

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**“DETECCIÓN Y MONITOREO DE DEFORMACIONES
DEL TERRENO MEDIANTE INTERFEROMETRÍA
DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA
SINTÉTICA (DInSAR) EN QUILAHUANI,
PROVINCIA DE CANDARAVE-TACNA”**

TESIS

Presentada por:

Bach. José María Quispe Larico

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
Faculta de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia


HOJA DE JURADO


TESIS

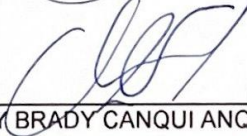
"DETECCIÓN Y MONITOREO DE DEFORMACIONES DEL TERRENO
MEDIANTE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE
APERTURA SINTÉTICA (DInSAR) EN QUILAHUANAI, PROVINCIA
DE CANDARAVE-TACNA"


Presentado por el bachiller José María Quispe Larico
Para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo-Geotécnico

Tesis sustentada y aprobada el 11 de diciembre del 2023 (RF N°791-23-
FIAG/UNJBG)
con el siguiente jurado:

Presidente : 
MSc. Ing. CONRADO GABINO BEDOYA JAÉN

Miembro – Secretario : 
Ing. JORGE PANTALEÓN BARRIGA GAMARRA

Miembro : 
Ing. TONY BRADY CANQUI ANQUISE

Asesor de Tesis : 
Mgr. Ing. GLORIA MARINA CHOQUE MACHACA

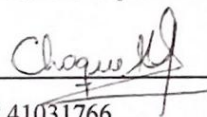
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Gloria Marina Choque Machaca** en mi condición de asesora acreditada por la Resolución de Facultad N° 466-2021-FIAG/UNJBG de la tesis titulada: Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) en Quilahuani, provincia de Candarave-Tacna.

Presentada por el bachiller José María Quispe Larico para optar el título de ingeniero geólogo-geotécnico.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual Turnitin Similarity cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 5%. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis que está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio Institucional**.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del título profesional.



D.N.I N° 41031766



Mgr. Ing. Gloria Marina Choque Machaca

DEDICATORIA

En memoria de “Cayrulo y Sebada”.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mis padres, hermano y familia por su apoyo incondicional en todo momento.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia, por todas las experiencias y aprendizajes brindados, así como su disponibilidad para absolver dudas y consultas.

Mi especial agradecimiento a la Ing. Gloria Choque por su siempre oportuna dirección y comprensión en el desarrollo de este trabajo, al Ing. Enrique Vargas, Ing. Edwin Ramírez e Ing. Alejandro Gambeta, quienes me dieron la oportunidad de iniciar mi carrera, así como desarrollarme como una mejor persona y profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. FUNDAMENTO Y JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. HIPÓTESIS	4
1.4.1. Hipótesis general	4
1.4.2. Hipótesis específicas.....	4
1.5. UBICACIÓN	5
1.6. CLIMA.....	6
1.7. VEGETACIÓN.....	6
1.8. GEOLOGÍA.....	6
1.9. GEOMORFOLOGÍA.....	9
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO	11
2.1 DESLIZAMIENTOS.....	11
2.1.1. Caso Quilahuani.....	12
2.1.2. Nomenclatura de un talud o ladera	13
2.1.3. Nomenclatura de los procesos de movimiento	14
2.1.4. Dimensiones de deslizamientos	15
2.2. TELEDETECCIÓN (RADAR)	16
2.2.1. Sensores de radar	18
2.2.4. Distorsiones de las imágenes radar.....	22
2.2.5. Interferometría de radar	23

2.2.6.	Permanet scatteres PS (dispersores permanentes)	24
2.3.	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.....	25
2.3.1.	Leica GeoMoS	25
2.3.2.	Extensómetros	28
2.3.3.	Radar interferométrico.....	29
2.3.4.	Piezómetros	34
2.3.5.	Inclinómetros	36
2.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE DATOS GEOTÉCNICOS	37
2.4.1.	Estadística en la geotecnia.....	37
2.4.2.	Análisis exploratorio de datos (eda)	38
2.4.3.	Tratamiento de datos.....	42
2.4.4.	Estimaciones de tiempo de falla	46
CAPÍTULO III		49
METODOLOGÍA.....		49
3.1.	TRABAJO PRELIMINAR	49
3.2.	TRABAJO DE CAMPO.....	50
3.3.	TRABAJO DE GABINETE	50
3.3.1.	Diagrama de flujo de trabajo	51
CAPÍTULO IV		60
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		60
4.1.	EVALUACION GEOLÓGICA.....	60
4.1.1.	Mega deslizamiento	60
4.1.2.	Deslizamiento de Matarani	62
4.2.	MAPEO DE DEFORMACIONES CON DINSAR.....	72
4.3.	PROPUESTA DE MONITOREO GEOTÉCNICO.....	82
4.4.	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TÉCNICA DINSAR Y EXTENSOMETRÍA ..	86
CONCLUSIONES.....		94
RECOMENDACIONES		96

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación Matarani-Quilahuani.	5
Figura 2. Mapa Geológico en el sector de Quilahuani.	8
Figura 3. Unidades Geomorfológicas en Quilahuani.....	10
Figura 4. Esquema de deslizamiento rotacional (A) y traslacional (B) donde se puede apreciar el desplazamiento de la masa inestabilizada a través de una superficie de rotura neta. (Por cortesía del Servicio Geológico de Canadá).....	11
Figura 5. Deslizamiento rotacional de Holbeck al sur de Scarborough (UK) en 1993. Afectó a un hotel, pero no hubo víctimas mortales porque los huéspedes fueron desalojados con anterioridad. (Por cortesía del Servicio Geológico Británico http://www.bgs.ac.uk/landslides/holbeckHall.html).....	12
Figura 6. Nomenclatura de taludes y laderas.	13
Figura 7. Nomenclatura de un desplazamiento.....	14
Figura 8. Dimensiones de los movimientos en masa.....	15
Figura 9. Principales componentes asociados a las actividades de teledetección.	18
Figura 10. Longitudes de ondas usadas en Teledetección: Ampliación de las microondas.	19
Figura 11. Geometría de toma de imágenes radar; A: trayectoria del sensor; B: distancia	

perpendicular sensor-superficie terrestre; C: zona de captura del sensor o huella; D: rango en la dirección perpendicular al sensor (across-track); E: rango en la dirección del sensor (along-track).....	23
Figura 12. GeoMoS Monitor	27
Figura 13. GeomMoS Analyzer.....	27
Figura 14. Aplicaciones y beneficios del GeoRadar.....	31
Figura 15. Hardware del GeoRadar, IDS GeoRadar	32
Figura 16. Software del GeoRadar, IDS GeoRadar.....	32
Figura 17. Tipos de Piezómetros	35
Figura 18. Equipo inclinométrico (cortesía de Ingeniería de Instrumentación y Control.)	36
Figura 19. Ciencia de datos.....	39
Figura 20. ¿En qué invierten más el tiempo los científicos de datos?	40
Figura 21. ¿Cuál es la parte menos agradable de la ciencia de datos? Nota. En la presente figura se muestra la distribución de las actividades menos amenas en la ciencia de datos. Tomado en una encuesta hecho por Forbes, 2016.	41
Figura 22. Distribución probabilística Normal.	43
Figura 23. Forecast de x datos.	45
Figura 24. Estructura para el ejemplo Forecast en Rstudio.	45
Figura 25. Relaciones de velocidad inversa versus tiempo que preceden a la falla de la pendiente, después de Fukuzono (Rose & Hungr, 2007).....	47
Figura 26. Gráfico de desplazamiento de velocidad inversa a largo plazo. (Rose & Hungr,2007) Nota. En la presente grafica se muestra los valores de velocidad inversa a largo plazo mostrando a la vez la recta de regresión, cuya intersección estima la fecha de falla. Tomado de A new method for predicting the failure time of a slope. Fukuzono, T. (1985). In: Proceedings of the fourth international conference and field. Tokyo: Japan Landslide Society, 145–50.....	48
Figura 27. Diagrama de flujo, DInSAR.....	51

Figura 28. Consulta y descarga de imágenes radar en ASF.....	52
Figura 29. Corregistro de Imágenes radar.	53
Figura 30. Formación de interferograma	54
Figura 31. Interferograma.	54
Figura 32. Burst en las imágenes radar.....	55
Figura 33. Interferogramas pre y post remoción de fase topográfica.	55
Figura 34. Filtro de Goldstein y Multi-Looking	56
Figura 35. Exportación de la fase.	57
Figura 36. Aplicación del algoritmo SNAPHU	57
Figura 37. Importación de la fase.	58
Figura 38. Phase to displacement.	58
Figura 39. Exportación en formato kmz	59
Figura 40. Sección longitudinal del deslizamiento antiguo.....	60
Figura 41. Deslizamiento de Quilahuani.	61
Figura 42. Mapa Geológico de Matarani.....	64
Figura 43. Interpretación deslizamiento de Matarani.	65
Figura 44. Esquema de extensometría.	66
Figura 45. Esquema en campo.....	67
Figura 46. Gráfico de deformación, extensómetro 1.	69
Figura 47. Gráfico de deformación extensómetro 2.	70
Figura 48. Gráfico de deformación extensómetro 3.	71
Figura 49. Gráfico de deformación extensómetro 4.	71
Figura 50. Gráfico de deformación extensómetro 5.	72
Figura 51. Secciones de evaluación.....	74
Figura 52. DInSAR 14 noviembre - 8 diciembre 2022.....	74
Figura 53. DInSAR 8 diciembre 2022 - 13 enero 2023.....	76
Figura 54. DInSAR 13 enero - 6 febrero 2023.	78
Figura 55. DInSAR 6 febrero - 2 marzo 2023.	80

Figura 56. Línea de sección B'-B	91
Figura 57. Canales de regadío.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro comparativo de misiones SAR	20
Tabla 2. Diferencias entre el GeoMoS Monitor y Analyzer	26
Tabla 3. Características del hardware y software necesarios para el GeoRadar.....	33
Tabla 4. Comportamientos más comunes para variables continuas.....	38
Tabla 5. Intervalos de confianza en una distribución Normal.	44
Tabla 6. Características de las imágenes Sentinel 1.....	53
Tabla 7. Distancia medida en metros entre pares extensométricos.....	68
Tabla 8. Diferencial de distancia en metros a través del tiempo.....	68
Tabla 9. Imágenes radar utilizadas.....	73
Tabla 10. Características de las imágenes radar utilizadas.	73
Tabla 11. Gráficos de deformación DInSAR 14 noviembre - 8 diciembre 2022	75
Tabla 12. Gráficos de deformación DInSAR 8 diciembre 2022 - 13 enero 2023.....	77
Tabla 13. Gráficos de deformación DInSAR 13 enero - 6 febrero 2023.....	79
Tabla 14. Gráfico de deformación DInSAR 6 febrero - 2 marzo 2023.	81
Tabla 15. Presupuesto de perforación e instrumentación en Quilahuani.....	83
Tabla 16. Instrumentación y monitoreo geotécnico en Quilahuani.	84
Tabla 17. Monitoreo DInSAR en Quilahuani.	85
Tabla 18. Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 1 en la sección E-E', en metros.....	87
Tabla 19. Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 3 en la sección D-D', en metros.....	88

Tabla 20. Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 5 en la sección C-C', en metros.	89
Tabla 21. Caracterización de un deslizamiento con base en la técnica DInSAR y extensometría.	90
Tabla 22. Fotografías 12 noviembre 2022.	101
Tabla 23. Fotografías 8 diciembre 2022.	102
Tabla 24. Fotografías 7 enero 2023.	103
Tabla 25. Fotografías 28 enero 2023.	104
Tabla 26. Fotografías 25 febrero 2023.	105

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Extensómetro de cinta.	28
Fotografía 2. Radar de apertura sintética, IDS GeoRadar.	31
Fotografía 3. Radar de apertura sintética, IDS GeoRadar.	33
Fotografía 4. Clastos dacíticos y riolíticos.	63
Fotografía 5. Tobas líticas.	63
Fotografía 6. Diorita.	64
Fotografía 7. Evaluación previa de la zona.	66

RESUMEN

El presente trabajo muestra metodologías de estudio de movimientos en masa o deslizamientos, se eligió el distrito de Quilahuani en Candarave, para esta investigación, siendo este lugar el más afectado por la mencionada problemática en los últimos años, debido a su posicionamiento sobre un mega deslizamiento antiguo.

Para ejecutar dicha investigación se usaron imágenes radar, comprendiendo un periodo del 14 de noviembre de 2022 al 2 de marzo de 2023, abarcando zonas de deslizamientos en Quilahuani, las cuales fueron procesadas con el software SNAP (Plataforma de aplicaciones Sentinel), mediante la técnica DInSAR (Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética) y correlacionados con datos de monitoreo extensométrico de cinta en campo, presentando los resultados mediante gráficos, tablas y mapas de deformación del terreno para una mejor comprensión del problema.

En el procesamiento de las imágenes radar, se obtuvieron valores de deformación de hasta 15,3 cm indicando el acercamiento o alejamiento de la zona de estudio en dirección de la línea de visión del sensor, mientras que, en la evaluación de campo, mediante el uso de 5 pares de extensometría, se obtuvo valores de deformación de hasta 32 cm indicando la apertura o el cierre progresivo de las grietas evaluadas, caracterizando dicho deslizamiento como uno de tipo rotacional.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos en campo, podemos validar los resultados de la técnica DInSAR, demostrándonos que, al correlacionar las técnicas

y metodologías apropiadas, permiten detectar y monitorear movimientos en masa o deformaciones del terreno, los cuales con base en la litología presente son ocasionados por las fuertes precipitaciones y acciones antrópicas de la zona.

Palabras clave: DInSAR, deslizamientos, Quilahuani.

ABSTRACT

This work shows methodologies for studying mass movements or landslides, the district of Quilahuani in Candarave was chosen for this research, this place being the most affected by the aforementioned problem in recent years, due to its positioning on an old megaslide.

To carry out this investigation, radar images were used, comprising a period from November 14, 2022 to March 2, 2023, covering areas of landslides in Quilahuani, which were processed with the SNAP software (Sentinel Application Platform), using the DInSAR technique (Interferometry Synthetic Aperture Radar Differential) and correlated with data from tape extensometric monitoring in the field, presenting the results through graphs, tables and ground deformation maps for better understanding of the problem.

In the processing of the radar images, deformation values were obtained up to 15.3 cm indicating the approach or distance from the study area in direction of the line of sight of the sensor, while, in the field evaluation, by using 5 pairs of extensometry, deformation values of up to 32 cm indicating the progressive opening or closing of the cracks evaluated, characterizing said slide as a rotational type.

Finally, based on the results obtained in the field, we can validate the results of the DInSAR technique, showing us that, by correlating the appropriate techniques and methodologies, they allow detecting and monitoring mass movements or deformations of the terrain, which based on the present lithology are caused by

heavy rainfall and anthropogenic actions in the area.

Keywords: DInSAR, landslides, Quilahuani.

INTRODUCCIÓN

El distrito de Quilahuani está ubicado en la provincia de Candarave, Región Tacna, en este lugar se desarrollan actividades de agricultura y ganadería. Durante los periodos de lluvias del año 2017 y parte de 2018 se produjeron una serie de deslizamientos en todo el distrito, siendo el más afectado esta zona, con considerables afecciones a la infraestructura de riego, así como en las vías de comunicación, influyendo fuertemente en el desarrollo de su economía.

El objetivo de la presente tesis fue detectar y monitorear movimientos del terreno de manera preventiva, frente a las posibles pérdidas económicas, producto de los deslizamientos. Los recursos más usados para el monitoreo fueron el software SNAP, QGIS, imágenes radar del sentinel 1; asimismo, en los periodos de noviembre de 2022 a marzo de 2023, se usó Excel, actuando así conjuntamente en la implementación de la técnica DInSAR, lo que permitió detectar variaciones como mapas de deformaciones en metros. Dicha técnica fue validada en campo con instrumentación geotécnica, aplicando para este caso el principio de extensometría de cinta.

Al correlacionar ambas técnicas, denotamos que existe relación entre los valores por cada fecha evaluada, tomando en cuenta que, si el valor es positivo, hablamos de un movimiento del terreno en dirección del deslizamiento y si es negativo es un movimiento contrario, podemos decir que, al presentarse ambos casos, estamos frente a un caso de movimiento constante y de alternancia.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente investigación tiene como zona de estudio el distrito de Quilahuani, ubicado en la provincia de Candarave, departamento de Tacna, el cual durante el año 2017 se vio afectado por fuertes deslizamientos, provocando pérdidas económicas, así como bloqueos de vías de acceso, causando malestar en la población.

Esta zona se encuentra posicionada sobre un gran deslizamiento antiguo evidenciado por los escarpes presentes, recomendándose en su momento una reubicación de la población de Quilahuani, debido a que la zona está sujeta a caídas de rocas, deslizamientos y derrumbes, representando un peligro latente muy alto.

Por lo expuesto anteriormente, se destaca el alto valor que representaría implementar áreas de monitoreo geotécnico haciendo uso de piezómetros, inclinómetros, extensómetros de cinta o cable, radares SAR y RAR, monitoreo satelital INSAR, PSI, SBAS, además de la logística que se necesitaría para instalar todo esto. Por lo que, no hay duda que el detectar y monitorear estas áreas inestables es un gran problema; sin embargo, su correcto estudio evitaría pérdidas considerables a corto y largo plazo.

1.2. FUNDAMENTO Y JUSTIFICACIÓN

En los casos de deslizamientos estudiados, se espera que suceda el evento para luego empezar con el monitoreo, sin embargo, esto provoca desbalances económicos no contemplados para las autoridades correspondientes, movilizand o maquinarias, equipo de personal y demás recursos necesarios para atender a este tipo de emergencias, como lo fue en su momento en Quilahuani.

Este distrito se sustenta a través de actividades agrícolas y ganaderas, por lo cual la presencia de derrumbes, deslizamientos continuos y caída de rocas, interfiere con sus actividades, causando pérdidas económicas considerables en los últimos años, además, ocasionando la restricción de vías de acceso a algunas zonas afectadas.

Actualmente, en el rubro del sensoramiento remoto aplicado a industrias mineras, agrícolas, hidrológicos, volcánicos, entre otros; existen muchas empresas que brindan el servicio de monitoreo INSAR, DInSAR, PSI, SBAS al sector privado y estatal con el fin de monitorear áreas de interés post eventos o zonas que muestren evidencias en terrenos que puedan presentar situaciones de riesgo, siendo estas muy costosas y como consecuencia inasequible en la mayoría de casos.

Este tipo de investigación permite la detección oportuna y el monitoreo constante de deformaciones del terreno, previniendo que los deslizamientos puedan causar fatalidades y pérdidas económicas, beneficiando así directamente a la población, las arcas de los gobiernos locales y las instituciones asociadas a la

gestión de riesgos y desastres, teniendo una visión más clara sobre la zona de interés a estudiar.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Detectar y monitorear deformaciones del terreno mediante interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) en Quilahuani, provincia de Candarave-Tacna.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una evaluación geológica del deslizamiento de Matarani en el distrito de Quilahuani.
- Mapear las zonas que presentan una mayor deformación del terreno mediante DInSAR y extensometría.
- Proponer una metodología de monitoreo geotécnico de óptimo costo.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

Las deformaciones del terreno en Quilahuani podrán ser detectadas y monitoreadas mediante la interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR).

1.4.2. Hipótesis específicas

- La evaluación geológica permitirá conocer el proceso de deformación en los

deslizamientos presentes en Quilahuani.

- Las zonas de mayor deformación del terreno podrán ser mapeadas mediante DInSAR y extensometría.
- La metodología propuesta permitirá optimizar costos en el monitoreo geotécnico de zonas afectadas.

1.5. UBICACIÓN

El distrito de Quilahuani se encuentra ubicado a 160 km de distancia de la UNJBG. Se llega mediante vía asfaltada de la ciudad Tacna-Tarata-Candarave. Así mismo, la zona de Matarani dista a 10 minutos en transporte vehicular del poblado de Quilahuani. En la figura 1 se denota la ubicación geográfica de la zona.

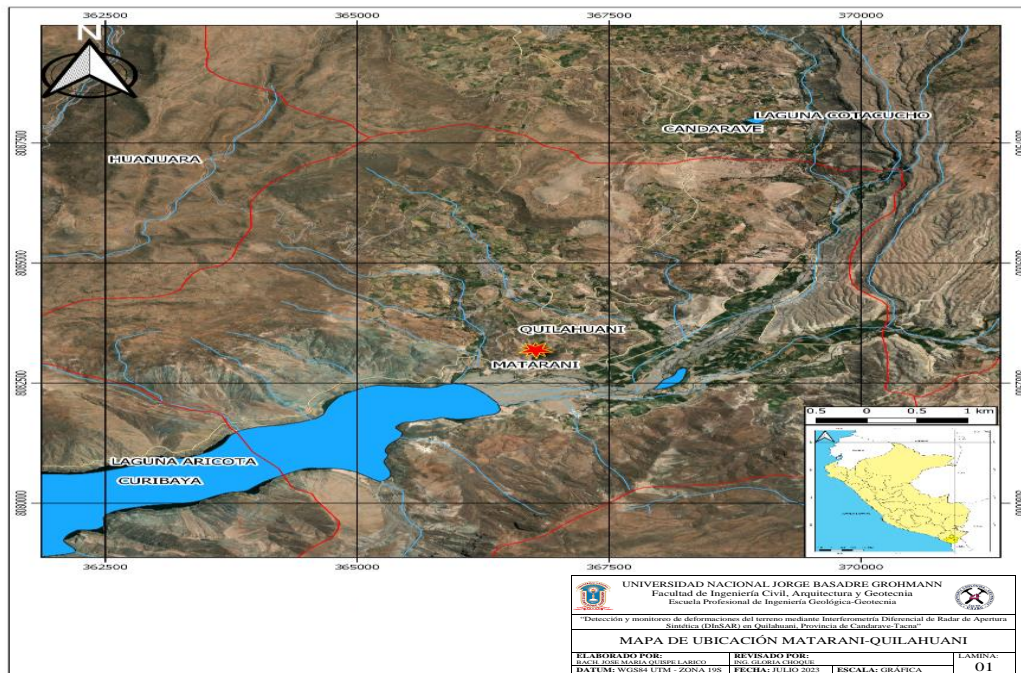


Figura 1. Mapa de Ubicación Matarani-Quilahuani.

Nota: Fuente propia

1.6. CLIMA

Según Tejada (2005) el clima en Quilahuani puede ser templado a frío con periodos de precipitación de diciembre-marzo, los cuales provocan aumento en el caudal del río Callazas. Así mismo, se describen vientos moderados a fuertes indistintamente durante el año, ligados a su vez a temperaturas bajo cero. (pp. 83-86)

1.7. VEGETACIÓN

Entre la flora existente en la zona podemos mencionar la presencia de yareta, tola, ichu y árboles como eucalipto, ciprés, etc. (Aro, 2020)

La actividad de la agricultura se desarrolla a través de cultivos como papas, ajo, en algunos sectores habas, orégano, y en un mayor nivel maíz. (Tejada, 2005).

1.8. GEOLOGÍA

- Formación Labra (Js-La)

Según De la Cruz (2001) al SE de Candarave podemos encontrar afloramientos de lutitas con algunas intercalaciones de areniscas. Hacia el bloque superior podemos ubicar calizas marrones grisáceas, presuntamente pertenecientes a la Fm. Gramadal. (pp. 2)

- Grupo Toquepala (KsP-To)

Según De la Cruz (2001) el Gr. Toquepala está constituido por las formaciones

Paralaque y Quellaveco, siendo esta última principalmente una toba andesítica y lítica. Estas tobas generalmente corresponden a fragmentos subangulosos a subredondeados de andesita porfírica y tobas de ceniza con presencia de granos de cuarzo amorfo. De la misma manera podemos encontrar hacia el sur la presencia de flujos andesíticos. (p. 4)

- Formación Huaylillas (Mioceno inferior-superior) (Nm-Hu 1-3)

Según Soncco (2018) esta formación generalmente hace referencia a las ignimbritas de color rosáceo blanquecino o rojo pálido en algunas ocasiones, de composición dacítica a riolítica. Estas afloran en Pampa Pagrilaca, Pallata y Talaca en posición subhorizontal con una potencia de 80 a 400 m. (p. 10)

- Calientes II (Pl-Ca2)

Según Soncco (2018) esta formación aflora al este de Quilahuani en concordancia con la extensión del río Callazas comprendiendo flujos piroclásticos de pómez y ceniza volcánica de color ocre a beige con potencia de 80 a 100 m. (p. 10)

- Depósitos Coluviales (Qh-al) y aluviales (Qh-al)

Los depósitos coluviales son producto de desprendimientos de los geomateriales en las laderas por acción de la gravedad consistiendo así en una acumulación de bloques, gravas, arenas y limos.

Los depósitos aluviales por el contrario de los coluviales, han sufrido bastante transporte generalmente por agua, generando bordes subangulosos y caracterizados por la presencia de arenas y limos.

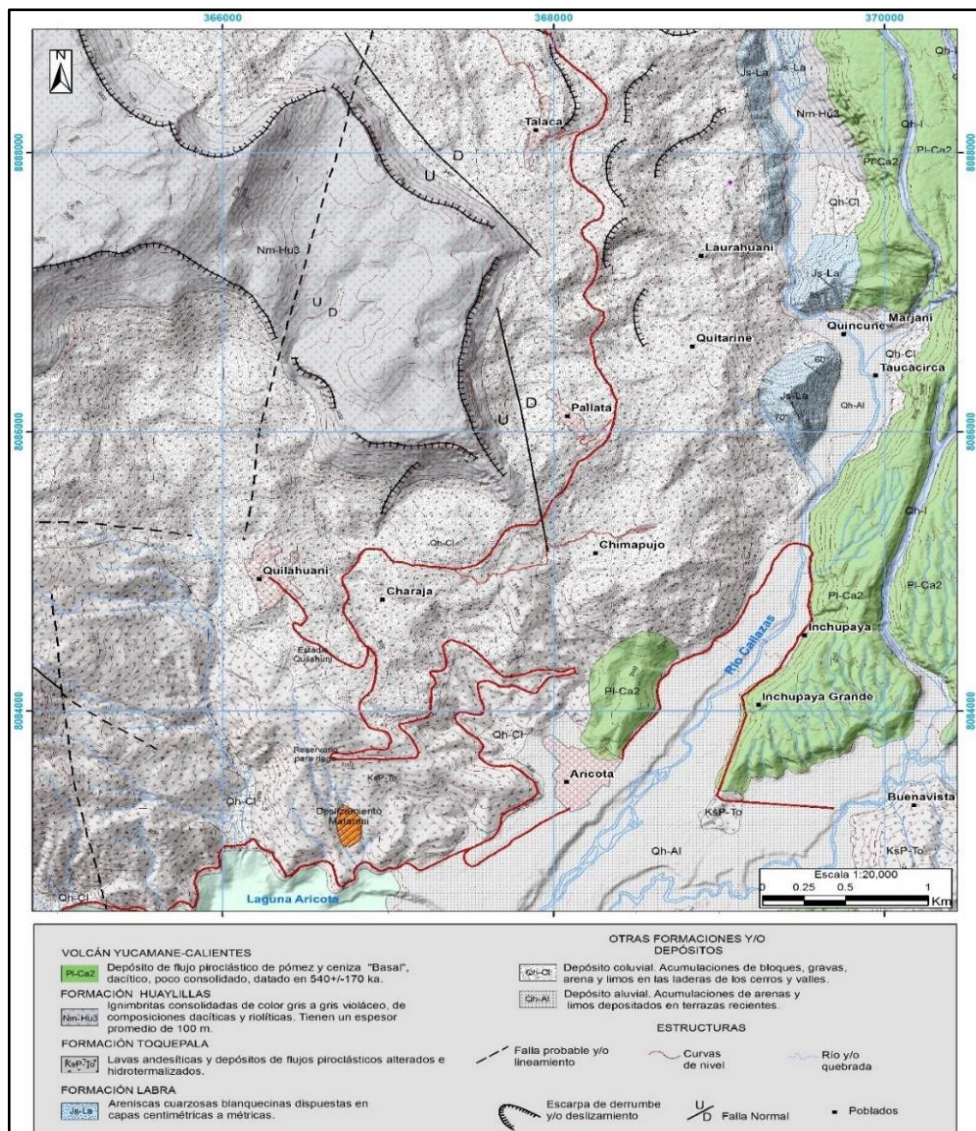


Figura 2. Mapa Geológico en el sector de Quilahuani.

Nota. Modificado de Vela (2015), tomado de Soncco, J., Manrique, N. (2018). Peligro por deslizamientos en el sector de Matarani. Informe técnico A6833, INGEMMET. Lima.

1.9. GEOMORFOLOGÍA

- Colinas Ignimbríticas (C-ig)

Según Soncco (2018), estas colinas pueden evidenciar pendientes entre los 15 y 30°, conformada como bien menciona su clasificación, por depósitos de flujos de pómez y tobas de composición riolítica. La mayoría de los deslizamientos en esta zona presentan sus escarpes en estas colinas con pendientes de 75°. (p. 6)

- Altiplanicie Ignimbrítica (A-ig)

Esta Altiplanicie está ubicada en la parte intermedia del megadelizamiento de Quilahuani el cual en palabras de Soncco (2018) presentan superficies onduladas poco pronunciadas, con pendientes de hasta 10° en promedio. Conformada de igual manera por tobas del Huaylillas. (p. 6)

- Abanico Aluvial (A-al)

Según Soncco (2018), estas áreas están localizadas en las partes bajas de los valles, con una pendiente entre 5 a 10 °, disectadas a su vez por quebradas de muy poca profundidad. (p. 7)

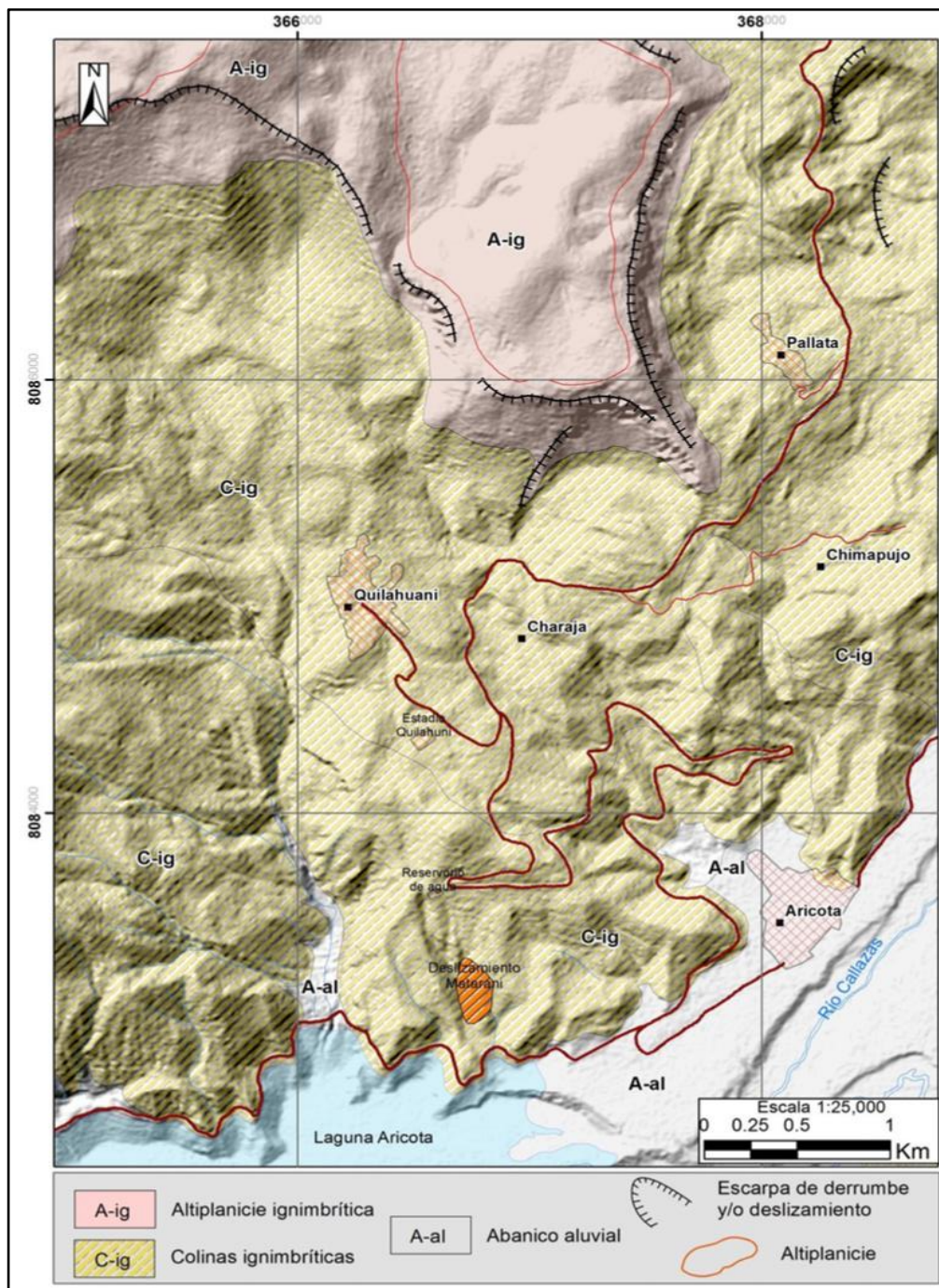


Figura 3. Unidades Geomorfológicas en Quilahuani.

