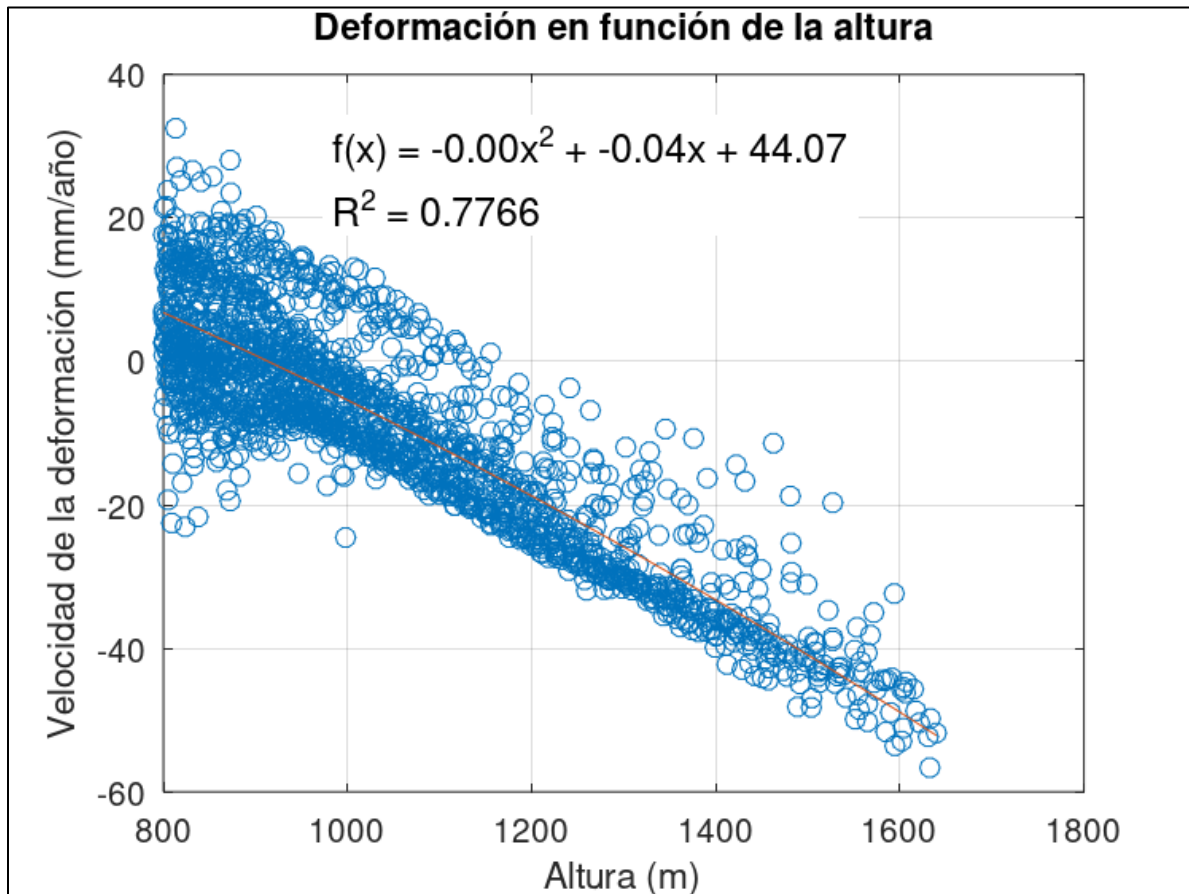


Figura 22. Velocidad de la deformación en función de la altura.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra la relación entre la altura en metros y la velocidad en milímetros por año. Los datos se representan como puntos individuales, y se ha ajustado una línea de regresión lineal que sigue la fórmula $y = -0,04x + 44,07$, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,775. El R^2 sugiere una alta correlación entre ambas variables que se están analizando, este valor indica que el 77,5% de la variabilidad en la velocidad puede ser explicada por la altura.

