

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**DETERMINACIÓN DE SISTEMAS DE ALARMA PARA EL
MONITOREO DE ESTABILIDAD DE TALUDES SEGÚN TENDENCIAS
DE DEFORMACIÓN EN MINERÍA A TAJO ABIERTO, HUARI, 2025**

PRESENTADO POR:

Br. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO GEOLOGO**

ASESOR:

Dr. RONALD LUIS LÓPEZ ZAPANA

CUSCO - PERÚ
2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Ing. Ronald Lopez Zapana
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: Determinación de sistemas de
alarma para el monitoreo de estabilidad de Taludes según
tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025
.....

Presentado por: Cynthia Huaman Aucauasi DNI N° 75948763 ;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO GEOLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 20 de enero de 2026

Ronald Lopez Zapana
.....
Firma

Post firma Ronald Lopez Zapana

Nro. de DNI 23923900

ORCID del Asesor 0000-0003-0148-6535

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259 : 547376438

CINTHYA HUAMAN

CINTHYA HUAMAN_Informe final vs10.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547376438

126 páginas

Fecha de entrega

19 ene 2026, 10:32 a.m. GMT-5

28.503 palabras

Fecha de descarga

19 ene 2026, 4:46 p.m. GMT-5

144.213 caracteres

Nombre del archivo

CINTHYA HUAMAN_Informe final vs10.pdf

Tamaño del archivo

33.2 MB

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
109 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por ser mi guía y soporte en todo mi camino. A mi querida madre Epifania Auccacusi Callañaupa por su apoyo incondicional en todo mi desarrollo personal y profesional, por enseñarme a ser fuerte y ser un gran ejemplo de fortaleza, humildad, persistencia y amor.

A mis hermanos Sayuri y Rudy que siempre me apoyaron y confiaron en mí. A mis queridos tíos que estuvieron presentes en cada momento de mi existencia y sus valiosos consejos.

Un reconocimiento a mi persona por demostrar valor ante las adversidades de la vida.

RESUMEN

Esta investigación, titulada "Determinación de sistemas de alarma para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025", tuvo como objetivo establecer sistemas de alerta temprana para eventos geodinámicos externos mediante el análisis de tendencias deformacionales, se desarrolló bajo una metodología de tipo aplicada, de enfoque mixto y diseño no experimental, utilizando tecnología de Georadares de apertura sintética (SAR), donde se procesaron 20 eventos entre 2023-2025. Como resultados, se identificó patrones trifásicos (estabilidad, desarrollo gradual y aceleración abrupta) y se definió umbrales de alerta basados en el coeficiente R^2 : sin alerta ($R^2 < 0.8$), advertencia ($0.8 \leq R^2 \leq 0.95$) y peligro ($R^2 \geq 0.96$), estos resultados demostraron que este sistema permite predecir deslizamientos con horas de antelación, optimizando la respuesta ante su ocurrencia mediante modelos matemáticos. Se concluye que la integración de estos umbrales con monitoreo continuo mejora significativamente la gestión de riesgos en operaciones mineras, combinando precisión y rapidez.

Palabras Clave: Tendencias, Deformación, Alarma, Monitoreo.

ABSTRACT

This research, entitled "Determination of alarm systems for monitoring slope stability according to deformation trends in open-pit mining, Huari, 2025", aimed to establish early warning systems for external geodynamic events by analyzing deformation trends. It was developed under an applied methodology, with a quantitative approach and non-experimental design, using synthetic aperture Ground-Penetrating Radar technology, where 20 events were processed between 2023-2025. As results, three-phase patterns (stability, gradual development and abrupt acceleration) were identified and alert thresholds were defined based on the R^2 coefficient: no alert ($R^2 < 0.8$), warning ($0.8 \leq R^2 \leq 0.95$) and danger ($R^2 \geq 0.96$). These results demonstrated that this system allows predicting landslides hours in advance, optimizing the response to their occurrence through mathematical models. It is concluded that the integration of these thresholds with continuous monitoring significantly improves risk management in mining operations, combining precision and speed.

Keywords: Trends, *Deformation*, *Alarm*, *Monitoring*.

INTRODUCCIÓN

En el siguiente informe de tesis de la investigación: Determinación de sistemas de alarma para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025, se ha desarrollado a nivel de ingenierías los datos, valores y cálculos con el objetivo de establecer sistemas de alarma que nos permitan predecir la ocurrencia de posibles eventos geotécnicos en minería a tajo abierto.

La minería a tajo abierto es una de las actividades económicas más importantes a nivel global, contribuyendo significativamente al desarrollo industrial y tecnológico. Sin embargo, este tipo de explotación conlleva riesgos geotécnicos inherentes, como deslizamientos, caídas de roca, basculamientos y deformaciones excesivas, que pueden comprometer la seguridad del personal, la continuidad operativa y la estabilidad financiera de los proyectos mineros. Ante este escenario, la determinación de umbrales de alarma se convierte en una herramienta fundamental para la gestión proactiva de riesgos, permitiendo la implementación de medidas correctivas antes de que ocurran fallas catastróficas.

En los últimos años, el avance en tecnologías de monitoreo (como sistemas de instrumentación in situ y radar satelital) ha generado grandes volúmenes de datos geotécnicos. No obstante, la falta de criterios estandarizados para interpretar esta información limita su utilidad en la toma de decisiones. Por ello, esta investigación busca establecer umbrales de alarma cuantitativos y cualitativos basados en el análisis de variables críticas (deformaciones), integrando metodologías estadísticas, modelos numéricos y casos de estudio de minas a tajo abierto en diferentes contextos geológicos.

El estudio, desarrollado en el año 2025, aporta una metodología innovadora que emplea análisis probabilístico para predecir comportamientos anómalos del macizo rocoso. Los resultados no solo mejorarán los protocolos de seguridad, sino que también

optimizarán costos asociados a paradas no planificadas. Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, particularmente con el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), reforzando la necesidad de una minería sostenible y resiliente.

En este contexto, la tesis se estructura en ocho capítulos que abarcan desde la revisión del estado del arte hasta la validación de los umbrales propuestos en casos reales, con el fin de brindar a la industria minera un marco de referencia confiable para la gestión de riesgos geotécnicos.

En el acápite 1, contiene inicialmente la parte introductoria, en un acápite siguiente que describe las generalidades en el cual se exponen la ubicación y la accesibilidad.

En el acápite 2, se describe el planteamiento del problema, guiado por el problema general y los problemas específicos, también se establecen el objetivo general y los objetivos específicos que guiaran la investigación.

En el acápite 3, se describe el marco referencial en el cual se exponen los conceptos que son utilizados en el desarrollo de los capítulos siguientes, así como el resumen de los estudios existentes en el ámbito de estudio.

En el acápite 4 se establece el diseño metodológico, dentro del cual se define el tipo y diseño de investigación, la población y la muestra de estudio

En el acápite 5 se dan a conocer los resultados y discusión por cada objetivo de investigación.

Y finalmente las conclusiones y las recomendaciones de la investigación

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	1
1.1. Ubicación.....	1
1.1.1. Ubicación Política	1
1.1.2. Ubicación Geográfica.....	1
1.1.3. Ubicación Fisiográfica	1
1.2. Accesibilidad.....	3
CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.1. Descripción del problema	4
2.2. Formulación del problema	5
2.3. Problema general	5
2.4. Problemas específicos	5
2.5. Justificación	6
2.5.1. Conveniencia	6
2.5.2. Relevancia Social	6
2.5.3. Implicancia Práctica	6
2.5.4. Valor Teórico.....	7
2.5.5. Utilidad Metodológica.....	7
2.6. Objetivos del Estudio.....	7
2.6.1. Objetivo general	7
2.6.2. Objetivos específicos	8
2.7. Hipótesis de Investigación	8
2.7.1. Hipótesis general.....	8
2.7.2. Hipótesis específicas.....	8
2.8. Variables.....	9
CAPÍTULO III. MARCO REFERENCIAL.....	10
3.1. Antecedentes	10
3.1.1. Antecedentes internacionales.....	10
3.1.2. Antecedentes nacionales	12
3.2. Bases Teóricas.....	14
3.2.1. Geomecánica de Rocas.....	14

3.2.2.	Deformación en macizos rocosos	15
3.2.3.	Aplicaciones de la mecánica de rocas	17
3.2.4.	Monitoreo con Georadar GBSAR.....	35
CAPÍTULO IV.	METODOLÓGIA DE INVESTIGACIÓN	46
4.1.	Tipo de investigación.....	46
4.2.	Enfoque de investigación.....	46
4.3.	Diseño de investigación.....	46
4.4.	Población de estudio	47
4.5.	Muestra	47
4.6.	Metodología de Trabajo	48
4.6.1.	Etapas de trabajo.....	48
CAPÍTULO V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
5.1.	Respecto al objetivo específico 1	50
5.1.1.	Geología Local	50
5.1.2.	Control Estructural:	57
5.2.	Respecto al objetivo específico 2	61
5.3.	Respecto al Objetivo Específico 03.....	64
5.3.1.	Evento del 13 de octubre de 2023	66
5.3.2.	Evento del 22 de noviembre de 2023.....	67
5.3.3.	Evento del 10 de diciembre de 2023	69
5.3.4.	Evento del 26 de diciembre de 2023	71
5.3.5.	Evento del 07 de febrero de 2024	72
5.3.6.	Evento del 15 de abril de 2024	74
5.3.7.	Evento de 28 de abril de 2024.....	75
5.3.8.	Evento del 11 de junio de 2024.....	77
5.3.9.	Evento del 13 de enero de 2025.....	78
5.3.10.	Evento del 03 de febrero de 2025	80
5.3.11.	Evento del 10 de febrero de 2025	81
5.4.	Resultados respecto al objetivo específico 04	83
5.4.1.	Sin Tendencia (Fase 1: Fase de estabilidad).....	83
5.4.2.	Tendencia Lineal (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	89
5.4.3.	Tendencia Polinómica (Fase 3: Fase de aceleración).....	94
5.5.	Resultados respecto al objetivo general	104
CONCLUSIONES		106

RECOMENDACIONES	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación política.....	1
Tabla 2. Ubicación Geográfica	1
Tabla 3. Matriz de operacionalización de las variables	9
Tabla 4. Umbrales de alerta.....	45
Tabla 5. Plan de acción ante activación de alertas.	45
Tabla 6. Eventos geotécnicos a analizar	47
Tabla 7. Procedimiento Estadístico.....	49
Tabla 8. Propiedades geomecánicas de cada evento.	61
<i>Tabla 9. Eventos geotécnicos de los últimos 03 años</i>	64
Tabla 10. Eventos geotécnicos a analizar	65
Tabla 11. Resumen de fase de eventos sin tendencia	88
Tabla 12. Resumen de eventos con tendencia lineal	94
Tabla 13. Resumen de eventos con tendencia polinómica	100
Tabla 14. <i>Diferencia entre las alertas de advertencia</i>	102
Tabla 15. Diferencia entre las alertas de Peligro	103
Tabla 16. Sistemas de alarma de deformacionales	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de ubicación.....	2
Figura 2. Deslizamiento en mina Kennecott Utah Copper	19
Figura 3. Configuración de Taludes	21
Figura 4. Componente de talud en Mina	22
Figura 5. Inclínómetro digital	24
Figura 6. Monitoreo de taludes con prismas.....	25
Figura 7. Rango de medición de radares InSAR.....	28
Figura 8. Procesamiento de tecnología Insar.....	29
Figura 9. Monitoreo de talud con tecnología RAR	31
Figura 10. GeoRadar SAR-IBIS	33
Figura 11. Componentes de radar Arcsar - SAR	33
Figura 12. Componentes de radar Arcsar - SAR	34
Figura 13. <i>adquisición de datos</i>	36
Figura 14. <i>Mapa de deformación acumulada</i>	37
Figura 15. <i>Visualización de software Guardián.</i>	38
Figura 16. <i>Mapas de desplazamiento, velocidad y alerta.</i>	41
<i>Figura 17. Gráficos esquemáticos de la tendencia de deformación</i>	43
<i>Figura 18. Etapas de deformación de deslizamientos.</i>	43
<i>Figura 19. Incremento de velocidad de deformación.</i>	44
Figura 20. Mapa de Geología Regional.....	55

Figura 21. Mapa de Geología Local	56
<i>Figura 22. Falla planar, ocurrencia de desprendimiento</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23. Falla en cuña, ocurrencia de desprendimiento</i>	<i>59</i>
Figura 24. Mapa Geológico/estructural	60
Figura 25. Mapa geomecánico	62
Figura 26. Mapa de ISOLINEAS	63
Figura 27. Evento N°1, 13/10/2023 con su serie temporal de deformación.....	66
Figura 28. Evento N°2: Evento 22/11/2023 con su serie temporal de deformación.....	67
Figura 29. Evento N°3: Evento 10/12/2023 con su serie temporal de deformación.....	69
Figura 30. Evento N°4: Evento 26/12/2023 con su serie temporal de deformación.....	71
Figura 31. Evento N°5: Evento 07/02/2024 con su serie temporal de deformación.....	72
Figura 32. Evento N°6: Evento 15/04/2024 con su serie temporal de deformación.....	74
Figura 33. Evento N°7: Evento 28/04/2024 con su serie temporal de deformación.....	75
Figura 34. Evento N°8: Evento 11/06/2024 con su serie temporal de deformación.....	77
Figura 35. Evento N°9: Evento 13/01/2025 con su serie temporal de deformación.....	78
Figura 36. Evento N°10: evento 03/02/2025.....	80
Figura 37. Evento N°11: evento 10/02/2025.....	81
Figura 38. Evento 1, evento 13/10/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	83
Figura 39. Evento 2: evento 22/11/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	83
Figura 40. Evento 3: evento 10/12/202 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	84
Figura 41. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	84
Figura 42. Evento 5: evento 15/04/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	85
Figura 43. Evento 6: evento 28/04/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	85
Figura 44. Evento 7: evento 11/06/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	86
Figura 45. Evento 8: evento 13/01/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	86
Figura 46. Evento 9: evento 03/02/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	87
Figura 47. Evento 10: evento 07/02/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	87
Figura 48. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad).....	88
Figura 49. Evento 1: evento 13/10/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	89
Figura 50. Evento 2: evento 22/11/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	89
Figura 51. Evento 3: evento 10/12/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	90
Figura 52. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	90
Figura 53. Evento 5: evento 07/02/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	91
Figura 54. Evento 6: evento 15/04/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	91
Figura 55. Evento 7: evento 28/04/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	92
Figura 56. Evento 8: evento 11/06/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	92
Figura 57. Evento 9: evento 13/01/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	93
Figura 58. Evento 10: evento 03/02/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	93
Figura 59. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)	94
Figura 60. Evento 1: evento 13/10/2023 (Fase 3: Fase de aceleración).....	95
Figura 61. Evento 2: 22/11/2023 (Fase 3: Fase de aceleración).....	95
Figura 62. Evento 3: evento 10/12/2023 (Fase 3: Fase de aceleración).....	96
Figura 63. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 3: Fase de aceleración).....	96
Figura 64. Evento 5: evento 07/02/2024 (Fase 3: Fase de aceleración).....	97
Figura 65. Evento 6: evento 15/04/2024 (Fase 3: Fase de aceleración).....	97

Figura 66. Evento 7: evento 28/04/2024 (Fase 3: Fase de aceleración).....	98
Figura 67. Evento 8: evento 11/06/2024 (Fase 3: Fase de aceleración).....	98
Figura 68. Evento 9: evento 13/01/2025 (Fase 3: Fase de aceleración).....	99
Figura 69. Evento 10: evento 03/02/2025 (Fase 3: Fase de aceleración).....	99
Figura 70. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 3: Fase de aceleración).....	100

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. Ubicación

1.1.1. Ubicación Política

Políticamente el área de estudio cubre gran extensión y está ubicada en la provincia de Huari y región de Ancash.

Tabla 1. Ubicación política

Región:	Ancash
Provincia:	Huari
Distrito:	San Marcos

1.1.2. Ubicación Geográfica

Los límites de la zona de estudio en el sistema **UTM - WGS 1984 – Zona 18 Sur**, tiene las siguientes coordenadas (Tabla 2):

Tabla 2. Ubicación Geográfica

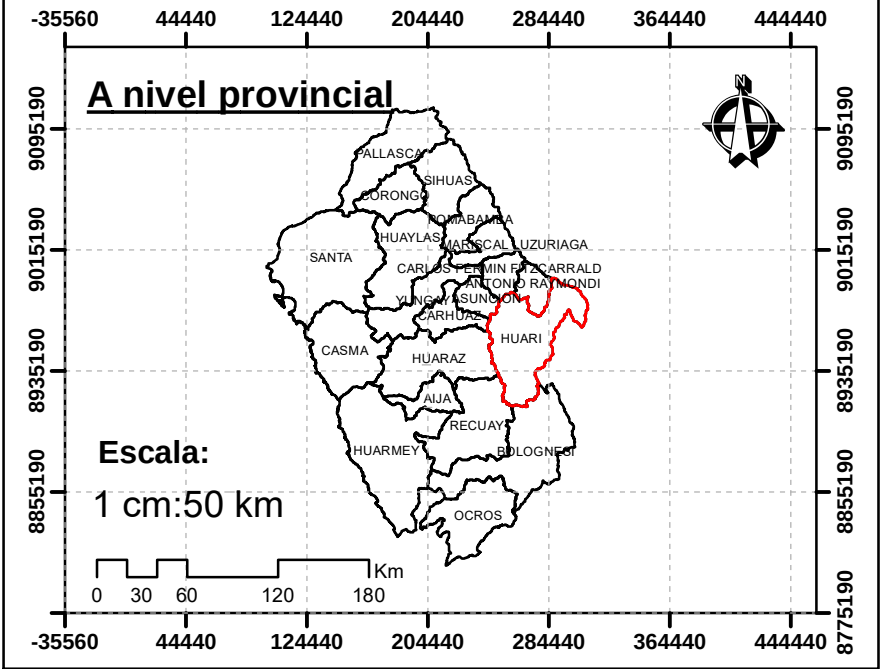
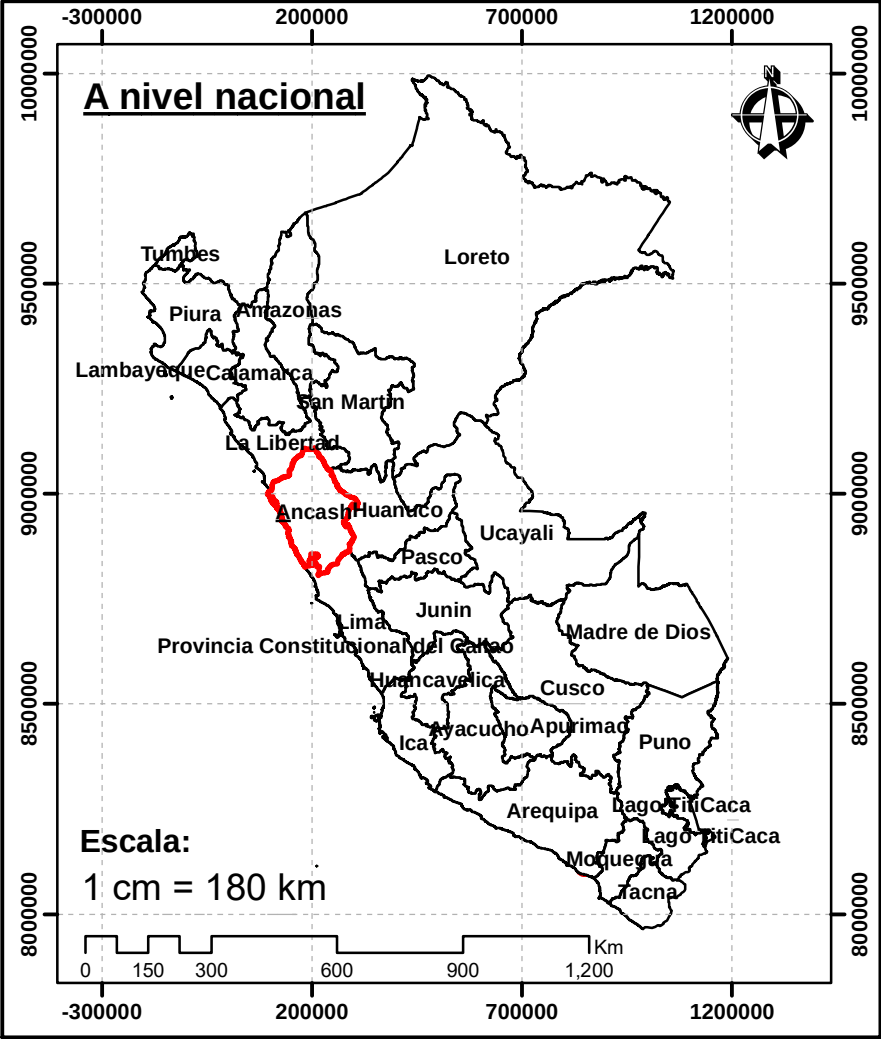
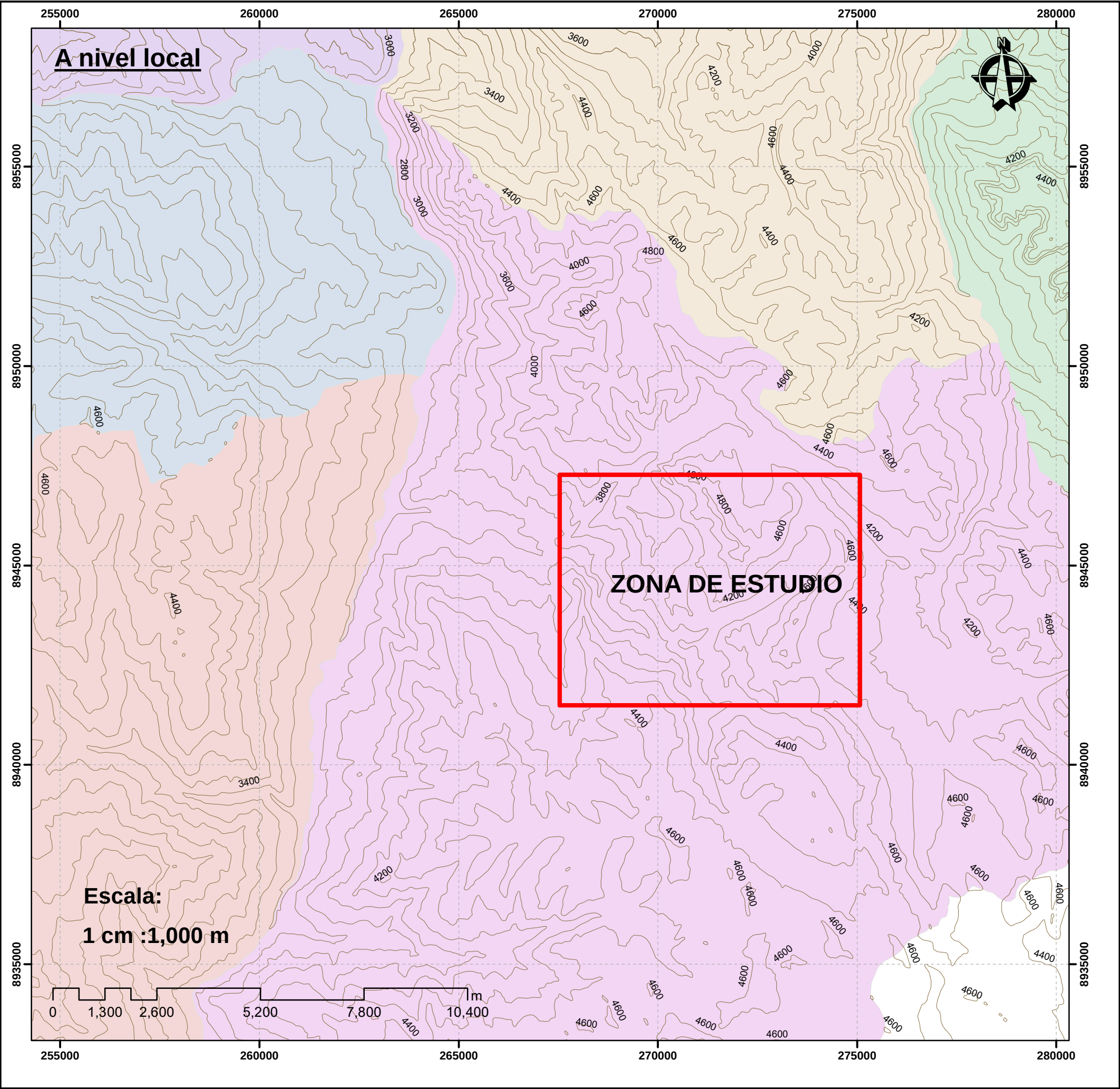
Coordenadas UTM- WGS84 1984				Coordenadas Geográficas	
Punto	Este	Norte	Altura (msnm)	Latitud	Longitud
P1	267500	8947500	3600	9°30'53.98" S	77°7'4.48" O
P2	275000	8947500	4200	9°30'55.45" S	77°2'58.64" O
P3	267500	8942500	4400	9°33'36.68" S	77°7'5.49" O
P4	275000	8942500	4600	9°33'38.15" S	77°2'59.61" O

Fuente: (Google earth, 2023)

1.1.3. Ubicación Fisiográfica

Corresponde a zona de alta montaña con topografía accidentada (cerros, quebradas y valles). Suelo predominantemente rocoso con un clima frío de altura (Tundra o Puna). Ecosistema de Puna Andina con escasa vegetación y presencia de glaciares y lagunas de origen glaciar en áreas cercanas.

FIGURA 1: PLANO DE UBICACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TESIS: Determinación de umbrales de alarma de eventos geotécnicos según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huarí, 2025			
	Plano: Plano de Ubicación	Ubicación: Región: Ancash Provincia: Huarí	N° de Plano: P-01
	Escalas: Las indicadas	Elaborado por: BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI	
	Fecha: Mayo de 2025		

Nota: Elaboración propia en base a la información brindada por la mina, 2025

1.2. Accesibilidad

Para llegar a la unidad minera desde Lima: La ruta de transporte para los trabajadores de la empresa inicia en la agencia Cruz del Sur, ubicada en la Av. Javier Prado (La Victoria, Lima), y se divide en cuatro tramos: el primero recorre 205 km por la Panamericana Norte (vía asfaltada) hasta Pativilca; el segundo asciende 115 km por una carretera asfaltada sinuosa hacia la cordillera hasta Conococha; el tercero continúa 85 km por vía asfaltada hasta Antarraga; y el último tramo cubre 15 km por una vía afirmada que culmina a 4,300msnm, donde se ubican las instalaciones de la unidad minera.

Para llegar a la unidad minera desde Huaraz: Primero Vía principal Huaraz – Conococha 50 km aproximadamente, segundo continúa 85 km por vía asfaltada hasta Antarraga; y el último tramo cubre 15 km por una vía afirmada que culmina a 4,300msnm, donde se ubican las instalaciones de la unidad minera.

CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

Las minas a cielo abierto son cada vez más grandes y, a medida que se profundizan, aumenta la importancia de interpretar y controlar la estabilidad de taludes. Una falla en un tajo no solo puede conducir a problemas de seguridad, sino también a pérdidas significativas debido a la interrupción de la producción, el trabajo de rehabilitación y las más graves pérdidas humanas. El desafío más grande en la explotación minera a cielo abierto es equilibrar la productividad con la seguridad y la vida humana dependiendo primordialmente de la precisa y oportuna predicción de las fallas en taludes.

Según Torres (2021), los deslizamientos de tierra son el fenómeno geológico más frecuente a nivel global y, en las dos últimas décadas, han provocado más de 18.000 víctimas mortales en todo el mundo.

Así, el 17 de noviembre de 2016, en la mina de cobre Madenkoy, en la ciudad de Sirvan, provincia de Siirt, en Turquía, producto de las lluvias, ocurrió un deslizamiento de tierra, en el cual fallecieron seis mineros y diez se encontraban desaparecidos, donde además alrededor de 100 trabajadores trabajaban en el rescate de los mineros desaparecidos según (IndustriALL, 2016), El 22 de febrero de 2023, en la mina Alxa League, de la región de Mongolia interior, en China, 50 obreros quedaron sepultados por un derrumbe en esta mina de carbón (infobae, 2023). El 07 de octubre de 2024, murieron 10 personas por el derrumbe de una mina a cielo abierto, localizada el distrito de Nangoma (teleSUR, 2024).

También a nivel del continente americano tenemos por ejemplo el accidente del 9 de noviembre de 2024, un accidente en un yacimiento de oro, conocido como La Soledad,

ubicado en la vereda Río Sucio, Argentina, donde a partir de un deslizamiento de tierra hubo una víctima mortal y 6 heridos de gravedad (Rodríguez, 2024).

Ahora bien, en el Perú, según las estadísticas mortales en el sector minero del Ministerio de Energía y Minas, en el año 2024 de 21 accidentes suscitados, 7 fueron accidentes por derrumbe (caídas de masas de tierra, de rocas, de piedras, de nieve) Ministerio de Energía y Minas. (2023).

Se reporta que los desprendimientos y/o basculamientos de rocas representa una parte significativa de los accidentes mortales en minería, como se vio en 2023 y principios de 2024 (Osinergmin, 2024)

Es por esta razón, que actualmente, las entidades fiscalizadoras del Estado exigen a las mineras, la instalación de más sensores y programas de monitorización que permitan proporcionar información del comportamiento de los taludes, detectando tempranamente probabilidades de falla e inestabilidad, evitando que los potenciales colapsos ocasionen víctimas mortales y pérdidas económicas.

2.2. Formulación del problema

2.3. Problema general

¿Cómo se pueden determinar sistemas de alarma geotécnicos confiables para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto?

2.4. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son las características litológicas y estructurales de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari 2025?
2. ¿Cuáles son las características geomecánicas de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari 2025?

3. ¿Cuáles son las tendencias de deformación de eventos geodinámicos externos en mina a tajo abierto de los últimos 3 años?
4. ¿Cuál es la probabilidad de colapso de acuerdo a datos de deformación en mina a tajo abierto de los últimos 3 años?

2.5. Justificación

2.5.1. Conveniencia

El estudio es altamente conveniente porque aborda directamente la necesidad crítica de implementar mecanismos de seguridad más efectivos en la minería a tajo abierto, específicamente en la unidad minera ubicado en Huari. Servirá para desarrollar una herramienta predictiva que traduce las tendencias de deformación del macizo rocoso en alertas tempranas y efectivas, lo cual es esencial para la gestión proactiva del riesgo geotécnico. En esencia, la investigación sirve para mejorar significativamente los estándares de seguridad operacional y la continuidad productiva de la mina.

2.5.2. Relevancia Social

El trabajo antrópico realizado en esta investigación radica en su impacto directo sobre la seguridad humana y la estabilidad económica regional. Al determinar sistemas de alarma confiables que previenen el colapso de taludes, el estudio beneficia directamente a los trabajadores mineros, protegiendo sus vidas y su integridad física, lo cual es la prioridad social más alta. Indirectamente, al asegurar la sostenibilidad y continuidad de la operación minera, la investigación contribuye a preservar las fuentes de empleo y el dinamismo económico en la zona de Huari, beneficiando a las comunidades locales que dependen de esta actividad.

2.5.3. Implicancia Práctica

La investigación tiene una implicancia práctica fundamental, ya que los resultados se traducirán en niveles de alarma que puede ser aplicado de inmediato por el equipo

geotécnico de la mina, permitiendo la toma de decisiones operacionales inmediatas como la restricción de acceso, la reubicación de equipos o la evacuación. El estudio, por tanto, resuelve el problema práctico de establecer cuándo y cómo reaccionar ante una inestabilidad incipiente, mejorando la eficiencia y la seguridad de las operaciones diarias.

2.5.4. Valor Teórico

El valor teórico de este trabajo reside en la capacidad de generar, validar o complementar conocimiento sobre la aplicación de modelos predictivos de deformación en la geomecánica minera. El análisis de las tendencias de deformación en Huari y su correlación con el comportamiento real del macizo rocoso permitirá llenar un vacío de conocimiento específico sobre la deformación crítica en ese entorno geológico, aportando datos empíricos valiosos que pueden servir para refinar teorías existentes sobre la predicción del colapso en taludes. Los hallazgos establecerán un marco de referencia teórico para futuros estudios en minas con características geológicas similares.

2.5.5. Utilidad Metodológica

La utilidad metodológica del estudio se basa en que el proceso de investigación permitirá desarrollar un método sistemático y replicable para transformar datos tomados de monitoreo en criterios de alarma concretos y funcionales. El protocolo que se desarrolló, que integra el análisis de tendencias de deformación y la calibración de sistemas de alerta, podrá ser adoptado como una nueva herramienta o guía estandarizada por otras empresas mineras. Esto representa una contribución valiosa a la metodología de monitoreo predictivo de estabilidad de taludes, trascendiendo la aplicación específica en la empresa minera.

2.6. Objetivos del Estudio

2.6.1. Objetivo general

Establecer sistemas de alarma para eventos geotécnicos para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, en el 2025.

2.6.2. *Objetivos específicos*

1. Establecer las características litológicas y estructurales de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari, 2025.
2. Establecer las características geomecánicas de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari, 2025.
3. Analizar las tendencias de deformación de eventos geodinámicos externos en mina a tajo abierto de los últimos 3 años.
4. Determinar la probabilidad de colapso de acuerdo a datos de deformación en mina a tajo abierto de los últimos 3 años.

2.7. Hipótesis de Investigación

2.7.1. *Hipótesis general*

La integración de datos de deformación obtenidos (Georadar) permite determinar sistemas de alarma para procesos geodinámicos externos confiables para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto.

2.7.2. *Hipótesis específicas*

1. Las características litológicas y estructurales de los eventos (procesos geodinámicos externos) evaluados en mina a tajo abierto son variables y determinantes para la ocurrencia de estos.
2. Las características geomecánicas del macizo rocoso de los eventos (procesos geodinámicos externos) nos permite evaluar la susceptibilidad al colapso, determinando zonas más frágiles en el Tajo y de mayo enfoque con el monitoreo geotécnico.

3. Las series temporales de deformación derivadas de los GeoRadares (Ibis Guardian) permiten identificar tendencias de deformación críticas asociadas a procesos de inestabilidad en taludes, el desarrollo de cada evento nos permitirá asociar comportamientos y analizarlos como valores numéricos.
4. Los sistemas de alarma definidos con base en la correlación entre tendencias obtenidas de GeoRadares (Ibis Guardian) y simulaciones numéricas pueden activarse de forma temprana y confiable, lo que permitiría tener mayor confiabilidad en la activación de alertas.

2.8. Variables

1. Variable Independiente: Eventos geodinámicos externos.
2. Variable Dependiente: Sistemas de alarma para el monitoreo de estabilidad de taludes.

Tabla 3. Matriz de operacionalización de las variables

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES
V. Independiente. Eventos Geodinámicos externos	Litología	Unidades Litológicas
	Estructural	Características Estructurales
	Geomecánica	RMR
		RQD
V. Dependiente Sistemas de alarma	D1: Intervalos de deformación	I1: Deformación Alta
		I2: Deformación Moderada
		I3: Deformación Baja
	D2: Probabilidad de Colapso	I4: Probabilidad Alta
		I5: Probabilidad Media
		I6: Probabilidad Baja

CAPÍTULO III. MARCO REFERENCIAL

3.1. Antecedentes

3.1.1. *Antecedentes internacionales*

1. Antecedente 1: Hernández (2019), en su estudio titulado “Hacia la automatización del análisis de estabilidad de taludes mineros”, aborda una problemática crucial para la seguridad y eficiencia en la minería a cielo abierto: la evaluación de la estabilidad de taludes. Tradicionalmente, este proceso se ha desarrollado de forma aislada respecto al diseño y planificación minera, generando demoras significativas y resultados que no siempre maximizan el valor del proyecto. Frente a ello, el objetivo principal fue un procedimiento automatizado que permite integrar la evaluación de estabilidad con la planificación minera. Para esto se utilizó instrumentos como los softwares especializados Whittle y Surpac de GEOVIA, Abaqus e Isight de SIMULIA, y Python como lenguaje de programación. Para ello su metodología consistió en vincular el modelo de bloques proveniente de la etapa de planificación con las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permitiendo así simular el comportamiento de los taludes bajo distintos escenarios. Los resultados fueron que el modelo automatizado no solo reduce significativamente los tiempos de procesamiento, sino que también permite realizar análisis de sensibilidad. Uno de los hallazgos más relevantes fue que, al reducir en un 15 % los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb, el porcentaje de taludes considerados estables cayó drásticamente de 81 % a 31 %, resaltando la importancia de incorporar la incertidumbre en los análisis geotécnicos.

El aporte de este trabajo para la tesis es que se demostró que una integración efectiva entre diseño, planificación y análisis de estabilidad puede traducirse en una gestión minera más precisa, segura y orientada a la toma de decisiones estratégicas.

2. Antecedente 2: Cardona (2016), en su estudio titulado “Validación de modelos de predicción de deslizamientos mediante el uso de inventarios en escalas subregionales”, El objetivo principal de su estudio fue verificar la universalidad de la distribución gamma inversa de tres parámetros propuesta por Malamud en el 2024, empleada para representar la frecuencia de áreas afectadas por deslizamientos y su posible alteración a causa de intervenciones humanas. Para la metodología se elaboró un inventario detallado de deslizamientos ocurridos en la carretera Guillermo Gaviria Correa y en un tramo adyacente de 1.5 km, diferenciando entre laderas asociadas a infraestructura vial y laderas rurales. El instrumento utilizado para la identificación de los eventos los realizó mediante interpretación visual de imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth®, técnica que le permitió una recolección precisa de datos. Los resultados mostraron dos hallazgos clave: por un lado, la distribución de frecuencias observada mostró una fuerte similitud con la distribución teórica planteada por Malamud; por otro, identificó un mejor ajuste para áreas de deslizamiento mayores a 631 m^2 , mientras que las áreas menores a este umbral evidenciaron una mayor frecuencia, atribuida a la aparición de nuevos deslizamientos vinculados a la construcción de vías. En conclusión, el estudio resalto la utilidad de los inventarios como herramientas fundamentales para validar modelos predictivos y como insumos estratégicos para la gestión del riesgo a escala regional.

El aporte de esta investigación es relevante para el presente estudio porque proporciona una base metodológica sólida para la validación de modelos geoespaciales aplicables a riesgos por deslizamientos en áreas con condiciones geomorfológicas similares.

3.1.2. Antecedentes nacionales

1. Antecedente 1: Apaza (2024), en su investigación titulada “Implementación de Structure from Motion en minería subterránea para mejorar el proceso de mapeos geomecánicos y análisis de estabilidad – Unidad Minera Pomasi – CIEMSA”, abordó un problema recurrente en la pequeña minería: la dificultad de realizar análisis geomecánicos detallados de forma eficiente en múltiples labores. El objetivo principal del estudio fue optimizar el proceso de mapeo geomecánico mediante la metodología Structure from Motion (SfM), evaluando su eficacia en comparación con el método tradicional, a través del análisis de tiempos de ejecución, precisión en la identificación de discontinuidades y resultados en el análisis de estabilidad utilizando el Factor de Seguridad. Entre los principales hallazgos, se destacó que el método SfM redujo significativamente el tiempo de ejecución por estación (12.54 minutos en promedio, frente a los 24.12 minutos del método tradicional). Si bien se registró una variación promedio del 12.87% en el buzamiento y del 15.96% en la dirección de las discontinuidades –atribuidas a la geometría irregular del macizo rocoso–, los resultados obtenidos en el análisis estereográfico fueron comparables entre ambos métodos.

Se concluyó que la implementación de SfM representa una alternativa eficiente y técnicamente viable para agilizar los procesos de mapeo geomecánico en minería subterránea, manteniendo niveles adecuados de precisión y contribuyendo a mejorar la gestión de la estabilidad en las labores mineras.