Nota. Tomado de Soncco, J., Manrique, N. (2018). Peligro por deslizamientos en el sector de Matarani. Informe técnico A6833, INGEMMET. Lima.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DESLIZAMIENTOS

Según Copons (2009) un deslizamiento es el movimiento de un terreno en la dirección o a través de una superficie de rotura, describiéndose así los de tipo rotacional o circular y los de tipo planar o traslacional (Figura 4). (p. 285)

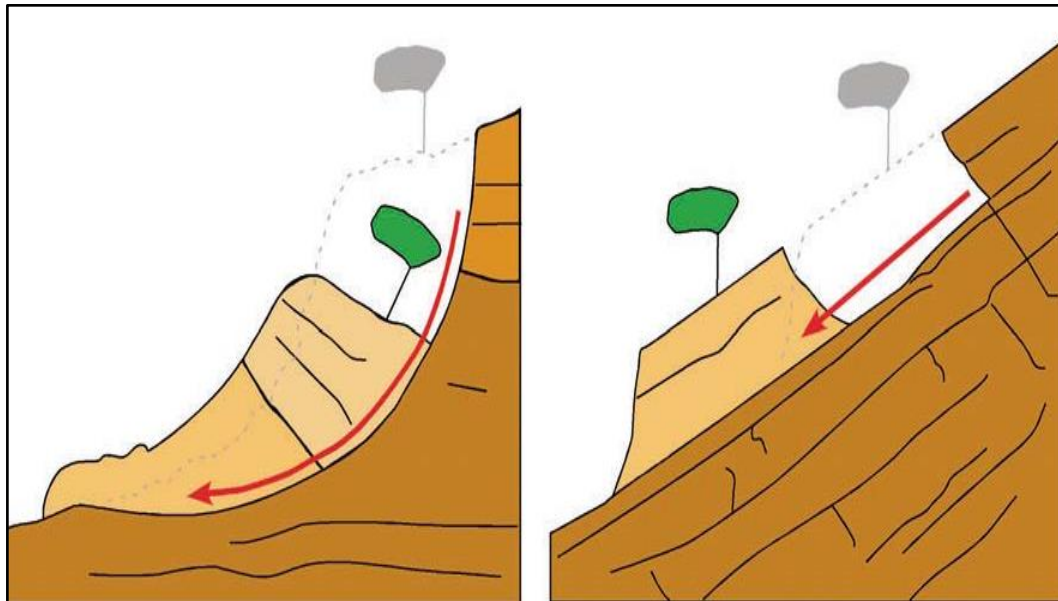


Figura 4. Esquema de deslizamiento rotacional (A) y traslacional (B) donde se puede apreciar el desplazamiento de la masa inestabilizada a través de una superficie de rotura neta. (Por cortesía del Servicio Geológico de Canadá).

Nota. Tomado de Copons, R., Tallada, A. (2009). Movimientos de ladera. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009.España. Vol. (17.3) 284-294. ISSN: 1132-9157.



Figura 5. Deslizamiento rotacional de Holbeck al sur de Scarborough (UK) en 1993. Afectó a un hotel, pero no hubo víctimas mortales porque los huéspedes fueron desalojados con anterioridad. (Por cortesía del Servicio Geológico Británico <http://www.bgs.ac.uk/landslides/holbeckHall.html>).

Nota. Tomado de Copons, R., Tallada, A. (2009). Movimientos de ladera. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009.España. Vol. (17.3) 284-294. ISSN: 1132-9157.

2.1.1. Caso Quilahuani

Seguidamente se presentan las causas de los deslizamientos, estudiados por otros autores, específicamente en el sector de Matarani:

Según Soncco (2018) entre las causas posibles, se puede considerar la litología presente, pendiente, precipitación o presencia de agua por acción antrópica, con una especial mención al mega deslizamiento de Quilahuani. (p.17)

Por otro lado, según Aro (2020) este deslizamiento fue provocado netamente por acciones antrópicas y la fuerte precipitación en el mes de diciembre de 2017 (p. 125)

2.1.2. Nomenclatura de un talud o ladera

Según Suarez (1998) describe ladera o talud como una masa de tierra con pendiente significativa. Técnicamente se define ladera, si su formación fue natural, o talud, si su conformación fue artificial. (p. 1) (Figura 6)

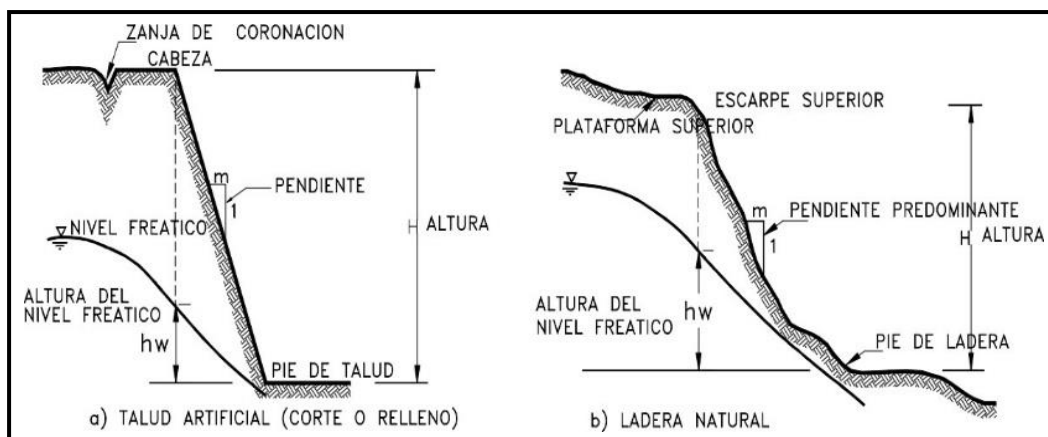


Figura 6. Nomenclatura de taludes y laderas.

Nota. En la presente imagen se muestra la nomenclatura para taludes (a) y laderas (b), destacando cada una de sus partes, tomado de Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Según Suarez (1998) los elementos que podemos encontrar en el talud o ladera son:

- **Altura.** Máxima distancia vertical tomada del pie a la cresta en un talud artificial, siendo así mismo, difícilmente, medida en laderas naturales por los accidentes topográficos poco definidos.
- **Pie.** Parte inferior de un talud con accidente topográfico marcado.
- **Cabeza o escarpe.** Parte superior de un talud con cambio topográfico marcado.
- **Altura de nivel freático.** Distancia vertical tomada desde la cresta de un talud hacia

el nivel de agua en profundidad.

- **Pendiente.** Inclinación presente en un talud o ladera la cual puede ser medible en grados, porcentaje o relación. (p. 2)

2.1.3. Nomenclatura de los procesos de movimiento

Según Suarez (1998):

Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera, pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo. (p. 3)

(Figura 7)

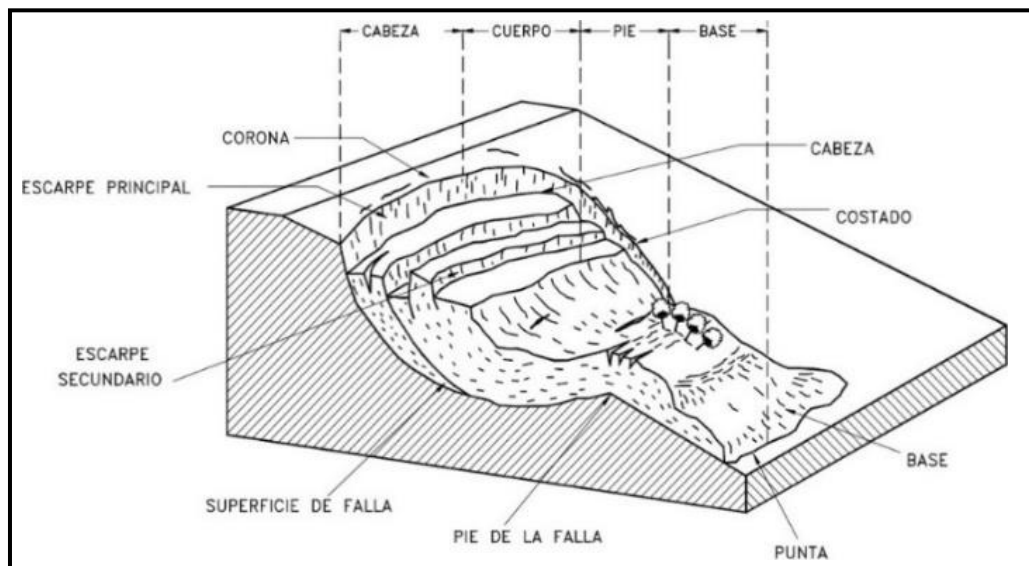


Figura 7. Nomenclatura de un deslizamiento.

Nota. En la presente figura se muestra un deslizamiento típico, con sus diversas partes, tomado de Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Partes de un deslizamiento según Suarez (1998):

- **Escarpe principal.** Corresponde a la primera parte de la superficie de falla principal la cual se extiende a lo largo de todo el movimiento o deslizamiento.
- **Escarpe secundario.** Superficie de falla secundaria en paralelo a la principal la cual fue producida por desplazamientos diferenciales.
- **Cabeza.** Parte superior al deslizamiento a lo largo del escarpe principal y bloques infrayacentes.
- **Cima.** El contacto más alto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Corona.** Parte superior del deslizamiento el cual no fue perturbado. (p. 3-4)

2.1.4. Dimensiones de deslizamientos

En el caso de las dimensiones de un deslizamiento podemos citar la terminología recomendada por el *IAEG Commission on Landslides* (1990). (Figura 8)

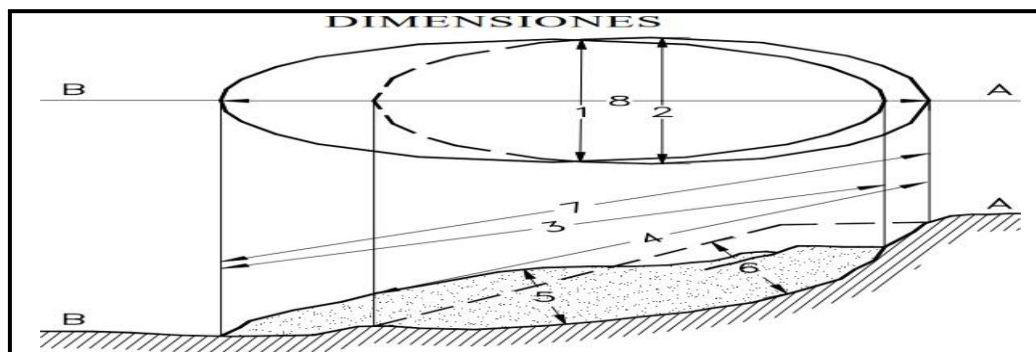


Figura 8. Dimensiones de los movimientos en masa

Nota. En la presente figura se enumeran las dimensiones a considerar en la geometría de un deslizamiento, tomado de IAEG Commission on Landslides. (1990). Suggested nomenclature for landslides. BULLETIN of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY de l'Association Internationale de GEOLOGIE DE L'INGÉNIEUR 41, 13-16.

Dimensiones según IAEG:

- **Ancho de la masa desplazada W_d .** Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .
- **Ancho de la superficie de falla W_r .** Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- **Longitud de la masa deslizada L_d .** Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- **Longitud de la superficie de falla L_r .** Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- **Profundidad de la masa desplazada D_d .** Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- **Profundidad de la superficie de falla D_r .** Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- **Longitud total L .** Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- **Longitud de la línea central L_{cl} .** Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

2.2. TELEDETECCIÓN (RADAR)

El autor Chuvieco (1995) refiere a la teledetección como el término para describir a los medios de observación remota o sensoramiento remoto, según la

expresión original “Remote Sensing”. (p.25).

Así mismo Chuvieco & Huete (2009) definen a la teledetección como:

La técnica de adquirir imágenes de la superficie terrestre con sensores que no están en contacto físico con ella (p.1).

Partiendo del marco de trabajo establecido por Chuvieco & Huete (2009), podemos incluir 6 componentes importantes sobre la teledetección (Figura 9), los cuales describen a continuación:

- **Una fuente de energía** o fuente de radiación electromagnética que va a ser detectada por el sensor, siendo entre las más importantes el Sol.
- **La superficie de la Tierra**, la cual es la que recibe la energía entrante y al interactuar con la vegetación, suelo y geomateriales presentes, reflejan una parte o energía residual hacia el sensor satelital.
- **El sistema sensor y su plataforma**. Son los encargados principalmente de medir y registrar la energía reflectante de la superficie. La plataforma en específico permite operar el satélite, desde su órbita hasta las telecomunicaciones y por ende transmitir la energía medida a la estación receptora terrestre.
- **La estación receptora**, es la encargada de recibir los datos medidos por el sensor y transformarlos en formatos manejables. De la misma manera permite pre procesar la información y corregirla antes de su distribución.

- **El analista**, quien mediante diferentes técnicas se encarga de darle valor aplicativo a la información recibida.
- **La comunidad de usuarios**, quienes utilizan estos productos temáticos en diferentes campos. (p. 2)

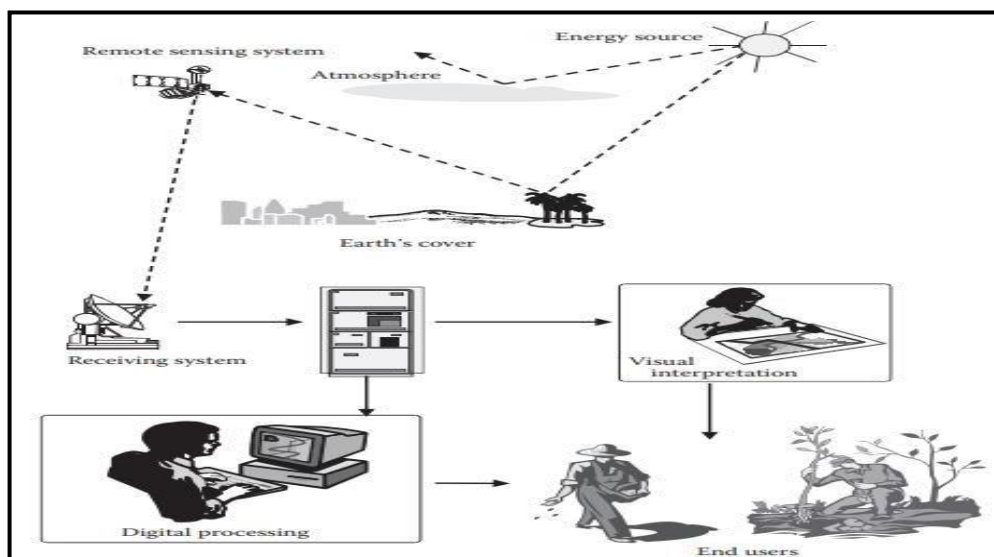


Figura 9. Principales componentes asociados a las actividades de teledetección.

Nota. En el presente grafico se describen los 6 componentes principales que interactúan en la teledetección según Chuvieco, E; Huete, A (2009). *Fundamentals of satellite remote sensing.* New York: CRC Press.

2.2.1. Sensores de radar

En Chuvieco (1995) podemos encontrar una referencia a radar como:

Acrónimo de *Radio Detection And Ranging* en inglés y *Detección y Localización por Radio* en español, es un sensor activo que funciona en las microondas, haciendo uso de ondas continuas de frecuencia modulada para detectar de forma precisa objetos estáticos o en movimiento. Se encuentran en la región del espectro electromagnético comprendida entre 1 m y 0.1 cm de longitud de onda, por esta

razón tiene la capacidad de trabajar en cualquier condición atmosférica. (p. 111)

Así mismo al consultar a Fernández (2009), nos dice que:

La interferometría trabaja con imágenes de RADAR de apertura sintética generadas por un sensor activo que emite y recibe su propia radiación en la banda del espectro electromagnético correspondiente a las microondas entre las longitudes de onda de 0.3 y 100 cm. (Figura 10) (p.34)

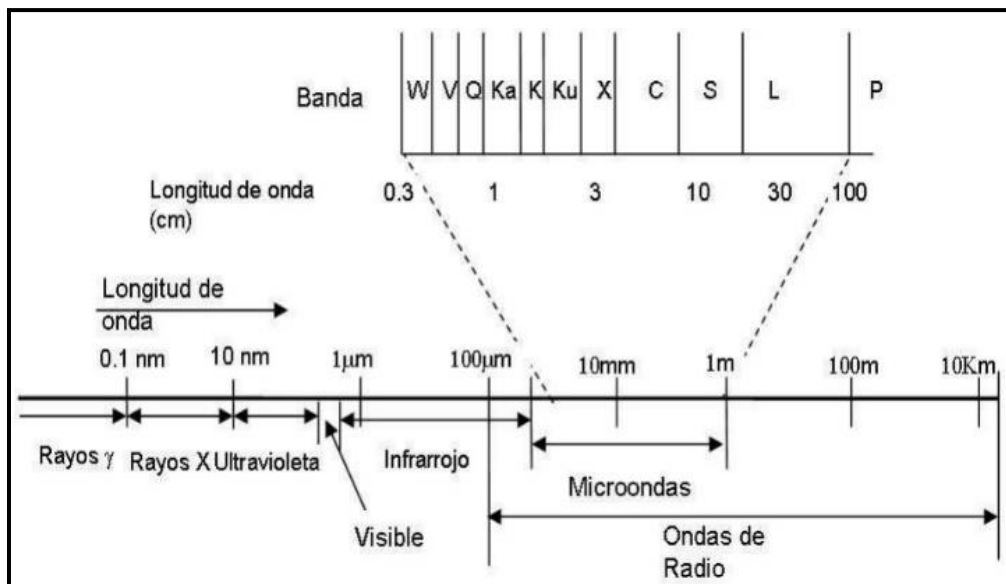


Figura 10. Longitudes de ondas usadas en Teledetección: Ampliación de las microondas.

Nota. En la presente figura se muestran las longitudes de onda que son alcanzadas por las ondas microondas, tomado de Fernández, M. (2009). Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR. Granada: Editorial de la Universidad de Granada.

Luego de presentar ambas perspectivas lo que queda claro es la precisión de las medidas tomadas respecto del radar, siendo estas a una escala milimétrica, y

aunque hasta hace una década se creía que en la mayoría de los casos no se ve afectado por las condiciones climáticas ni el tiempo en la toma de datos, existen casos en las que los efectos atmosféricos modificaron los resultados obtenidos brindando respuestas totalmente equivocadas.

2.2.2. Características de misiones SAR

La información que se presenta a continuación corresponde a una recopilación de las misiones SAR, considerando sus características como resolución, banda, polarización, entre otros, lo cual fue presentado por Tocasuche & Peñaloza (2018). (p.47)

Tabla 1
Cuadro comparativo de misiones SAR

Satélite	ALOS	ENVISAT	TERRA SAR-X	RADARSAT-2	COSMO SKYMED	SENTINEL-1
Lanzamiento	2006	2002	2007	2007	2007	2013
Banda	L	C	X	C	X	C
Polarización	HH o VV	HH o VV VV+HH	HH o VV HH+VV	HH o VV VV+VH	HH o VV VV+HH	HH o VV VV+VH
	VV+VH HH+HV VH+VV	HV+HH VH+VV	HH+HV VH+VV	HH+HV VH+VV	HH+HV	HH+HV
Resolución (m)	10-100	30x30	1.7-3.5x3	3-100	1-100	5x5 5x20 25x100
Angulo de Incidencia (°)	20-55	20-45	15-60	10-60	Necesitado	20-45
Ancho de Swath (km)	70-250	100-400	15-30	10-500	10-200	80 250 400

Nota. Tabla tomada de Tocasuche, N., & Peñaloza, L. (2018). Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias Norte y Valderrama del departamento de Boyacá. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

2.2.3. Beneficios de una constelación SAR

Entre los beneficios más destacados según Atisoft (2020) se encuentran:

- **Imágenes precisas en muy alta resolución.** A lo largo de los años, se ha experimentado con diferentes longitudes de onda para SAR, por ello, se ha comprobado que el uso de diferentes longitudes de onda se traduce en distintas ventajas. Por otro lado, un gran ancho de banda permite lograr una excelente resolución de rango de tierra.
- **Obtención de Imágenes 24/7.** Los sensores EO suelen depender de la iluminación solar, por lo tanto, la obtención de información de datos obtenidos en horario nocturno suele ser muy limitada.
- Las longitudes de onda de los sistemas de OE por lo regular no pueden penetrar bien a través de nubes, lo cual no es impedimento para las constelaciones SAR. Con las constelaciones SAR tenemos la ventaja obtener imágenes nítidas a cualquier hora y bajo cualquier circunstancia climática.
- **Imágenes bajo demanda.** Los satélites y constelaciones SAR suelen ser ágiles y cuentan con la capacidad de obtener imágenes desde diferentes direcciones y ángulos de visión. Por esta razón, es posible obtener imágenes más frecuentemente con menos satélites.
- **Monitoreo confiable del cambio global en 3D.** Los sensores SAR pueden detectar cambios en la superficie de la tierra a lo largo del tiempo a través de una variedad de técnicas avanzadas. La detección coherente de cambios es exclusiva

de SAR y aprovecha la información de fase de la señal devuelta para detectar cambios más sutiles en la superficie de la tierra, como podrían serlo: nuevas huellas de neumáticos en un camino de tierra o la aparición de un cultivo en un campo recién plantado, entre otros.

- **Modelos de elevación precisos.** Como ya se mencionó en el punto pasado, los sistemas SAR brindan una capacidad única para caracterizar con precisión la topografía y las características de la superficie en 3D. Esto se logra gracias al uso de imágenes bistáticas con dos satélites los cuales vuelan en formación, o a través de un enfoque llamado radargrametría para crear imágenes tridimensionales.

2.2.4. Distorsiones de las imágenes radar

El autor Fernández (2009) nos dice que:

La geometría de las imágenes RADAR difiere de las imágenes de teledetección óptica, ya que los sensores radar tienen visión lateral, por lo que las imágenes RADAR tienen forma rectangular y una resolución decreciente entre las zonas más próximas al sensor (*near range*) y las zonas más alejadas (*far range*). (Figura 11) (pp. 34-35)

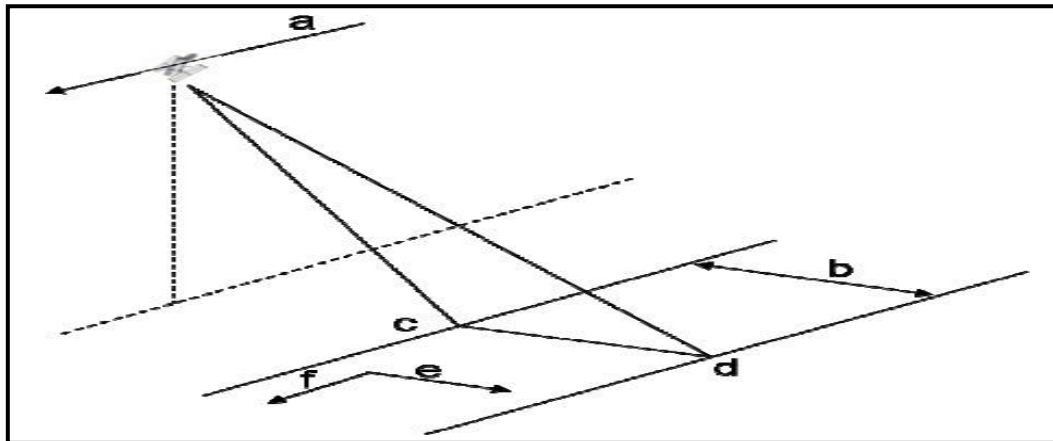


Figura 11. Geometría de toma de imágenes radar; A: trayectoria del sensor; B: distancia perpendicular sensor-superficie terrestre; C: zona de captura del sensor o huella; D: rango en la dirección perpendicular al sensor (across-track); E: rango en la dirección del sensor (along-track).

Nota. En la presente figura se muestra la geometría distribuida de la toma de imágenes radar de acuerdo con Fernández, M. (2009). Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR. Granada: Editorial de la Universidad de Granada.

2.2.5. Interferometría de radar

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) según Rosen, et al (2000) Es una técnica que nos permite medir los cambios a lo largo del tiempo de la topografía de una misma zona o área de superficie a través de los patrones de interferencia construidos al comparar dos imágenes SAR o par interferométrico.

El producto que se obtiene de esta comparación de imágenes SAR en diferentes etapas de tiempo y espacio es llamado interferograma, conteniendo información de geometría relativa y patrones de interferencia los cuales pueden ser aplicados de manera cuantitativa a la geodesia, gestión de riesgos, etc.(p.333)

En el mismo ámbito Tocasuche & Peñaloza (2018) hacen mención de la técnica DInSAR, como una capaz de medir desplazamientos a escala centimétrica y según la variación de esta a escala milimétrica. Los programas que ejecutan esta

técnica se encargan de extraer con base en las imágenes radar brindadas, el desplazamiento de manera cuantitativa, que a diferencia del INSAR tradicional el cual está diseñado para extraer elevaciones de la superficie.

Entre las aplicaciones más usuales del DInSAR podemos citar fenómenos como subsidencias y levantamientos del terreno, movimientos en un volcán, deslizamientos de laderas y sismos, minería, hidrocarburos, explotación de acuíferos entre otros.

Esta herramienta o técnica resulta ser muy importante en la mitigación y prevención de riesgos, debido a que facilita mediante un monitoreo continuo DINSAR, el conocer la dinámica de deformaciones del terreno evitando así pérdidas de vida, infraestructura y afecciones a la economía de la región. (p. 63)

2.2.6. *Permanet scatteres PS (dispersores permanentes)*

La técnica de dispersores permanentes se la debemos a Ferretti, et al (2001), y en palabras de Fernández (2009) es una de las más extendidas y se basa en la estimación de la velocidad en ciertos puntos de las imágenes que son denominados Permanet Scatteres (“Dispersores Permanentes” (PS)). Dichos puntos son secciones de la superficie que no han sufrido alguna perturbación en el periodo analizado a través de todas las imágenes evaluadas. Para ello, deben cumplir la condición de tener una amplitud estable en todas las imágenes. De todos los PS detectados como candidatos, serán considerados verdaderos PS aquellos que tengan una coherencia

por encima del umbral. Además, para que el análisis pueda llevarse a cabo es necesario que haya una densidad mínima, de más de 25 por km².

A diferencia de la técnica DInSAR clásica y otras, es necesario una mayor cantidad de imágenes, al menos unas 30, y que todas ellas tengan la misma imagen maestra, lo que, en algunos casos, resulta difícil. Sin embargo, el hecho de que el tamaño de los PS sea menor que la resolución de la celda, hace posible el uso de interferogramas con línea base grande. Con ella se estima, para cada uno de los PS, las componentes lineal y no lineal del desplazamiento y las correcciones topográficas, considerando los efectos atmosféricos. (p. 45)

2.3. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

2.3.1. *Leica GeoMoS*

El software Leica GeoMoS, es un programa de monitoreo por excelencia que se encarga de monitorear bajo coordenadas locales diferentes puntos topográficos, valiéndose de prismas, estaciones robotizadas, tableros de reflectancia, los cuales miden las diferencias a través del tiempo bajo vectores transversales, longitudinales y de altura, obteniendo también velocidades, aceleraciones, entre otros.

La siguiente información descrita en este punto corresponde al brochure de presentación del software GeoMoS, propiedad de la empresa Leica Geosystem.

- Auscultación automática: En el marco del crecimiento de la vida cotidiana del hombre, este construye y fabrica diferentes equipos y estructuras de gran

envergadura para su bienestar, así como su comodidad cobrando así gran protagonismo la auscultación de estas estructuras.

Debido a la gran importancia de estas estructuras para la vida del hombre es importante obtener la información sobre posibles anomalías como deformaciones en ellas, y más aún la rapidez con que se haga dicha tarea.

Es así que la automatización del monitoreo para una rápida respuesta frente a datos que sobrepasen los umbrales de seguridad en estas estructuras ha representado en las últimas décadas un reto en cuanto a la precisión, rapidez y medidas de mitigación para salvaguardar todo lo que confluye en la vida del hombre

- Leica GeoMoS representa una aplicación muy útil formada por Monitor; quien gestiona los datos, cálculos y sucesos; y Analyzer quien analiza procesa y presenta los resultados de los datos. (Figura 12 y 13).

Tabla 2
Diferencias entre el GeoMoS Monitor y Analyzer

GeoMoS Monitor	GeoMoS Analyzer
Unidad de auscultación central para adquisición de datos y control múltiple del sensor.	Análisis gráfico y numérico. Importación y exportación de datos.
Motor para terceros programas con base de datos SQL abierta.	Mejoras en la calidad mediante la edición y postprocesamiento de datos.
Gráficos en tiempo real que muestran el estado del sistema.	Mapa del sitio con información de estado.

Nota. Fuente: Tomado del Brochure informativo de Leica GeoMoS,

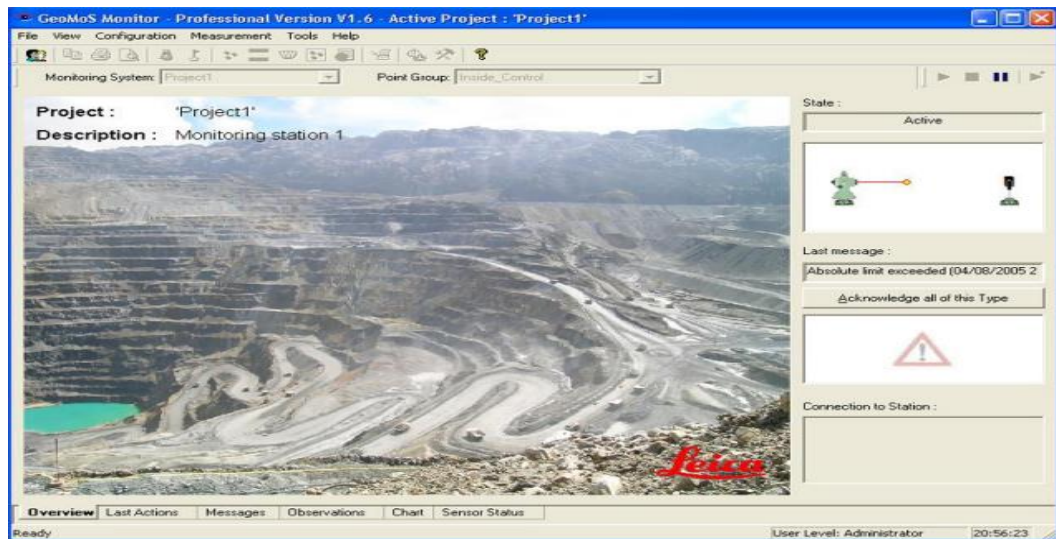


Figura 12. GeoMoS Monitor

Nota. En la presente figura se observa las funcionalidades del GeoMoS Monitor, en la cual se configura el proyecto, el ciclo de toma de datos, así como el método de búsqueda. Tomado del Brochure informativo de Leica GeoMoS.