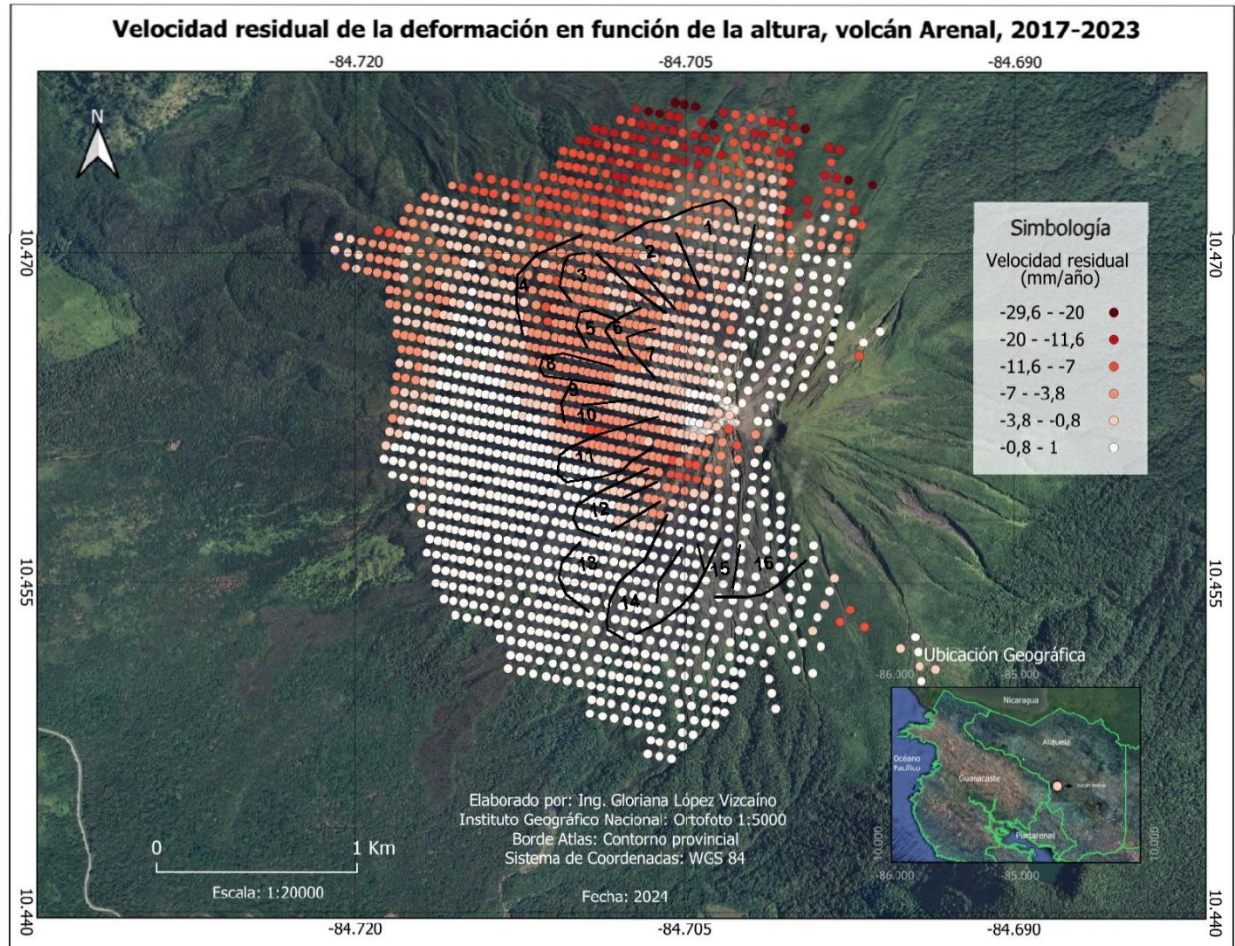
Al ser esta una mejor correlación, se podría sugerir que la velocidad en función de la altura es el proceso primario detrás de esta deformación, por lo que esta podría ser por la compactación del material a través de los milenios de existencia del Arenal.

Al observar la Figura 22, A medida que aumenta la altura, la velocidad de la deformación volcánica tiende a aumentar llegando a valores de hasta -80mm a los 1600m de altitud. La ecuación sugiere que cada vez que se sube de 100 m en altura la deformación aumenta de 7mm/año .