El aporte del estudio de Apaza (2024) radica en demostrar que la metodología Structure from Motion (SfM) es una alternativa viable, eficiente y técnicamente precisa para mejorar el mapeo geomecánico y el análisis de estabilidad en minería

subterránea, especialmente en el contexto de pequeña minería, donde los recursos y el tiempo suelen ser limitados.

2. Antecedente 2: De La Cadena y Jambo (2019), en su tesis titulada “Determinación de umbrales de alarma y velocidad de colapso, utilizando el radar MSR 300 en la pared Nor-Este del tajo Tapado Oeste en Minera Yanacocha”, desarrollaron una investigación enfocada en la interpretación del monitoreo geotécnico tras la ocurrencia de eventos de inestabilidad asociados a las fallas Shingo y Subfase en el año 2017. Estas fallas se presentaron en zonas con alteraciones argílicas y propílicas, por lo que se utilizó el radar geotécnico Reutech MSR 300 para registrar la deformación del terreno. Aplicando la metodología de Broadbent y Zavodni (1978–1982), basada en análisis estadísticos y back análisis de eventos geotécnicos pasados, se lograron estimar las velocidades de colapso y se propuso un modelo para establecer umbrales de alarma: uno geotécnico y otro crítico. Este modelo fue implementado como parte del sistema de gestión de seguridad en la etapa final de explotación del tajo Tapado Oeste, permitiendo una respuesta preventiva frente a posibles inestabilidades. La investigación combinó datos del radar con observaciones de campo, logrando definir criterios de alerta basados en la relación entre velocidad de deformación y tiempo. En conclusión, este estudio ofrece una herramienta operativa efectiva para mejorar la toma de decisiones en tiempo real y mitigar riesgos asociados a fallas geotécnicas en minería a cielo abierto.

El aporte de la investigación a la tesis es que evalúa la determinación de umbrales de alarma de velocidad según back análisis de eventos geotécnicos lo que contrasta el análisis que se hace en la presente investigación.

3. Antecedente 3: Ames (2021), en su tesis titulada “*Aplicación de la gestión de controles críticos con la metodología Bow Tie enfocada a la prevención de accidentes*”

por deslizamiento de taludes en minería de tajo abierto”, tuvo como objetivo desarrollar una propuesta de mejora para la gestión de riesgos geotécnicos por deslizamiento de taludes, basada en los lineamientos del ICMM. La metodología empleada combinó el enfoque de Gestión de Controles Críticos (GCC) con la metodología Bow Tie, utilizando como instrumento el diagrama Bow Tie para analizar sistemáticamente las causas, consecuencias y controles del evento en una mina de Junín. Los resultados obtenidos permitieron estructurar cinco procedimientos específicos que redujeron significativamente la magnitud del riesgo y mejoraron el sistema de gestión. El estudio concluyó que la GCC, combinada con Bow Tie, representa una herramienta práctica y eficiente para fortalecer la prevención de accidentes graves, especialmente cuando se cuenta con información adecuada y participación activa de las partes involucradas.

La referencia aportó una herramienta práctica y estructurada para la gestión preventiva del riesgo geotécnico, al integrar el análisis de controles críticos con el enfoque visual del Bow Tie, facilitando la toma de decisiones y la prevención de accidentes graves en minería a cielo abierto.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Geomecánica de Rocas

Según Ramírez & Alejano (2004), es la ciencia teórica y aplicada que estudia el comportamiento mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. Sería pues la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizos rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno. (p. 3)

1. Roca intacta: En el tema de mecánica de rocas se ha hablado en muchas ocasiones de ROCA o ROCA INTACTA para referirse a un elemento (trozo, bloque, probeta) de roca que no muestra discontinuidades observables (Ramírez & Alejano, 2004)

2. Macizo rocoso: Es el entorno in-situ que contempla diferentes tipos de discontinuidades como diaclasas, pliegues, estratos, fallas y otros rasgos estructurales” (Conociendo a la roca) “Se define como Macizo rocoso como la forma en la que se presenta las rocas en el medio natural. Por lo tanto, un macizo rocoso estará definido por la roca y la estructura” (Ramírez & Alejano, 2004).

3.2.2. Deformación en macizos rocosos

1. Definición de deformación: En primer lugar, es fundamental comprender que la deformación en macizos rocosos constituye un fenómeno clave en la estabilidad de taludes. Según Hoek y Brown (1981), este proceso implica cambios en la estructura interna del macizo rocoso debido a fuerzas externas o internas. Por consiguiente, su estudio es esencial para predecir posibles fallas geotécnicas.

En términos generales, la deformación se define como la alteración en la forma, volumen o posición de un macizo rocoso bajo la acción de esfuerzos. Según Hoek & Brown (1981), un macizo rocoso es un medio discontinuo compuesto por bloques de roca intacta separados por discontinuidades (fallas, diaclasas, estratificación). A diferencia de la roca intacta, su comportamiento mecánico está dominado por estas estructuras. El criterio empírico de Hoek & Brown (1981) describe la resistencia a la compresión de macizos rocosos considerando su calidad geomecánica (GSI). Este modelo es ampliamente utilizado en ingeniería de rocas porque, a diferencia de los modelos elásticos lineales, incorpora la influencia de las discontinuidades.

Por otra parte, la teoría de plasticidad de Brady & Brown (2006) explica cómo los macizos rocosos sufren deformaciones irreversibles bajo cargas elevadas, generando zonas de falla y redistribución de esfuerzos.

2. **Deslizamiento:** El deslizamiento es un tipo de movimiento de masa en el que una porción coherente de terreno (suelo o roca) se desplaza ladera abajo a lo largo de una superficie de corte o plano de debilidad bien definido, como una capa de arcilla, un estrato o una fractura. Este movimiento suele ser progresivo y relativamente lento, y puede manifestarse como un bloque único (deslizamiento rotacional o traslacional). Es uno de los fenómenos de inestabilidad de taludes más comunes y su monitoreo es crucial, ya que suele presentar deformaciones precursoras medibles antes de una falla catastrófica (IGME, 1986).
3. **Desprendimiento:** El desprendimiento, específicamente la caída de rocas, se refiere al proceso en el que fragmentos o bloques de roca se separan de una cara rocosa y caen de manera abrupta mediante caída libre, rebote o rodadura. A diferencia del deslizamiento, no ocurre a lo largo de una superficie de falla continua, sino que implica la rotura y el desplazamiento individualizado de los materiales. Este fenómeno es muy rápido, impredecible y suele desencadenarse por la acción de la gravedad, la erosión, la gelifracción o vibraciones (Ramírez & Alejano, 2004).
4. **Colapso:** El colapso es una falla geotécnica súbita y violenta que implica la pérdida total de la capacidad portante de un material o estructura, conduciendo a una deformación interna brusca y a la desintegración. Un ejemplo clásico es el derrumbe o hundimiento de cavidades subterráneas, como en el caso de dolinas (sinkholes) o el colapso del techo de una galería minera. Este fenómeno suele ocurrir con poca advertencia superficial previa y puede causar daños catastróficos en un periodo muy corto de tiempo (Ramírez & Alejano, 2004).

3.2.3. *Aplicaciones de la mecánica de rocas*

1. Minería a Tajo abierto: Es un método de explotación minera que consiste en extraer minerales desde la superficie terrestre mediante la remoción progresiva de grandes volúmenes de suelo y roca, formando un gran cráter o tajo en forma de escalones. En este tipo de minería, el principal objetivo de la mecánica de rocas es garantizar la estabilidad de los taludes (pendientes) y las estructuras de la mina, tanto en su conjunto como en zonas específicas.

Dependiendo de factores como la forma del yacimiento, los requisitos técnico-económicos y otras condiciones, algunos taludes pueden mantenerse estables sin soporte adicional, mientras que otros requerirán refuerzos para evitar derrumbes (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2004).

2. Eventos Geodinámicos en minería: Los eventos Geodinámicos externos, como deslizamientos o movimientos de masa, están condicionados por varios factores clave relacionados con la velocidad, tiempo, litología y dimensiones del talud. A continuación, se describen estos factores y su influencia:

A) Velocidad: La velocidad de los eventos geotécnicos constituye un parámetro crítico para la evaluación de riesgos. Este factor varía desde desplazamientos milimétricos anuales en taludes estructuralmente competentes hasta flujos catastróficos que alcanzan velocidades superiores a 5 m/s en materiales alterados. La pendiente del talud, la saturación hídrica y el grado de fracturamiento rocoso son los principales controladores de esta variable. Eventos rápidos (>1 m/min) presentan particular peligrosidad debido a su capacidad de generación de ondas de impacto y su difícil predicción (Gama, 1986).

B) Tiempo: El análisis temporal debe considerar dos perspectivas complementarias: los procesos geológicos de largo plazo (como la meteorización progresiva o el ajuste

gravitacional de macizos rocosos) y los desencadenantes inmediatos (precipitaciones extremas, vibraciones por voladuras o actividad sísmica). La interacción entre estas escalas explica por qué taludes aparentemente estables pueden fallar súbitamente tras alcanzar su umbral crítico de deformación (Gama, 1986).

C) Litología: Las propiedades geomecánicas del material condicionan fundamentalmente la estabilidad. Rocas competentes (granitos frescos, basaltos) suelen presentar modos de falla por planos estructurales, mientras que materiales alterados (saprolitos, arcillas) desarrollan flujos plásticos. La anisotropía por foliación o estratificación, la presencia de minerales expansivos y el grado de cementación natural son factores determinantes que deben caracterizarse mediante ensayos de laboratorio y modelos numéricos (Cobeña, 2017).

Figura 2. Deslizamiento en mina Kennecott Utah Copper



Nota: Adaptado de MCH en base a información de KSL.com

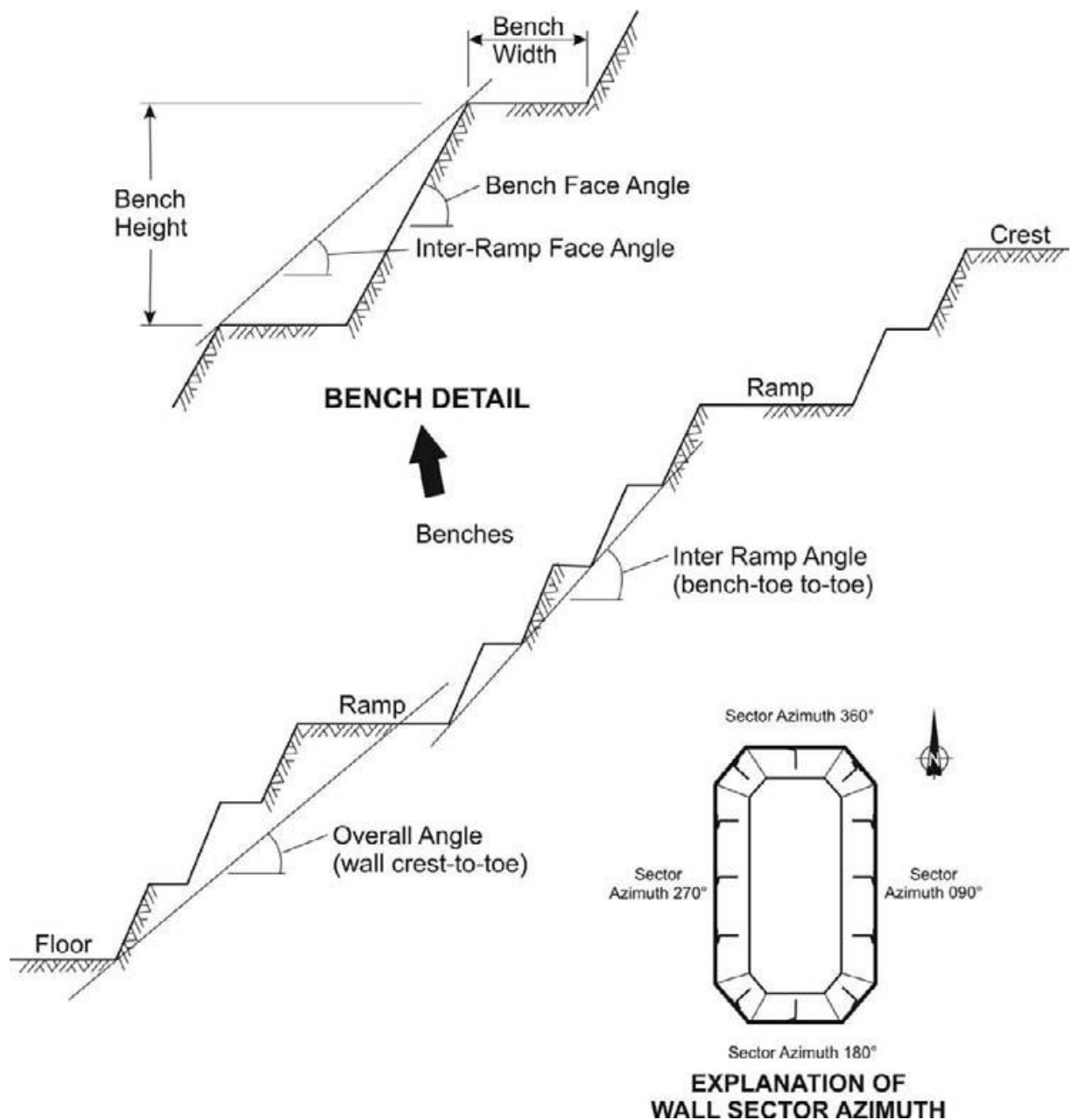
Dimensiones del talud: La pendiente, altura y morfología del talud influyen directamente en la estabilidad. Taludes muy empinados o altos tienen mayor riesgo de falla. Además, la estructura geológica (orientación de estratos, fracturas) y la morfología condicionan el tipo de movimiento y su magnitud (Gama, 1986).

Los componentes geométricos de un talud minero constituyen el conjunto de parámetros físicos que describen la configuración tridimensional del talud. Estos elementos permiten caracterizar su forma, dimensiones, inclinaciones y relación espacial entre bancos, bermas y rampas, lo que resulta esencial para su diseño y evaluación. Una geometría correctamente seleccionada permite controlar la caída de rocas, reducir la probabilidad de fallas locales y globales, optimizar el volumen de desmonte y garantizar el desempeño del sistema de transporte y de las actividades de perforación, voladura y carguío.

- Ángulo de cara de banco: Corresponde al ángulo que es formado entre el plano horizontal y la pared del banco. En la mayoría de los rajes abiertos de roca dura posee rangos entre los 55° y los 80°
- Altura de banco: Es la altura que típicamente debe adaptarse a las características del equipo de carguío que operará en la mina
- Ancho de berma: Es la distancia medida entre la pata del banco y la cresta del banco.
- Ángulo inter-rampa: Es el ángulo entre la pata del talud por donde pasa un segmento de rampa y la pata del banco inmediatamente superior.
- Ángulo global de talud: Es el ángulo medido entre la pata del banco más profundo del rajo y la cresta del banco que intercepta la superficie topográfica original.

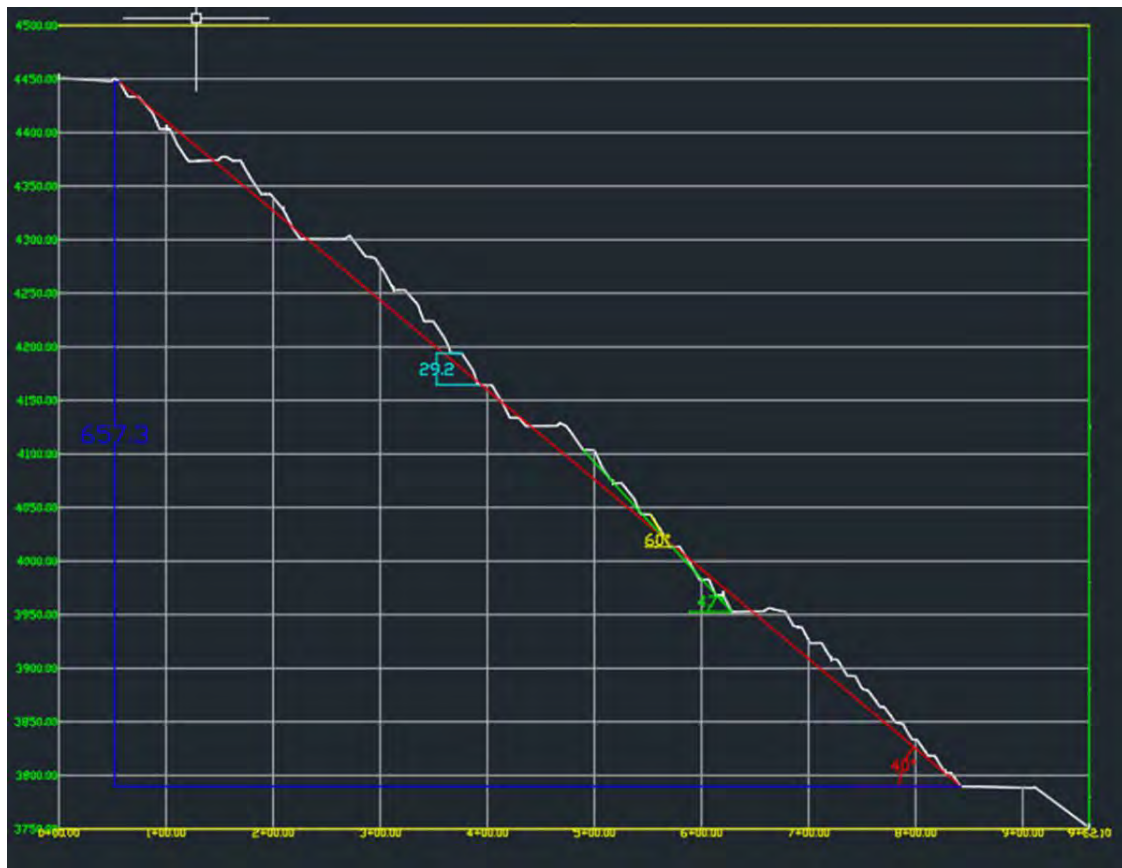
- Altura de talud global: Corresponde a la altura proyectada en el eje vertical entre la pata del banco más profundo del rajo y la cresta del banco que intercepta a la superficie topográfica original.
- Ancho de rampa: Corresponde al ancho del segmento por donde circularán los equipos de transporte.

Figura 3. Configuración de Taludes



Fuente: (Read & Stacey, 2009)

Figura 4. Componente de talud en Mina



Nota: Fuente propia

3. Monitoreo de movimientos de talud en minería: La identificación temprana de zonas inestables constituye un componente crítico en la prevención de roturas de taludes en operaciones mineras. Paralelamente, el estudio de los desplazamientos precursores junto con el análisis integral de sus factores condicionantes (geología, hidrogeología) y desencadenantes (sismicidad, precipitaciones) permite desarrollar estrategias proactivas para:
 - Prevención de colapsos: Diseñar medidas correctivas basadas en patrones de deformación Pre-falla.
 - Mitigación del riesgo: Implementar soluciones ingenieriles (drenajes, anclajes) o protocolos de monitoreo continuo (Georadar, estaciones totales).

Estas acciones son determinantes en la gestión del riesgo geotécnico minero, ya que no solo reducen la probabilidad de ocurrencia de eventos catastróficos, sino que también minimizan sus impactos operacionales, económicos y de seguridad. La integración de tecnologías de monitoreo con modelos geo mecánicos predictivos representa hoy una práctica esencial para operaciones mineras sostenibles y resilientes (López, 2022).

4. Instrumentación para Monitoreo de taludes: La instrumentación geotécnica para el monitoreo de taludes es una herramienta esencial para evaluar en tiempo real el comportamiento del terreno, detectar movimientos o inestabilidades y tomar medidas preventivas o correctivas oportunas. Su correcta aplicación mejora la seguridad y reduce riesgos en obras civiles, minería y otras infraestructuras.

A) Inclinómetros: Según Blanco Urrutia & Alvarenga (2003) los inclinómetros representan una de las herramientas más confiables y ampliamente utilizadas en la instrumentación geotécnica para el monitoreo de estabilidad de taludes. Estos dispositivos permiten:

- Medición de desplazamientos horizontales a diferentes profundidades con precisiones de hasta 0.1 mm/m.
- Detección de superficies de falla mediante el registro continuo de cambios en la inclinación del terreno.
- Monitoreo de zonas críticas, coronas de taludes mineros, áreas cercanas a estructuras sensibles, zonas con antecedentes de inestabilidad.

Sus principales ventajas técnicas son:

- Alta sensibilidad, son capaces de detectar movimientos incipientes antes de que sean visibles superficialmente.

- Perfil completo de deformación, proporcionan datos a lo largo de toda la longitud del sondeo.
- Compatibilidad con sistemas de alerta temprana cuando se integran a plataformas de monitoreo continuo.

Figura 5. *Inclinómetro digital*



Fuente. *Dirimpex – Inclinómetro Digital*

B) Monitoreo de taludes con prismas: El monitoreo de taludes con prismas es una técnica geodésica/topográfica que consiste en colocar prismas reflectores en puntos críticos del talud para medir sus desplazamientos en el tiempo mediante una estación total o estaciones totales motorizadas (AMTS: Automated Motorized Total Station) o convencional. Estas mediciones permiten detectar deformaciones, estimar velocidades de movimiento y emitir alertas tempranas de inestabilidad (slope stability, 2013).

Componentes:

- i. Prismas reflectores: reflectores ópticos instalados en puntos fijos del talud u obra, que devuelven el haz láser de la estación total.
- ii. Estación total (manual o automática): instrumento que mide distancia láser + ángulos horizontales y verticales hacia el prisma, permitiendo localizar su posición tridimensional.
- iii. Puntos de control o referencia: ubicados en zonas estables para asegurar que los cambios detectados se deban al talud y no al desplazamiento de la estación o error del instrumento.
- iv. Frecuencia de medición: puede ser periódica (semanal, diaria, mensual) o continua/en intervalos cortos, dependiendo del riesgo asociado y recursos disponibles.
- v. Procesamiento y análisis de datos: se comparan mediciones en distintos tiempos para cuantificar desplazamientos absolutos, velocidades de desplazamiento, tendencias, y comparar/superar umbrales de seguridad.

Figura 6. Monitoreo de taludes con prismas



Fuente. (Severin, J. 2013)

La figura 6 ilustra el esquema de un sistema de monitoreo geodésico automatizado para la estabilidad de taludes, el cual se compone de una red de prismas reflectores (network of prisms) instalados estratégicamente sobre la superficie del terreno, que son medidos

periódicamente por una o más estaciones totales robóticas (total station); los datos capturados se transmiten mediante un repetidor (repeater) a una computadora central (office PC), donde son procesados para detectar desplazamientos milimétricos y evaluar en tiempo real la posible evolución de movimientos en el talud.

C) Monitorización mediante interferometría radar (INSAR) satélite: La interferometría de radar (InSAR) es una técnica que aprovecha la interferencia coherente entre señales de radar transmitidas desde dos antenas con geometrías espacialmente separadas (línea base) para extraer información precisa de alcance. Al comparar las diferencias de fase de las señales de retorno, se generan interferogramas capaces de detectar variaciones en la escala de fracciones de longitud de onda (λ), permitiendo aplicaciones como:

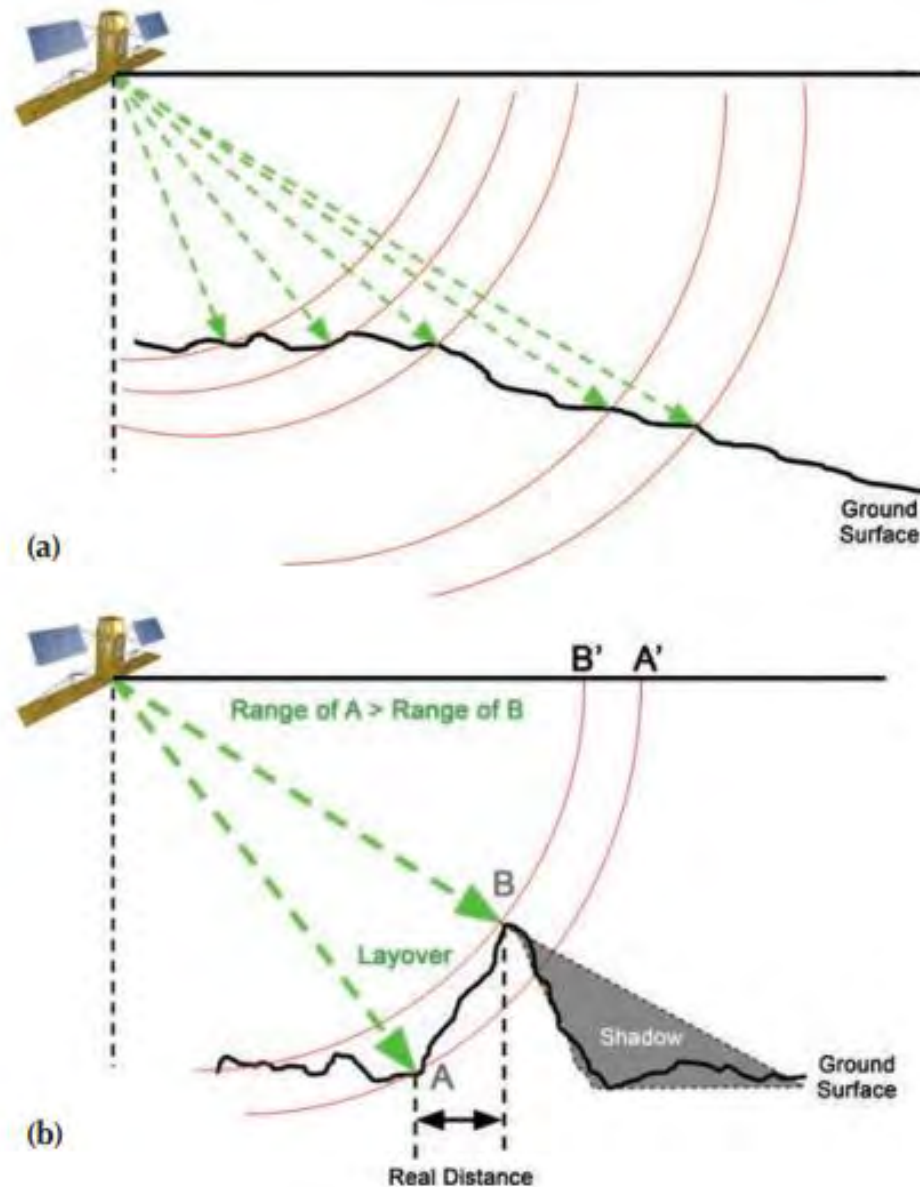
- Cartografiado topográfico de alta resolución: Mediante sistemas SAR (Radar de Apertura Sintética) con configuraciones de:
- Doble antena en plataforma única (single-pass): Dos antenas montadas en paralelo (ej.: avión/satélite) miden simultáneamente la altura del objetivo con precisión submétrica, combinando datos de alcance, dirección y ángulo de observación para reconstruir coordenadas 3D absolutas (Zebker et al., 1992).
- Dos pasadas con antena única (repeat-pass): Requiere trayectorias de vuelo superpuestas con mínima desviación transversal, dependiendo de correcciones precisas de la órbita/posición (McHugh et al., 2006).

Según la (NASA, 2024), el uso de estos radares presenta las siguientes ventajas:

- Puede operar de día y de noche, ya que no depende de la luz solar.
- Es capaz de penetrar nubes, lluvia y, en algunos casos, vegetación o nieve, lo que lo hace ideal para monitoreo en cualquier condición meteorológica.

- Permite detectar pequeños movimientos de la superficie (milimétricos o centimétricos), útil en estudios de deformación del terreno, terremotos, glaciares, inundaciones, y humedad del suelo.

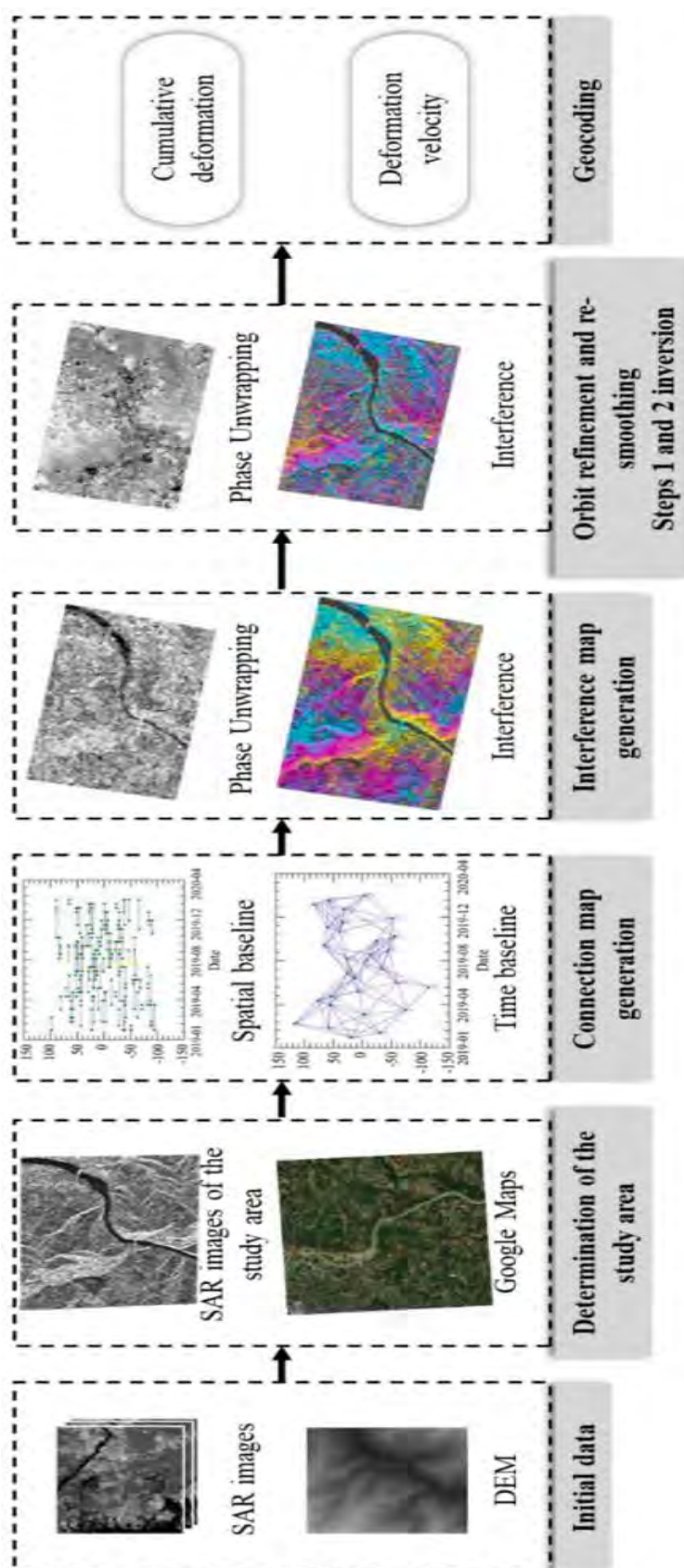
Figura 7. Rango de medición de radares InSAR



Fuente. Sharon & Eberhardt (2020).

- Corrección de artefactos geométricos: Elimina distorsiones como *escorzo* y *superposición* en imágenes SAR, generando Modelos Digitales de Elevación (DEM).

Figura 8. *Procesamiento de tecnología Insar.*



Fuente. (Z. Deng et al, 2025)

1. Radares Ground Control RAR (Radares de apertura real): El radar RAR se refiere al radar real (el verdadero radar de apertura, en inglés). Este es un tipo de radar de la imagen en la que la resolución de espacio depende directamente del tamaño físico de la antena. En el raros de radar, los objetos anti -electromagnéticos y el eco se reflejan por los objetos en la superficie, creando dos imágenes de la Tierra o los objetivos observados (Living Textbook, s. f.).

Como pioneros en el monitoreo geotécnico, los sistemas RAR destacan por su capacidad de adquisición geométrica directa, con las siguientes especificaciones operativas:

- i. Mecanismo de escaneo bidimensional:
 - Rotación mecánica sincronizada en ejes de azimuth (barrido horizontal) y elevación (ángulo vertical)
 - Generación de datos tridimensionales independientes por píxel (azimut, rango, elevación)
 - Independencia topográfica
 - Formación de imágenes intrínsecamente geométricas, sin correlación con la morfología del talud
 - Visualización directa sin requerir modelos digitales de elevación (DEM) como soporte
- ii. Ventajas operacionales:
 - Adquisición en tiempo real con resolución espacial consistente ideal para monitoreo táctico en campo.
 - Baja sensibilidad a ruidos atmosféricos por lo tanto data más confiable.
 - Equipo que se adapta para todo tipo de ambiente y a diferentes climas.

- Adquisición de datos mediante ondas electromagnéticas. Brinda datos de deformación, velocidad, aceleración, amplitud, coherencia y rango.

Estas características los hacen ideales para monitoreo en minas a cielo abierto con geometrías complejas, donde la autonomía de procesamiento agiliza la detección de deformaciones críticas (Ramos Apaza, 2023).

Figura 9. Monitoreo de talud con tecnología RAR



Fuente. (Hexagon, 2023)

La figura 12 muestra la aplicación de una técnica de monitoreo RAR. Se observa que el talud que está siendo monitoreado por un dispositivo sensor identificado como "RAR". Este instrumento emite haces de señal para escanear y medir deformaciones en la superficie. El objetivo del sistema es detectar, de forma continua y precisa, cualquier movimiento o desplazamiento en el terreno, sirviendo como una herramienta clave para la alerta temprana de posibles inestabilidades o deslizamientos.

2. Radares Ground Control SAR (Radares de apertura sintetica): Es un sistema de radar de apertura sintética instalado en tierra, utilizado para monitorear desplazamientos del terreno y estructuras **con una** precisión milimétrica.(NASA-ISRO SAR MISSION, s. f.).

A diferencia de los radares espaciales o aerotransportados, el GBSAR se monta sobre una plataforma fija o móvil (por ejemplo, sobre rieles) que escanea un área objetivo mediante el movimiento de su antena. Esto permite obtener imágenes de radar de alta resolución y, mediante el procesamiento interferométrico (InSAR), detectar pequeñas deformaciones o movimientos en tiempo real.

El sistema funciona bajo cualquier condición climática y de día o de noche, por lo que es ideal para aplicaciones de seguridad geotécnica, como el monitoreo de taludes mineros, presas, infraestructuras críticas y laderas inestables. (Monserrat et al, 2014).

- i. Características principales

- Adquisición rápida y continua de datos (monitoreo en tiempo real).
- Resolución milimétrica a distancias de hasta varios kilómetros.
- Independiente de la iluminación solar o condiciones atmosféricas.
- Cobertura de grandes áreas mediante barrido angular o lineal.
- Posibilidad de integrarse con cámaras ópticas, GNSS y sensores meteorológicos

- ii. Aplicaciones

- Control de estabilidad de taludes mineros y naturales.
- Supervisión de estructuras civiles (presas, puentes, túneles).
- Gestión de riesgos geotécnicos y prevención de deslizamientos.

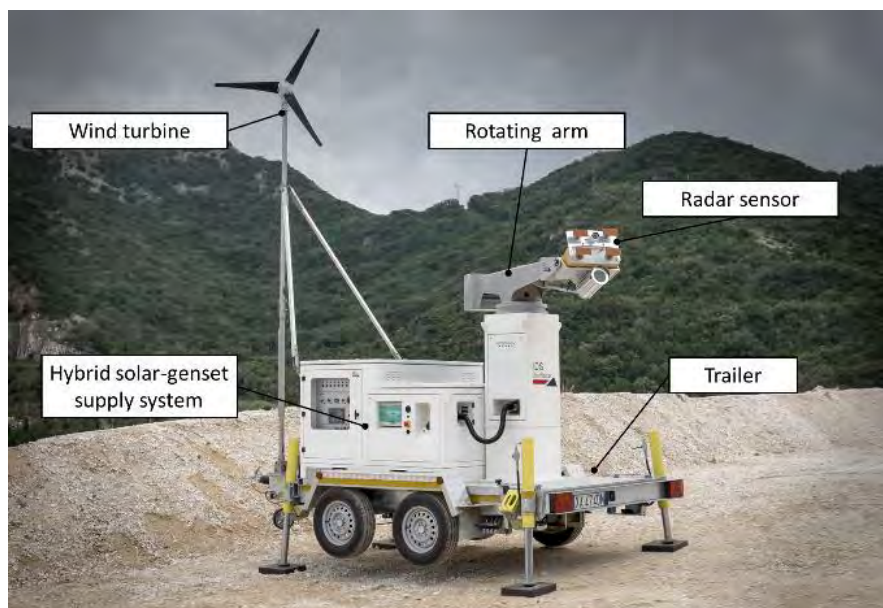
- Estudios de glaciares y deformaciones superficiales.

Figura 10. GeoRadar SAR-IBIS



Fuente. Ramos Apaza (2023)

Figura 11. Componentes de radar Arcsar - SAR



Fuente. Michelini, A., Viviani, F., & Mayer, L. (2019)

A continuación, se comparan las tecnologías de radar y como se adecua a las distintas estrategias de monitoreo.

Figura 12. Componentes de radar Arcsar - SAR

	 IBIS-FM	 IBIS-Rover	 IBIS-ArcSAR
Instalacion	Fijo	Moble	Moble
Resolucion @1 Km (Tamaño pixel)	0.75m x 4.3mrad	0.75m x 8.6mrad	0.375m x 4.3mrad
Rango Máximo	4,500m	2,500m	5,000m
Cobertura	90°H x 60°V	270°H x 60°V	360°H x 70°V
Tiempo de escaneo	<3min	1min @90° 4min @270°	20sec @180° 40sec @360°
Camera	Opcional	Opcional	Incorporada
Alimentacion	Externa/Generador diésel/Solar	Externa/Generador diésel/Solar/eólico	Externa/Generador diésel/Solar/eólico
+ Auto-Geocoding	-	SI	SI
- DTM	-	A pedido	Automático
Requerimiento de banda	<1Mbit/s	<1Mbit/s	<1Mbit/s

Nota: Adaptado de (IDS Georadar, 2019).

3. Geo-Radares RAR y SAR: En el monitoreo de estabilidad de taludes mediante radar, existen dos métodos para formar los frentes de onda: Radar de Apertura Real (RAR), que utiliza un frente de onda real dirigido mecánicamente hacia el talud, y Radar de Apertura Sintética (SAR), que genera un frente de onda sintético mediante procesamiento de señales. Ambos sistemas pueden producir imágenes bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), donde las dimensiones corresponden a azimut (dirección de barrido), elevación (ángulo vertical) y rango (distancia al objetivo). Mientras que RAR y SAR definen cómo se genera el frente de onda, la formación de imágenes 2D o 3D depende de cómo este frente interactúa con la superficie del talud para capturar datos espaciales y geométricos (López Vinielles, 2022).

3.2.4. Monitoreo con Georadar GBSAR.

El análisis e interpretación de los datos obtenidos mediante radares terrestres de apertura sintética (GBSAR), permiten identificar y cuantificar desplazamientos en la superficie del terreno o de estructuras, se convierte una herramienta fundamental para el monitoreo geotécnico continuo de taludes, presas, estructuras y zonas inestables.