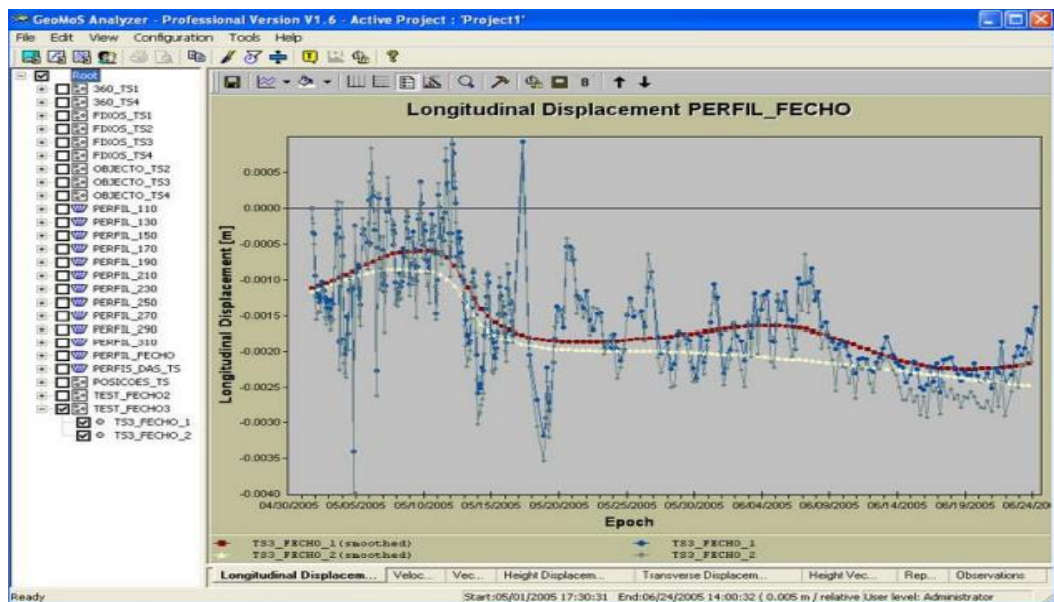


Figura 13. GeoMoS Analyzer

Nota. En la presente figura se denota el GeoMoS Analyzer, el cual provee la información recolectada y se encarga de obtener los vectores transversales, longitudinal y de altura, velocidades, aceleraciones y demás. Tomado del Brochure informativo de Leica GeoMoS.

2.3.2. Extensómetros

Los extensómetros son equipos utilizados para medir el desplazamiento de puntos fijados por el Geotecnista, que permitirá prever desplazamientos de gran envergadura y tomar medidas frente a diferentes situaciones. Entre los diferentes equipos podemos mencionar los extensómetros de cinta y cable.

- **Extensómetros de cinta:** Este tipo de equipo mide la distancia entre dos puntos específicos en un lugar determinado de la operación, generalmente según la experiencia, al identificar una grieta de tracción y considerándose como potencial inestabilidad, se procede a colocar 2 puntales en ambos lados de la grieta y se procede a medir la distancia entre ellos periódicamente, mediante una cinta métrica digital. A la vez existen 2 tipos de extensómetros de cintas, mecánicos y electrónicos (Fotografía 1), con la diferencia de que el electrónico, puede conectarse a la oficina y recabar información remotamente.

Fotografía 1. *Extensómetro de cinta.*



- **Extensómetro de cable:** Este tipo de extensómetro, se coloca bajo el mismo criterio anteriormente descrito, ya que el objetivo es identificar si el talud monitoreado se está desplazando. Además, consta de un trípode, el cual, en conjunto con una polea, un cable y una pesa de una magnitud a criterio del Geotecnista, se va midiendo periódicamente si la pesa se está desplazando hacia arriba o abajo, considerando de esta manera el movimiento del talud.

2.3.3. Radar interferométrico

Los radares en el ámbito de la geotecnia se usan desde hace más de una década, debido a que es capaz de escanear la pared de la operación minera, o área a evaluar, a nivel sub milimétrico las deformaciones que sufre el terreno, con tal exactitud que a la fecha se consolida como uno de los mejores equipos para el monitoreo de estabilidad de taludes, incluso frente a situaciones adversas como el polvo, nubosidad, lluvia y otras condiciones.

La información contenida en este punto corresponde al brochure informativo de la empresa IDS GeoRadar. IBIS-FM es el primer Radar de Apertura Sintética diseñado y desarrollado específicamente para el monitoreo en tiempo real de los taludes de las minas a cielo abierto (Fotografía 2). Cada detalle ha sido perfectamente afinado para satisfacer los exigentes requisitos de los ambientes mineros más difíciles. La colaboración permanente con los profesionales de la minería, garantizan mejoras constantes en tecnología y actualizaciones.

- Cobertura en tiempo y espacio:

La extremadamente alta resolución y el motor de procesamiento multi escala patentado, garantizan que el IBIS-FM mida con precisión las múltiples escalas de desplazamientos que van desde el sub-banco, hasta los movimientos totales de los taludes. Aceleración en zonas débiles con riesgo de colapso (cm/h) y monitoreo en zonas de movimiento lento progresivo (mm/mes), para así brindar soporte al área de planeamiento mina implementando medidas de mitigación. Todo en tiempo real.

- Comportamiento frente a condiciones climáticas

La tecnología IBIS es capaz de proporcionar datos de desplazamiento fiables con precisión sub-milimétrica, gracias al empleo del algoritmo automático de corrección atmosférica más avanzado disponible en el mercado hoy en día, siendo capaz de adaptarse en tiempo real a todos los cambios climáticos repentinos, típicos de las condiciones mineras extremas, incluso en los climas más difíciles. Todos sin necesidad de alguna entrada por parte del usuario.

- Integración de radares

La integración de dos o más sistemas IBIS con la plataforma FPM360, permite a los usuarios aprovechar la capacidad única de monitoreo completo del pit. El usuario dispone de una vista universal en tiempo real del tajo mediante la integración de múltiples conjuntos de datos radar IBIS en una sola plataforma visual integrada tal como destaca la figura 15, para la gestión completa de los

riesgos de colapso de taludes y el perfecto control del comportamiento de la roca. El FPM360 reduce la carga de trabajo, eliminando la necesidad de reproducir las mismas tareas en varias estaciones de trabajo. (Figura 14 y 15)



Fotografía 2. Radar de apertura sintética, IDS GeoRadar.

Nota. En la presente fotografía se observa el radar, siendo este de apertura sintética debido a que oscila de izquierda a derecha, cubriendo un ángulo determinado hacia una sección de la operación. Tomado del brochure informativo de la empresa IDS GeoRadar.













APLICACIONES	BENEFICIOS
 Monitoreo crítico de seguridad (desplazamientos rápidos)	 Una tecnología para el monitoreo táctico y estratégico con cobertura a gran escala en tiempo y espacio
 Detección temprana de movimientos lentos en apoyo a la planificación de la mina y al análisis geotécnico	 Corrección atmosférica automática más avanzada, capaz de reaccionar a cambios repentinos de la atmósfera. No se requieren áreas estables y los datos están disponibles desde el segundo escaneo
 Monitoreo continuo a largo plazo (conjuntos de datos a largo plazo dentro de un solo proyecto)	 Instalación semi-permanente: establecer y olvidar (interior/exterior)
 Cobertura amplia del área con un largo alcance (4500m)	 Alta disponibilidad de servicio comprobada: un número limitado de piezas móviles y bajos requerimientos de mantenimiento (mínimo tiempo de inactividad)
 Monitoreo de vertederos, estériles y tranques de relaves	 Composición modular con herramientas opcionales disponibles, para cumplir con los requisitos específicos de los usuarios finales
	 Componentes comunes de hardware y piezas críticas compartidos entre todos los radares IBIS, proporcionando el ahorro en costos y soluciones rápidas a los problemas
	 Integración con la red completa de monitoreo del tajo FPM360

Figura 14. Aplicaciones y beneficios del GeoRadar

Nota. En la presente figura notamos la aplicaciones y beneficios del radar en las operaciones. Tomado del brochure informativo de la empresa IDS GeoRadar.

- Composición Modular



Figura 15. Hardware del GeoRadar, IDS GeoRadar

Nota. En la figura 14 notamos los equipos necesarios para mantener el radar funcionando 24x7, generador de energía por combustible, energía eléctrica, energía solar, así como la toma de datos atmosféricos para hacer las correcciones debidas. Tomado del brochure informativo de la empresa IDS GeoRadar.

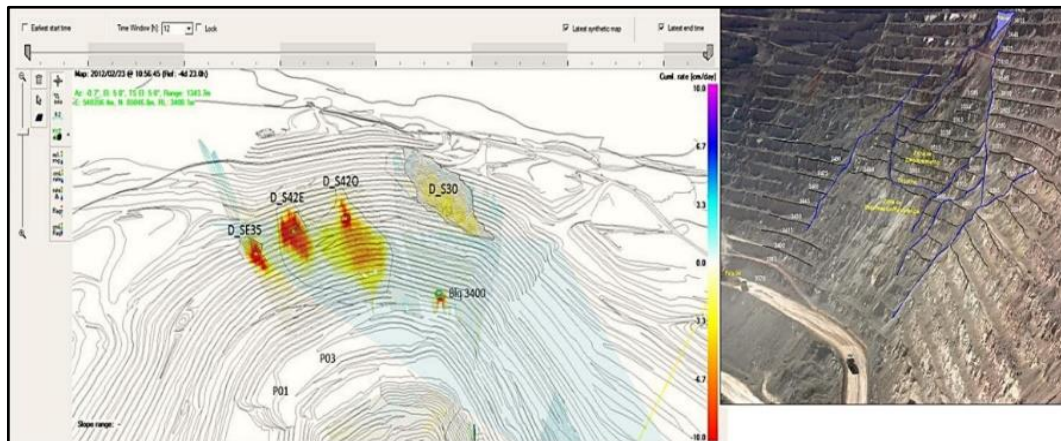


Figura 16. Software del GeoRadar, IDS GeoRadar

Nota. La figura 15 corresponde al monitoreo con radar en la Mina Cuajone, donde se destacan bajo coloraciones calientes los desplazamientos y al lado izquierdo una fotografía del terreno. Tomado de la presentación de PERUMIN 31 Convención Minera, Raúl Veramendi, Super. de Geotecnia SPCC, 2013.

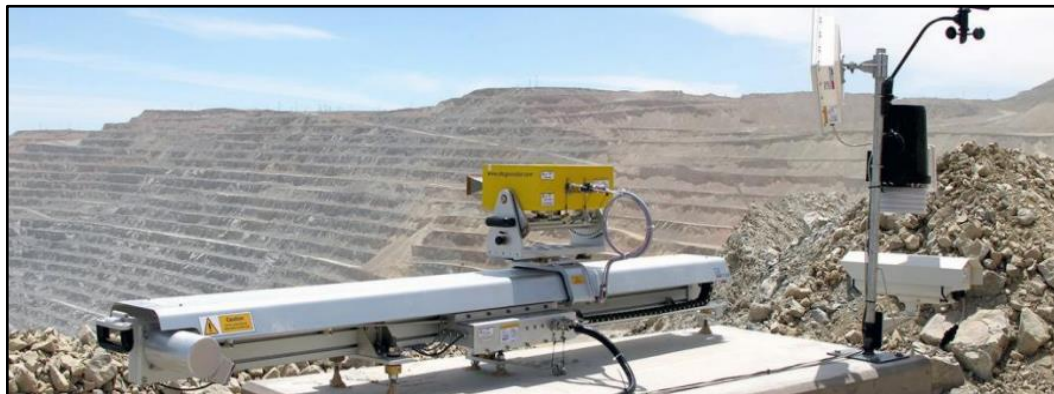
Tabla 3

Características del hardware y software necesarios para el GeoRadar.

Características del hardware	Características del software
<ul style="list-style-type: none">• Alta resolución espacial (celda de resolución de 0,5 x 4,4m a 1000 m).• Intervalo de funcionamiento largo (desde 10m hasta 4500m).• Tiempo de escaneo rápido (3 minutos).• Amplia cobertura del área (alrededor de 5000m² a 2000m).• Operación totalmente remota (enlace de radio inalámbrico) y tamaño de archivo optimizado para un ancho de banda bajo.• Opción de auto-alimentación con una combinación de paneles solares y baterías, con generador diésel de respaldo.• Funciona en todas las condiciones climáticas y temperaturas (desde -25/-50°C * hasta 55°C)	<ul style="list-style-type: none">• Generación de alarmas con niveles definidos por el usuario y múltiples criterios de alarma.• Configuración de proyecto en un simple toque con geocodificación automática.• Cero retrasos en el procesamiento de datos y generación de alarmas, proporcionando un flujo de trabajo sin fisuras para la reacción inmediata del usuario.• Manejo interactivo de datos 3D y salida totalmente georreferenciada.• Interfaz de salida amigable de formatos de exportación para la mayoría de los paquetes de software de planificación minera y la posibilidad de importar capas digitales.• Herramientas integradas de análisis geotécnico.

Fotografía 3.

Radar de apertura sintética, IDS GeoRadar.



Nota. En la presente fotografía podemos observar el radar de apertura sintética en conjunto con su fuente alimentación y los equipos para la medir las condiciones atmosféricas. Tomado del brochure informativo de la empresa IDS GeoRadar.

2.3.4. Piezómetros

Los piezómetros son tuberías colocadas a lo largo de perforaciones en la operación con el objeto de medir el nivel freático y así poder monitorear el mismo durante el laboreo. Entre los diferentes piezómetros existentes podemos mencionar según Gonzales (2002) a la tubería piezométrica ranurada, piezómetros abiertos y piezómetros cerrados los cuales pueden ser observados en la figura 17.

- **Tubería piezométrica ranurada:** Básicamente consiste en un tubo por lo general de PVC el cual presenta pequeñas ranuras a través de su circunferencia siendo instalado en una perforación con el propósito de medir el nivel freático en algún punto requerido. El nivel freático siempre y cuando sea un acuífero libre es alcanzado días después de acabada la perforación e instalado el piezómetro, donde el agua ingresa a través de las ranuras del tubo hasta el punto de encontrar un periodo de estabilización que represente el nivel de agua. La forma en la que este es medido involucra la utilización de un sensor acoplado a una cinta métrica el cual es bajado a través de la tubería, quien al contacto con el agua hará un sonido característico indicando así la profundidad a la que este nivel es encontrado, entre los más comerciales tenemos wáter level o también el conocido pozómetro
- **Piezómetro abierto o de Casa Grande:** Este consiste en el uso tuberías ciegas y ranuradas, estas últimas utilizadas generalmente en zonas de interés con abundante flujo de recurso hídrico. Obteniendo por lo general la altura del nivel

freático en esta zona de interés.

- **Piezómetro cerrado o de cuerda vibrante:** consiste en la instalación de un sensor de lectura para la presión intersticial en un determinado punto, enviando inmediatamente la información a un sensor exterior para su evaluación. El transductor de acuerdo a su requerimiento puede ser neumático, el cual está ubicado entre el sensor y la unidad exterior, por lo general en distancia menores a 200 metros de resistencia eléctrica, los cuales pierden precisión al tener variaciones en la temperatura, y los de cuerda vibrante que permiten enviar señales a distancias mayores a 1.000 metros sin perder precisión, midiendo presiones en diferentes tramos y en zonas poco permeables siendo también entre los menos afectados por los posibles movimientos del terreno. (p. 366)

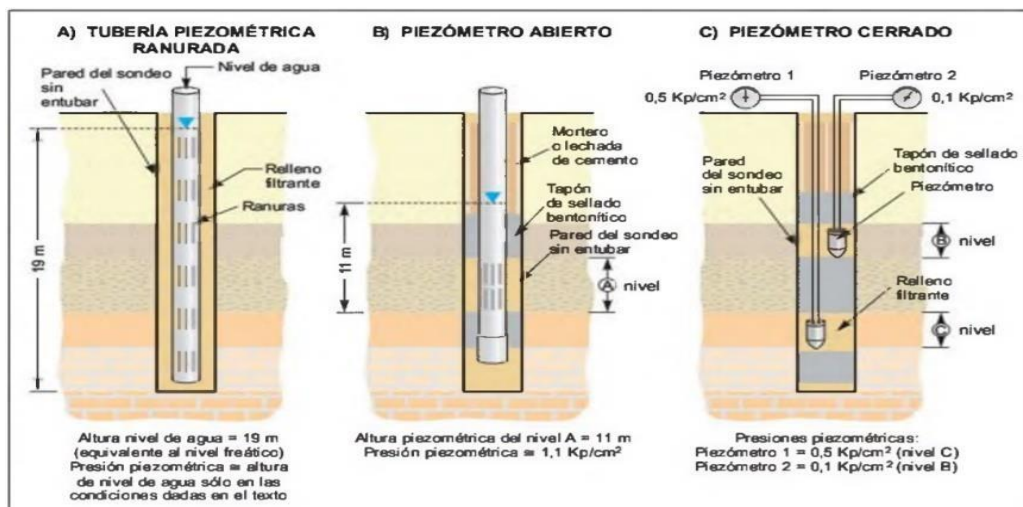


Figura 17. Tipos de Piezómetros

Nota. En la presente figura se observa los piezómetros abiertos, cerrado y de tubería ranurada con sus respectivas partes. Tomado de Ingeniería Geológica. Por González de Vallejo, L. (2002). Madrid: Pearson Educación.

2.3.5. *Inclinómetros*

Según Gonzales de Vallejo (2002) los inclinómetros son equipos principalmente utilizados en zonas de posible deslizamiento para evaluar movimientos transversales a un sondeo. Básicamente consiste en la inserción de un sensor a través de las ranuras del inclinómetro el cual irá midiendo mediante señales eléctricas proporcionales a la inclinación en diferentes profundidades y tiempos, permitiendo así cuantificar los movimientos existentes respecto de una línea base.

(p. 364) (Figura 18)



Figura 18. *Equipo inclinométrico (cortesía de Ingeniería de Instrumentación y Control.)*

Nota. En la presente figura se observa el inclinómetro, así como el equipo que se utiliza para registrar las diferentes medidas y el tiempo de medida. Tomado de Ingeniería Geológica. Por Gonzáles de Vallejo, L. (2002). Madrid: Pearson Educación.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE DATOS GEOTÉCNICOS

2.4.1. Estadística en la geotecnia

En el campo de la ingeniería geotécnica, específicamente en lo que respecta a la mecánica de rocas y mecánica de suelos, la recolección de datos referentes a las propiedades de los geomateriales, siempre ha sido y será de vital importancia para poder explicar los diferentes fenómenos propios de la naturaleza. Sin embargo, el solo hecho de recolectar estos datos no es suficiente, ya que pueden mostrar sesgo por errores humanos, errores de equipo o una mala metodología a la hora de ejecutar los diferentes ensayos, es ahí donde entra la estadística, tratando de reducir la incertidumbre de los datos geotécnicos, como densidad, desplazamiento, UCS, ángulo de fricción, cohesión, entre otros.

Para las propiedades antes mencionadas, según (Fenton, 1997), es posible identificar las distribuciones estadísticas que estas tienen (Tabla 4), y con base en ellas hacer los diferentes análisis, como estabilidad de taludes, para lo cual más allá del factor de seguridad se identificará la probabilidad de falla que sumado a la sectorización por importancia de sector en mina, puede darse un resultado más robusto respecto a la estabilidad del tajo, entre otros.

Tabla 4*Comportamientos más comunes para variables continuas.*

Distribution	PDF	Mean	Variance	Explanation	Example
Uniform	$f_x(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$		test bias
Triangular	$f_x(x) = \begin{cases} \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{u-a} \right) & a \leq x \leq u \\ \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-u} \right) & u \leq x \leq b \end{cases}$	$\frac{a+b+u}{3}$	$\frac{1}{18}(a^2+b^2+u^2 - au - bu - ab)$		construction cost
Exponential	$f_x(x) = \nu e^{-\nu x}, \quad x \geq 0$	$\frac{1}{\nu}$	$\frac{1}{\nu^2}$	X represents the time between independent occurrences, where ν is the ave. occurrence rate	earthquake return period
Normal	$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$ $-\infty < x < \infty$	μ	σ^2	X represents the sum of many random variables	soil strength
Lognormal	$f_x(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln x}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2}$ $x \geq 0$	$e^{\mu_{\ln x} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln x}^2}$	$\mu_x^2 (e^{\sigma_{\ln x}^2} - 1)$	X represents the product of many random variables	hydraulic conductivity

Nota. Se presentan los comportamientos estadísticos más comunes de variables continuas en geotecnia. Tomado de Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, por Fenton, G. (1997) Utah: ASCE Geotechnical Safety and Reliability Committee.

2.4.2. Análisis exploratorio de datos (eda)

El proceso de análisis de la información consta de tres partes específicas, que pueden ser consultadas en cualquier bibliografía referente a la creación de algoritmos y procesos de análisis en computación.

Los tres pilares fundamentales para un análisis correcto de la información en primera instancia son: un conocimiento profundo del tema, sólidas bases estadísticas y conocimientos en computación que ayudarán para la automatización de los procesos. (Figura 19)



Figura 19. Ciencia de datos.

Nota. La presente figura expresa las diferentes áreas que ha de considerarse en la ciencia de datos, como estadística, conocimiento del tema, computación y las relaciones entre ellas. Propuesta por Erick López Ovando.

Estos campos son contemplados muy bien en lo que es “Data Science”, que al interactuar entre las mismas generan campos como, el aprendizaje automático, machine learning, analítica de datos, etc. La utilización de estos conceptos, si bien es cierto proporcionan muchas ventajas, el aplicarlos por ejemplo sin los conocimientos estadísticos básicos, puede llevar a la interpretación de resultados erróneos pudiendo generar pérdidas millonarias a cualquier empresa, no solo en el rubro minero.

Centrándonos una vez más en el análisis de la información podemos también citar las siguientes partes fundamentales:

- Ordenamiento y limpieza de datos: esta sección consiste en separar la

información útil, que va a ser utilizada para los análisis a realizarse en el siguiente punto. Se espera que aquí pueda identificarse los errores de equipo y humanos, siendo estos los mayores problemas en lo que respecta a la analítica de datos.

Es por ello, que si damos un vistazo en que parte del proceso en general los científicos de datos utilizan más su tiempo (Figura 20), podemos notar que lo hacen en esta sección.

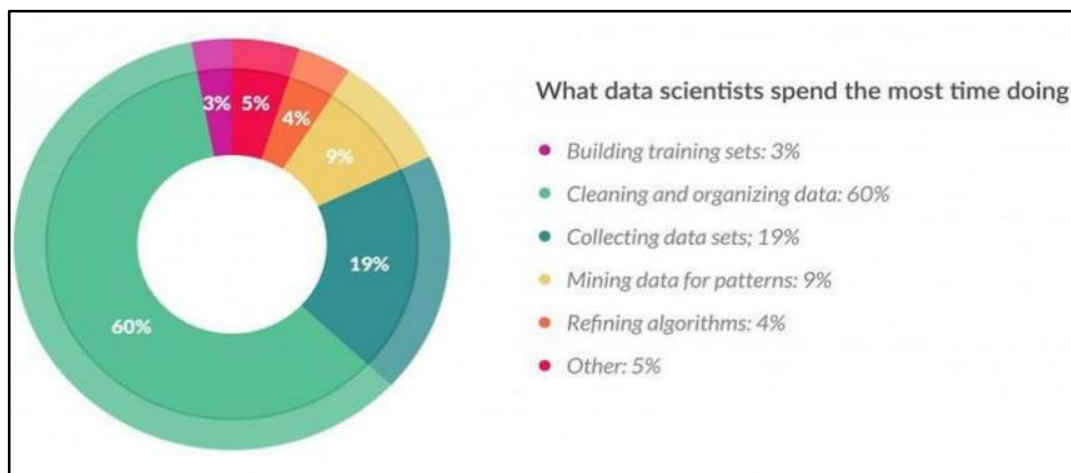


Figura 20. *¿En qué invierten más el tiempo los científicos de datos?*

Nota. Tomado de una encuesta hecha por Forbes, 2016.

Así mismo por la importancia de esta sección, se hace más larga y tediosa la tarea, pero si hacemos de igual manera una consulta sobre qué actividad resulta la menos atractiva en lo que respecta a la ciencia de datos (Figura 21), efectivamente, encontramos que se trata de la misma, ordenamiento y limpieza de datos.

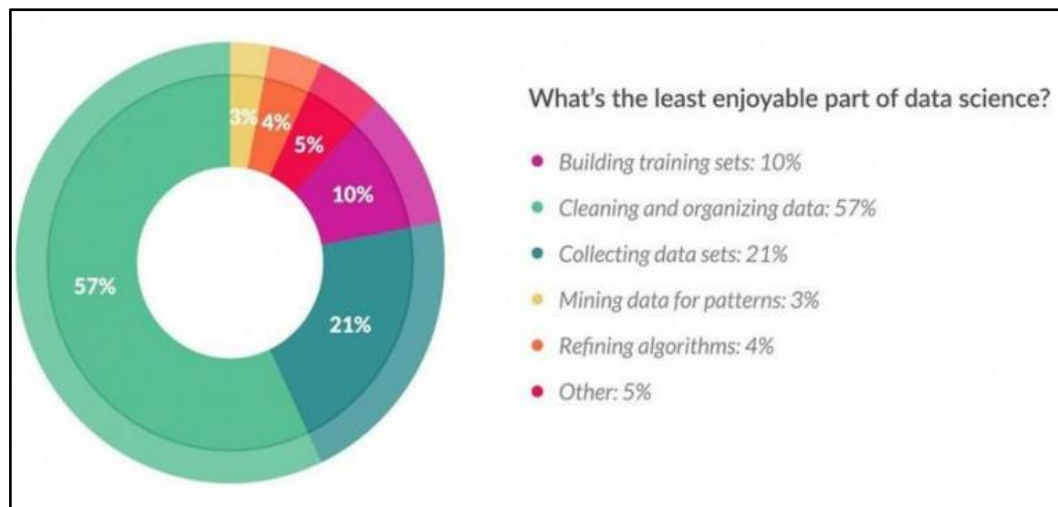


Figura 21. ¿Cuál es la parte menos agradable de la ciencia de datos?

Nota. En la presente figura se muestra la distribución de las actividades menos amenas en la ciencia de datos. Tomado en una encuesta hecho por Forbes, 2016.

- Procesamiento y generación de modelos: Esta sección corresponde al desarrollo de algoritmos y metodologías de análisis, dividiéndose a la vez en tres grandes campos, el diseño que es plasmado en el diagrama de flujo para el algoritmo, la codificación propiamente dicha y la validación del modelo como punto final.
- Análisis y toma de decisiones: Esta sección básicamente corresponde a la obtención de nuevo conocimiento a partir de lo procesado anteriormente, y con base en ello, se procede a tomar decisiones que afectarán a la operación en cuestión.

2.4.3. Tratamiento de datos

En este punto se darán a conocer algunos conceptos básicos que pueden ser aplicados para el tratamiento estadístico de los datos en el ámbito de la geotecnia minera.

- Media: También llamado promedio, se obtiene de dividir la sumatoria total de los datos entre el número de los mismos.
- Mediana: La mediana de un conjunto de datos es el número de en medio una vez que este haya sido ordenado de mayor a menor y si en caso coincide que hubiese dos números con estas características, la media se obtendrá de dividir estos entre dos.
- Moda: Número que tiene más apariciones en un determinado paquete de datos.

Estas tres medidas son las más conocidas en la estadística, sin embargo, si la distribución de los datos a observar no cumple con una distribución normal, la media deja de ser una medida representativa, pudiendo ser esta la mediana o la moda. Todo el análisis tiene que ser elaborado con base en la distribución probabilística de los datos, de ahí que resulta tan importante el aplicar dichas medidas.

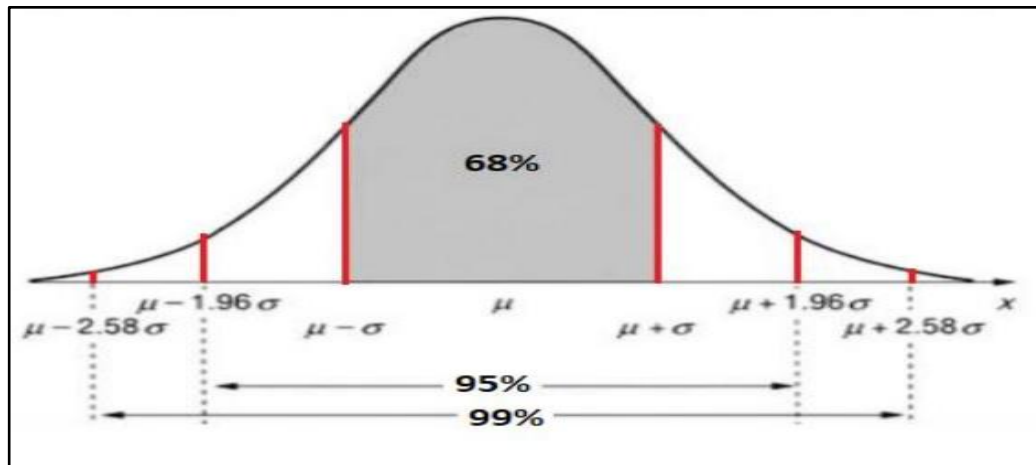


Figura 22. Distribución probabilística Normal.

Nota. En esta figura se muestra los diferentes intervalos de confianza con base en la desviación estándar y el valor de los Z crítico.

Algunas distribuciones conocidas, como por ejemplo Log Normal, que usualmente se ajusta a valores de Dip/Dip Direction o los valores de resistencia que mantienen un comportamiento de distribución Normal, son algunos de los cuales hay que tener en cuenta, y si no tuviera esas distribuciones en mis datos, significaría que necesito más datos o validar la información.

- Desviación estándar: Es una medida que cuantifica la variación o dispersión de un número determinado de datos, es también conocida como desviación típica.
- Intervalos de confianza: Estos intervalos sirven para discriminar cierta información que están por fuera de estos intervalos. Básicamente consisten en aplicar las desviaciones estándar y multiplicar por los Z críticos considerando un porcentaje del total de datos, entre el más usual y conocido, está el 1,96 o 95 % de intervalo de confianza.

Tabla 5*Intervalos de confianza en una distribución Normal.*

Valores de $Z_{\alpha/2}$ para los niveles de confianza más usados			
Nivel de confianza	α	$\alpha/2$	$Z_{\alpha/2}$
90%	0,10	0,05	1,645
95%	0,05	0,025	1,96
99%	0,01	0,005	2,576

Nota. En la presente figura se muestra los valores de alfa como intervalos de confianza, así como el porcentaje de datos que se contienen en ese intervalo.

- Media móvil: La media es quizá la herramienta que más se utiliza cuando se trata de suavizar el ruido producido por diferentes equipos, como el inclinómetro o los prismas, sin embargo, el solo hecho de aplicarlo no es suficiente, se necesita que el periodo en que se va a aplicar la media móvil vaya acorde a la operación minera, y en concordancia con el tipo de equipos que se tienen, así como las características del macizo rocoso. A continuación, se hace una demostración de la aplicación de la media móvil en el software libre RStudio (Figura 23), además de aplicar la predicción del comportamiento de los datos, mediante el Forecast, el cual permite en base a los datos estimar tendencias y predecir futuros valores bajo el código descrito en la figura 24.

