

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Modelado de deslizamiento utilizando técnicas de sensores remotos: Caso de estudio vía a la Costa-Guayas.

INGE-2642

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniería en Geología**

Presentado por:

Erick Paul León Borbor

Guayaquil-Ecuador

Año: 2024

## **Dedicatoria**

---

A Dios, a mis padres y hermanos, que hicieron posible todo esto.

## Agradecimientos

---

A mis padres quienes, con su apoyo incondicional y constante, estuvieron siempre pendientes de cada etapa, brindándome fortaleza y motivación para culminar con éxito mis estudios.

A Tatiana y Daniela, que gracias a su compañía y apoyo moral pude alcanzar esta meta.

Al grupo de amigos que la universidad me supo regalar, Ariana, Nicole, Astrid, Elizabeth, Eudes, Adrian, Elvis y Andrei, quienes me acompañaron a lo largo de este camino, brindándome su apoyo y palabras de aliento en los momentos más desafiantes.

A los Ingenieros Daniel Garcés, Maurizio Mulas y Diego Capa quienes, con su apoyo y guía, pudimos culminar este proyecto con éxito.

## Declaración Expresa

---

Yo Erick Paul León Borbor acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.



---

Erick Paul León Borbor

## **Evaluadores**

---

**Joselyne Bárbara Solórzano Chauca**

Profesor de Materia

---

**Daniel Omar Garcés León**

Tutor de proyecto

## Resumen

Los deslizamientos representan un riesgo significativo en Ecuador debido a las condiciones geológicas y climáticas, agravadas por actividades humanas como la minería a cielo abierto. Este proyecto se centró en el modelado del deslizamiento ocurrido en 2023 en el sector de vía a la Costa utilizando técnicas de teledetección, en particular la metodología de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR). El propósito principal de este estudio fue modelar el deslizamiento del año 2023 en vía a la Costa utilizando sensores remotos, para la obtención de la deformación superficial en el terreno, incluyendo la generación de mapas de deformación, la validación de resultados con datos LiDAR y el análisis de índices de vulnerabilidad de los sectores en riesgo.

La metodología implicó la adquisición y procesamiento de imágenes de radar utilizando el software SNAP. Los pasos clave incluyeron correcciones orbitales, generación de interferogramas, desenrollado de fase y conversión a mapas de deformación. Los resultados revelaron desplazamientos superficiales significativos en dos zonas críticas denominadas zonas de interés, permitiendo identificar un lineamiento de los resultados DInSAR y una posible línea de falla identificada con LiDAR en el área de estudio. En el periodo post-evento, se observó que las deformaciones continuaron, especialmente en los alrededores de la corona y los flancos del deslizamiento, siguiendo direcciones de menor pendiente. Asimismo, se registraron deformaciones en las zonas de extracción de material pétreo, lo que indica que la actividad minera sigue influyendo en la inestabilidad del terreno. Además, se elaboraron mapas de vulnerabilidad que destacan las zonas críticas, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica de las zonas de interés y ofreciendo información clave para la toma de decisiones en la planificación de la cantera y la gestión de riesgos.

*Palabras clave:* Modelado de deslizamientos, DInSAR, teledetección, Sentinel-1, vía a la Costa.

### *Abstract*

Landslides represent a significant risk in Ecuador due to geological and climatic conditions, exacerbated by human activities such as open-pit mining. This project focused on modeling the landslide that occurred in 2023 in the vía a la Costa sector using remote sensing techniques, particularly the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) methodology. The main objective of this study was to model the 2023 landslide in Vía a la Costa using remote sensors to obtain surface deformation data, including the generation of deformation maps, validation of results with LiDAR data, and analysis of vulnerability indices for at-risk areas.

The methodology involved acquiring and processing radar images using SNAP software. Key steps included orbital corrections, interferogram generation, phase unwrapping, and conversion to deformation maps. The results revealed significant surface displacements in two critical areas, referred to as zones of interest, allowing the identification of a lineament from the DInSAR results and a possible fault line detected using LiDAR in the study area. In the post-event period, deformations continued, particularly around the landslide's crown and flanks, following low-slope directions. Deformations were also observed in areas where rock extraction occurs, indicating that mining activities continue to affect the stability of the terrain. Additionally, vulnerability maps were created to highlight critical areas, contributing to a better understanding of the dynamics of the zones of interest and providing key information for decision-making in quarry planning and risk management.

*Keywords:* Landslide modeling, DInSAR, remote sensing, Sentinel-1, vía a la Costa.

## Índice general

Resumen .....	1
<i>Abstract</i> .....	2
Índice general .....	3
Abreviaturas .....	6
Simbología .....	8
Índice de figuras .....	9
Índice de tablas.....	10
Capítulo 1 .....	1
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del problema.....	3
1.3    Justificación del problema .....	5
1.4    Zona de estudio.....	5
1.4.1    Actividades productivas del cantón de Guayaquil .....	6
1.5    Objetivos.....	8
1.5.1    Objetivo general .....	8
1.5.2    Objetivos específicos.....	8
1.6    Antecedentes.....	8
1.7    Marco teórico.....	10
1.7.1    Deslizamientos .....	10
1.7.2    Sensores remotos.....	12
1.7.3    Radar de Apertura Sintética (SAR) .....	12
1.7.4    Interferometría.....	13
1.7.5    Características del radar .....	14
1.7.6    Características de los satélites ERS.....	15
1.7.7    Características de los satélites ENVISAT .....	16
1.7.8    Características de los satélites RADARSAT .....	16

1.7.9	Características de los Satélites Sentinel - 1 .....	17
1.7.10	Formación de imágenes.....	18
1.7.11	Geometría de observación de los sensores SAR .....	18
1.7.12	Características de la señal de radar .....	19
1.7.13	Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR).....	20
1.7.14	Sensores LiDAR.....	21
Capítulo 2	.....	23
2.1	Marco Geológico .....	24
2.1.1	Contexto tectónico regional del Ecuador .....	24
2.1.2	Configuración tectónica de la costa sur–oeste ecuatoriana.....	25
2.1.3	Marco Geológico local .....	27
Capítulo 3	.....	30
3.1	Formulación de alternativas.....	31
3.2	Materiales .....	32
3.3	Metodología.....	33
3.3.1	Búsqueda de información bibliográfica .....	33
3.3.2	Adquisición de imágenes .....	33
3.3.3	Procesamiento de imágenes .....	35
3.3.4	Validación con datos en campo.....	42
3.3.5	Análisis de vulnerabilidad.....	44
Capítulo 4	.....	47
4.1	Resultados y discusión.....	48
4.1.1	Mapas de deformación (Metodología DInSAR) .....	48
4.1.2	Validación con resultados LiDAR .....	54
4.1.3	Mapa de vulnerabilidad .....	57
Capítulo 5	.....	58
5.1	Conclusiones.....	59

5.2	Recomendaciones .....	60
	Referencias .....	62
	Apéndice.....	68

**Abreviaturas**

AMI	Active Microwave Instrument
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
DEM	Digital Elevation Model
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Spatial Agency
ESD	Enhanced Spectral Diversity
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EW	Extra Wide Swath
HH / VV	Polarización Paralela
HV / VH	Polarización Cruzada
IR	Índice de Rentabilidad
IW	Interferometric Wide swath
LBP	Línea Base Perpendicular
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOS	Line of Sight
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PEA	Población Económicamente Activa
SAR	Radar de Apertura Sintética
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIR	Spaceborne Imaging Radar
SLAR	Side-Looking Airborne Radar
SLC	Single Look Complex
SM	Strip Map

SNAP	Sentinel Application Platform
TIR	Tasa Interna de Retorno
USGS	United States Geological Survey
VAN	Valor Actual Neto
WV	Modo de Olas

**Simbología**

>	Mayor que
>=	Mayor e igual que
<	Menor que
<=	Menor e igual que
CaO	Óxido de Calcio (Cal)
E	Este
m	Metros
mm	Milímetros
N	Norte
NW	Noroeste
O	Oeste
S	Sur
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Azufre
SW	Suroeste

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Esquema del problema</i> .....	4
Figura 2 <i>Imagen tomada en la cantera evidenciando el deslizamiento</i> .....	4
Figura 3 <i>Mapa de la zona de estudio</i> .....	6
Figura 4 <i>Esquema de las partes de un deslizamiento</i> .....	11
Figura 5 <i>Sistemas de radar RADARSAT</i> .....	15
Figura 6 <i>Geometría de observación del sensor SAR</i> .....	19
Figura 7 <i>Modos de polarización de una imagen</i> .....	20
Figura 8 <i>Mapeo topográfico resultado de LiDAR</i> .....	22
Figura 9 <i>Configuración tectónica regional</i> .....	25
Figura 10 <i>Falla Inversa que afecta la parte centro-oeste de la provincia del Guayas</i> .....	25
Figura 11 <i>Configuración tectónica de la costa sur – oeste ecuatoriana</i> .....	27
Figura 12 <i>Mapa de las formaciones geológicas de la zona de estudio</i> .....	29
Figura 13 <i>Esquema de la metodología empleada</i> .....	35
Figura 14 <i>Esquema de las correcciones orbitales</i> .....	36
Figura 15 <i>Esquema de la creación del interferograma</i> .....	37
Figura 16 <i>Esquema de la fase de filtros</i> .....	38
Figura 17 <i>Modelo Digital de terreno obtenido de LiDAR</i> .....	43
Figura 18 <i>Modelo Digital de Terreno de diciembre 2022</i> .....	44
Figura 19 <i>Mapa de diferencias mostrando la superficie afectada por el deslizamiento</i> .....	45
Figura 20 <i>Esquema de la metodología para la obtención de la vulnerabilidad física</i> .....	45
Figura 21 <i>Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo ascendente para el pre-evento</i> .....	49
Figura 22 <i>Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo descendente para el pre-evento</i> .....	50
Figura 23 <i>Deformación en zonas de interés en el modo de vuelo ascendente</i> .....	51
Figura 24 <i>Interferograma que evidencia la deformación en la LOS en días previos al evento</i> ....	52
Figura 25 <i>Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo ascendente para el post-evento</i> .....	53
Figura 26 <i>Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo descendente para el post-evento</i> .....	53
Figura 27 <i>Dinámica del movimiento de masas por el evento de deslizamiento</i> .....	54
Figura 28 <i>Resultados LiDAR</i> .....	55
Figura 29 <i>Resultados en modo de vuelo ascendente pre-evento</i> .....	56
Figura 30 <i>Resultados en modo de vuelo ascendente post-evento</i> .....	56
Figura 31 <i>Mapa de vulnerabilidad física</i> .....	57

## Índice de tablas

Tabla 1 <i>Población económicamente activa del cantón Guayaquil</i> .....	7
Tabla 2 <i>Actividades económicas desarrolladas en el cantón Guayaquil</i> .....	7
Tabla 3 <i>Clasificación de deslizamientos</i> .....	11
Tabla 4 <i>Características de las técnicas de monitoreo frente a deslizamientos</i> .....	32
Tabla 5 <i>Características de las imágenes descargadas</i> .....	34
Tabla 6 <i>Valores de reclasificación para la estandarización de mapas</i> .....	46
Tabla 7 <i>Datos de las imágenes utilizadas para el procesamiento de interferogramas en modo de vuelo descendente con temporalidad de 12 días</i> .....	71
Tabla 8 <i>Datos de las imágenes utilizadas para el procesamiento de interferogramas en modo de vuelo ascendente con temporalidad de 12 días</i> .....	73

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

A nivel mundial el riesgo de desastres, es un tema que está profundamente entrelazado con los rápidos procesos de urbanización no planificados y crecimiento demográfico (Greiving et al., 2021; Reyna et al., 2020). Estudios realizados por el Banco Central indican que América del Sur es una de las regiones con más susceptibilidad a deslizamientos en el mundo y, que la causa de estos deslizamientos está relacionada a las pendientes pronunciadas del terreno y a las altas tasas de precipitaciones en la región (Stolton et al., 2008).

Según Calderón–Larrañaga et al. (2021) los deslizamientos causados por cambios en el uso del suelo, o por actividades antrópicas como la minería a cielo abierto, constituyen uno de los factores de riesgo socioeconómico más importantes en los países con economías en desarrollo. A menudo, las actividades mineras inducen con frecuencia movimientos del terreno, ocasionando subsidencias o deslizamientos (Botin, 2009; Lopéz Juan, 2022). Los deslizamientos asociados con la minería están influenciados por factores ajenos a las condiciones naturales. Su impacto depende del momento en que ocurren, su efecto residual y condiciones como la pendiente y la litología (Maki Mateso et al., 2023).

Por otro lado, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) desempeñan un papel clave en la vigilancia del riesgo de movimientos en masa. El análisis geoespacial en un SIG permite modelar la susceptibilidad a los deslizamientos considerando múltiples factores causales (Graw et al., 2022). En sus inicios, la interferometría diferencial de radar (acrónimo en inglés DInSAR), se utilizaba para la obtención de la elevación del terreno y las señales de deformación del suelo. En la actualidad, la metodología DInSAR se utiliza ampliamente para medir deformaciones causadas por fenómenos naturales como terremotos, erupciones volcánicas y reducción de los glaciares, así como para monitorear el desplazamiento del suelo causado por actividades antrópicas como la minería (S. Li et al., 2022; Massonnet et al., 1993).

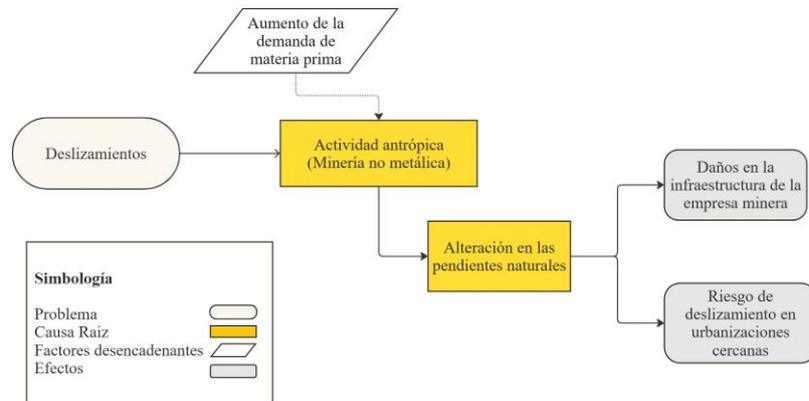
En cuanto a Ecuador, es considerado uno de los países de la región con mayor probabilidad de ocurrencia de desastres naturales. Tanto por el incremento de las condiciones de vulnerabilidad (inadecuado uso del suelo, densidad poblacional, incremento de la frontera agrícola), como por la frecuencia y manifestación de fenómenos de origen geológico-geomorfológico (sismos, erupciones volcánicas y deslaves o deslizamientos) (Bustamante, 2018; Urgilez Vinueza, 2024).

Por tanto, el estudio propuesto plantea la modelización del deslizamiento ocurrido en 2023 en vía a la Costa usando herramientas de teledetección como sensores remotos, en específico la metodología D-InSAR, analizando imágenes Sentinel-1 con un rango temporal de 12 días en los años 2022-2023 y su posterior procesamiento con el software SNAP, con la finalidad de identificar las zonas con más probabilidad de deslizamientos en el sector.

## **1.2 Descripción del problema**

En vía a la Costa se han asentado por más de 50 años varias canteras que explotan materia prima que se emplea en la producción de cemento y también materiales pétreos (Coronel et al., 2016). A medida que el desarrollo urbanístico crece, también lo hace la demanda de estos recursos en la industria. Como resultado, los cerros de la zona han sufrido alteraciones en sus pendientes naturales y en su estabilidad, lo que ha causado deslizamientos visibles desde la avenida principal de la zona, poniendo en riesgo urbanizaciones cercanas y principalmente las instalaciones de una cantera importante que explota calizas y material pétreo en este sector (Añazco Toro, 2017) (Ver Figura 1).

**Figura 1** Esquema del problema



Por otro lado, un deslizamiento (ver Figura 2) ocurrido en las inmediaciones de la cantera generó temor entre los residentes de una urbanización ubicada en la vía a la Costa. Durante la madrugada, los habitantes escucharon ruidos de deslizamientos de rocas provenientes del cerro cercano, lo que provocó una sensación de peligro inminente en la comunidad. Este incidente pone de manifiesto la tensión existente entre el desarrollo urbano y las dinámicas naturales del terreno, resaltando la importancia de implementar protocolos efectivos para la evaluación y comunicación de riesgos en áreas residenciales que colindan con espacios naturales o zonas de explotación. (Andrade, 2023).

**Figura 2** Imagen tomada en la cantera evidenciando el deslizamiento



### 1.3 Justificación del problema

Los deslizamientos en las áreas de explotación de canteras en la vía a la Costa son cada vez más comunes, agravados por las condiciones climáticas durante la temporada invernal, debido a la alteración en la topografía causadas por la actividad minera. Ante esta problemática, es necesario implementar métodos para predecir estos movimientos en masa. En este contexto, el modelado de deslizamientos en la zona mediante sensores remotos es una solución útil, ya que únicamente requiere imágenes satelitales, una opción económicamente viable, al no requerir la instalación de equipos en el lugar de estudio ni visitas técnicas para realizar estudios físicos del deslizamiento.

Los ODS que se alinean a la problemática de este proyecto son las siguientes:

**ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**, enfocado en reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con los deslizamientos, logrando que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

**ODS 13: Acción por el clima**, enfocado en fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales, adoptando medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

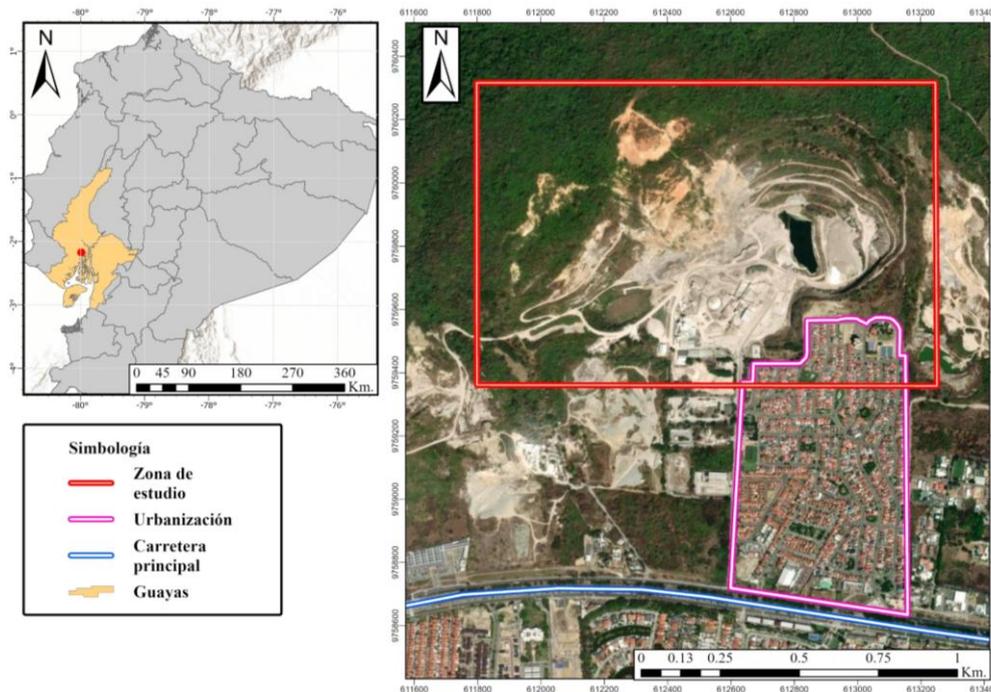
### 1.4 Zona de estudio

El área de interés para este estudio cuenta con una superficie aproximada de 1.4 km<sup>2</sup>, y se encuentra ubicado en un sector de vía a la Costa, Ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador (Ver Figura 3). A su vez, forma parte del Bosque Protector Cerro Blanco, que se ubica en el extremo sureste de la cordillera Chongón-Colonche. Este bosque se caracteriza por ser uno de los remanentes de bosque seco de la costa ecuatoriana (Cajas et al., 2013; Salas, 2008).

El sector está influenciado por las corrientes marinas de Humboldt y El Niño, lo que genera dos estaciones bien definidas: una estación seca, que abarca desde junio hasta diciembre, y

una estación lluviosa, que va de enero a mayo (aunque en los últimos años ha comenzado desde mediados de febrero o marzo). La precipitación anual promedio de este sector oscila entre 500 y 700 mm (Cajas et al., 2013). El deslizamiento en cuestión se encuentra dentro del área de influencia de la zona de explotación de la cantera.

**Figura 3** Mapa de la zona de estudio



#### 1.4.1 Actividades productivas del cantón de Guayaquil

Guayaquil alberga uno de los puertos más relevantes de la costa del Pacífico oriental, por donde transita el 70% de las exportaciones privadas del país y el 83% de sus importaciones. Reconocida como la "capital económica del país", Guayaquil se destaca por su papel como centro comercial, respaldado por la gran cantidad de empresas, fábricas y comercios en toda la ciudad. En el sector industrial de la provincia del Guayas, predominan las agroindustrias y las productoras de alimentos, junto con industrias textil, tabaquera, petroquímica, de conservas, metalmecánica, maderera y cementera.

Según el Censo de Población y Vivienda de 2010, el 43% de la población total del cantón Guayaquil constituye su Población Económicamente Activa (PEA), representando el 67% de la

PEA de toda la provincia del Guayas. Dentro del cantón, el 63% de esta PEA corresponde a hombres y el 37% a mujeres (Hernández, 2021) (Ver Tabla 1 y Tabla 2).

**Tabla 1** *Población económicamente activa del cantón Guayaquil*

<b>PEA Cantón Guayaquil</b>		
<b>Sexo</b>	<b>Población</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Hombres	635781	67
Mujeres	380301	37
<b>Total</b>	<b>1016082</b>	<b>100</b>

*Nota.* Datos del Censo de Población y Vivienda 2010. Modificado de Hernández (2021).

**Tabla 2** *Actividades económicas desarrolladas en el cantón Guayaquil*

<b>Actividades Económicas en el Cantón Guayaquil</b>		
<b>Actividad</b>	<b>Población</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	23307	2.29
Explotación de minas y canteras	824	0.08
Industrias manufactureras	111077	10.93
Suministro de electricidad, gas vapor y aire acondicionado	3322	0.33
Distribución de agua y alcantarillado	6151	0.61
Construcción	72310	7.12
Comercio al por mayor y menor	257439	25.34
Transporte y almacenamiento	65115	6.41
Actividades de alojamiento y servicio de comidas	43874	4.32
Información y comunicación	16334	1.61
Actividades financieras y de seguros	11528	1.13
Actividades inmobiliarias	3466	0.34
Actividades profesionales, científicas y técnicas	22875	2.25
Actividades de servicios administrativos y de apoyo	37302	3.67
Administración pública y defensa	28845	2.84
Enseñanza	45990	4.53
Actividades de atención a la salud humana	31194	3.07
Artes, entretenimiento y recreación	7792	0.77

Otras actividades de servicios	26216	2.58
Actividades en hogares como empleadores	41343	4.07
Actividades de organizaciones y órganos extraterritoriales	125	0.01
No declarado	89553	8.81
Trabajador nuevo	70100	6.90
<b>Total</b>	<b>1016082</b>	<b>100</b>

*Nota.* Datos del Censo de Población y Vivienda 2010. Modificado de Hernández (2021).