1. Procesamiento de datos:

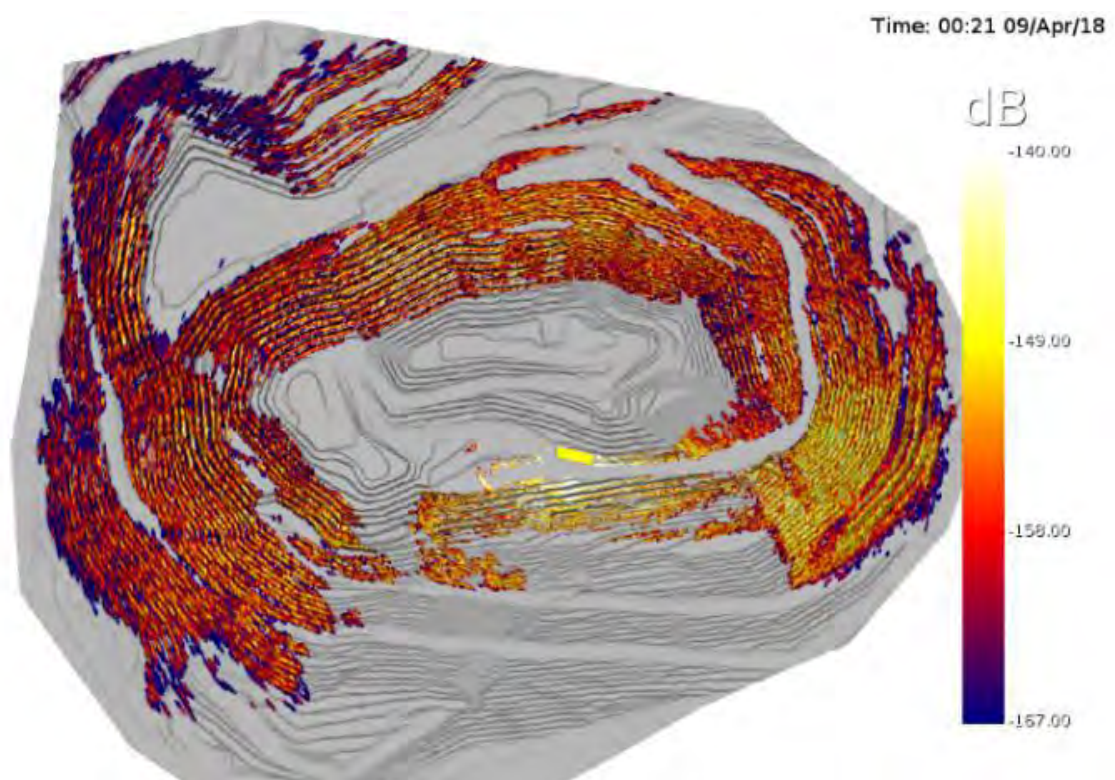
El sistema GBSAR emite pulsos electromagnéticos hacia el terreno y registra el eco reflejado. A partir de la diferencia de fase entre las señales emitidas y recibidas en distintas posiciones de la antena, se generan interferogramas que permiten detectar pequeñas deformaciones superficiales a lo largo de la línea de visión (LOS, Line of Sight) del radar, con precisión milimétrica.

Un píxel en monitoreo geotécnico es la unidad más pequeña en las imágenes obtenidas por sensores remotos (como radar GBSAR o InSAR) que miden desplazamientos, deformaciones o tensiones en un área monitoreada del terreno. En sistemas como radar interferométrico (InSAR) o radar basado en tierra (GBSAR), cada píxel representa una porción del terreno, y los valores asociados al píxel corresponden a parámetros geotécnicos como el desplazamiento en milímetros o la coherencia entre imágenes consecutivas (Hernan, G. (2017)).

- i. Resolución de desplazamiento: < 0.1 mm.
- ii. Alcance: hasta 4-5 km (dependiendo del modelo).
- iii. Frecuencia de adquisición: cada pocos segundos o minutos.
- iv. Software: Usualmente acompañado por Guardian o IBIS Data Viewer para visualización y análisis.

A) Adquisición de datos: El radar se instala en una posición fija o sobre un riel lineal y realiza barridos periódicos sobre el área de interés. Cada adquisición genera una imagen de amplitud y fase que representa la respuesta radar del terreno. Ver figura 16. Se presentan y analizan dos conjuntos de datos reales de IBIS-ArcSAR, prestando especial atención a la capacidad del sistema para adquirir imágenes con un gran campo de visión. El primer escenario considerado es una mina de oro a cielo abierto con un diámetro de unos 2 km. IBIS-ArcSAR se desplegó aproximadamente a mitad de la pendiente del pozo, lo que permitió adquirir señales relevantes en los 360° del barrido circular e identificar unos 520 000 pixles, (Ferretti et al. 2001) en la imagen SAR

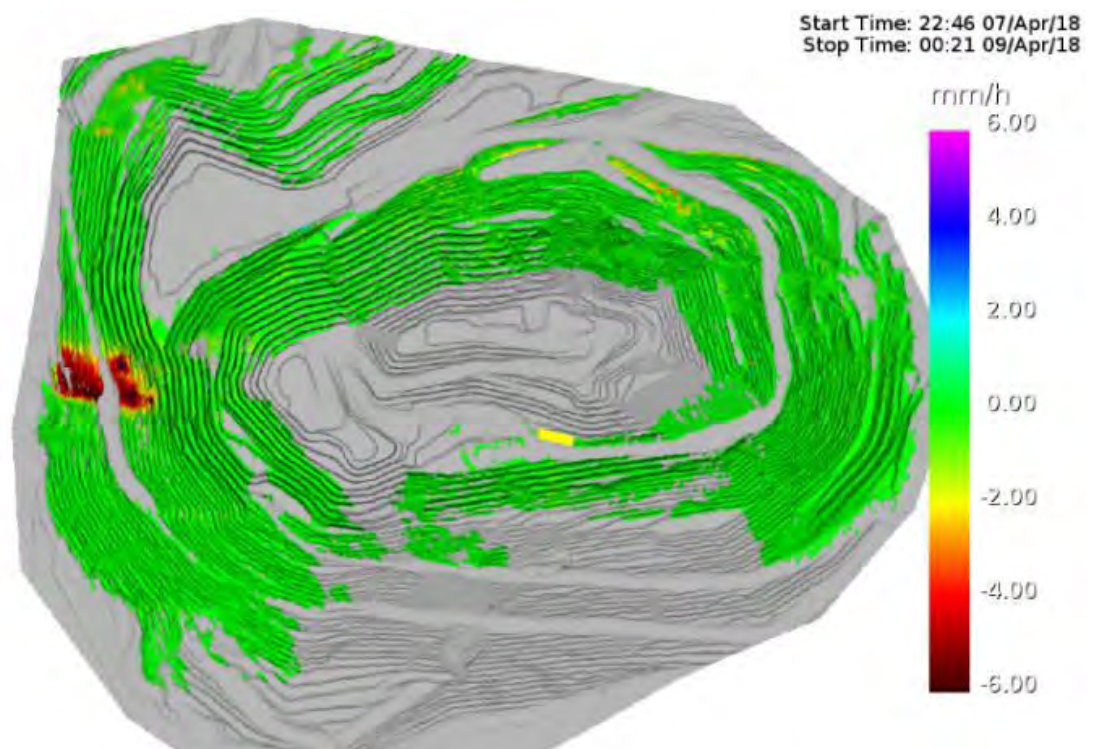
Figura 13. *adquisición de datos*



Fuente: Michelini, A., Viviani, F., & Mayer, L. (2019)

B) Procesamiento Interferometrico: Mediante técnicas de InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), se calculan los cambios de fase entre imágenes consecutivas, lo que permite derivar mapas de desplazamiento secante (v_{LOS}) y deformación acumulada. A partir de la calidad de datos, es posible obtener excelentes resultados del procesamiento interferométrico, que pueden ser utilizados por la geotecnia minera en forma de mapas de desplazamiento o velocidad. A modo de ejemplo, en la Figura 18, se muestra el mapa de velocidad geocodificado calculado en un intervalo de 24 h. El área sujeta a deformación es claramente visible e identificable dentro del Tajo.

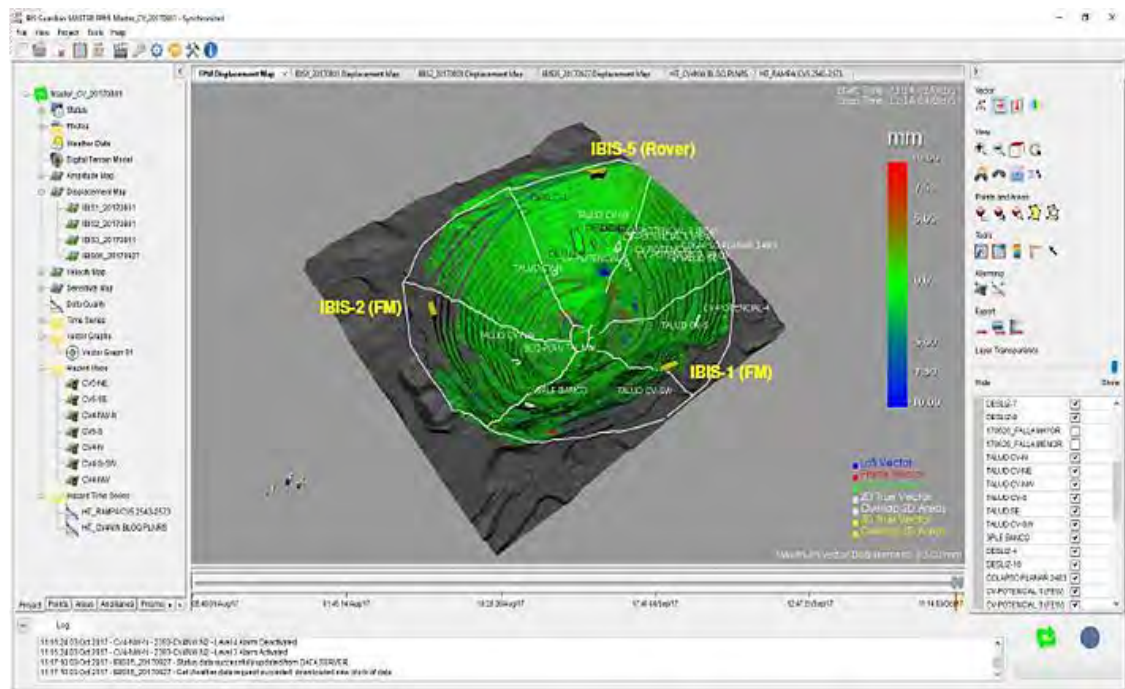
Figura 14. *Mapa de deformación acumulada*



Fuente: Michelini, A., Viviani, F., & Mayer, L. (2019)

C) Visualización de Monitoreo: Una vez definido el sistema de procesamiento de los datos crudos de campo, la información debe visualizarse en una aplicación específica que proporciona cada sistema para la revisión, evaluación y análisis de los riesgos geotécnicos.

Figura 15. Visualización de software Guardián.



Fuente: Huarache E. (2020)

D) Correcciones atmosféricas en radares: Las condiciones atmosféricas cambian de manera constante en el tiempo. Entre los principales factores que afectan la señal radar se encuentran:

- Humedad y precipitación
- Temperatura del aire
- Presión atmosférica

Estos cambios pueden presentar comportamientos:

- Cíclicos, asociados a los ciclos día–noche o a las estaciones del año.
- Predecibles o impredecibles, dependiendo del régimen climático local.

- De baja o alta magnitud, desde variaciones leves hasta eventos extremos.

Entre todos estos factores, la precipitación es la que genera los mayores efectos atmosféricos, ya que altera significativamente la refractividad del aire y puede introducir ruido adicional en la señal radar. En consecuencia, los periodos de lluvia intensa suelen requerir un análisis cuidadoso de la calidad de los datos y, en algunos casos, la exclusión temporal de mediciones para evitar interpretaciones erróneas de la deformación del talud. (Michelini et al., 2019).

E) Software Ibis Guardian: El visualizador final de la información de deformación constituye la etapa culminante del sistema de monitoreo geotécnico basado en radar interferométrico, donde se integran, analizan e interpretan los datos de desplazamiento obtenidos. En esta etapa se ejecutan los parámetros de análisis mediante la generación de series temporales, las cuales se consultan a través de puntos individuales (píxeles) o áreas definidas, permitiendo un seguimiento detallado del comportamiento deformacional del talud.

A través del visualizador se gestionan alarmas de desplazamiento, alarmas de tasa de velocidad y alarmas basadas en la velocidad inversa, estas últimas ampliamente utilizadas para la estimación del tiempo de colapso en taludes inestables. Este enfoque permite anticipar fallas mediante el análisis de la aceleración progresiva de los movimientos del macizo rocoso (Michelini et al., 2019).

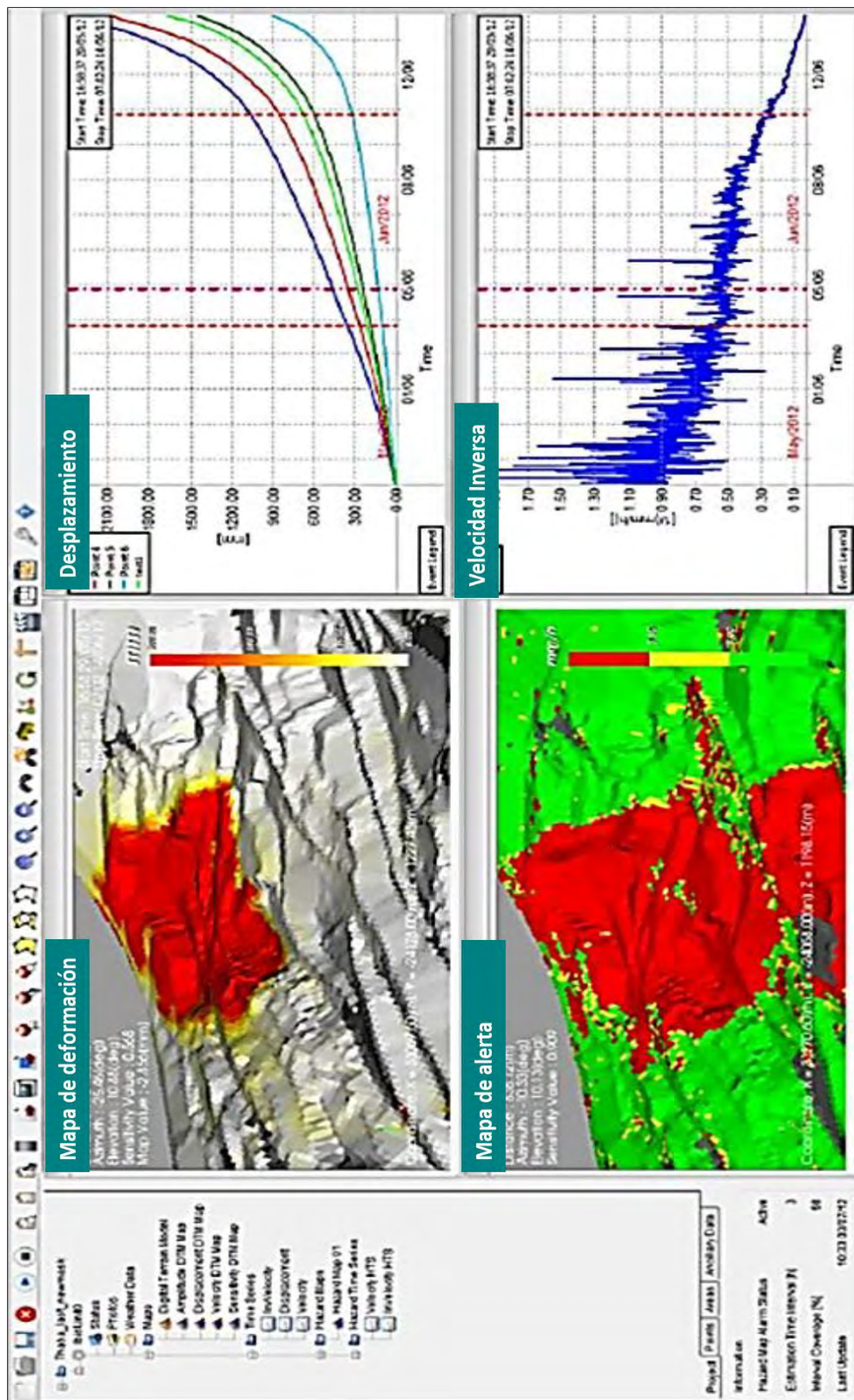
Adicionalmente, el sistema permite:

- Procesamiento en tiempo real con corrección automática de los efectos atmosféricos, asegurando mediciones de alta precisión.
- Generación de alarmas mediante niveles definidos por el usuario y la aplicación de criterios múltiples de activación.

- Salidas georreferenciadas, compatibles con sistemas de información geográfica (SIG).
- **Gestión interactiva de datos en 3D**, facilitando la interpretación espacial de los desplazamientos. Ver Fig. 21.
- Definición de zonas específicas por el usuario para la generación de alarmas localizadas. Ver Fig. 21.
- Exportación de resultados hacia software de planeamiento y diseño minero.
- Generación de alarmas múltiples, considerando diferentes características geomecánicas del macizo rocoso.
- Alarmas basadas en velocidad, aceleración, desplazamiento y velocidad inversa, según criterios de estabilidad. Ver Fig. 21.
- Alarmas definidas en función del área mínima afectada, evitando falsas alertas por ruido local.
- Envío automático de alarmas mediante correo electrónico, mensajes de texto o ventanas emergentes (*pop-up*).
- Configuración de distintos destinatarios de alarmas, según niveles de responsabilidad operativa y geotécnica.

Este conjunto de funcionalidades convierte al visualizador final en una herramienta clave para la toma de decisiones, la gestión del riesgo geotécnico y la implementación de sistemas de alerta temprana en minas a cielo abierto (Michelini et al., 2019).

Figura 16. Mapas de desplazamiento, velocidad y alerta.



Nota: Modificado de Huarache E. (2020), se muestra el mapa de deformación de la zona de monitoreo, mapa de alerta con la configuración de umbrales de velocidad, desplazamiento y velocidad inversa.

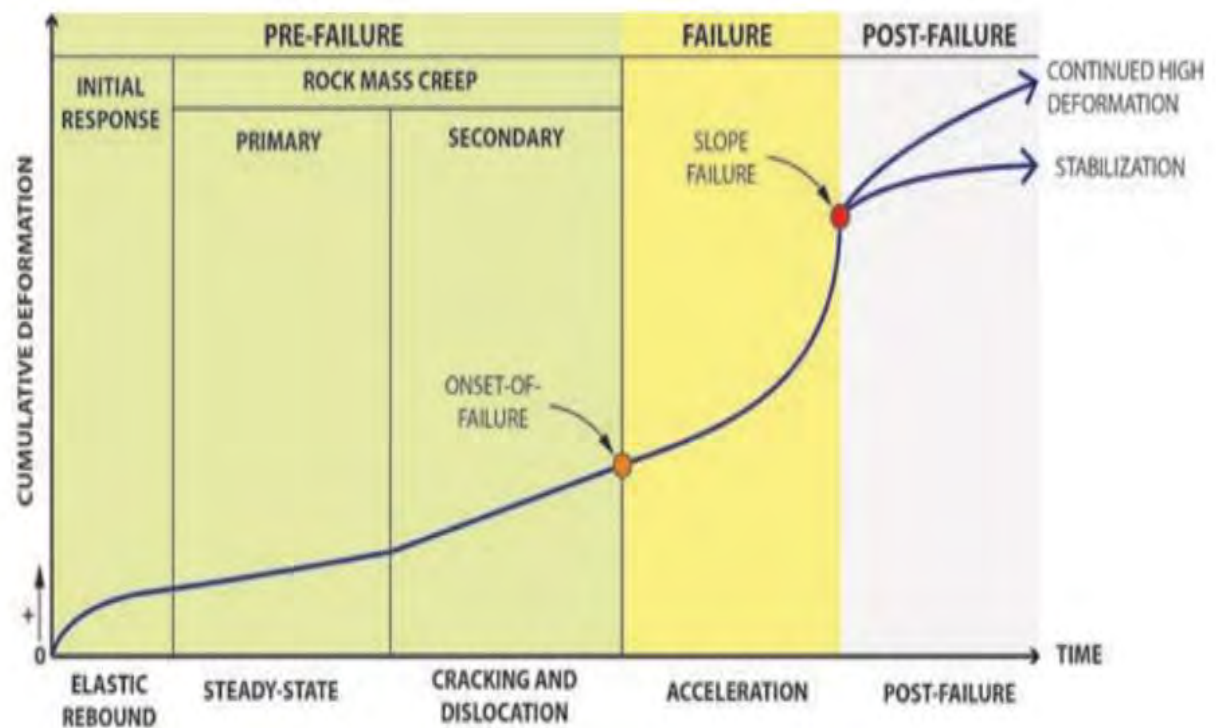
F) Tendencias de deformación por desplazamiento: El estudio de la evolución temporal del movimiento permite detectar aceleraciones o tendencias anómalas, que pueden indicar procesos de inestabilidad activa o incipiente.

Los taludes del Tajo pueden experimentar respuestas elastoplásticas en las primeras etapas de la exploración minera y conforme avance la operación minera, estos suelen producirse como respuesta a la exploración minera y pueden continuar mucho después de que la explotación haya terminado sin que haya pruebas visibles de pérdida de resistencia de la masa rocosa.

Cuando las fuerzas externas (gravedad) ejercen una tensión sobre la pendiente del tajo, la masa rocosa responde deformándose (deformación) es así que la resistencia al corte de la masa rocosa y las propiedades elastoplásticas definen el inicio de un fallo progresivo del talud (Zavodni 2001), Sullivan (1993) amplió el proceso de clasificación de fallos dividiendo los patrones de movimientos de los taludes en Tres fases según (Newcomen & Dick 2015).

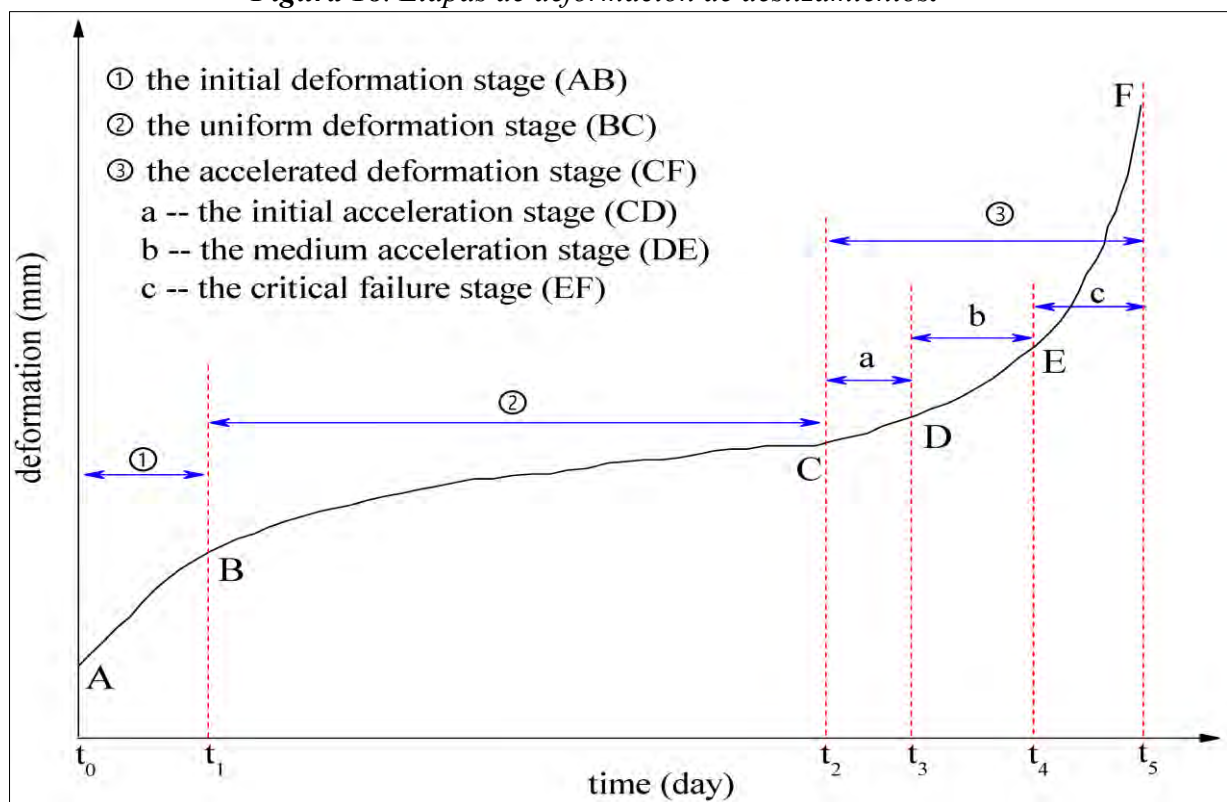
- i. Pre-falla (Tendencia lineal): se considera una fase de estabilidad y el inicio de la deformación.
- ii. Falla (tendencia progresiva): fase de aceleración y el colapso del macizo rocoso.
- iii. Post-Falla (tendencia regresiva): comportamiento de disminución de velocidad y deformación del macizo rocoso.

Figura 17. Gráficos esquemáticos de la tendencia de deformación



Fuente. Newcomen y Dick (2015)

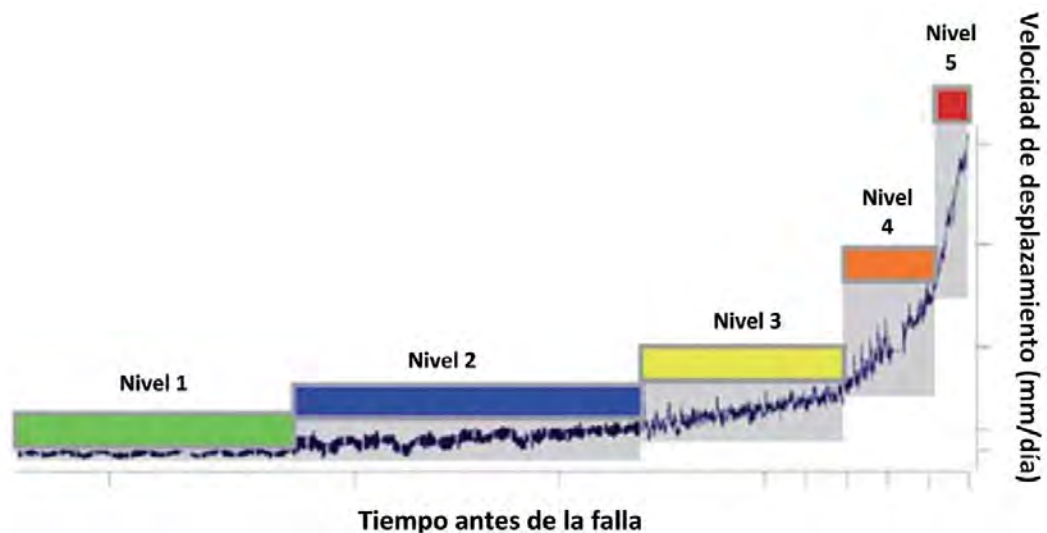
Figura 18. Etapas de deformación de deslizamientos.



Fuente. (Li, T., Chen, N., Zhang, Y., & Hu, J. 2021)

G) Cálculo de velocidad de deformación: Al hacer el análisis de velocidad se encuentra que intervalos de cálculo cortos arrojarán velocidades más altas que intervalos de cálculo largo, no obstante, los intervalos cortos introducen mayor ruido o dispersión en la gráfica. Debe buscarse a un equilibrio entre ruido y valores pico de velocidad. El periodo de cálculo de velocidad (Velocity Calculation Period) es un parámetro muy importante, pues es el intervalo de tiempo usado para calcular los parámetros de velocidad.

Figura 19. Incremento de velocidad de deformación.



Nota. Adaptada de Lacasse & Nadim, 2011.

H) Configuración de umbrales de Alerta: Configurar umbrales de alerta en un radar IBIS (como IBIS-ArcSAR o IBIS-RG) es fundamental para la detección temprana de movimientos peligrosos en taludes, estructuras o presas. Este proceso se realiza usualmente desde el software Guardian (de Hexagon), y permite activar alarmas automáticas cuando se superan ciertos límites predefinidos de desplazamiento o velocidad de deformación.

Detectar comportamientos anómalos (ej. aceleración de un talud o deformación estructural) antes de que ocurran fallas, mediante el uso de alertas automáticas basadas en:

- i. Desplazamiento acumulado
- ii. Velocidad de desplazamiento (mm/h, mm/día)
- iii. Aceleración del movimiento
- iv. Coherencia de señal

Los valores de umbral dependen del tipo de terreno o estructura, pero un ejemplo típico en minería es:

Tabla 4. Umbrales de alerta.

Nivel de alerta	Umbral de desplazamiento	Umbral de velocidad
● Normal	< 5 mm	< 1 mm/h
● Advertencia	5–10 mm	1–2 mm/h
● Peligro	> 10 mm	> 2 mm/h

Nota. Estos valores deben adaptarse según el comportamiento histórico del sitio y el tipo de material. No es lo mismo un talud rocoso que uno arcilloso.

La evaluación del nivel de alarma es realizada con base en la interpretación de todas las mediciones disponibles y su evolución en el tiempo en base a ello se muestra el plan de acción ante activación de alertas.

Tabla 5. Plan de acción ante activación de alertas.

Nivel de alarma	Actividades y alarmas	Respuesta
Nivel 1 Situación normal	Variaciones menores	Equipo técnico solamente
	Ninguna alarma	Mantenimiento técnico
Nivel 2 Alerta	Fluctuaciones estacionales importantes en uno o múltiples sensores	Incrementar frecuencia de revisión de información, comparar diferentes sensores
	Valores < límites superiores para Nivel 2	Notificar a experto geotécnico / geológico
Nivel 3 Incrementar alerta	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Revisión continua de información en oficina y en campo, presencia de geo experto en oficina
	Valores < límites superiores para Nivel 3	Informar a instituciones encargadas de atención de emergencias
Nivel 4 Alta amenaza	Incrementos en la velocidad de desplazamientos observados en múltiples sensores	Incrementar la preparación, análisis continuo de información
	Valores < límites superiores para Nivel 4	Alertar a la población para estar preparada para evacuación
Nivel 5 Situación crítica	Incremento continuo de desplazamientos en taludes	Evacuación
	Valores < límites superiores para Nivel 5	

Nota. Adaptado de Lacasse & Nadim, 2011.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo de investigación

Según Hernández et al. (2014), esta investigación es de tipo aplicada, ya que su finalidad es generar conocimientos orientados a resolver un problema concreto dentro del ámbito de estudio de una disciplina específica. Asimismo, por la naturaleza de los datos y el método empleado, el enfoque es mixto, dado que el análisis se sustenta la interpretación técnica del comportamiento geotécnico del terreno y la medición numérica de las variables y el tratamiento estadístico de los eventos geodinámicos externos.

4.2. Enfoque de investigación

La presente investigación adopta un enfoque mixto, el cual integra los métodos cuantitativo y cualitativo con el propósito de obtener una comprensión más completa del fenómeno de estudio. El enfoque mixto implica la recolección, análisis e integración de datos numéricos y descriptivos en un mismo estudio, con el fin de responder de manera más amplia al problema planteado (Hernández et al., 2014).

El enfoque mixto permitió abordar la problemática de manera integral, combinando la medición objetiva de las deformaciones (enfoque cuantitativo) con la interpretación técnica del comportamiento geotécnico del terreno (enfoque cualitativo). Esta complementariedad metodológica posibilitó la determinación precisa de los sistemas de alarma y la definición de criterios confiables para el monitoreo continuo de la estabilidad de taludes en minería a tajo abierto.

4.3. Diseño de investigación

Según Hernández et al. (2014), esta investigación adoptará un diseño no experimental, ya que no se manipulan deliberadamente las variables de estudio, sino que se analizan en su contexto natural, tal como se presentan los eventos en la unidad minera.

Este diseño permite observar y analizar las variables sin intervención externa, manteniendo las condiciones reales en las que ocurren los fenómenos de interés.

Además, se enmarcará dentro de la investigación no experimental transeccional, ya que recopilará datos en un momento específico para describir las fallas, explicar sus causas y proponer mejoras. Como señala Carrasco (2005), este tipo de diseño es ideal cuando no es posible o ético manipular variables.

4.4. Población de estudio

Primeramente, establezcamos el concepto de población, para Hernández et al. (2014), este término se relaciona al conjunto de situaciones y/o elementos que comparten ciertas características para un estudio, para lo cual la población de estudio serán los eventos geotécnicos ocurridos en los últimos 3 años.

4.5. Muestra

La muestra es, en términos simples, un subgrupo de la población. Es decir, es un conjunto más pequeño de elementos que forman parte de un grupo más amplio y definido, al que denominamos población (Hernández et al., 2014). De este modo se ha establecido una muestra de 11 eventos geotécnicos presentados en los últimos 3 años en la zona de estudio.

Tabla 6. Eventos geotécnicos a analizar

Nº	FECHA	EVENTO
1	13/10/2023 7:31	Deslizamiento
2	22/11/2023 14:15	Deslizamiento
3	10/12/2023 16:33	Deslizamiento
4	26/12/2023 21:59	Deslizamiento
5	07/02/2024 15:49	Deslizamiento
6	15/04/2024 7:46	Deslizamiento
7	28/04/2024 21:15	Deslizamiento
8	11/06/2024 19:46	Deslizamiento
9	13/01/2025 20:41	Deslizamiento
10	03/02/2025 9:20	Deslizamiento
11	10/02/2025 14:04	Deslizamiento

4.6. Metodología de Trabajo

4.6.1. *Etapas de trabajo*

1. Pre campo: Revisión y Recopilación de Datos

- Contexto geológico-geotécnico: Analizar litología, estructuras, fallas y en general el contexto geológico de la zona de estudio.

2. Campo: Monitoreo en Tiempo Real

- Eventos registrados Identificar antecedentes de deslizamientos, grietas o colapsos en la zona de estudio.
- Recopilación histórica: Obtener datos de deformación de eventos geotécnicos en la zona de estudio.

3. Gabinete: Procesamiento y Análisis de Datos

- Tendencias de deformación:
- Gráficos de desplazamiento vs. tiempo.
- Identificación de velocidades y deformación.

Análisis estadístico:

- Establecer umbrales de deformación.
- Modelos de regresión para predecir comportamiento futuro.

Para el análisis estadístico se aplicarán los siguientes procedimientos:

Tabla 7. Procedimiento Estadístico

Proceso	Técnica estadística aplicada	Software recomendado	Procedimiento general
Preprocesamiento de datos	Filtrado de datos, detección y eliminación de outliers (z-score, IQR)	Excel	Importar datos, limpiar valores erróneos, eliminar outliers, normalizar datos para análisis posterior.
Análisis de tendencias	Regresión lineal/no lineal, pruebas de tendencia (Mann-Kendall)	SPSS	Ajustar modelos de regresión para series temporales, realizar pruebas no paramétricas para validar tendencias.
Análisis de correlación	Coefficiente de Pearson/Spearman, análisis multivariado	SPSS	Correlacionar deformaciones con variables externas (precipitación, presión de poros), identificar causas potenciales.
Definición de umbrales de alarma	Análisis de percentiles, desviación estándar, criterios de seguridad basados en ingeniería	SPSS	Definir niveles de prealarma, alarma y evacuación con base en análisis estadístico y experiencia técnica.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Respecto al objetivo específico 1

5.1.1. *Geología Local*

El yacimiento, ubicado en la provincia de Huari, región Áncash, representa uno de los depósitos de cobre y zinc más importantes del Perú y de relevancia internacional. Desde el punto de vista geológico, corresponde a un depósito tipo skarn polimetálico, generado por la intrusión de un pórfido cuarzo-monzonítico del Mioceno en secuencias carbonatadas mesozoicas, dando lugar a procesos de metasomatismo de contacto y a una compleja zonación mineralógica.

En función de la litología hospedante, mineralización y controles estructurales, el yacimiento ha sido subdividido en dominios geológicos y geo metalúrgicos, los cuales condicionan tanto el diseño minero como la planificación de la explotación. La producción se encuentra dominada por sulfuros de cobre, principalmente calcopirita y bornita, con aportes secundarios de zinc, plata, plomo y molibdeno, asociados a fases minerales específicas.

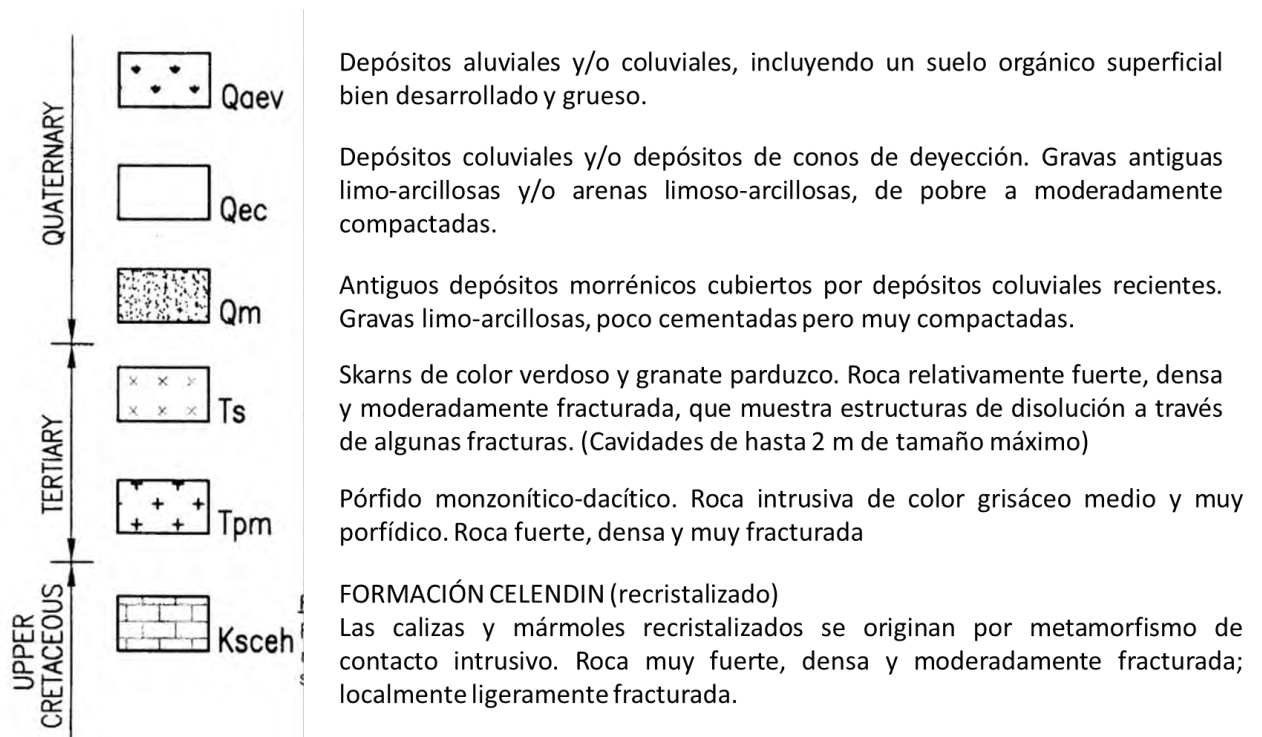
El depósito está constituido por:

La Formación Celendín (Ks-ce) está constituida predominantemente por margas calcáreas nodulares, de estratificación pobremente desarrollada, con coloraciones que varían entre amarillo plumizo y grisáceo. Presenta intercalaciones de calizas, esquistos arcillosos (mudstones) de tonalidad plumiza y niveles de margas.

La unidad alcanza un espesor aproximado de 500 m y aflora formando estructuras sinclinales con rumbo preferencial noroeste–sureste (NW–SE). Desde el punto de vista estratigráfico, la Formación Celendín se dispone de manera concordante sobre la Formación Jumasha, indicando una continuidad deposicional entre ambas unidades.