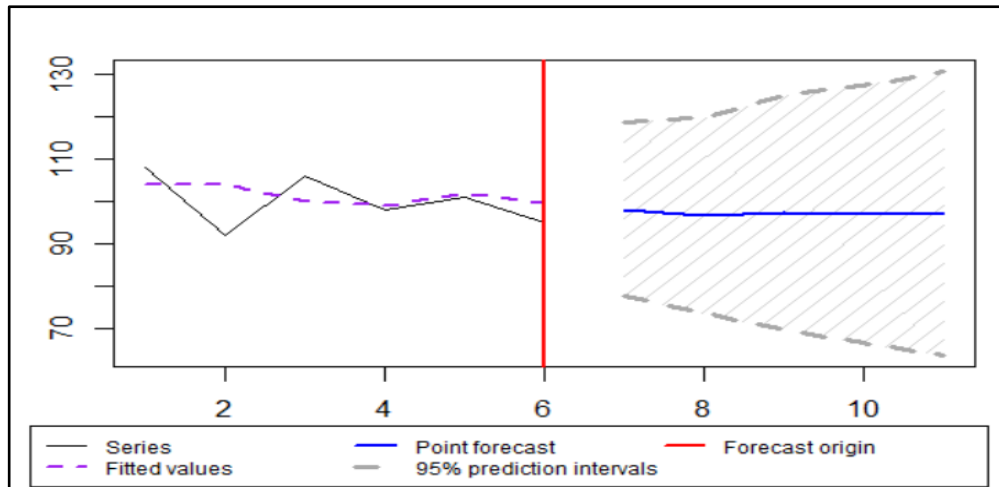


Figura 23. Forecast de x datos.

Nota. En la presente figura se hace la demostración del método Forecast para la predicción de datos, iniciando en que dicho ejemplo se desarrolló con datos aleatorios. Fuente propia.

```
#Estructura para la media móvil y predicción de datos
#####
library(smooth)

#Cargamos los datos para pronosticar ventas:
datos <- c(108,92,106,98,101,95)

#Graficamos:
plot(ts(datos))

##Ajustamos los datos del modelo SMA: donde "order" es el N del promedio móvil:
mediamovil <- sma(ts(datos), order=2)

#Realizo el pronostico deseado: donde "h" es el numero de periodos a pronosticar:
pronostico <- forecast(mediamovil, h=5)
plot(forecast(pronostico))
```

Figura 24. Estructura para el ejemplo Forecast en Rstudio.

Nota. En la presente figura se muestra el código generado en Rstudio para la aplicación de la herramienta forecast que facilita la predicción del comportamiento de los datos. Fuente propia.

2.4.4. Estimaciones de tiempo de falla

Con el hito anteriormente descrito, podemos pasar a unos de los puntos más importantes de la geotecnia minera actual, la predicción o estimación del tiempo de falla del macizo rocoso.

(Fukuzono, 1985), fue quien implemento hace más de tres décadas este concepto y ha sufrido varias colaboraciones a lo largo del tiempo sin embargo la simpleza del método desarrollado por Fukuzono sigue siendo de lejos el más utilizado, inclusive por los radares de interferometría. (Figura 25)

Según Fukuzono al invertir el valor de la velocidad obtenida producto de los desplazamientos, se puede llegar a obtener una posible fecha de falla (Figura 26). Sin embargo, este concepto en realidad viene sujeto al coeficiente de correlación de Pearson, el famoso R, en una recta de regresión lineal. Si este valor está por encima del 0,9, la correlación es lo suficientemente significativa como para tomar medidas en la operación minera puesto que el tiempo estimado de falla será 90% confiable, pero para valores más bajos de 0.9, es muy incierta la toma de acción debido a la variabilidad de los datos y por la misma anisotropía del terreno, eso sin tener en cuenta las condiciones climáticas, que por ejemplo el radar, hace correcciones independiente del operador, mas no lo hacen todos los equipos, solo algunos.

Entonces podemos decir que, si bien Fukuzono estableció una metodología para predecir la fecha de falla del macizo rocoso, esta es totalmente inútil si no se tiene los conocimientos solidos sobre el comportamiento de los geomateriales, así

como su tratamiento en este caso desde la perspectiva estadística.

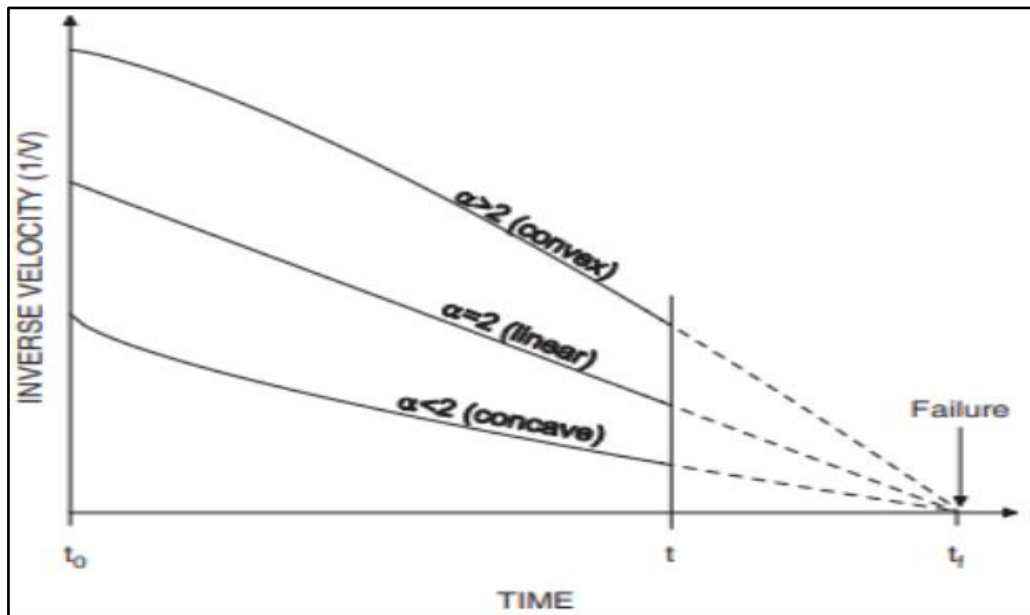


Figura 25. Relaciones de velocidad inversa versus tiempo que preceden a la falla de la pendiente, después de Fukuzono (Rose & Hungr, 2007)

Nota. En la presente figura se muestra el comportamiento de las curvas que se pueden generar al aplicar el método de la velocidad inversa para estimar el tiempo de falla. Tomado de A new method for predicting the failure time of a slope. Fukuzono, T. (1985). In: Proceedings of the fourth international conference and field. Tokyo: Japan Landslide Society, 145–50.

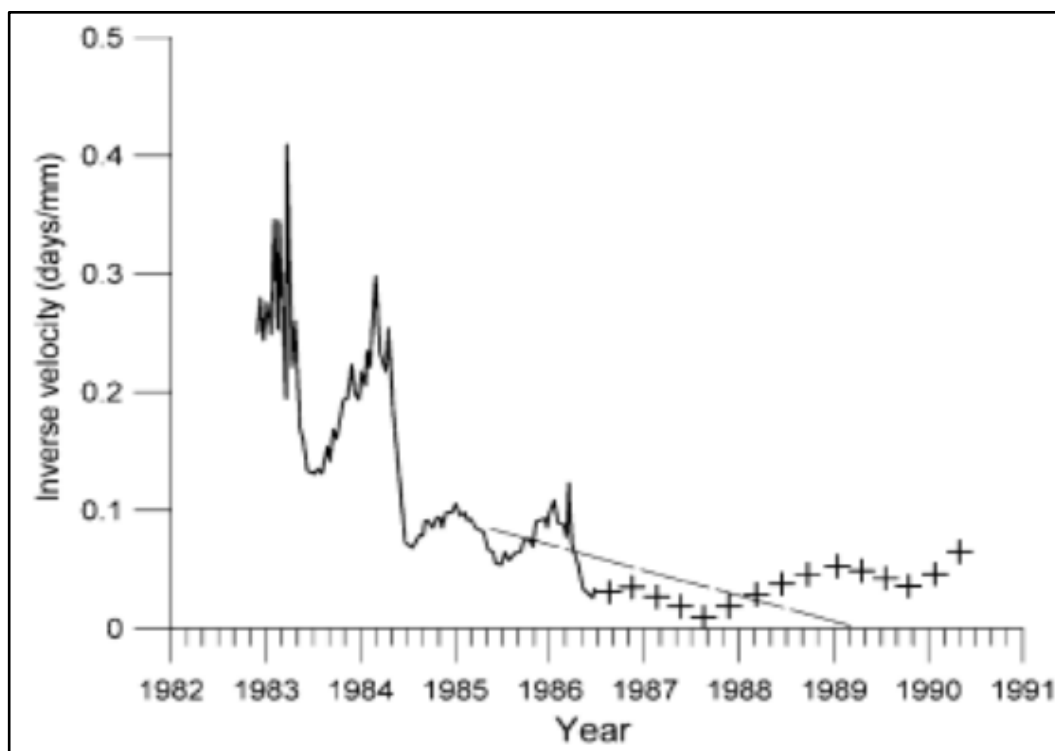


Figura 26. Gráfico de desplazamiento de velocidad inversa a largo plazo. (Rose & Hungr, 2007)

Nota. En la presente gráfica se muestran los valores de velocidad inversa a largo plazo mostrando a la vez la recta de regresión, cuya intersección estima la fecha de falla. Tomado de *A new method for predicting the failure time of a slope.* Fukuzono, T. (1985). In: *Proceedings of the fourth international conference and field.* Tokyo: Japan Landslide Society, 145–50.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología utilizada para las tres diferentes fases de la investigación, desde el trabajo previo al campo, el proceso en el terreno y la labor final de gabinete.

3.1. TRABAJO PRELIMINAR

Para llevar a cabo la investigación, en primera instancia se procede a realizar una revisión bibliográfica sobre trabajos anteriores en la zona de estudio, así como la búsqueda de información referida a DInSAR, luego de ello se recolectará los recursos de acceso libre como softwares para el procesamiento de los datos, imágenes SAR pertinentes y elaboración de Mapas.

- Etapa de gabinete Pre campo
 - Recolección de información bibliográfica, como artículos, tesis de pregrado, maestría y doctorado sobre DInSAR, PSI, imágenes radar, etc.
 - Instalación de softwares como SNAP, QGIS, etc.
 - Recolección de imágenes SAR, AESA COPERNICUS o ALASKA SATELLITE FACILITY para descargar las imágenes SAR Sentinel 1-A y sentinel1-B, periodo de noviembre de 2022 a marzo de 2023.

- Procesamiento de imágenes SAR, haciendo uso del software SNAP en caso del DInSAR.

3.2. TRABAJO DE CAMPO

El segundo núcleo de la investigación consiste en la evaluación geológica de los deslizamientos en la zona de estudio para la propuesta de una instrumentación geotécnica adecuada para la zona.

- Etapa de Campo

- Evaluación geológica, levantamiento de puntos de control ubicados estratégicamente en zonas de grietas de tracción monitoreados cada cierto día según condiciones climáticas lapso de 3 a 4 meses, destacando las zonas donde se presenten una mayor apertura de las grietas de tracción para monitorearlas en conjunto con las zonas de mayor desplazamiento identificadas con el DInSAR.

3.3. TRABAJO DE GABINETE

Como último punto se describe la metodología seguida desde el procesamiento de imágenes radar para el mapeo de deformación con DINSAR hasta la generación de mapas y perfiles de deformación.

3.3.1. Diagrama de flujo de trabajo

A continuación, se diseña el diagrama de flujo de las partes a considerar para el desarrollo de la interferometría diferencial, desde la obtención de las imágenes hasta la exportación final a diferentes plataformas. (Fig. 27)

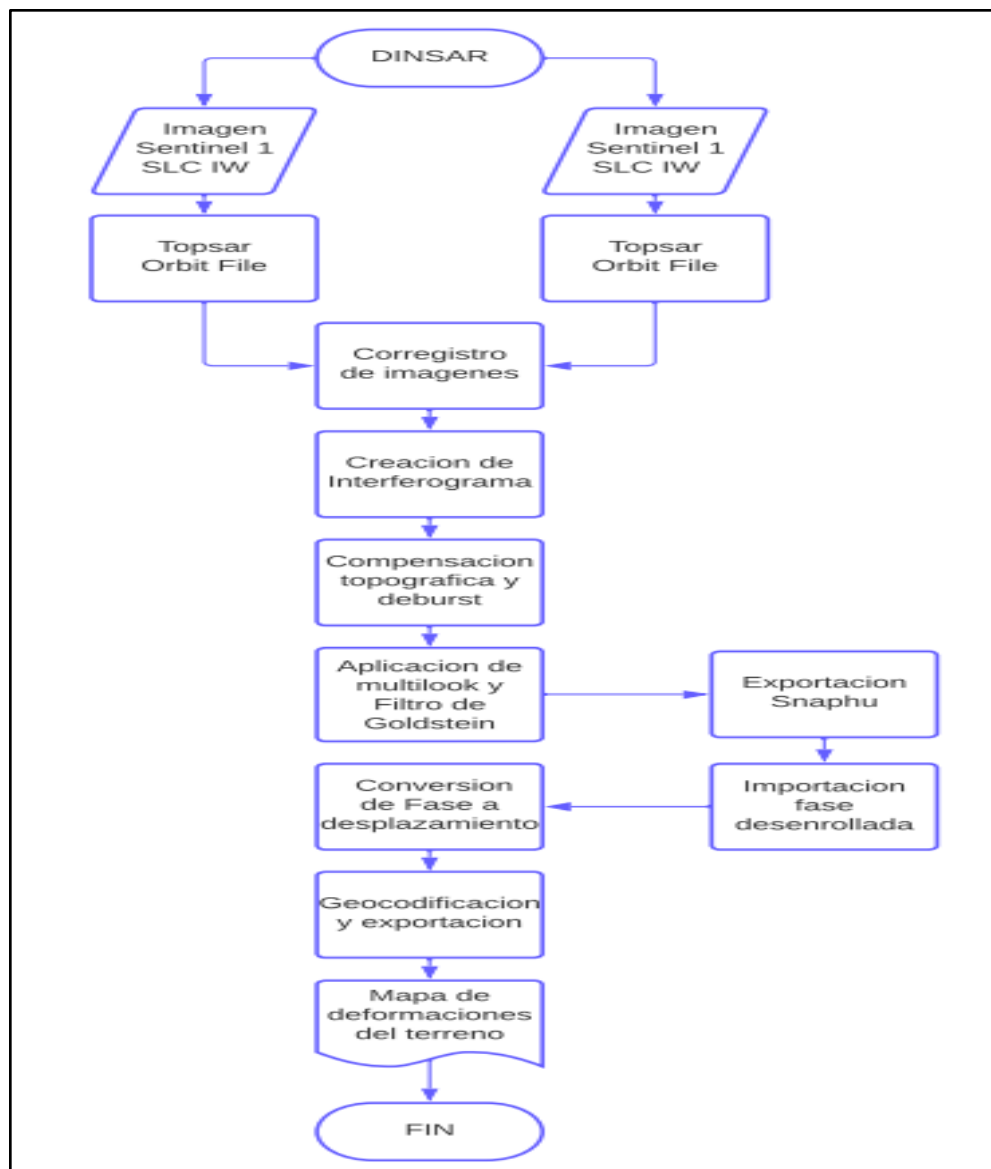


Figura 27. Diagrama de flujo, DInSAR.

Nota. Fuente Propia.

- Consulta de imágenes disponibles:

Para este punto se hizo uso de la plataforma Alaska Satellite Facility la cual guarda un Back up más amplio de las imágenes Sentinel 1.

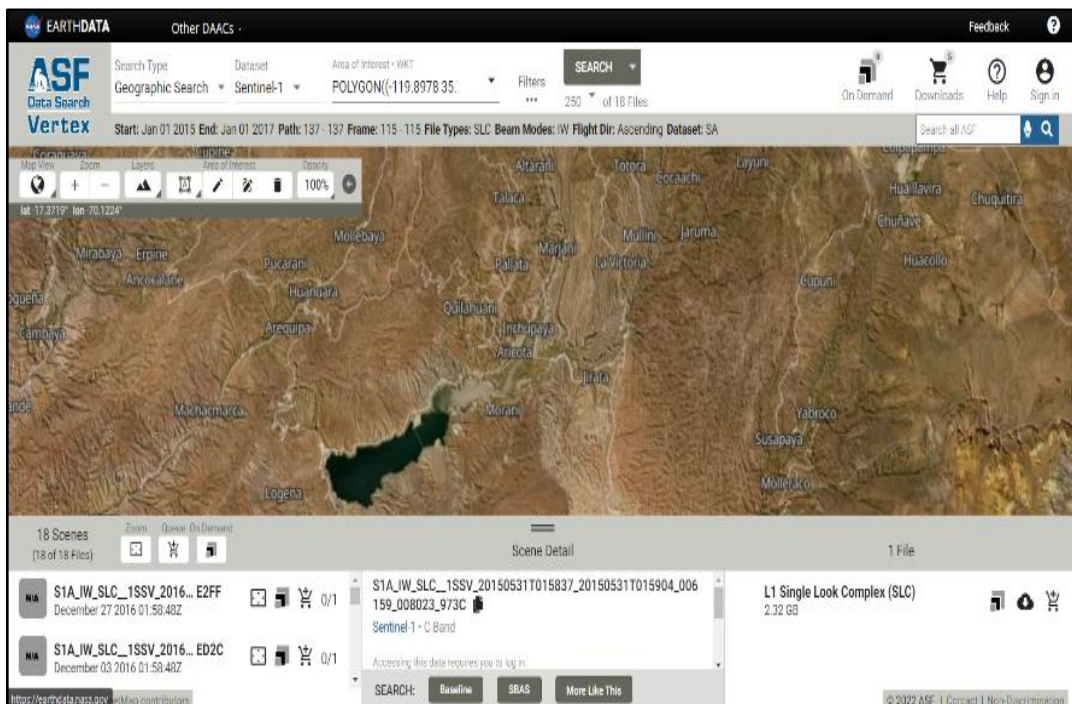


Figura 28. Consulta y descarga de imágenes radar en ASF.

Nota. Fuente Propia.

- Descarga de imágenes Sentinel 1:

De hizo la descarga desde setiembre de 2016 hasta finales de 2022, alternando entre los satélites Sentinel 1-A y 1-B ya sea en órbita ascendente o descendente.

Tabla 6

Características de las imágenes Sentinel 1.

Satélite	Sentinel 1
Banda	C SAR (5.4 GHz)
Polarización	HH o VV, VV+VH, HH+VH
Resolución (m)	5x5, 5x20, 20x40
Angulo de incidencia (°)	20-45
Ancho de Swath (km)	80, 250, 400
Productos	SM, IW, EW, VW
Revisita	12 días

Nota. Modificado de Podest, E. (2019). SAR Processing and data análisis. ARSET, NASA. USA.

- Corregistro de imágenes:

Según Tocasuche (2018) y SNAP (2015) el corregistro es un proceso en el que se unen dos imágenes radar, en este caso Sentinel 1, haciendo uso de archivos de órbita, sub-swath y un DEM remuestreado por un método de interpolación seleccionado en el software. (pp. 109)

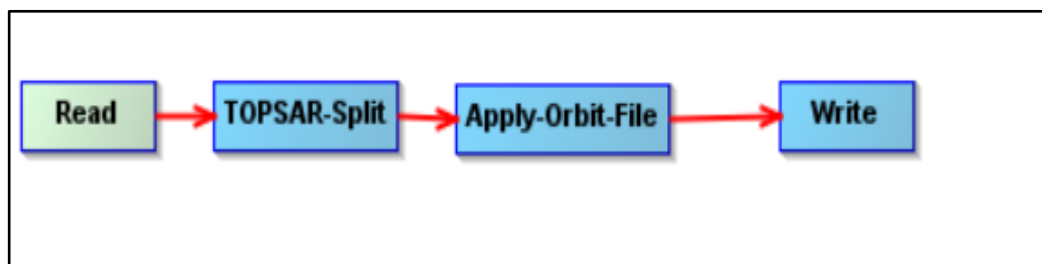


Figura 29. *Corregistro de Imágenes radar.*

Nota. Fuente Propia.

- Formación de interferograma y aplicación de filtro deburst.

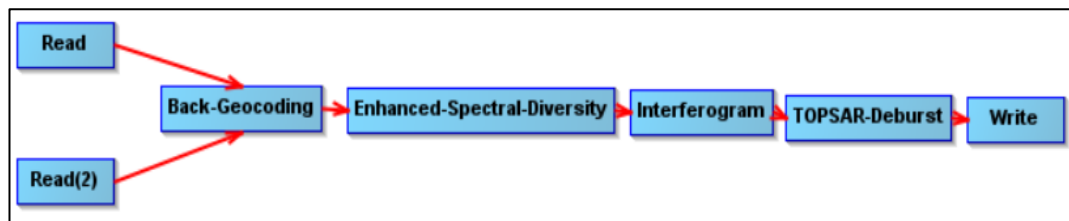


Figura 30. *Formación de interferograma*

Nota. Fuente Propia.

Respecto al interferograma, según Tocasuche (2018) y SNAP (2015) es una imagen generada de la comparación de dos imágenes radar en donde se evalúa los cambios de fase representado por franjas con valores de 0 a 2π . Las franjas cobran un mayor nivel de confianza y protagonismo al remover el efecto de la curvatura de la tierra. (pp. 109)

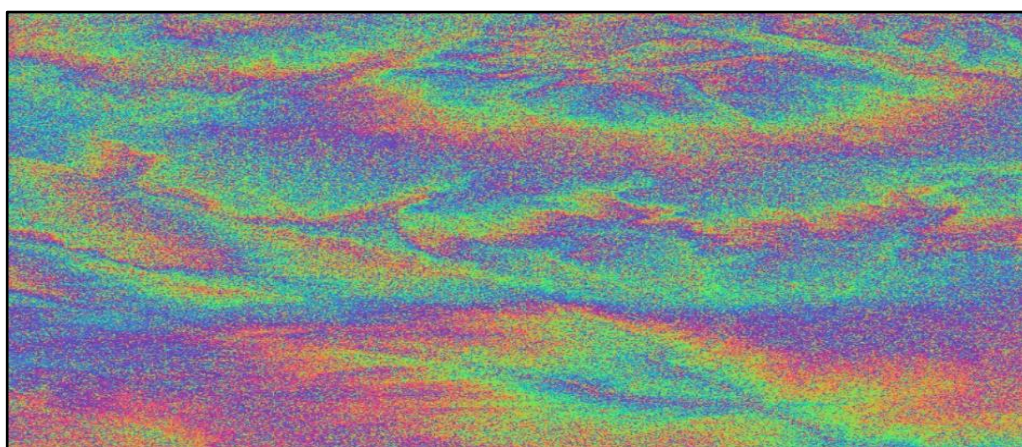


Figura 31. *Interferograma.*

Nota. Fuente propia.

Respecto al filtro deburst, según Tocasuche (2018) y SNAP (2014), las imágenes se encuentran compuestas por una serie de ráfagas o Burst propias de la

forma en que los datos son tomados. Estas ráfagas son eliminadas con el filtro deburst el cual haciendo un remuestreo y traslape en azimuth es suficiente para darle continuidad a la información, eliminando de esa manera las mencionadas ráfagas.

(p. 110)

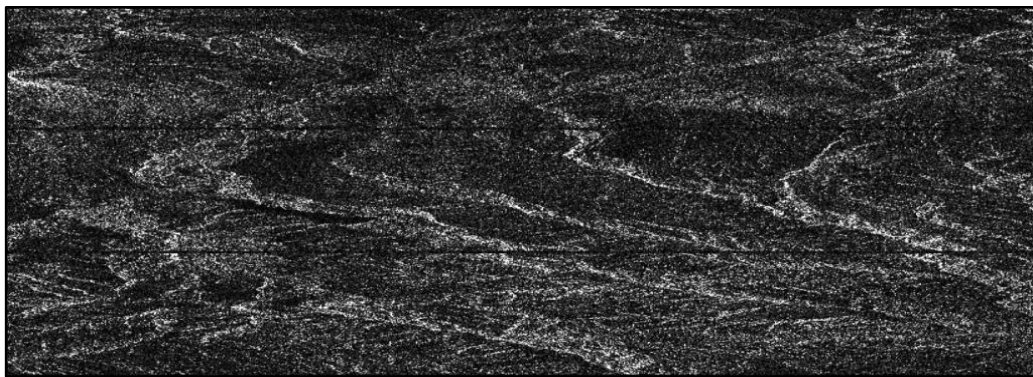


Figura 32. *Burst en las imágenes radar.*

Nota. Fuente propia.

- Remoción de fase topográfica

En el siguiente paso se procede a remover la fase topográfica, se recomienda seleccionar SRTM 1 para una mejor resolución en la zona.

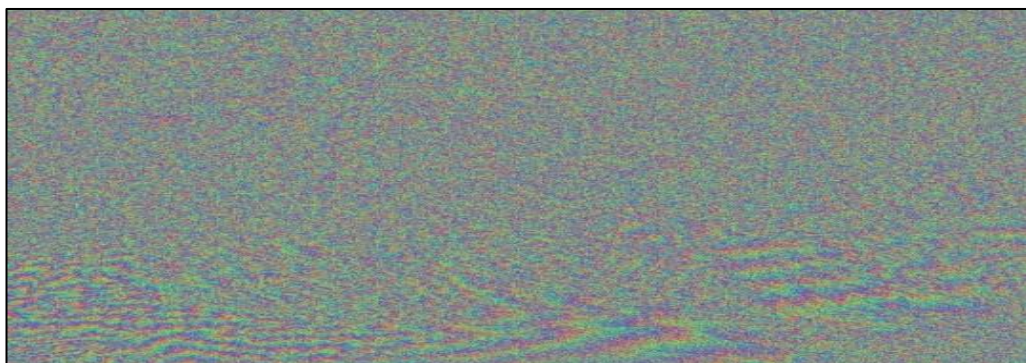
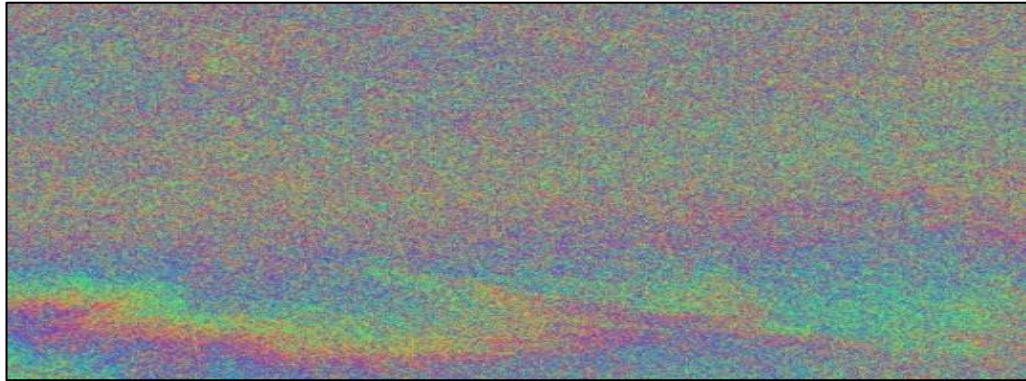


Figura 33. *Interferogramas pre y post remoción de fase topográfica.*

Nota. Fuente propia.



- Aplicación de filtro y Multi-looking

En esta etapa del procesamiento se procede a aplicar el filtro de Goldstein y posteriormente el Multi-looking, consistiendo este último en realizar un promedio de los valores en varios píxeles dando nueva información y reduciendo la cantidad de ruido.

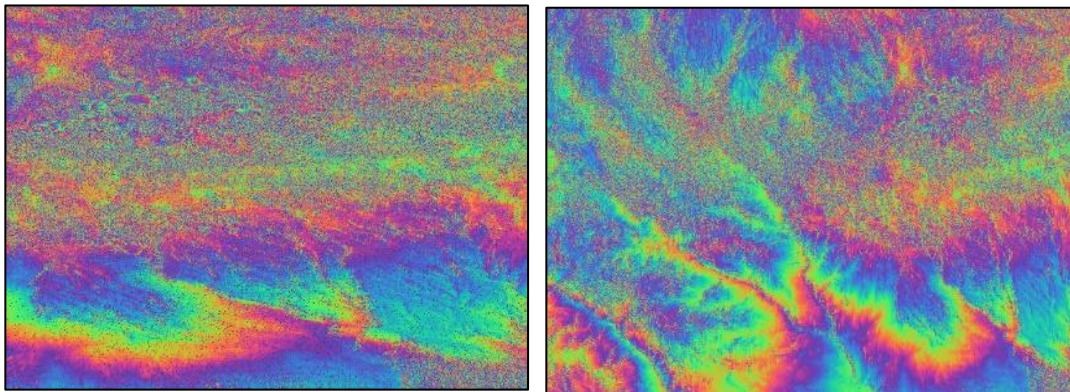


Figura 34. Filtro de Goldstein y Multi-Looking

Nota. Fuente propia.

- Desenrollamiento de la fase

Para este paso se procede a exportar el anterior recurso bajo un filtro de multilooking, y se continua a aplicar el algoritmo SNAPHU.

```

# CONFIG FOR SNAPHU
# -----
# Created by SNAP software on: 15:24:51 14/02/2023
#
# Command to call snaphu:
#
#   snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img 7039
#####
# Unwrapping parameters #
#####

STATCOSTMODE      SMOOTH
INITMETHOD        MCF
VERBOSE           TRUE

#####
# Input files #
#####

CORRFILE           coh_IW1_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img

#####
# Output files #
#####

OUTFILE            UnwPhase_ifg_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img
LOGFILE            snaphu.log

#####
# File formats #
#####

INFILEFORMAT       FLOAT_DATA
CORRFILEFORMAT     FLOAT_DATA
OUTFILEFORMAT      FLOAT_DATA

```

Figura 35. Exportación de la fase.

Nota. Fuente propia.

```

C:\Administrador de Símbolo del sistema
D:\V1_TEST5\3. INSAR\OCT2017_DIC2017\snaphu-v1.4.2_win64\bin>snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img 7039
snaphu v1.4.2
27 parameters input from file snaphu.conf (84 lines total)
only one tile - disregarding multiprocessor option
logging run-time parameters to file snaphu.log
Reading wrapped phase from file Phase_ifg_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img
No weight file specified. Assuming uniform weights
Reading correlation data from file coh_IW1_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img
Calculating smooth-solution cost parameters
Building range cost arrays
Building arithm cost arrays
Initializing flows with MCF algorithm
Setting up data structures for cs2 MCF solver
Running cs2 MCF solver
Running nonlinear network flow optimizer
Maximum flow on network: 3
Number of nodes in network: 19868275
Flow increments: 1 (Total improvements: 0)
Treesize: 19868275 Pivots: 166579 Improvements: 5400
Maximum flow on network: 3
Total solution cost: 8271345
Integrating phase
Writing output to file UnwPhase_ifg_VH_29Aug2017_27Dec2017.snaphu.img
Program snaphu done
Elapsed processor time: 0:11:23.83
Elapsed wall clock time: 0:12:48
D:\V1_TEST5\3. INSAR\OCT2017_DIC2017\snaphu-v1.4.2_win64\bin>

```

Figura 36. Aplicación del algoritmo SNAPHU

Nota. Fuente propia.

- Importación de la fase desenrollada.

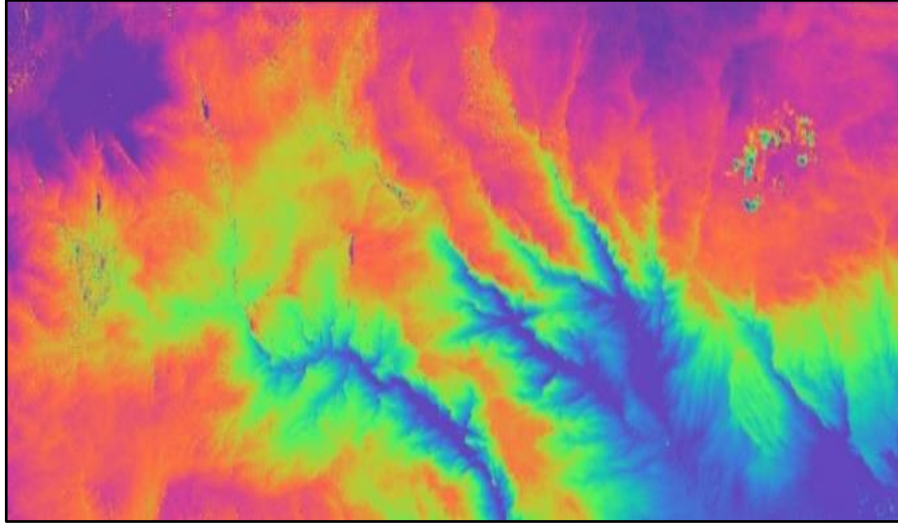


Figura 37. *Importación de la fase.*
Nota. Fuente propia.