Al estudiar cómo la altura afecta la velocidad de deformación, mediante una regresión (ver Figura 20), se identificaron zonas geográficas con mayor deformación por influencia de la altura. Los resultados revelan una influencia significativa de la altitud en este fenómeno, respaldada por una correlación destacada entre ambas variables, concentrada localmente en el área occidental con altura que rondan los 1000m .

Se puede observar que la zona con mayor densidad de información se concentra en la parte del cráter nuevo. Hay un patrón que forma un semiarco desde el cráter y en dirección norte del volcán, zona donde se concentra la mayor velocidad de la deformación, con valores de velocidades más negativas (indicadas por tonos rojos oscuros) alcanzan hasta -29.6 mm/año . Esta distribución sugiere la posible influencia de la gravedad, influenciando el movimiento de materiales y en la estabilidad de laderas.

Adicionalmente, la particularidad de los cráteres volcánicos en el Arenal, sugieren que la deformación se centra en el cráter nuevo, mientras que el cráter viejo, se mantiene más estable; esto se observa en los residuales localizados en la zona del cráter viejo se mantienen en el orden de -0.8 a -1 mm/año . Afirmando la influencia de la gravedad sobre el coloso, de forma que se genera un peso de un flanco sobre el otro, razón por la que los valores de deformación en la base son más significativos.



Mapa 4. Velocidad residual de la deformación en función de la altura, con deslizamientos resultantes del estudio Ebmeier 2014 (líneas negras).

Fuente: Elaboración propia.

En las zonas presentadas con color rojo se observa tiene la peculiaridad de presentar lo que podrían ser deslizamientos, ya que según se logra observar en la ortofoto (ver Mapa 4), el área se encuentra descubierta y sin vegetación, lo que da cabida a la interpretación de posibles deslizamientos presentes y en conjunto con posibles cambios por el proceso de erosión.

Capítulo 6: Conclusiones

1. El volcán Arenal, un complejo volcánico joven ubicado en la región norte de Costa Rica, ha sido históricamente uno de los centros volcánicos más activos del país. Tras décadas de intensa actividad eruptiva que causaron importantes transformaciones en el paisaje y afectaron a comunidades aledañas, el volcán entró en una etapa de aparente reposo a partir de 2010. Este cambio en su comportamiento volcánico ha despertado el interés de la comunidad científica, que busca comprender las causas de su transición hacia un estado más estable y los procesos geofísicos asociados a su evolución.
2. El estudio actual determinó que la tasa de deformación del volcán es de aproximadamente -8 cm/año en las zonas cercanas al cráter, disminuyendo hasta $0,1$ cm/año en la base. Al analizar el comportamiento en diferentes puntos del volcán, se concluye que hay una deformación que disminuye gradualmente a lo largo del volcán, con presencia de posibles deslizamientos, localizados en las zonas de mayor velocidad de deformación, que, además, son coincidentes con las laderas visibles en las ortofotos.
3. En este nuevo estudio InSAR realizado en el volcán Arenal, se logró una mayor cobertura espacial en comparación con investigaciones anteriores, obteniéndose datos incluso en el cráter y sus alrededores. Esto permitió analizar una zona más amplia y detallada del volcán.
4. La estructura particular del volcán, donde el cráter nuevo se encuentra a mayor altura del cráter viejo, y con una deformación localizada en el cráter nuevo, causa una reacción donde el peso adicional puede inducir fallas o deslizamientos gravitacionales localizados. Por ende, los movimientos del terreno no solo responden también a la influencia de la topografía y la gravedad.
5. Se encontró una magnitud máxima de deformación de hasta aproximadamente -8 cm/año, que, en comparación con los datos resultantes de estudios anteriores, se observa una diferencia aproximadamente $2-4$ cm/año, mostrando una disminución conforme pasa el tiempo, lo que podría indicar que el volcán se está estabilizando.