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 *Objetivo general*

Modelar el deslizamiento del año 2023 en vía a la Costa utilizando sensores remotos, para la obtención de la deformación superficial en el terreno.

### 1.5.2 *Objetivos específicos*

- Construir mapas y gráficos de deformación a partir de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) correspondientes a fechas previas y posteriores al evento del deslizamiento.
- Comparar los Modelos Digitales de Terreno obtenidos a partir de fotogrametría con los resultados de las técnicas de sensores remotos para la validación de la deformación del deslizamiento.
- Analizar los sectores que podrían ser afectados por la inestabilidad de taludes, mediante índices de vulnerabilidad.

## 1.6 Antecedentes

En el estudio de Bermúdez & Paredes (2006) se subraya la importancia de que empresas industriales, implementen un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) para asegurar prácticas sostenibles y que a su vez ayuden a identificar y mitigar impactos ambientales, tales como el ruido, polvo y residuos generados, y también incluye planes de acción para situaciones de emergencia.

Pérez (2010), en su estudio propone un análisis del impacto de las vibraciones causadas por las voladuras, teniendo en cuenta el tipo de carga empleada en la columna de perforación y la influencia del accesorio utilizado en las voladuras, como el Taponex. Según el estudio, las vibraciones generadas en la cantera son significativas; sin embargo, el empleo de estas técnicas de voladura logra reducirlas hasta el punto de que dejan de ser relevantes, lo que es factible para una disminución en las molestias causadas en urbanizaciones cercanas.

Coronel et al (2016) plantea como objetivo principal en su trabajo el análisis de los conflictos relacionados con el uso del suelo a través de un análisis espacial, identificando canteras, urbanizaciones, gasoductos, así como riesgos naturales y antropogénicos. Estudio que serviría como una herramienta para la planificación y gestión del ordenamiento territorial de las actividades mineras y urbanísticas en el sector de la vía a la costa.

Añazco (2017) propone en su tesis un análisis geomecánico del macizo rocoso en un sector de vía a la Costa así como también un diseño de taludes, con el fin de garantizar la seguridad a corto plazo tanto de las instalaciones de la empresa, la maquinaria y así como también la de los trabajadores. El trabajo concluye que los análisis cinemáticos de los taludes del sector tienen una alta probabilidad de fallamiento en tipo cuña y para solventar este problema sugieren la implementación de canales o cunetas derivadores para prevenir la infiltración de agua superficial sobre el macizo y mantener el nivel freático a por lo menos 5 metros de profundidad dentro de la cara del talud.

Medina & Vásquez (2018) con el fin de optimizar los procesos de operaciones simultáneas en dos frentes de explotación en una cantera en vía a la costa, plantean el desarrollo de un modelo de simulación por eventos discretos que permita evaluar, con alto grado de confiabilidad, el sistema de carga y transporte basado en el ciclo de producción y los recursos actuales de la empresa, evitando así la necesidad de aumentar la maquinaria o crear nuevas rutas de transporte.

Nogales (2020) plantea un modelamiento matemático para optimizar la producción en la flota de transporte de una empresa minera a cielo abierto mediante programación lineal. La meta principal del proyecto fue maximizar la eficiencia de la flota de transporte, desarrollando un modelo matemático en Microsoft Excel con el complemento Solver y validándolo con el software de simulación Flexsim.

Osorio (2022) en su estudio analiza la eficiencia y viabilidad económica, técnica y ambiental de reemplazar la flota actual de camiones Dumper rígidos que trabajan en las canteras de la zona de estudio con camiones mineros Volvo BAS multiejes. Dado que el acarreo constituye un alto porcentaje de los costos operativos de minería, se evaluó el costo por tonelada transportada, y se compararon indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Índice de Rentabilidad (IR).

## **1.7 Marco teórico**

Para ampliar la comprensión de este estudio se presentan definiciones que serán de utilidad para el lector.

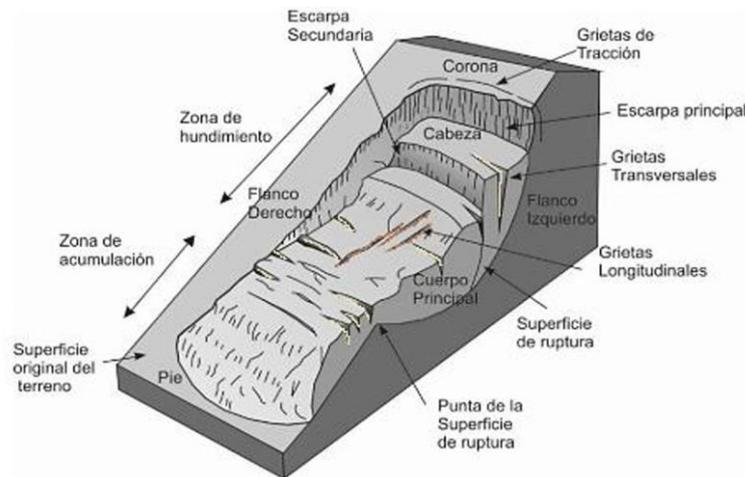
### **1.7.1 Deslizamientos**

Los deslizamientos, también denominados movimientos en masa, son eventos geológicos que se caracterizan por el desplazamiento, ya sea repentino o gradual, de grandes volúmenes de materiales, tales como roca, suelo y escombros, a lo largo de una pendiente inclinada (ver Figura 4). Este desplazamiento suele ocurrir siguiendo superficies de ruptura preexistentes, las cuales actúan como planos de debilidad que favorecen el movimiento de las masas inestables (Brideau & Roberts, 2022).

La ocurrencia y clasificación de los deslizamientos (ver Tabla 3) dependen de diversos factores intrínsecos y extrínsecos que influyen directamente en la estabilidad del terreno. Entre los factores intrínsecos se incluyen la naturaleza del material que compone el terreno, es decir, el tipo de roca y suelo, así como la pendiente y la configuración geomorfológica del relieve. Asimismo,

la presencia de fracturas, fallas geológicas y otras discontinuidades estructurales juega un papel clave, ya que estas discontinuidades actúan como zonas de debilidad que facilitan el desprendimiento y movimiento de los materiales (Hungri et al., 2013).

**Figura 4** Esquema de las partes de un deslizamiento



*Nota.* Tomado de Varnes & Cruden (1996).

Por otro lado, los factores extrínsecos, como la intensidad y recurrencia de las precipitaciones, tienen una gran influencia, debido a que el agua puede saturar el suelo y disminuir su cohesión, aumentando el riesgo de deslizamiento. La actividad sísmica es otro desencadenante importante, ya que las vibraciones producidas por los sismos pueden desestabilizar pendientes previamente inestables. Además, las acciones humanas, como la explotación minera, la construcción de infraestructura y la deforestación, contribuyen significativamente a la ocurrencia de estos fenómenos al alterar las condiciones naturales del terreno. Finalmente, tanto la erosión natural causada por el viento y el agua como la erosión inducida por actividades humanas también incrementan la probabilidad de deslizamientos al reducir el soporte de las pendientes (Cruden & Varnes, 1996; Hungri et al., 2013)

**Tabla 3** Clasificación de deslizamientos

Tipo de movimiento	Roca	Detritos	Tierra
Caída	Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de tierra
Vuelcos	Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de tierra

Deslizamiento rotacional	Depresión de roca	Depresión de detritos	Depresión de tierra
Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de bloque	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
Expansión lateral	Expansión de roca		Expansión de tierra
Flujo	Arrastre de rocas	Fuljo de pedregal	Flujo de arena seca
		Flujo de detritos	Flujo de arena húmeda
		Avalancha de detritos	
		Soliflucción	Flujo rápido de arcilla
		Arrastre de suelo	Flujo de tierra
			Flujo rápido de tierra
			Perdida de flujo
Complejo	Avalancha de detritos	Arqueamiento, valle	Depresión de tierra
	Deslizamiento de rocas	abultado	Flujo de tierra

---

*Nota.* Modificado de Hungr et al. (2013)

### 1.7.2 Sensores remotos

Las técnicas usadas en sensores remotos son una tecnología utilizada para obtener datos de la superficie terrestre sin contacto directo. Los sensores captan energía reflejada o emitida, que luego es procesada en imágenes o datos. La distancia del sensor y las condiciones atmosféricas, como las nubes, pueden influir en la calidad de los datos capturados. Estos datos, transmitidos a estaciones terrestres, son interpretados para obtener información sobre la superficie de la Tierra (Florenzano, 2013).

### 1.7.3 Radar de Apertura Sintética (SAR)

SAR es una tecnología que mejora la resolución espacial de imágenes mediante el uso de una antena en movimiento para crear una "apertura sintética". Esto supera las limitaciones de los radares tradicionales de barrido lateral, como la falta de información de fase y las antenas largas (Rosen, 2000). El concepto de SAR, desarrollado por Carl Wiley (1954), utiliza la información de

fase para sintetizar antenas más largas y mejorar la resolución en la dirección de vuelo. El SAR satelital surgió para superar las limitaciones de los sensores ópticos, que dependen de la luz solar y las condiciones atmosféricas. El lanzamiento del satélite Seasat en 1978 marcó un avance significativo en la observación de los océanos mediante SAR. En las décadas de 1980 y 1990, misiones como Radar de Imagen Espacial (siglas en inglés SIR) SIR-A, SIR-B, Cosmos-1870, Misión Soviética (ALMAZ-1) y Magellan contribuyeron al perfeccionamiento de SAR, extendiendo su aplicación a la cartografía planetaria y la observación de la Tierra. (Hanssen, 2001).

En la década de 1990, satélites como el Satélite Europeo de Sensores Remotos (siglas en inglés ERS) ERS-1 y el ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (siglas en inglés ESA), junto con el Satélite Japonés de Recursos Terrestres (siglas en inglés JERS) y Radarsat de Canadá, consolidaron el uso de SAR en la teledetección terrestre y oceánica. Estas misiones no solo proporcionaron datos cruciales para monitorear cambios ambientales, sino que también avanzaron en el uso de la interferometría SAR, que permite medir la deformación de la superficie terrestre. El hito final fue la Misión de Topografía de Radar del Transbordador (siglas en inglés SRTM) en el año 2000, que utilizó SAR para mapear casi toda la superficie terrestre con una precisión sin precedentes, marcando una nueva era en la cartografía global desde el espacio (Massonnet et al., 1994).

#### **1.7.4 Interferometría**

A diferencia de las técnicas geodésicas convencionales, el radar presenta una limitación clave: no puede medir ángulos con precisión. Al igual que el ojo humano, que no percibe bien la diferencia de distancia entre objetos en ángulos distintos, pero a la misma distancia, un radar o SAR no puede distinguir entre objetos en ángulos diferentes respecto al instrumento. La solución a este problema fue inspirada en la visión binocular humana, que usa dos ojos para percibir la profundidad (Zebker & Weber Hoen, 2000). De manera similar, la interferometría surgió al combinar dos imágenes SAR, obtenidas con dos antenas distintas o mediante adquisiciones

repetidas. Esta técnica permite medir tanto la distancia como los ángulos, gracias al uso de la información de fase, que posibilita detectar diferencias de distancia con gran precisión. La separación entre los sensores, por su parte, permite medir diferencias angulares, lo que resulta crucial para la cartografía topográfica. (Hanssen, 2001).

Massonet et al. (1994) menciona que, la interferometría compara las fases de imágenes tomadas desde diferentes posiciones (por ejemplo, dos antenas en un mismo plano adquieren imágenes simultáneamente) o en diferentes momentos (una antena toma imágenes en dos tiempos distintos), una vez que las imágenes han sido registradas correctamente. La diferencia resultante en las fases crea un nuevo tipo de imagen llamado interferograma, que es un patrón de interferencia de franjas que contiene información sobre la geometría relativa. Si se cumplen ciertas condiciones, el interferograma ya no es ruidoso.

### **1.7.5 Características del radar**

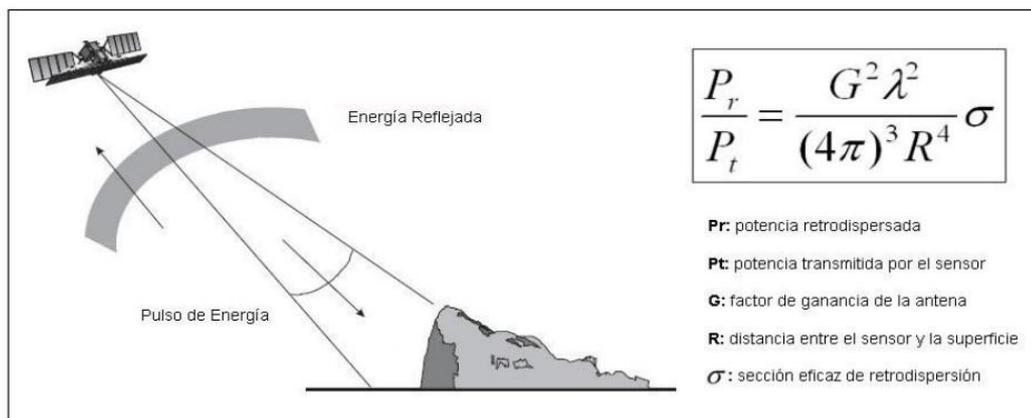
El radar es un sensor activo de microondas que se desplaza en una plataforma, emitiendo pulsos de energía hacia la superficie terrestre y capturando las señales de retorno. Al generar su propia energía, permite controlar parámetros como la frecuencia, polarización y la geometría de observación, y es eficaz tanto de día como de noche, lo que es ventajoso en regiones polares con largos periodos de oscuridad (Rosen, 2000).

La relación entre el radar, los objetos observados y la señal recibida está descrita en la ecuación del radar, que vincula la potencia emitida y la potencia reflejada hacia el sensor. El radar mide la intensidad de la radiación retrodispersada, que depende del coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ), el cual relaciona la energía reflejada con la recibida por unidad de área en la dirección del sensor (Massonet et al., 1994; Zebker & Weber Hoen, 2000). Este coeficiente varía según la superficie observada, en función de su conductividad o constante dieléctrica. Diversos factores pueden influir en la señal recibida, como la polarización y el ángulo de incidencia del haz emitido,

así como las propiedades de la superficie, como la humedad, rugosidad y la inclinación o morfología del terreno (Massonnet et al., 1993).

Cada píxel en una imagen radar tiene un valor numérico que representa la intensidad de la señal recibida, y esto se manifiesta en la imagen como "brillantez radar" ( $\beta^0$ ), visible a través de una escala de grises proporcional a la intensidad de la señal retrodispersada (ver Figura 5). El sistema de radar transmite pulsos de microondas que barren la superficie terrestre, recibiendo la energía reflejada y registrando tanto la intensidad de la señal como el retardo temporal entre emisión y recepción, lo que permite calcular la distancia de los objetos observados (Hanssen, 2001; Marchionni & Cavayas, 2014; Massonnet et al., 1993).

**Figura 5** *Sistemas de radar RADARSAT*



*Nota.* El sistema mide la intensidad de la señal reflejada (radiación retrodispersada) y el tiempo de retardo entre la emisión y la recepción de cada pulso de energía, lo que permite determinar la distancia a los objetos observados. Tomado de Marchionni & Cavayas (2014).

### 1.7.6 Características de los satélites ERS

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó una serie de satélites equipados con SAR bajo el nombre de ERS, diseñados para proporcionar datos continuos sobre la superficie terrestre, los océanos y las zonas costeras. El primer satélite de esta serie, el ERS-1, fue lanzado en 1991, seguido por el ERS-2 en 1995. Ambos satélites operaron hasta los años 2000 y 2011, respectivamente, y contaban con un instrumento de microondas activas, el Instrumento de

Microondas Activo (siglas en inglés AMI), que en su modo de imagen SAR operaba en la banda C (5,6 cm), con polarización VV, un ángulo de incidencia de 23° y un intervalo de revisita de 35 días (Marchionni & Cavayas, 2014).

### **1.7.7 Características de los satélites ENVISAT**

La continuidad en la recolección de datos tras el fin de ERS-2 fue garantizada con el lanzamiento del satélite ENVISAT en 2002, cuya misión concluyó en 2012. ENVISAT estaba equipado con instrumentos avanzados, tanto ópticos como de radar, que permitían la observación constante de la Tierra, la atmósfera, los océanos y las masas de hielo, además de monitorear los factores que influyen en el cambio climático global (Samsonov & d'Oreye, 2017). Uno de sus instrumentos principales, el Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), operaba también en la banda C, pero con mejoras tecnológicas que lo hacían más avanzado que sus predecesores, ofreciendo varios modos operativos, una mayor cobertura (hasta 400 km en modo de barrido amplio), un rango de ángulos de incidencia de 15° a 45° y opciones de polarización dual, tanto en polarización paralela (VV y HH) como cruzada (VH y HV) en el modo de polarización alternada (Marchionni & Cavayas, 2014).

### **1.7.8 Características de los satélites RADARSAT**

El satélite RADARSAT-1, lanzado en 1995 por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), fue el primer satélite de Canadá dedicado a la observación de la Tierra, seguido por RADARSAT-2 en 2007. Estos satélites fueron diseñados para ofrecer datos sobre el Ártico canadiense y las regiones polares, donde hay largos periodos de oscuridad en invierno, así como sobre las costas canadienses, caracterizadas por una alta nubosidad. Su objetivo principal es facilitar la navegación marítima y monitorear el medio ambiente (Zebker & Weber Hoen, 2000).

RADARSAT-1 fue pionero al incluir un radar operativo con modo ScanSAR, lo que le permitió realizar barridos amplios. Su órbita permite una cobertura global cada 24 días, aunque en las zonas ecuatoriales este periodo se reduce a 5 días, mientras que en el Ártico la cobertura es

diaria. Operando en la banda C (5.6 cm) con polarización horizontal (HH), el satélite cuenta con 7 modos de haz que ofrecen resoluciones que varían de 8 a 100 metros y áreas de cobertura de entre 50 y 500 km (Hanssen, 2001; Zebker & Weber Hoen, 2000).

Además, tiene 7 posiciones de haz que abarcan ángulos de incidencia de entre 10° y 59°. RADARSAT-1 observa hacia la derecha, mirando al oeste en su órbita descendente y al este en la ascendente. Por su parte, RADARSAT-2 introdujo importantes mejoras, como una antena que puede observar tanto hacia la izquierda como hacia la derecha en ambas órbitas, lo que aumenta la frecuencia de revisita. También cuenta con una resolución ultrafina de 3 metros y ofrece múltiples opciones de polarización, tanto paralela (HH o VV) como cruzada (HV o VH), en modos simple, dual y polarimétrico, lo que amplía significativamente sus aplicaciones. (Marchionni & Cavayas, 2014).

### **1.7.9 Características de los Satélites Sentinel - 1**

La misión Sentinel-1 utiliza principalmente dos modos operativos de imagen: el modo de Interferometría de Banda Ancha (IW) y el modo de Olas (WV). Estos modos satisfacen la mayoría de los requisitos de los servicios actuales, permiten una planificación más sencilla y reducen los costos operativos. Además, hay otros modos disponibles para asegurar la continuidad con misiones anteriores (como ERS y ENVISAT) y para cumplir con las nuevas necesidades de los usuarios, incluidos el modo de Mapa Lineal (siglas en inglés SM) y el modo de Banda Extra Ancha (siglas en inglés EW). El SAR del Sentinel-1 admite polarización dual en la mayoría de los modos, excepto en el modo de Olas, que solo utiliza polarización simple (Davidson et al., 2012; Rosen, 2000).

El modo IW se implementa con escaneo progresivo para combinar una cobertura de 250 km con alta resolución ( $5 \times 20$  m). El modo SM ofrece una resolución mayor ( $5 \times 5$  m) en un área más pequeña de 80 km de ancho, mientras que el modo EW cubre más de 400 km con resolución

media ( $20 \times 40$  m). El Sentinel-1 garantiza interferometría a través de la superposición de espectros y proporciona imágenes de alta calidad con diversas aplicaciones (Davidson et al., 2012).

#### **1.7.10 Formación de imágenes**

La formación de imágenes SAR se logra a través de la alineación de la antena del radar con la trayectoria de vuelo del satélite, dirigiendo un haz hacia la superficie terrestre. El SAR utiliza la "apertura sintética" para mejorar la resolución azimutal mediante el procesamiento de las señales de retorno de pulsos sucesivos. Este proceso, conocido como enfoque SAR, reconstruye la respuesta de los dispersores en la superficie (Hanssen, 2001; Rosen, 2000; Zebker & Weber Hoen, 2000).

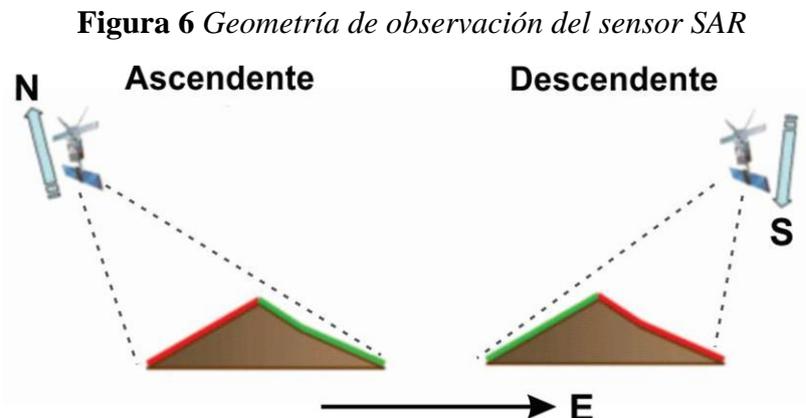
El enfoque SAR ha evolucionado de procesadores ópticos a digitales, con varios algoritmos que mejoran la precisión del enfoque y la calidad de la imagen. La resolución en azimut está vinculada al tamaño de la antena, donde antenas más pequeñas ofrecen mayor resolución, pero sacrifican la relación señal-ruido. El proceso de formación de la imagen incluye varios pasos, como el análisis del patrón de la antena, la compresión del pulso de rango y la corrección de migración, lo que permite obtener imágenes detalladas de la superficie terrestre con alta precisión (Hanssen, 2001).

#### **1.7.11 Geometría de observación de los sensores SAR**

Según Curlander & McDonough (1991), Henderson & Lewis (1998) y Gómez Palacios (2019); todos los satélites equipados con sensores SAR que orbitan el planeta operan en órbitas sincrónicas polares. Este tipo de órbita implica que el satélite cruza un mismo punto de la superficie terrestre siempre a la misma hora del día, manteniendo una regularidad en las condiciones de iluminación y observación. La altitud de estos satélites varía entre 500 y 800 km sobre la superficie terrestre, dependiendo de la plataforma en la que se encuentra instalado el sensor. Asimismo, el ángulo formado entre la dirección Norte-Sur y la trayectoria orbital del satélite presenta una ligera variación, generalmente en torno a los  $10^\circ$ , según las características de cada satélite.