La Formación Jumasha (Ks-j) está conformada por calizas grises de carácter masivo, organizadas en estratos potentes con espesores que oscilan entre 1 y 2 m. Se trata de una unidad altamente competente y resistente a los procesos de intemperismo, con un espesor total inferior a 700 m.

Geomorfológicamente, esta formación da lugar a relieves prominentes, manifestándose como crestas y cadenas elevadas. Desde el punto de vista hidrogeológico, presenta un marcado desarrollo cárstico, evidenciado por la presencia de cuevas, cavernas y sumideros, producto de la disolución de la roca carbonatada.



Nota: Fuente propia

Foto N°1: Pared del Tajo litología compuesta por Marmol



El depósito de skarn presenta una zonación concéntrica alrededor de un intrusivo central de pórfido monzonítico. La mineralización principal consiste en:

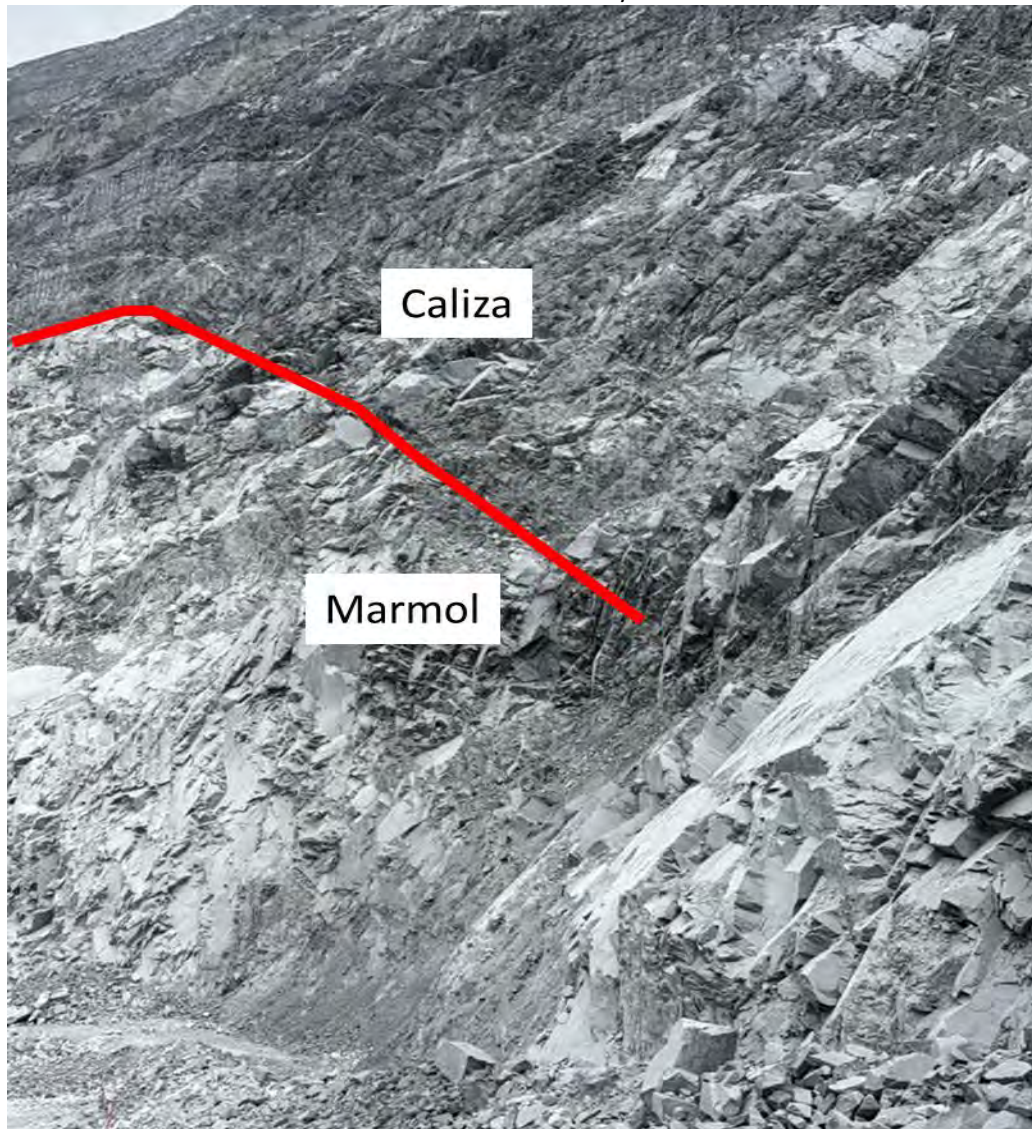
- Skarn de granate café con calcopirita, adyacente al intrusivo.
- Skarn de granate verde con calcopirita y esfalerita, formando una zona de transición entre el skarn café y las calizas limolíticas metamorfizadas periféricas.
- Skarn de wollastonita-diópsido-granate verde con bornita y esfalerita, ubicado en el margen sur del skarn verde.

Foto N°2: Zona Mineralizada por Skarn verde



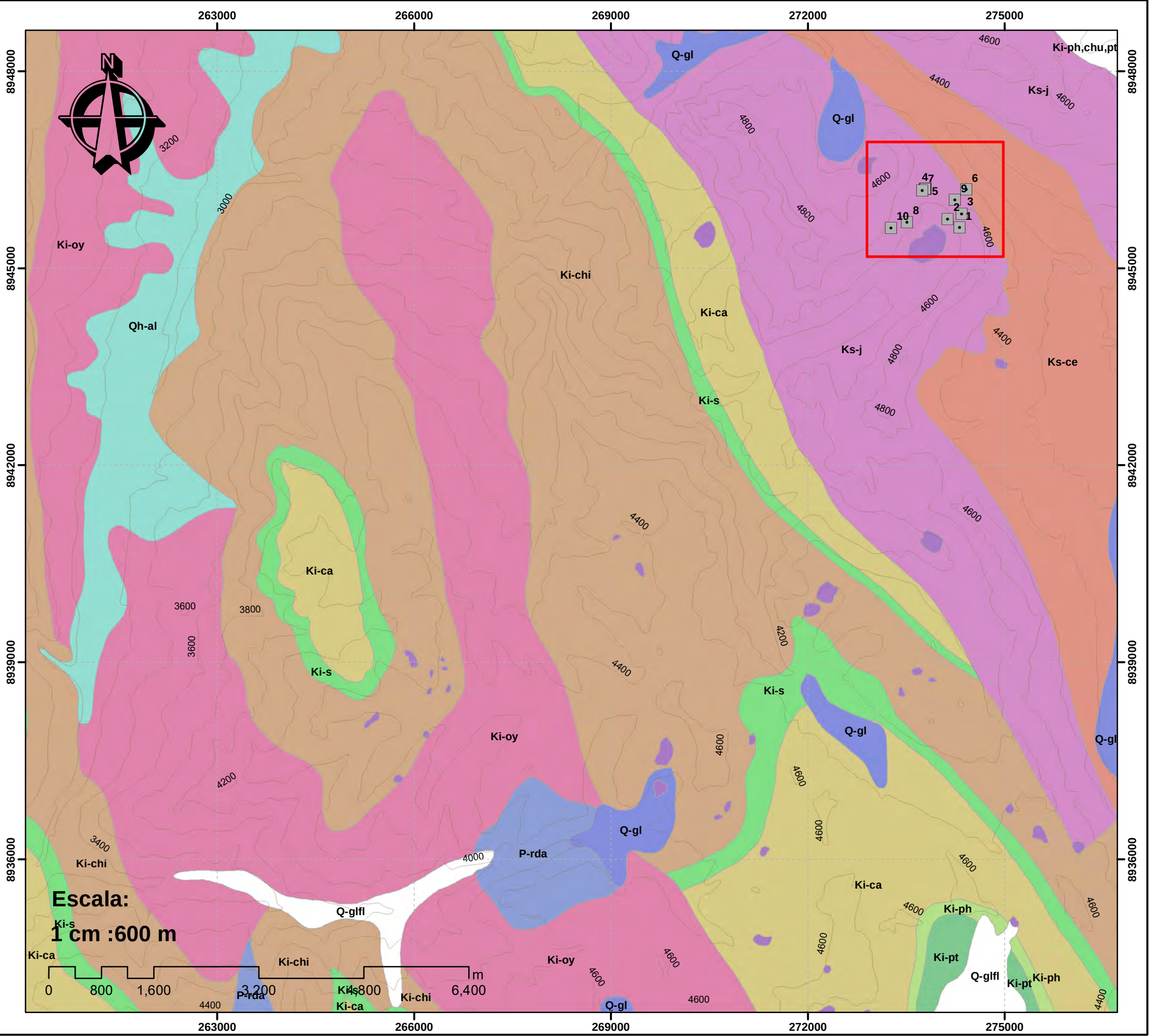
Las calizas limolíticas circundantes presentan distintos grados de hornfelsización y marmolización, con vetas, venillas y lentes de galena, acompañadas de pirita, calcopirita, esfalerita y fluorita en menores proporciones. La calcopirita constituye el 90% del contenido de cobre del depósito, mientras que la bornita aporta menos del 10%. La pirita y magnetita son minerales comunes en todo el yacimiento, y los intrusivos centrales contienen mineralización de molibdenita. Como minerales accesorios destacan tenantita, pirrotita, hematita, cubanita, bismutinita y cosalita. Aunque el 50% del depósito presenta contenidos de bismuto inferiores a 15 ppm, se han detectado valores más altos cerca de los bordes de la mineralización del skarn de granate.

Foto N°3: Contacto Caliza/Marmol



El depósito es un Intrusivo Cuarzo Monzonítico se emplaza en las calizas de la Formación Celendín, al oeste de la mina, la Formación Jumasha forma una rampa de escurrimiento sobre una lengua sobre escurrida de Jumasha (es decir sobre sí misma) y la Formación Celendín. Jumasha forma montañas prominentes pronunciadas de calizas bien estratificadas gris claras generando así el Skarn. Esta secuencia forma la faja de pliegues y sobre-escurrimientos de la Zona Subandina.

FIGURA 20: MAPA DE GEOLOGÍA REGIONAL



Leyenda

UNIDAD

, Laguna

Ki-ca, Formación Carhuaz

Ki-chi, Formación Chimú

Ki-oy, Formación Oyón

Ki-ph, Formación Pariahuanca

Ki-pt, Formación Pariatambo

Ki-s, Formación Santa

Ks-ce, Formación Celendín

Ks-j, Formación Jumasha

N-mgr, Monzogranito

P-rda, Riodacita

Q-gl, Depósito glaciar

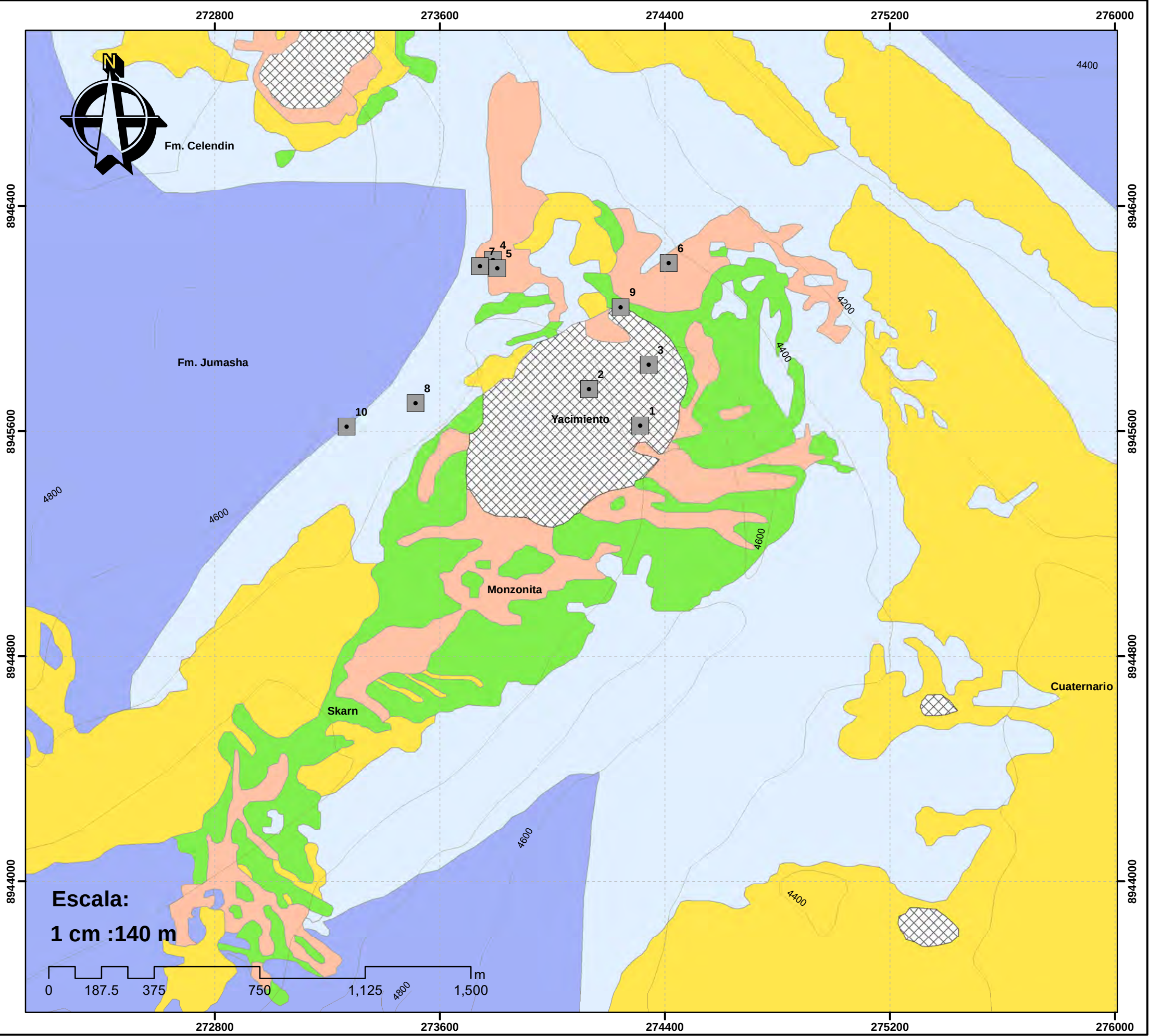
Qh-al, Depósito aluvial

Eventos geodinámicos externos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TESIS: Determinación de umbrales de alarma de eventos geotécnicos según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025			
	Plano: Mapa de Geología Regional	Ubicación: Región: Ancash Provincia: Huari	N° de Plano: P-02
	Escala: Las indicadas	Elaborado por: BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI	
	Fecha: Mayo de 2025		

Nota. adaptado de GEOCATMIN, 2025.

FIGURA 21: MAPA DE GEOLOGÍA LOCAL



Leyenda

geologia

Cuaternario

Fm. Celendin

Fm. Jumasha

Monzonita

Skarn

Yacimiento

Eventos geodinámicos externos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TESIS: Determinación de umbrales de alarma de eventos geotécnicos según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025			
	Plano: Mapa de Geología Local	Ubicación: Región: Ancash Provincia: Huari	N° de Plano: P-03
	Escala: Las indicadas	Elaborado por: BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI	
	Fecha: Mayo de 2025		

Nota. Adaptado en base a información brindada por la unidad minera, 2025.

5.1.2. Control Estructural:

La estructura tectónica dominante en el área corresponde a un sobrefallamiento regional de alto ángulo, con desplazamiento general de sur a norte. Esta estructura ha condicionado el desarrollo de plegamientos con ejes paralelos al rumbo predominante de la Cordillera.

Los pliegues asociados corresponden principalmente a pliegues de arrastre, manifestados como anticlinales y sinclinales de pequeña escala, los cuales han desempeñado un papel relevante en el control estructural y la distribución de la mineralización.

En un ámbito local tenemos presencia de fallas planares y fallas en cuña presentes en la mina.

La mayor parte de los desprendimientos ocurren en fallas en cuña y planares, a continuación, se muestra el mapeo en campo:

Falla Planar: Una falla planar es un tipo de mecanismo de inestabilidad que ocurre cuando un bloque de suelo o roca se desliza a lo largo de un plano casi plano, generalmente una discontinuidad natural como una fractura, estratificación, diaclasa o plano de falla.

- Este tipo de falla se presenta cuando el plano de discontinuidad:
- Tiene una inclinación hacia el exterior del talud,
- Presenta un buzamiento mayor que el ángulo de fricción del material,
- Es continuo y persistente,
- No está adecuadamente confinado lateralmente

Figura 22. Falla planar, ocurrencia de desprendimiento



Falla Cuña: Una falla planar es un tipo de inestabilidad que ocurre cuando un bloque de roca se desliza a lo largo de un solo plano de discontinuidad (como una diaclasa, estrato o falla) que está inclinada hacia el talud y tiene una orientación desfavorable.

- Este tipo de falla se presenta cuando:

- El plano de discontinuidad buzza en la misma dirección que el talud.
- El ángulo de buzamiento del plano es mayor que el ángulo de fricción del material.
- El plano de discontinuidad aflora en la cara del talud.
- Existe poco confinamiento lateral del bloque.

El movimiento ocurre principalmente por deslizamiento, controlado por la resistencia al corte del plano.

Figura 23. Falla en cuña, ocurrencia de desprendimiento

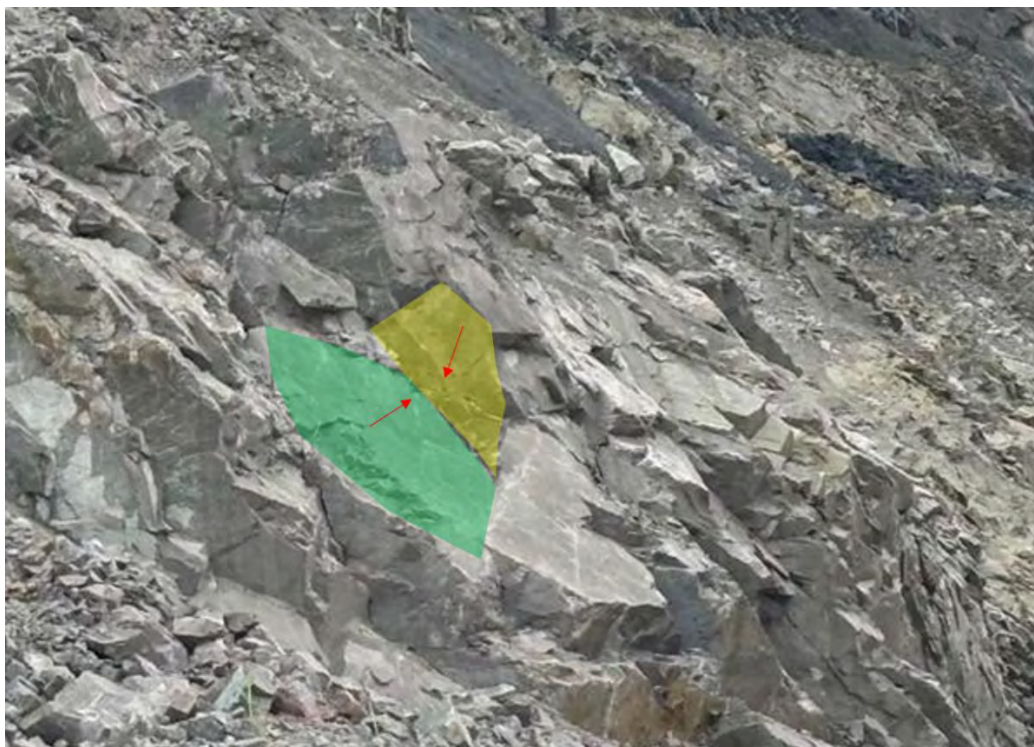
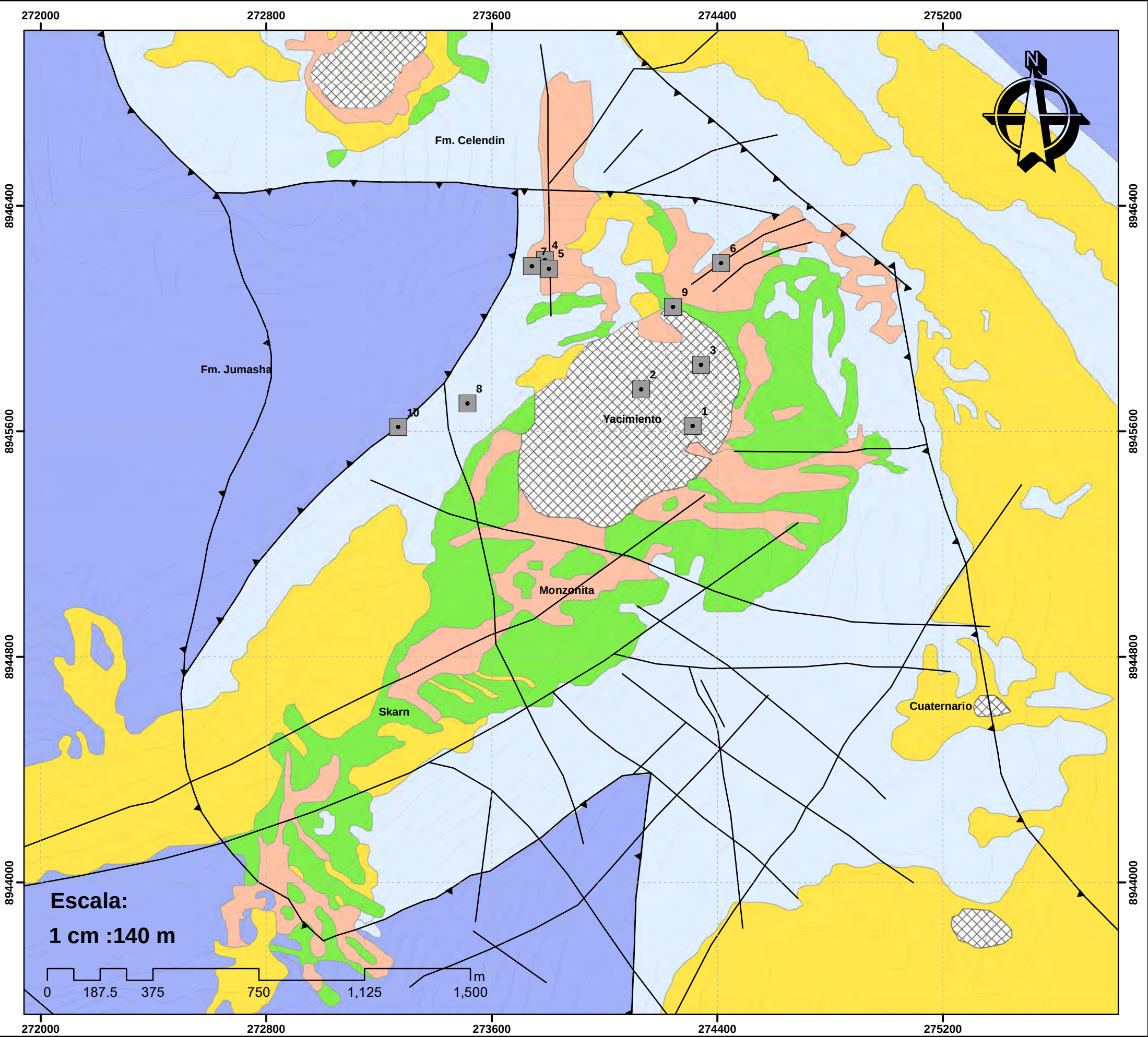


FIGURA 24. MAPA DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL



Leyenda

GEOLOGÍA

- Cuaternario
- Fm. Celendin
- Fm. Jumasha
- Monzonita
- Skarn
- Yacimiento
- Eventos geodinámicos externos

G. ESTRUCTURAL

- Falla Inversa
- Falla Observable

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS: Determinación de umbrales de alarma de eventos geotécnicos
según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025



Plano:
Mapa de Geología
Estructural

Escalas:
Las indicadas

Fecha:
Mayo de 2025

Ubicación:
Región: Ancash
Provincia: Huari

Elaborado por:
BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI

N° de Plano:
P-08

Nota: Adaptado a la información brindada por la unidad minera, 2025.

5.2. Respecto al objetivo específico 2

Se ha determinado el RMR y RQD que son parámetros fundamentales en geomecánica para caracterizar macizos rocosos en cada punto a evaluar y según su litología correspondiente, en general el macizo rocoso tiene las siguientes características:

Parámetro Rango típico Clasificación

RQD 60% – 90% De regular a muy buena

RMR 40 – 75 De regular a buena

Para la investigación se realizó un análisis más detallado de cada punto a evaluar obteniendo los valores mostrados en la siguiente tabla y el mapa geomecánico.

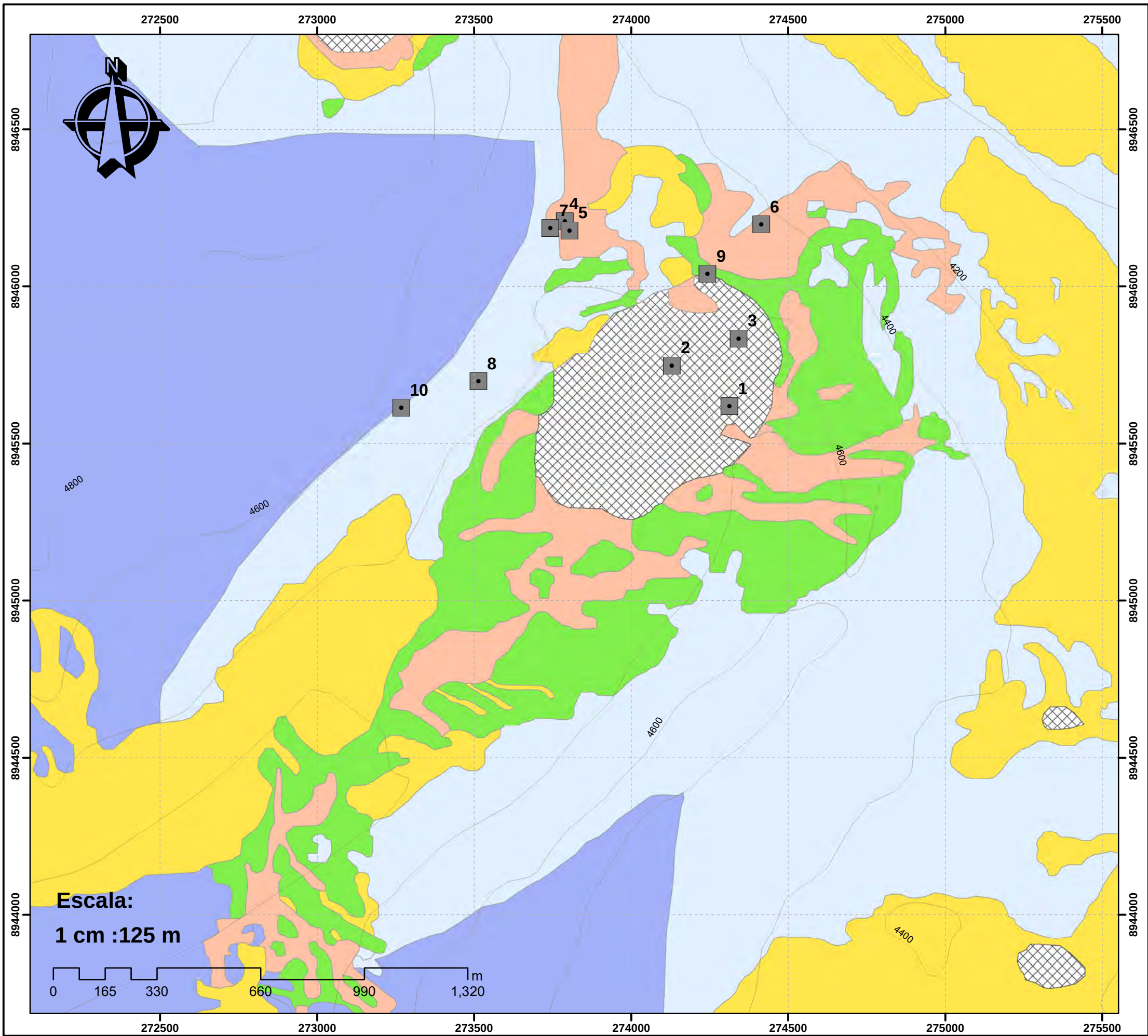
Tabla 8. Propiedades geomecánicas de cada evento.

PUNTO	JV	RMR	RQD
P1	10.838	57.153	79.58
P2	10.838	57.153	79.58
P3	10.838	57.153	79.58
P4	14.353	53.993	67.827
P5	14.353	53.993	67.827
P6	14.353	53.993	67.827
P7	11.177	54.678	78.41
P8	11.177	54.678	78.41
P9	16.386	50.943	61.047
P10	12.619	55.52	73.529

Nota: Data extraída en base a la información brindada por la unidad Minera, 2025.

De acuerdo con los resultados obtenido, se ha realizado un mapa que contiene las ISOLINEAS respecto al RMR, se observa que el evento 9, es el que presenta menor valor de RMR, lo que significa que tendría mayor susceptibilidad al colapso.

FIGURA 25. MAPA GEOMECAÁNICO



PUNTO	JV	RMR	RQD
P1	10.838	57.153	79.58
P2	10.838	57.153	79.58
P3	10.838	57.153	79.58
P4	14.353	53.993	67.827
P5	14.353	53.993	67.827
P6	14.353	53.993	67.827
P7	11.177	54.678	78.41
P8	11.177	54.678	78.41
P9	16.386	50.943	61.047
P10	12.619	55.52	73.529

Leyenda

Eventos geodinamicos externos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Plano:
Geomecánico

Escalas:
Las indicadas

Fecha:
Mayo de 2025

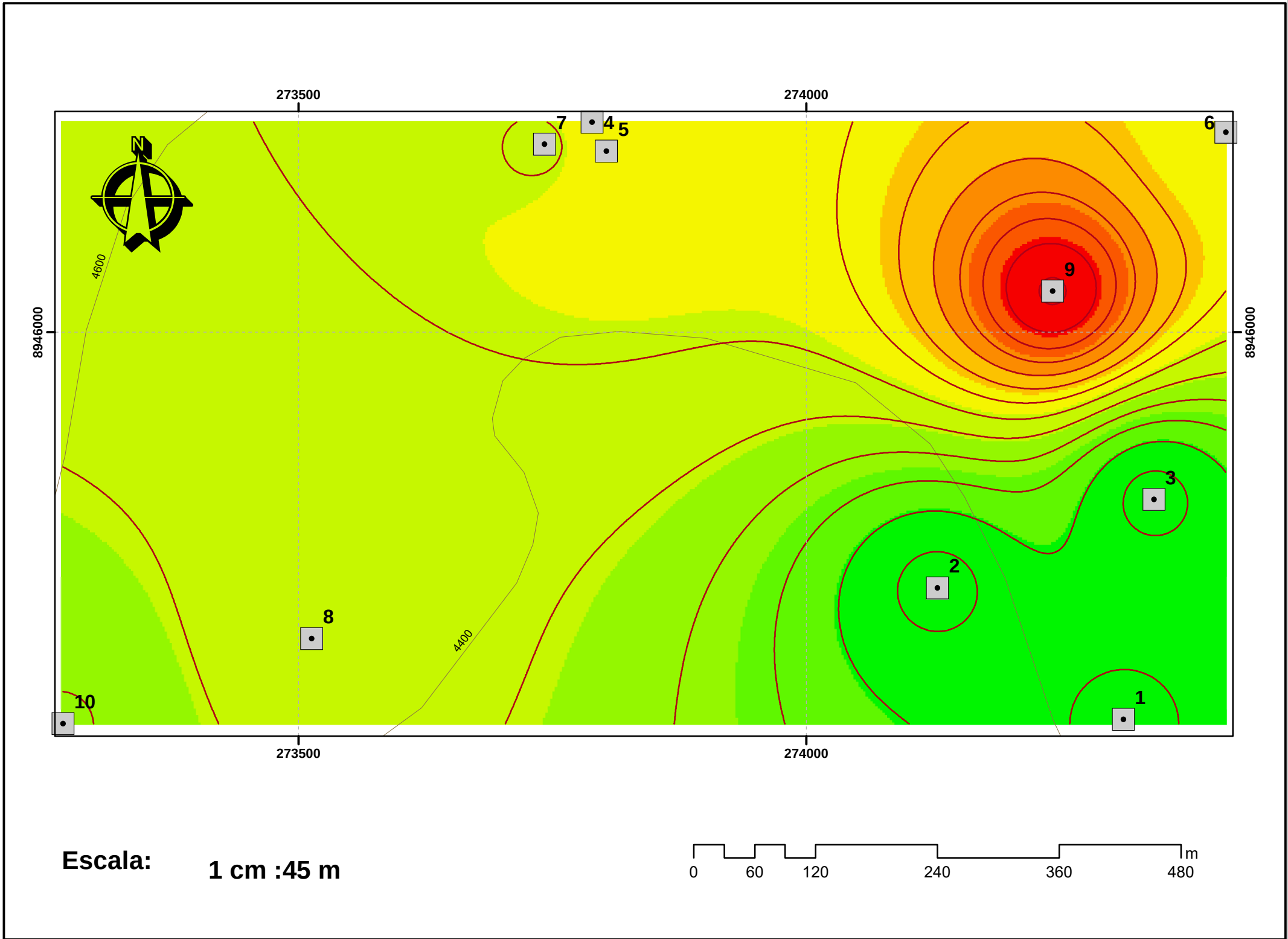
Ubicación:
Región: Ancash
Provincia: Huarí

Elaborado por:
BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI

N° de Plano:
P-05

Nota: Adaptado a la información brindada por la unidad minera, 2025.

FIGURA 26. MAPA DE ISOLÍNEAS



Nota: Adaptado a la información brindada por la unidad minera, 2025

Leyenda

Eventos geodinámicos externos

RMR

	50.9432106 - 51.63317744
	51.63317745 - 52.32314428
	52.32314429 - 53.01311111
	53.01311112 - 53.70307795
	53.70307796 - 54.39304479
	54.3930448 - 55.08301163
	55.08301164 - 55.77297846
	55.77297847 - 56.4629453
	56.46294531 - 57.15291214

PUNTO	JV	RMR	RQD
P1	10.838	57.153	79.58
P2	10.838	57.153	79.58
P3	10.838	57.153	79.58
P4	14.353	53.993	67.827
P5	14.353	53.993	67.827
P6	14.353	53.993	67.827
P7	11.177	54.678	78.41
P8	11.177	54.678	78.41
P9	16.386	50.943	61.047
P10	12.619	55.52	73.529

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TESIS: Determinación de umbrales de alarma de eventos geotécnicos según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, Huari, 2025			
	<u>Plano:</u> Mapa Geomecánico	<u>Ubicación:</u> Región: Ancash Provincia: Huari	<u>N° de Plano:</u> P-06
	<u>Escala:</u> Las indicadas		
	<u>Fecha:</u> Mayo de 2025	<u>Elaborado por:</u> BACH. CINTHYA HUAMAN AUCCACUSI	

5.3. Respecto al Objetivo Específico 03

Durante los 03 años de evaluación del 2023 al 2025 se han registrado mediante los Georadares 20 eventos (caída de roca y deslizamientos), ocurridos desde enero de 2023 hasta febrero de 2025, estos datos se resumen en la tabla 8.

Tabla 9. *Eventos geotécnicos de los últimos 03 años*

Nº	FECHA	EVENTO	DETALLES
1	13/10/2023 7:31	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
2	06/11/2023 10:47	Deslizamiento	Caída de material post voladura
3	22/11/2023 14:15	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
4	27/11/2023 14:36	Caída de rocas	No presento tendencia previa
5	10/12/2023 16:33	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
6	19/12/2023 7:25	Caída de rocas	No presento tendencia previa
7	26/12/2023 21:59	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
8	07/02/2024 15:49	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
9	15/04/2024 7:46	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
10	28/04/2024 21:15	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
11	02/06/2024 5:06	Deslizamiento	Caída de material post voladura
12	07/06/2024 15:14	Caída de rocas	No presento tendencia previa
13	11/06/2024 19:46	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
14	19/06/2024 4:27	Caída de rocas	No presento tendencia previa
15	14/09/2024 2:58	Deslizamiento	Caída de material post voladura
16	26/11/2024 11:43	Caída de rocas	No presento tendencia previa
17	13/01/2025 20:41	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
18	19/01/2025 18:26	Caída de rocas	No presento tendencia previa
19	03/02/2025 9:20	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento
20	10/02/2025 14:04	Deslizamiento	Deslizamiento que presenta una tendencia previa al evento

De estos datos se han excluido un total de 9 eventos por no presentar una tendencia en la deformación (caída de roca), o por haber un evento previo que haya tenido incidencia en la ocurrencia del evento geotécnico. Quedando los siguientes eventos para su análisis correspondiente:

Tabla 10. Eventos geotécnicos a analizar

Nº	FECHA	EVENTO	DETALLES	UTMX	UTMY	Z
1	13/10/2023 7:31	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274300.2	8945600.3	4710
2	22/11/2023 14:15	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274000.6	8945700.8	4760
3	10/12/2023 16:33	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274350.9	8945800.5	4625
4	26/12/2023 21:59	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	273750.4	8946200.4	4530
5	07/02/2024 15:49	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	273780.7	8946170.9	4510
6	15/04/2024 7:46	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274420.6	8946170.1	4580
7	28/04/2024 21:15	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	273740.4	8946160.6	4615
8	11/06/2024 19:46	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	273500.1	8945720.7	4750
9	13/01/2025 20:41	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274210.9	8946100.5	4667
10	03/02/2025 9:20	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	274208.7	8945608.1	4609
11	10/02/2025 14:04	Deslizamiento	presenta una tendencia previa al evento	273207.4	8945610.3	4611

En la tabla 9 se detallan los 11 eventos ocurridos entre octubre de 2023 y febrero de 2025, detallando fecha, hora y la característica común de presentar "una tendencia previa al evento", lo que sugiere movimientos graduales o señales de alerta temprana antes de cada incidente, sin patrones estacionales claros, pero con mayor frecuencia en diciembre de 2023 y febrero de 2025.