6. Los resultados indican que los procesos de deformación están mayormente influenciados por la altitud: a medida que aumenta la altura, también lo hace la velocidad de deformación. Este patrón indica una compactación progresiva del edificio volcánico, impulsada por la gravedad. A medida que un volcán crece y se vuelve más alto y pesado, su propio peso puede superar la resistencia de las rocas que lo sostienen.
7. El estudio evaluó la posible relación entre la presencia de flujos de lava y los patrones de deformación observados. No obstante, al analizar la influencia potencial de la lava sobre la deformación existente, se determinó que esta no es significativa, como lo demuestra la baja correlación obtenida en los resultados. Además, se observó que las zonas con mayores valores de deformación se encuentran principalmente en áreas con velocidades más estables, lo que refuerza esta conclusión.
8. Los resultados de este análisis indican que la deformación actual del volcán Arenal responde principalmente a procesos gravitacionales y estructurales propios del edificio volcánico, más que a actividad magmática interna. La velocidad de deformación disminuye sistemáticamente desde el cráter hacia la base, reflejando una compactación progresiva influida por la altitud y el peso acumulado del volcán.
9. Este estudio permite concluir que la deformación actual del volcán Arenal está dominada por procesos gravitacionales asociados a la estructura del edificio volcánico y su evolución morfológica, más que por una actividad magmática activa. La distribución espacial de las velocidades de deformación, junto con la topografía y las características estructurales del volcán, sugiere un proceso de compactación progresiva y posibles deslizamientos superficiales. Estos resultados no solo contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento reciente del Arenal, sino que también refuerzan la necesidad de un monitoreo geodésico continuo, que permita anticipar cambios estructurales y evaluar riesgos potenciales en esta región volcánica activa.

Capítulo 7: Recomendaciones

1. Ante lo demostrado, se recomienda hacer un estudio utilizando imágenes satelitales en órbitas tanto ascendentes como descendentes, con el objetivo de obtener una caracterización más completa y precisa del campo de deformación del volcán Arenal. El uso de una sola geometría de observación, como ha sido el caso en el presente análisis, limita la capacidad de distinguir de forma clara si los desplazamientos observados corresponden principalmente a movimientos verticales
2. Los resultados de este estudio aportan evidencia de una deformación continua, por factores estructurales y gravitacionales, más que por procesos magmáticos activos. Si bien no se identifican señales de reactivación, los desplazamientos detectados en las laderas y en el cráter nuevo deben seguir siendo objeto de atención, ya que podrían derivar en movimientos de masa o inestabilidades localizadas.
3. Por ello, se recomienda mantener e incluso fortalecer las redes de monitoreo en volcanes activos y en aparente reposo, como el Arenal. Esto incluye no solo la continuidad de observaciones geodésicas y satelitales, sino también la integración de nuevas tecnologías, la mejora de las capacidades locales de respuesta y la formación de profesionales en vigilancia volcánica.

Referencias

- Alaska Satellite Facility. (2023). **About the Alaska Satellite Facility. Alaska Satellite Facility.** UAF University of Alaska Fairbanks. <https://asf.alaska.edu/asf/about-asf/>
- Anaconda. (2023). **GitHub - isce-framework/isce2: InSAR Scientific Computing Environment version 2.** GitHub. <https://github.com/isce-framework/isce2>
- Blanco, P. (2018). **El 29 de julio se conmemoran 50 años de la erupción del volcán Arenal.** Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/07/28/el-29-de-julio-se-conmemoran-50-anos-de-la-erupcion-del-volcan-arenal.html>
- Bordino, J. (2022). **Flujo piroclástico: qué es y cómo se forma.** Ecologiaverde. <https://www.ecologiaverde.com/flujo-piroclastico-que-es-y-como-se-forma-3637.html>
- Bustos, D. (2018). **Monitoreo del Complejo Volcánico Nevados de Chillán con base en observaciones InSAR.** Universidad de Concepción. <https://repositorio.udec.cl/items/11b1a780-fa66-47b4-aac1-2a9606c93284>
- Cardi. (2022). **InSAR.** Geofísica UNAM. <http://cardi.geofisica.unam.mx/card/styled-2/index.html>
- CEUPE. (s. f.). **QGIS: ¿Qué es y qué ventajas ofrece?** Ceupe. <https://www.ceupe.com/blog/qgis.html>
- Chaves, E. J., Duboeuf, L., Schwartz, S. Y., Lay, T., & Kintner, J. A. (2017). **Aftershocks of the 2012 MW7.6 Nicoya, Costa Rica, earthquake and mechanics of the plate interface.** *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1227–1239. <https://doi.org/10.1785/0120160283>