Durante su recorrido, los satélites de órbita sincrónica polar sobrepasan cualquier región de la Tierra en dos modos: ascendente y descendente. En el modo ascendente, el satélite se desplaza desde el polo Sur hacia el polo Norte, mientras que en el modo descendente lo hace en sentido contrario, del polo Norte hacia el polo Sur. En una configuración de adquisición típica, los sensores SAR emiten señales hacia el Oeste cuando el satélite se encuentra en modo descendente y hacia el Este en modo ascendente. Esta particularidad determina la calidad de la cobertura en función de la orientación de las laderas observadas.

Es importante resaltar que las órbitas descendentes proporcionan una cobertura menos distorsionada para las laderas con orientación hacia el Oeste, mientras que las órbitas ascendentes ofrecen una cobertura equivalente para las laderas orientadas hacia el Este. En contraste, las laderas con orientación Norte-Sur presentan una baja susceptibilidad a las distorsiones geométricas producidas por el ángulo de adquisición del sensor (ver Figura 6).



*Nota.* Tomado de Gómez Palacios (2019).

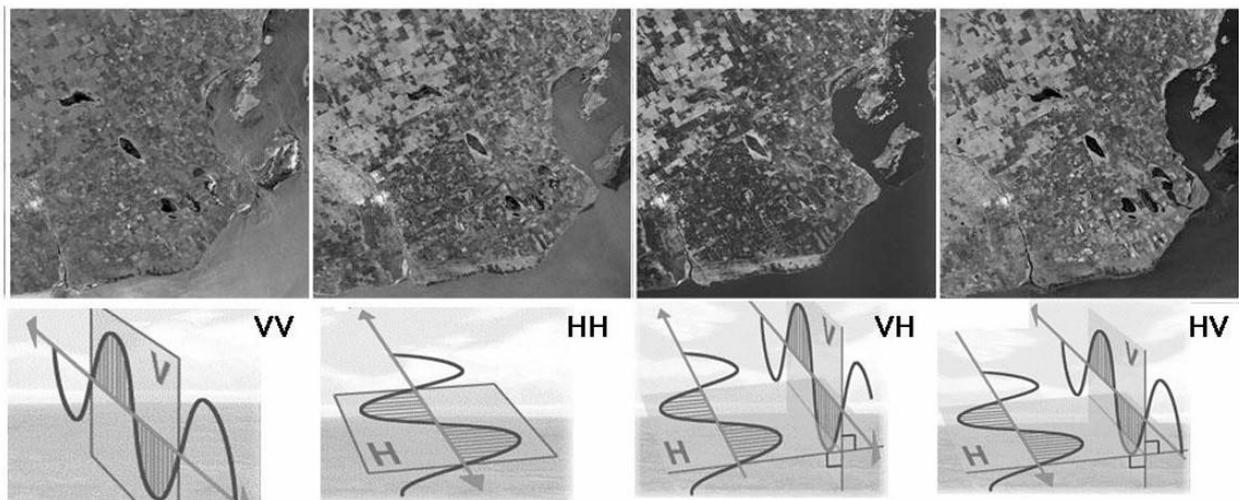
### 1.7.12 Características de la señal de radar

Los sistemas de teledetección por radar operan en el rango de microondas, con longitudes de onda que van de 0.5 cm a 75 cm, lo que les permite recolectar datos sin verse afectados por las condiciones climáticas. Esto es especialmente útil en zonas tropicales con alta cobertura nubosa, ya que pueden generar imágenes de buena calidad. Las microondas se agrupan en bandas designadas por letras (K, X, C, S, L, P), siendo la banda C la más común en satélites como ERS-1

y 2, RADARSAT-1 y 2, y ENVISAT. La banda L se utilizó en SESAT y en los radares JERS-1 y ALOS, mientras que la banda X pertenece al programa COSMO-SkyMed (Marchionni & Cavayas, 2014; Zebker & Weber Hoen, 2000).

Estos sistemas de radar están diseñados para enviar y recibir radiación polarizada en diversas orientaciones, lo que afecta cómo interactúan con el entorno y la señal de retorno. Los primeros radares satelitales solo podían recibir radiación en la misma polarización que la transmitida (polarización paralela), pero los radares más modernos, como los de RADARSAT-2, ENVISAT, ALOS y COSMO-SkyMed, también pueden recibir señales en polarización cruzada. Esto les permite ofrecer diferentes combinaciones de polarización en una imagen: Single Pol (una escena HH o VV), Dual Pol (dos escenas HH+HV o VV+VH) y Quad Pol (polarimétrica, con cuatro escenas: HH, HV, VH y VV) (Marchionni & Cavayas, 2014) (ver Figura 7).

**Figura 7** Modos de polarización de una imagen



*Nota.* Imágenes SAR tomadas de RADARSAT – 2 con distintas polarizaciones de configuración.

Tomado de Marchionni & Cavayas (2014).

### 1.7.13 Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)

Es una técnica de procesamiento de imágenes satelitales que facilita la eliminación del componente topográfico. Cuando los efectos atmosféricos y el ruido son mínimos, la diferencia de

fase residual puede relacionarse directamente con los desplazamientos superficiales a lo largo de la línea de visión del satélite (Zebker & Weber Hoen, 2000).

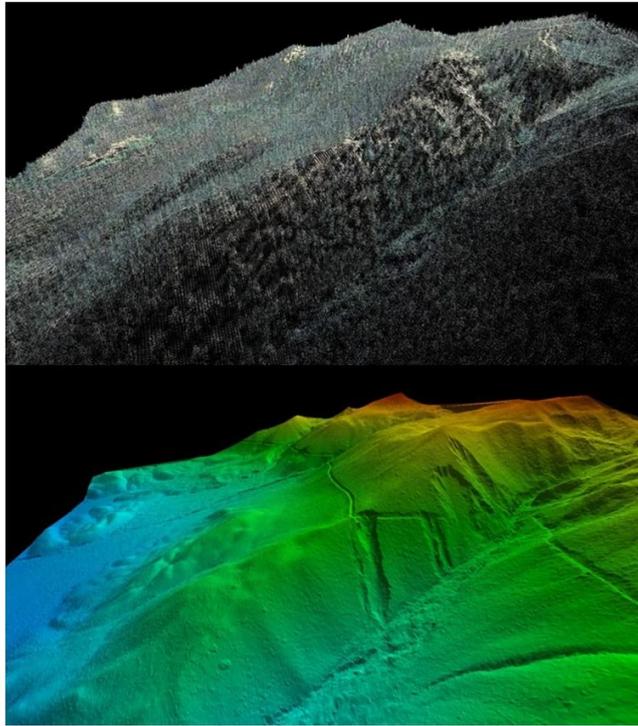
Este método permite monitorear movimientos lentos del terreno, como subsidencias, fallas y desplazamientos volcánicos, con alta precisión, en el rango de centímetros o milímetros y una resolución de píxeles de decenas de metros. En el caso de los deslizamientos de tierra, el uso del DInSAR enfrenta limitaciones debido a la baja resolución espacial de las imágenes SAR, el largo intervalo entre las pasadas de los satélites y la longitud de onda de la radiación, lo que lo hace ineficiente para monitorear movimientos rápidos en áreas pequeñas o con pendientes pronunciadas. Sin embargo, es útil para obtener información sobre movimientos muy lentos en áreas grandes y con vegetación dispersa (Canuti et al., 2004).

#### **1.7.14 Sensores LiDAR**

La tecnología Light Detection and Ranging (siglas en inglés, LiDAR) permite medir con alta precisión la distancia y velocidad de los objetos mediante el uso de un haz láser. A diferencia del Detección y Medición por Radio (siglas en inglés RADAR), que emplea ondas de radio de mayor longitud de onda, LiDAR ofrece una resolución más alta en el mapeo tridimensional. Su aplicación es muy variada, abarcando áreas como metrología, monitoreo ambiental, arqueología, robótica y, más recientemente, la conducción autónoma (N. Li et al., 2022).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (siglas en inglés, USGS) utiliza la tecnología LiDAR para respaldar diversas investigaciones científicas, como la creación de modelos hidrológicos, hidráulicos y de inundación, la detección de fallas geológicas, y el monitoreo de riesgos de deslizamientos y volcanes, entre otros. Los datos derivados de LiDAR son esenciales para actividades de mapeo topográfico, cartografía de erosión y análisis de hábitats (ver Figura 8). (Stoker et al., 2016).

**Figura 8** Mapeo topográfico resultado de LiDAR



*Nota.* Tomado de Stoker et al. (2016).

## **Capítulo 2**

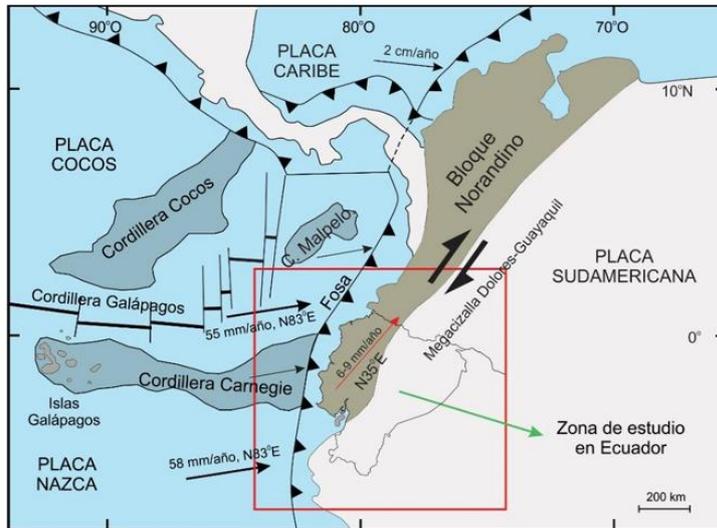
## **2.1 Marco Geológico**

### **2.1.1 Contexto tectónico regional del Ecuador**

El margen costero de Ecuador se caracteriza por estar en el límite de placas convergentes que forma una trinchera o fosa. En esta región, se inicia la subducción de la placa oceánica de Nazca, que incluye la Cordillera Carnegie, bajo la corteza continental de la placa Sudamericana, lo que provoca la creación de un arco volcánico activo. La Cordillera Carnegie se formó debido al paso de la placa de Nazca sobre el punto caliente de las Galápagos hace unos 20 a 23 millones de años. Esta cordillera influyó en el acoplamiento entre las placas de Nazca y Sudamericana, lo que incrementó el vulcanismo, la deformación y la actividad sísmica en la costa de Ecuador (Tamay, 2018). Debido a la colisión de la Cordillera de Carnegie en el margen costero ecuatoriano se está evidenciando levantamiento del terreno (Witt et al., 2006).

La subducción de la corteza oceánica es ligeramente oblicua con respecto a la dirección de la fosa (Tamay, 2018). Como consecuencia de aquello se originó el movimiento del Bloque Norandino, y también una subsidencia del Golfo de Guayaquil, el movimiento de este bloque tiene una dirección N35°E, a través de un sistema de fallas de tipo dextral, la velocidad del movimiento es de 6 a 9 mm/año. Estas estructuras forman parte de la mega cizalla Dolores–Guayaquil (Peuzin et al., 2023; Tamay, 2018; Witt et al., 2006) (ver Figura 9).

**Figura 9** Configuración tectónica regional

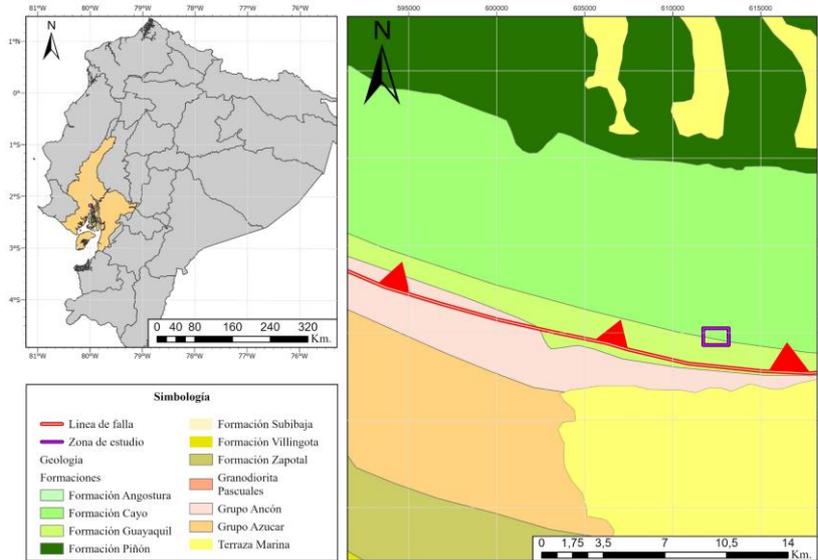


Nota. Tomado de Tamay (2018).

**2.1.2 Configuración tectónica de la costa sur-oeste ecuatoriana**

Según Egúez et al. (2003), existe una falla de tipo inversa que afecta la zona centro-oeste de la provincia del Guayas con velocidad de movimiento menor a 1 mm/año, esta falla pertenece a un complejo de fallas denominada *Falla Colonche*, que afecta mayormente en todo el remanente de la cordillera Chongón-Colonche (Ver Figura 10). El mismo autor proporciona en el mapa realizado para la USGS, información geológica y geográfica, incluyendo edades de las fallas, tasas de desplazamiento, intervalos de recurrencia y referencias en toda la zona geográfica ecuatoriana.

**Figura 10** Falla Inversa que afecta la parte centro-oeste de la provincia del Guayas



Alemán et al. (2021), describe tres ciclos evolutivos tectonoestratigráficos principales en esta región. Estos ciclos son clave para entender la evolución geológica y estructural del margen andino en el suroeste de Ecuador. Estos ciclos evolutivos son:

(1) **Acreción de terrenos oceánicos:** este ciclo involucra la acreción de terrenos oceánicos desde el Cretácico Tardío hasta el Paleoceno. Los arcos intra-oceánicos de Río Cala y Cayo se desarrollaron sobre fragmentos de mesetas oceánicas, lo que marcó eventos de colisión y acreción. Existen debates sobre si hubo un solo evento de colisión o múltiples eventos de acreción. Los estudios de datación radiométrica y la identificación de distintos terrenos son clave en este debate.

(2) **Deposición en cuenca de antepaís (foredeep basin):** durante la colisión de los arcos intra-oceánicos, se desarrollaron cuencas de antepaís asociadas a las deformaciones tectónicas. El relleno de la cuenca se dio principalmente a través de secuencias de flysch (sedimentos marinos profundos) que fueron deformados por cinturones de pliegues y cabalgamientos. Los estudios paleontológicos y sedimentológicos ayudan a diferenciar los ambientes de depósito de estos sedimentos, y se debate la interpretación de éstos como cuencas de prismas de acreción o cuencas de antepaís.

(3) **Deposición en cuenca de antearco (forearc basin):** con el inicio de la subducción durante el Eoceno Medio, las cuencas de antearco comenzaron a desarrollarse. La cuenca Progreso es una de estas cuencas, y su evolución está asociada a eventos de transtensión (tensiones extensionales y de cizalla). Este ciclo se caracteriza por la acumulación de sedimentos marinos y siliciclásticos en el antearco, con el incremento de la actividad volcánica de los arcos cercanos (Ver Figura 11).



### **2.1.3.2 Miembro Guayaquil**

La localidad tipo está en la cantera frente al puente sobre el Estero Salado, en la salida W de Guayaquil. Los afloramientos siguen en las canteras del Cerro Santa Ana formando una banda paralela al flanco S de la Cordillera Chongón Colonche hasta unos 80km al WNW de Guayaquil. Está constituido por capas estratificadas de 0.2-0.4m de espesor de lutitas silíceas, lutitas tobáceas, chert nodular bandeado, tobas, arenisca y lutitas fisiles de color verde, variable de gris claro a oscuro y negro (Duque, 2000). Se observan también vetas de sílice calcedonia azul, casi opalescente, nódulos de piritita y vetas de cuarzo. Tiene una edad del Maastrichtiano y una potencia de 450 m en la cordillera Chongón Colonche hasta Guayaquil (Ver Figura 12).

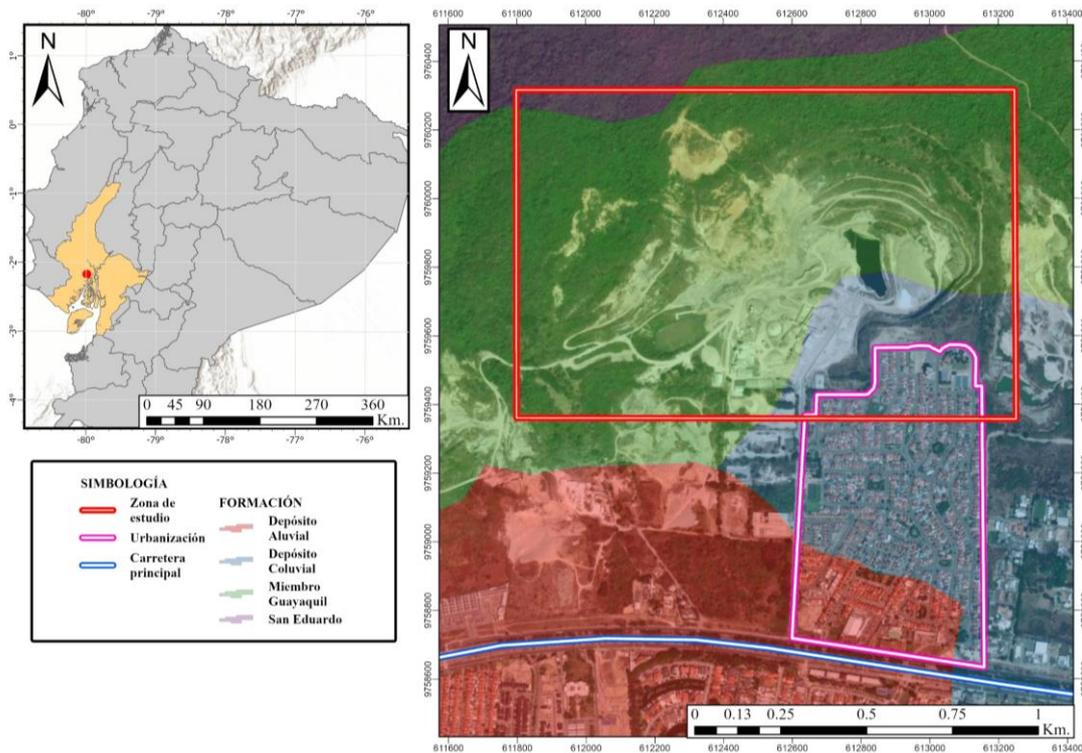
### **2.1.3.3 Formación San Eduardo**

La localidad tipo está en la cantera San Eduardo dentro de la empresa Cemento Nacional, en la autopista a la Costa, Prov. de El Guayas, 2km al W del cerro San Eduardo, tiene una potencia de 200 m (Duque, 2000). Descansa sobre el Miembro Guayaquil en forma aparentemente concordante pero las respectivas edades sugieren un hiato sedimentario entre ellas, tiene una edad correspondiente al Eoceno Medio. Se caracteriza por presentar fragmentos de algas arrecifales, guijarros de calcilutitas y acumulaciones de chert. Sobreyacen en discordancia angular, en algunos sectores, con el miembro Guayaquil (Núñez del Arco, 2003) (Ver Figura 12).

Pérez (2010) en su tesis indica que la Formación San Eduardo se ha dividido en cuatro unidades, denominadas de abajo hacia arriba como U4, U3, U2 y U1.

La unidad U1 es la de mejor calidad en esta formación, caracterizada por un bajo contenido de  $SO_3$  y un alto contenido de CaO. Está compuesta por calizas de tipo mudstones micríticos y espatíticos, de colores que varían entre beige claro y gris claro, además de packstones y grainstones fosilíferos. También presenta láminas centimétricas y milimétricas de margas oscuras a shale calcáreo, que son muy esporádicas y discontinuas.

**Figura 12** Mapa de las formaciones geológicas de la zona de estudio



La unidad U2 consiste en capas subparalelas y onduladas de wackestones intraclásticos, margas oscuras y shales orgánicos calcáreos, con tonalidades que van del gris medio al gris oscuro. En esta unidad es común encontrar pirita diseminada y glauconita. Su espesor, que oscila entre 6 y 10 m, es bastante uniforme en todo el yacimiento. Es una unidad sulfurosa que se encuentra justo por debajo de la U1.

La unidad U3 está compuesta principalmente por calizas de color gris claro de alta ley, con algunas intercalaciones de margas con alto contenido de azufre y materia orgánica, así como calizas margosas gris claro, wackestones y shales oscuros. El espesor de esta unidad varía lateralmente, aumentando hacia el este, donde puede alcanzar entre 15 y 60 m. Se encuentra por debajo de la unidad U2 y por encima de la unidad U4.

Por último, la unidad U4 se caracteriza por facies de color gris oscuro a negro, ricas en azufre y materia orgánica, que lateralmente se convierten en calizas de alta ley, con intercalaciones ocasionales de margas con alto contenido de azufre y materia orgánica. Esta unidad está debajo de la U3 y por encima de la Formación Guayaquil.

## **Capítulo 3**

### 3.1 Formulación de alternativas

Las técnicas empleadas para la monitorización y caracterización de deslizamientos se clasifican en tres categorías principales, cada una con enfoques específicos y aplicaciones particulares (Gómez Palacios, 2019; Vázquez Roura, 2013).

En primer lugar, las técnicas geofísicas se utilizan para analizar las propiedades físicas del terreno, siendo útiles en estudios que abarcan desde pocos metros hasta varias centenas de profundidad. Estas herramientas permiten identificar límites de fallas y localizar niveles freáticos. Aunque no invasivas y aplicables en terrenos inestables, su resolución tiende a disminuir con la profundidad y requieren complementarse con otras disciplinas, como la geotecnia y la hidrología, para garantizar mayor precisión en los resultados (Vázquez Roura, 2013).

Por otro lado, las técnicas geotécnicas se enfocan en el análisis de parámetros mecánicos del suelo, como su resistencia al corte y su consistencia, aspectos fundamentales para la evaluación del riesgo y peligro asociado a deslizamientos. La principal ventaja de este enfoque radica en la alta precisión obtenida al analizar muestras específicas. Sin embargo, su implementación suele ser costosa y demandar una considerable inversión de tiempo debido al número de pruebas necesarias (Tejada, 2020; Torres Chung, 2007).

Finalmente, las técnicas de teledetección utilizan imágenes de radar satelital para mapear desplazamientos en grandes extensiones de terreno con una precisión milimétrica. En esta categoría, destaca la interferometría SAR, tanto en su modalidad convencional como avanzada y por su eficacia en la detección de movimientos en masa. Estas técnicas permiten el monitoreo en tiempo real, presentan costos relativamente bajos y ofrecen ventajas significativas en términos de cobertura y resolución espacial (Gonzales et al., 2009; Massonnet et al., 1994).

Este apartado expone de manera concisa las diferentes técnicas utilizadas para la monitorización de movimientos en masa, destacando sus ventajas y limitaciones, que varían según su campo de aplicación y los objetivos específicos de cada investigación (Ver Tabla 4).