- Transformación de onda de fase a desplazamiento.

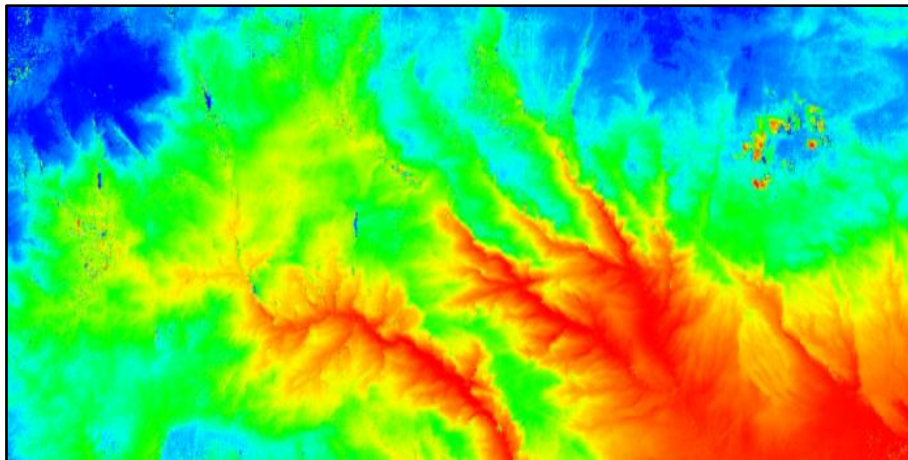


Figura 38. *Phase to displacement.*
Nota. Fuente propia.

- Geocodificación y Exportación

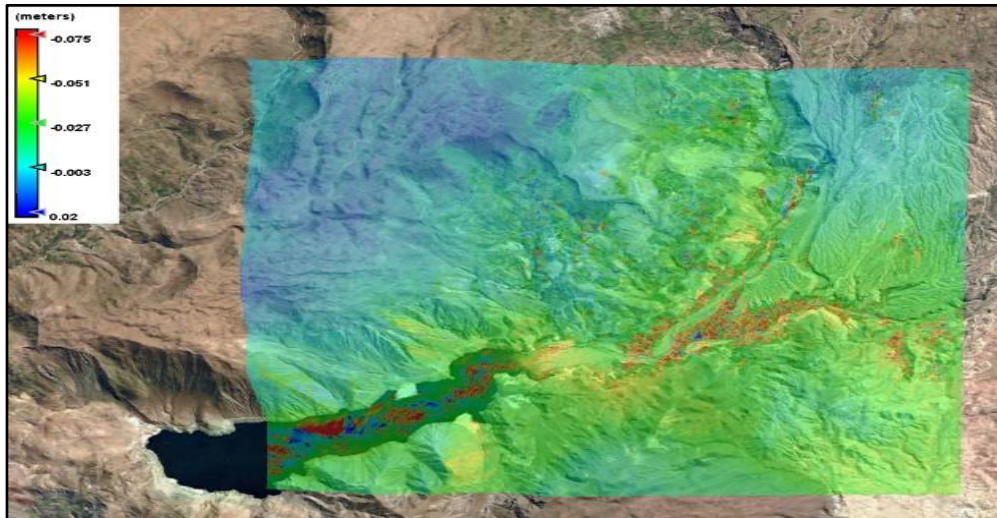


Figura 39.Exportación en formato kmz

Nota. Fuente propia.

- Elaboración de Mapas, considerando los desplazamientos, interferograma, ubicación, control y monitoreo de las grietas de tracción.
- Propuesta de instrumentación geotécnica adecuada, considerando la accesibilidad a la zona, el grado de desplazamiento y las afecciones circundantes.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. EVALUACION GEOLÓGICA

4.1.1. *Mega deslizamiento*

Este deslizamiento interpretado mediante imágenes satelitales en el cual se emplaza el distrito de Quilahuani, abarca desde la parte alta del mismo hasta la laguna Aricota y parte del rio Callazas. (Fig. 41)

Geoméricamente hablando la línea central del deslizamiento cuenta con una longitud estimada de 4,85km., contemplando de la cota 2840m a 3920m, con una anchura estimada 3,2km y una dirección hacia el SE. (Fig. 40)

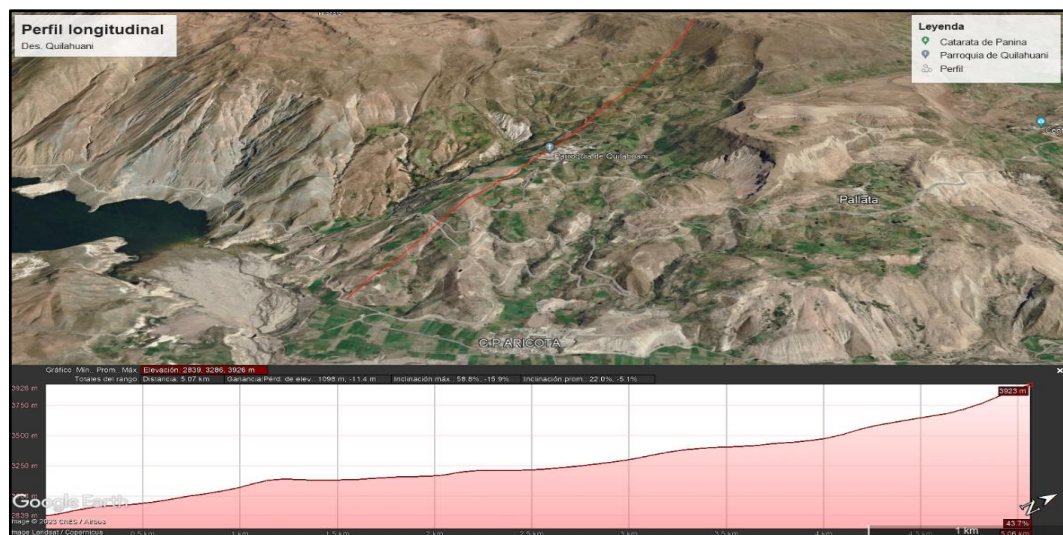


Figura 40. Sección longitudinal del deslizamiento antiguo.

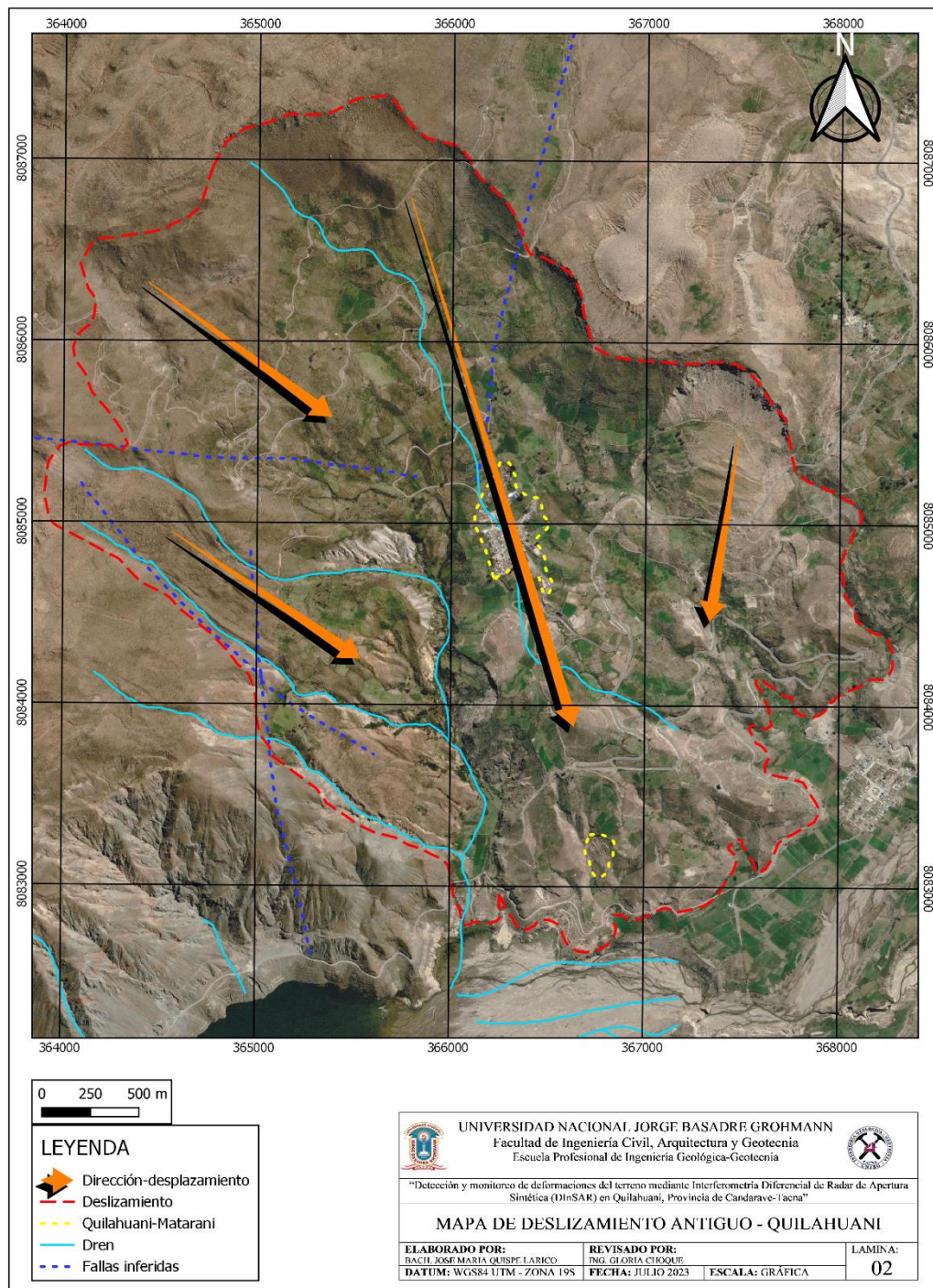


Figura 41. Deslizamiento de Quilahuani.

Nota. Fuente propia.

4.1.2. Deslizamiento de Matarani

- GEOLOGÍA LOCAL

La litología presente está compuesta principalmente de material cuaternario, coluviales entremezclados con ceniza volcánica de color blanquecino a rosáceo y fragmentos en horizontes bajos de composición dacítica, riolítica procedentes de la formación huaylillas, de coloraciones rosáceas pálidos o rojizos oscuros, con presencia de hornblenda, plagioclasas, biotitas, cuarzo de forma subredondeado fragmentado y algunos clastos atrapados con una matriz de textura más afanítica. Ver fotografía 4.

De la misma manera se pudo verificar afloramientos con presencia de tobas líticas bastante intemperizados de color violáceo, verdosos y amarillentos con fragmentos dacíticos, de textura brechada en algunos tramos, con presencia de una alteración supergena. Estos afloramientos corresponderían a los volcánicos Quellaveco. Ver fotografía 5.

Diorita, de color gris verdosa, con textura de grano medio, con alteración propilitica, presencia de cloritas y epidotas presentando a la vez una leve argilización supergena. Se presenta como un afloramiento de 5 por 2 metros debajo de las cenizas y material cuaternario, instruyendo al volcánico Quellaveco. Ver fotografía 6.

Fotografía 4

Clastos dacíticos y riolíticos.



Nota. Volcánico dacítico-riolítico, abundante qz como parte de matriz, de coloración rojiza parda a clara, plagioclasa en algunos casos como fenocristales, hornblendas alargadas y fragmentadas.

Fotografía 5

Tobas líticas.



Nota. Tobas compuestas por una matriz fina de color violáceo que atrapan a fragmentos líticos subangulosos de composición dacítica de matriz fina rojiza con fenocristales de plagioclasa con presencia de alteración argílica supergena.

Fotografía 6

Diorita.

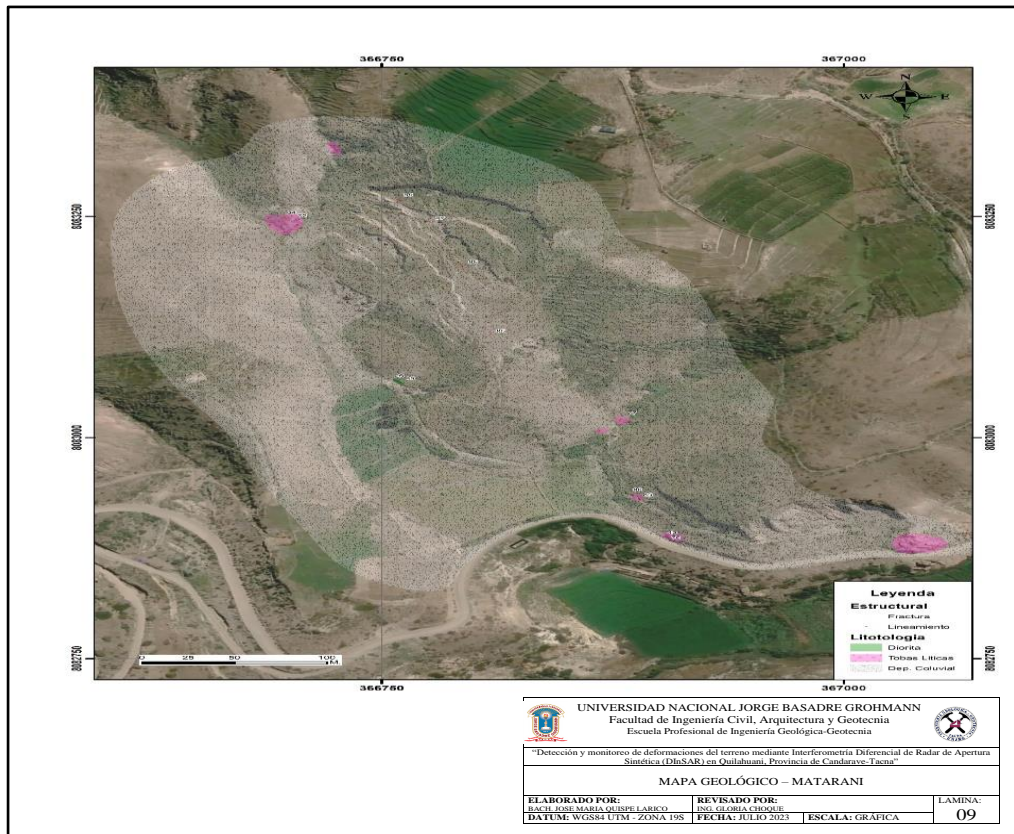
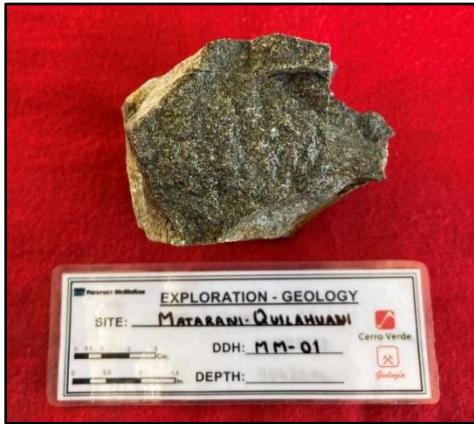


Figura 42. Mapa Geológico de Matarani.

Nota. Fuente propia.

- Monitoreo extensométrico

Seguidamente se presenta las interpretaciones hechas mediante imágenes satelitales y posteriormente corroboradas en campo correspondientes a escarpes de primer y segundo orden, así como las grietas de tensión las cuales fueron de vital importancia para el planteamiento del método de monitoreo en campo como validación de la técnica DInSAR. (Fig. 43)

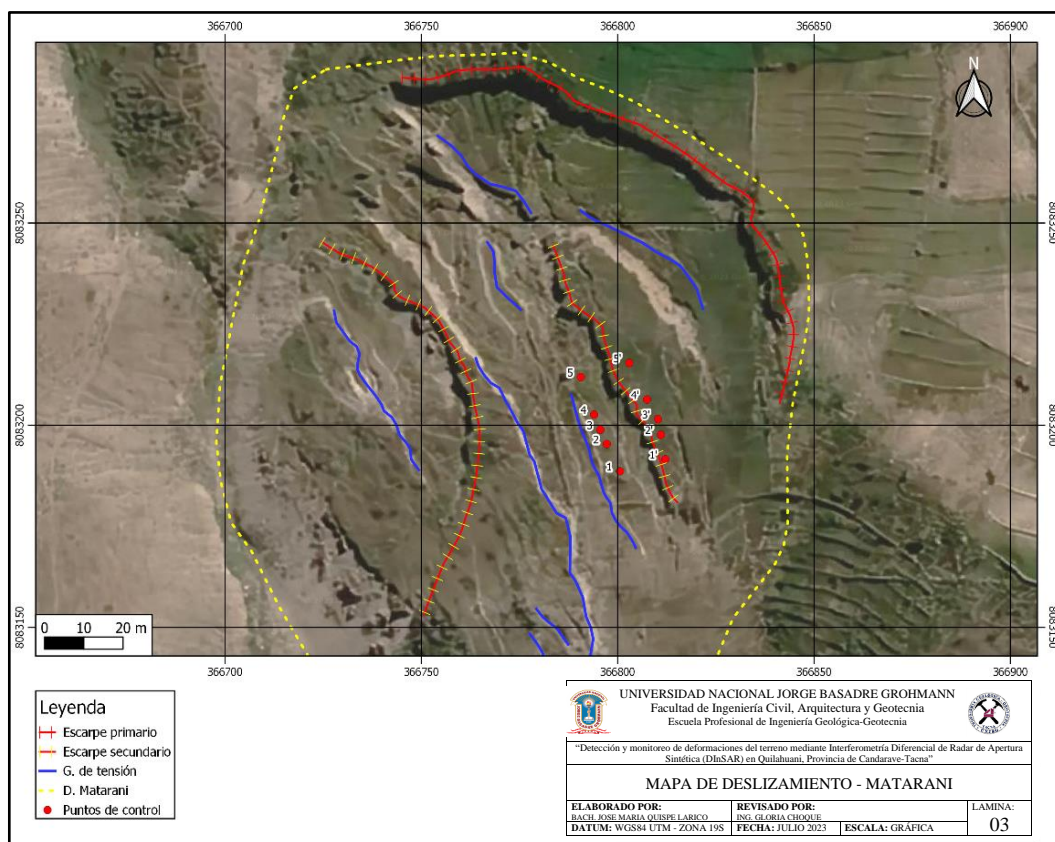


Figura 43. Interpretación deslizamiento de Matarani.

Nota. Fuente propia.

En este punto se hizo una visita preliminar a la zona de estudio para determinar la manera más óptima de monitorear las grietas existentes en el terreno, llegando a

inclinarnos por la metodología de extensometría de cinta; ampliamente utilizada en el monitoreo de pads de lixiviación, botaderos y laderas inestables en general.

Fotografía 7

Evaluación previa de la zona.



Nota. Fuente propia.

A continuación, se presenta el esquema básico de extensometría:

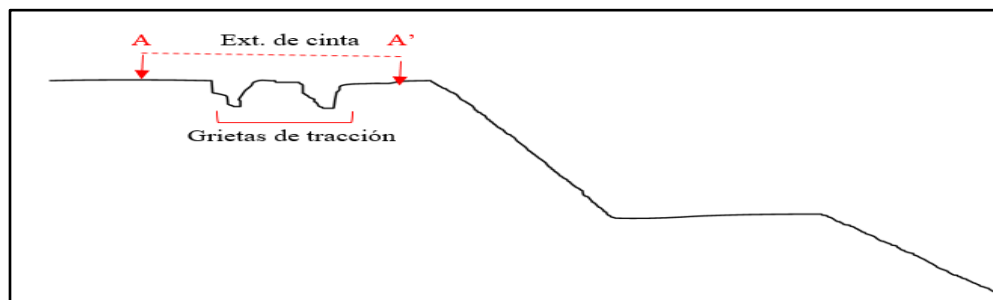


Figura 44. Esquema de extensometría.

Nota. Fuente propia. El diferencial de distancia entre A y A' a través del tiempo permite reconocer si se está generando una deformación en la zona.

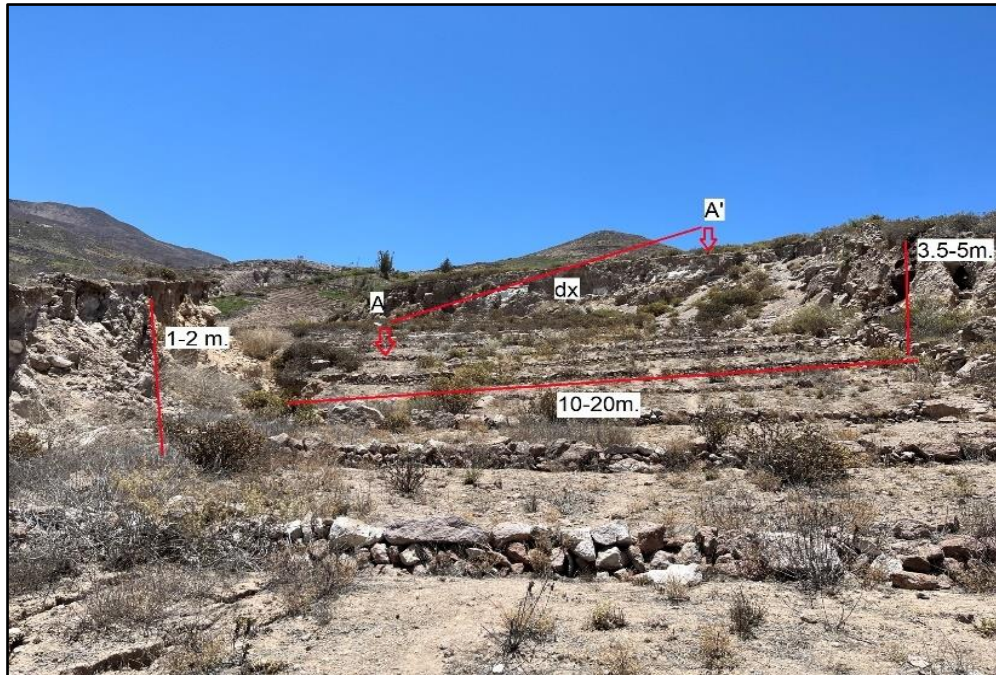


Figura 45. *Esquema en campo.*

Nota. Fuente propia.

La evaluación y monitoreo geotécnico en campo se llevó a cabo en un periodo que comprende del 12 de noviembre de 2022 al 25 de febrero de 2023. Se colocaron 5 pares de control (Fig. 43) para medir su diferencial de distancia a través del periodo mencionado. (Ver tabla 7 y 8)

Para revisar las fotografías de cada salida de campo por fecha revisar el anexo 1.

Tabla 7*Distancia medida en metros entre pares extensométricos*

Fech. /Par extensométrico	Par Ext. 1-1'	Par Ext. 2-2'	Par Ext. 3-3'	Par Ext. 4-4'	Par Ext. 5-5'
12-Nov-22	11,79	13,75	13,46	14,46	13,08
8-Dic-22	11,82	13,79	13,5	14,5	13,13
7-Ene-23	12,01	13,76	13,51	14,52	13,14
28-Ene-23	11,88	13,85	13,58	14,57	13,18
25-Feb-23	11,93	13,9	13,56	14,67	13,28

Nota. Fuente propia. La tabla 7 muestra la distancia medida entre los puntos extensométricos para cada par por fecha de monitoreo. (Ver Figura 43)

Tabla 8*Diferencial de distancia en metros a través del tiempo.*

Fech. /Par extensométrico	Par Ext. 1-1'	Par Ext. 2-2'	Par Ext. 3-3'	Par Ext. 4-4'	Par Ext. 5-5'
Ini. 12 de Nov	0	0	0	0	0
12nov-8dic	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
8dic-7ene	0,19	-0,03	0,01	0,02	0,01
7ene-28ene	-0,13	0,09	0,07	0,05	0,04
28ene-25feb	0,05	0,05	-0,02	0,1	0,1
Acumulado	0,14	0,15	0,1	0,21	0,2

Nota. Fuente propia. La tabla 8 muestra el diferencial de distancia entre fechas por cada par extensométrico. (Ver Figura 43)

A continuación, se muestran los gráficos correspondientes de desplazamientos por fechas para tener una visión más completa de la deformación.

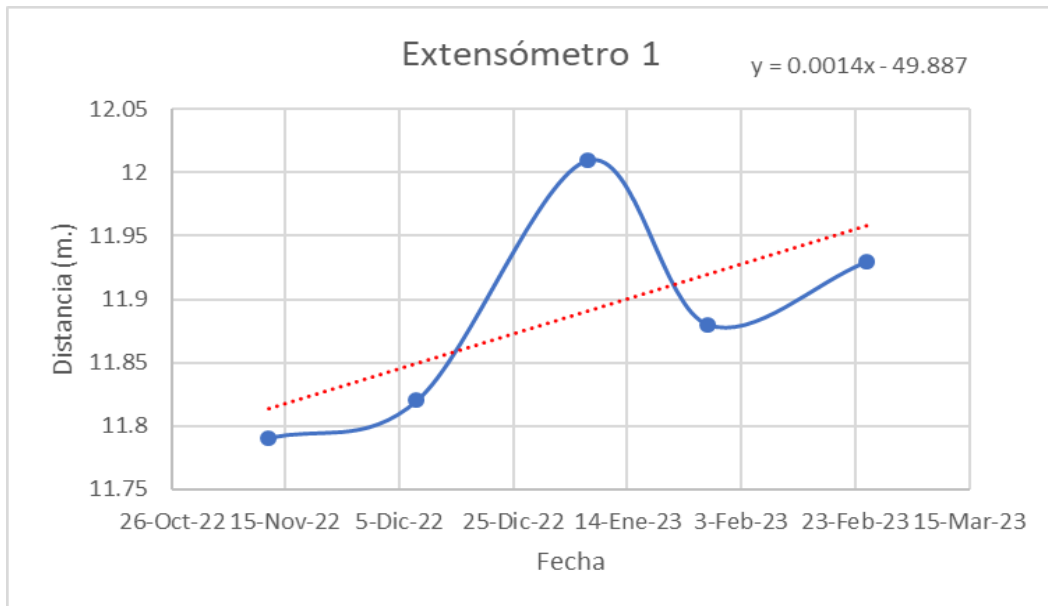


Figura 46. Gráfico de deformación, extensómetro 1.

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

Respecto al extensómetro 1 podemos ver una pendiente positiva cuyo desplazamiento acumulado es de 14 cm. Teniendo un gran movimiento de tracción de 19 cm entre el 8 de diciembre y el 7 enero para luego tener un movimiento contrario como si se hubiera asentado teniendo una diferencia de -13 cm,

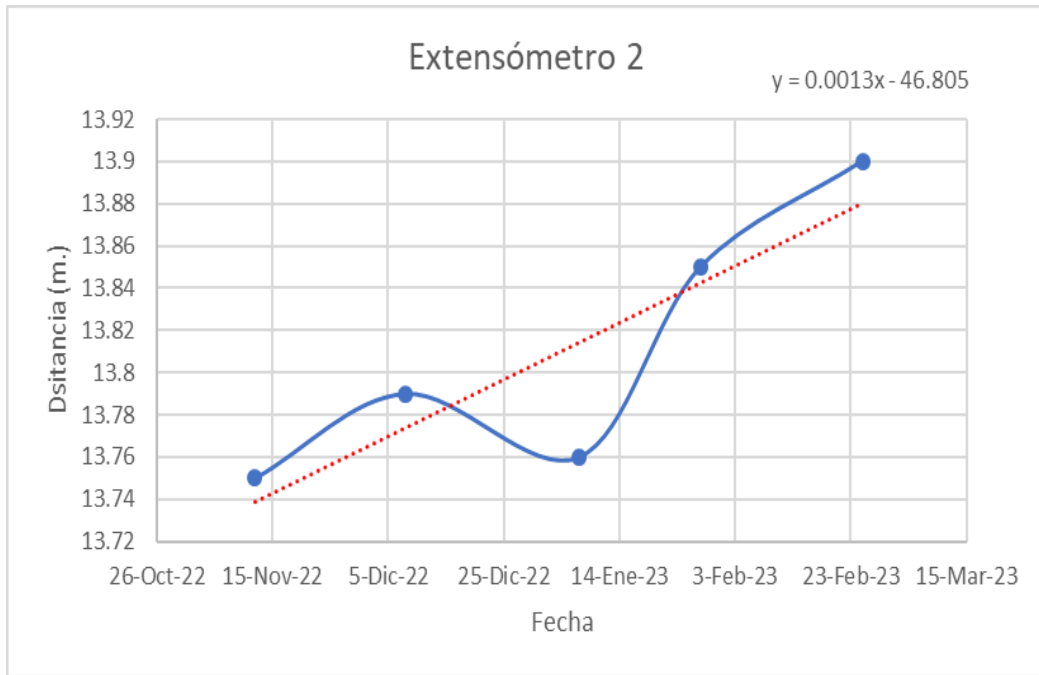


Figura 47. Gráfico de deformación extensómetro 2.

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

Al igual que en el extensómetro 1 muestra un movimiento resaltante entre el 8 de diciembre y el 7 de enero, pero esta vez de 3 cm bajo una contracción para luego sufrir una tracción de 9 cm. La pendiente aún es positiva.

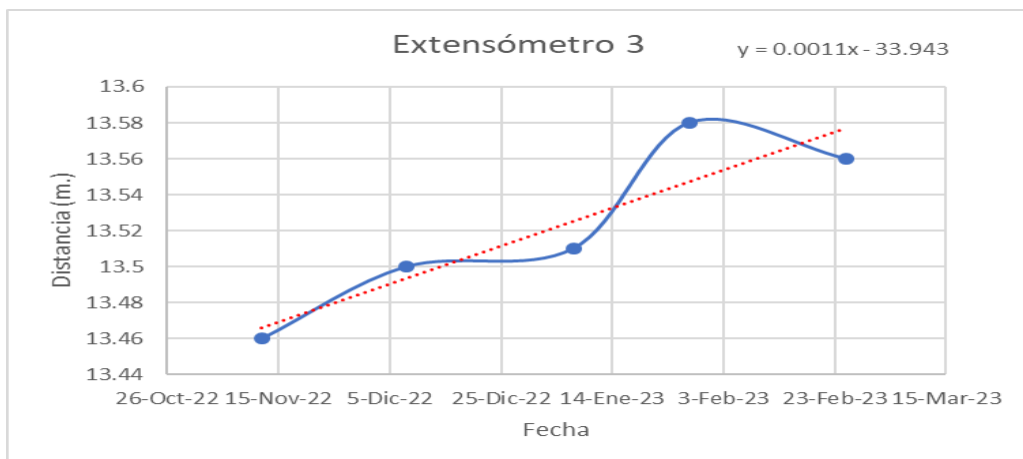


Figura 48. Gráfico de deformación extensómetro 3.

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

En este par de control nos muestra un desplazamiento acumulado de 10 cm con desplazamiento entre fechas que van desde -2cm hasta 7 cm con una recta de deformación con pendiente positiva, por lo cual podemos intuir que el desplazamiento solo aumentara conforme pase el tiempo.