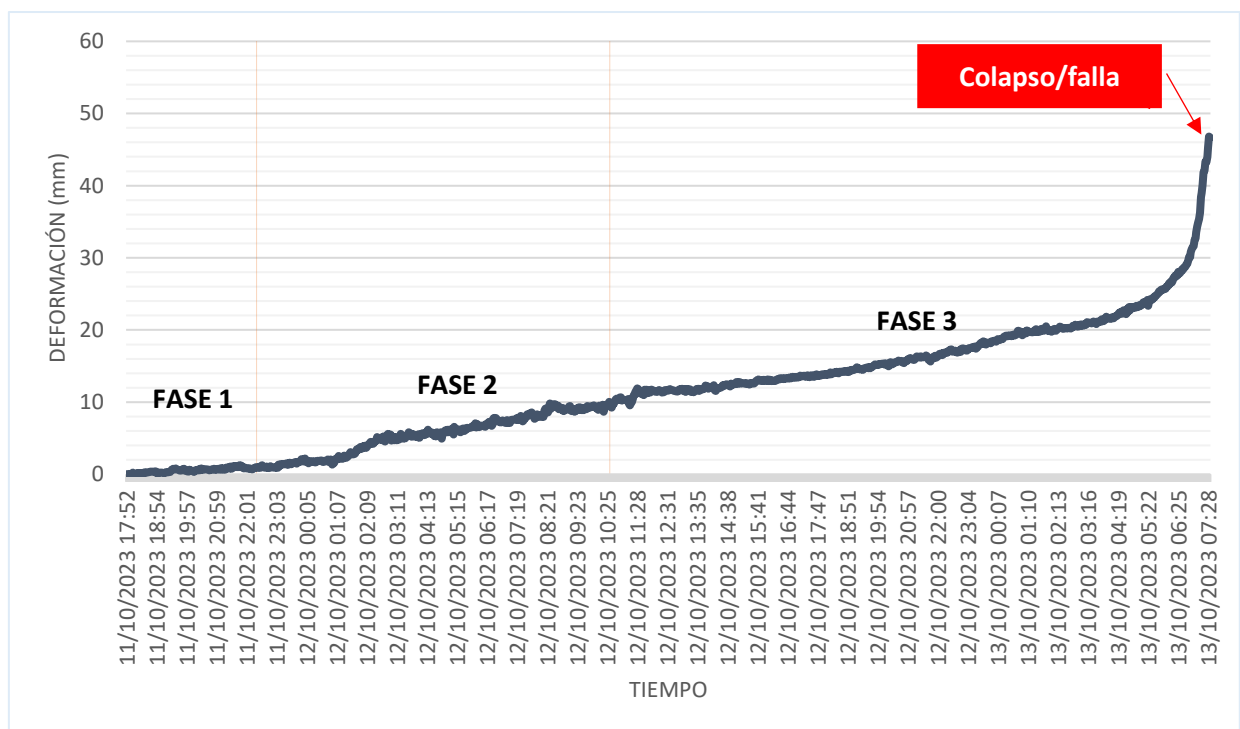
De esta manera, de los 11 eventos analizados se ha identificado las siguientes tendencias de deformación:

- **Fase 1:** Fase inicial estable-Deformación baja

- **Fase 2:** Fase de desarrollo moderado-Deformación moderada
- **Fase 3:** Fase de aceleración abrupta-Deformación alta

5.3.1. Evento del 13 de octubre de 2023

Figura 27. Evento N°1, 13/10/2023 con su serie temporal de deformación



Descripción: En la figura 27 podemos observar el evento del 13/10/2023 y como este registró una deformación progresiva en el tiempo. La serie de datos muestra un comportamiento no lineal, con una deformación inicial constante, que presenta

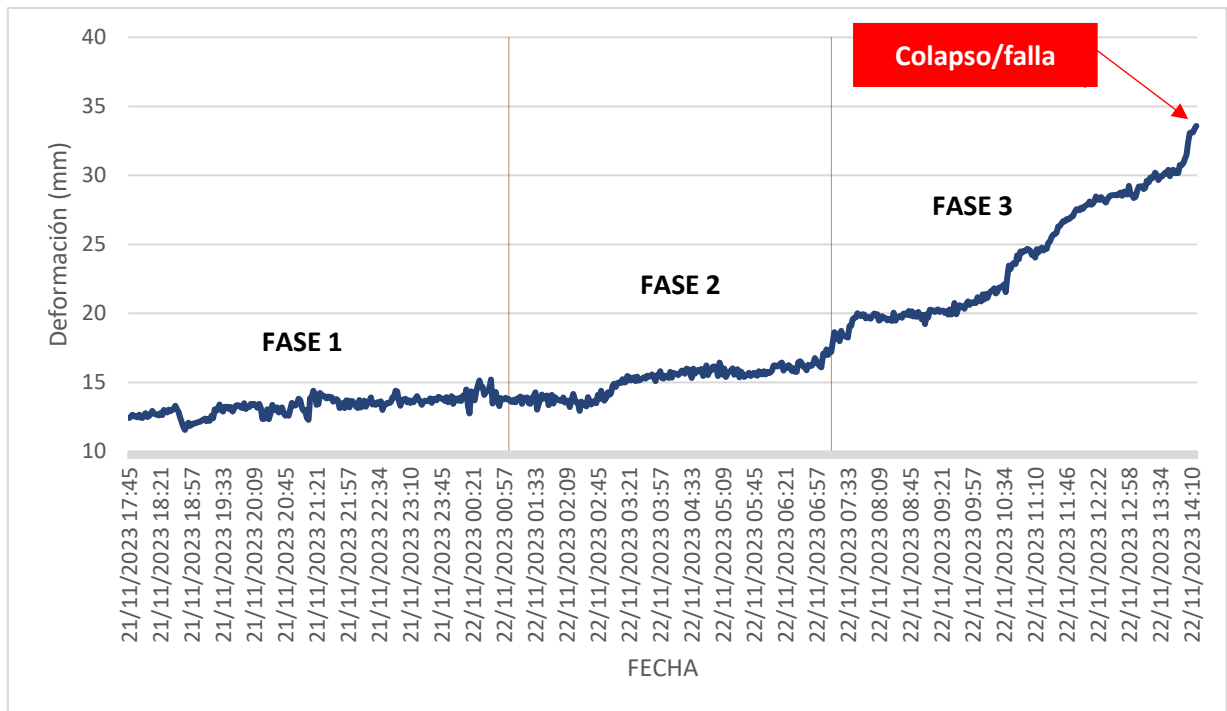
incrementos de 0 mm a 20 mm cada 2 segundos seguida de una aceleración abrupta de 20 a 48 mm, Esto sugiere que el deslizamiento pasó por:

1. Fase 1: Fase inicial estable (11/10/2023 17:52 - 11/10/2023 22:21): Durante esta etapa, el evento se mantiene en un estado de baja actividad o estado base. El valor permanece constante, fluctuando ligeramente alrededor de 0, lo que indica un período de calma o normalidad.
2. Fase 2: Fase de desarrollo moderado (11/10/2023 22:21 - 12/10/2023 10:31): En esta etapa, el valor continúa su ascenso de forma más pronunciada, aunque aún controlada, pasando de 10 a 20 mm. Se observa una tendencia clara al alza, sugiriendo que la actividad del evento está aumentando de manera sostenida.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (12/10/2023 10:31 – 13/10/2023 07:31): A partir de la madrugada del 13 de octubre, la magnitud del evento se intensifica rápidamente. La curva asciende de forma muy pronunciada, pasando de 20 a casi 50 mm en las últimas horas del período observado. Esta aceleración repentina podría indicar un punto de ruptura o el inicio de la fase más crítica del evento, que aún se está desarrollando al final de la observación.

5.3.2. Evento del 22 de noviembre de 2023

Figura 28. Evento N°2: Evento 22/11/2023 con su serie temporal de deformación





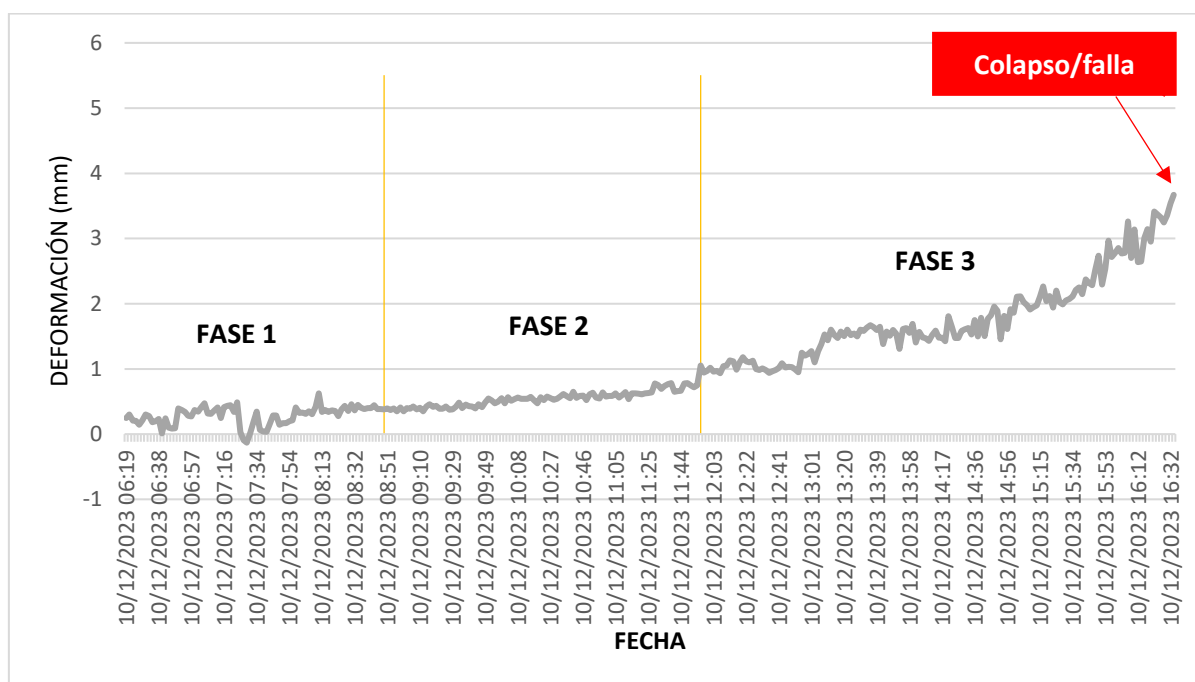
Descripción: En la figura 28 del evento del 22/11/2023 y cómo este registró una variación progresiva a lo largo del tiempo. La serie de datos muestra un comportamiento no lineal, con un valor inicial constante que fluctúa entre 10 y 15 mm durante un largo período, seguido de una aceleración abrupta. Esto sugiere que el evento pasó por las siguientes fases:

1. Fase 1: Fase inicial estable (21/11/2023 17:45 - 22/11/2023 01:03): Durante esta etapa, el evento se mantiene en un estado de baja actividad o estado base. Los valores se muestran constantes, fluctuando ligeramente, lo que indica un período de calma o normalidad.
2. Fase 2: Fase de desarrollo moderado (22/11/2023 01:03 - 22/11/2023 07:14): En esta fase, el valor comienza a aumentar de forma lenta pero constante, pasando de 15 a 20 mm. Esta podría ser una etapa precursora del evento principal, donde las condiciones comienzan a cambiar gradualmente.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (22/11/2023 07:14 - 22/11/2023 14:15): A partir de las 09:20, la magnitud del evento se intensifica rápidamente. El valor asciende de

20 a más de 30 mm en poco tiempo. Esta aceleración repentina podría indicar un punto de ruptura o el inicio de la fase más crítica del evento.

5.3.3. Evento del 10 de diciembre de 2023

Figura 29. Evento N°3: Evento 10/12/2023 con su serie temporal de deformación



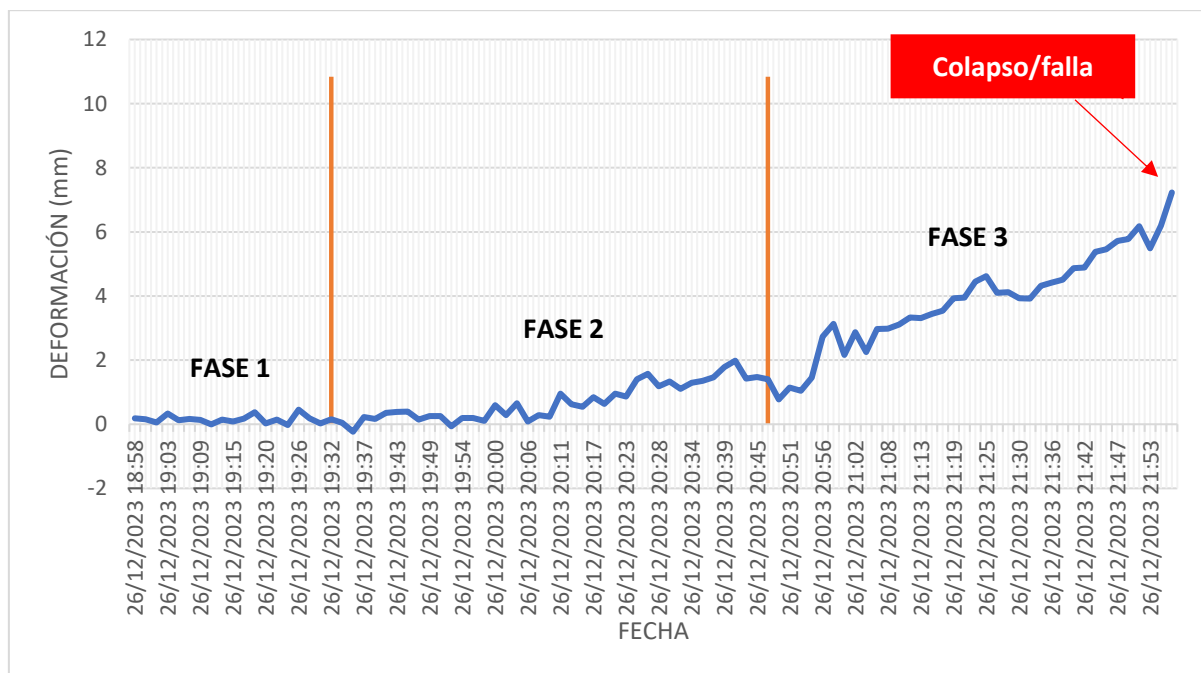
Descripción: En la figura 29, podemos observar el evento del 10/12/2023 y su variación progresiva en el tiempo. La serie de datos presenta un comportamiento no lineal, comenzando con un valor constante cercano a cero, seguido de varios aumentos graduales

que culminan en una aceleración pronunciada al final del período. Esto sugiere que el evento pasó por las siguientes fases:

1. Fase 1: Fase inicial estable (10/12/2023 06:19 - 10/12/2023 08:49): Durante esta etapa, el evento se mantiene en un estado de baja actividad o estado base. El valor fluctúa ligeramente alrededor de 0, lo que indica un período de relativa calma. La primera línea vertical naranja, alrededor de las 11:05, marca el final de esta fase y el inicio de un cambio.
2. Fase 2: Fase de desarrollo moderado (10/12/2023 08:49 - 10/12/2023 11:55): En esta fase, el valor comienza a aumentar de forma lenta pero constante, pasando de un valor cercano a 0 a aproximadamente 2 mm. Se observa una tendencia clara al alza, sugiriendo que la actividad del evento está aumentando de manera sostenida. La segunda línea vertical naranja, alrededor de las 13:58, marca un nuevo cambio en la tendencia.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (10/12/2023 11:55– 16:33): A partir de las 13:58, la magnitud del evento se intensifica rápidamente. La curva asciende de forma más pronunciada, pasando de 2 a más de 3.5 mm en las últimas horas del período observado. Aunque los picos de las 15:34 y 16:12 muestran cierta irregularidad, la tendencia general es de un crecimiento acelerado. Esta fase final podría indicar un punto de ruptura o el inicio de la fase más crítica del evento, que aún se está desarrollando al final de la observación.

5.3.4. Evento del 26 de diciembre de 2023

Figura 30. Evento N°4: Evento 26/12/2023 con su serie temporal de deformación



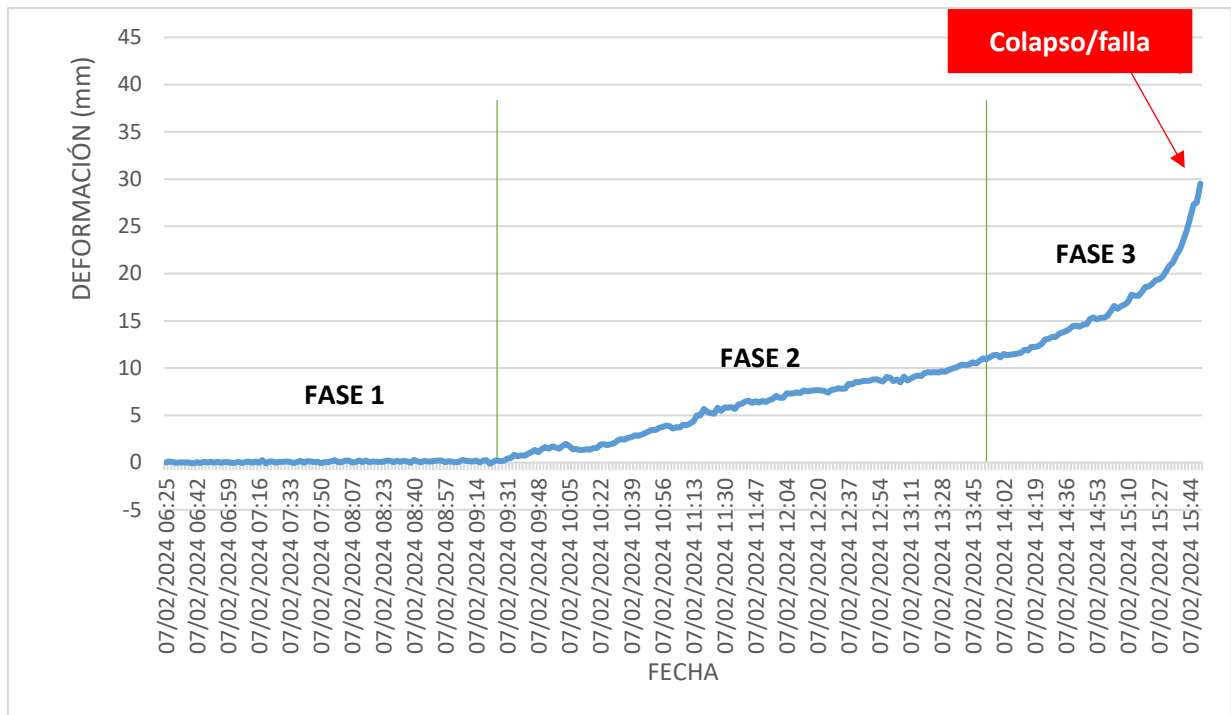
Descripción: En la figura 30, se observa el evento del 26/12/2023 y su evolución en el tiempo, con una serie de datos que muestra la deformación en milímetros a intervalos de 2 segundos. El comportamiento es no lineal, pasando por varias etapas.

1. Fase 1: Fase inicial estable (26/12/2023 18:58 - 19:32): Durante esta fase, la deformación se mantiene en un estado constante y cercano a los 0 mm. El sistema presenta un estado de reposo o deformación base, lo que sugiere una estabilidad inicial. La primera línea vertical naranja marca el final de esta fase.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (26/12/2023 19:32 - 20:47): A partir de las 19:54, la deformación comienza a aumentar de manera lenta y constante, pasando de 0 mm a casi 4 mm. Este incremento gradual indica una fase de precursora o de desarrollo del evento, donde las tensiones o las deformaciones comienzan a acumularse.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (26/12/2023 20:47 - 21:57): A partir de las 21:25, la deformación entra en una fase de aceleración rápida y pronunciada. El valor se eleva de 4 mm a casi 7 mm. Esta aceleración repentina podría ser un indicador de un punto crítico o de una falla inminente, con la deformación aumentando de manera exponencial al final del registro. La segunda línea vertical naranja señala el inicio de esta fase crítica.

5.3.5. Evento del 07 de febrero de 2024

Figura 31. Evento N°5: Evento 07/02/2024 con su serie temporal de deformación



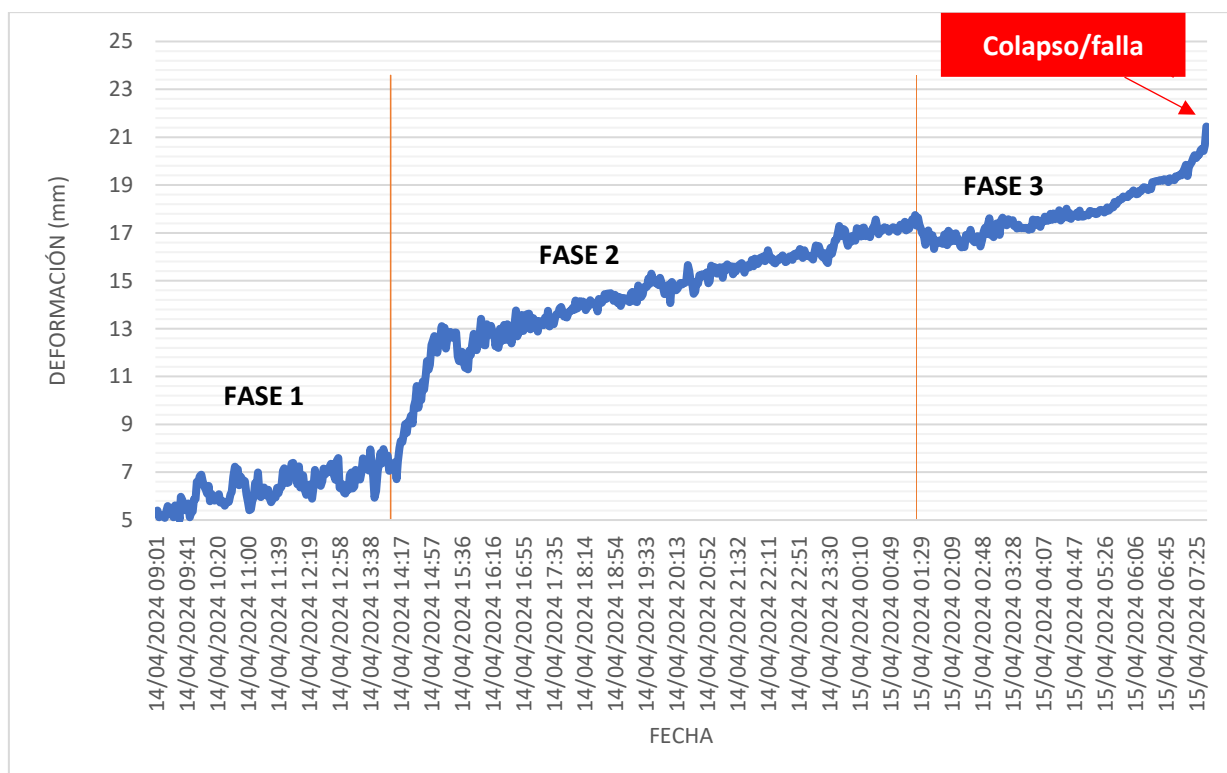


Descripción: En la figura 31 se presenta el evento del 07/02/2024, mostrando la deformación en milímetros (mm) a lo largo del tiempo, el evento también se desarrolla en tres fases principales.

1. Fase de estabilidad (07/02/2024 06:25 - 07/02/2024 09:26): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando alrededor de 0 mm. Esto indica un estado de deformación base o reposo.
2. Fase de desarrollo gradual (07/02/2024 09:26 - 07/02/2024 13:53): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 0 mm a 12 mm. Este período de varias horas representa la fase precursora, donde las tensiones se acumulan gradualmente.
3. Fase de aceleración abrupta (07/02/2024 13:53 – 15:49): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 12 mm a casi 30 mm en el transcurso de dos horas. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y posiblemente ha entrado en un punto de falla.

5.3.6. Evento del 15 de abril de 2024

Figura 32. Evento N°6: Evento 15/04/2024 con su serie temporal de deformación



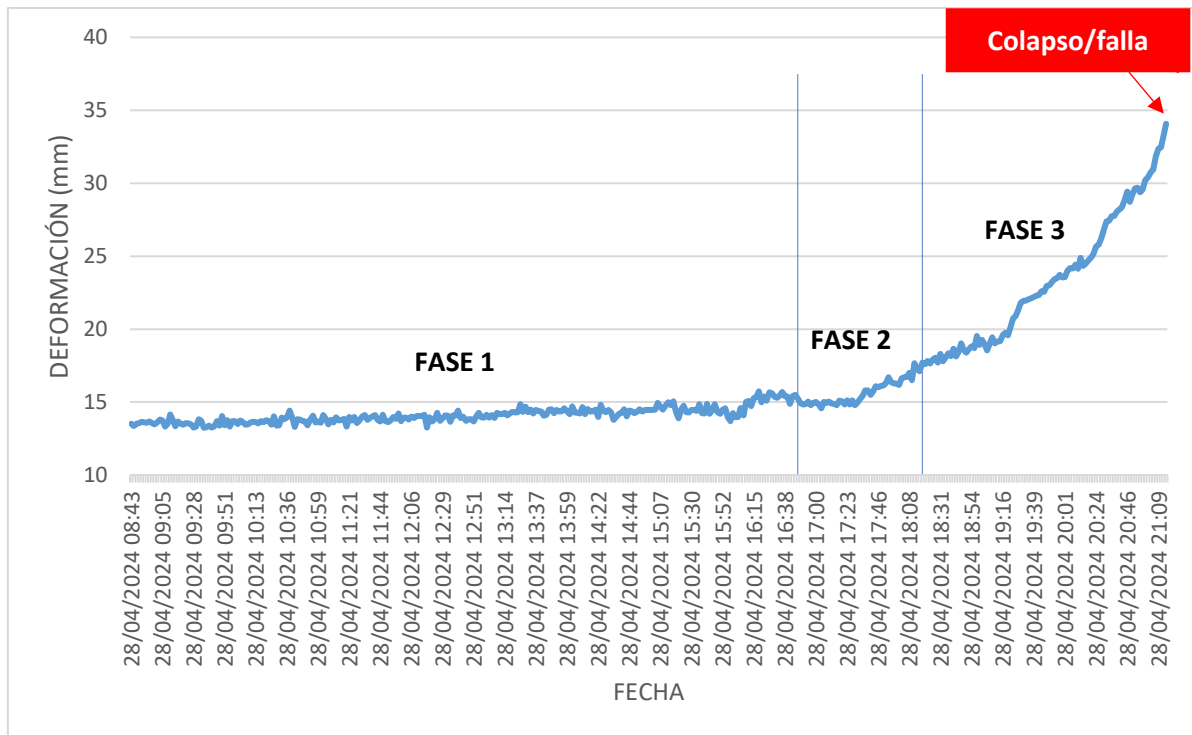
Descripción: En la figura 32 del evento del 15/04/2025, se muestra la deformación en milímetros a lo largo del tiempo, donde el comportamiento es no lineal y se puede dividir en tres fases principales.

1. Fase 1: Fase de estabilidad (14/04/2024 09:01 - 14/04/2024 14:04): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando entre 5 y 7 mm. Esto indica un estado de reposo o deformación base.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (14/04/2024 14:17 - 15/04/2024 01:23): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 7 mm a 18 mm. Esta fase representa un período precursor, donde las tensiones se acumulan de manera gradual.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (15/04/2024 01:23 – 15/04/2024 07:38): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 18 mm a más de 23 mm en un corto período de tiempo. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y potencialmente ha entrado en un punto de falla.

5.3.7. Evento de 28 de abril de 2024

Figura 33. Evento N°7: Evento 28/04/2024 con su serie temporal de deformación





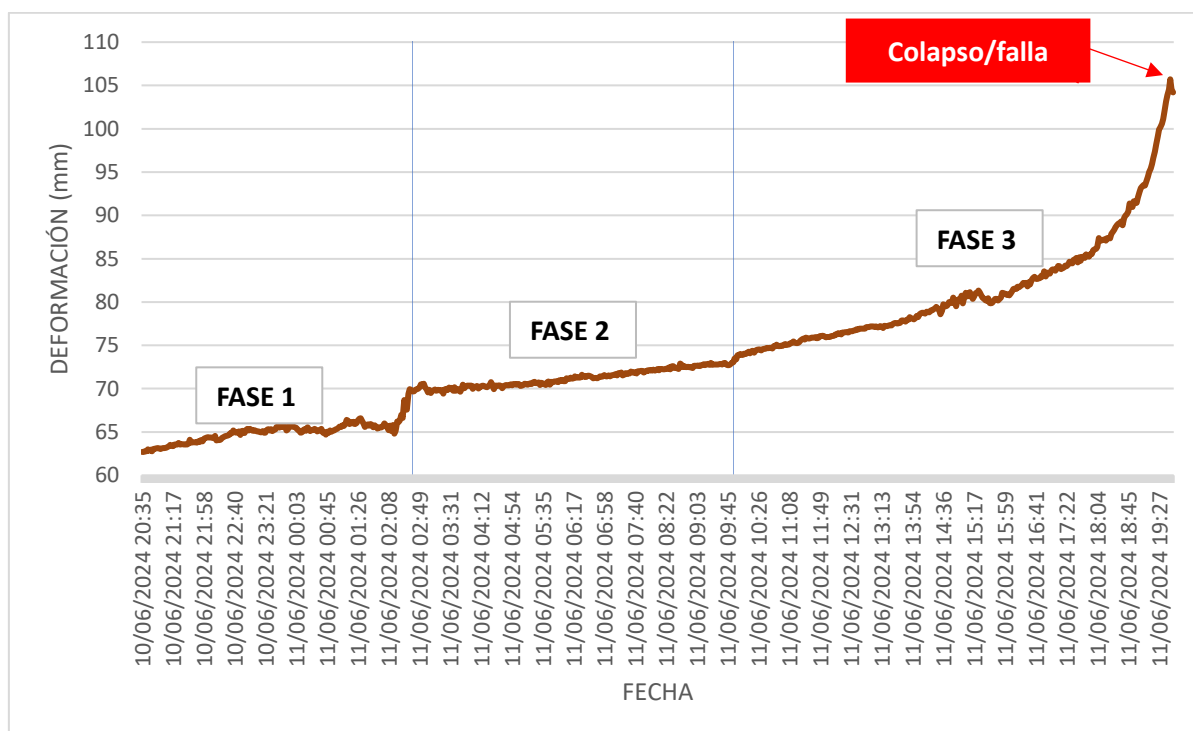
Descripción: En la figura 33 se muestra la deformación en milímetros a lo largo del tiempo del evento del 28/04/2024, el comportamiento es no lineal y se puede dividir en tres fases principales.

1. Fase1: Fase de estabilidad (28/04/2024 08:43 - 16:47): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando entre 14 y 15 mm. Esto indica un estado de reposo o deformación base que duró aproximadamente 9 horas. La primera línea vertical azul, alrededor de las 17:23, marca el final de esta fase.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (28/04/2024 16:47 - 18:18): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 15 mm a 20 mm. Esta fase representa un período precursor, donde las tensiones se acumulan de manera gradual.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (28/04/2024 18:18 – 21:15): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 20 mm a más de 30 mm. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y

potencialmente ha entrado en un punto de falla. La segunda línea vertical azul señala el inicio de esta fase crítica.

5.3.8. Evento del 11 de junio de 2024

Figura 34. Evento N°8: Evento 11/06/2024 con su serie temporal de deformación



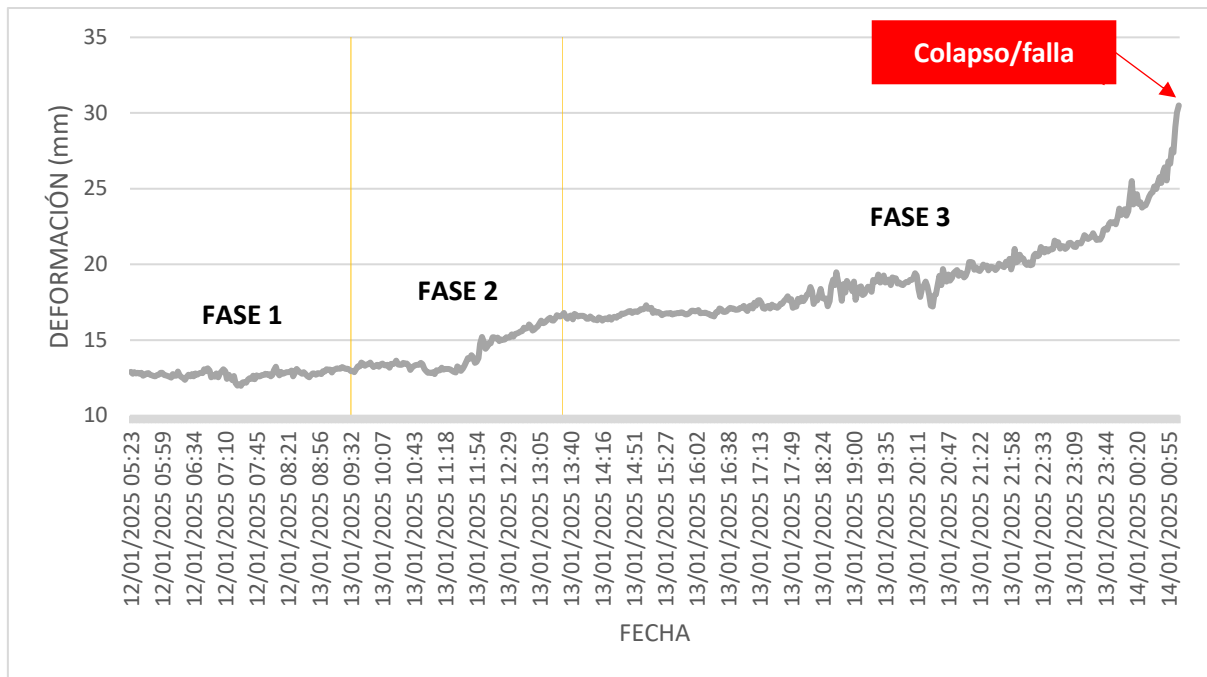
Descripción: En la figura 34 podemos observar que el evento se puede dividir en tres fases principales, que indican una progresión desde la estabilidad hasta una aceleración final.

1. Fase 1: Fase de estabilidad (10/06/2024 20:35 - 11/06/2024 02:40): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando alrededor de 60 mm. Esto indica un estado de deformación base o reposo, que duró aproximadamente 6 horas. La primera línea vertical azul señala el final de esta fase.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (11/06/2024 02:40 - 11/06/2024 09:52): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 60 mm a 80 mm. Este período de casi 12 horas representa la fase precursora, donde las tensiones se acumulan de manera gradual.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (11/06/2024 09:52 – 19:46): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 80 mm a más de 100 mm en el transcurso de unas 4 horas. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y posiblemente ha entrado en un punto de falla.

5.3.9. Evento del 13 de enero de 2025

Figura 35. Evento N°9: Evento 13/01/2025 con su serie temporal de deformación



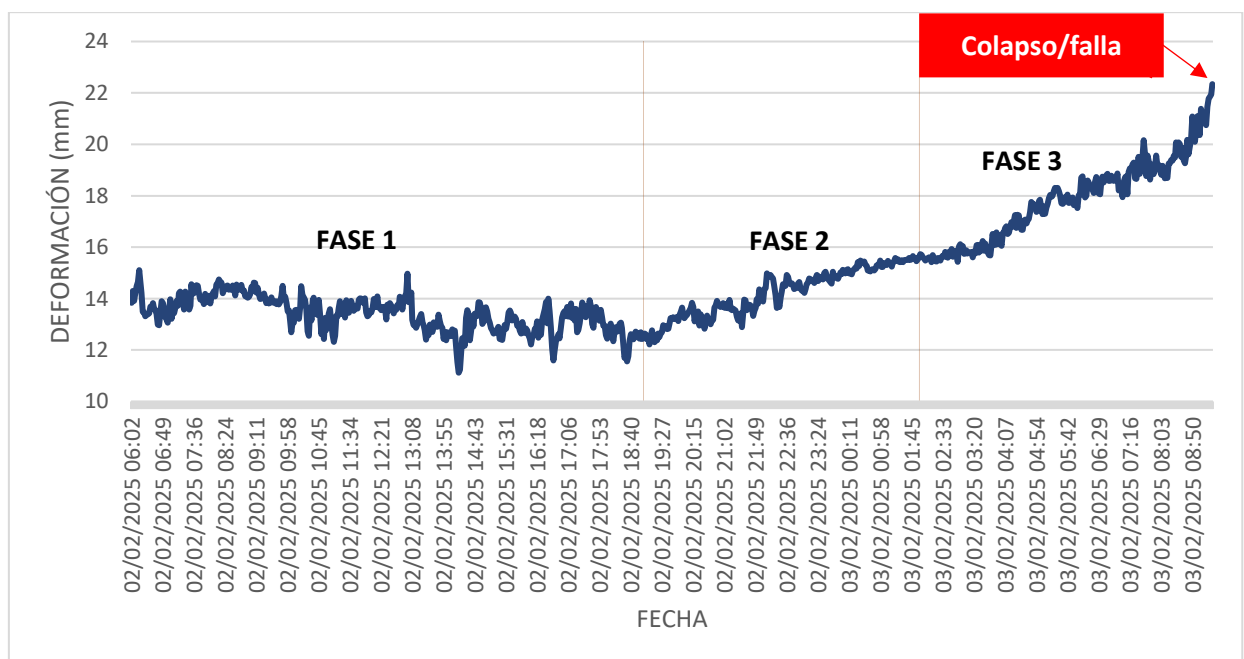


Descripción: La figura 35 presenta el evento del 13/01/2025, mostrando la deformación en milímetros (mm) a lo largo del tiempo, el evento se desarrolla en tres fases principales.

1. Fase 1: Fase de estabilidad (12/01/2025 05:23 - 13/01/2025 09:32): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando entre 12 y 13 mm. Esto indica un estado de deformación base o reposo que duró más de un día.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (13/01/2025 09:32 - 13/01/2025 13:31): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 13 mm a 18 mm. Este período de varias horas representa la fase precursora, donde las tensiones se acumulan gradualmente.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (13/01/2025 13:31 - 14/01/2025 01:07): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 18 mm a casi 20 mm en el transcurso de aproximadamente dos horas. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y posiblemente ha entrado en un punto de falla.

5.3.10. Evento del 03 de febrero de 2025

Figura 36. Evento N°10: evento 03/02/2025



Descripción: En la figura 36 se presenta el evento del 03/02/2025, mostrando la deformación en milímetros (mm) a lo largo del tiempo, el evento se desarrolla en tres fases principales.

1. Fase 1: Fase de estabilidad (02/02/2025 06:02 - 02/02/2025 18:59): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando entre 12 y 15 mm, con una ligera

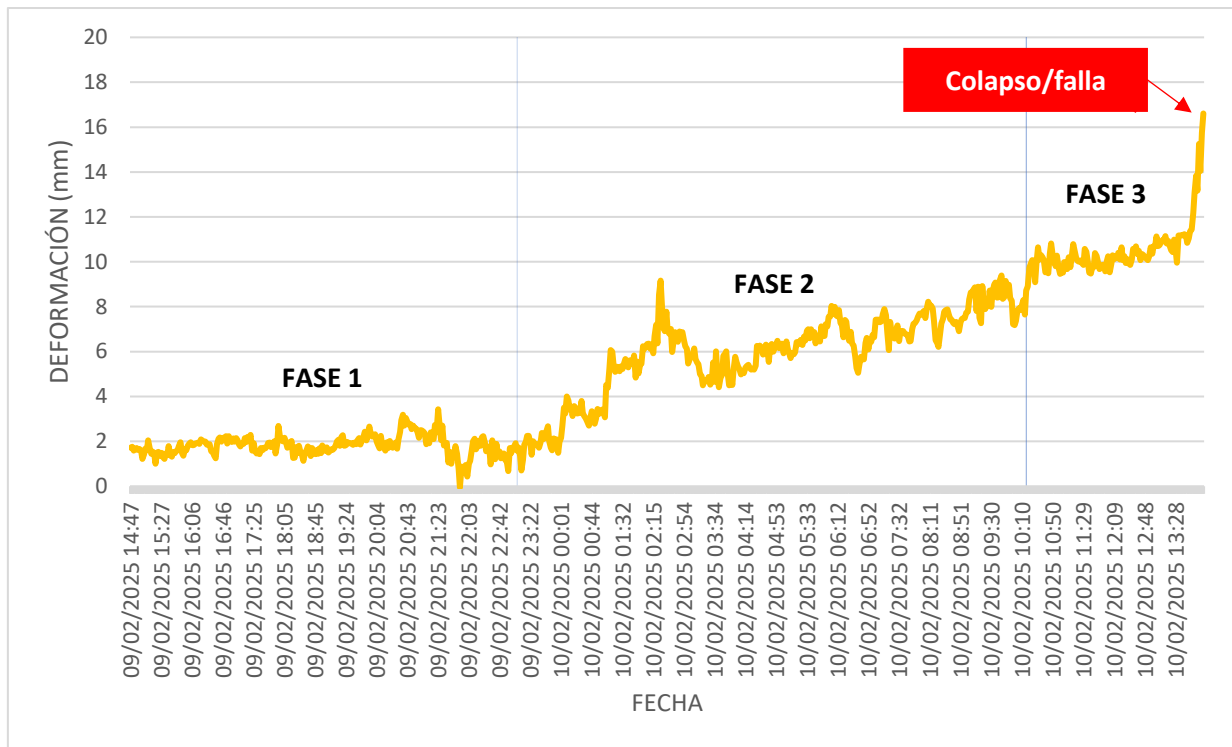
disminución. Esto indica un estado de deformación base o reposo que duró más de un día.