**Tabla 4** Características de las técnicas de monitoreo frente a deslizamientos

<b>Criterio</b>	<b>Técnicas Geofísicas</b>	<b>Técnicas Geomecánicas</b>	<b>Técnicas de Interferometría</b>
<b>Principio</b>	Análisis de propiedades físicas del terreno	Monitoreo directo de parámetros mecánicos	Observación remota de deformaciones del terreno
<b>Escala espacial</b>	Local o regional (dependiendo de la técnica)	Local (puntos específicos)	Regional (áreas extensas)
<b>Resolución</b>	Media a alta	Muy alta en puntos específicos	Muy alta para áreas amplias (milimétricas)
<b>Costos</b>	Moderados a altos	Moderados a altos	Moderados a bajos
<b>Limitaciones</b>	Ruido geológico por agua subterránea	Accesibilidad al sitio	Limitada cobertura satelital y vegetación

### 3.2 Materiales

El dron utilizado para la captura del DEM es de marca DJI Matriz 350 con sensor LiDAR y cámara digital.

El procesamiento de imágenes para la metodología DInSAR se llevó a cabo utilizando el software de acceso libre Sentinel Application Platform (SNAP). Este programa, que permite el análisis de imágenes Sentinel y de otras misiones espaciales, se utilizó en su versión 9.0 all toolboxes, versión lanzada en 2022 (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/previous-versions/>), la cual es más estable y contiene menos errores en su código, facilitando así el procesamiento adecuado de las imágenes.

Un aspecto importante en la utilización del software SNAP es la descarga de los pluggins adecuados que fueron útiles para la etapa del desenrollado de fase (unwrapping), en este caso el plugin *snaphu unwrapping*.

Los mapas resultantes fueron elaborados utilizando el software ArcGIS Pro, con una licencia académica proporcionada por la ESPOL para fines educativos.

### **3.3 Metodología**

Este apartado se construyó en base a las definiciones presentadas en el tutorial realizado por la Agencia Espacial Europea (ESA) bajo autoría de Braun et al. (2021). La Figura 13 presenta un esquema resumido de la metodología aplicada en este proyecto.

#### **3.3.1 Búsqueda de información bibliográfica**

La búsqueda de información bibliográfica en artículos científicos, tesis de grado y tesis doctorales, resultó esencial para comprender y aplicar la metodología DInSAR de manera adecuada. Permitió analizar los principios científicos que fundamentan esta técnica, así como identificar estudios previos en los que se empleó en contextos similares. Además, facilitó la selección de herramientas de procesamiento, y ayudó a reconocer los posibles desafíos, como errores asociados a la cobertura vegetal y de interpretación de resultados.

También proporcionó los argumentos necesarios para justificar la elección de esta metodología, como la más adecuada para el proyecto relacionado con el análisis del deslizamiento en vía a la Costa, lo que permitió aprovechar experiencias previas en regiones con características similares, destacando así la relevancia del trabajo dentro del ámbito científico.

#### **3.3.2 Adquisición de imágenes**

Para la adquisición de imágenes se tomaron las siguientes consideraciones:

- La línea base perpendicular entre cada par de imágenes debe ser lo mínimo posible. Según Usai (2001), la decorrelación interferométrica surge por diferencias en la retrodispersión entre imágenes, aumentando con mayores distancias entre sensores (línea base perpendicular). Esto genera imágenes con ruido cuando las firmas son muy distintas, siendo la línea base perpendicular crítica a los 300 m. Manconi et al. (2024), sugiere que esta línea base perpendicular sea máximo 150 m, pero para no perder temporalidad entre

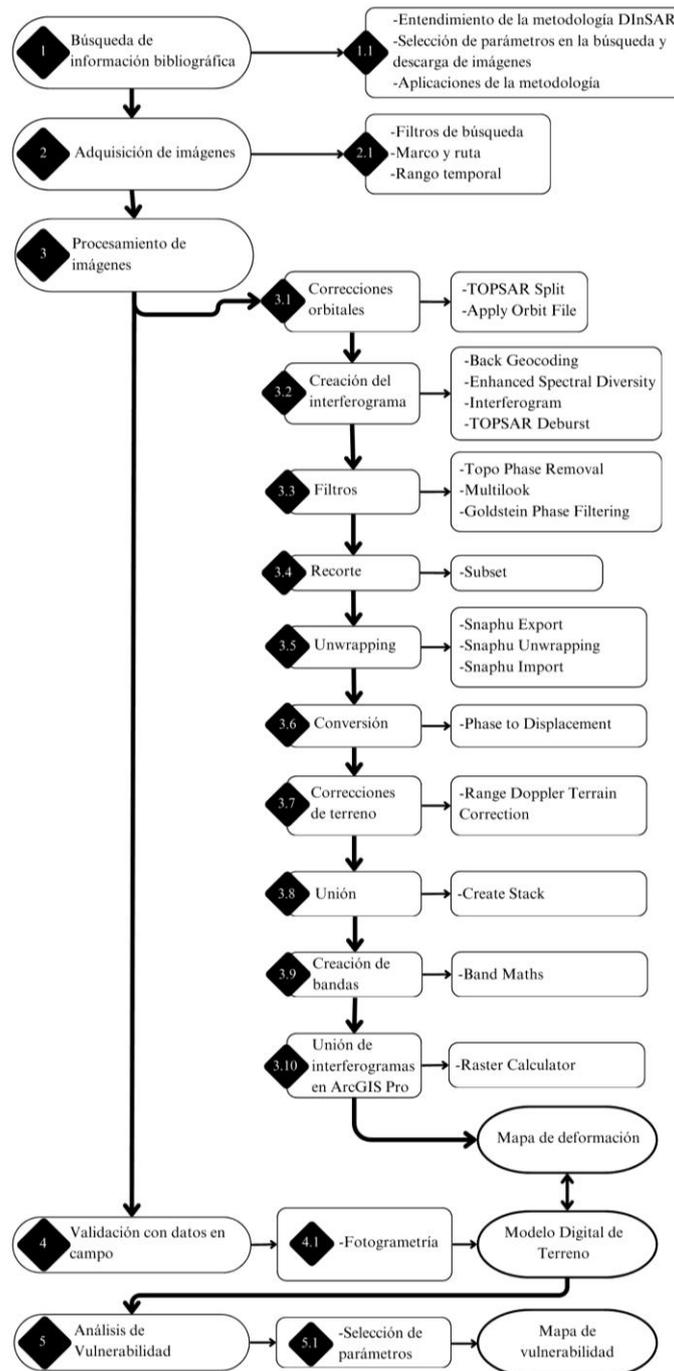
cada par de imágenes, el presente estudio consideró un máximo de 200 m como línea base perpendicular crítica.

- Se adquirieron imágenes de tipo Sentinel-1A, descargadas de manera gratuita desde la página web del ASF Canadian Data Search (<https://search.asf.alaska.edu>). En total se descargaron 55 imágenes radar complejas con formato SLC, en el modo IW, con polarización VV VH en el periodo que corresponde desde octubre-2022 a octubre-2023, cada par de imágenes con un rango temporal de 12 días. De estas imágenes, 26 fueron adquiridas en el modo de vuelo Ascendente (Marco 1170 y ruta 18) y, 29 en el modo de vuelo Descendente (Marco 596-601 y ruta 40) (Ver Tabla 5).

**Tabla 5** *Características de las imágenes descargadas*

<b>Tipo de Vuelo</b>	<b>Nro. De imágenes</b>	<b>Rango temporal (días)</b>	<b>Polarización</b>	<b>Marco</b>	<b>Ruta</b>
Ascendente	25	12	VV VH	1170	18
Descendente	27	12	VV VH	596 - 601	40

**Figura 13** Esquema de la metodología empleada



### 3.3.3 Procesamiento de imágenes

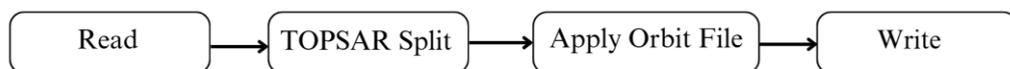
#### 3.3.3.1 Correcciones orbitales

Este paso fue crucial en el proceso ya que corrigieron aspectos orbitales de la imagen y se la recortó a un área correspondiente a la zona de estudio.

La operación *TOPSAR Split* se aplicó a ambas imágenes (maestra y esclava) con el fin de seleccionar únicamente las franjas necesarias para el análisis. Originalmente, las imágenes Sentinel se dividen en tres sub-franjas denominadas IW1, IW2 e IW3. Para este estudio, considerando la zona de interés, se seleccionó la sub-franja IW1 en el modo de vuelo ascendente y la sub-franja IW2 en el modo descendente, ambas con polarización VV. Además, las imágenes también presentan subdivisiones denominadas *Burst*, organizadas en filas. Generalmente, cada imagen contiene nueve *Burst*, de las cuales se seleccionaron las sub-franjas 8 y 9 en el modo de vuelo ascendente, mientras que en el modo descendente se escogieron las sub-franjas 8 y 9 para el marco 596 y las sub-franjas 1 y 2 en el marco 601 (Ver Figura 14).

Los vectores de estado orbital, que se encuentran en los metadatos de los productos SAR, generalmente no son precisos. Las órbitas exactas de los satélites se determinan después de varios días y están disponibles días o incluso semanas después de la generación del producto. La función *Apply Orbit File* en SNAP permitió descargar y actualizar automáticamente los vectores de estado orbital para cada escena SAR en los metadatos del producto, proporcionando información precisa sobre la posición y velocidad del satélite (Filipponi, 2019).

**Figura 14** Esquema de las correcciones orbitales



### 3.3.3.2 Creación del interferograma

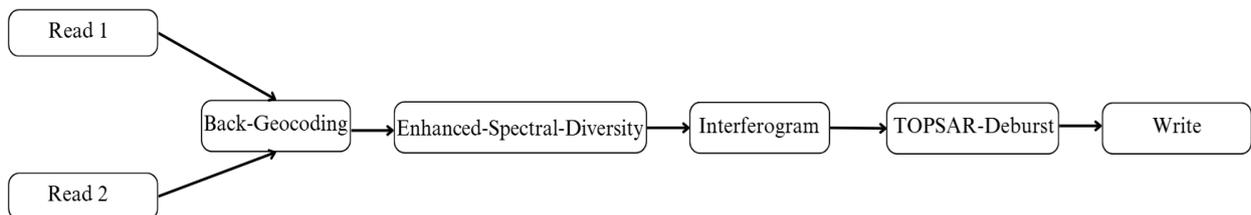
Después de haber aplicado el proceso anterior a cada imagen, se utilizó la herramienta *Back Geocoding*, la cual sirvió para realizar el coregistro de los dos productos previos en función de la información orbital que se había agregado en la sección 3.3.3.1. Para aumentar la calidad del coregistro, se aplicó el operador *Enhanced Spectral Diversity* (ESD), la cual hace correcciones de desplazamiento en rango y acimut a la imagen secundaria. Aplicar el proceso (ESD) fue estrictamente necesario cuando la selección de los *Burst* era más de uno.

Para la fase de creación del interferograma y las bandas de coherencia, se aplicó el operador *Interferogram Formation*, en este paso resultó de importancia resaltar las siguientes casillas:

- **Subtract flat-earth phase:** la fase de tierra plana es la componente de fase en la señal interferométrica que surge por la curvatura de la superficie de referencia. Esta fase se calcula usando los datos orbitales y se elimina del interferograma complejo.
- **Include coherence estimation:** esto produce una banda de coherencia en la salida calculada con una ventana de 10x3 píxeles en dirección rango/acimut.

En cambio, el *TOPSAR Deburst* se usó para eliminar las líneas de unión entre los *Burst* individuales. El producto de salida contiene las mismas bandas, pero con los *Burst* fusionados (Ver Figura 15).

**Figura 15** Esquema de la creación del interferograma



### 3.3.3.3 Fase de filtros

En un terreno plano, se espera una serie de franjas paralelas y regularmente espaciadas. Cualquier desviación de este patrón paralelo se puede interpretar como una variación topográfica. Si se desea analizar esta variación topográfica (por ejemplo, para derivar un modelo digital de elevación), no se resta la fase topográfica. Sin embargo, como en este trabajo interesaba el desplazamiento de la superficie, se aplicó la eliminación de la fase topográfica seleccionando *SRTM 1Sec HGT (Auto Download)* con la herramienta *Topo Phase Removal*.

El procesamiento *Multilook* fue un paso opcional utilizado para generar un producto con un tamaño de píxel de imagen nominal. Este proceso consistió en la generación de múltiples vistas mediante el promedio de celdas de resolución en rango y/o acimut, lo que mejoró la resolución

radiométrica, pero a costa de una disminución en la resolución espacial. Como resultado, la imagen presentó un menor nivel de ruido y un espaciamiento de píxeles más uniforme tras su conversión de rango oblicuo a rango terrestre.

La fase interferométrica puede verse afectada por ruido debido a la decorrelación temporal y geométrica, la dispersión de volumen y otros errores de procesamiento. La información de fase en áreas con decorrelación no puede recuperarse; sin embargo, la calidad de las franjas presentes en el interferograma puede mejorarse aplicando filtros de fase especializados, como el *Goldstein Phase Filtering*, que utiliza una Transformada Rápida de Fourier (FFT) para aumentar la relación señal-ruido de la imagen. Esto fue necesario para un desenrollado adecuado en el siguiente paso. En este caso se aplicó el filtro de Goldstein 32 (Ver Figura 16).

**Figura 16** Esquema de la fase de filtros



#### 3.3.3.4 Fase de recorte

Dado que los *Burst* seleccionados cubren un área mayor de lo necesario para este análisis, se procedió crear un recorte (*Subset*) de datos. Resulta de importancia aplicar este *Subset* únicamente después de haber realizado el *TOPSAR Deburst*. Además, el subconjunto ayudó a eliminar las áreas verdes en los bordes de la imagen que se generaron durante el procesamiento.

Para crear el *Subset* en el área de interés, se seleccionaron las coordenadas geográficas especificadas a continuación:

- -80.0636978149414, -2.1470000743865967;
- -79.9468002319336, -2.1470000743865967;
- -79.9468002319336, -2.220599889755249;
- -80.0636978149414, -2.220599889755249;
- -80.0636978149414, -2.1470000743865967;
- -80.0636978149414, -2.1470000743865967

### 3.3.3.5 Unwrapping

En un interferograma, la fase interferométrica presenta una ambigüedad, ya que solo es conocida dentro de un intervalo de  $2\pi$ , lo que complica su asociación directa con la altura topográfica. Para resolver este problema, se realizó un proceso llamado desenrollado de fase (*Phase Unwrapping*), que permitió eliminar dicha ambigüedad. La altitud de ambigüedad representa la diferencia de altura necesaria para que ocurra un cambio de fase de  $2\pi$  en el interferograma nivelado.

El desenrollado de fase funciona integrando las diferencias de fase entre píxeles adyacentes. Al restar cualquier múltiplo entero de la altitud de ambigüedad, que es equivalente a ciclos enteros de  $2\pi$ , se calculó la variación de fase real entre dos puntos. Esto permitió obtener una medición relativa de la altura o del desplazamiento entre los píxeles en las imágenes comparadas, brindando así resultados que representan fielmente el relieve o el movimiento de la superficie analizada.

Para obtener resultados óptimos en el desenrollado de fase, el proceso anterior (sección 3.3.3.3) es realmente necesario. Para mapas de desplazamiento a gran escala, se sugiere considerar un *multi-looking* con resolución espacial de 20 metros o menor.

La fiabilidad de los resultados depende de la coherencia de entrada, siendo recomendable una coherencia mínima de 0.25 para asegurar resultados confiables. El proceso de desenrollado en SNAP se realizó en tres etapas:

- SNAPHU Export
- SNAPHU Unwrapping
- SNAPHU Import.

Aunque *SNAPHU* opera externamente, su integración con *SNAP* permite realizar el proceso sin usar la línea de comandos. La duración del desenrollado puede variar, pero *snaphu* admite el procesamiento en múltiples hilos, lo que mejora la eficiencia del cálculo.

El operador de *SNAPHU Export*, convierte el interferograma (en su fase envuelta) a un formato compatible con *snaphu*. También permite seleccionar algunos parámetros que afectan el proceso de desenrollado, los cuales se guardan en un archivo de configuración que *snaphu* utiliza.

Tras exportar correctamente el producto, el proceso de desenrollado puede iniciarse directamente en el programa mediante el operador *SNAPHU-unwrapping*. Para ello, se seleccionó como producto de entrada el subconjunto *phase.img* previamente generado con *SNAPHU Export*. El programa luego envía el comando especificado en el archivo *snaphu.conf* a *snaphu.exe*, que finalmente produce la imagen ráster asociada a los metadatos de la fase desenrollada.

Terminado con este apartado se procedió a utilizar la herramienta *SNAPHU Import*, que convirtió el archivo de nuevo al formato *BEAM DIMAP* y añade los metadatos necesarios del producto de fase envuelta, dado que ambos comparten la misma geometría.

#### **3.3.3.6 Conversión de datos**

Para este proceso se utilizó la herramienta *Phase to Displacement*, la cual convirtió la fase desenrollada en medidas de desplazamiento en metros a lo largo de la línea de visión (LOS). Con ella, se pueden interpretar los cambios de superficie, donde los valores positivos indican elevación y los negativos, hundimiento, considerando la fecha de adquisición de la imagen de referencia. Una vez aplicada a la fase desenrollada, cada píxel adquiere un valor métrico que indica su desplazamiento.

#### **3.3.3.7 Correcciones de terreno**

La corrección del terreno usando la herramienta *Range Doppler Terrain Correction*, permitió geocodificar la imagen al corregir las distorsiones geométricas inherentes al SAR mediante el uso de un modelo de elevación digital (siglas en inglés, DEM) y al producir un producto proyectado en un sistema de coordenadas de mapa.

La geocodificación convierte una imagen de geometría de rango inclinado o de rango terrestre a un sistema de coordenadas de mapa. La geocodificación del terreno utiliza un DEM

para corregir distorsiones geométricas, tales como el acortamiento, el efecto de superposición y las sombras.

Filipponi (2019) menciona que, el operador de corrección de terreno por *Range Doppler Terrain Correction* en SNAP se utiliza para geocodificar escenas SAR, empleando un método de ortorrectificación que combina datos del estado orbital, tiempos de radar y un modelo de elevación digital para lograr una geolocalización precisa.

En este proceso cabe recalcar que se lo hizo tanto para el producto que se obtuvo en el proceso del *SUBSET* (sección 3.3.3.4) y también para el resultado después de la conversión de datos (Sección 3.3.3.6).

### **3.3.3.8 Unión de datos**

En este apartado con la herramienta *Create Stack* se dispuso a unir los resultados de sección 3.3.3.7 con la finalidad de obtener un producto final con todas sus bandas.

### **3.3.3.9 Creación de bandas**

En esta etapa, se procedió a la creación de nuevas bandas en el producto final utilizando la opción *Band Maths*. Este proceso implica la discretización de los datos, donde todos los píxeles con valores menores o iguales a 0.25 serán descartados y no considerados para este estudio.

Según Tzouvaras et al. (2020), esto sirve para eliminar toda esa información que viene con ruido debido a la vegetación, el mismo autor considera valores de coherencia a partir 0.20, esta banda inicial sirvió para crear la siguiente, en la cual también fue necesario discretizar los datos que presentan valores de coherencia mayores o iguales a 0.5; en el caso de la zona de estudio, estos valores corresponden a los píxeles que abarcan las urbanizaciones cercanas. Dado que el análisis no contempla deformaciones en estas áreas, dichos píxeles son eliminados del estudio.

El resultado final debería contar con un total de 7 bandas, siendo la última la más relevante, ya que fue generada en el paso final del proceso. Esta banda es la que debe considerarse al exportar el producto a ArcGIS Pro.

Desde la sección 3.3.3.1 hasta la sección 3.3.3.9 , el procedimiento se repite para cada interferograma, teniendo en cuenta que la imagen esclava de un interferograma se convierte en la imagen maestra del siguiente. Este proceso se llevó a cabo de manera secuencial hasta cubrir todo el rango temporal definido para el estudio, tanto en el modo de vuelo ascendente y el modo de vuelo descendente.

### **3.3.3.10 Unión de interferogramas en ArcGIS Pro**

Este apartado tiene como objetivo combinar todos los interferogramas generados hasta la sección anterior, considerando únicamente aquellos que contienen información relevante sobre la zona de estudio. Para este proceso, se empleó la herramienta *Raster Calculator*, que permitió realizar una suma total de los interferogramas, lo cual facilita la visualización de la deformación acumulada a lo largo del rango temporal analizado. Este último paso es clave para obtener el producto final del análisis de interferometría.

### **3.3.4 Validación con datos en campo**

Los datos de campo LiDAR fueron recolectados gracias a la colaboración y el préstamo de equipos y sensores por parte de los ingenieros Bernardo Iñiguez, Juan José Usca y Erwin Larreta. De igual manera, los datos topográficos del terreno para el periodo pre-evento fueron proporcionados gracias a la colaboración de los ingenieros Wilmer Vásquez y César Pacheco, quienes además facilitaron el acceso a los terrenos de la zona de interés para llevar a cabo este estudio.

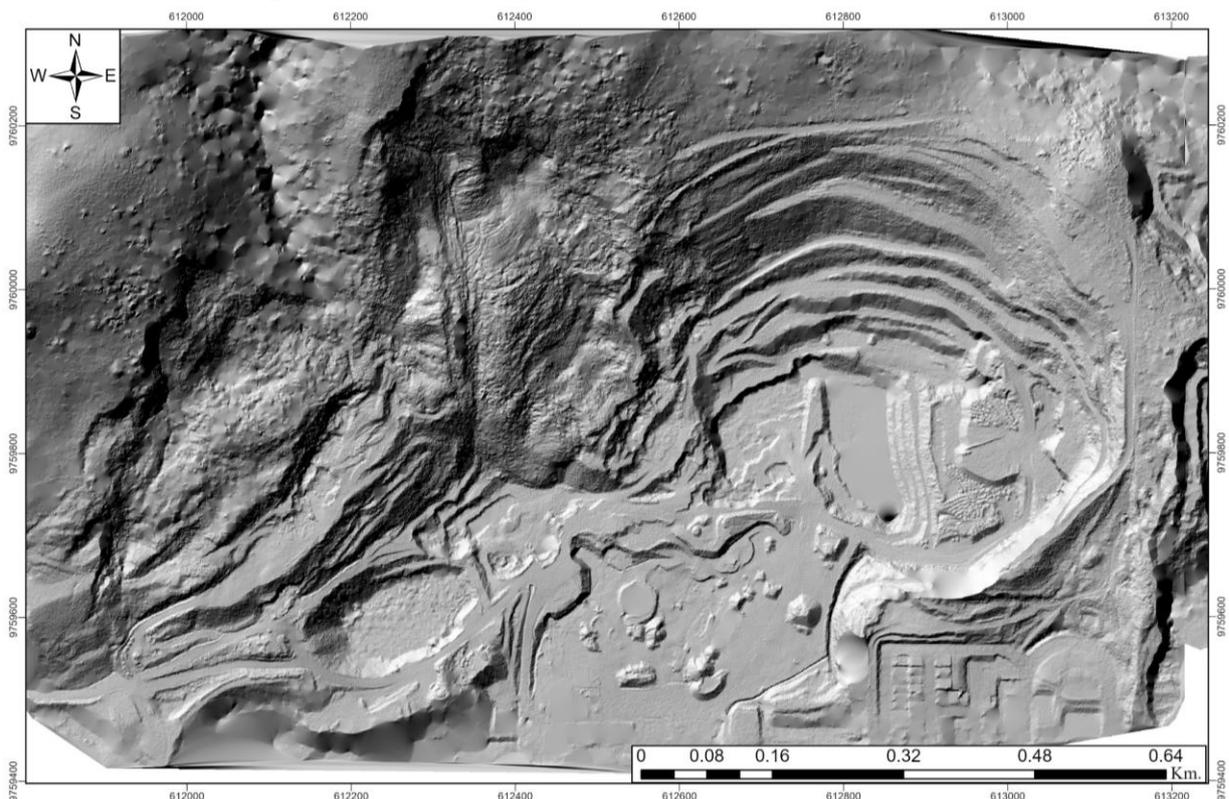
El vuelo de dron se realizó con un sensor LiDAR para obtener una nube de puntos que al hacerle un par de correcciones (*classify ground* y *classify buildings*), permitió obtener un Modelo Digital de Terreno (siglas en inglés DEM). La herramienta *Classify Ground*, tuvo como propósito diferenciar y categorizar los puntos que representaban la superficie del terreno dentro de una nube de puntos LiDAR. Este proceso fue esencial para distinguir de manera automatizada los puntos

correspondientes al suelo de aquellos que pertenecen a elementos como edificaciones, vegetación y otras estructuras artificiales.