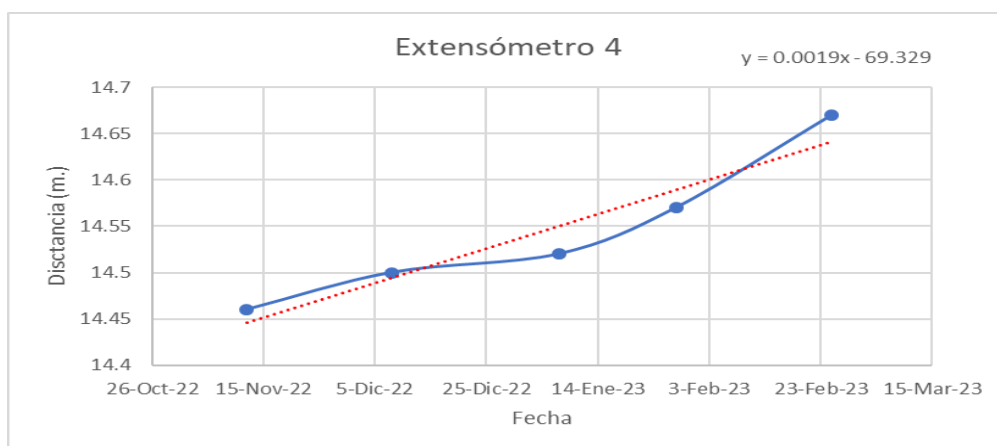


Figura 49. Gráfico de deformación extensómetro 4.

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

En el extensómetro 4 notamos un desplazamiento acumulado de 21 cm, siendo este el mayor entre los 5 pares, siempre por tracción evidenciándose en una recta de pendiente totalmente positiva.

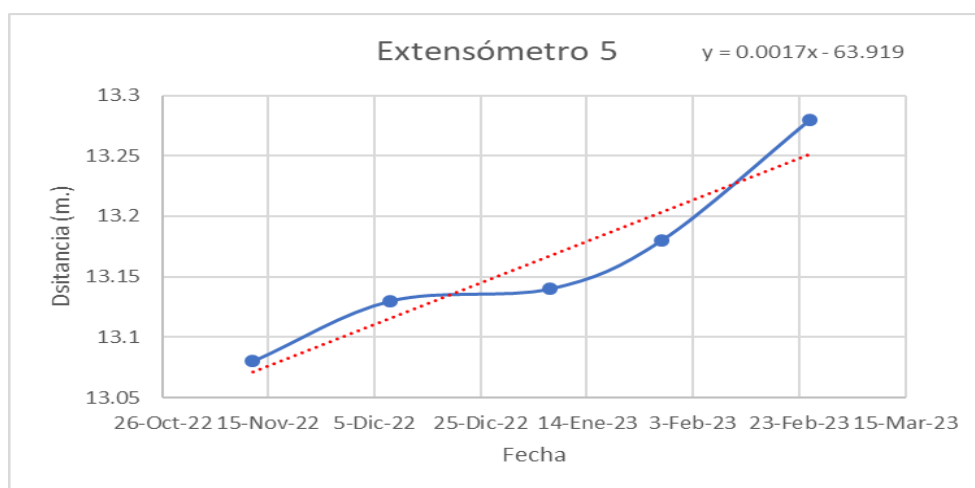


Figura 50. Gráfico de deformación extensómetro 5.

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

En este par podemos notar al igual que en el 4 una deformación constante positiva llegando a un acumulado de 20 cm, siendo esta una zona con un movimiento totalmente de tracción.

4.2.MAPEO DE DEFORMACIONES CON DINSAR

Para el mapeo de deformaciones del terreno bajo una metodología DInSAR se hizo uso del software libre SNAP propiedad de la Agencia Espacial Europea.

A continuación, se presentan las imágenes radar tomadas para el estudio de la zona

en las fechas más cercanas posibles a los monitoreos en campo, para este caso se hizo uso del Sentinel 1-A en órbita ascendente.

Tabla 9

Imágenes Radar utilizadas.

N°	Nombre
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20221114T230823_20221114T230850_045896_057DC9_7A1E
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20221208T230822_20221208T230849_046246_0589AB_5F05
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20230113T230820_20230113T230847_046771_059B76_49A3
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20230206T230819_20230206T230846_047121_05A738_D792
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20230302T230819_20230302T230846_047471_05B308_73AE

Nota. Fuente propia.

Tabla 10

Características de las imágenes radar utilizadas.

N°	Fecha	Subswath	Polarización	Orbita
1	14/11/2022	1	VV-VH	Ascendente
2	8/12/2022	1	VV-VH	Ascendente
3	13/01/2023	1	VV-VH	Ascendente
4	6/02/2023	1	VV-VH	Ascendente
5	2/03/2023	1	VV-VH	Ascendente

Nota. Fuente propia.

Acorde a lo presentado en el capítulo III sobre la metodología de trabajo en gabinete, se confeccionó mapas de deformación bajo la técnica DInSAR, cuyos valores serán evaluados en 5 secciones distribuidas en toda el área de estudio. (Ver figura 51)

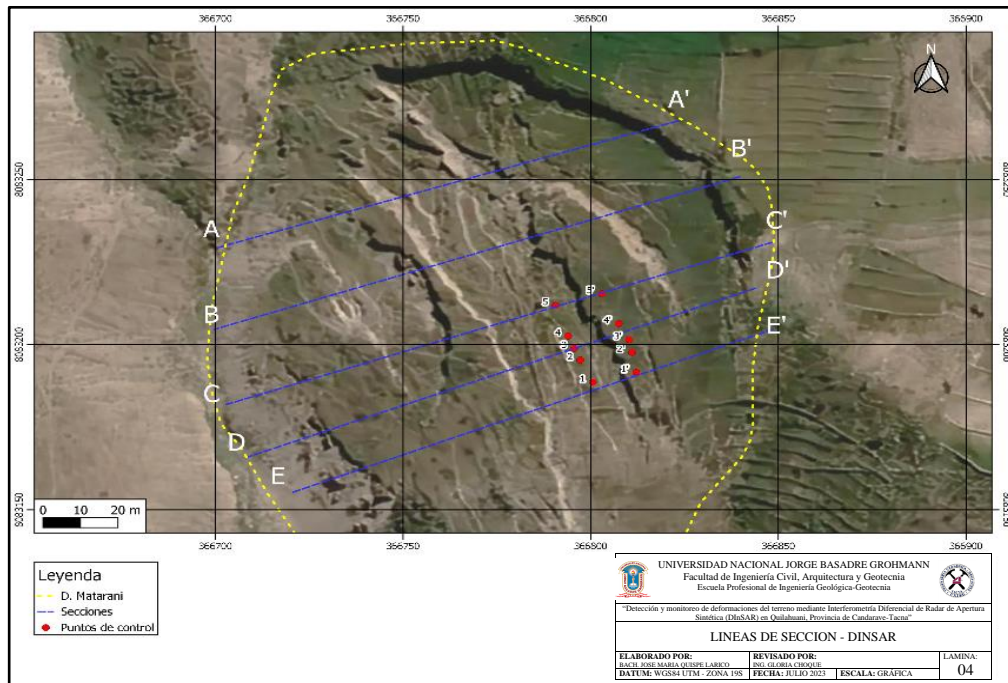


Figura 51. Secciones de evaluación.
Nota. Fuente propia.

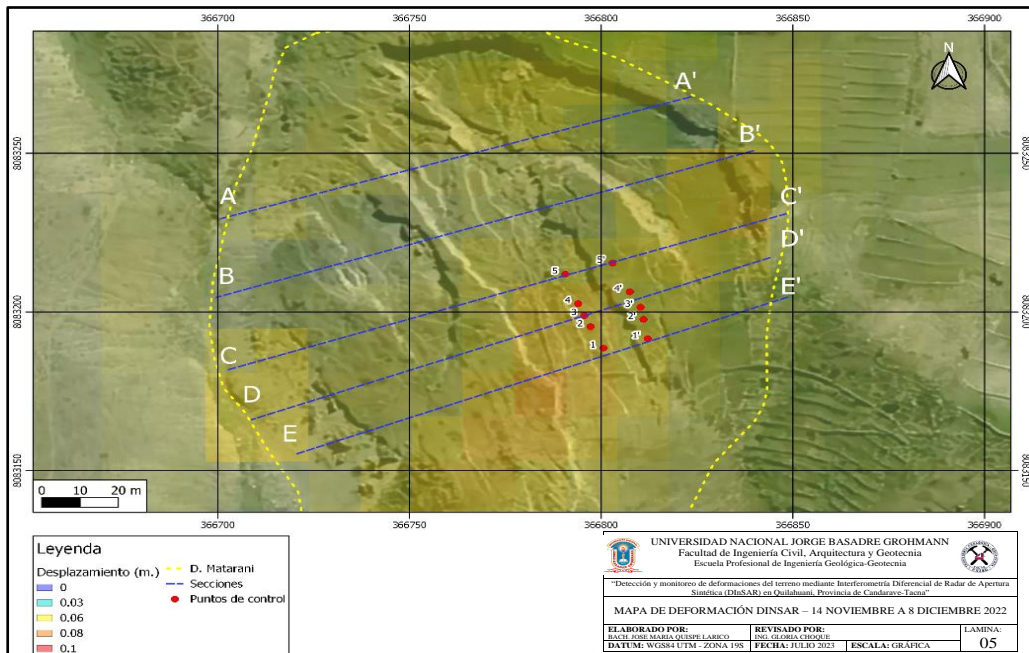
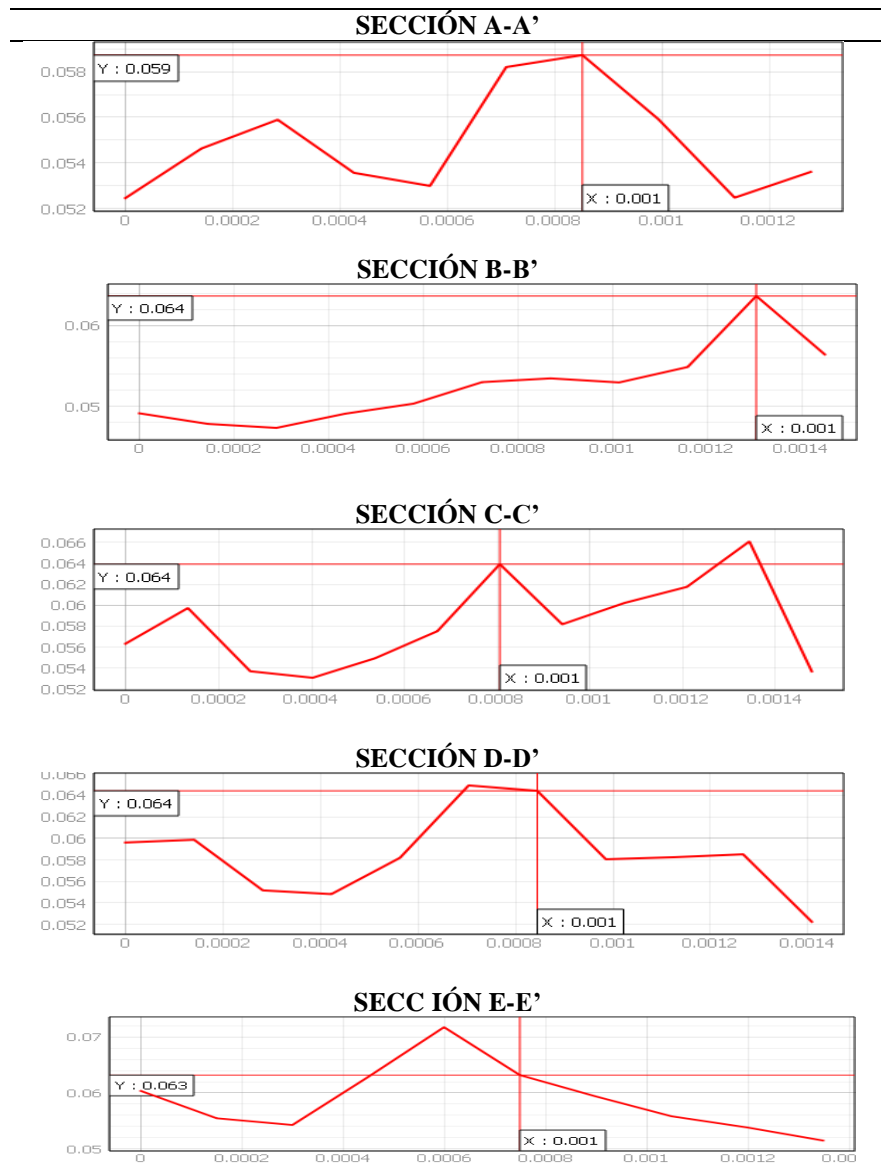


Figura 52. DInSAR 14 noviembre - 8 diciembre 2022.
Nota. Fuente propia.

Como siguiente parte de esta sección se presentan los resultados obtenidos, así como los perfiles correspondientes a la deformación.

Tabla 11
Gráficos de deformación DInSAR 14 noviembre - 8 diciembre 2022



Nota: Fuente propia

Las secciones A-A' y B-B' muestran una deformación con pendiente positiva que van desde 5,2 cm a 6,4 cm, tomando en cuenta que el tamaño del pixel puede ir de 13,5 a 14,5 m por defecto, se tienen de 9 a 11 puntos que muestran el valor de la deformación a través de toda la línea de sección cuyas longitudes varían de 130 a 150m. La mayor deformación en la sección A-A' es de 5,9 cm y en B-B' es de 6,4 cm.

Las secciones C-C', D-D' y E-E', se encuentran en la zona de nuestros puntos de monitoreo, cuyos valores de deformación más altos son de 6,3-6,4 cm, siendo el promedio de su deformación 5,5 cm. (Ver tabla 11).

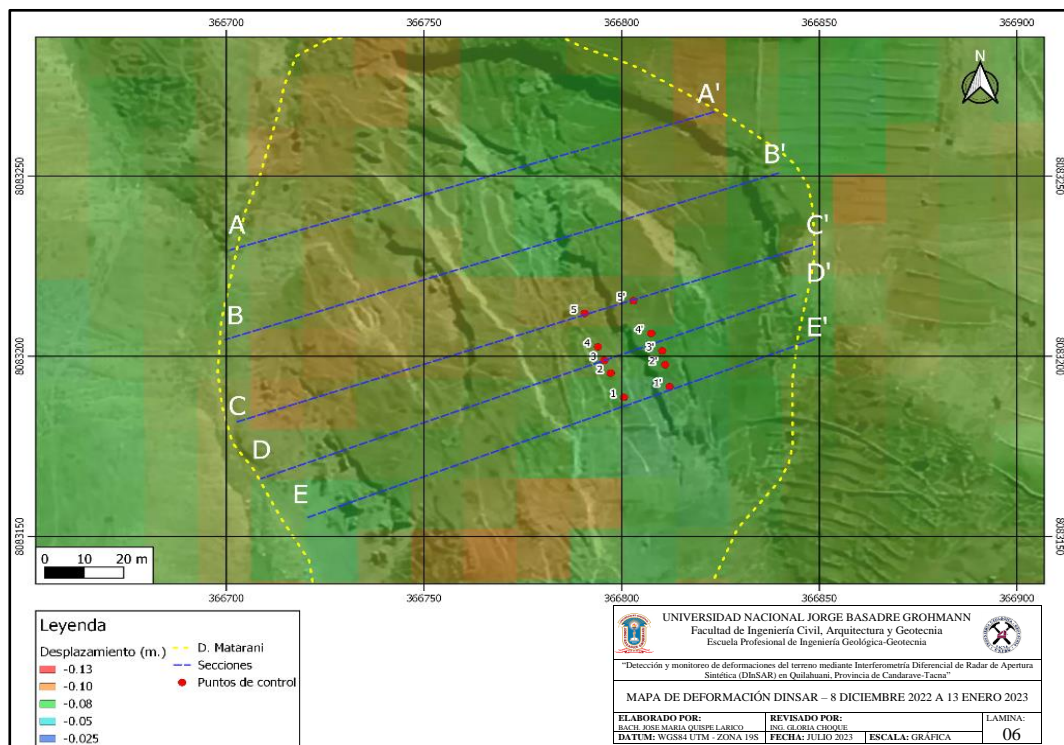
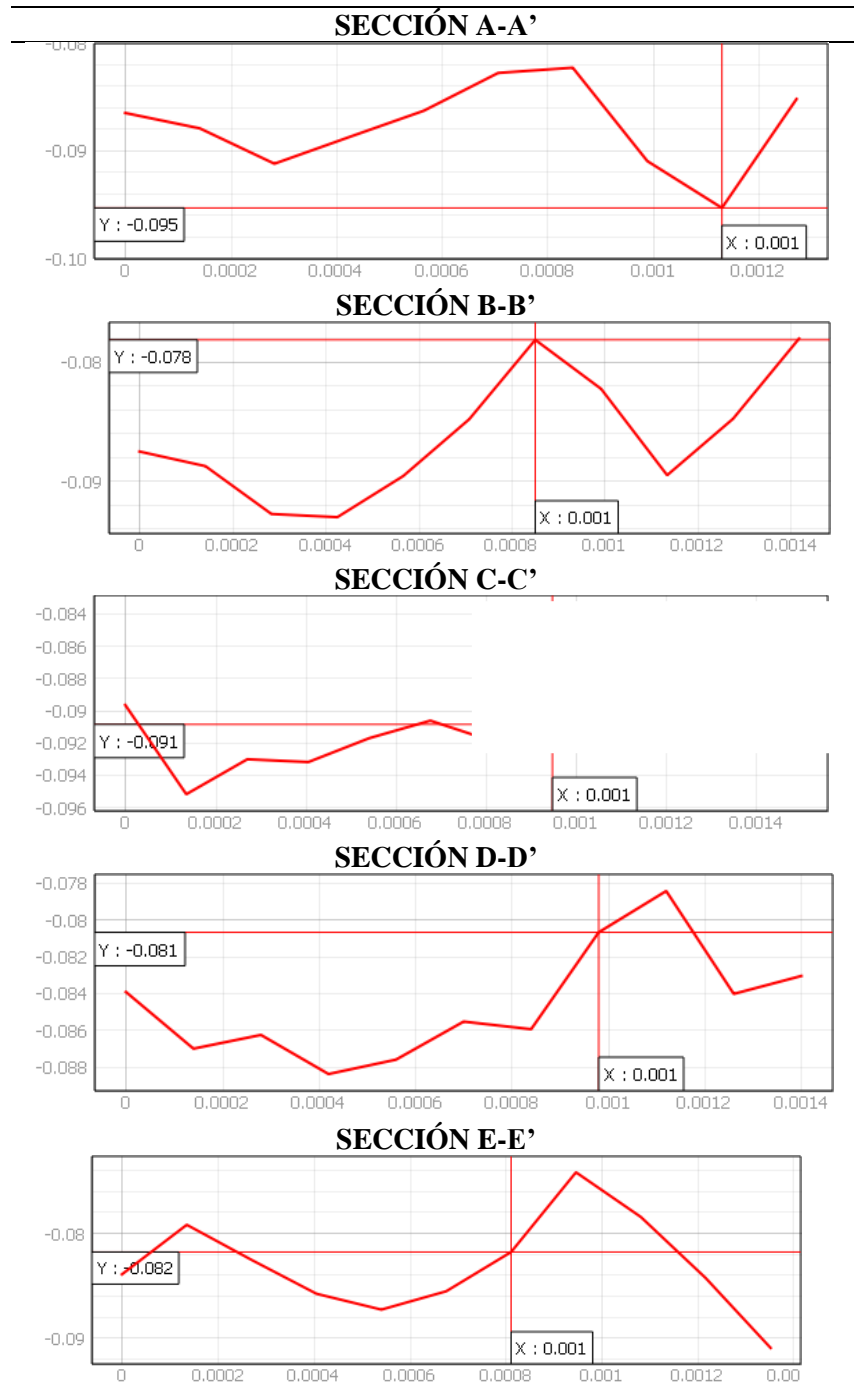


Figura 53. DInSAR 8 diciembre 2022 - 13 enero 2023

Nota. Fuente propia

Tabla 12

Gráficos de deformación DInSAR 8 diciembre 2022 - 13 enero 2023.



Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

Para esta fecha en especifica los valores de deformación son todos negativos a lo largo de las 5 secciones, lo cual indicaría una subsidencia en la zona de estudio. Los valores van desde -7,8 cm hasta -9,5 cm, tomando en cuenta que las últimas tres secciones se centran en nuestra zona de monitoreo tenemos un valor de deformación promedio de -8,5 cm.

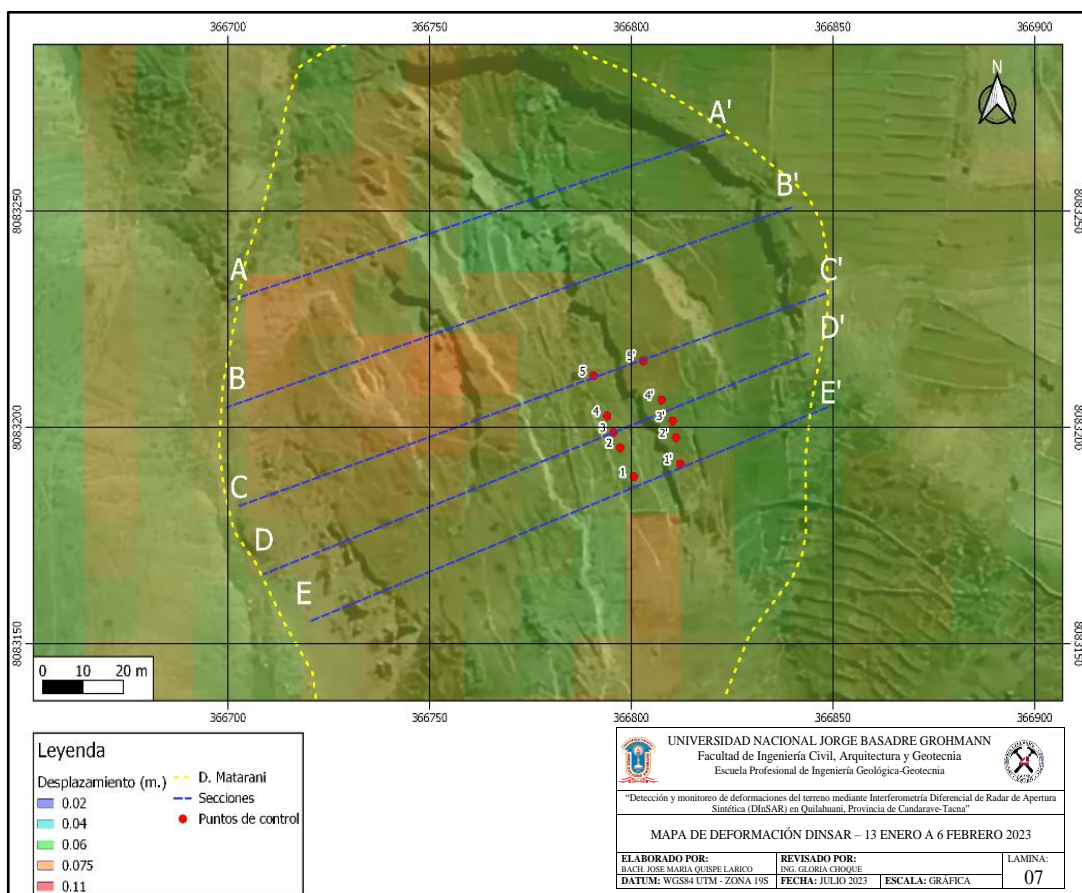
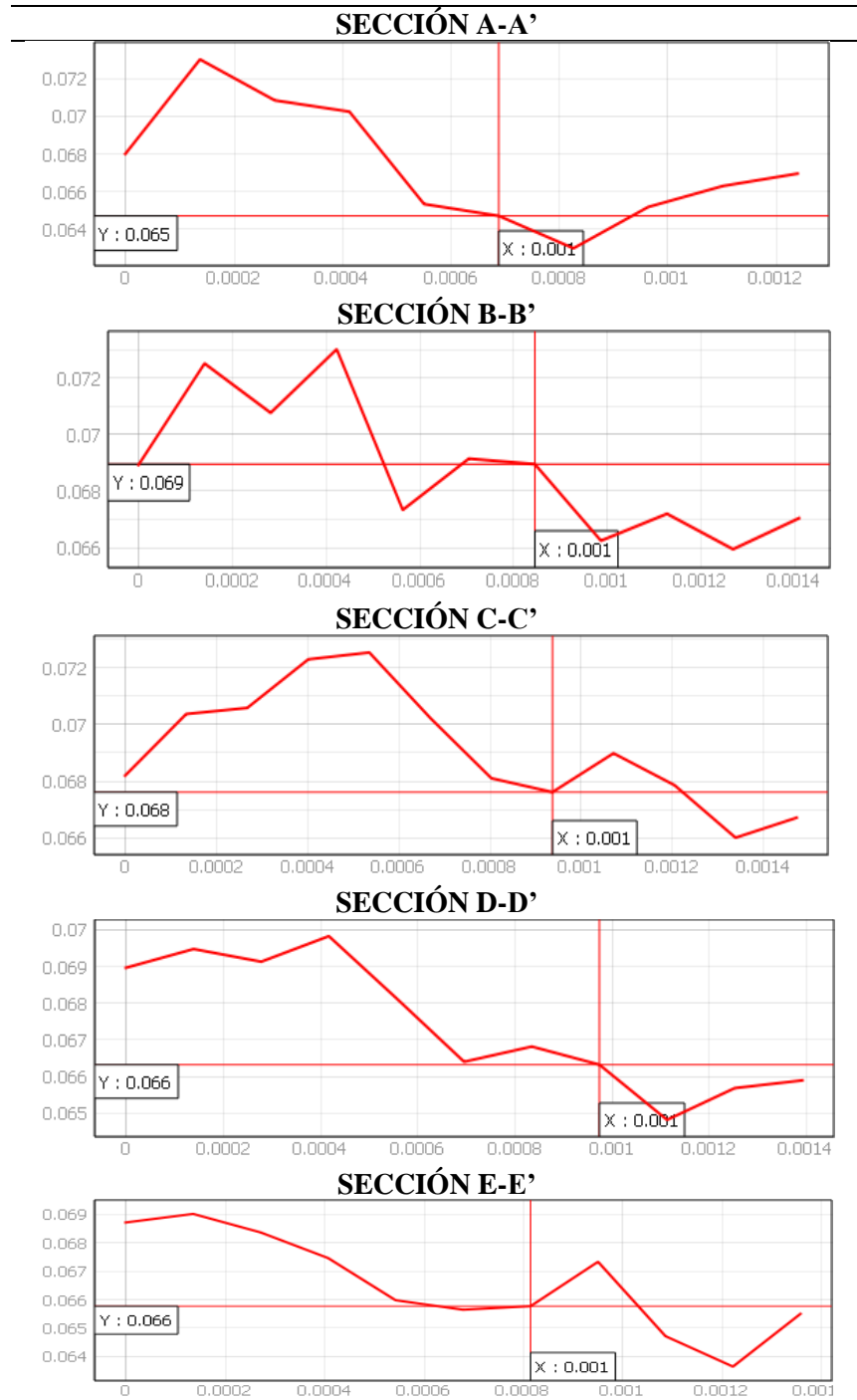


Figura 54. DInSAR 13 enero - 6 febrero 2023.

Nota. Fuente propia.

Tabla 13

Gráficos de deformación DInSAR 13 enero - 6 febrero 2023.



Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

En este caso los valores de deformación cambiaron a positivo variando de 6,4 cm a 7,2 cm. Si nos centramos en las últimas 3 secciones podemos ver un valor promedio de deformación de 6,7 cm, esto significa que el terreno se ha acercado hacia el satélite en la línea de visión dicho metrado.

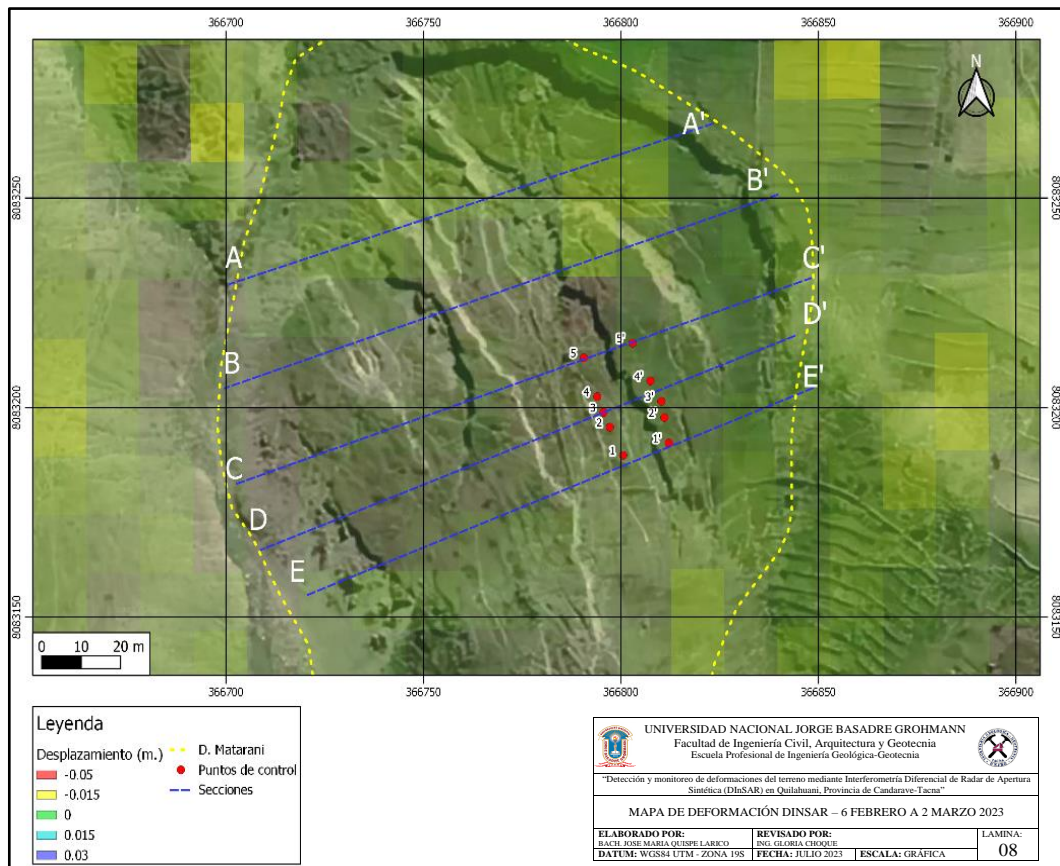
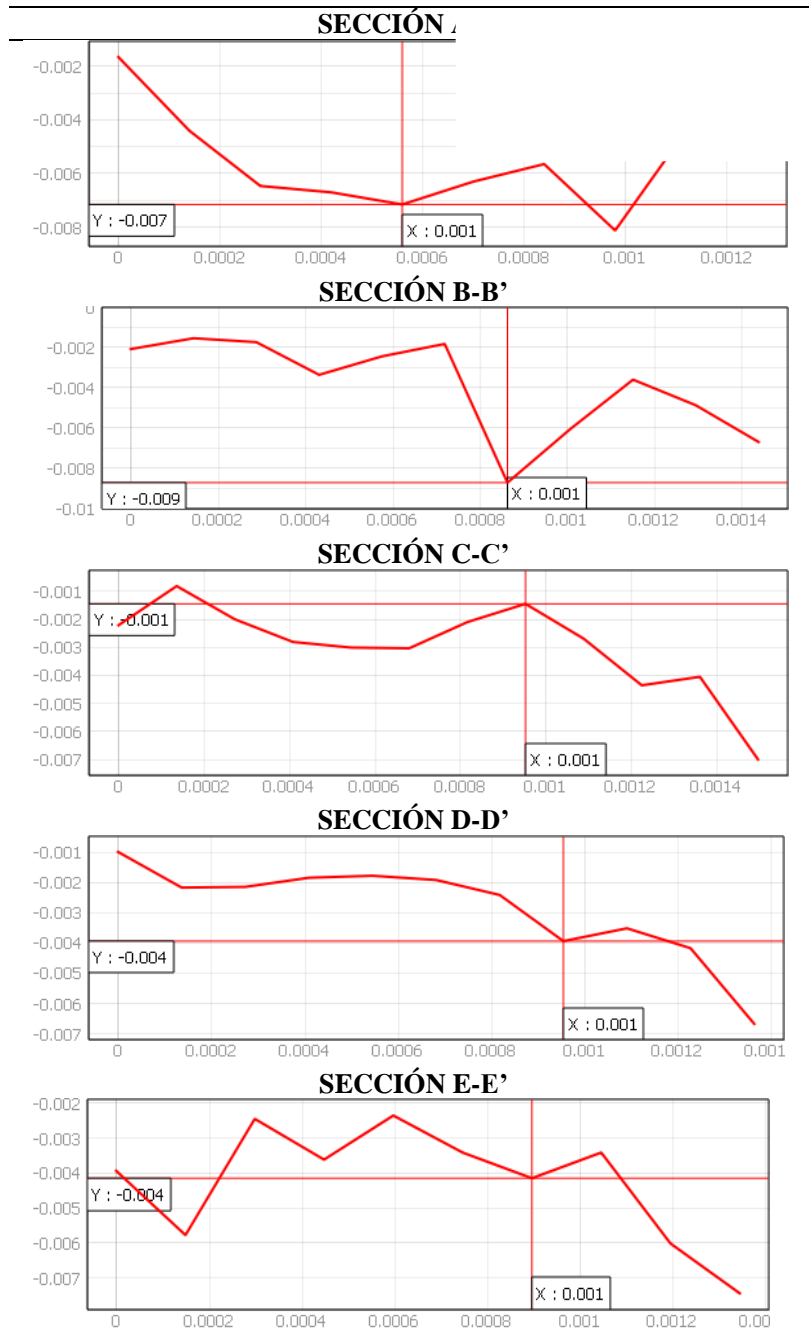


Figura 55. DInSAR 6 febrero - 2 marzo 2023.