-
- Darvishi, M., Cuozzo, G., Bruzzone, L., & Nilfouroushan, F. (2020). **Performance evaluation of phase- and weather-based models in atmospheric correction with Sentinel-1 data: Corvara landslide in the Alps.** *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9043525>
 - De Souza, S. F. (2004). **Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR).** Universidad Federal de Río Grande del Sur. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75664>
 - Delgado, F. (2022). **Programa Riesgo Sísmico (PRS).** Universidad de Chile.
<https://prs.uchile.cl/observatorio-g-data/insar/>
 - Ding, X., Li, Z., Zhu, J., Feng, G., & Long, J. (2008). **Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation.** *Sensors*, 8(9), 5426–5448.
<https://doi.org/10.3390/s8095426>
 - Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2022). **La naturaleza de los volcanes.** Gobierno de España. <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-riesgos/geologicos/volcanes>
 - Duarte, C. (2015). **Órbitas satelitales, hay mucho de dónde escoger.** *Hacia el Espacio*.
<https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=186>
 - 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.** *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(12). <https://doi.org/10.1029/2010GC003263>
 - Ebmeier, S. K., Biggs, J. C., Mather, T. A., & Amelung, F. (2013). **Applicability of InSAR to tropical volcanoes: Insights from Central America.** *Geological Society, London, Special Publications*, 380(1), 15–37. <https://doi.org/10.1144/sp380.2>

-
- 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, 35. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00035>
 - ESIC University. (s. f.). **¿Qué son y cómo se analizan las series temporales?** ESIC. <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/series-temporales-que-son-c>
 - Esparza, C. (s. f.). **Series temporales.** Laboratorio de Estadística CSIC. http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/SeriesTemporales.pdf
 - Euillades, P., & Euillades, L. (2023). **Curso de interferometría SAR [Material de curso no publicado].** Asociación Latinoamérica de Geodesia Volcánica (GEOVOL).
 - European Space Agency. (2007). **InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation.** ESA Publications https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf
 - European Space Agency. (s. f.). **Mission ends for Copernicus Sentinel-1B satellite.** https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission_ends_for_Copernicus_Sentinel-1B_satellite
 - Felicísimo, A. (s. f.). **Modelo de elevaciones: Capítulo 2.** Universidad de Oviedo. https://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf
 - Flores, M. J. S. (2021). **Técnicas multivariadas I | Técnicas multivariadas con R.** https://bookdown.org/jsalinas/tecnicas_multivariadas/biblio.html
 - Geremia-Nievinski, F. (2004). **Interferometría por radar de apertura sintética (InSAR).** ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/258848316_Interferometria_por_radar_de_abertura_sintetica_InSAR

- GitHub. (2023). **GitHub - insarlab/MintPy: Miami InSAR time-series software in Python**. GitHub. <https://github.com/insarlab/MintPy>
- Guerrero. (s. f.). **Estratovolcán**. La guía de geografía. <https://geografia.laguia2000.com/general/estratovolcan>
- Hermosilla, D. (2016). **Interferometría radar de apertura sintética (InSAR) aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcán Calbuco con ayuda de imágenes Sentinel-1A**. Universidad Técnica Federico Santa María. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/882a0121-a168-41f5-b6c0-bb52a5645911/content>
- Infante, S. (s. f.). **Guía básica de vulcanología**. Corporación de Fomento de la Producción Chile. <https://es.scribd.com/document/688961882/29-Guia-basica-de-vulcanologia-Autor-Sebastian-Infante>
- Instituto Geográfico Nacional de España. (s. f.). **Plan Nacional de Teledetección**. <https://pnt.ign.es/satelites-sentinel>
- León, F. M. (2024). **Los datos de ERA5 ayudarán a comprender el clima global**. Meteored. <https://www.tiempo.com/ram/497511/los-datos-de-era5-ayudaran-a-comprender-el-clima-global/>
- Lumbreras, N. (2017). **Modelización de deformaciones volcánicas: Aplicación al proceso preruptivo del volcán Tagoro en la isla de El Hierro** [Trabajo fin de máster] Universidad Complutense de Madrid. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/190876/1/MODELIZACI%C3%93N%20DE%20DEFORMACIONES%20VOLC%C3%81NICASLumbrerasGerma.pdf>