Se utilizó también la herramienta *Classify Buildings*, la cual permitió distinguir los puntos que representan edificaciones, ya que en el área de estudio también se detectaron construcciones asociadas a las instalaciones de una cantera y de la urbanización cercana.

Para generar el DEM, se consideró únicamente la categoría *Ground*, que incluye exclusivamente los puntos correspondientes a la topografía del terreno, excluyendo por completo aquellos asociados a edificaciones. Una vez finalizado este proceso, se procedió a exportar el modelo LiDAR como un DEM (ver Figura 17), con una resolución de píxel de 0.5 m.

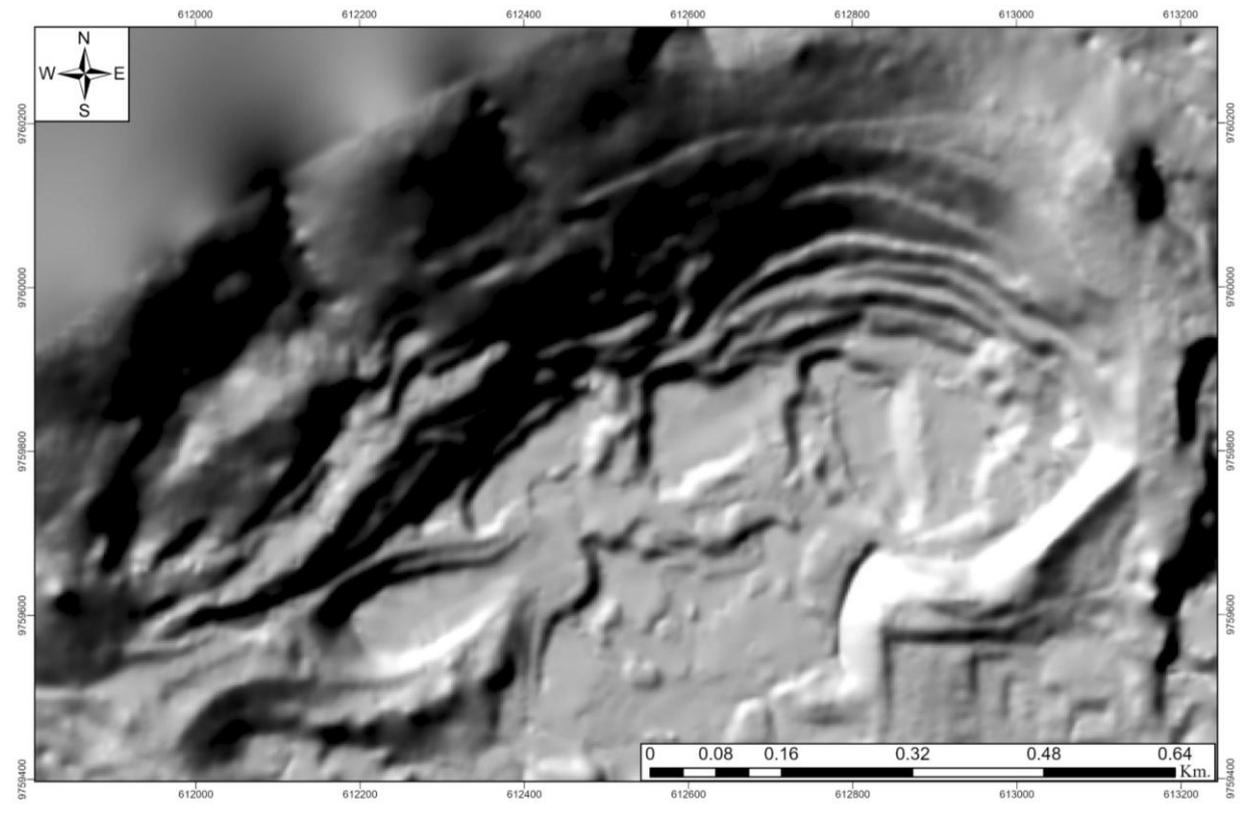
**Figura 17** Modelo Digital de terreno obtenido de LiDAR



El modelo LiDAR utilizado permitió obtener un DEM actualizado de la zona de estudio. Para fines de comparación y análisis en este estudio, la empresa que labora en la zona de estudio facilitó un DEM de diciembre 2022 con resolución de píxel de 3x3 m, correspondiente a fechas

anteriores al evento de deslizamiento (ver Figura 18). Este modelo previo resultó útil para comparar las variaciones en el terreno antes y después del deslizamiento.

**Figura 18** *Modelo Digital de Terreno de diciembre 2022*



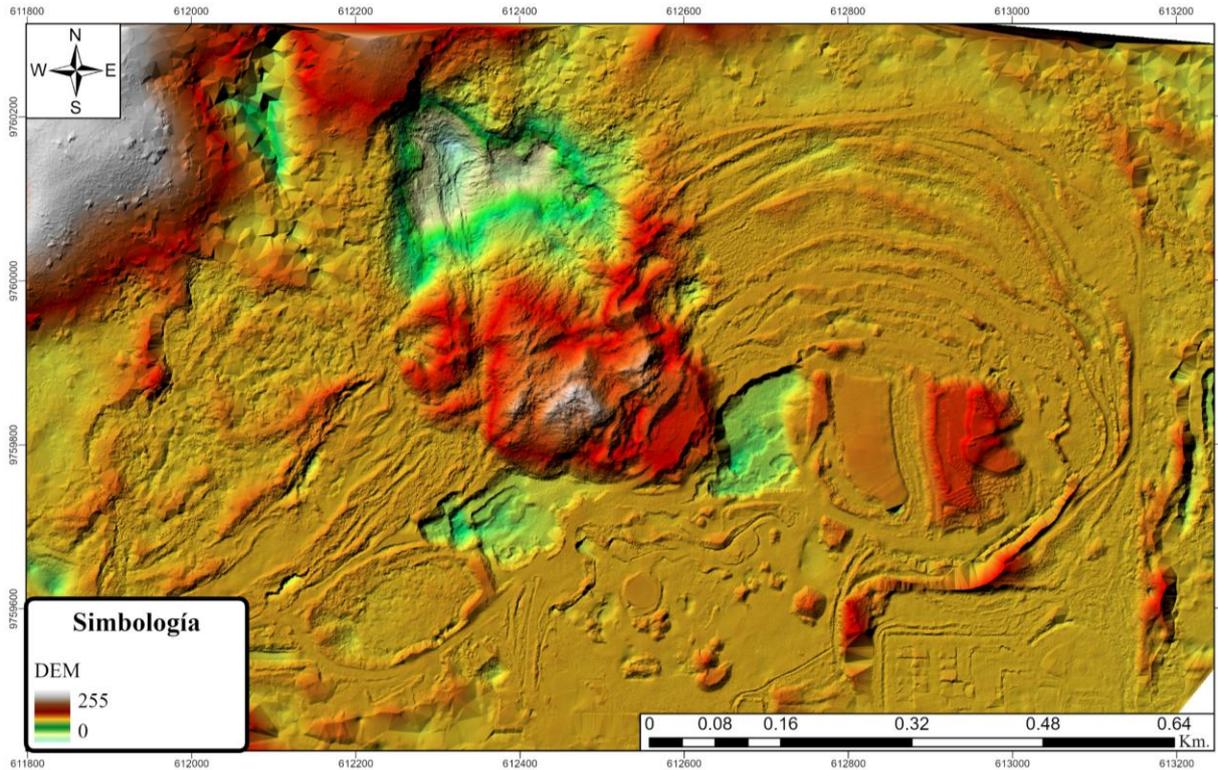
Una vez obtenidos ambos modelos, se utilizó la herramienta *Raster Calculator* para restar el modelo actualizado del modelo anterior. Este proceso permitió generar un modelo que facilitó la visualización de toda la superficie afectada por el deslizamiento, destacando las áreas donde se han producido cambios significativos en el terreno (ver Figura 19).

### 3.3.5 Análisis de vulnerabilidad

En este apartado se elaboró un mapa de vulnerabilidades físicas siguiendo la metodología propuesta por Salini et al. (2024), la cual plantea un modelo de vulnerabilidad basado en la consideración de diversos factores, entre ellos topográficos, meteorológicos, antropogénicos y geológicos (ver Figura 20). Sin embargo, debido a la información disponible y al alcance del área de estudio, el análisis se enfocó exclusivamente en factores topográficos. Para ello, se generaron

un mapa de pendientes, un mapa de curvatura y un mapa de orientaciones, todos derivados del DEM obtenido a partir del modelo LiDAR proporcionado por el vuelo de dron.

**Figura 19** Mapa de diferencias mostrando la superficie afectada por el deslizamiento



**Figura 20** Esquema de la metodología para la obtención de la vulnerabilidad física



*Nota.* Modificado de Salini et al. (2024).

Una vez elaborados los tres mapas propuestos por la metodología, se procedió a realizar una reclasificación de los valores de cada uno de ellos, siguiendo los rangos y categorías definidos por los autores Murillo-García et al.(2017), Salini et al. (2024) y Bathrellos et al. (2017) en la Tabla 6. Esta reclasificación permitió estandarizar los datos de los mapas de pendientes, curvatura

y orientaciones, con el fin de facilitar su combinación posterior y la elaboración del mapa final de vulnerabilidades físicas.

**Tabla 6** *Valores de reclasificación para la estandarización de mapas*

<b>Mapa de Pendientes</b>	<b>Mapa de Curvatura</b>	<b>Mapa de Orientaciones</b>	<b>Valores de reclasificación</b>
0° a 5°	26.3123 a 10	315° a 360°	1 – muy bajo
5° a 15°	10 a 1	0° a 45° - 270° a 315°	2 – bajo
15° a 25°	1 a -1	45° a 90° - 225° a 270°	3 – moderado
25° a 35°	-1 a -5	90° a 135° - 180° a 225°	4 – alto
>35°	-5 a -14.208	135° a 180°	5 – muy alto

Como último paso, con todos los mapas con sus respectivas reclasificaciones se realizó el mapa final de vulnerabilidad física utilizando la herramienta *Raster Calculator* y los valores de ponderación se ajustaron según la ecuación 3.1:

$$\text{Vulnerabilidad física} = (\text{Pendientes} * 0.5) + (\text{Curvatura} * 0.3) + (\text{Orientaciones} * 0.2) \quad (3.1)$$

## **Capítulo 4**

## **4.1 Resultados y discusión**

### **4.1.1 Mapas de deformación (Metodología DInSAR)**

El estudio fue estructurado en tres etapas temporales claramente definidas: pre-evento, evento y post-evento, con el propósito de realizar un análisis detallado de la evolución de la deformación del terreno en relación directa con el deslizamiento. La etapa correspondiente al periodo de pre-evento abarcó desde octubre de 2022 hasta marzo de 2023, permitiendo así identificar las condiciones iniciales del terreno antes de que ocurriera el fenómeno. En contraste, el periodo del evento (11 de abril de 2023) estuvo delimitado por un interferograma que cubrió las fechas del 31 de marzo al 12 de abril de 2023, período durante el cual se registraron las mayores tasas de deformación. Finalmente, el periodo post-evento comprendió desde abril hasta septiembre de 2023, etapa clave para evaluar la persistencia de las deformaciones y la aparición de posibles movimientos secundarios o alteraciones adicionales en el terreno tras el evento principal. Esta división temporal detallada resultó fundamental para el análisis integral del fenómeno, permitiendo una mejor comprensión de las dinámicas de deformación asociadas al deslizamiento en cada una de las fases.

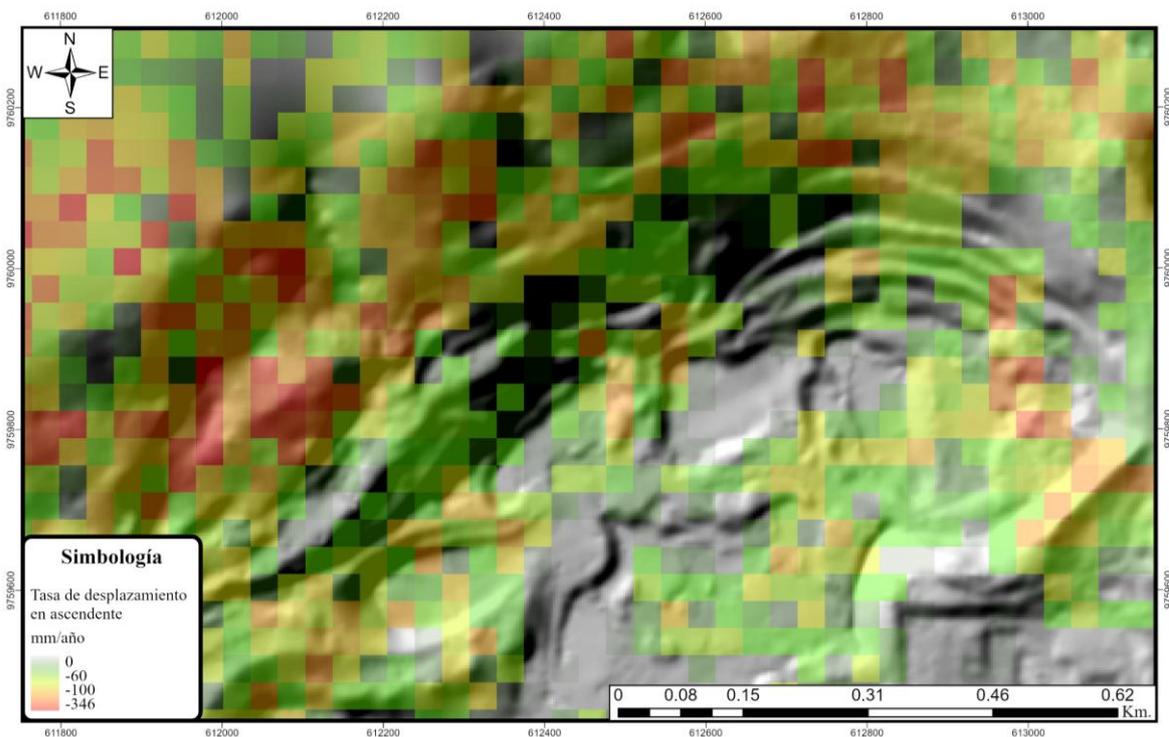
En el modo de vuelo ascendente se generaron un total de 24 interferogramas, correspondientes a las fechas del 12 de octubre de 2022 al 13 de septiembre de 2023. Sin embargo, solo 17 de ellos fueron utilizados en el estudio realizado. Siete interferogramas se omitieron en este modo de vuelo, tres fueron descartados debido a que sus líneas base perpendiculares superaban el umbral de los 200 metros, mientras que cuatro interferogramas adicionales fueron excluidos por no proporcionar información relevante en la zona de estudio.

En el modo de vuelo descendente se generaron 26 interferogramas correspondientes a las fechas comprendidas entre el 2 de octubre de 2022 y el 9 de octubre de 2023. De estos, 20 fueron seleccionados para el análisis de la zona de estudio. Dos interferogramas fueron descartados debido a la ausencia de información en la zona de estudio, mientras que dos más fueron excluidos

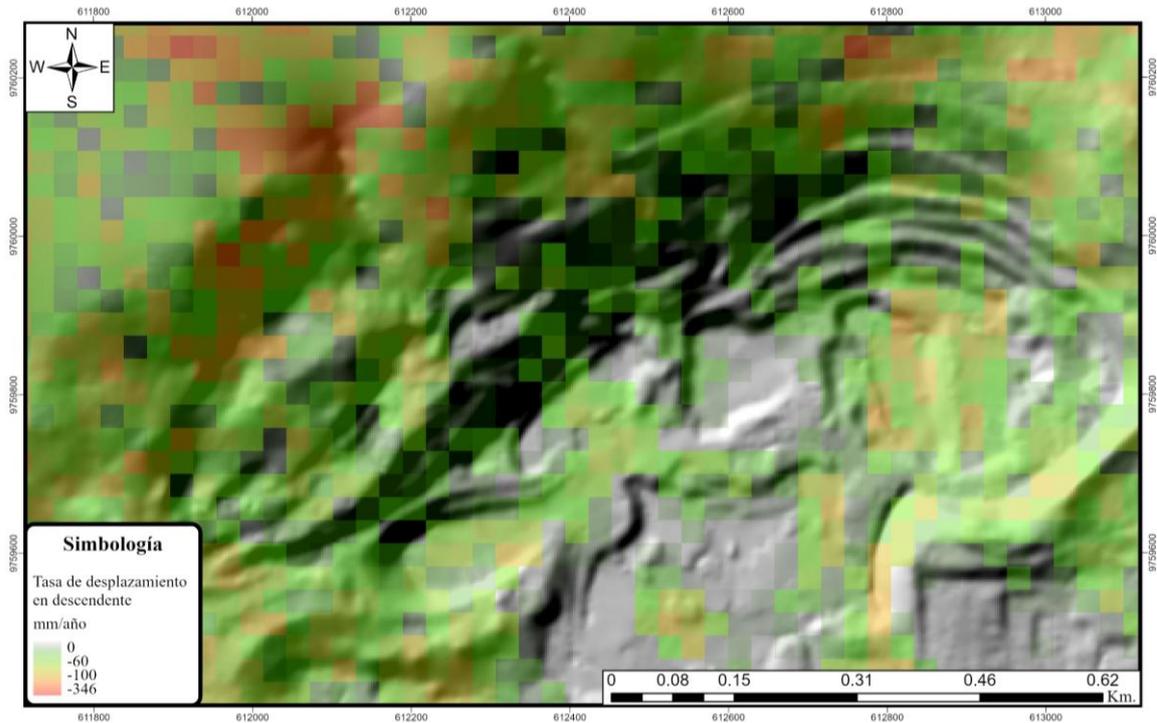
por presentar líneas base perpendiculares que superaban el umbral establecido, además; de que dos interferogramas no se pudieron realizar debido a que sus marcos no coincidían.

Para el periodo pre-evento en ambos modos de vuelo (ascendente y descendente) los resultados de la velocidad de deformación máxima en la línea de visión del satélite (siglas en inglés, LOS) fueron de -346 mm/año (ver Figura 21 y Figura 22), velocidades negativas significan que el movimiento relativo del terreno tiende al hundimiento.

**Figura 21** Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo ascendente para el pre-evento

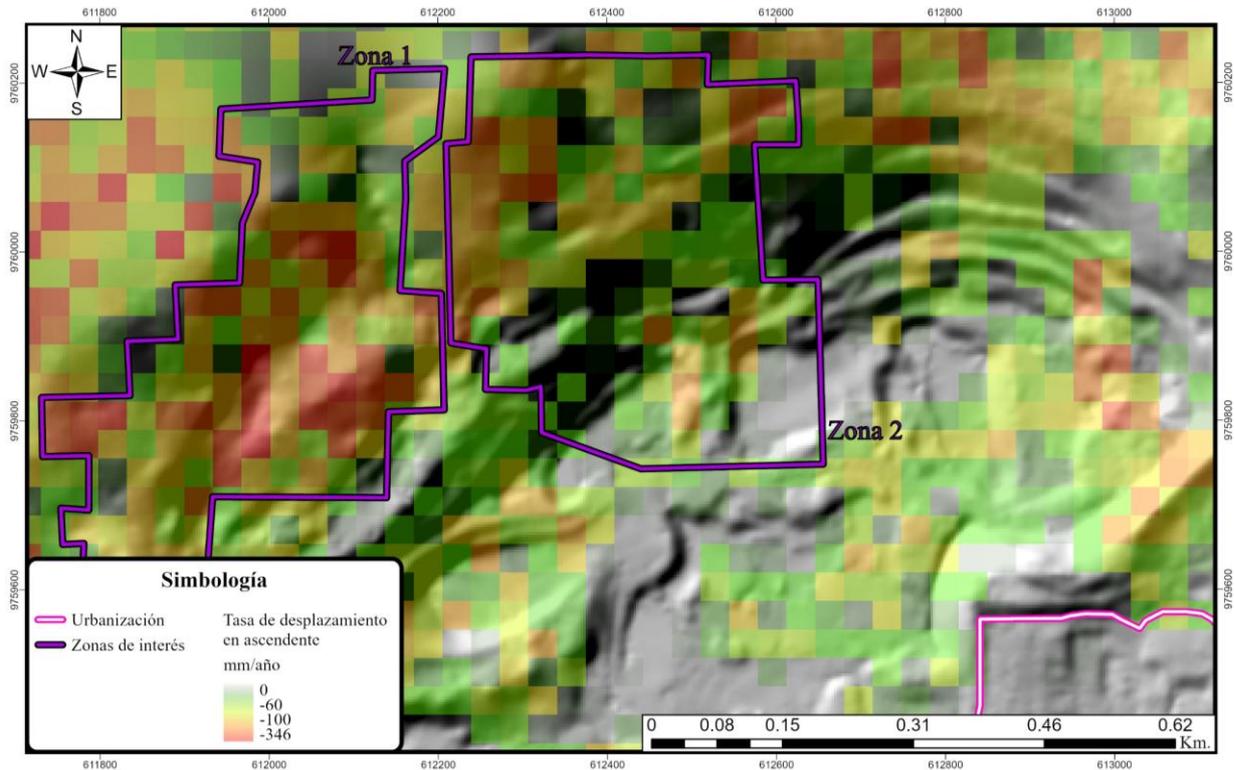


**Figura 22** Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo descendente para el pre-evento



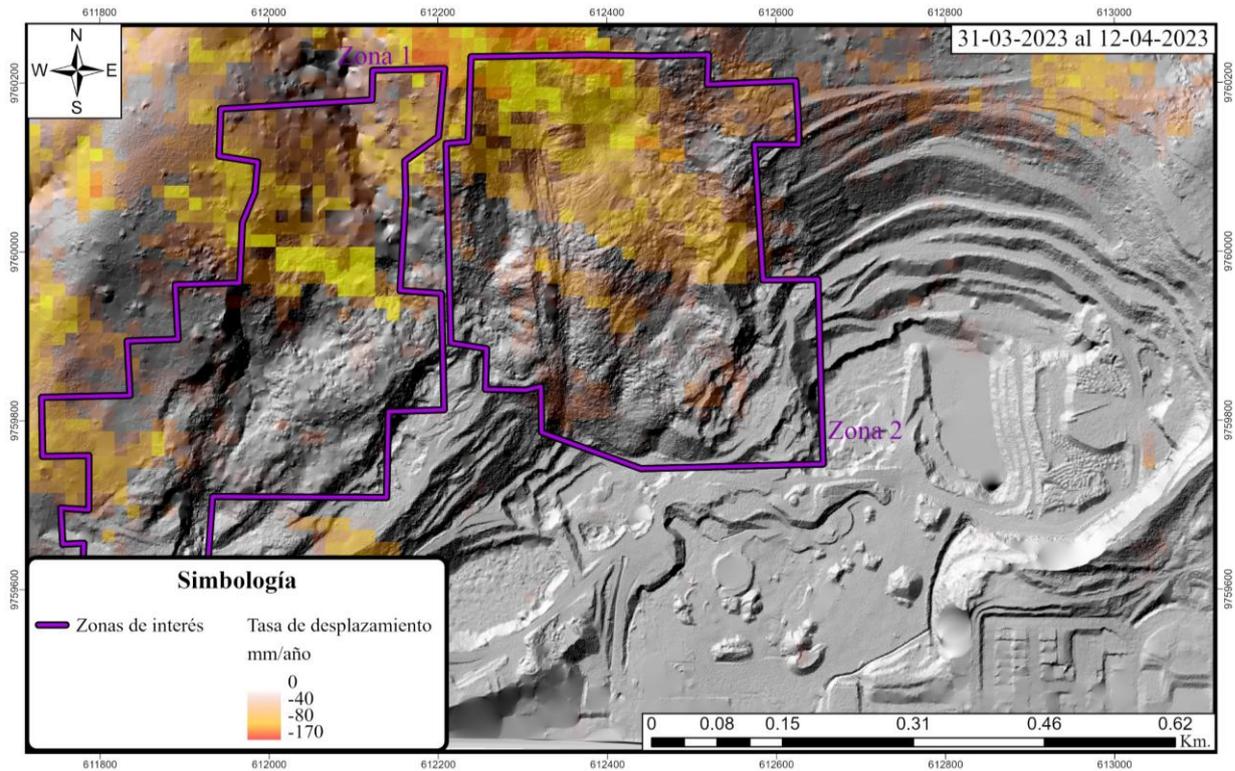
Los resultados permitieron identificar dos áreas significativamente afectadas por altas velocidades de deformación, las cuales fueron presentadas en los mapas como zonas de interés. La zona 2 se asoció de manera directa con el evento del deslizamiento (ver Figura 23). Aunque estas zonas presentaron deformaciones altas, el deslizamiento únicamente ocurrió en la zona 2. Se evidenció, además, que la zona 1 presentó una superficie de deformación mayor en comparación con la propia zona del deslizamiento.