2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (02/02/2025 18:59 - 03/02/2025 01:57): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 12 mm a 16 mm. Este período de varias horas representa la fase precursora, donde las tensiones se acumulan gradualmente.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (03/02/2025 01:57 – 09:20): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 16 mm a casi 22 mm en el de 6 horas. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y posiblemente ha entrado en un punto de falla.

5.3.11. Evento del 10 de febrero de 2025

Figura 37. Evento N°11: evento 10/02/2025





Descripción: La figura 37 presenta el evento del 10/02/2025, mostrando la deformación en milímetros (mm) a lo largo del tiempo, este evento se desarrolla en tres fases principales.

1. Fase 1: Fase de estabilidad (09/02/2025 14:47 - 09/02/2025 23:05): La deformación se mantiene en un nivel constante, fluctuando alrededor de 2 a 3 mm. Esto indica un estado de deformación base o reposo que duró aproximadamente 9.5 horas.
2. Fase 2: Fase de desarrollo gradual (09/02/2025 23:05 - 10/02/2025 10:16): La deformación comienza a aumentar de forma lenta y progresiva, pasando de 3 mm a 10 mm. Este período de casi 13.5 horas representa la fase precursora, donde las tensiones se acumulan de manera gradual.
3. Fase 3: Fase de aceleración abrupta (10/02/2025 10:16 – 14:04): La deformación entra en una fase de aceleración rápida, aumentando de 10 mm a más de 15 mm en el transcurso de una hora. Este incremento repentino indica que el evento ha alcanzado una fase crítica y posiblemente ha entrado en un punto de falla.

5.4. Resultados respecto al objetivo específico 04

5.4.1. Sin Tendencia (Fase 1: Fase de estabilidad)

Figura 38. Evento 1, evento 13/10/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad)

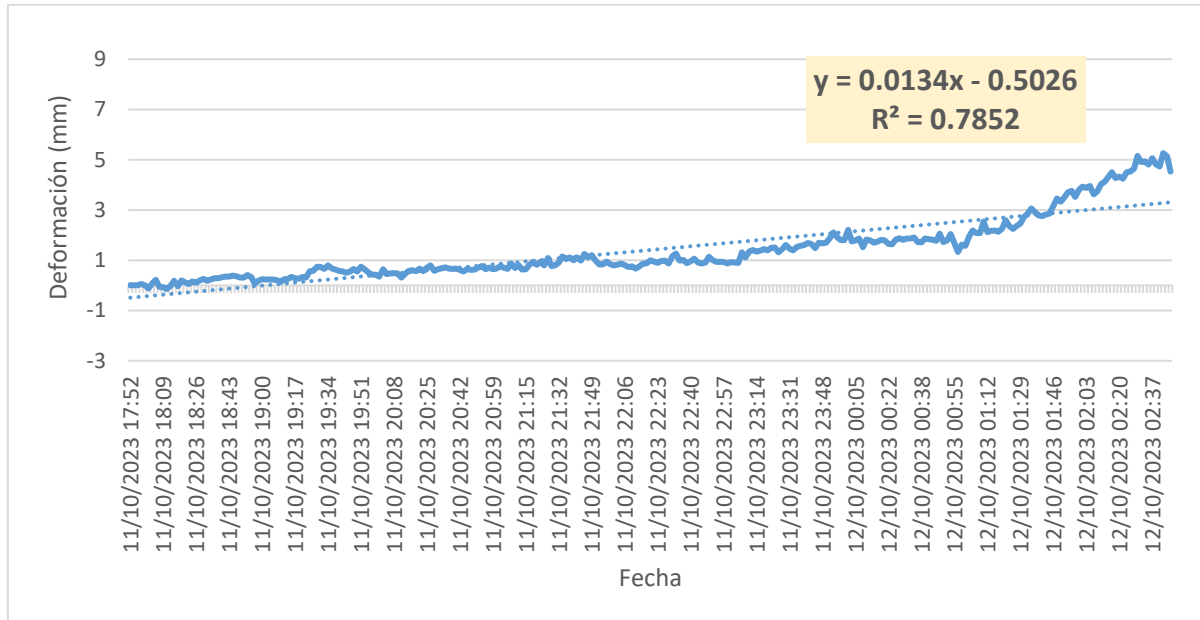


Figura 39. Evento 2: evento 22/11/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad)

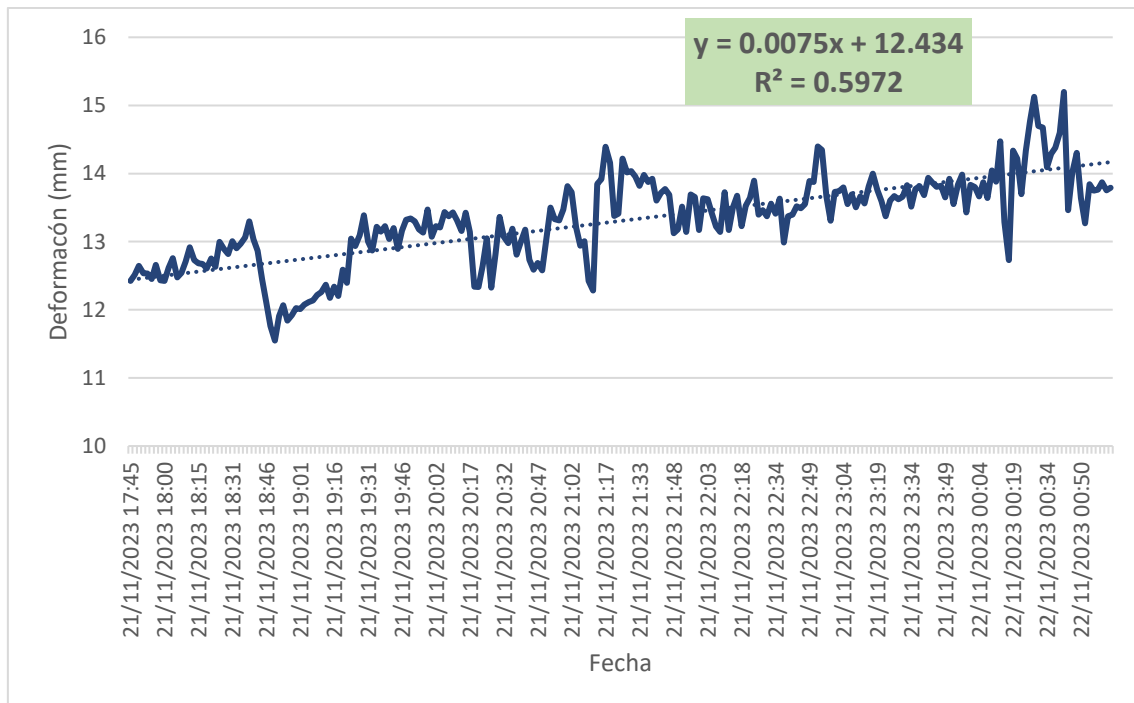


Figura 40. Evento 3: evento 10/12/202 (Fase 1: Fase de estabilidad)

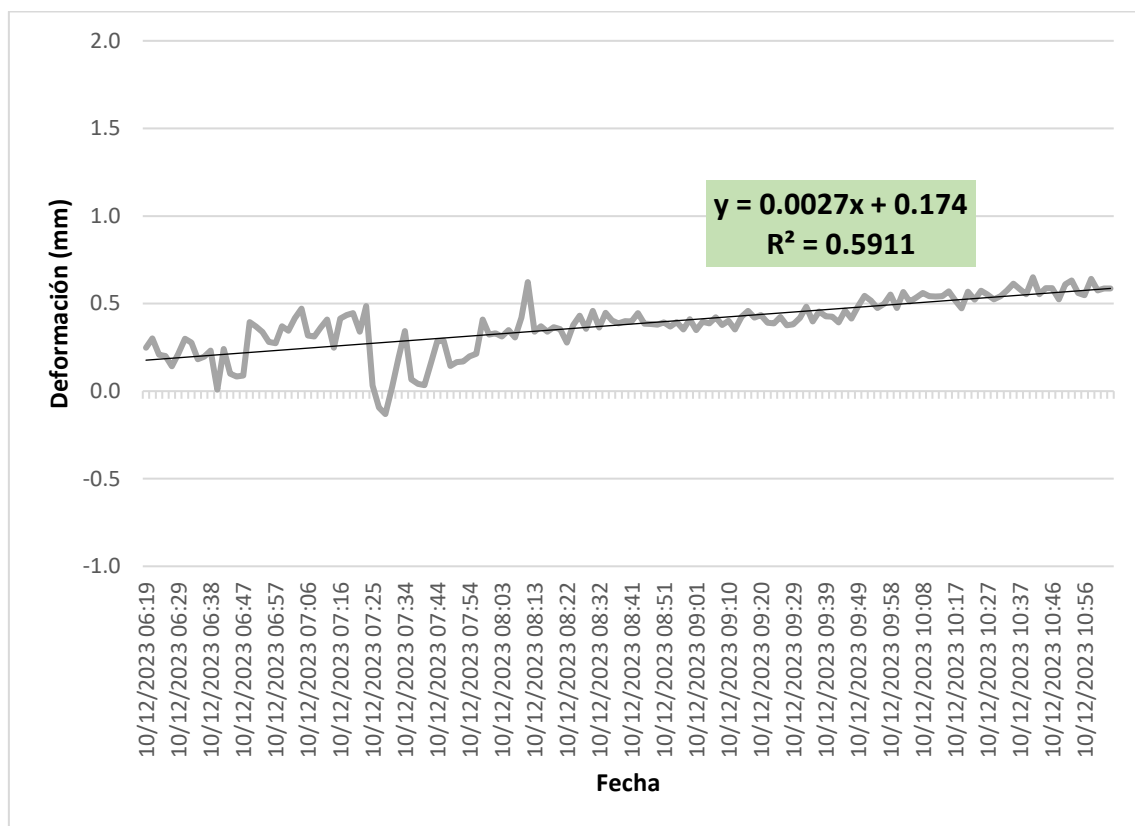


Figura 41. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 1: Fase de estabilidad)

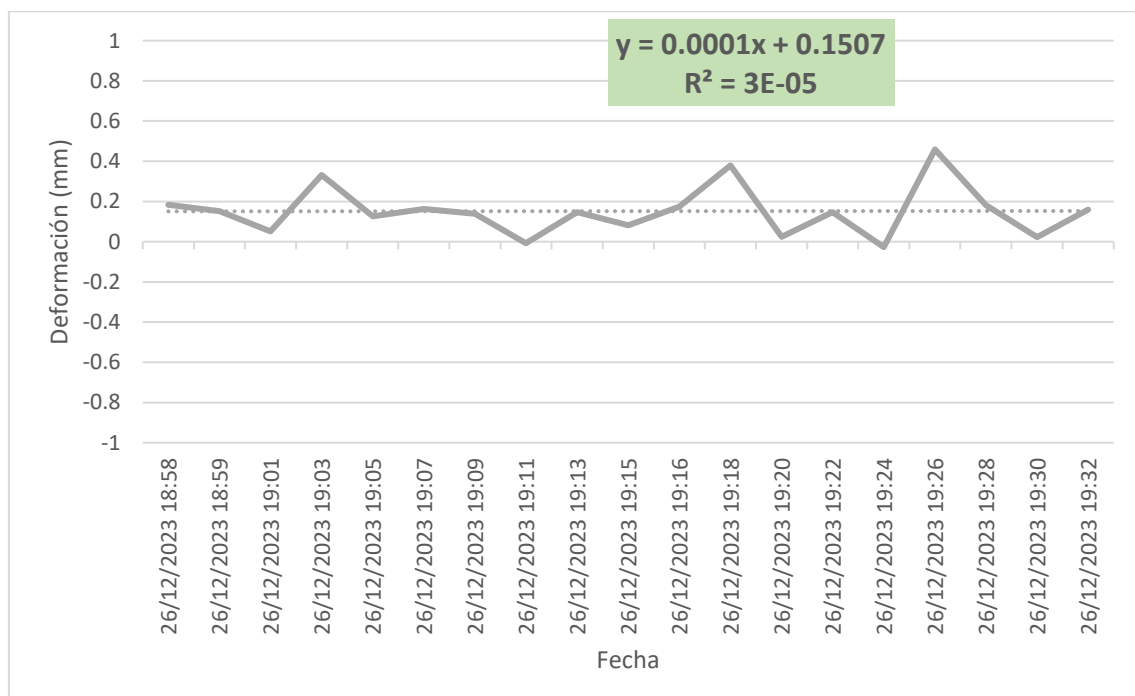


Figura 42. Evento 5: evento 15/04/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad)

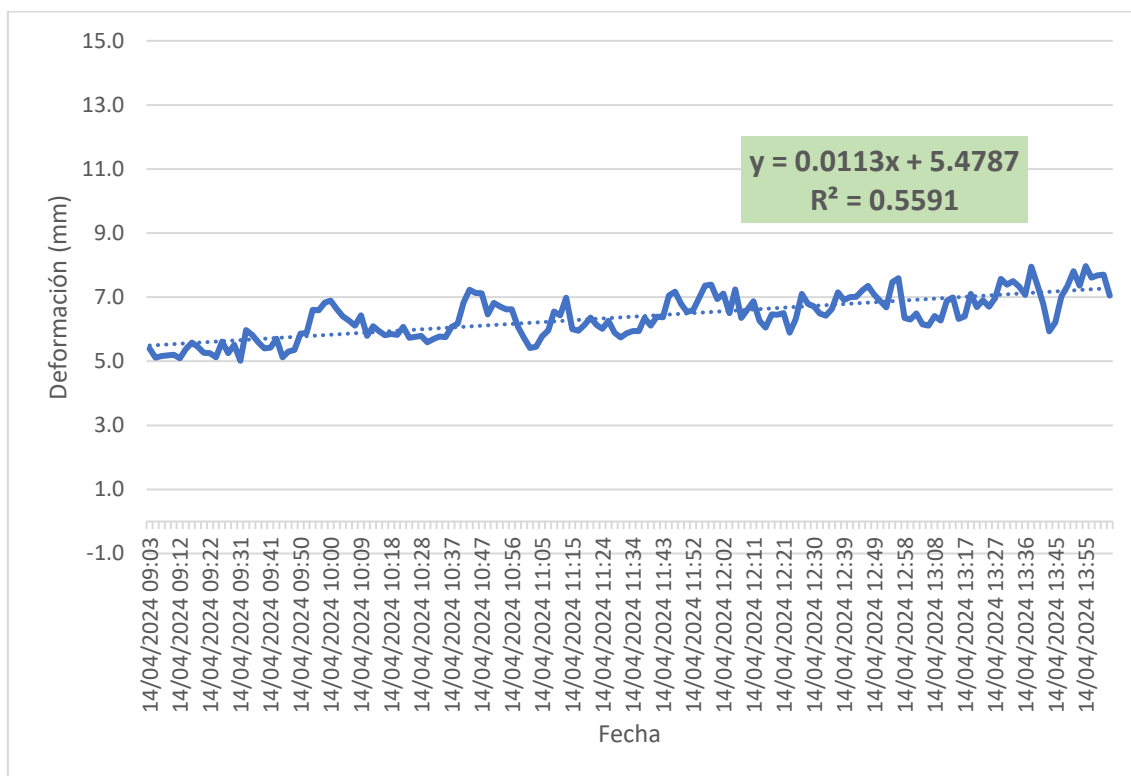


Figura 43. Evento 6: evento 28/04/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad)

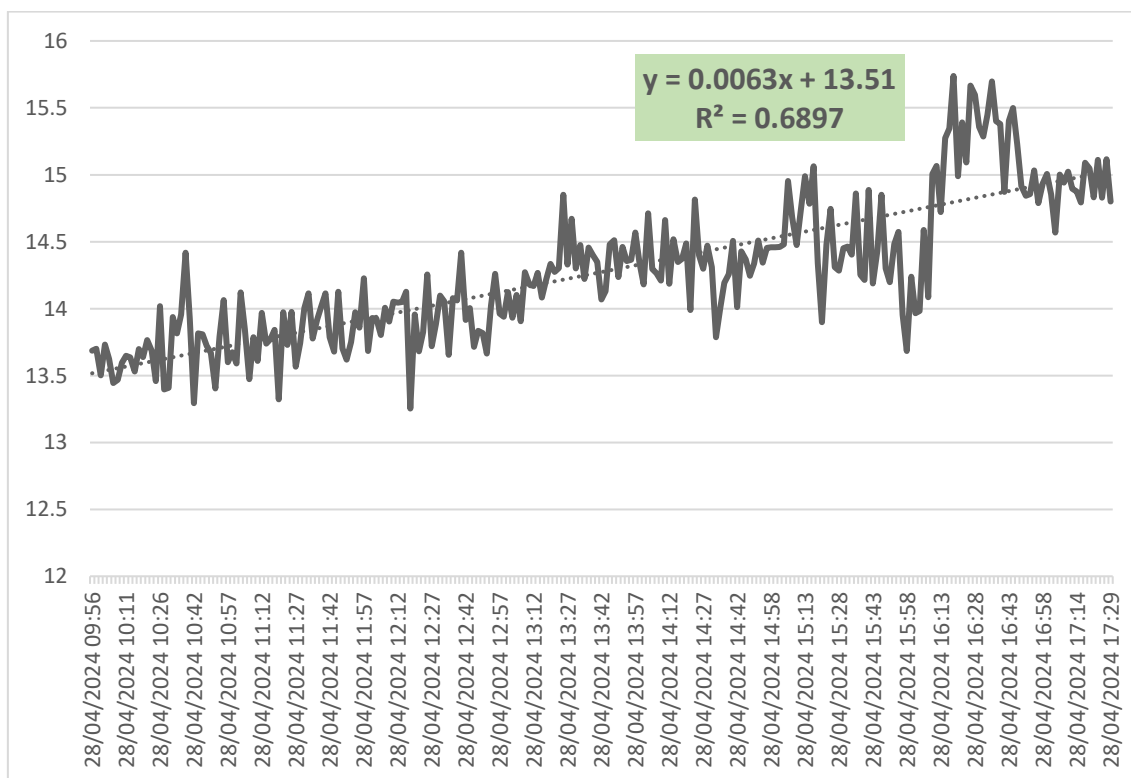


Figura 44. Evento 7: evento 11/06/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad)

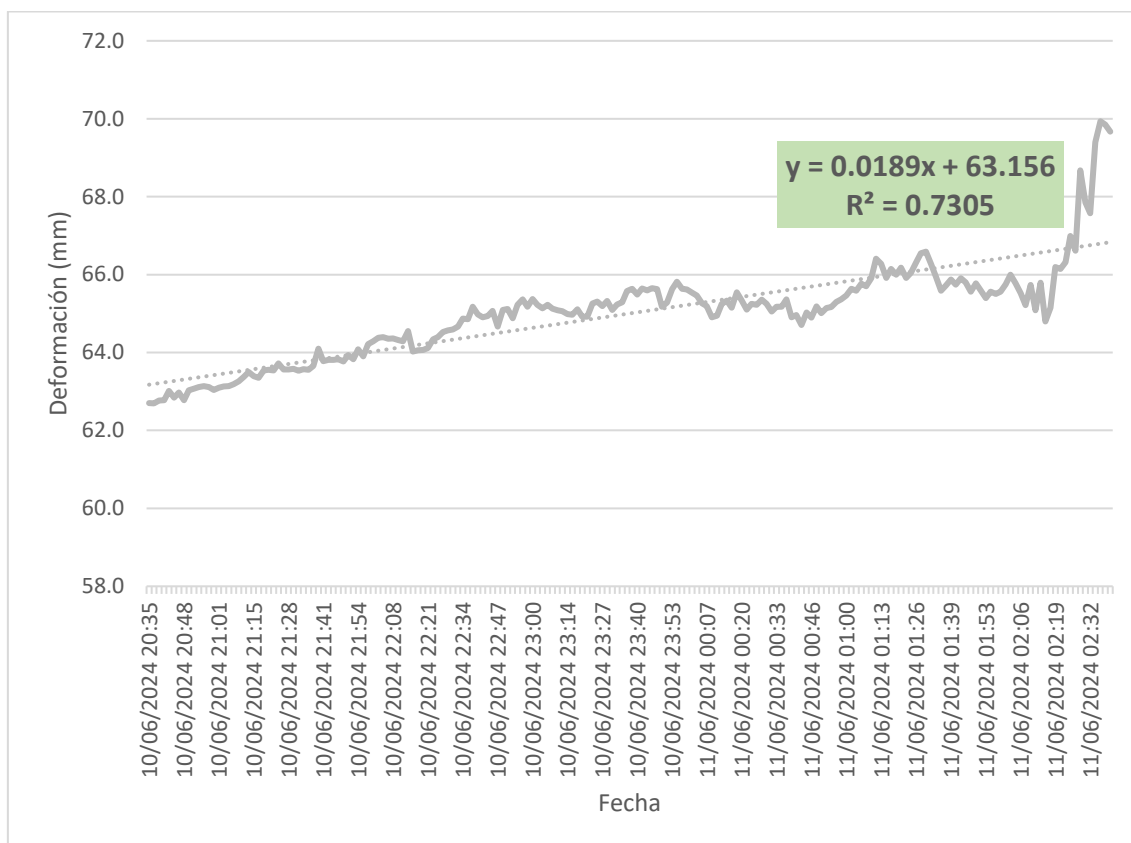


Figura 45. Evento 8: evento 13/01/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad)

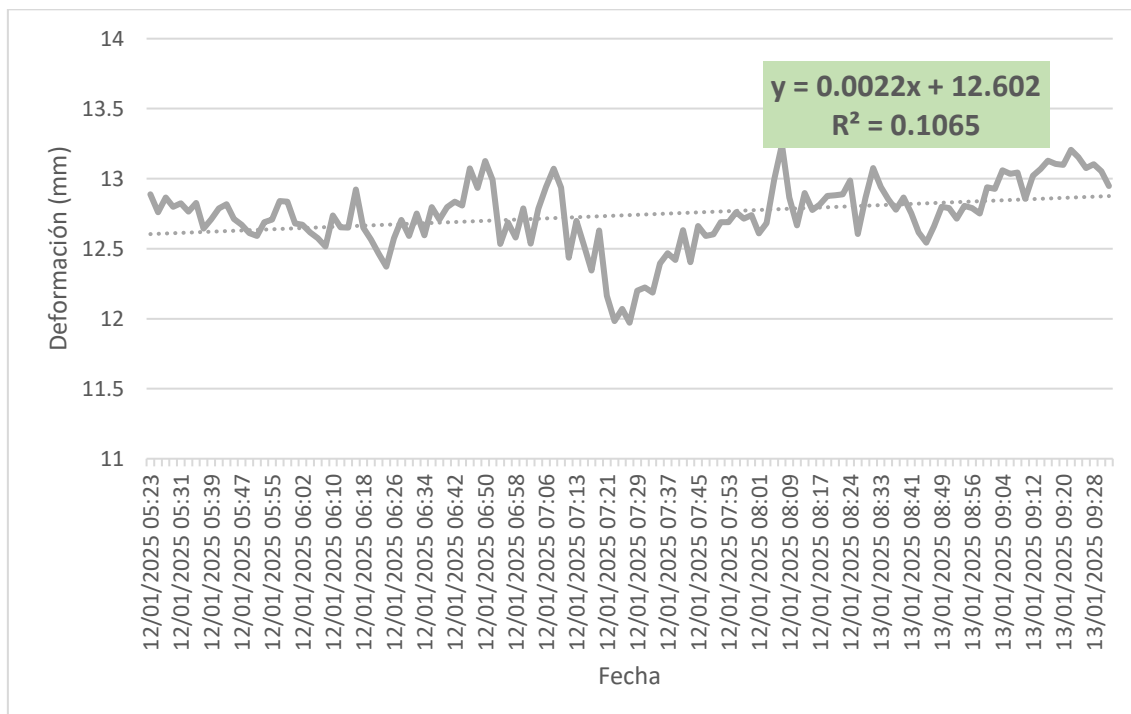


Figura 46. Evento 9: evento 03/02/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad)

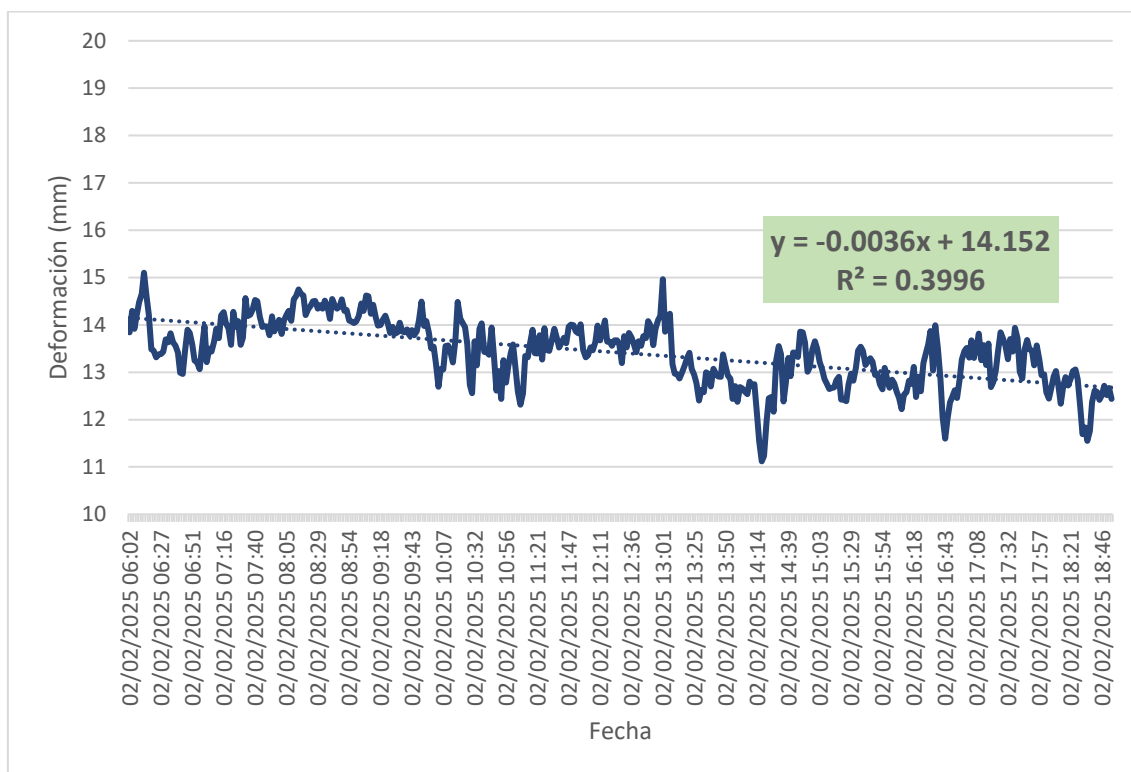


Figura 47. Evento 10: evento 07/02/2024 (Fase 1: Fase de estabilidad)

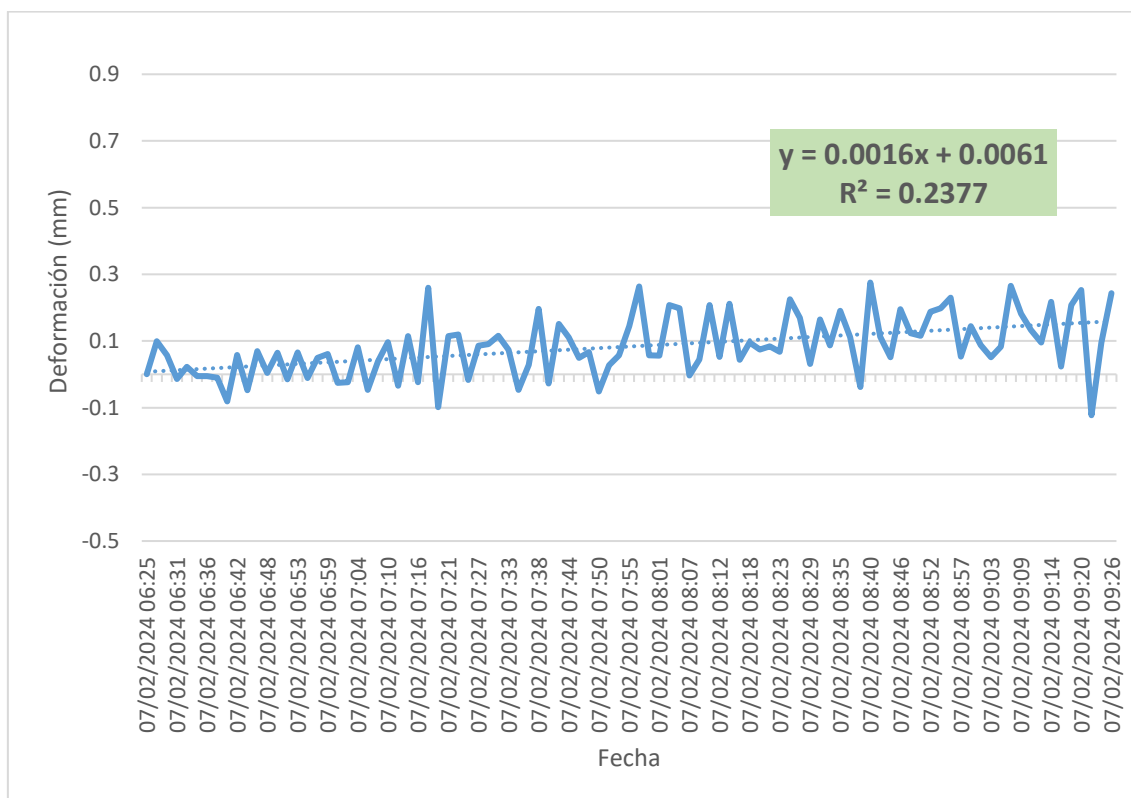
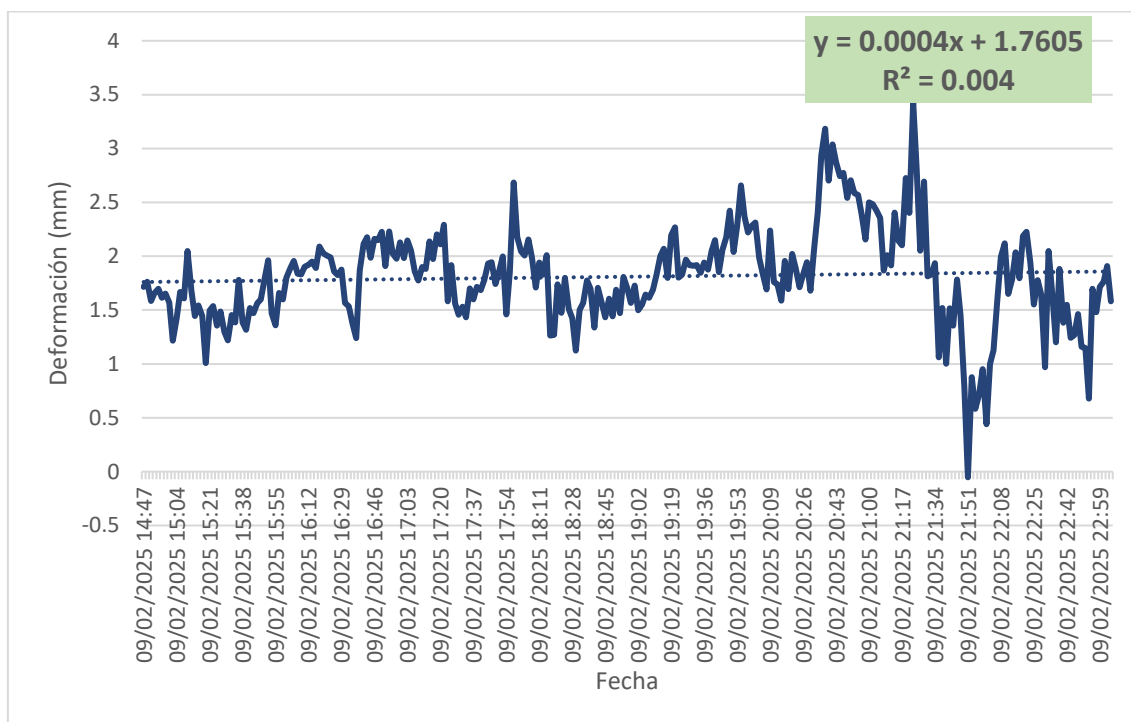


Figura 48. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 1: Fase de estabilidad)



Las ecuaciones y los valores de R^2 en los tramos evaluados sin tendencia se ha resumido en la tabla 10:

Tabla 11. Resumen de fase de eventos sin tendencia

SIN TENDENCIA Probabilidad de colapso bajo		
Evento	Ecuación	R2
1	$y = 0.0134x - 0.5026$	0.7852
2	$y = 0.0075x + 12.434$	0.5972
3	$y = 0.0027x + 0.174$	0.5911
4	$y = 0.0001x + 0.1507$	0.0003
5	$y = 0.0113x + 5.4787$	0.5591
6	$y = 0.0063x + 13.51$	0.6897
7	$y = 0.0189x + 63.156$	0.7305
8	$y = -0.0022x + 12.602$	0.1065
9	$y = -0.0036x + 14.152$	0.3996
10	$y = 0.0016x + 0.0061$	0.2377
11	$y = 0.0004x + 1.7605$	0.004

5.4.2. Tendencia Lineal (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

Figura 49. Evento 1: evento 13/10/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

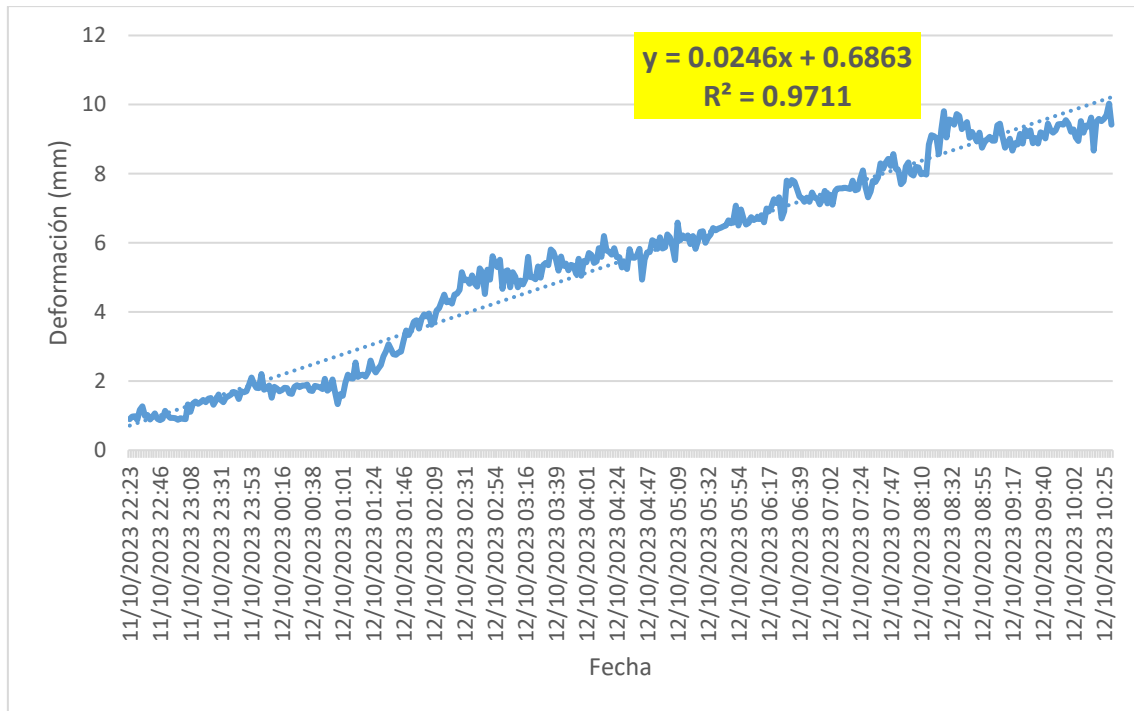


Figura 50. Evento 2: evento 22/11/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

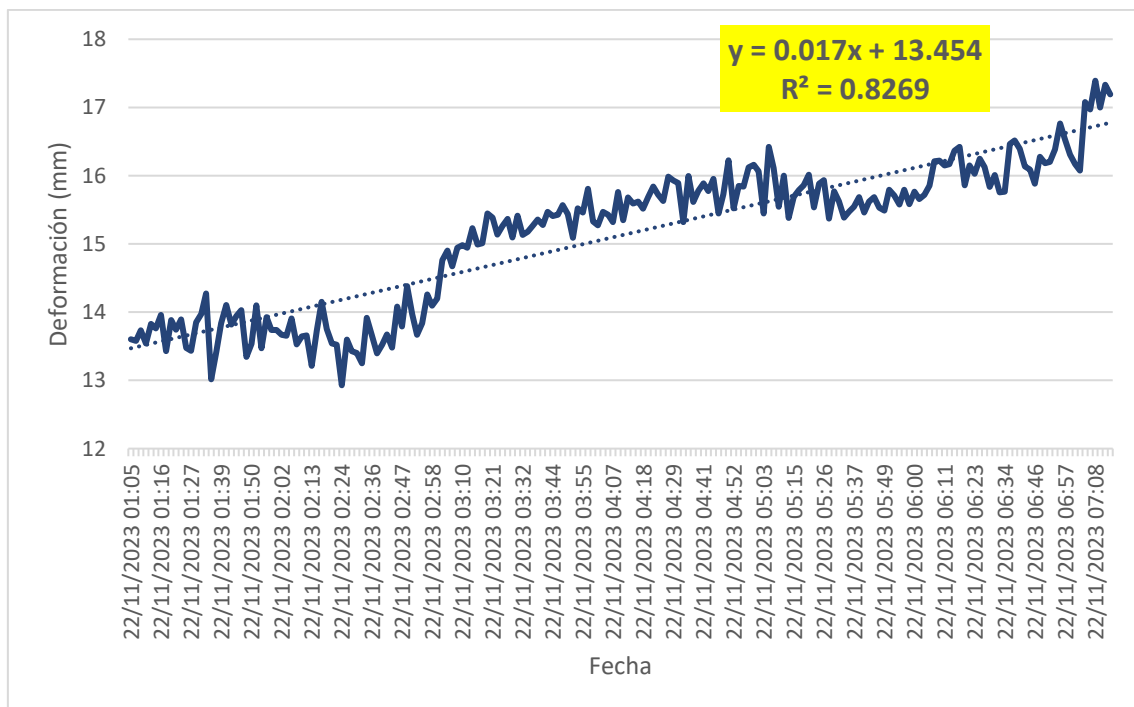


Figura 51. Evento 3: evento 10/12/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