Nota. Fuente propia

Tabla 14

Gráfico de deformación DInSAR 6 febrero - 2 marzo 2023.



Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

En este caso hablamos de una deformación negativa sin embargo los valores son menores a -1cm lo cual hace notar que está iniciando un proceso de asentamiento del terreno en dirección de los del satélite.

4.3.PROPUESTA DE MONITOREO GEOTÉCNICO

En este punto se plantea diferentes propuestas técnicas para proyectos de instrumentación y monitoreo, en donde se contemplaron inclinómetros, extensómetros de cinta y cable, así como el monitoreo DInSAR.

- PERFORACIÓN E INSTRUMENTACIÓN EN QUILAHUANI

Para esta sección se presenta el presupuesto de perforación e instrumentación de 2 inclinómetros con una profundidad de 100 metros cada uno, donde el valor suma un total de 62 050 USD. (Ver tabla 15)

Tabla 15

Presupuesto de perforación e instrumentación en Quilahuani.

Perforación e instrumentación geotécnica en Quilahuani						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	PERSONAS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
COSTO DIRECTO						\$42 020
1	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACIÓN					\$ 4 000
	Movilización de equipos (Tacna - Quilahuani)	Glb.		1	\$ 2000	\$ 2 000
	Desmovilización de equipos (Tacna - Quilahuani)	Glb.		1	\$ 2000	\$ 2 000
2	PERFORACIÓN DIAMANTINA					\$ 18 400
	Perforación HQ	m.		100	\$ 100	\$ 10 000
	Revestimiento HW	m.		50	\$ 50	\$ 2 500
	Revestimiento PW	m.		50	\$ 50	\$ 2 500
	Bomba de Agua	Día		20	\$ 100	\$ 2 000
	Luminaria para turno noche	Día		20	\$ 20	\$ 400
	Compresora para Limpieza de pozos	Día		20	\$ 40	\$ 800
	Traslado e Instalación en puntos de perforación	Und.		2	\$ 100	\$ 200
3	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA					\$ 19 120
3.1	Tubería Inclínométrica					
	Suministro e Instalación de Tubería Inclínométrica	ml		204	\$ 75	\$ 15 300
	Suministro e Instalación de Tapa superior de tubería inclinométrica.	Und.		2	\$ 10	\$ 20
	Suministro e Instalación de Tapa inferior de tubería inclinométrica.	Und.		2	\$ 25	\$ 50
3.2	Preparación y Acabados de Pozos					
	Suministro de Bentonita en Polvo (saco de 25 kg)	Und.		60	\$ 21	\$ 1 260
	Suministro de Cemento (bolsas de 50 kg)	Und.		120	\$ 9	\$ 1 080
	Suministro de Grava de Cuarzo de 2mm (bolsas de 40 kg)	Und.		5	\$ 27	\$ 135
	Suministro de Bentonita en Pellets 3/8" (saco de 23 kg)	Und.		5	\$ 25	\$ 125
	Protector de acero de 4" x 1.5 mts, incluye candados + dado de concreto	Und.		2	\$ 75	\$ 150
	Señalética y letreros para instrumentación	Und.		2	\$ 50	\$ 100
3.3	INSITU					
	Lectura base de cada instrumentación (inclínómetro)	Glb.		1	\$ 200	\$ 200
	Cajas plásticas porta testigos	Und.		70	\$ 10	\$ 700
4	ACTIVIDADES DE GABINETE					\$ 500
	Informe Técnico (Perforación, Logueo, protocolos, etc.)	Glb.		1	\$ 500	\$ 500
GASTOS GENERALES						\$20 030
1	PERSONAL DEL PROYECTO					
	Ing. Geólogo - Geotécnico	MES	2	1	\$1 500	\$3 000
	Operador de Perforadora	MES	2	1	\$1 250	\$2 500
	Ayudantes de perforación	MES	4	1	\$750	\$3 000
	Conductor 1	MES	1	1	\$1 000	\$1 000
	Conductor 2	MES	1	1	\$1 000	\$1 000
2	GASTOS ADMINISTRATIVOS					
	Exámenes Médicos	GLB	10	1	\$50	\$500
	EPP's + EPP's COVID 19	MES	10	1	\$100	\$1 000
	SCTR	MES	10	1	\$25	\$250
	Inducciones	GLB	10	1	\$50	\$500
3	SEGUROS					
	Seguro Vida Ley	GLB	10	1	\$20	\$200
5	MOVILIDAD					
	Camioneta	DÍAS	1	30	\$50	\$1 500
	MiniBus	DÍAS	1	30	\$75	\$2 250
	Combustible para movilidades	DÍAS	2	30	\$25	\$1 500
	Combustible para perforadora	DÍAS	1	30	\$15	\$450
6	TRANSPORTE - VIAJES					
	Pasajes Terrestres	GLB	10	2	\$50	\$1 000
7	EQUIPOS E INSUMOS EN OBRA					
	Útiles de oficina	GLB	1	1	\$100	\$100
	Agua para consumo	Caja	10	1	\$8	\$80
8	EPPS COLECTIVOS					
	Señalización y delimitación de seguridad	GLB	1	1	\$200	\$200
MONTO TOTAL DEL CONTRATO						\$62 050

Nota. Fuente propia.

- **INSTRUMENTACION Y MONITOREO G. EN QUILAHUANI**

En esta sección el programa de monitoreo está compuesto por 3 extensómetros de cable y 5 extensómetros de cinta por un periodo de 3 meses, teniendo como monto total 16 629 USD. (Ver tabla 16)

Tabla 16

Instrumentación y monitoreo geotécnico en Quilahuani.

Instrumentación y Monitoreo geotécnico en Quilahuani						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	PERSONAS	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
COSTO DIRECTO						\$2 275
1	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA					\$ 1 775
1.1	Extensometría					
	Extensómetro de cinta	Und.		1	\$ 500	\$ 500
	Barras de acero liso	Und.		6	\$ 25	\$ 150
	Trípode, polea y pesa de 12 Lb	Und.		3	\$ 150	\$ 450
	Cable de acero trenzado	Und.		1	\$ 25	\$ 25
1.2	Preparación y Acabados de Pozos					
	Señalética y letreros para instrumentación	Und.		13	\$ 50	\$ 650
2	ACTIVIDADES DE GABINETE					\$ 500
	Informe Técnico (Instalación, Monitoreo, etc.)	Glb.		1	\$ 500	\$ 500
GASTOS GENERALES						\$14 354
1	PERSONAL DEL PROYECTO					
	Ing. Geólogo - Geotécnico	MES	1	3	\$1 500	\$4 500
	Asistente de campo	MES	2	3	\$750	\$4 500
	Conductor	MES	1	3	\$750	\$2 250
2	GASTOS ADMINISTRATIVOS					
	Exámenes Médicos	GLB	4	1	\$50	\$200
	EPP's + EPP's COVID 19	MES	4	1	\$100	\$400
	SCTR	MES	4	1	\$25	\$100
	Inducciones	GLB	4	1	\$50	\$200
3	SEGUROS					
	Seguro Vida Ley	GLB	4	1	\$20	\$80
4	MOVILIDAD					
	Camioneta	DIAS	1	15	\$50	\$750
	Combustible para movilidad	DIAS	1	15	\$50	\$750
5	TRANSPORTE - VIAJES					
	Pasajes Terrestres	GLB	4	2	\$50	\$400
6	EQUIPOS E INSUMOS EN OBRA					
	Útiles de oficina	GLB	1	1	\$100	\$100
	Agua para consumo	Caja	3	1	\$8	\$24
7	EPPS COLECTIVOS					
	Señalización y delimitación de seguridad	GLB	1	1	\$100	\$100
MONTO TOTAL DEL CONTRATO						\$16 629

Nota. Fuente propia.

- **MONITOREO DINSAR EN QUILAHUANI**

El monitoreo DInSAR consiste, en la detección de deformaciones del terreno en la zona de estudio por un periodo de 3 meses con presentaciones mensuales, haciendo uso de imágenes radar provenientes del Sentinel 1 A-B en órbita ascendente y descendente.

El monto total es de 6 575 USD, donde un porcentaje aproximado de 95% tiene que ver con el salario del profesional, así como un computador portátil. (Ver tabla 17).

Tabla 17

Monitoreo DInSAR en Quilahuani.

Monitoreo DInSAR en Quilahuani						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	PERSONAS	CANTIDA D	VALOR UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
COSTO DIRECTO						\$1 575
1	DInSAR					\$ 1 575
1.1	Obtención y Procesamiento de imágenes					
	Obtención de imágenes radar	Und.		0	\$ 1 000	\$ -
	Procesamiento	Und.		0	\$ 250	\$ -
	Confeción de mapas y secciones	Und.		0	\$ 150	\$ -
	Computador	Und.		1	\$ 1 500	\$ 1 500
1.2	Servicio de internet					
	Internet	Und.		3	\$ 25	\$ 75
2	ACTIVIDADES DE GABINETE					\$ -
	Informe Técnico (Instalación, Monitoreo, etc.)	Glb.		0	\$ 500	\$ -
GASTOS GENERALES						\$5 000
1	PERSONAL DEL PROYECTO					
	Ing. Geólogo - Geotécnico	MES	1	3	\$1 500	\$4 500
4	MOVILIDAD					
	Camioneta	DIAS	1	3	\$50	\$150
	Combustible para movilidad	DIAS	1	3	\$50	\$150
5	TRANSPORTE - VIAJES					
	Pasajes Terrestres	GLB	1	2	\$50	\$100
6	EQUIPOS E INSUMOS EN OBRA					
	Útiles de oficina	GLB	1	1	\$100	\$100
MONTO TOTAL DEL CONTRATO						\$6 575

Nota. Fuente propia.

- **Discusión**

Entre las metodologías presentadas respecto a la instrumentación y con base en los presupuestos presentados podemos afirmar que el monitoreo DInSAR es por lejos uno de los más óptimos en lo que respecta a costo beneficio. Sin embargo, entendiendo que la comprobación en campo siempre será importante, podemos apoyar el monitoreo DInSAR con extensómetros de cinta o cable, teniendo un periodo de evaluación cada 15 días, optando que este sea lo más cercano a las orbitas del satélite que desee utilizarse.

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA TÉCNICA DINSAR Y EXTENSOMETRÍA

En la presente sección se hizo un análisis comparativo entre los desplazamientos hallados bajo la técnica DInSAR y el monitoreo en campo con extensometría. Para este análisis se tomaron en cuenta las secciones generadas C-C', D-D' y E-E' en las zonas específicas de los pares de extensometría 5, 3, y 1 respectivamente.

Los valores positivos y negativos en extensometría significan un ensanchamiento o reducción de la apertura de la grieta, sin embargo, en el DInSAR estos valores significan el acercamiento o alejamiento de la superficie del terreno en la línea de visión del satélite.

Tabla 18

Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 1 en la sección E-E', en metros.

	Extensometría (m.)	DInSAR (m.)
Fecha\N°	1	E-E'
Ini. 12 de Nov	0	0
12nov-8dic	0,03	0,059
8dic-7ene	0,19	-0,074
7ene-28ene	-0,13	0,066
28ene-25feb	0,05	-0,04

Nota. Fuente propia. La tabla 18 hace una comparación en metros entre los resultados de deformación de la técnica DINSAR y la metodología de extensometría entre el par extensométrico 1 y la línea de sección E-E'.

Para la primera fecha tenemos valores positivos en ambos casos, lo cual indica un ensanchamiento de la grieta y un acercamiento en la línea del satélite, la zona se ha desplazado en la dirección del deslizamiento. (Bloque inferior se desplaza)

Para la segunda fecha tenemos un valor positivo y negativo, lo cual indica un ensanchamiento de la grieta, pero debido al valor negativo en el DInSAR, sabemos que se trata de un alejamiento o subsidencia de la zona, pudiendo caracterizar así un movimiento rotacional de la zona de estudio. (Bloque inferior se desplaza, rotacional)

Para la tercera fecha tenemos valores negativos y positivos, lo cual indica una reducción de la apertura de la grieta y un movimiento en dirección del sensor.

(Bloque superior se desplaza).

Para la última fecha tenemos valores positivos y negativos, hablamos de un ensanchamiento de la grieta, así como un movimiento de subsidencia. (El bloque inferior se desplaza, rotacional)

Tabla 19

Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 3 en la sección D-D', en metros.

	Extensometría (m.)	DInSAR (m.)
Fecha\N°	3	D-D'
Ini. 12 de Nov	0	0
12 nov-8dic	0,04	0,062
8 dic-7ene	0,01	-0,081
7 ene-28ene	0,07	0,066
28 ene-25feb	-0,02	-0,04

Nota. Fuente propia. La tabla 19 hace una comparación en metros entre los resultados de deformación de la técnica DINSAR y la metodología de extensometría entre el par extensométrico 3 y la línea de sección D-D'.

Para la primera fecha tenemos valores positivos en ambos casos indica un ensanchamiento de la grieta y un acercamiento en la línea del satélite, la zona se ha desplazado en la dirección del deslizamiento. (Bloque inferior se desplaza)

Para la segunda fecha tenemos un valor positivo y negativo, lo cual indica un ensanchamiento de la grieta, pero debido al valor negativo en el DInSAR, sabemos que se trata de un alejamiento o subsidencia de la zona, pudiendo

caracterizar así un movimiento rotacional de la zona de estudio. (Bloque inferior se desplaza, rotacional)

Para la tercera fecha tenemos valores positivos, lo que indica un ensanchamiento de la apertura de la grieta y un movimiento en dirección del sensor. (Bloque inferior se desplaza).

Para la última fecha tenemos dos valores negativos, hablamos de un ensanchamiento de la grieta, así como un movimiento de subsidencia. (Bloque superior se desplaza, rotacional)

Tabla 20

Comparación de resultados entre la técnica DInSAR y extensometría, par 5 en la sección C-C', en metros.

	Extensometría (m.)	DInSAR (m.)
Fecha\N°	5	C-C'
Ini. 12 de Nov	0	0
12nov-8dic	0,05	0,058
8dic-7ene	0,01	-0,089
7ene-28ene	0,04	0,068
28ene-25feb	0,1	-0,02

Nota. Fuente propia. La tabla 19 hace una comparación en metros entre los resultados de deformación de la técnica DINSAR y la metodología de extensometría entre el par extensométrico 5 y la línea de sección C-C'.

Para la primera fecha tenemos valores positivos en ambos casos lo cual indica un ensanchamiento de la grieta y un acercamiento en la línea del satélite, la zona se ha desplazado en la dirección del deslizamiento. (Bloque inferior se

desplaza)

Para la segunda fecha tenemos un valor positivo y negativo, lo cual indica un ensanchamiento de la grieta, pero debido al valor negativo en el DInSAR, sabemos que se trata de un alejamiento o subsidencia de la zona, pudiendo caracterizar así un movimiento rotacional de la zona de estudio. (El bloque inferior se desplaza, rotacional)

Para la tercera fecha tenemos valores positivos, lo cual indica un ensanchamiento de la apertura de la grieta y un movimiento en dirección del sensor. (El bloque inferior se desplaza).

Para la última fecha tenemos dos valores negativos, hablamos de un ensanchamiento de la grieta, así como un movimiento de subsidencia. (Bloque superior se desplaza, rotacional)

Con base en las tablas 18, 19 y 20 podemos caracterizar el deslizamiento de la siguiente manera. (Tabla 21)

Tabla 21

Caracterización de un deslizamiento con base en la técnica DInSAR y extensometría.

Extensometría	DInSAR	Comentario
-	-	Bloque superior se desplaza, rotacional
-	+	Bloque superior se desplaza
+	-	Bloque inferior se desplaza, rotacional
+	+	Bloque inferior se desplaza

Nota. Fuente propia. La tabla 21 hace referencia a una caracterización del deslizamiento en Quilahuani, con base en los valores obtenidos y sus observaciones plasmadas en las tablas anteriores.

A continuación, se presenta la línea de sección B'-B ubicada anteriormente, sobre la cual se realizó un análisis respecto a la cinemática del deslizamiento teniendo en cuenta los monitoreos geotécnicos, satelital, geología y acciones antrópicas.

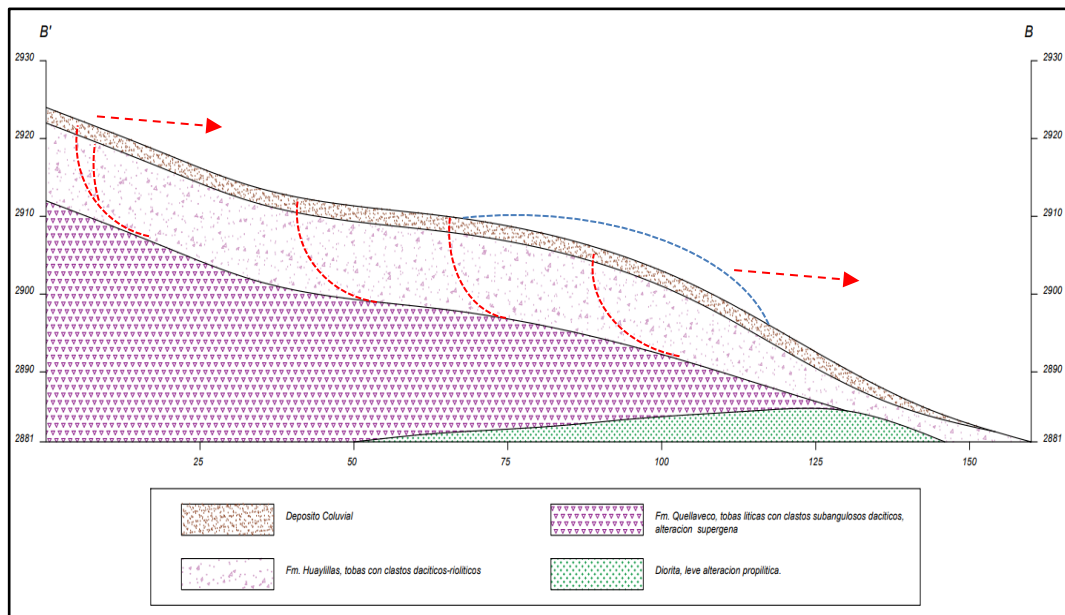


Figura 56. Línea de sección B'-B

Nota. Fuente propia.

En la zona estudiada se presenta de manera muy relevante la agricultura, por lo cual la presencia de canales de regadío y surcos por los cuales transita el agua producto de esta actividad son muy comunes.

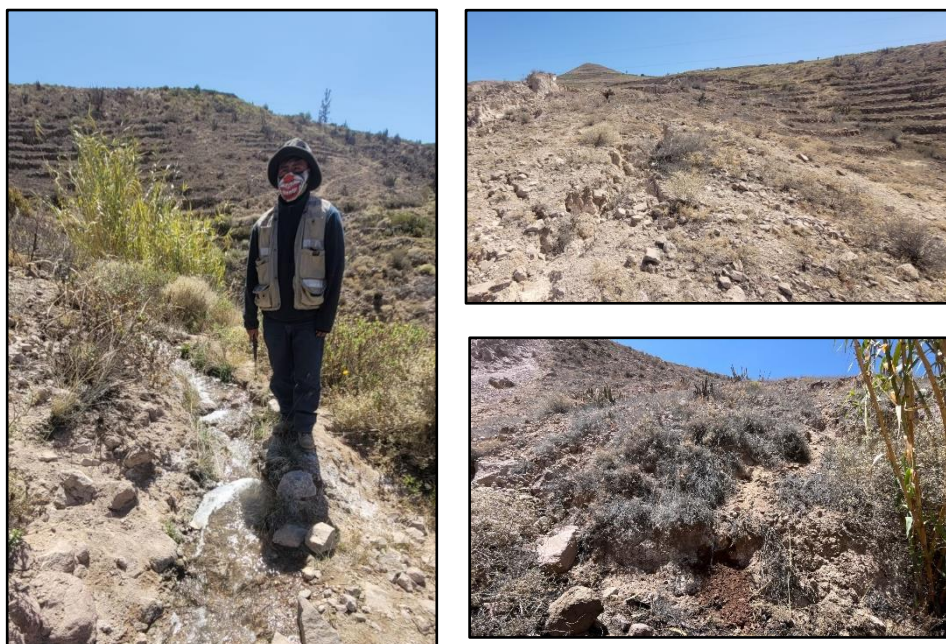


Figura 57. *Canales de regadío*

Nota. Fuente propia.

Teniendo en cuenta que la zona mapeada consiste básicamente en una capa superior de material cuaternario, seguida de la formación huaylillas, ambas porosas, suprayaciendo al volcánico Quellaveco de tobas líticas más compactas y una diorita que instruye a este volcánico, podemos decir que las grietas de tracción y posterior deslizamiento de tipo rotacional se deben a un saturamiento de capas inferiores de los volcánicos, cuyo contacto (Fm. Quellaveco-Fm. Huaylillas), podrían haber actuado como una superficie a través de la cual se produce una lubricación facilitando así este fenómeno, debido a que se han evidenciado puntos de humedad y algunos de escurrimiento en la base del deslizamiento.

Explorando la parte estructural de la zona, se han indagado algunas fallas inferidas como se describen en el trabajo de Soncco (2018), con azimut aparente de 10° , sin embargo, esta estructura se proyecta desde el poblado de Quilahuani hacia la quebrada cercana al cementerio del mismo, en el margen izquierdo de la zona estudiada, por lo que su incidencia sería mínima en comparación con la acción antrópica, geológica y pendientes elevadas.

CONCLUSIONES

La zona estudiada presenta valores positivos de 0,01m hasta 0,19m en el extensómetro 5 y 1 respectivamente, evidenciando un movimiento de tensión, siendo esto entre las fechas del 8 de diciembre y 7 enero. Sin embargo, en la siguiente fecha de monitoreo tenemos valores negativos de hasta -0,13m evidenciando un movimiento de asentamiento entre los pares de control. Con base en lo anteriormente descrito, podemos concluir que se trata de un movimiento basculante de manera rotacional en varios bancos.

Como parte de la evaluación geológica se describe la presencia de una capa superficial de depósitos coluviales, tobas con clastos dacíticos-riolíticos pertenecientes a la formación Huaylillas, tobas líticas con clastos subangulosos de dacitas y la presencia de dioritas en el toe o base del deslizamiento. Concluyendo de esta manera que, el fenómeno pudo ocasionarse por un saturamiento de los volcánicos Huaylillas y Quellaveco; producto de la actividad pluvial y constante riego de parcelas en la parte superior de la zona, generando una superficie de lubricación y posterior avance en el contacto de los mismos.

En cuanto al DInSAR, según las fechas descritas en la tabla 10, tomando en cuenta las secciones A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', podemos evidenciar valores promedios

de deformación de -9 a 6 cm; -8,5 a 6,2 cm; -8,9 a 6,3 cm; -8,1 a 6,3 cm y de -7,4 a 6,2 cm, en dirección de la línea de visión del satélite, lo cual indica al igual que en el punto anterior, un movimiento de tracción y asentamiento constante.

Respecto a la propuesta de metodologías de monitoreo geotécnico de más óptimo costo, con base en las tablas 15, 16 y 17, donde se describen presupuestos de diferentes alternativas, podemos concluir que el monitoreo DInSAR aun con visitas esporádicas de reconocimiento a campo e implementación de extensómetros, es por lejos en relación costo beneficio, una de las mejores alternativas, con un valor neto de 6 575 USD frente a los más de 60 000 USD de la primera alternativa planteada. Con base en lo expuesto podemos concluir que el DInSAR es una herramienta muy potente para detectar, caracterizar y monitorear procesos de deformación en casi cualquier zona que se decida estudiar, mientras se tengan imágenes radar disponibles.

En cuanto a la relación existente entre la técnica DInSAR y la metodología de extensometría, a pesar de medir en diferentes formas la deformación en terreno, se puede concluir que hay una correspondencia cercana al 70-80 % en cuanto a su magnitud, permitiendo de esta manera una caracterización más oportuna del deslizamiento como lo indica en la tabla 21.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de metodologías más complejas como PSINSAR y SBAS, para un mejor tratamiento de la información siempre y cuando se tenga al menos un número superior a 20 imágenes radar para una correcta modelación de las condiciones atmosféricas con suficientes puntos reflectantes en la zona de estudio, así como reporte de procesos de deformación a lo largo del tiempo.

En lo posible se recomienda hacer uso de imágenes radar con un menor tamaño de pixel y menor ciclo de revisita.

Respecto a la polarización de las imágenes radar, se recomienda tener en cuenta la presencia de vegetación o cuerpos de agua.

Como parte de un programa de monitoreo geotécnico se sugiere explorar algunas alternativas como puntos geodésicos, monitoreo con prismas y la implementación de algún inclinómetro cercano a la zona de Quilahuani.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aro, R. (2020). *Efecto de la infiltración del agua en los deslizamientos de las laderas de Quilahuani*. Tacna: UNJBG.
- Bellido, E. (1979). *GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO DE MOQUEGUA. BOLETÍN N° 15. Serie A: Carta Geológica Nacional*. Lima: INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/132>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A.
- Copons, R., Tallada, A. (2009). *Movimientos de ladera*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009.España. Vol. (17.3) 284-294. ISSN: 1132-9157
- De la Cruz, N., De la Cruz, O. (2001). *Memoria explicativa de la revisión geológica Cuadrángulo de Tarata*, INGEMMET. Lima.
- Fenton, G. (1997). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. Utah: ASCE Geotechnical Safety and Reliability Committee.
- Fernández, M. (2009). *Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR*. Granada: Editorial de la Universidad de Granada.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 39, NO. 1*, 8-20.
- Fukuzono, T. (1985). *A new method for predicting the failure time of a slope*. In: Proceedings of the fourth international conference and field. Tokyo: Japan Landslide Society, 145–50.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *INGENIERÍA GEOLÓGICA*. Madrid: Pearson Educación.

- Huete, A., & Chuvieco, E. (2009). *Fundamentals of satellite remote sensing*. New York: CRC Press.
- IAEG Commission on Landslides. (1990). Suggested nomenclature for landslides. *BULLETIN of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY de l'Association Internationale de GEOLOGIE DE L'INGÉNIEUR* 41, 13-16.
- Oyanguren, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid.
- Podest, E. (2019). *SAR Processing and data análisis*. ARSET, NASA. USA.
- Rose, N., & Hungr, O. (2007). *Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 308-320. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2006.07.014>
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Member, IEEE, Li, F., . . . Goldstein, R. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 333-382.
- Sierra, B. (1992). *Técnicas de investigación social*. España: Paraninfo.
- Sociedad Nacional de Minería, P. y. (2004). *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea*. Lima
- Soncco, J., Manrique, N. (2018). *Peligro por deslizamientos en el sector de Matarani*. Informe técnico A6833, INGEMMET. Lima.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Tamariz, J. (07 de septiembre de 2020). *ATISoft*. Obtenido de <https://atisoft.com.mx/beneficios-de-una-constelacion-sar/>
- Tejada, G., Huisa, C., Sarmiento, Z., & Cerdeña, R. (2005). Estudio Geológico - Minero y Geoeconómico Preliminar de un Yacimientos de Silice (Cuarcita) en

Candarave 84. Tacna, 83 - 86.

Tocasuche, N. d., & Peñaloza, L. (2018). *Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias Norte y Valderrama del departamento de Boyacá*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Vela, J. (2015). *Estudio Tefro-estratigráfico de los depósitos asociados con las erupciones recientes del volcán Yucamane (Tacna)*. Tesis de ingeniería - UNSA.







ANEXOS

- ANEXO 1: Panel Fotográfico
- ANEXO 2: Mapas

ANEXO 1

Tabla 22

Fotografías 12 noviembre 2022.

Extensómetro 1	Extensómetro 2
	
Extensómetro 3	Extensómetro 4
	
Extensómetro 5	Zona de estudio
	

Nota. Fuente propia.

Tabla 23

Fotografías 8 diciembre 2022.

Extensómetro 1	Extensómetro 2
	
Extensómetro 3	Extensómetro 4
	
Extensómetro 5	Zona de estudio
	

Nota. Fuente propia.

Tabla 24

Fotografías 7 enero 2023.

Extensómetro 1	Extensómetro 2
	
Extensómetro 3	Extensómetro 4
	
Extensómetro 5	Zona de estudio
	

Nota. Fuente propia.

Tabla 25







Fotografías 28 enero 2023.

Extensómetro 1	Extensómetro 2
	
Extensómetro 3	Extensómetro 4
	
Extensómetro 5	Zona de estudio
	

Nota. Fuente propia.

Tabla 26

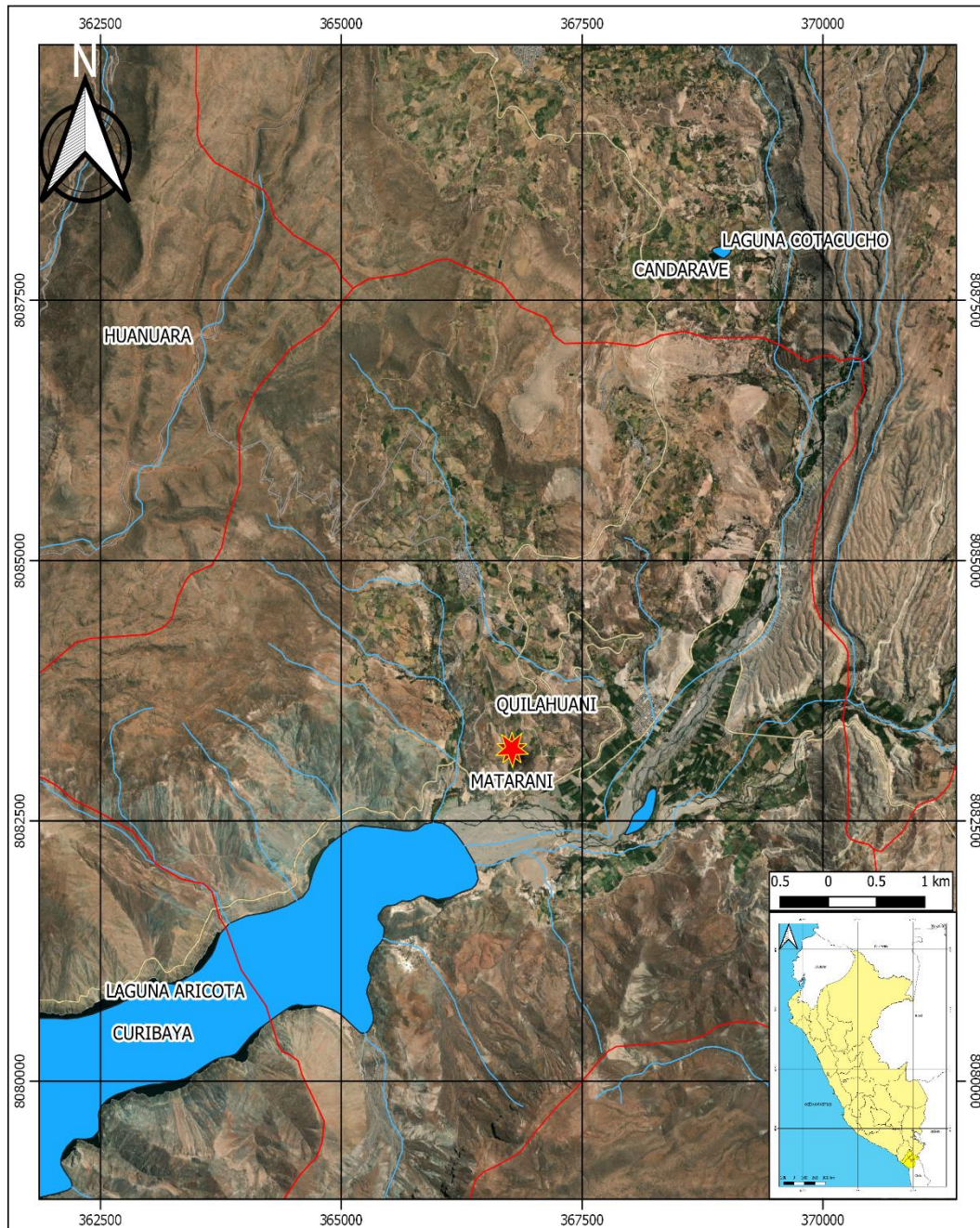
Fotografías 25 febrero 2023.