**Figura 23** Deformación en zonas de interés en el modo de vuelo ascendente



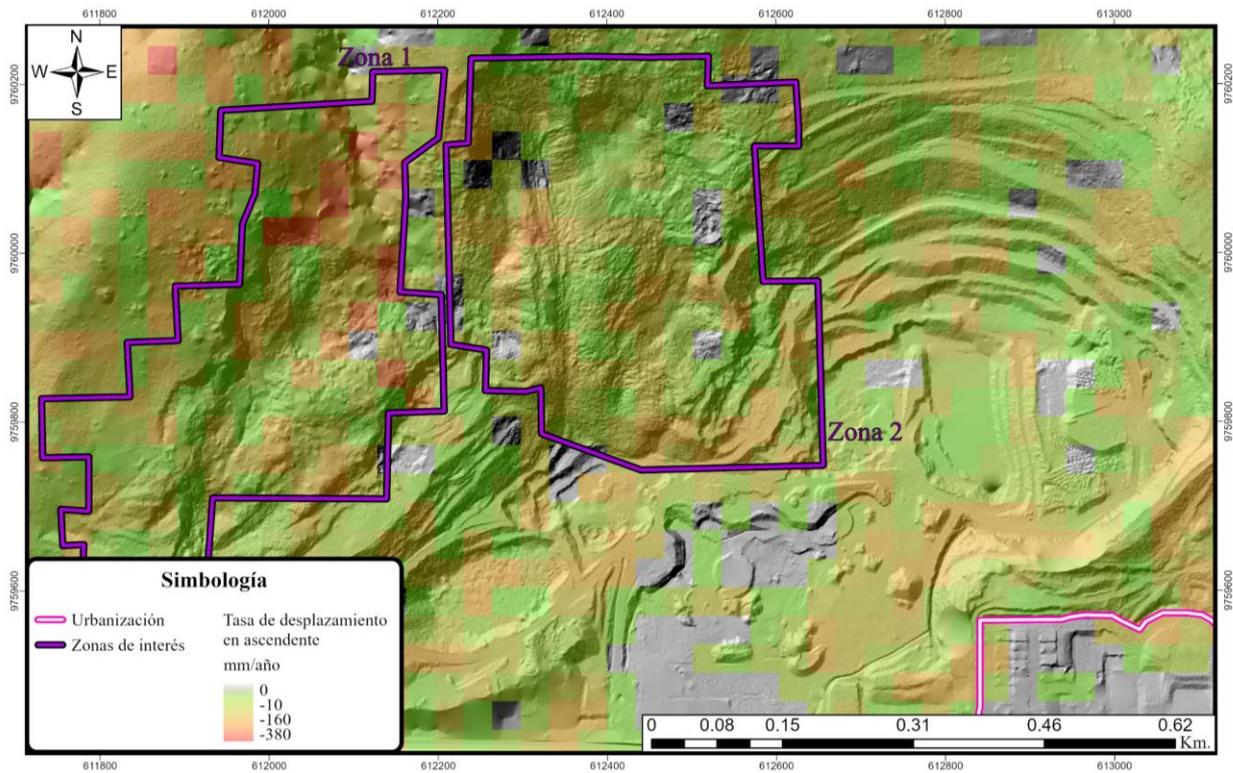
Durante el periodo del evento, correspondiente a las fechas del 31 de marzo al 12 de abril de 2023, se evidenciaron altas tasas de deformación (deformación máxima de -170 mm/año) tanto en la corona del deslizamiento como en la parte superior de la misma. El interferograma permitió visualizar las zonas afectadas y las velocidades de deformación de la superficie que contribuyeron al deslizamiento. Si bien no se registraron deslizamientos significativos, se destacó que, en el sector ubicado al noroeste del deslizamiento, correspondiente a la zona 1, también se presentaron deformaciones en su superficie (entre 80 a 120 mm/año) (ver Figura 24).

**Figura 24** Interferograma que evidencia la deformación en la LOS en días previos al evento

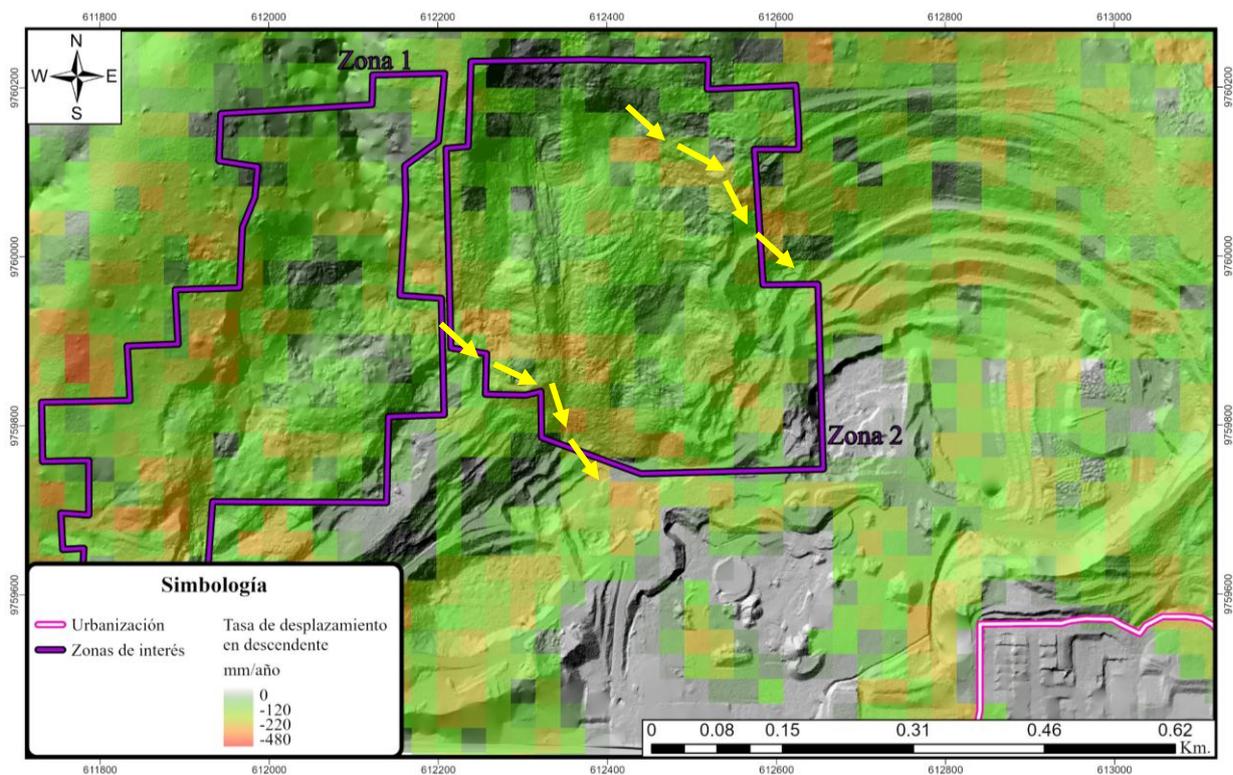


Finalmente, en el análisis del periodo post-evento, se observó que las tasas de deformación persistieron en ambas zonas, alcanzando velocidades máximas de  $-380$  mm/año. Estas tasas fueron claramente visibles en el modo de vuelo ascendente (ver Figura 25). Por otro lado, para el modo de vuelo descendente, en la zona del deslizamiento se identificó que las áreas con mayores tasas de deformación se localizaron en los flancos del deslizamiento, en dirección hacia el sureste, siguiendo los niveles más bajos de la topografía del terreno (dirección de las flechas amarillas) (ver Figura 26).

**Figura 25** Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo ascendente para el post-evento



**Figura 26** Desplazamientos en LOS en el modo de vuelo descendente para el post-evento

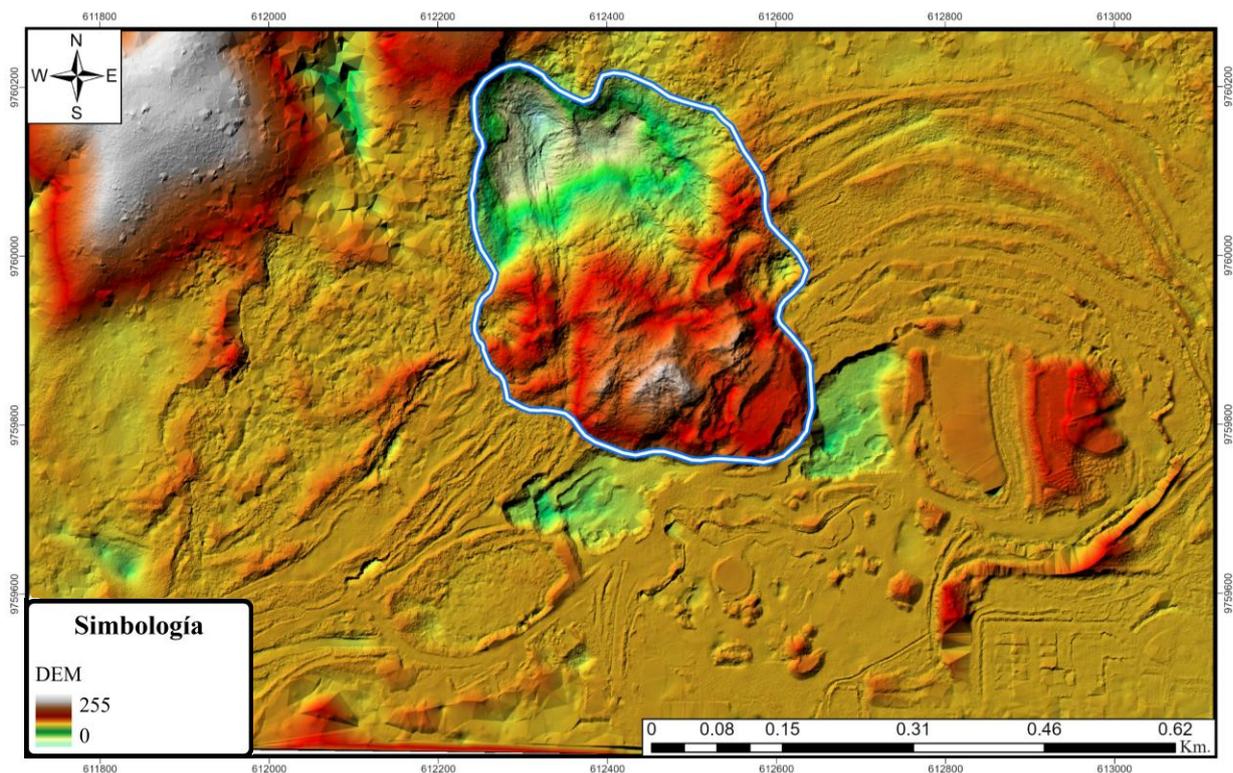


*Nota.* Flechas amarillas indican la dirección de movimiento de los flancos del deslizamiento.

#### 4.1.2 Validación con resultados LiDAR

La dinámica del movimiento de masas llevado a cabo utilizando los DEM correspondientes a las fechas previas y posteriores al evento de deslizamiento, permitió identificar con precisión la zona específica donde ocurrió el evento (ver Figura 27), proporcionando detalles claros sobre las variaciones en la topografía del terreno. Asimismo, se observó que, en la parte superior o corona del deslizamiento, se produjo un hundimiento o subsidencia del terreno, mientras que en la parte inferior se evidenció levantamiento, comportamiento que pudo haber sido causado por la acumulación del material desplazado desde las zonas más altas hacia las partes más bajas del mismo.

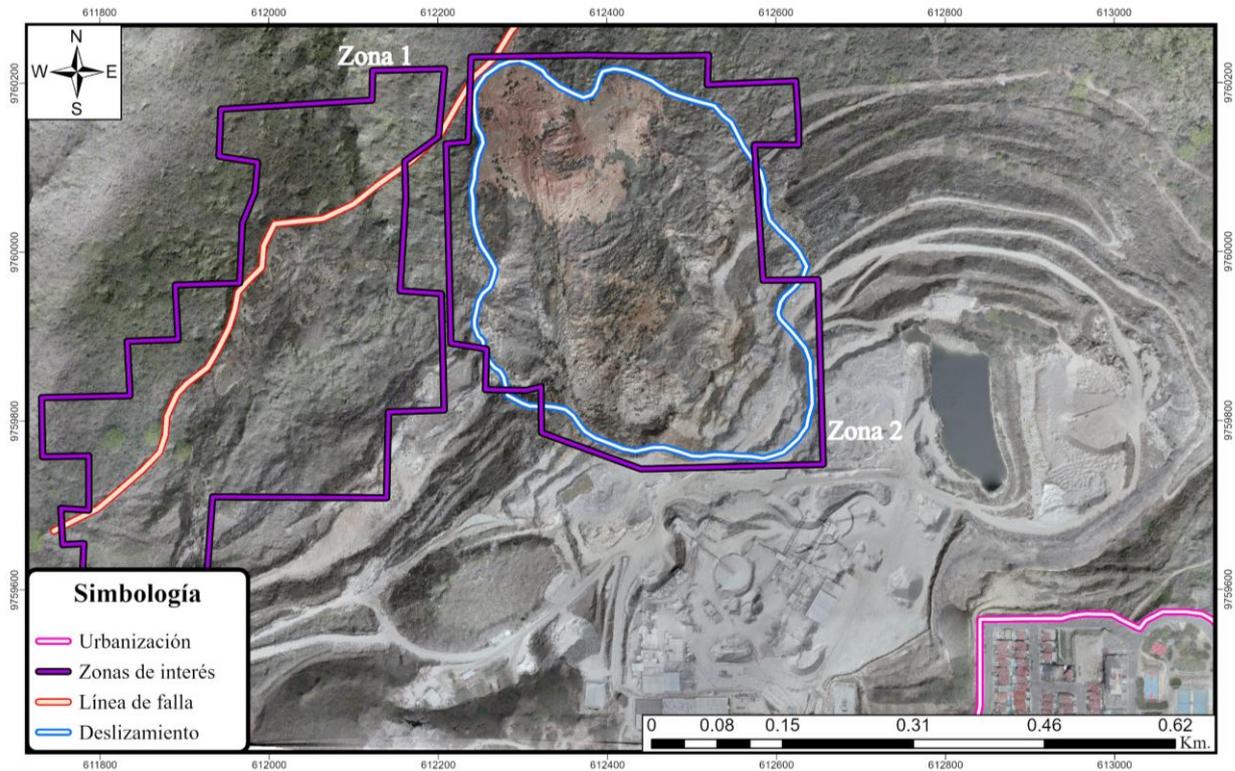
**Figura 27** Dinámica del movimiento de masas por el evento de deslizamiento



Los resultados de fotogrametría permitieron identificar con claridad la superficie del deslizamiento, lo que claramente se puede corroborar que pertenece a la zona 2 anteriormente definida, además; facilitó la identificación de un lineamiento de una posible falla en dirección NE-

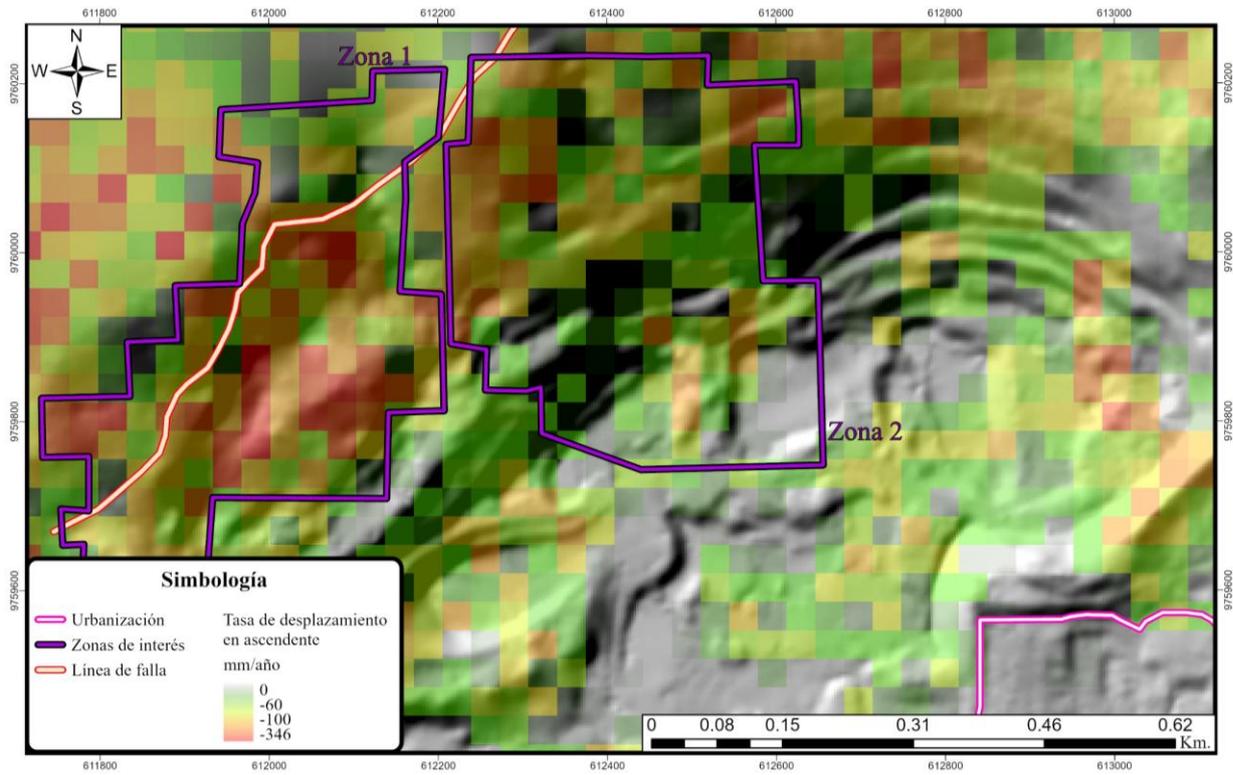
SW u otra estructura que está afectando significativamente a la zona de estudio. Este lineamiento corta y traspasa a la zona 1 y afecta en gran medida a la corona del deslizamiento (ver Figura 28).

**Figura 28 Resultados LiDAR**

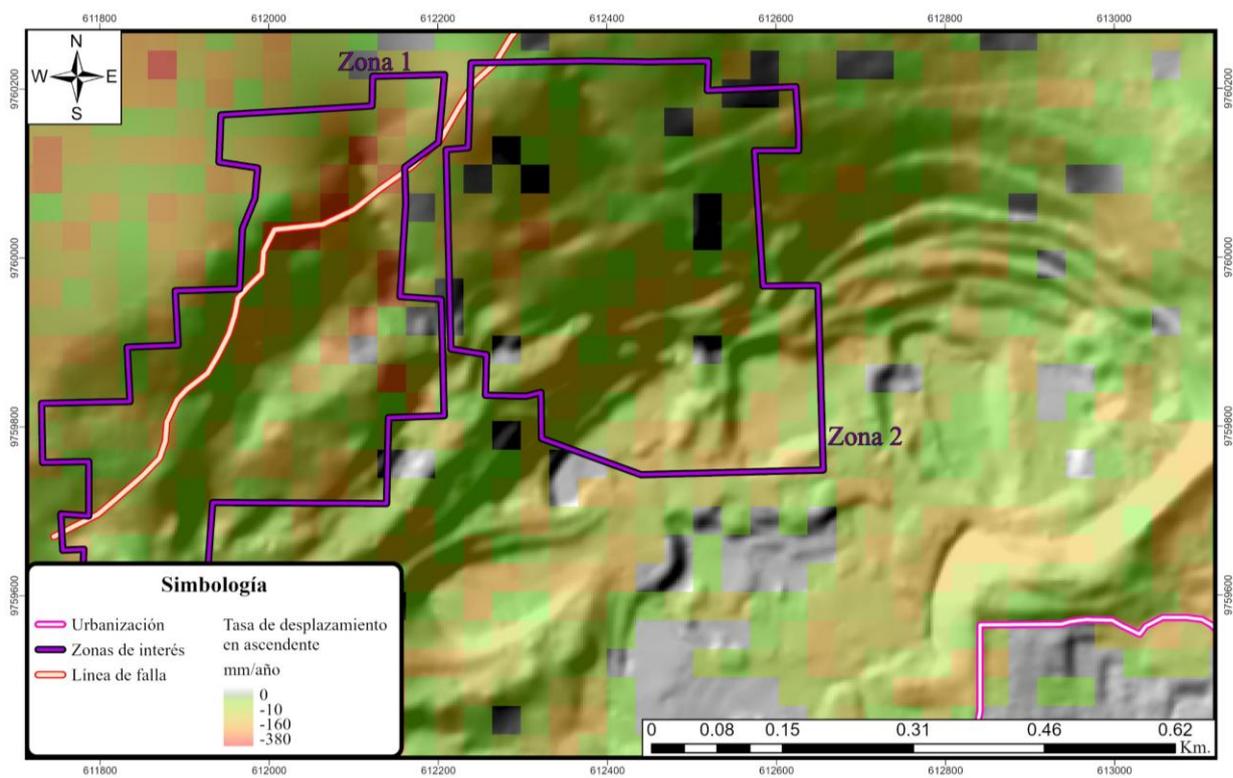


La posible causa del deslizamiento, así como la tendencia del terreno a deformarse, se atribuyó a la probable presencia de una línea de falla en combinación con las pendientes pronunciadas de la zona 2 (entre  $65^\circ$  y  $80^\circ$ ). Esta hipótesis coincide con los resultados obtenidos mediante interferometría en modo de vuelo ascendente durante el periodo pre-evento, donde se pudo observar una clara correspondencia lineal entre la línea de falla y las zonas con altas tasas de deformación (ver Figura 29). Por otro lado, en los resultados del periodo post-evento, se evidenció que la deformación persistió en la parte superior de la zona 1, especialmente en áreas cercanas a la corona del deslizamiento. Este comportamiento no solo continúa afectando la zona del deslizamiento, sino que también impacta de manera considerable la zona 2, lo que indica una posible propagación del fenómeno de deformación hacia sectores adyacentes (ver Figura 30).