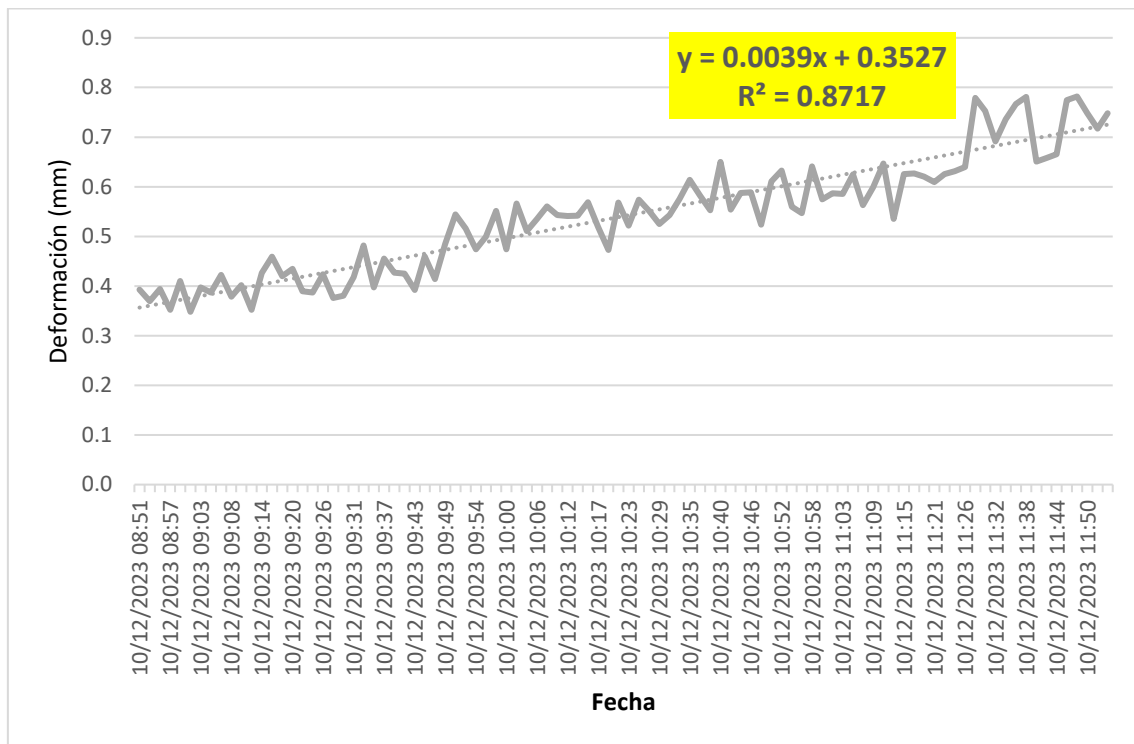


Figura 52. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

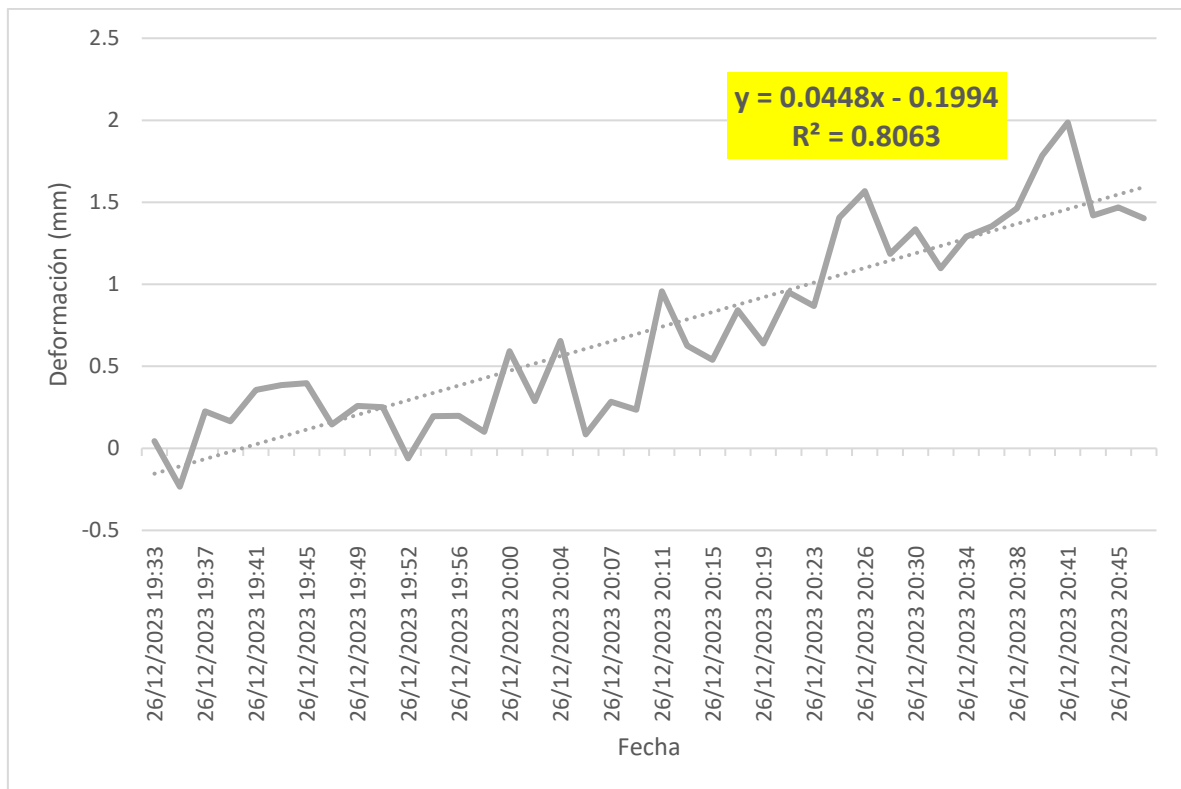


Figura 53. Evento 5: evento 07/02/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

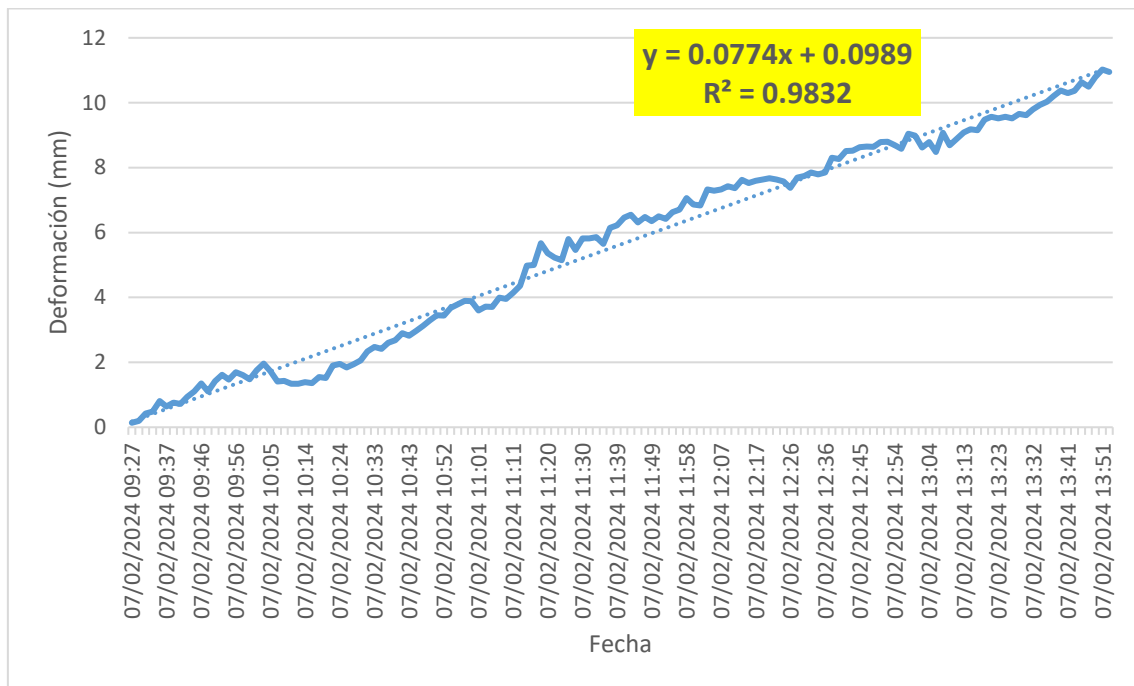


Figura 54. Evento 6: evento 15/04/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

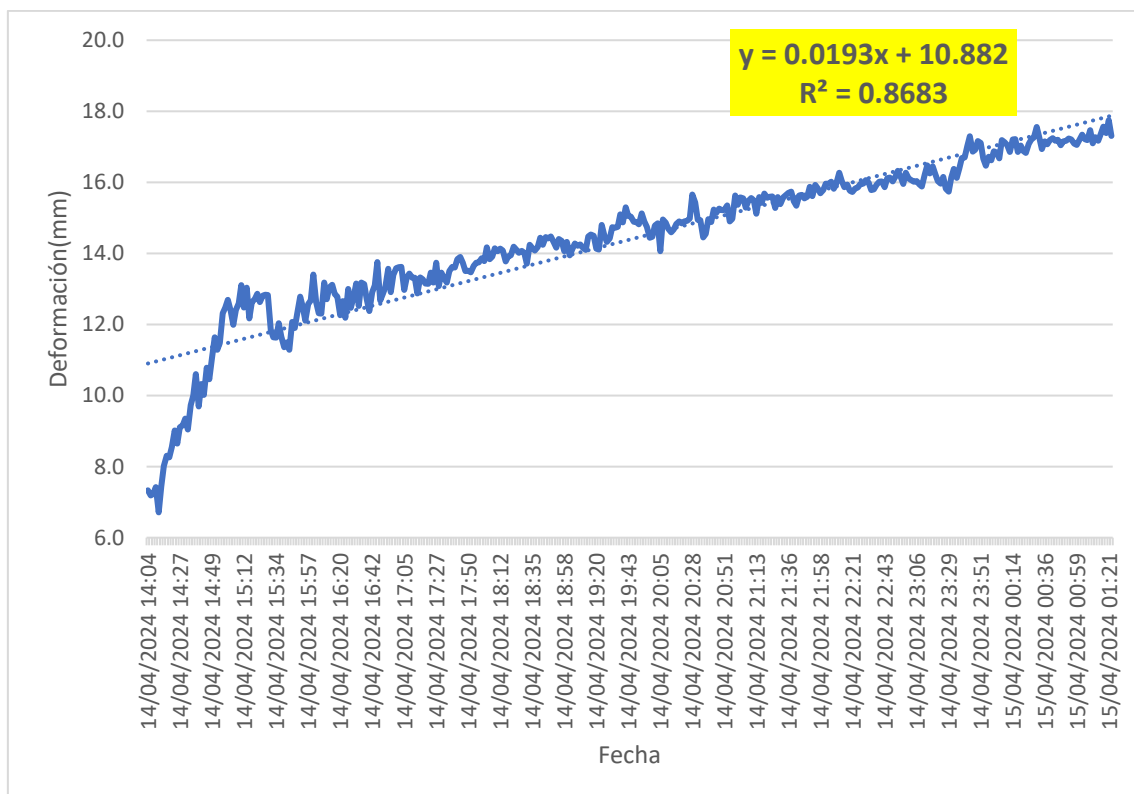


Figura 55. Evento 7: evento 28/04/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

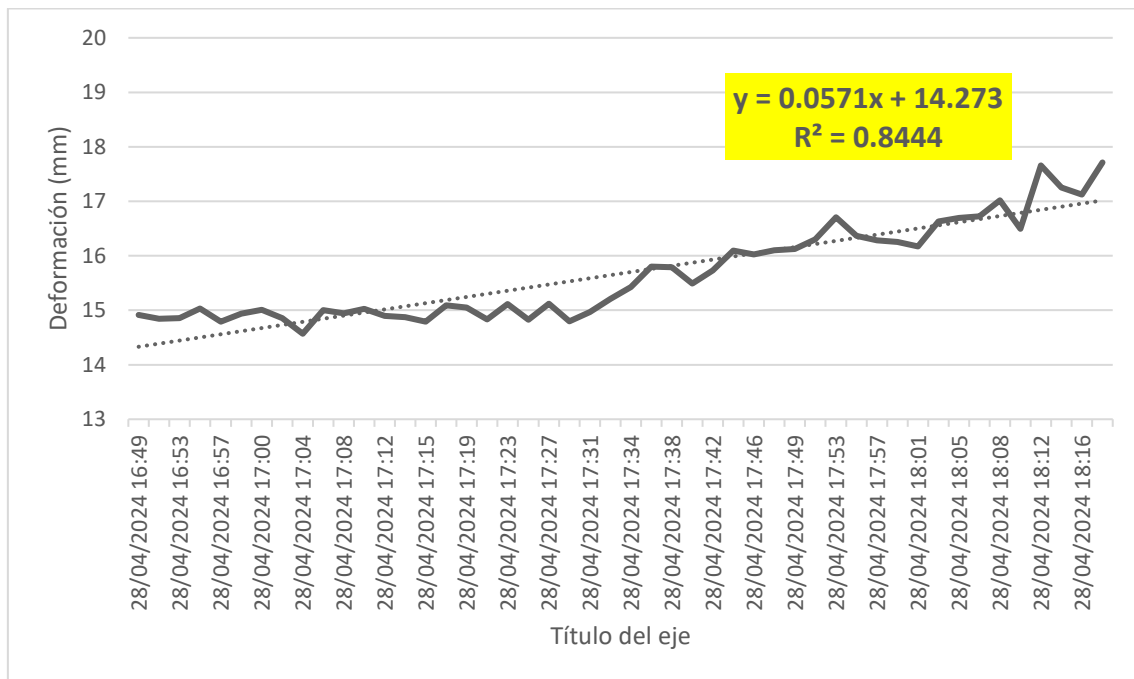


Figura 56. Evento 8: evento 11/06/2024 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

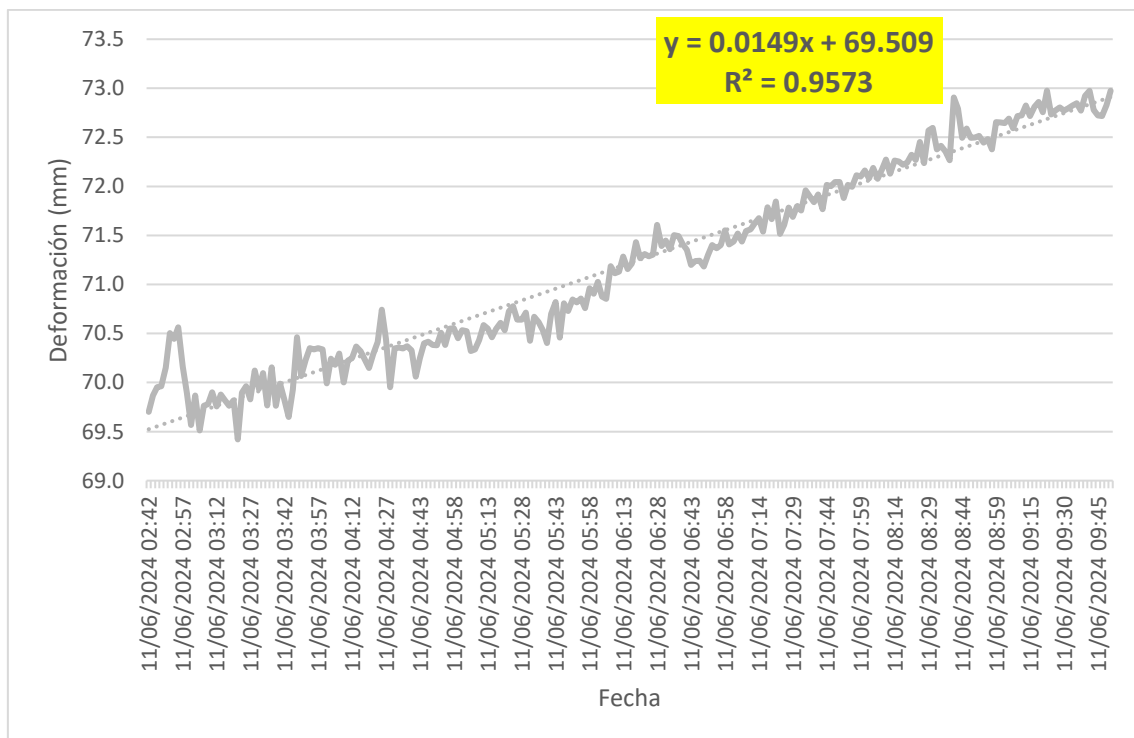


Figura 57. Evento 9: evento 13/01/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

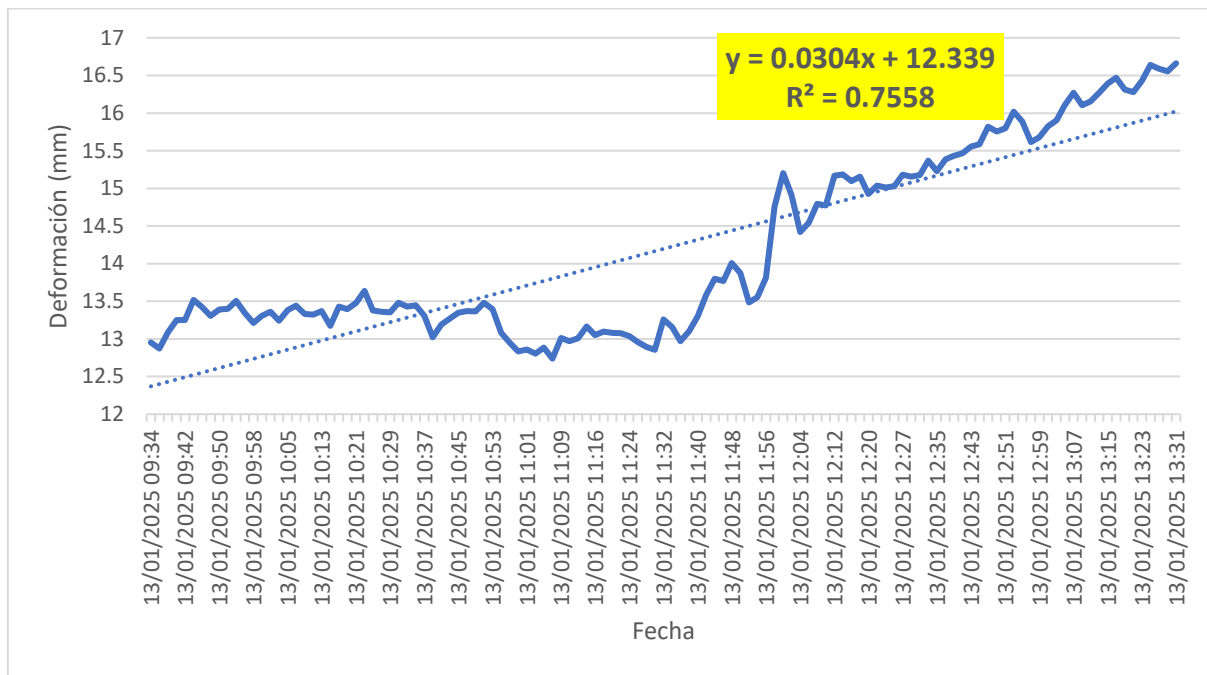


Figura 58. Evento 10: evento 03/02/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)

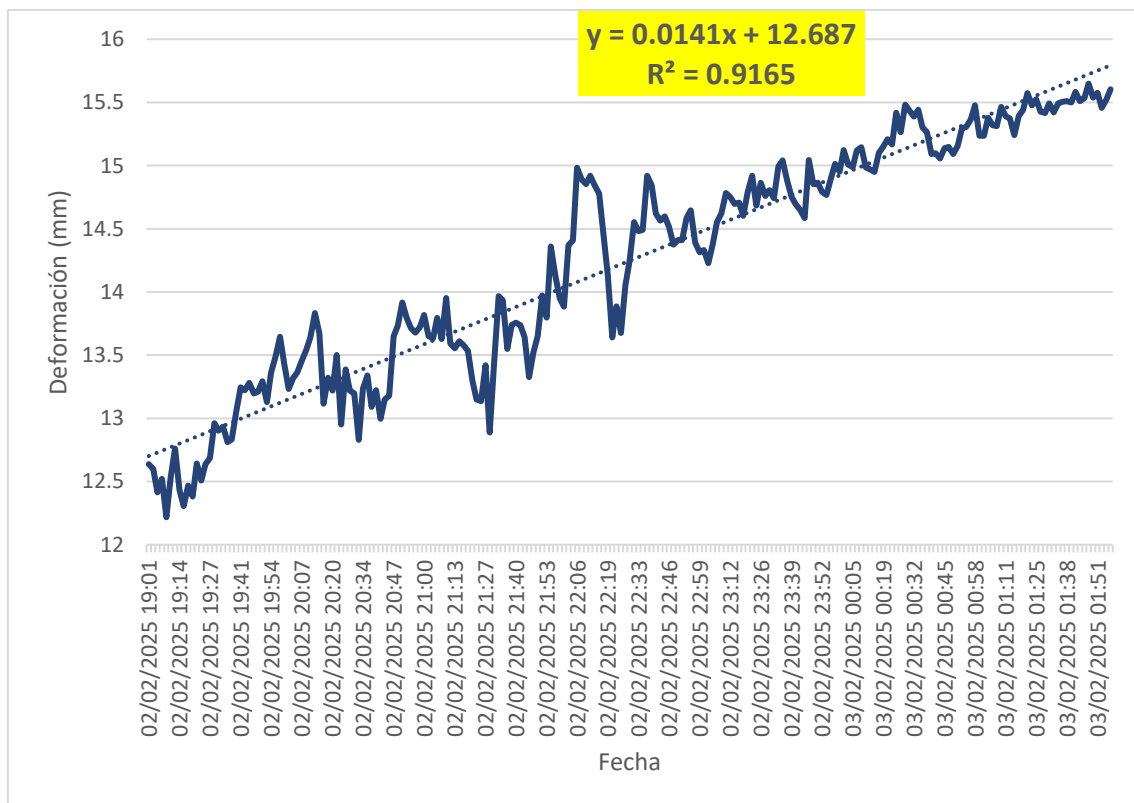
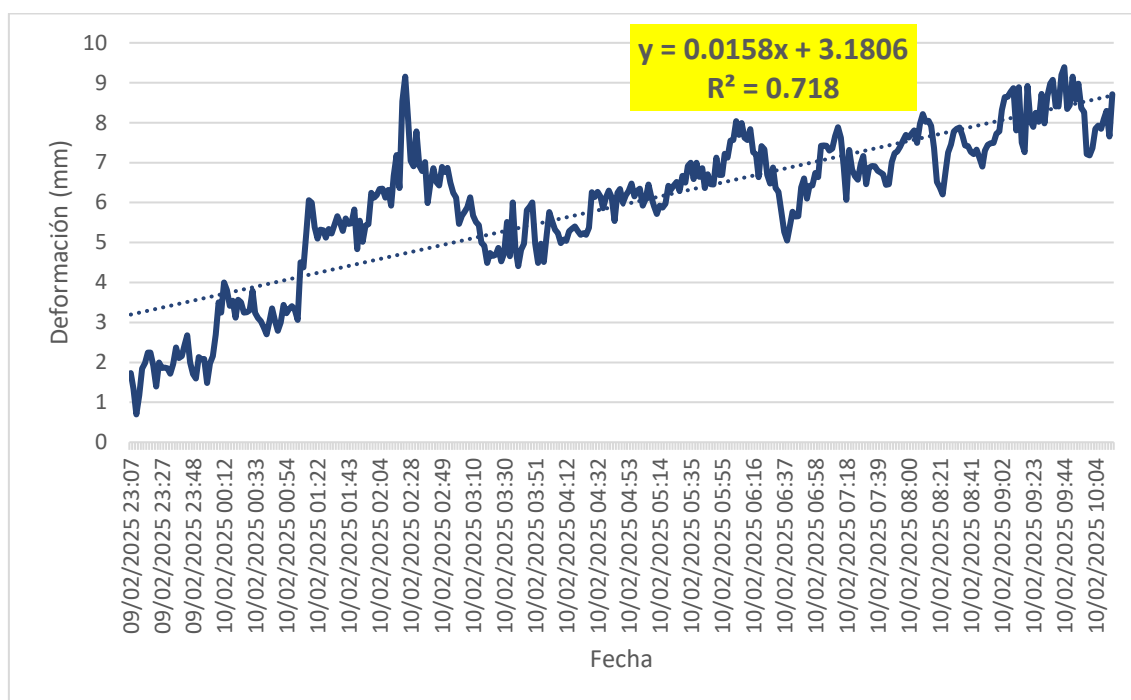


Figura 59. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 2: Fase de desarrollo gradual)



Las ecuaciones y los valores de R^2 en los tramos evaluados con tendencia lineal se ha resumido en la tabla 11.

Tabla 12. Resumen de eventos con tendencia lineal

TENDENCIA LINEAL (ADVERTENCIA-Probabilidad Moderada de colapso)		
Evento	Ecuación	R2
1	$y = 0.0246x + 0.6863$	0.9711
2	$y = 0.017x + 13.454$	0.8269
3	$y = 0.0039x + 0.3527$	0.8717
4	$y = 0.0448x - 0.1994$	0.8063
5	$y = 0.0193x + 10.882$	0.8683
6	$y = 0.0571x + 14.273$	0.8444
7	$y = 0.0149x + 69.509$	0.9573
8	$y = 0.0304x + 12.339$	0.7558
9	$y = 0.0141x + 12.687$	0.9165
10	$y = 0.0774x + 0.0989$	0.9832
11	$y = 0.0158x + 3.1806$	0.718

5.4.3. Tendencia Polinómica (Fase 3: Fase de aceleración)

Figura 60. Evento 1: evento 13/10/2023 (Fase 3: Fase de aceleración)

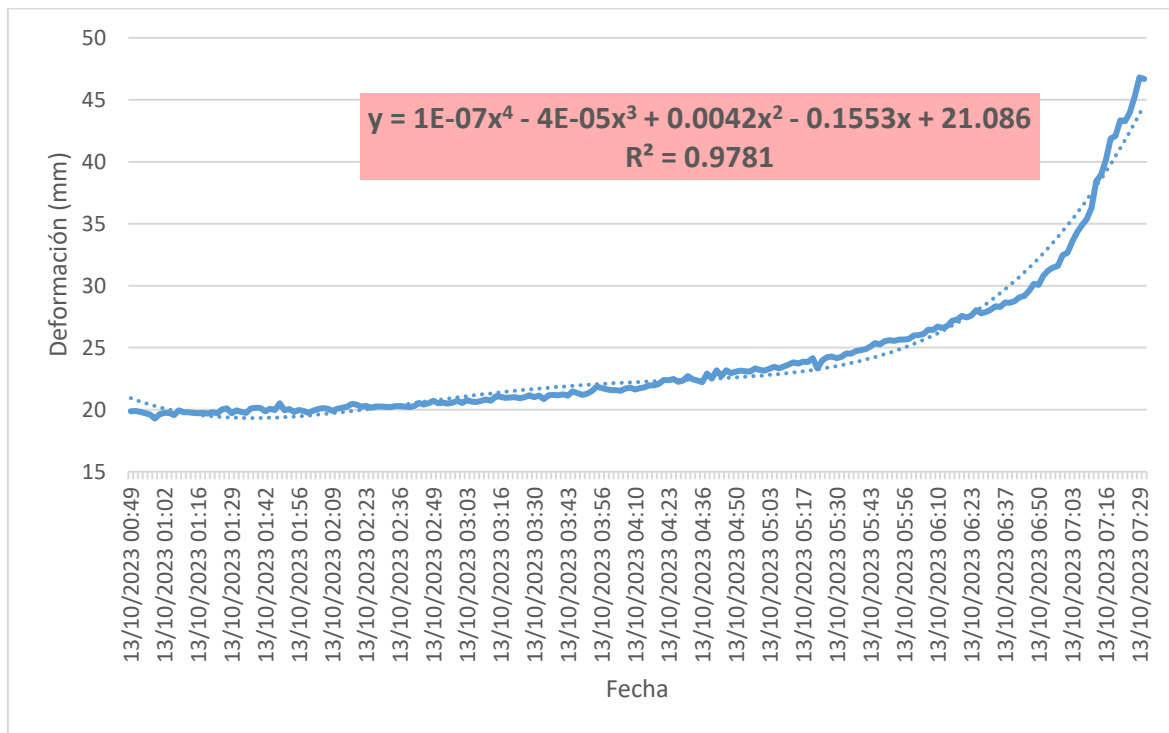


Figura 61. Evento 2: 22/11/2023 (Fase 3: Fase de aceleración)

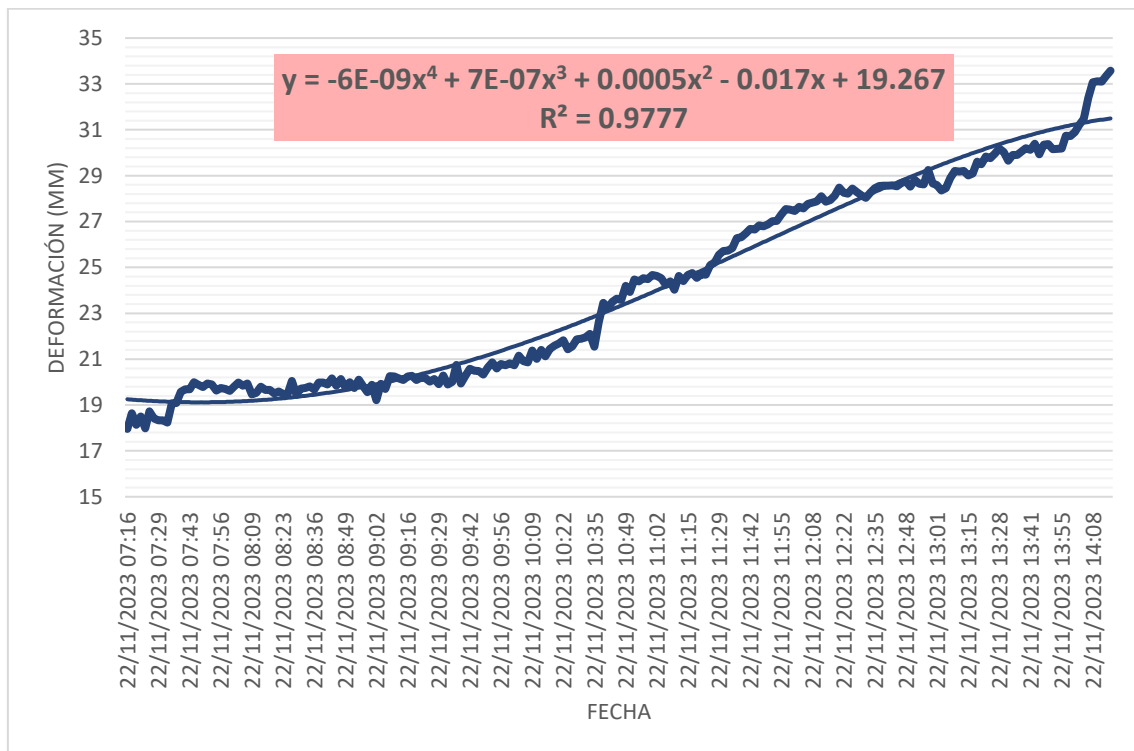


Figura 62. Evento 3: evento 10/12/2023 (Fase 3: Fase de aceleración)

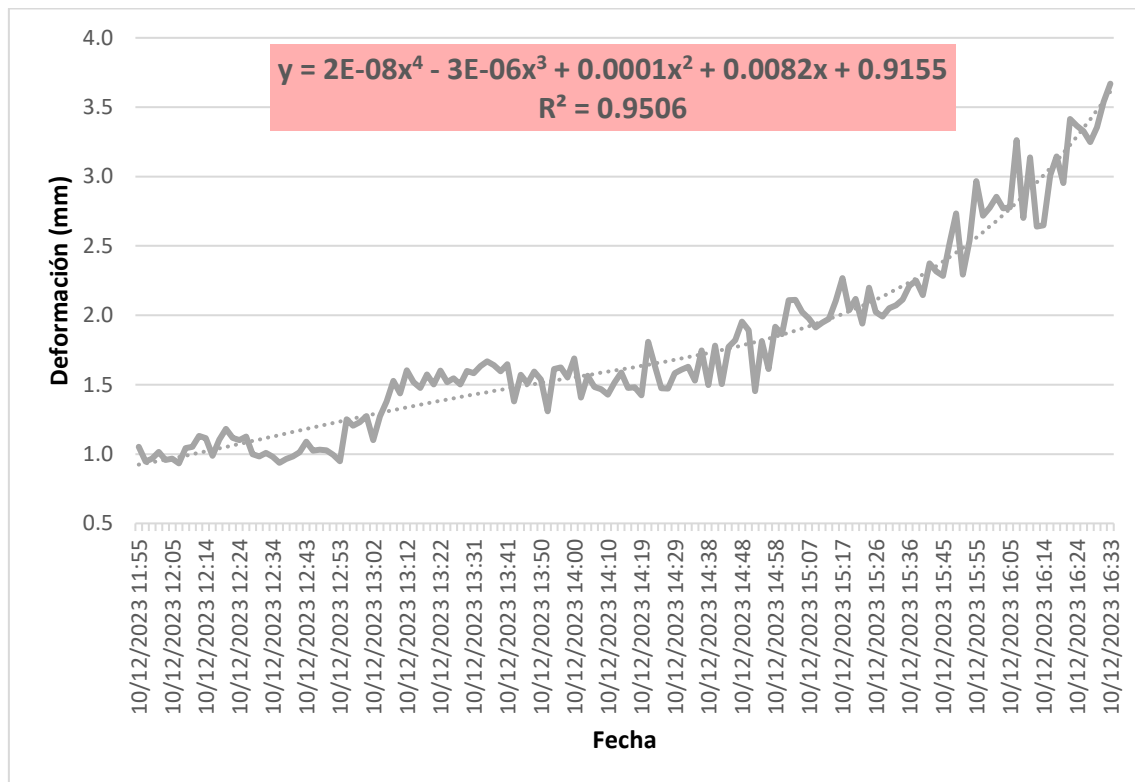


Figura 63. Evento 4: evento 26/12/2023 (Fase 3: Fase de aceleración)

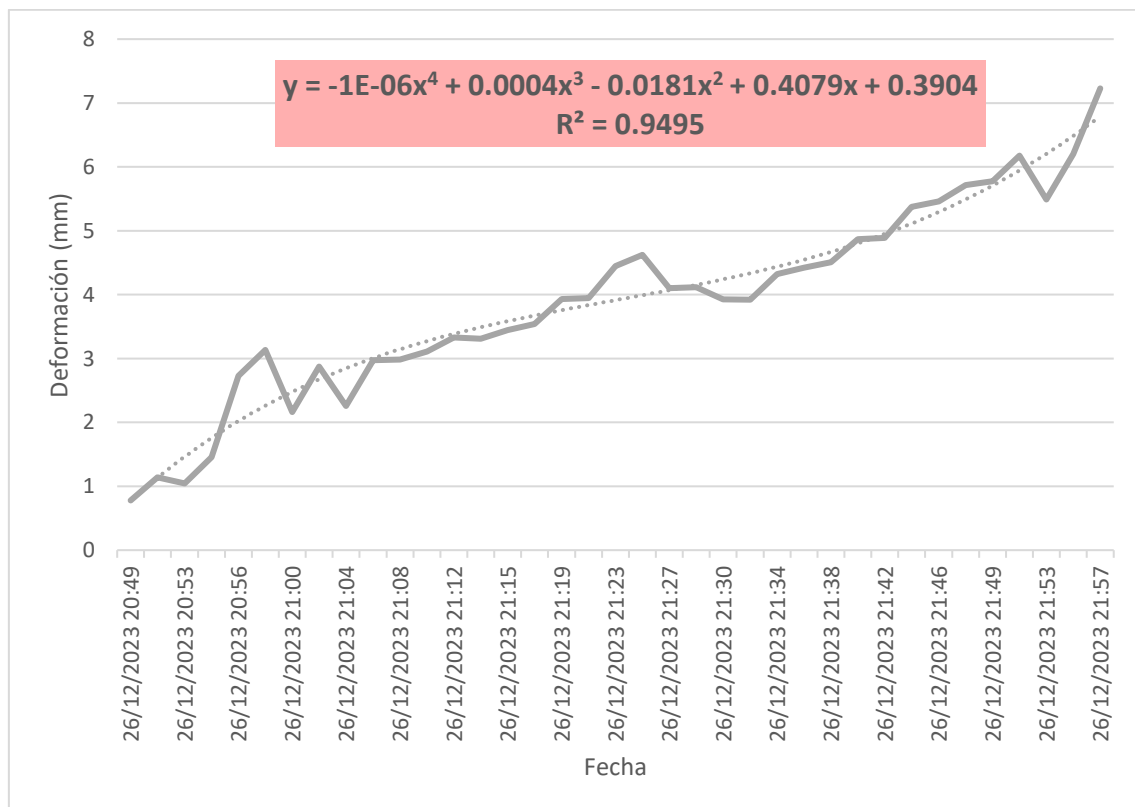


Figura 64. Evento 5: evento 07/02/2024 (Fase 3: Fase de aceleración)

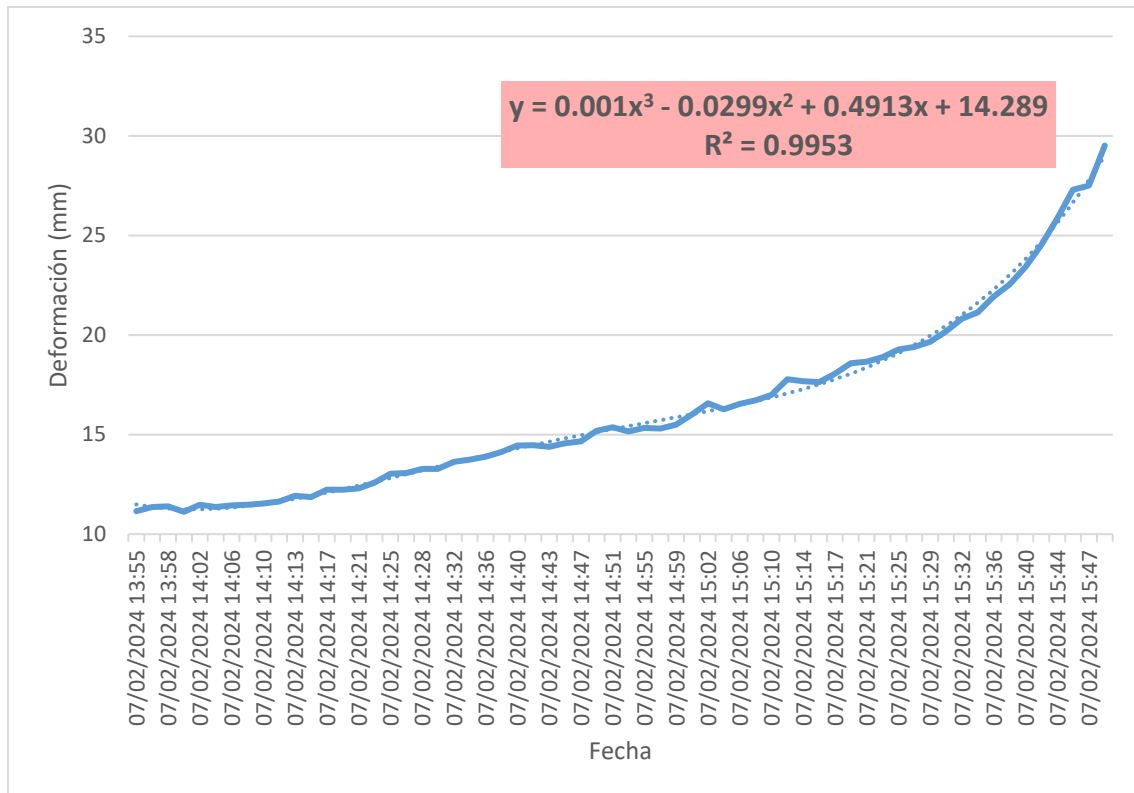


Figura 65. Evento 6: evento 15/04/2024 (Fase 3: Fase de aceleración)