Extensómetro 1	Extensómetro 2
	
Extensómetro 3	Extensómetro 4
	
Extensómetro 5	Zona de estudio
	

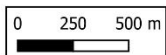
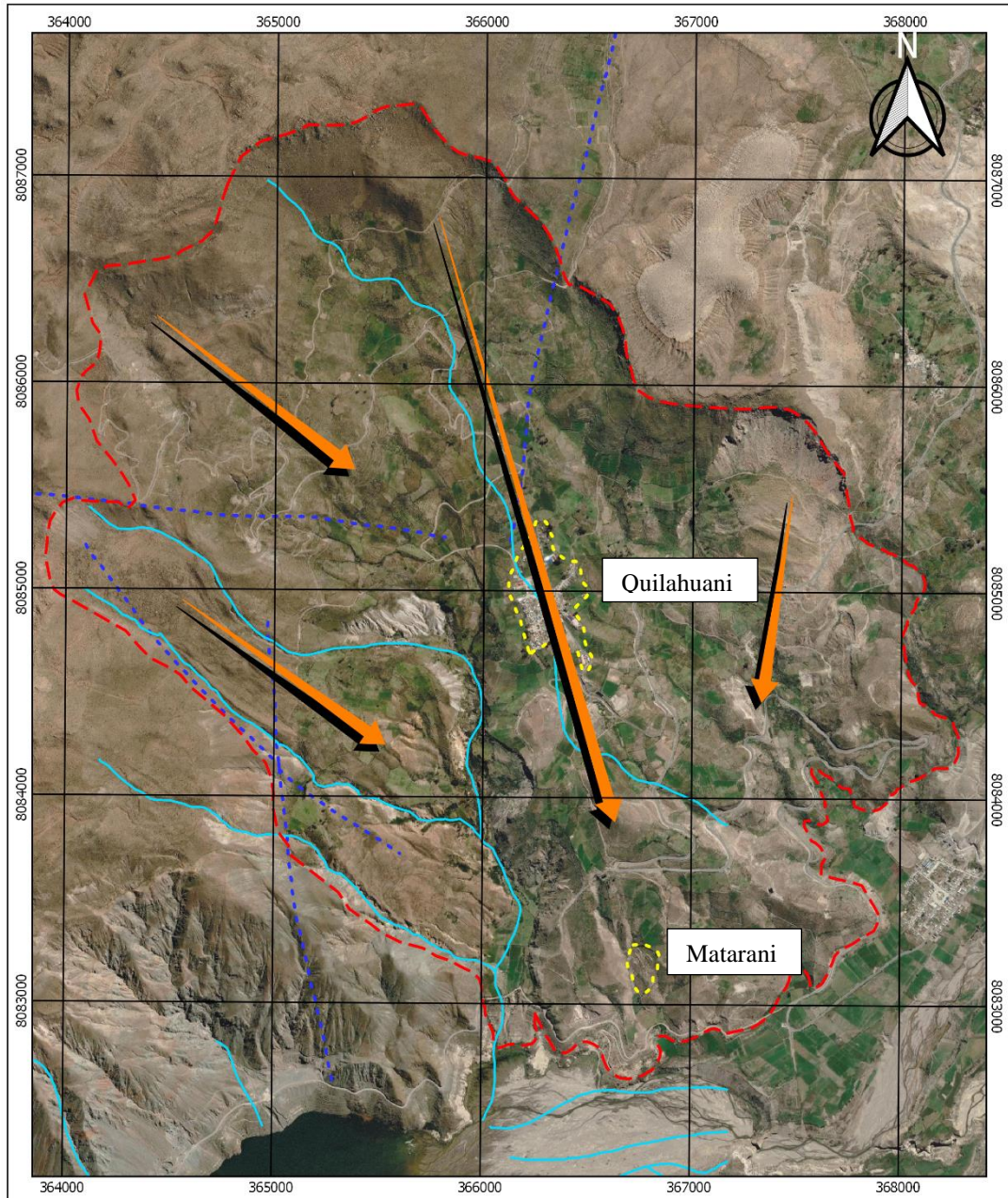
Nota. Fuente propia.

ANEXO 2

- MAPA DE UBICACIÓN
- DESLIZAMIENTO DE QUILAHUANI
- DESLIZAMIENTO DE MATARANI
- LINEAS DE SECCIÓN
- DINSAR 14 NOVIEMBRE - 8 DICIEMBRE 2022
- DINSAR 8 DICIEMBRE 2022 - 13 ENERO 2023
- DINSAR 13 ENERO – 6 FEBRERO 2023
- DINSAR 6 FEBRERO - 2 MARZO 2023
- MAPA GEOLÓGICO-MATARANI



 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia</p>		
<p>“Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Taena”</p>		
<p>MAPA DE UBICACIÓN MATARANI-QUILAHUANI</p>		
<p>ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO</p>	<p>REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE</p>	<p>LAMINA:</p>
<p>DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S</p>	<p>FECHA: JULIO 2023</p>	<p>ESCALA: GRÁFICA</p>
		<p>01</p>



LEYENDA

- Dirección-desplazamiento
- Deslizamiento
- Quilahuani-Matarani
- Dren
- Fallas inferidas



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
 Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia



"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Taena"

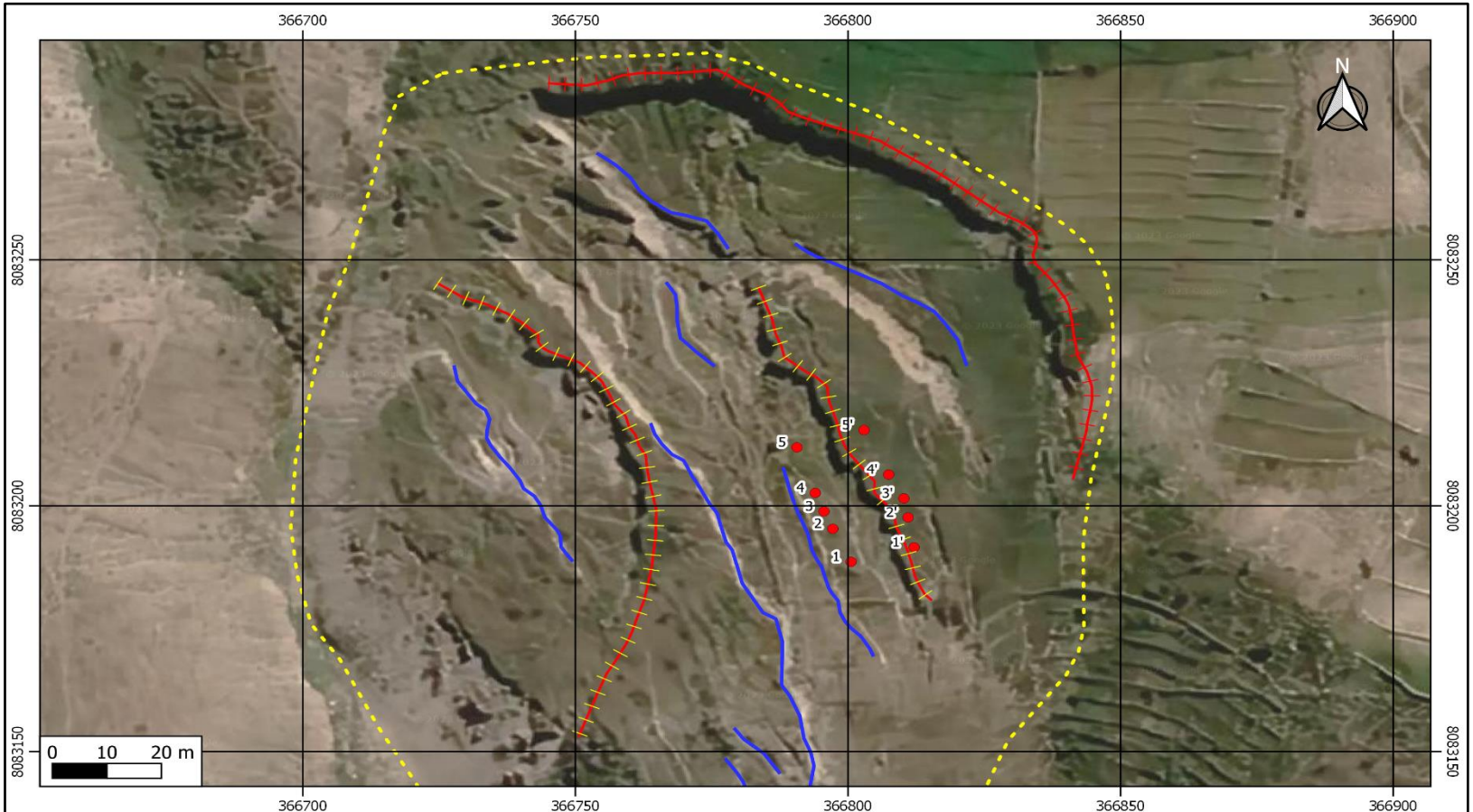
MAPA DE DESLIZAMIENTO ANTIGUO - QUILAHUANI

ELABORADO POR:
 BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S


REVISADO POR:
 ING. GLORIA CHOQUE
FECHA: JULIO 2023

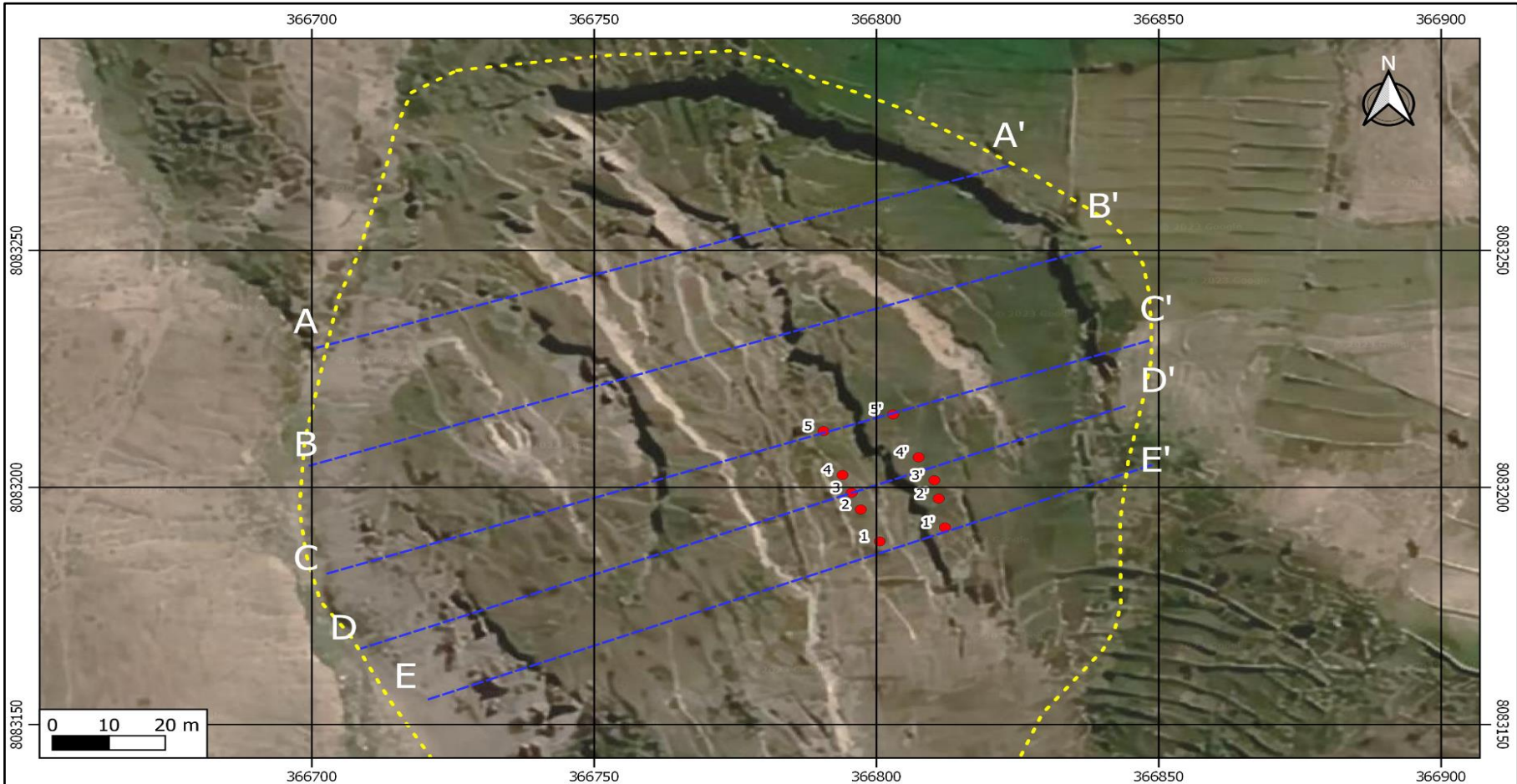
ESCALA: GRÁFICA

LAMINA:
 02



- Leyenda**
- +— Escarpe primario
 - - - Escarpe secundario
 - G. de tensión
 - - - D. Matarani
 - Puntos de control

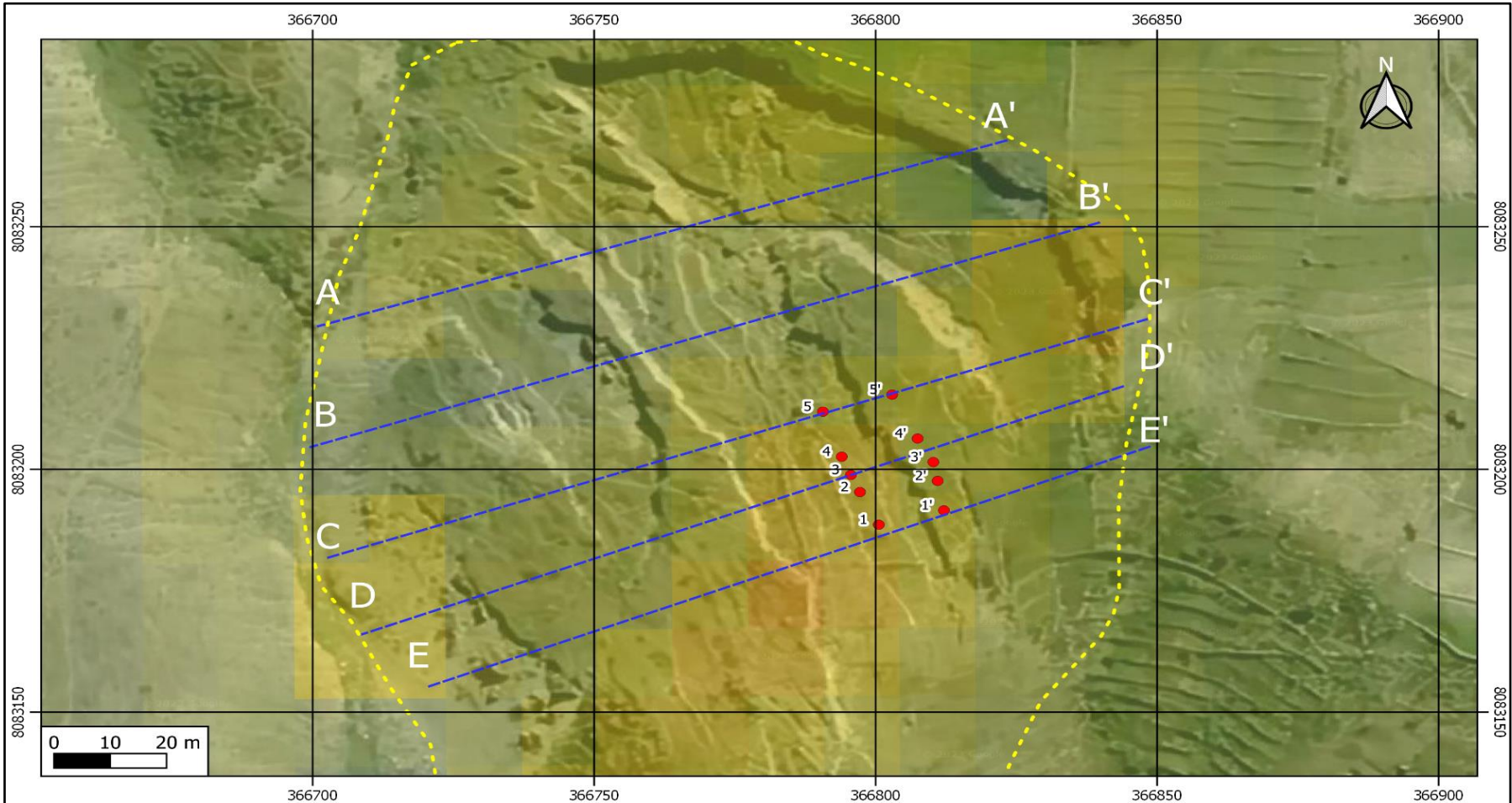
	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia	
<small>"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"</small>		
MAPA DE DESLIZAMIENTO - MATARANI		
ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE	LAMINA: 03
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	ESCALA: GRÁFICA



Leyenda

- - - D. Matarani
- - - Secciones
- Puntos de control

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia		
"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"		
LINEAS DE SECCION - DINSAR		
ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE	LAMINA: 04
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	ESCALA: GRÁFICA



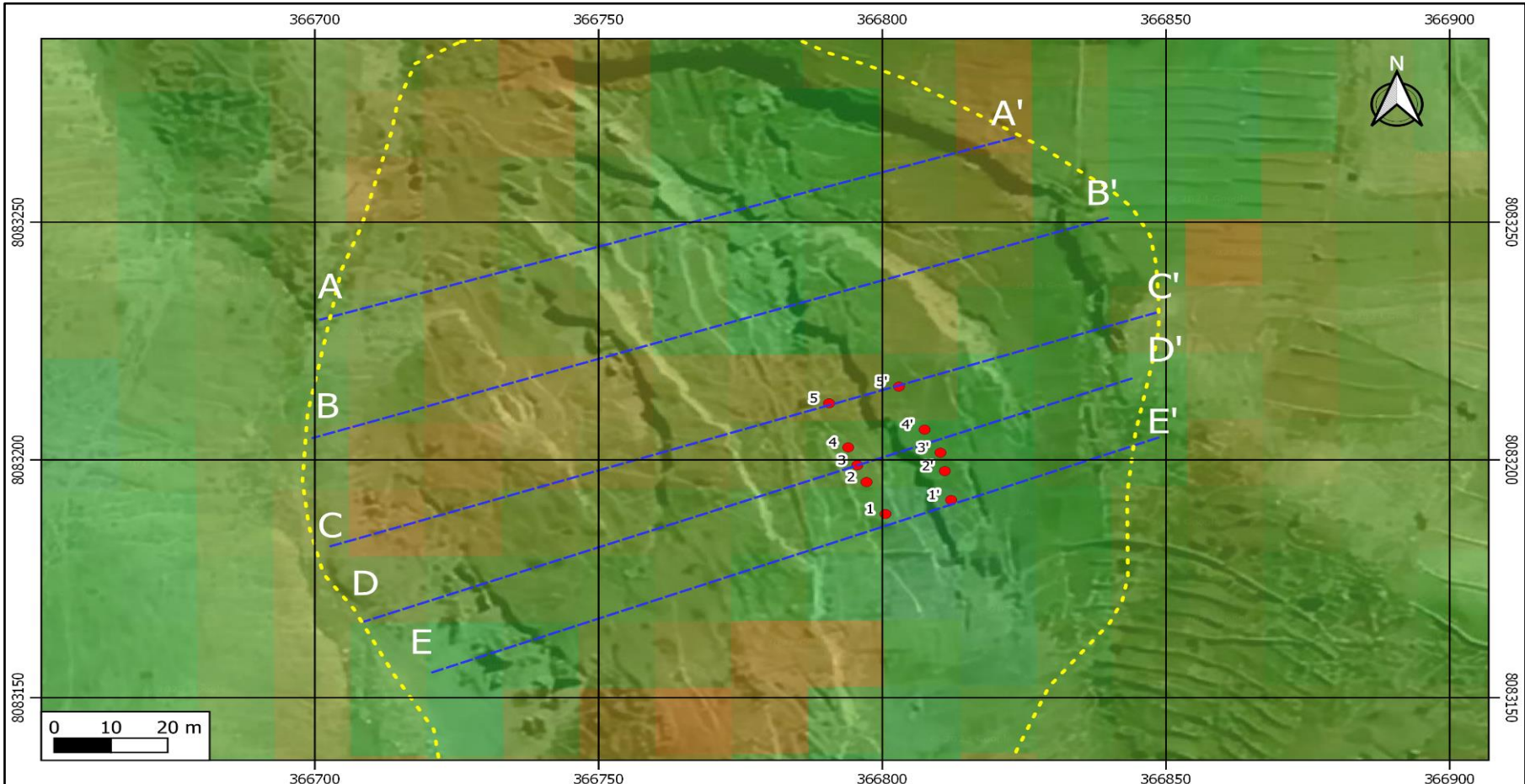
Leyenda

Desplazamiento (m.)

- 0
- 0.03
- 0.06
- 0.08
- 0.1

--- D. Matarani
--- Secciones
● Puntos de control

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia		
"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"		
MAPA DE DEFORMACIÓN DINSAR – 14 NOVIEMBRE A 8 DICIEMBRE 2022		
ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOOQUE	LAMINA: 05
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	ESCALA: GRÁFICA





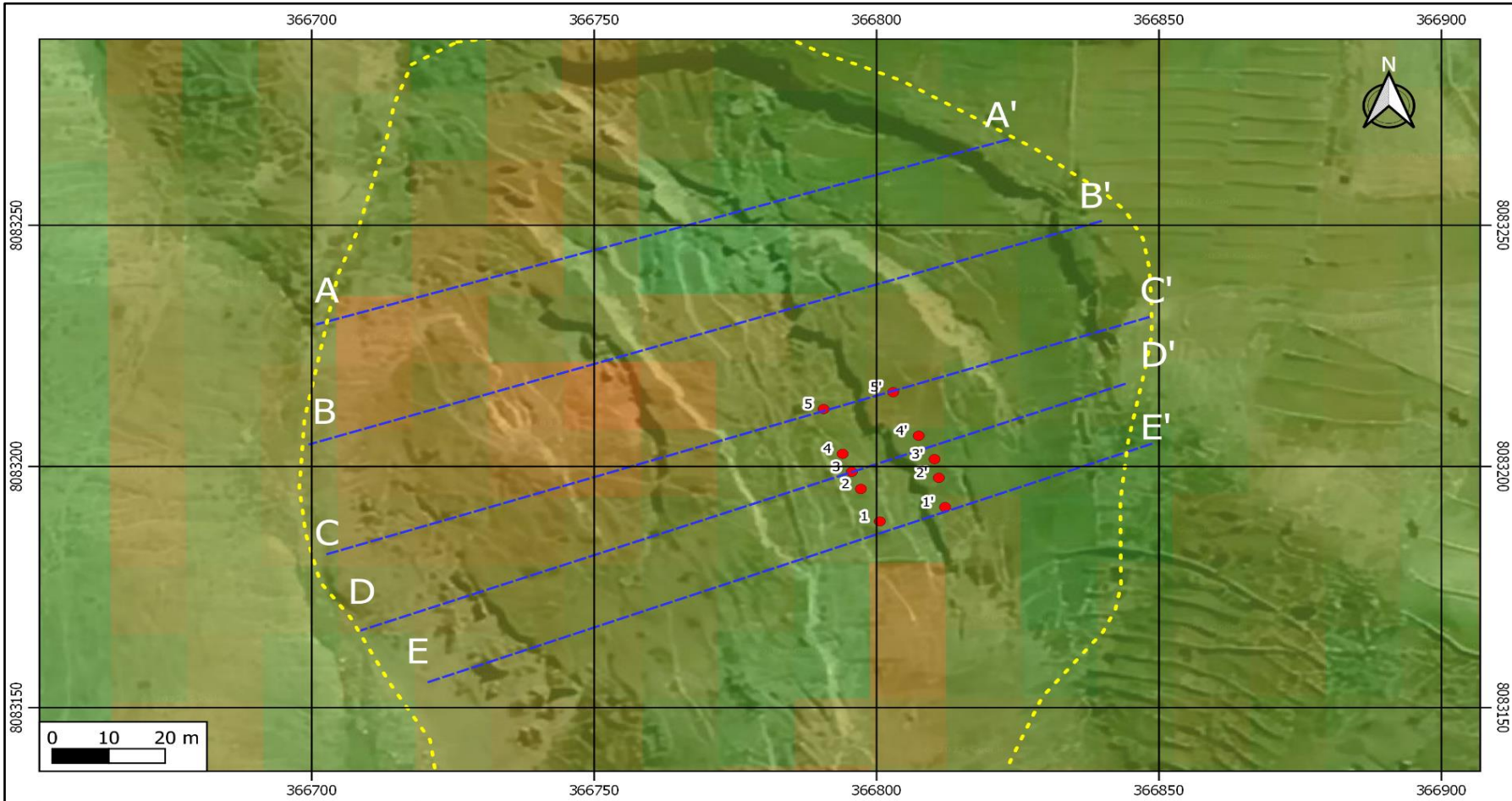
Leyenda

Desplazamiento (m.)

- 0.13
- 0.10
- 0.08
- 0.05
- 0.025



- D. Matarani
- Secciones
- Puntos de control

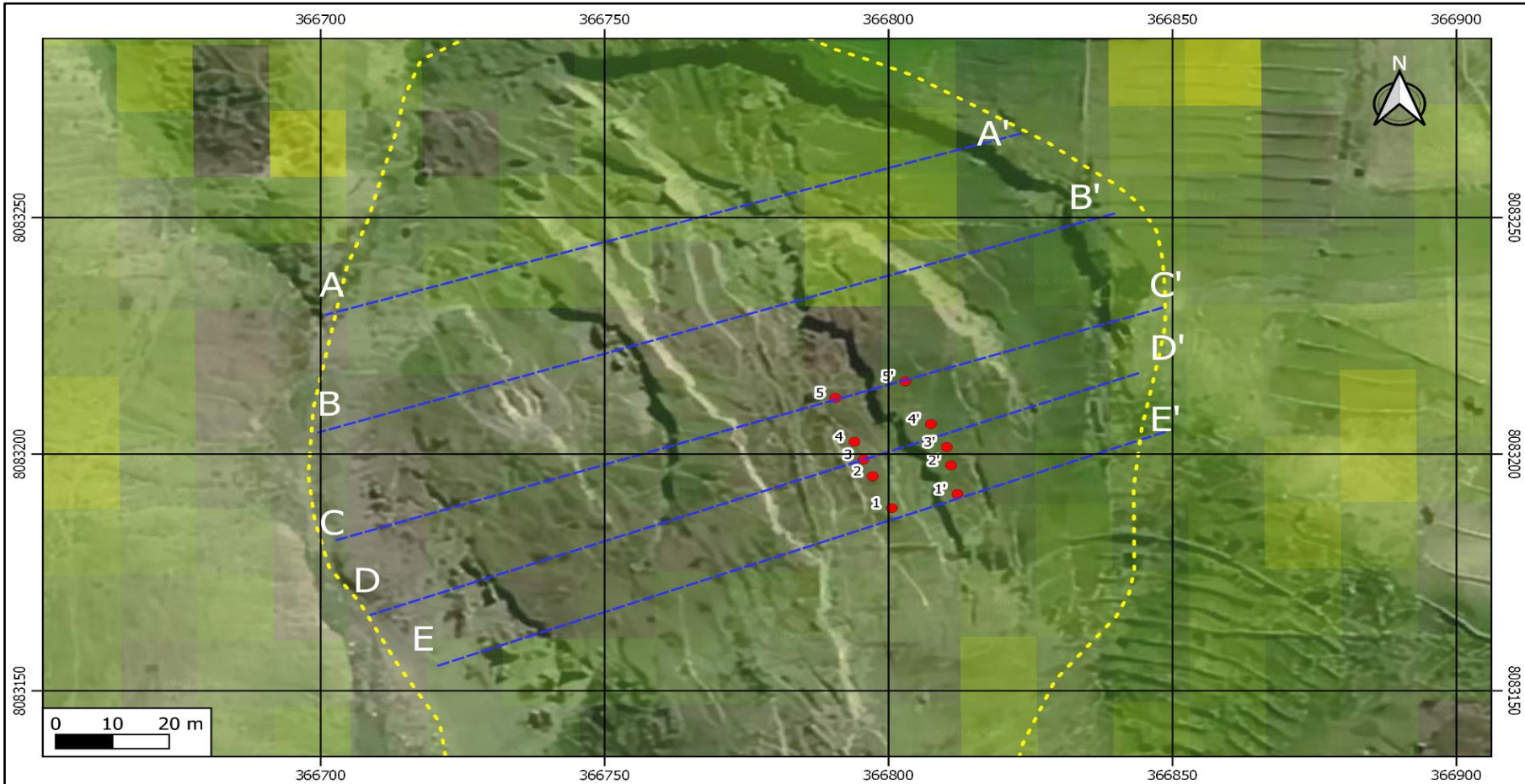
	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia	
"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"		
MAPA DE DEFORMACIÓN DINSAR – 8 DICIEMBRE 2022 A 13 ENERO 2023		
ELABORADO POR: BACH. JOSÉ MARÍA QUISPE LARICO DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE FECHA: JULIO 2023	LAMINA: <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">06</div>
ESCALA: GRÁFICA		



Legenda



Desplazamiento (m.)	— D. Matarani
0.02	— Secciones
0.04	● Puntos de control
0.06	
0.075	
0.11	

 UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia		
"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"		
MAPA DE DEFORMACIÓN DINSAR – 13 ENERO A 6 FEBRERO 2023		
ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE	LAMINA: 07
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	ESCALA: GRÁFICA



Leyenda

Desplazamiento (m.)	--- D. Matarani
■ -0.05	● Puntos de control
■ -0.015	--- Secciones
■ 0	
■ 0.015	
■ 0.03	

 UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia		
"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Tacna"		
MAPA DE DEFORMACIÓN DINSAR – 6 FEBRERO A 2 MARZO 2023		
ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISEP LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE	LAMINA: 08
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	ESCALA: GRÁFICA



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
 Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia



"Detección y monitoreo de deformaciones del terreno mediante Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) en Quilahuani, Provincia de Candarave-Taena"

MAPA GEOLÓGICO – MATARANI

ELABORADO POR: BACH. JOSE MARIA QUISPE LARICO	REVISADO POR: ING. GLORIA CHOQUE	LAMINA: 09
DATUM: WGS84 UTM - ZONA 19S	FECHA: JULIO 2023	