**Figura 29** Resultados en modo de vuelo ascendente pre-evento



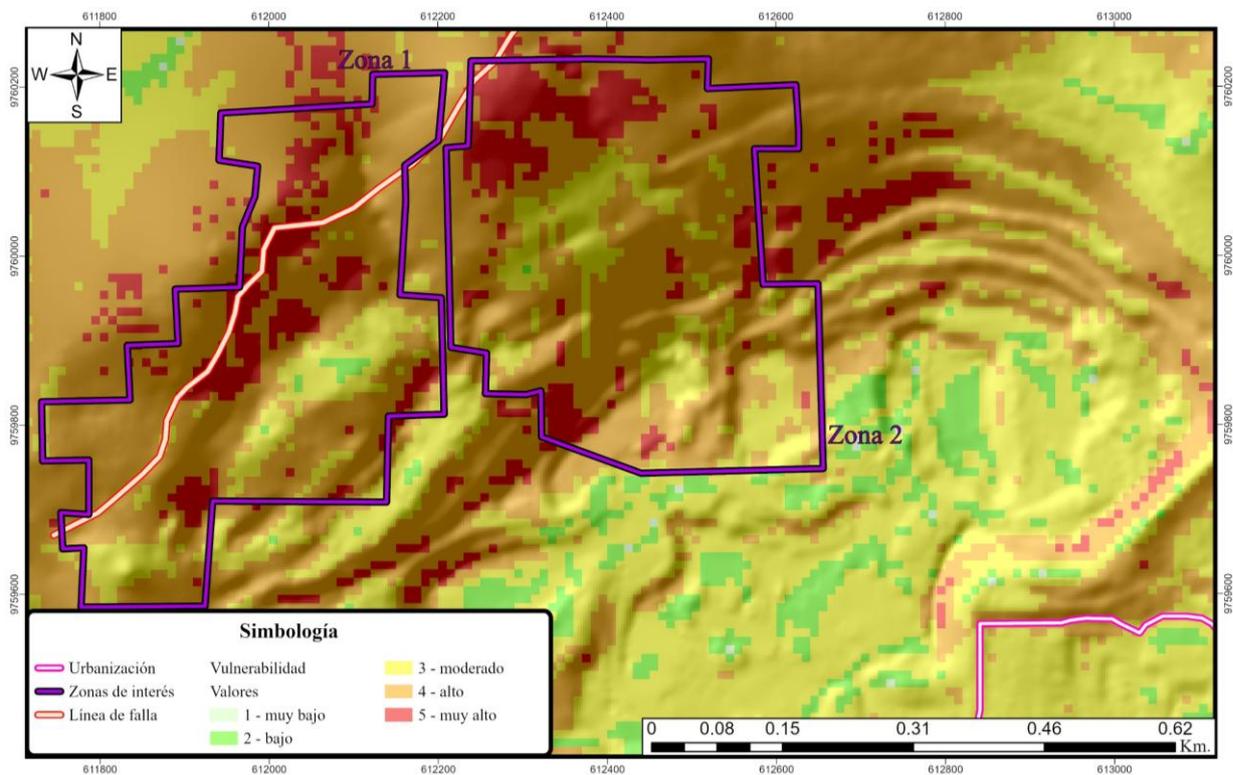
**Figura 30** Resultados en modo de vuelo ascendente post-evento



### 4.1.3 Mapa de vulnerabilidad

El análisis realizado permitió identificar las áreas con mayor vulnerabilidad a deslizamientos dentro de la zona de estudio, evidenciando que las zonas de interés se clasificaron con rangos de vulnerabilidad de alto a muy alto (ver Tabla 6) (ver Figura 31). Además, los resultados mostraron una correspondencia notable entre las áreas más vulnerables y la probable línea de falla, incluso; la corona del deslizamiento también presentó alta susceptibilidad a deformación.

**Figura 31** Mapa de vulnerabilidad física



## **Capítulo 5**

## 5.1 Conclusiones

La superficie total del área de estudio abarca 140 hectáreas. De estas, aproximadamente 8.1 hectáreas, equivalentes al 5.7 % del total, fueron afectadas por deformaciones del terreno durante el período previo al evento. Posteriormente, tras el deslizamiento, alrededor de 6.3 hectáreas (lo que representa un 4.5 % del total) continúan siendo afectadas por movimientos de terreno. Este análisis pone en evidencia la persistencia de la inestabilidad en ciertas zonas, incluso después del evento principal. Estas áreas representan un estimado calculado en proyección plana.

Los análisis realizados a partir de los resultados DInSAR permitieron identificar que, durante el periodo previo al evento de deslizamiento (ver Figura 29), se presentó un mayor número de áreas afectadas por altas tasas de deformación, rondando velocidades máximas de hasta 346 mm/año. Si bien se podría anticipar una tendencia hacia la estabilización del terreno tras el deslizamiento, los resultados post-evento (ver Figura 30) demuestran que los movimientos continúan, con una especial concentración en los sectores aledaños a la probable línea de falla.

La metodología DInSAR permitió identificar dos zonas con elevadas tasas de deformación, clasificadas como zonas de interés (representando un 24% del área total). Al combinar estos resultados con los obtenidos mediante LiDAR, se logró no solo establecer una correlación directa entre ambos, sino también delimitar un lineamiento asociado a una posible falla que impacta significativamente la zona de estudio (ver Figura 29 y Figura 30). Esta misma correlación se reflejó en los análisis de vulnerabilidad física de la zona de estudio (ver Figura 31). Adicionalmente, LiDAR facilitó la delimitación precisa de la región afectada por el deslizamiento, a través de la dinámica del movimiento de masas (ver Figura 27).

Aunque la zona 2 está fuertemente influenciada por el posible lineamiento identificado, únicamente la zona 1, correspondiente al deslizamiento, presentó afectaciones por movimientos de terreno. Esto se debe a que la topografía en dicha área muestra pendientes más pronunciadas (entre 50° y 75°) en comparación con la zona 2, lo que la hace más susceptible a deslizamientos.

En el periodo post-evento se evidencia que aún existen altas tasas de deformación tanto en zonas aledañas a la corona del deslizamiento como en zonas cercanas a la línea de falla, incluso; se evidenció movimiento en los flancos del deslizamiento siguiendo la dirección a bajas pendientes en sentido SE, lo que indica que el terreno se sigue deformando en la zona del deslizamiento, las zonas en donde se realizan desembanques en la zona de estudio, también evidencian deformación, esto debido a que la técnica de interferometría también detecta cambios en zonas donde se está extrayendo material pétreo (ver Figura 26).

## **5.2 Recomendaciones**

La implementación de un sistema de monitoreo permanente en la vía a la Costa, basado en técnicas DInSAR, permitiría la detección continua de deformaciones del terreno en sectores aledaños, donde la actividad comercial se centra en la minería a cielo abierto. Este sistema contribuiría significativamente a la generación de alertas tempranas, brindando información oportuna a las autoridades locales y a las comunidades cercanas a las zonas de explotación, lo que favorecería la toma de decisiones preventivas y la reducción de riesgos asociados a posibles deslizamientos o deformaciones críticas del terreno.

Complementar los análisis de D-InSAR con estudios geotécnicos y geofísicos locales; permitiría una evaluación integral de la estabilidad del terreno, considerando tanto los datos de monitoreo satelital como las condiciones mecánicas y físicas del suelo en campo, haciendo énfasis en la zona de interés 2, que si bien es cierto no ha presentado movimientos significativos evidentes en comparación con la zona 1, los resultados D-InSAR indican deformaciones considerables, que llaman a complementar este tipo de estudios para evitar desastres futuros.

Se sugiere implementar mejoras en los diseños de taludes en la zona afectada por el deslizamiento, con el objetivo de prevenir deslizamientos futuros. Esta recomendación se fundamenta en el hecho de que, en las zonas bajas, aún se desarrollan actividades de explotación de la cantera, lo que incrementa el riesgo de nuevos eventos. Los resultados muestran que los

flancos del deslizamiento continúan presentando movimientos relativos de magnitud considerable, lo que subraya la importancia de adoptar medidas de estabilización y reforzamiento de taludes para minimizar el riesgo de fallas en el terreno.

## Referencias

- Alemán, A. M., Palencia, A. A., Lezama, E. E., & Montenegro, G. (2021). The Chongón/Colonche oroclinal transrotational bending and the coeval opening of the Progreso basin in southwestern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103480>
- Añazco Toro, L. A. (2017). *Caracterización Geomecánica y Diseño de Taludes en la Cantera “Calizas Huayco”* [Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41146>
- Andrade, F. J. (2023). Guayaquil: el Cabildo se pronunció sobre el desprendimiento de Cerro Blanco. *Diario Expreso*. <https://www.expreso.ec/guayaquil/cabildo-pronuncio-desprendimiento-cerro-paraiso-156978.html>
- Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., Chousianitis, K., Youssef, A. M., & Pradhan, B. (2017). Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. *Science of the Total Environment*, 575, 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.025>
- Botin, J. . (2009). *Sustainable Management of Mining*.
- Braun, A., & Veci, L. (2021). Sentinel-1 Toolbox Interferometry Tutorial. *Esa, March*, 1–20.
- Brideau, M.-A., & Roberts, N. J. (2022). *Landslide Hazards, Risks, and Disasters*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818464-6.00002-0>
- Bustamante, D. (2018). Perspectiva para zonificación del riesgo por deslizamientos para el cantón Riobamba. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 20–28.
- Cajas, C., Novillo, J., Peña, M., & Vizuete, J. C. (2013). *Plan Piloto de Restauración del Bosque Seco Tropical Alterado por la Minería en el Bosque Protector Cerro Blanco* ,. June 2011, 30.
- Calderón-Larrañaga, Y., García-Ubaque, C. A., & Pineda-Jaimes, J. A. (2021). A data mining approach to the relationships between landslides and open-pit mining activity: A case study in soacha (cundinamarca). *DYNA (Colombia)*, 88(217), 111–119. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.89558>
- Canuti, P., Casagli, N., Ermini, L., Fanti, R., & Farina, P. (2004). Landslide activity as a geoinicator in Italy: Significance and new perspectives from remote sensing. *Environmental Geology*, 45(7), 907–919. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0952-5>
- Coronel, J., Rosales, R., & Garzón, W. (2016). *Conflictos de Uso de Suelo Urbanizado en el Sector de Vía a la Costa, Guayaquil*.

- Cruden, D. ., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes, Special Report , Transportation Research Board, National Academy of Sciences. *Landslide Investigation and Mitigation, December*, 36–75. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf>
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264163199>
- Davidson, M., Askne, M., & Ulander, L. M. H. (2012). Sentinel-1: ESA’s radar observatory mission for GMES operational services. In *ESA Special Publication* (Vol. 1, Issue 1322).
- Duque, P. (2000). *Breve léxico estratigráfico del Ecuador*. Sistema de Información Geológica y Minera. <https://books.google.com.ec/books?id=wpZRAQAAMAAJ>
- Egüez, A., Alvarado, A., & Yepes, H. (2003). Mapa de fallas y pliegues cuaternarias de Ecuador y regiones oceánicas adyacentes. *US Geological Survey–Escuela Politécnica Nacional, Programa Internacional de La Litosfera, Grupo de Trabajo II-2. OFR*, 3–289.
- Filipponi, F. (2019). *Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow*. 11. <https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201>
- Florenzano, T. G. (2013). *Iniciación em Sensoriamento Remoto*. Oficina de Textos. <https://books.google.com.ec/books?id=18GkH5X81XcC>
- Gómez Palacios, D. (2019). *Aplicación de la interferometría SAR satelital para la detección y monitoreo de los deslizamientos en la carretera escénica Tijuana-Ensenada, BC*. 104.
- Gonzales, K., Froger, J.-L., Audin, L., & Macedo, O. (2009). Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoahuaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar – Insar. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 103, 109–124.
- Graw, V., Dedring, T., Hiby, R., Jara-Alvear, J., Guzman, P., & Juergens, C. (2022). Regressive Erosion at River Coca in Northeast Ecuador: Landslide Monitoring with Sentinel-1 to Support Disaster Risk Management. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 90(5), 457–471. <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00221-z>
- Greiving, S., Schödl, L., Gaudry, K. H., Miralles, I. K. Q., Larraín, B. P., Fleischhauer, M., Guerra, M. M. J., & Tobar, J. (2021). Multi-risk assessment and management—a comparative study of the current state of affairs in chile and ecuador. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13031366>
- Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry Data interpretation and error analysis. In *Novel Radar Techniques and Applications*. [https://doi.org/10.1049/SBRA512F\\_ch6](https://doi.org/10.1049/SBRA512F_ch6)
- Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). *Principles and aplications of Imaging Radar*.

- Hernández, M. (2021). Programa de obras viales en zonas densamente pobladas de la ciudad de Guayaquil. In *Alcaldía Guayaquil*. [https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/UPFE-CAF/UPFE\\_2022/LICO-MIMG-067-2022/EvaluacionSocioeconomicaCAF\\_XV-signed.pdf](https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/UPFE-CAF/UPFE_2022/LICO-MIMG-067-2022/EvaluacionSocioeconomicaCAF_XV-signed.pdf)
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, *11*(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Javier, B., & Cecilia, P. (2006). *Sistema de Gestión Ambiental de una Industria Procesadora de Calizas*, Basado en la Norma ISO 14001. *19*(0257–1749), 65–72. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/211/154>
- Li, N., Ho, C. P., Xue, J., Lim, L. W., Chen, G., Fu, Y. H., & Lee, L. Y. T. (2022). *Laser Photonics Reviews - 2022 - Li - A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors.pdf* (p. 24).
- Li, S., Xu, W., & Li, Z. (2022). Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, *13*(2), 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>
- López Juan. (2022). *Aplicación de técnicas de interferometría radar satélite al análisis de estabilidad de taludes en zonas mineras*. 1–256.
- Maki Mateso, J. C., Bielders, C. L., Monsieurs, E., Depicker, A., Smets, B., Tambala, T., Bagalwa Mateso, L., & Dewitte, O. (2023). Characteristics and causes of natural and human-induced landslides in a tropical mountainous region: the rift flank west of Lake Kivu (Democratic Republic of the Congo). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *23*(2), 643–666. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-643-2023>
- Manconi, A., Jones, N., Loew, S., Strozzi, T., Caduff, R., & Wegmueller, U. (2024). Monitoring surface deformation with spaceborne radar interferometry in landslide complexes: insights from the Brienz/Brinzauls slope instability, Swiss Alps. *Landslides*, *21*(10), 2519–2533. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02291-z>
- Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural: Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. *Geoacta*, *39*(1), 62–89. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-77442014000100007&lang=pt](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442014000100007&lang=pt)
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., & Adragna, F. (1994). Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, *369*(6477), 227–230. <https://doi.org/10.1038/369227a0>

- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433), 138–142. <https://doi.org/10.1038/364138a0>
- Medina, X., & Vásquez, J. (2018). *Evaluación de la Operación de Transporte Minero Usando Simulación por Eventos Discretos en la Cantera Calizas Huayco S.A. Ubicada en el Cantón Guayaquil, Provincia del Guayas - Ecuador* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/48814/1/D-CD70395.pdf>
- Murillo-García, F. G., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., & Alcántara-Ayala, I. (2017). Hazard and population vulnerability analysis: a step towards landslide risk assessment. *Journal of Mountain Science*, 14(7), 1241–1261. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4179-9>
- Nogales Mieles, M. J. (2020). *Optimización Del Sistema De Transporte Minero Por Medio De Un Modelo Matemático En Una Cantera Ubicada En El Cantón Guayaquil, Provincia Del Guayas*. [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/50499/1/T-70431 NOGALES.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/50499/1/T-70431%20NOGALES.pdf)
- Núñez del Arco, E. (2003). Geología del Ecuador. *Facultad de Ingeniería En Ciencias de La Tierra de La Escuela Superior Politécnica Del Litoral*, 275. <https://toaz.info/doc-view>
- Osorio, K. O. (2022). *Análisis económico y ambiental de equipos de transporte minero en la cantera Calizas Huayco, LOGIMIN S.A* [Esuela Superior Politécnica del Litoral]. [https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/33cb92cc-ee87-4d6f-a627-d2f101be276b/T-70588 OSORIO - QUINTO.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/33cb92cc-ee87-4d6f-a627-d2f101be276b/T-70588%20OSORIO%20-%20QUINTO.pdf)
- Pérez Rodríguez, A. G. (2010). *Análisis Comparativo de la Reducción de Vibraciones en la Cantera de Cerro Blanco, durante Voladuras; Utilizando Carga Tradicional de Explosivo y el Uso de Taponex*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Peuzin, A., Saillard, M., Espurt, N., Michaud, F., Bulois, C., Praeg, D., Régnier, M., & Calderon, Y. (2023). Gravity-driven large-scale deformation system in the Tumbes-Guayaquil forearc basin, Northern Andes (Northern Peru-Southern Ecuador). *Journal of Structural Geology*, 173(June). <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.104909>
- Reyna, A., Moreira, D., Bonilla, A., Pisco, J., & Macías, C. (2020). Asentamientos humanos en zonas susceptibles a riesgos por inundación y deslizamiento de la ciudadde Portoviejo. *Revista San Gregorio*, 43, 109–123.
- Rosen, P. A. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–380. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- Salas, J. (2008). Murciélagos del Bosque Protector Cerro Blanco (Guayas-Ecuador). *Chiroptera*

*Neotropical*, 14(2), 397–402.

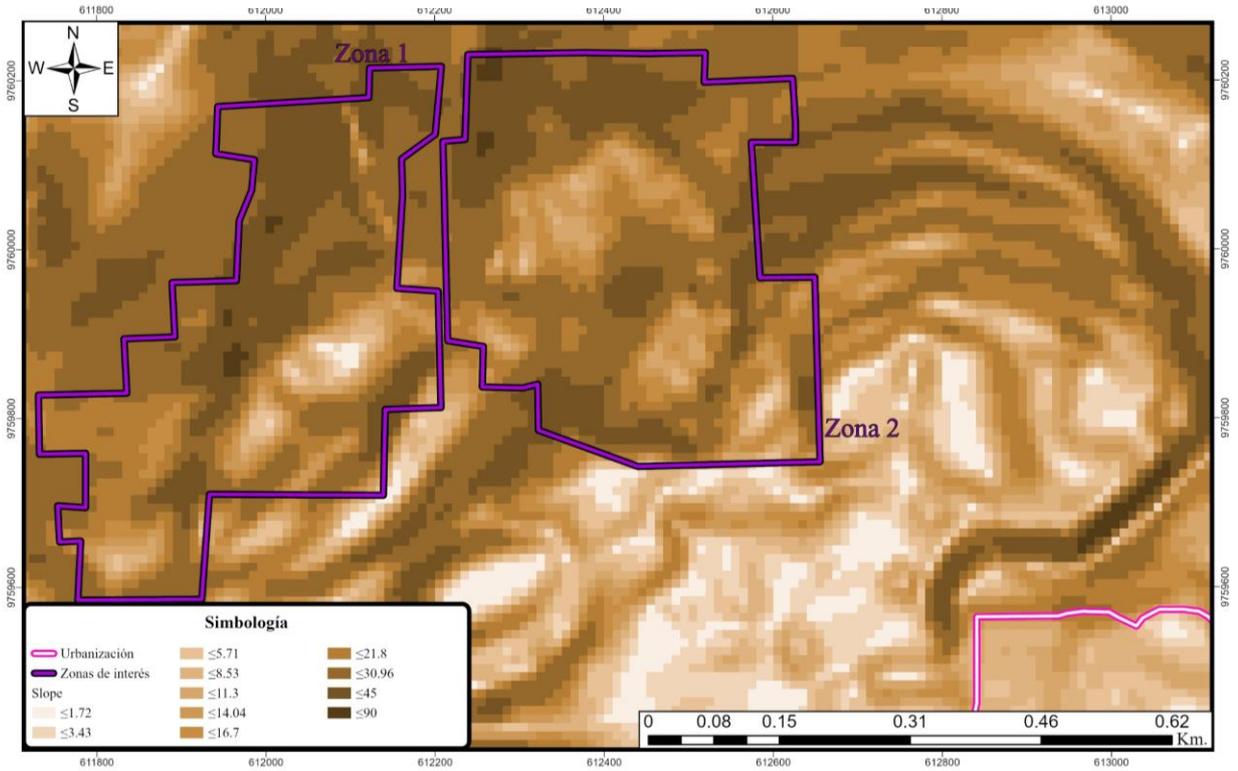
- Salini, P. N., & Rahul, P. (2024). Risk and vulnerability analysis of road network in landslide prone areas in Munnar region, India. *Transportation Engineering*, 18(September), 100275. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100275>
- Samsonov, S. V., & d'Oreye, N. (2017). Multidimensional Small Baseline Subset (MSBAS) for Two-Dimensional Deformation Analysis: Case Study Mexico City. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43(4), 318–329. <https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1344926>
- Stoker, J. M., Brock, J. C., Soulard, C. E., Ries, K. G., Sugarbaker, L. J., Newton, W. E., Haggerty, P. K., Lee, K. E., & Young, J. A. (2016). USGS lidar science strategy—Mapping the technology to the science. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr20151209>
- Stolton, S., Dudley, N., & Randall, J. (2008). Natural security protected areas and hazard mitigation. In *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 6, Issue 4). [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2008\)6\[172:D\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2008)6[172:D]2.0.CO;2)
- Tamay, J. V. (2018). *Estructura de cuencas intramontañosas del sur de Ecuador en relación con la tectónica de la Cordillera de los Andes a partir de datos geofísicos y geológicos*. <http://hdl.handle.net/10481/51634>
- Tejada, F. A. (2020). *Análisis de la influencia de factores geotécnicos de suelos en la susceptibilidad a deslizamientos*.
- Torres Chung, C. R. (2007). Valoración Del Riesgo En Deslizamientos. *Universidad Ricardo Palma*, 413. <http://cybertesis.urp.edu.pe/handle/urp/52>
- Tzouvaras, M., Danezis, C., & Hadjimitsis, D. G. (2020). Small scale landslide detection using Sentinel-1 interferometric SAR coherence. *Remote Sensing*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/rs12101560>
- Urgilez Vinueza, A. (2024). Analysis of the slow-moving landslides in the Mazar Region in southeast Ecuador. In *TU Delft University of technology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4233/uuid:04e4fe71-d257-4cac-aaa6-56390b3d80f9>
- Usai, S. (2001). A New approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry. In *Delft Univ. Press*.
- Vázquez Roura, A. V. (2013). *Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo*. 129.
- Wiley, C. (1954). Pulsed Doppler Radar Method and Means. *US Patent*.
- Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordoñez, M., Jiménez, N., & Sosson, M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean

block tectonic escape. *Tectonics*, 25(3). <https://doi.org/10.1029/2004TC001723>