-
- Molinero, L. M. (2003). **Análisis de series temporales**. <https://www.alceingenieria.net/bioestadistica/tseries.pdf>
 - NASA-ISRO SAR Mission. (s. f.). **Interferometry. Get to Know SAR – NASA-ISRO SAR Mission (NISAR)**. NASA Science <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/interferometry/>
 - Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS). (s. f.). **Erupciones volcánicas**. <https://www.paho.org/es/temas/erupciones-volcanicas>
 - Osmanoglu, B., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). **Time series analysis of InSAR data: Methods and trends**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
 - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). (2012). **Estado de los volcanes**. Heredia, Costa Rica: Programa de Vigilancia Volcánica. <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/extension/estado-de-los-volcanes>
 - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). (2014). **Estado de los volcanes**. Heredia, Costa Rica: Programa de Vigilancia Volcánica. <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/extension/estado-de-los-volcanes>
 - Portillo, G. (2012). **Efectos del deslizamiento de tierra**. Renovables Verdes. <https://www.renovablesverdes.com/efectos-del-deslizamiento-de-tierra>
 - Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). **An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes**. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(2). <https://doi.org/10.1029/2003gc000610>

-
- Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). **An InSAR-based survey of volcanic deformation in the southern Andes.** *Geophysical Research Letters*, 31(15).
<https://doi.org/10.1029/2004gl020545>
 - Red Sismológica Nacional. (2012). **Arenal.** Universidad de Costa Rica.
<https://rsn.ucr.ac.cr/index.php/component/content/article/arenal?catid=22>
 - Restrepo, et al. (2012). **Aplicación del análisis por componentes principales en la evaluación de tres variedades de pasto.** Redalyc.
<https://www.redalyc.org/pdf/2950/295023555011.pdf>
 - Rodríguez, A. (2004). **¿Qué es Ubuntu y para qué sirve?.** Blog de GoDaddy.
<https://es.godaddy.com/blog/que-es-ubuntu-y-para-que-sirve/>
 - Rodríguez, H. (2025). **Volcanes: qué son y cómo se forman.** National Geographic.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/volcanes-que-son-como-se-forman_18140
 - Suárez, D. (1998). **Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.** Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
<https://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
 - The MathWorks. (s. f.). **MATLAB: El lenguaje del cálculo técnico.** Matlab
<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
 - U.S. Department of the Interior Geological Survey. (2000). **Servicio geológico de los Estados Unidos: Reduciendo el riesgo de los peligros volcánicos** (USGS Fact Sheet 144–00). <https://pubs.usgs.gov/fs/fs144-00/fs144-00.pdf>
 - U.S. Geological Survey. (s. f.). **InSAR: Satellite-based technique captures overall deformation “picture”.** Volcano Hazards Program.

<https://www.usgs.gov/programs/VHP/insar-satellite-based-technique-captures-overall-deformation-picture>

- Wadge, G., Dorta, D. O., & Cole, P. D. (2006). **The magma budget of Volcán Arenal, Costa Rica, from 1980 to 2004.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(1–3), 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.037>
- Yu, C., Li, Z., & Penna, N. T. (2020). **Triggered afterslip on the southern Hikurangi subduction interface following the 2016 Kaikōura earthquake from InSAR time series with atmospheric corrections.** *Remote Sensing of Environment*, 251, 112097. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112097>
- Yu, C., Penna, N. T., & Li, Z. (2017). **Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 2008–2025. <https://doi.org/10.1002/2016JD025753>