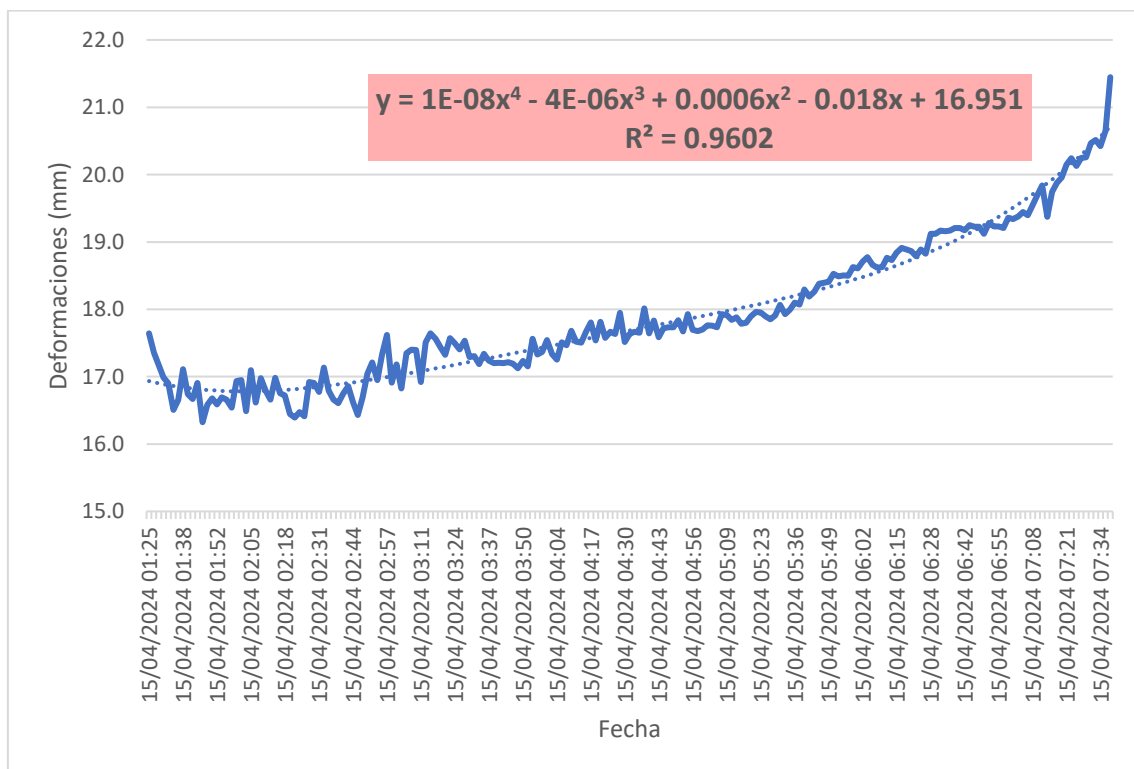


Figura 66. Evento 7: evento 28/04/2024 (Fase 3: Fase de aceleración)

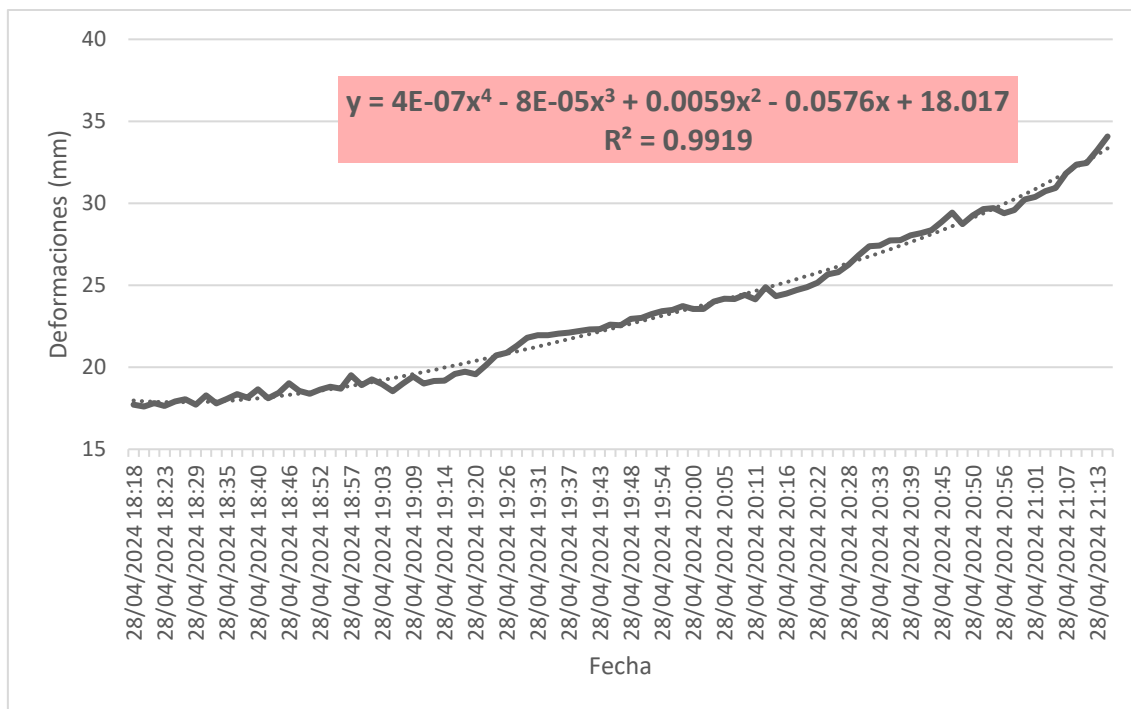


Figura 67. Evento 8: evento 11/06/2024 (Fase 3: Fase de aceleración)

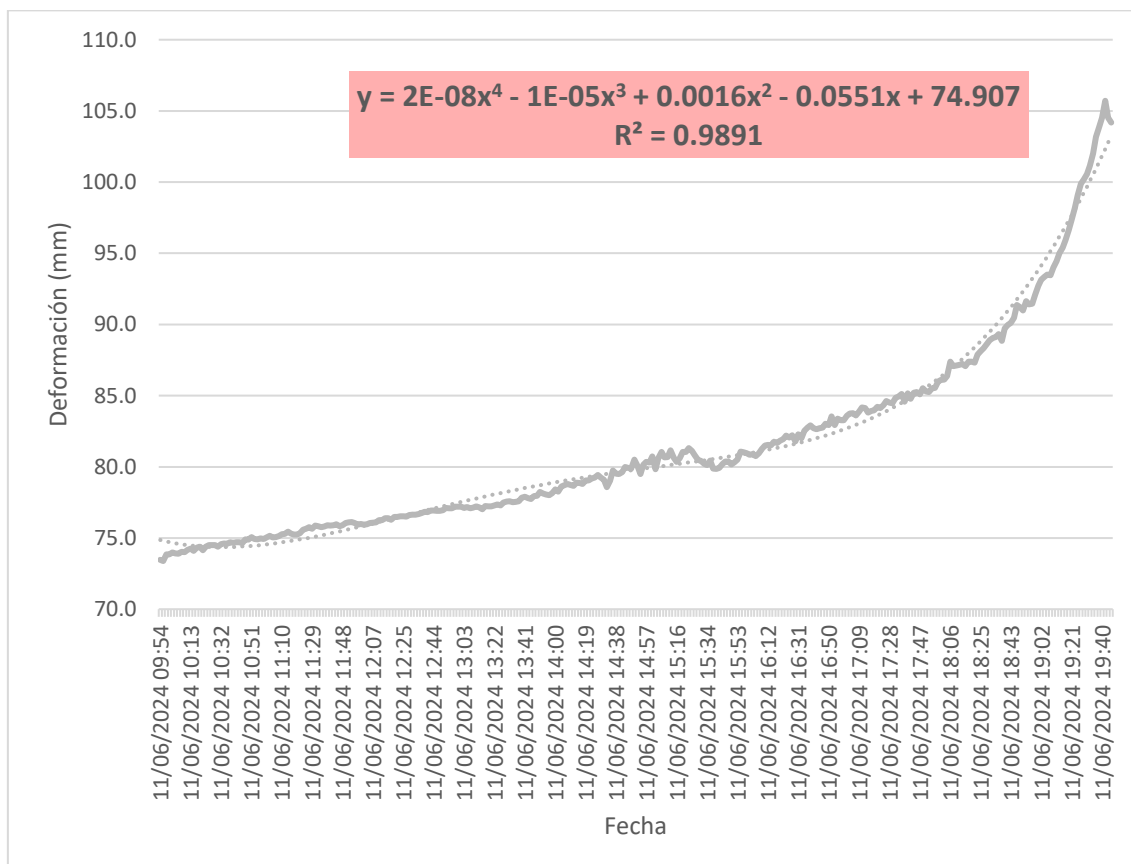


Figura 68. Evento 9: evento 13/01/2025 (Fase 3: Fase de aceleración)

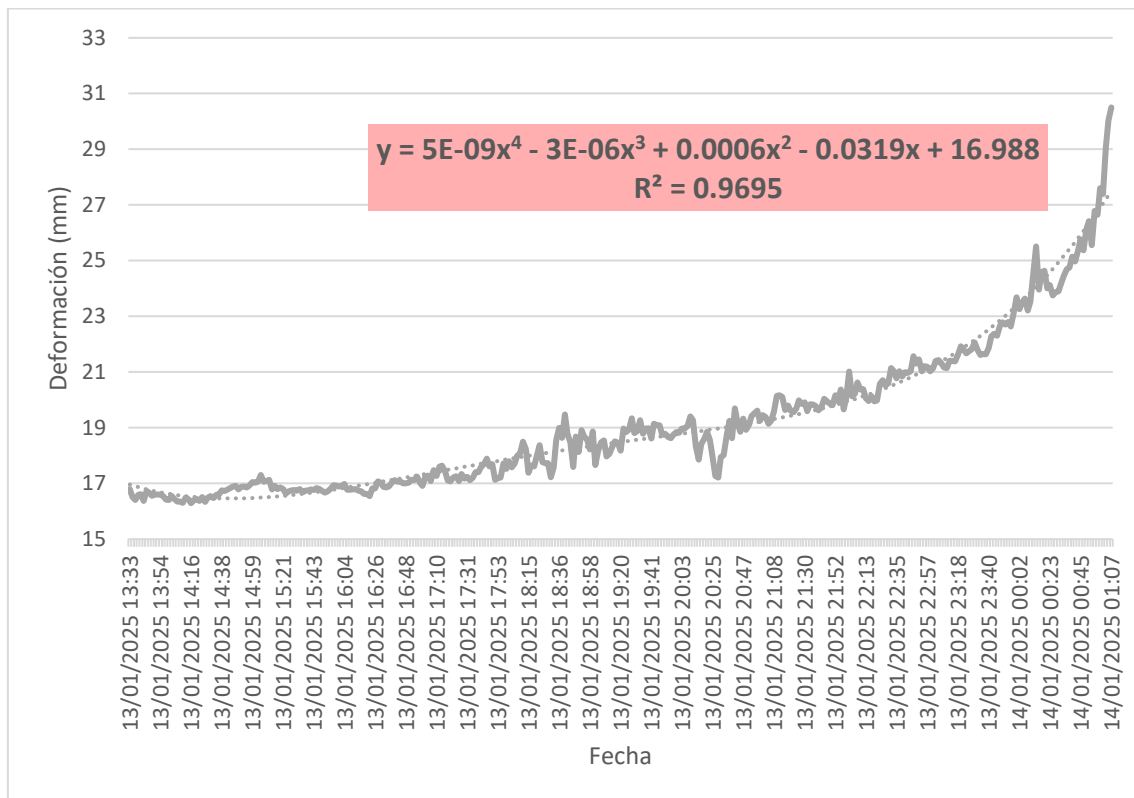


Figura 69. Evento 10: evento 03/02/2025 (Fase 3: Fase de aceleración)

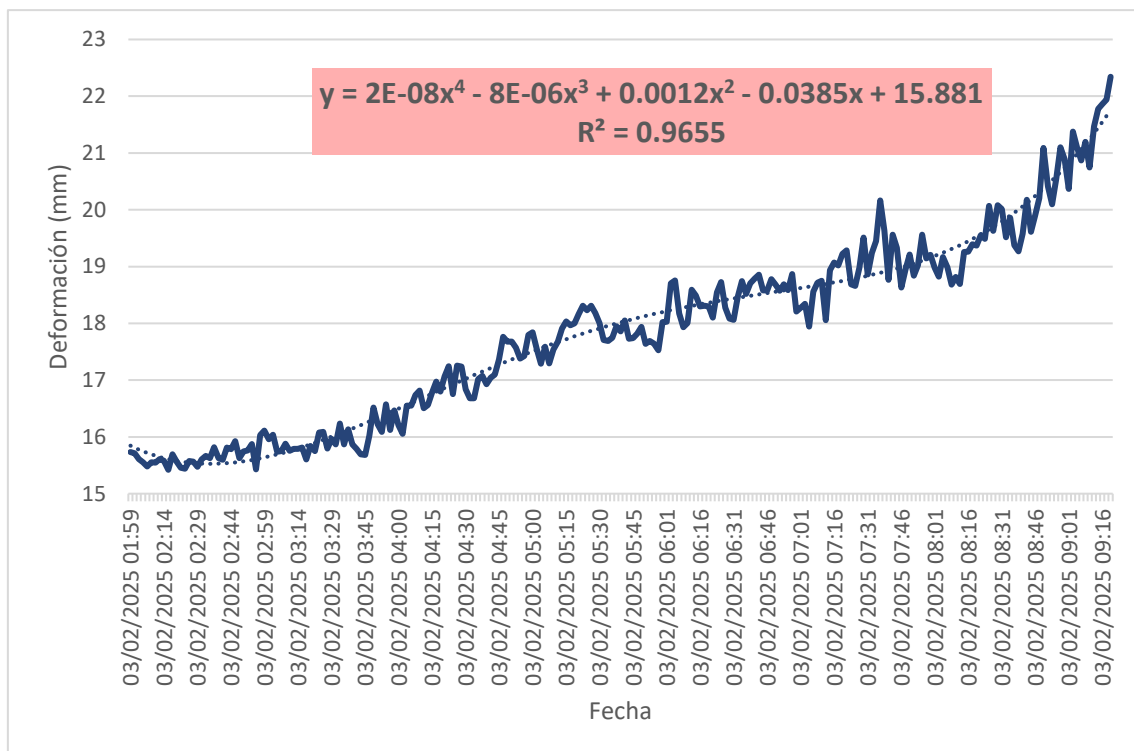
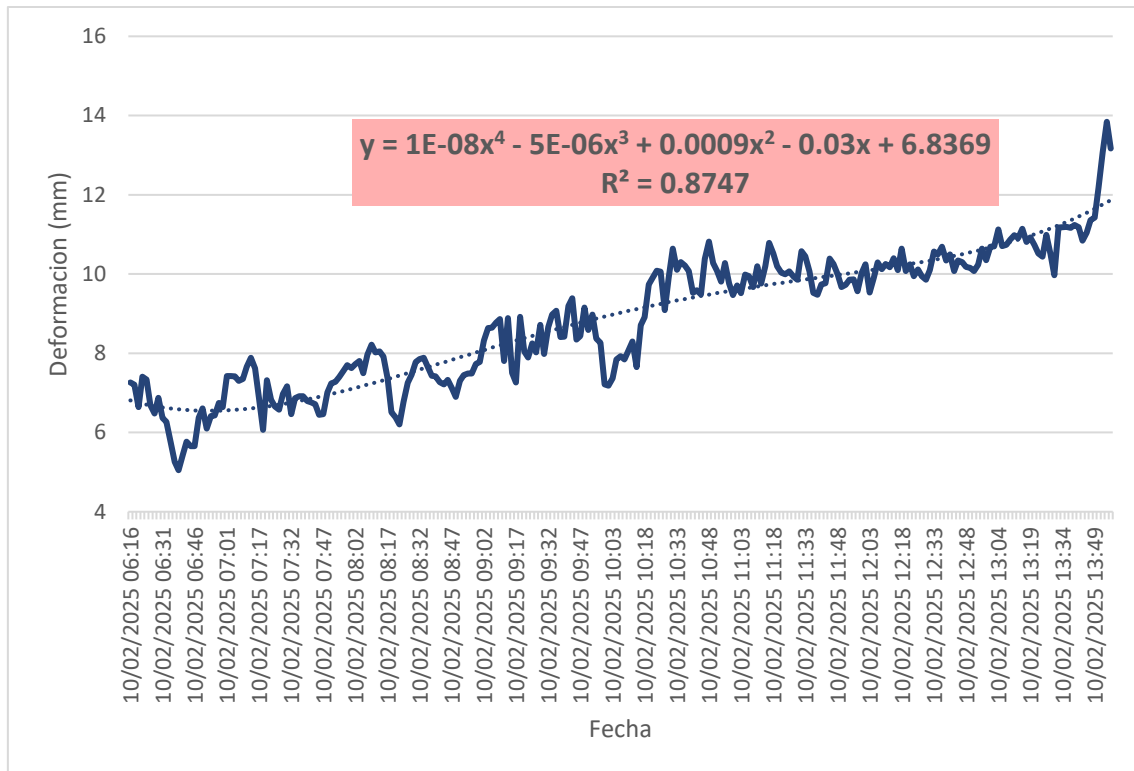


Figura 70. Evento 11: evento 10/02/2025 (Fase 3: Fase de aceleración)

Las ecuaciones y los valores de R^2 en los tramos evaluados con tendencia polinómica se ha resumido en la siguiente tabla:

Tabla 13. Resumen de eventos con tendencia polinómica

TENDENCIA POLINÓMICA (PELIGRO-PROBABILIDAD ALTA DE COLAPSO)		
Evento	Ecuación	R2
1	$y = 1E-07x^4 - 4E-05x^3 + 0.0042x^2 - 0.1553x + 21.086$	0.9781
2	$y = -6E-09x^4 + 7E-07x^3 + 0.0005x^2 - 0.017x + 19.267$	0.9777
3	$y = 2E-08x^4 - 3E-06x^3 + 0.0001x^2 + 0.0082x + 0.9155$	0.9506
4	$y = -1E-06x^4 + 0.0004x^3 - 0.0181x^2 + 0.4079x + 0.3904$	0.9495
5	$y = 1E-08x^4 - 4E-06x^3 + 0.0006x^2 - 0.018x + 16.951$	0.9602
6	$y = 4E-07x^4 - 8E-05x^3 + 0.0059x^2 - 0.0576x + 18.017$	0.9919
7	$y = 2E-08x^4 - 1E-05x^3 + 0.0016x^2 - 0.0551x + 74.907$	0.9891
8	$y = 5E-09x^4 - 3E-06x^3 + 0.0006x^2 - 0.0319x + 16.988$	0.9695
9	$y = 2E-08x^4 - 8E-06x^3 + 0.0012x^2 - 0.0385x + 15.881$	0.9655
10	$y = 0.001x^3 - 0.0299x^2 + 0.4913x + 14.289$	0.9953
11	$y = 1E-08x^4 - 5E-06x^3 + 0.0009x^2 - 0.03x + 6.8369$	0.8747

Después de haber realizado el análisis de 11 eventos, se ha observado que el grado de reducción se puede medir en el tiempo que se alerta de la ocurrencia de un evento, esto se ha determinado de acuerdo a las horas en las que se activa la alerta por velocidades versus la hora en la que se activaría si fuera por las alertas de deformación, esto se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 14. *Diferencia entre las alertas de advertencia*

ALERTA DE ADVERTENCIA							
EVENTO	FECHA	FECHA Y HORA	ALERTA DE DEFORMACIÓN	ALERTA DE VELOCIDAD	TIEMPO DE REACCIÓN CON VELOCIDAD	TIEMPO DE REACCIÓN CON DEFORMACIÓN	% DE MEJORA
1	13/10/2023	13/10/2023 07:31	11/10/2023 22:21	12/10/2023 02:01	05:30	09:10	12.4%
2	22/11/2023	22/11/2023 14:15	22/11/2023 01:03	22/11/2023 07:22	06:53	13:12	91.8%
3	10/12/2023	10/12/2023 16:33	10/12/2023 08:49	10/12/2023 09:28	07:05	07:44	9.2%
4	26/12/2023	26/12/2023 21:59	26/12/2023 19:32	26/12/2023 20:24	01:35	02:27	54.7%
5	15/04/2024	15/04/2024 07:46	14/04/2024 14:04	15/04/2024 02:01	05:45	17:42	207.8%
6	28/04/2024	28/04/2024 21:15	28/04/2024 16:47	28/04/2024 17:48	03:27	04:28	29.5%
7	11/06/2024	11/06/2024 19:46	11/06/2024 02:40	11/06/2024 09:52	09:54	17:06	72.7%
8	13/01/2025	13/01/2025 20:41	13/01/2025 09:32	13/01/2025 12:26	08:15	11:09	35.2%
9	03/02/2025	03/02/2025 09:20	02/02/2025 18:59	02/02/2025 22:02	11:18	14:21	27.0%
10	07/02/2024	07/02/2024 15:49	07/02/2024 09:26	07/02/2024 10:39	05:10	06:23	23.5%
11	10/02/2025	10/02/2025 14:04	09/02/2025 23:05	10/02/2025 01:35	12:29	14:59	20.0%

Tabla 15. Diferencia entre las alertas de Peligro

ALERTA DE PELIGRO						
EVENTO	FECHA Y HORA	DEFORMACIÓN	VELOCIDAD	TIEMPO DE REACCIÓN CON VELOCIDAD	TIEMPO DE REACCIÓN CON DEFORMACIÓN	% DE MEJORA
1	13/10/2023 07:31	12/10/2023 10:31	12/10/2023 12:05	19:26	21:00	8.1%
2	22/11/2023 14:15	22/11/2023 07:14	22/11/2023 08:19	05:56	07:01	18.3%
3	10/12/2023 16:33	10/12/2023 11:55	10/12/2023 12:18	04:15	04:38	9.0%
4	26/12/2023 21:59	26/12/2023 20:47	26/12/2023 20:58	01:01	01:12	18.0%
5	15/04/2024 07:46	15/04/2024 01:23	15/04/2024 06:43	01:03	06:23	507.9%
6	28/04/2024 21:15	28/04/2024 18:18	28/04/2024 18:20	02:55	02:57	1.1%
7	11/06/2024 19:46	11/06/2024 09:52	11/06/2024 10:38	09:08	09:54	8.4%
8	13/01/2025 20:41	13/01/2025 13:31	13/01/2025 13:37	07:04	07:10	1.4%
9	03/02/2025 09:20	03/02/2025 01:57	03/02/2025 06:04	03:16	07:23	126.0%
10	07/02/2024 15:49	07/02/2024 13:53	07/02/2024 14:08	01:41	01:56	14.9%
11	10/02/2025 14:04	09/02/2025 10:16	10/02/2025 10:25	03:39	1 día con 03:48	661.6%

En la tabla 14 y 15, se comparan la eficacia de dos sistemas de alerta, un sistema de alerta por deformación y el sistema tradicional de alerta por velocidad. En la alerta de advertencia (Tabla 14), las alertas por deformación superan a las de velocidad en todos los casos, en hasta 207.8%, lo que permitiría tomar acciones preventivas en horas críticas de anticipación.

En la alerta de peligro (Tabla 14), se observa que las alertas de deformación son mejores a las alertas de peligro en todos los casos.

El análisis confirma que las alertas por deformación reducen significativamente el riesgo geotécnico al anticipar eventos, especialmente en etapas tempranas. Sin embargo, su eficacia podría variar en situaciones de peligro inminente. Estos resultados respaldan la implementación del sistema de alerta por deformación.

5.5. Resultados respecto al objetivo general

De acuerdo a las ecuaciones halladas y el valor del coeficiente de determinación (R^2), se han establecido los valores mínimos y máximos, los cuales serán nuestros sistemas de alerta, esto se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 16. *Sistemas de alarma de deformacionales*

Fase	Tendencia	Valor de R^2		Alerta
		Mínimo	Máximo	
Fase 1	Sin tendencia	0.0003	0.7852	SIN ALERTA
Fase 2	Tendencia lineal	0.8063	0.9573	ADVERTENCIA
Fase 3	Tendencia Polinómica	0.9602	0.9953	PELIGRO

En general, los eventos estudiados evolucionan a través de tres fases distintas, cada una caracterizada por una tendencia y un nivel de riesgo asociados. La fase 1 representa un estado de normalidad o estabilidad, sin una tendencia clara y con valores de R^2 bajos, lo que le da una clasificación de SIN ALERTA. A medida que el evento progresa a la fase 2, se desarrolla una tendencia lineal con valores de R^2 más altos,

indicando una progresión constante y predecible, lo que eleva el riesgo a ADVERTENCIA. Finalmente, en la fase 3, la tendencia se vuelve polinómica, con valores de R^2 muy altos que confirman una aceleración abrupta en el evento, señalando una situación de PELIGRO inminente o crítico.

CONCLUSIONES

1. En relación con el objetivo específico 1, se realizó la caracterización litológica de la zona de estudio, encontrando las siguientes unidades litológicas predominantes: Formación Celendín y la Formación Jumasha. Predomina las calizas, el mármol y el Skarn, al tener este tipo de litología la ocurrencia de desprendimientos es mas rápido, teniendo así menos tiempo de desarrollo de deformación y menor tiempo de predicción desde la central de monitoreo geotécnico. Las características estructurales indican que los desprendimientos ocurren por presencia de fallas planas y en cuña que se dan en roca, lo que también nos indica que estos eventos son de ocurrencia rápida.
2. En relación con el objetivo específico 2, Se determinaron los índices RMR y RQD en todos los puntos de evaluación. El análisis de estos datos, representado en mapas geotécnicos y de isolíneas del RMR, permitió identificar la calidad geomecánica del macizo rocoso. Se concluye que el evento 9 presenta el valor de RMR más bajo, identificándolo como la zona de menor calidad rocosa y, por lo tanto, con la mayor susceptibilidad al colapso o inestabilidad.
3. En relación con el objetivo específico 3, Se identificó 11 eventos que mostraron un patrón de 3 fases: la primera fase de estabilidad, una segunda fase de desarrollo gradual y una tercera fase de aceleración abrupta. De acuerdo a eso se analizaron las tendencias identificadas, encontrando que la primera fase no presenta una tendencia clara, la segunda fase presenta una tendencia lineal y la tercera fase presenta una tendencia polinómica de cuarto grado.
4. En relación con el objetivo específico 4, Se definió sistemas de alarma basados en data de GeoRadares, encontrando un tramo sin alerta, donde los valores de R^2 no supera el valor de 0.79, una alerta de advertencia con valores de R^2 entre 0.8063 y 0.9573, y la alerta de peligro con valores de R^2 de entre 0.9602 y 0.995 y se logró

determinar que las alertas de advertencia por deformación redujeron el tiempo de reacción hasta en un 207.8% frente a las de velocidad. En las alertas de peligro, fueron efectivas también en todos los casos, en hasta 661.6%. Esto demuestra que integrar ambos sistemas optimiza la gestión de riesgos, combinando rapidez y precisión.

5. En relación con el objetivo general, se logró establecer sistemas de alarma según las tendencias de deformación analizadas, lo que permitirá predecir deslizamientos con horas de antelación, clasificando su severidad mediante modelos matemáticos.

RECOMENDACIONES

1. Dado que las tendencias deformacionales podrían variar según el tipo de material, se recomienda clasificar los macizos en las zonas monitoreadas, para luego correlacionar las fases de deformación con la litología dominante. Esto permitiría identificar patrones específicos, en suelos blandos y en rocas fracturadas, y así establecer umbrales de alerta adaptados a cada unidad litológica, evitando generalizaciones que podrían subestimar el riesgo y mejorando la precisión del sistema de alarma.
2. Se recomienda implementar un plan de soporte de roca reforzado (por ejemplo, pernos de roca y malla de acero) en el "Evento 9" y zonas con RMR similar. Este sector debe ser monitoreado continuamente y se debe restringir el acceso innecesario debido a su alta susceptibilidad al colapso, adicional a ello se debe incorporar nuevas tecnologías para complementar el monitoreo Geotécnico como el uso de Scanner Lasser en el Tajo.
3. Se recomienda implementar un sistema de alerta temprana que active una investigación detallada al detectar el inicio de la "segunda fase" (tendencia lineal), ya que precede a la fase de aceleración abrupta (tendencia polinómica) que es crítica. El modelo de las 3 fases debe integrarse en el software de monitoreo.
4. Se recomienda establecer protocolos de acción operativos claros para cada nivel de alerta definido por el valor de R^2 . Por ejemplo, con "Alerta de Advertencia" (R^2 0.8063 - 0.9573) se debe aumentar la frecuencia de monitoreo, y con "Alerta de Peligro" (R^2 > 0.9602) se debe ejecutar la evacuación preventiva de las áreas de riesgo.
5. Dado que el estudio demostró que las alertas por deformación son más rápidas, mientras que las de velocidad son más precisas, se propone una investigación aplicada para integrar ambos enfoques, desarrollando algoritmos híbridos que combinen series temporales de desplazamiento con tasas de velocidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ames Arredondo, C. A. (2021). Aplicación de la gestión de controles críticos con la metodología Bow Tie enfocado a la prevención de accidentes por deslizamiento de taludes en minería de tajo abierto. *Universidad Continental*.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10039>
- Apaza Chino, J. (2024). *Implementación de Structure From Motion en minería subterránea para mejorar el proceso de mapeos geomecánicos y análisis de estabilidad – Unidad Minera Pomasi – CIEMSA*.
<https://www.proquest.com/openview/cb81ddac093bbc9c5f4921340a589950/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>
- Aucay Maldonado, L. R., & Ordoñez Ordoñez, J. D. (2019). *Aplicabilidad del esclerómetro o martillo de Schmidt a la determinación de la resistencia a la compresión simple en rocas* [bachelorThesis, Universidad del Azuay].
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9286>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering* by Z. T. Bieniawski. Wiley-Interscience.
- Blanco Urrutia, F. A., & Alvarenga, E. R. (2003). *Monitoreo Inclinométrico de Taludes*.
<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/inclino.pdf>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). Rock mechanics and mining engineering. En B. H. G. Brady & E. T. Brown (Eds.), *Rock Mechanics for underground mining: Third*

edition (pp. 1-16). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9_1

Cabrejo Liévano, A. G. (2013). Analysis of failures in open pit mines and consideration of the uncertainty when predicting collapses. *Slope Stability*.

Cardona Giraldo, I. K. (2016). *Validación de modelos de predicción de deslizamientos mediante el uso de inventarios en escalas sub-regionales*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59628>

Carrasco Díaz, S. (2005). *Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. San Marcos.

Cobeña, J. C. (2017). *Factores Geológicos y Problemas Geotécnicos | PDF | Geología | Ingeniería geotécnica*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/341589343/Factores-Geologicos-y-Problemas-Geotecnicos>

Cronqvist, L. (2025, marzo 6). Los Diferentes Tipos de Radares en Minería e Ingeniería. *GroundProbe*. <https://www.groundprobe.com/es/los-diferentes-tipos-de-radares-en-mineria-e-ingenieria-2/>

De La Cadena Julón, R. A., & Jambo Marchena, M. R. (2019). *Determinación de umbrales de alarma y velocidad de colapso, utilizando el radar MSR 300 en la pared Nor-Este del tajo tapado oeste en Minera Yanacocha* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana del Norte]. <http://hdl.handle.net/11537/22452>

Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons.

Gama, C. D. (1986). Geologia de engenharia e geotecnia em mineração. *Geotecnia*, 47, Article 47. https://doi.org/10.14195/2184-8394_47_3

Hernández Cáceres, F. J. (2019). *Hacia la automatización del análisis de estabilidad de taludes mineros*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170974>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014).

Metodología de la investigación. McGraw Hill España.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>

Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock Slope Engineering: Third Edition* (0 ed.). CRC

Press. <https://doi.org/10.1201/9781482267099>

Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018

edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Huarache Chilo, E. A. (2020). *Monitoreo de taludes con radares para el control de*

riesgos geotécnicos en la mina a tajo abierto, Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.

departamento Arequipa, provincia Arequipa, distrito Uchumayo.

<http://hdl.handle.net/20.500.12773/11960>

IndustriALL. (2016, noviembre 22). *Seis mineros muertos, diez siguen atrapados en*

deslizamiento de tierra en Turquía. IndustriALL. [https://www.industrial-](https://www.industrialunion.org/es/seis-mineros-muertos-diez-siguen-atrapados-en-deslizamiento-de-tierra-en-turquia)

[union.org/es/seis-mineros-muertos-diez-siguen-atrapados-en-deslizamiento-de-tierra-en-turquia](https://www.industrialunion.org/es/seis-mineros-muertos-diez-siguen-atrapados-en-deslizamiento-de-tierra-en-turquia)

infobae. (2023, febrero 22). *Al menos dos muertos y más de 50 personas atrapadas tras*

el derrumbe de una mina en China. infobae.

<https://www.infobae.com/america/mundo/2023/02/22/al-menos-dos-muertos-y-mas-de-50-personas-atrapadas-tras-el-derrumbe-de-una-mina-en-china/>

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1986). *Manual de Taludes*.

Living Textbook. (s. f.). *Living Textbook | [PP2-3-5] Real Aperture Radar (RAR) | By*

ITC, University of Twente. Recuperado 6 de julio de 2025, de

<https://ltb.itc.utwente.nl/554/concept/103979>

- López Castillo, E. L. A. (2015). *Monitoreo de deslizamientos utilizando el sistema de extensómetros artesanales* [Other, Universidad de San Carlos de Guatemala].
<http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- López Jimeno, C., Grande Sanchez, P., Serra Palacios, J., San Narcizo Saez, V., Bonhekamp de la Peña, C. I., Sebatián Baldo, I., Hernando Degea, A., León Sánchez, A., & Mataix Gonzáles, C. (2022). *Manual de Minería a Cielo Abierto*. E.T.S.I. Minas y Energía -UPM.
- López Vinielles, J. (2022). *Aplicación de técnicas de interferometría radar satélite al análisis de estabilidad de taludes en minería*.
- McHugh, E. L., Dwyer, J., Long, D. G., & Sabine, C. (2006, abril 1). *Applications of ground-based radar to mine slope monitoring*.
<https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2006116>
- Michelini, A., Viviani, F., & Mayer, L. (2019). Introduction to IBIS-ArcSAR: A circular scanning GB-SAR system for deformation monitoring. *In Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) (15–17 May 2019)*. Athens, Greece.
- Miller, R. P. (1965). *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*.
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2606024>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2023). *Estadísticas de accidentes mortales en el sector minero*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4646331-estadisticas-de-accidentes-mortales-en-el-sector-minero>
- NASA. (2024, noviembre 6). *ARSET - Introducción al Radar de Apertura Sintética (SAR) y sus Aplicaciones* | NASA Applied Sciences.
<https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/spanish/arset-introduccion-al-radar-de-apertura-sintetica-sar-y-sus>

- NASA-ISRO SAR MISSION. (s. f.). *Overview | Get to Know SAR*. NASA-ISRO SAR Mission (NISAR). Recuperado 6 de julio de 2025, de <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/overview>
- Pire, M. C. (2006). Caracterización Geomecánica De Macizos Rocosos En Obras Subterráneas De La Región Oriental De País. (Resumen De Tesis Doctoral / 2001). *Minería y Geología*, 22(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223517652004>
- Radio, C. (2019). *Muere un minero y cinco más están atrapados por deslizamiento en Marmato*. <http://172.16.10.183/handle/20.500.11762/35140>
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes | Archivo Digital UPM*. <https://oa.upm.es/14183/>
- Ramos Apaza, J. L. (2023). *Predicción de deslizamiento mediante el monitoreo geotécnico con radares de la zona fase 01 Norte de la unidad minera Quellaveco*. <https://hdl.handle.net/20.500.14655/547>
- Rodríguez, J. D. (2024, noviembre 10). *Un muerto y 6 heridos en un deslizamiento en mina de Córdoba*. infobae. <https://www.infobae.com/colombia/2024/11/10/un-muerto-y-6-heridos-en-un-deslizamiento-en-mina-de-cordoba/>
- Santos, B. C. C. D., Assunção, J. V. D., Almeida, E. L. de S., & Oliveira, C. B. D. (2022). Geotecnia aplicada a taludes. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(4), Article 4. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n4-013>
- Sharon, R., & Eberhardt, E. (2020). *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. Taylo & Francis Group.
- Soil mechanics in engineering practice, 2nd edition. Edited by Karl Terzaghi and R.B. Peck* (with Internet Archive). (1967). New York John Wiley & Sons. <http://archive.org/details/soilmechanicsine0000unse>

Tamayo, M. (2003). *El Proceso De La Investigacion Cientifica*. LIMUSA S.A.

https://www.academia.edu/29308889/Tamayo_Mario_El_Proceso_De_La_Investigacion_Cientifica_pdf

teleSUR. (2024, octubre 7). *Mueren al menos diez personas tras derrumbe de mina a cielo abierto en Zambia*—teleSUR [teleSURtv.net].

<https://www.telesurtv.net/mueren-al-menos-diez-personas-tras-derrumbe-de-mina-a-cielo-abierto-en-zambia/>

Torres, A. (2021, mayo 28). Radar de estabilidad de taludes para gestión de riesgos geotécnicos en aplicaciones civiles. *GroundProbe*.

<https://www.groundprobe.com/es/radar-de-estabilidad-de-taludes-para-gestion-de-riesgos-geotecnicos-en-aplicaciones-civiles/>

ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Tipo de Investigación: Aplicada Enfoque de Investigación: Mixto Diseño de Investigación: No experimental transeccional Población: Eventos geotécnicos ocurridos en los últimos 3 años Muestra: 11 eventos geotécnicos presentados en los últimos 3 años en la zona de estudio
¿Cómo se pueden determinar sistemas de alarma geotécnicos confiables para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto?	Establecer sistemas de alarma para eventos geotécnicos para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto, en el 2025.	La integración de datos de deformación obtenidos (Georadar) permite determinar sistemas de alarma geotécnicos confiables para el monitoreo de estabilidad de taludes según tendencias de deformación en minería a tajo abierto.	
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	
¿Cuáles son las características litológicas y estructurales de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari 2025? ¿Cuáles son las características geomecánicas de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari 2025? ¿Cuáles son las tendencias de deformación de eventos geodinámicos externos en mina a tajo abierto de los últimos 3 años? ¿Cuál es la probabilidad de colapso de acuerdo a datos de deformación en mina a tajo abierto de los últimos 3 años?	- Establecer las características litológicas y estructurales de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari, 2025. - Establecer las características geomecánicas de los eventos geodinámicos externos evaluados en mina a tajo abierto, Huari, 2025. - Analizar las tendencias de deformación de eventos geodinámicos externos en mina a tajo abierto de los últimos 3 años. - Determinar la probabilidad de colapso de acuerdo a datos de deformación en mina a tajo abierto de los últimos 3 años.	- Las características litológicas y estructurales de los eventos (procesos geodinámicos externos) evaluados en mina a tajo abierto son variables y determinantes para la ocurrencia de estos. - Las características geomecánicas del macizo rocoso de los eventos (procesos geodinámicos externos) nos permite evaluar la susceptibilidad al colapso, determinando zonas más frágiles en el Tajo y de mayo enfoque con el monitoreo geotécnico. - Las series temporales de deformación derivadas de los GeoRadares (Ibis Guardian) permiten identificar tendencias de deformación críticas asociadas a procesos de inestabilidad en taludes, el desarrollo de cada evento nos permitirá asociar comportamientos y analizarlos como valores numéricos. - Los sistemas de alarma definidos con base en la correlación entre tendencias obtenidas de GeoRadares (Ibis Guardian) y simulaciones numéricas pueden activarse de forma temprana y confiable, lo que permitiría tener mayor confiabilidad en la activación de alertas.	