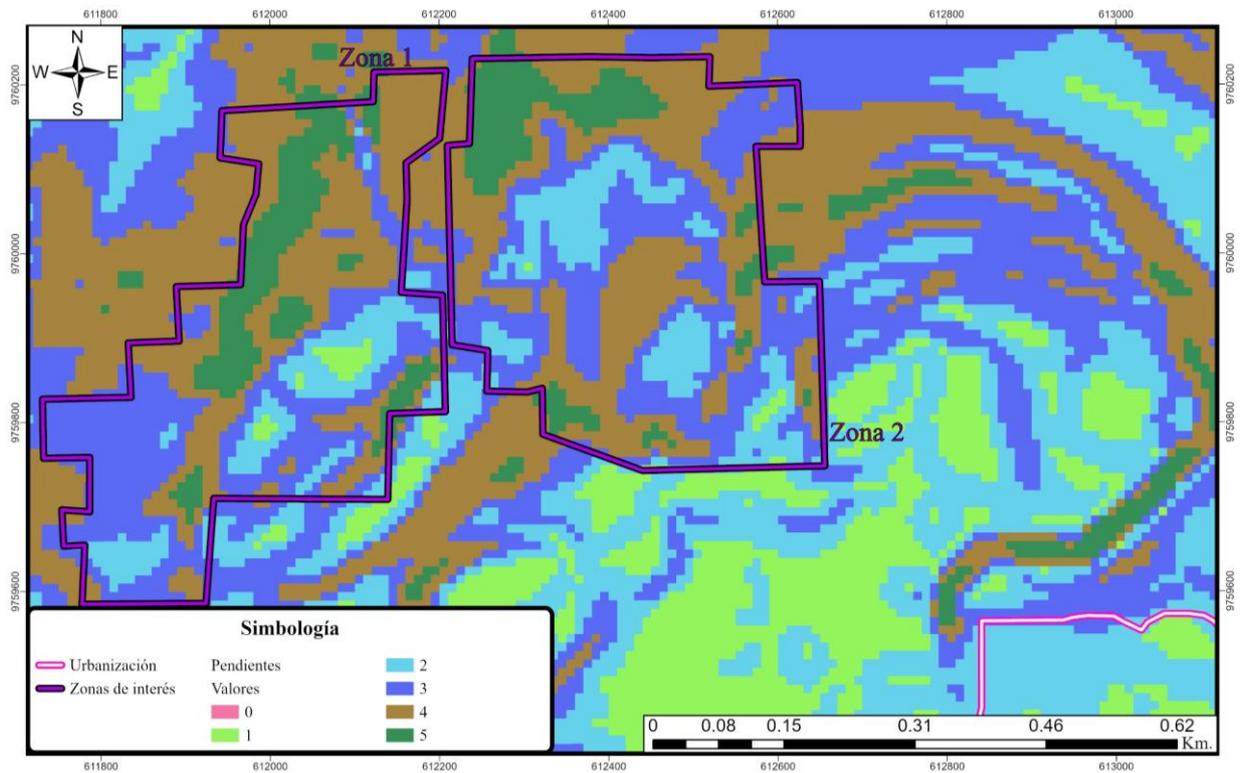
Zebker, H. A., & Weber Hoen, E. (2000). Penetration depths inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland ice sheet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6), 2571–2583. <https://doi.org/10.1109/36.885204>

# Apéndice

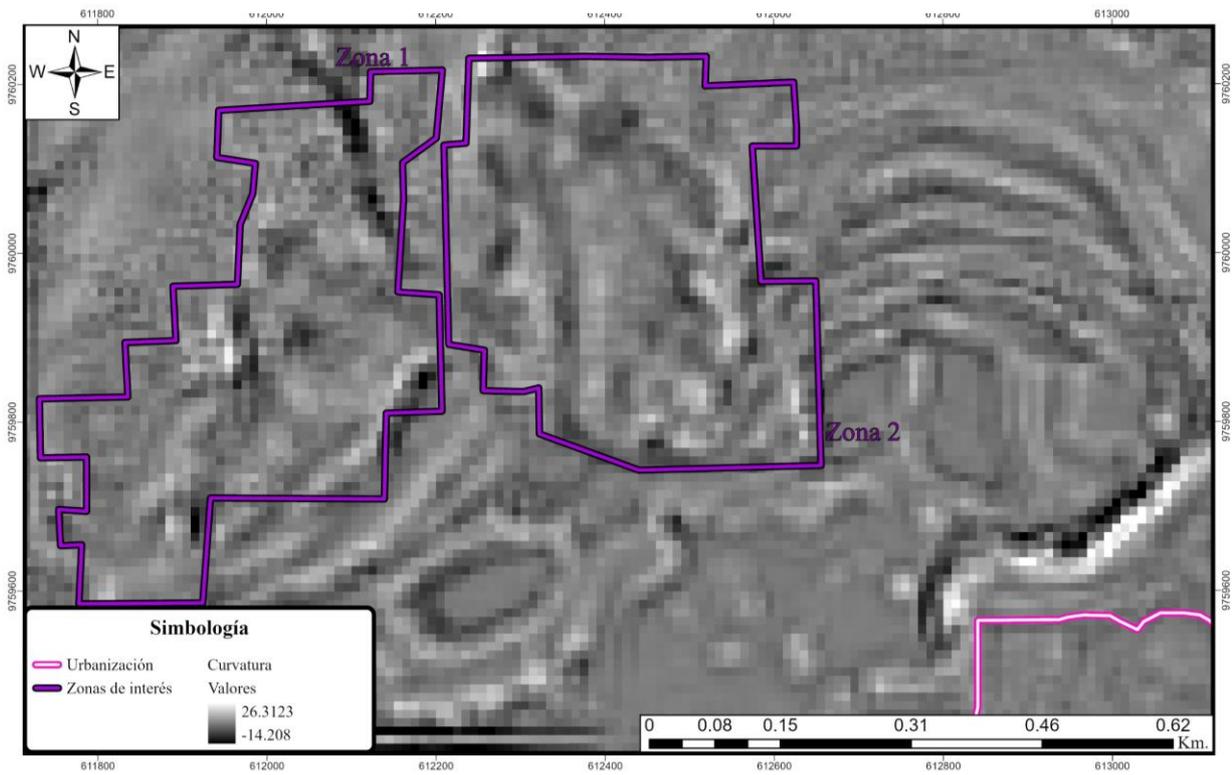
Mapa de pendientes usado para el análisis de vulnerabilidad.



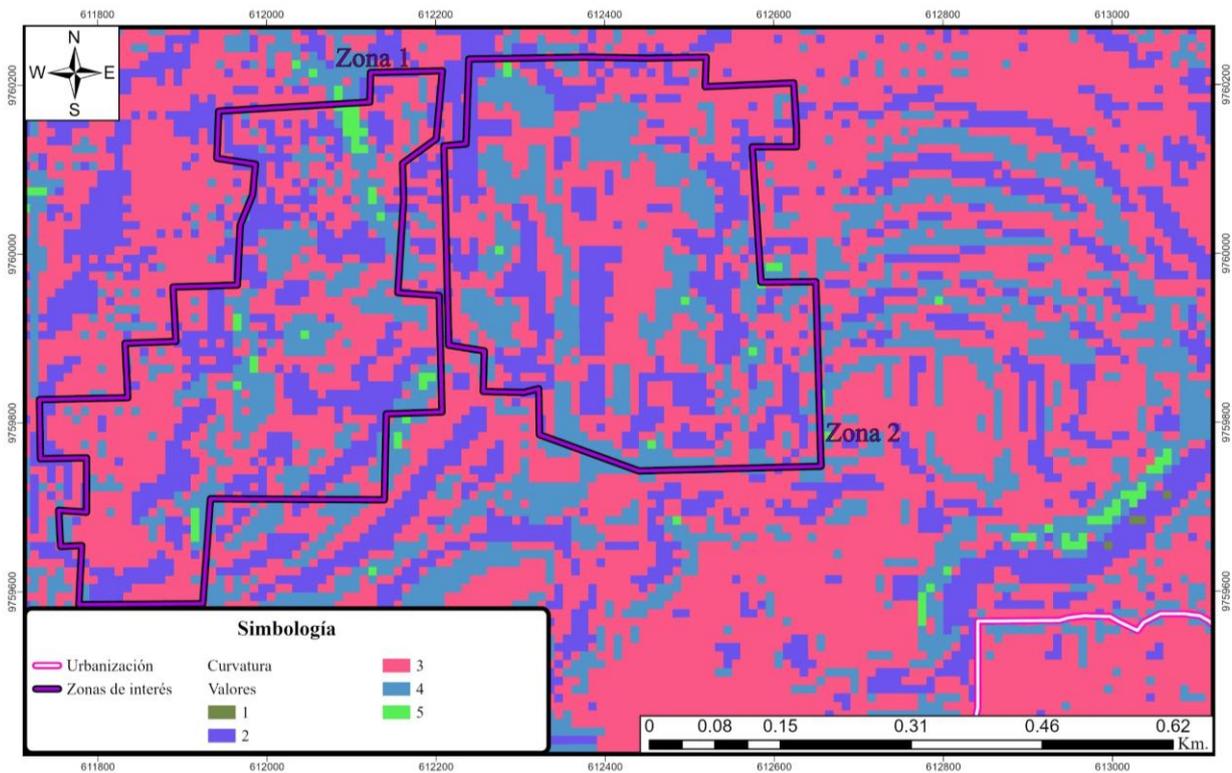
Mapa de pendientes reclasificado, usado para el análisis de vulnerabilidad.



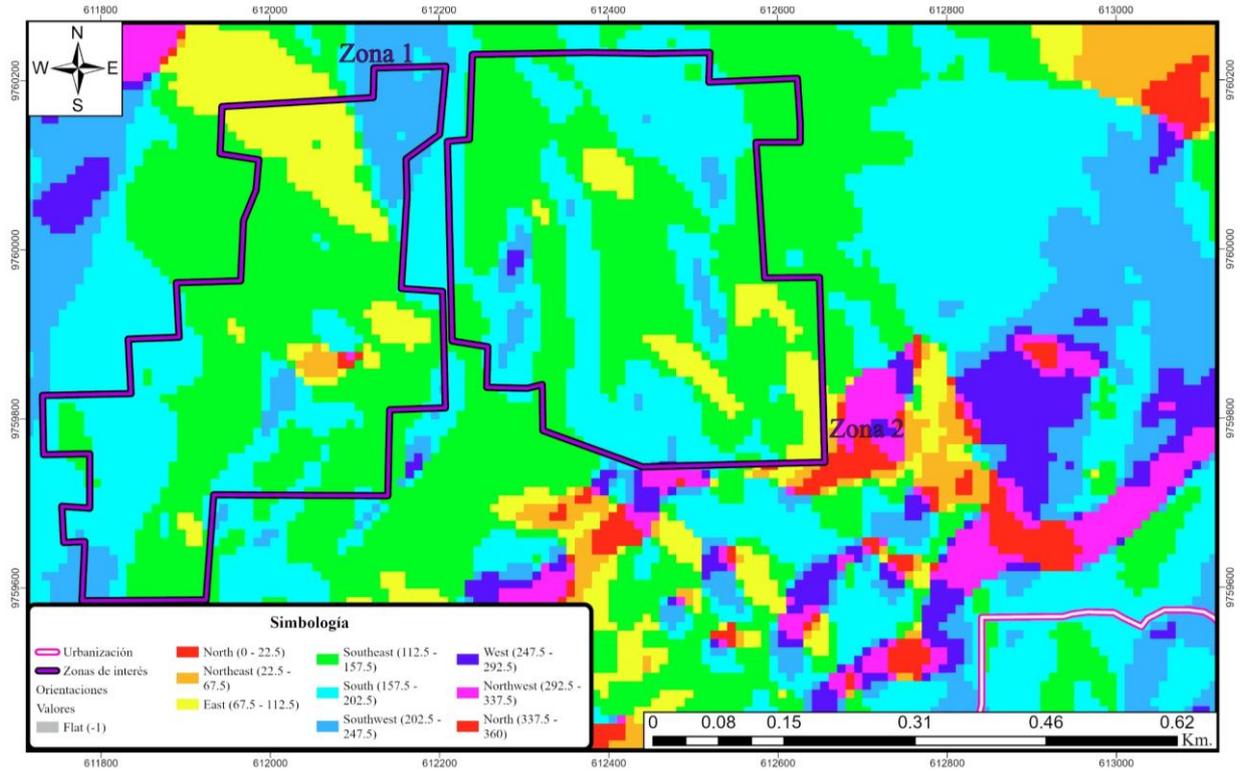
Mapa de curvatura usado para el análisis de vulnerabilidad.



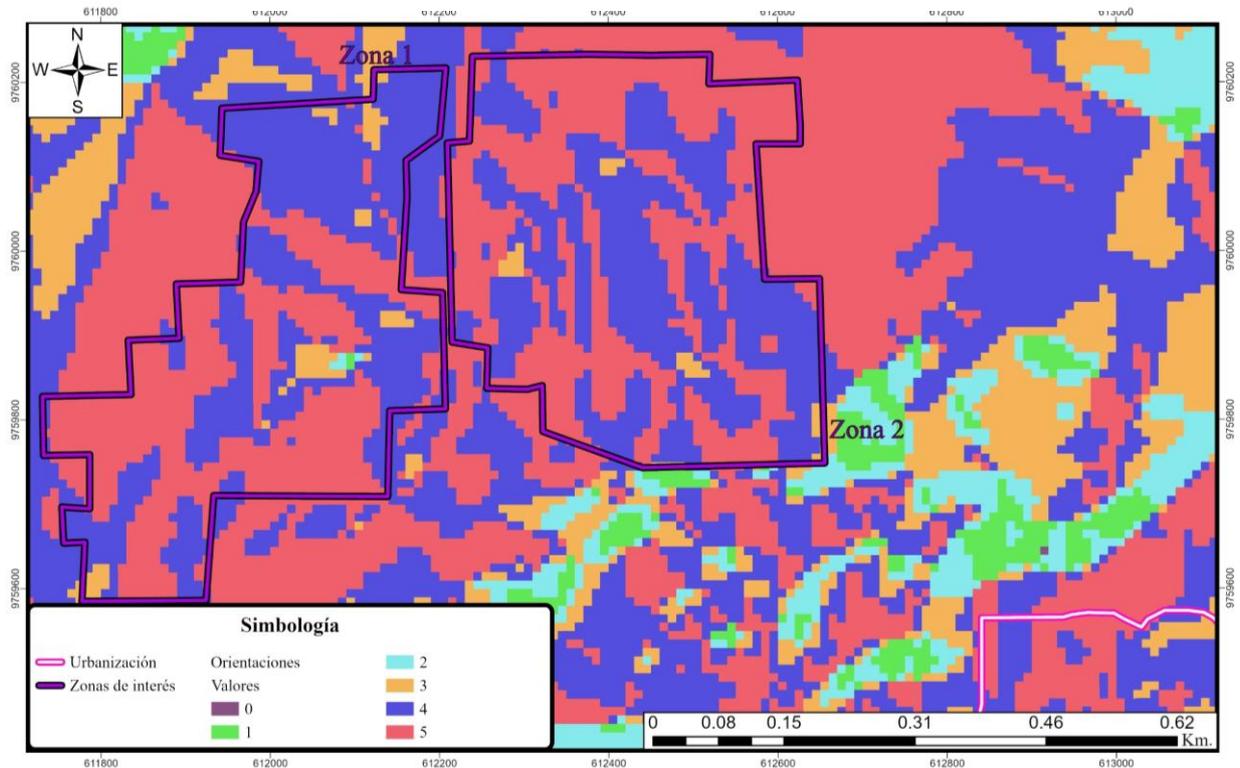
Mapa de curvatura reclasificado, usado para el análisis de vulnerabilidad.



Mapa de orientaciones usado para el análisis de vulnerabilidad.



Mapa de curvatura reclasificado, usado para el análisis de vulnerabilidad.



**Tabla 7** Datos de las imágenes utilizadas para el procesamiento de interferogramas en modo de vuelo descendente con temporalidad de 12 días

Interferograma	Imagen	Año	Mes	Día	Ruta	Marco	Modo de Haz	Línea Base Perpendicular (m)	BURST	IW	Observaciones
1	Maestra	2023	10	2	40	596	IW	107	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	10	14	40	596	IW				
2	Maestra	2023	10	14	40	596	IW	85	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	10	26	40	596	IW				
3	Maestra	2023	10	26	40	596	IW	137	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	11	7	40	596	IW				
4	Maestra	2023	11	7	40	596	IW	134	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	11	19	40	596	IW				
5	Maestra	2023	11	19	40	596	IW	78	9, 10	2	Sin información
	Esclava	2023	12	1	40	596	IW				
6	Maestra	2023	12	1	40	596	IW	55	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	12	13	40	596	IW				
7	Maestra	2023	1	6	40	596	IW	278	9, 10	2	LBP supera el umbral
	Esclava	2023	1	18	40	596	IW				
8	Maestra	2023	1	18	40	596	IW	372	9,10	2	LBP supera el umbral
	Esclava	2023	1	30	40	596	IW				
9	Maestra	2023	1	30	40	596	IW	65	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	2	11	40	596	IW				
10	Maestra	2023	2	11	40	596	IW	155	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	2	23	40	596	IW				
11	Maestra	2023	2	23	40	596	IW	145	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	3	7	40	596	IW				
12	Maestra	2023	3	7	40	596	IW	34	NN	2	No coexisten en el mismo marco
	Esclava	2023	3	19	40	595	IW				

13	Maestra	2023	3	19	40	595	IW	34	NN	2	No coexisten en el mismo marco
	Esclava	2023	3	31	40	596	IW				
14	Maestra	2023	3	31	40	596	IW	43	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	4	12	40	596	IW				
15	Maestra	2023	4	12	40	596	IW	18	9, 10	2	Utilizado
	Esclava	2023	4	24	40	596	IW				
16	Maestra	2023	5	6	40	601	IW	4	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	5	18	40	601	IW				
17	Maestra	2023	5	18	40	601	IW	9	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	5	30	40	601	IW				
18	Maestra	2023	5	30	40	601	IW	120	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	6	11	40	601	IW				
19	Maestra	2023	6	11	40	601	IW	60	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	6	23	40	601	IW				
20	Maestra	2023	6	23	40	601	IW	69	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	7	5	40	601	IW				
21	Maestra	2023	7	5	40	601	IW	62	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	7	17	40	601	IW				
22	Maestra	2023	7	17	40	601	IW	13	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	7	29	40	601	IW				
23	Maestra	2023	8	22	40	601	IW	120	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	9	3	40	601	IW				
24	Maestra	2023	9	3	40	601	IW	54	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	9	15	40	601	IW				
25	Maestra	2023	9	15	40	601	IW	12	1, 2	2	Sin información
	Esclava	2023	9	27	40	601	IW				
26	Maestra	2023	9	27	40	601	IW	45	1, 2	2	Utilizado
	Esclava	2023	10	9	40	601	IW				

**Tabla 8** Datos de las imágenes utilizadas para el procesamiento de interferogramas en modo de vuelo ascendente con temporalidad de 12 días

Interferograma	Imagen	Año	Mes	Día	Ruta	Marco	Modo de Haz	Línea Base Perpendicular (m)	BURST	IW	Observaciones
1	Maestra	2022	10	12	18	1170	IW	145	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2022	10	24	18	1170	IW				
2	Maestra	2022	10	24	18	1170	IW	100	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2022	11	5	18	1170	IW				
3	Maestra	2022	11	5	18	1170	IW	61	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2022	11	17	18	1170	IW				
4	Maestra	2022	11	17	18	1170	IW	57	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2022	11	29	18	1170	IW				
5	Maestra	2022	11	29	18	1170	IW	49	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2022	12	11	18	1170	IW				
6	Maestra	2022	12	11	18	1170	IW	90	8.9	1	Sin información
	Esclava	2022	12	23	18	1170	IW				
7	Maestra	2022	12	23	18	1170	IW	69	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	1	4	18	1170	IW				
8	Maestra	2023	1	4	18	1170	IW	125	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	1	16	18	1170	IW				
9	Maestra	2023	1	16	18	1170	IW	276	8.9	1	LBP supera el umbral
	Esclava	2023	1	28	18	1170	IW				
10	Maestra	2023	1	28	18	1170	IW	166	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	2	9	18	1170	IW				
11	Maestra	2023	2	9	18	1170	IW	38	8.9	1	Sin información
	Esclava	2023	2	21	18	1170	IW				
12	Maestra	2023	2	21	18	1170	IW	201	8.9	1	LBP supera el umbral
	Esclava	2023	3	5	18	1170	IW				
13	Maestra	2023	3	5	18	1170	IW	194	8.9	1	

	Esclava	2023	3	17	18	1170	IW				Sin información
14	Maestra	2023	4	10	18	1170	IW	96	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	4	22	18	1170	IW				
15	Maestra	2023	4	22	18	1170	IW	90	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	5	4	18	1170	IW				
16	Maestra	2023	5	4	18	1170	IW	48	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	5	16	18	1170	IW				
17	Maestra	2023	5	16	18	1170	IW	28	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	5	28	18	1170	IW				
18	Maestra	2023	5	28	18	1170	IW	182	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	6	9	18	1170	IW				
19	Maestra	2023	6	9	18	1170	IW	66	8.9	1	Sin información
	Esclava	2023	6	21	18	1170	IW				
20	Maestra	2023	6	21	18	1170	IW	172	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	7	3	18	1170	IW				
21	Maestra	2023	7	3	18	1170	IW	90	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	7	15	18	1170	IW				
22	Maestra	2023	7	15	18	1170	IW	43	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	7	27	18	1170	IW				
23	Maestra	2023	7	27	18	1170	IW	268	8.9	1	LBP supera el umbral
	Esclava	2023	8	8	18	1170	IW				
24	Maestra	2023	9	1	18	1170	IW	91	8.9	1	Utilizado
	Esclava	2023	9	13	18	1170	IW				