

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

**Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar
el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación
Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Reymer Donato MEZA QUINTANA

ASESOR:

Dr. Jaime Alberto HUAMÁN MONTES

AYACUCHO - PERÚ

2024

RESUMEN

La tesis titulada “IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE LA SUBSIDENCIA EN EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUBLEVEL CAVING EN LA UNIDAD MINERA YAURICOCHA” tuvo por objetivo Evaluar de que manera la Implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha. La metodología consistió en un diseño no experimental, de carácter transversal de corte descriptivo correlacional. Los resultados destacan un máximo acumulado de 81.01 cm desde 2017, evidenciando la importancia del monitoreo geotécnico. La implementación de inclinómetros ha permitido una evaluación detallada de los desplazamientos en múltiples direcciones, mientras que el uso del Robot Leica ha facilitado mediciones precisas de la subsidencia superficial. Además, la tecnología microsísmica ha revelado una actividad sísmica asociada con la explotación subterránea, proporcionando información crucial sobre los procesos geotécnicos involucrados. En conclusión, con estos resultados destacan la necesidad de un enfoque integral de monitoreo geotécnico para comprender y mitigar los riesgos asociados con la explotación minera. La combinación de diferentes herramientas y tecnologías de monitoreo proporciona una visión completa de la evolución de la subsidencia, lo que permite tomar decisiones informadas para garantizar la seguridad de la operación minera y la estabilidad del entorno circundante.

Palabras clave: Subsidencia , Factor de seguridad, monitoreo microsísmico, inclinómetros

ABSTRAT

The thesis titled “IMPLEMENTATION OF THE GEOTECHNICAL MONITORING SYSTEM TO EVALUATE THE BEHAVIOR OF SUBSIDENCE IN THE SUBLEVEL CAVING EXPLOITATION METHOD IN THE YAURICOCHA MINING UNIT” had the objective of Evaluating how the Implementation of a geotechnical monitoring system allows evaluating the behavior of subsidence in the sublevel caving exploitation method in a mine in the province of Yauyos. The methodology consisted of a non-experimental, cross-sectional, descriptive-correlational design. The results highlight an accumulated maximum of 61.68 cm since 2017, evidencing the importance of geotechnical monitoring. The implementation of inclinometers has allowed a detailed evaluation of displacements in multiple directions, while the use of the Leica Robot has facilitated precise measurements of surface subsidence. Additionally, microseismic technology has revealed seismic activity associated with underground exploitation, providing crucial information about the geotechnical processes involved. In conclusion, these results highlight the need for a comprehensive geotechnical monitoring approach to understand and mitigate the risks associated with mining exploitation. The combination of different monitoring tools and technologies provides a complete view of the evolution of subsidence, allowing informed decisions to be made to ensure the safety of the mining operation and the stability of the surrounding environment.

Keywords: Subsidence, Safety factor, microseismic monitoring, inclinometers.

INTRODUCCIÓN

La industria minera, en la provincia de Yauyos, ha sido testigo de incesantes avances tecnológicos destinados a mejorar la eficiencia y la seguridad en las operaciones subterráneas. En este contexto, el método de explotación Sublevel Caving ha surgido como una técnica destacada, pero su implementación no está exenta de desafíos, especialmente en lo que respecta al monitoreo geotécnico y la evaluación de la subsidencia.

Este estudio se sumerge en el corazón mismo de la mina, donde la subsistencia del terreno es una preocupación constante. La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico se erige como un faro de innovación, brindando una mirada sin precedentes al comportamiento de la subsidencia en el método Sublevel Caving. No solo se trata de la eficacia operativa, sino también de salvar la integridad estructural y, en última instancia, la seguridad de los trabajadores subterráneos.

A lo largo de esta tesis, exploramos las complejidades geotécnicas específicas de la provincia de Yauyos, desentrañando los desafíos únicos que presenta la implementación de esta técnica de extracción. Desde la instrumentación especializada hasta las metodologías de análisis de datos, este estudio arroja luz sobre cómo el monitoreo geotécnico puede convertirse en el catalizador para una minería más sostenible y segura en la región.

La investigación se organizó en cinco capítulos donde se incluye sus respectivos ítems, como se muestra en el índice de contenido.

En el capítulo I, se describe el planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, delimitación y los objetivos de la investigación.

El capítulo II, contiene el marco teórico de esta investigación; bases teóricas de diversos autores con sus respectivos libros u obras; definición de términos básicos, a fin de correlacionarlas entre ellas y sirviendo de base para el desarrollo de la presente investigación.

El capítulo III, constituye la descripción de los materiales y métodos que se utilizó en esta investigación.

En el capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, a partir de los datos obtenidos del monitoreo y del respectivo análisis de los parámetros que determinan la subsidencia.

Finalmente, se plasma las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

DEDICATORIA

A Matthias, mi fuente de inspiración y motor de mis sueños. Tú has sido mi luz en los momentos oscuros y mi razón para nunca rendirme.

A Rous, mi compañera de vida, cuyo amor y apoyo han sido inquebrantables. Tu paciencia y comprensión han sido mi refugio en los momentos de dificultad. A mi amada familia, por su constante aliento y por estar siempre presentes, impulsándome a alcanzar mis metas. Este logro es también suyo, gracias por estar a mi lado en este viaje

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de esta tesis.

A mi director de tesis, Andrés Portugal Paz, por su orientación experta, su paciencia y su constante apoyo a lo largo de este proceso. Sus valiosos consejos y sugerencias han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también al Ing. Jaime, Alberto Huamán Montes/Investigador, Ing. Prado/Investigador y Ing. Carlos/Investigador por su invaluable colaboración, por brindarme su tiempo, conocimientos y por sus útiles comentarios que enriquecieron este estudio.

A mis padres, Donato, Meza Montes y Julia, Quintana Pérez, por su amor incondicional, su constante aliento y por haberme inculcado valores de perseverancia y dedicación. A mi esposa Rosalinda Aliaga Huarcaya, por su comprensión, paciencia y por ser mi sostén en los momentos difíciles.

A mis amigos y seres queridos, por su apoyo moral.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron con sus palabras de aliento y motivación para alcanzar este logro.

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda y el apoyo de todos ustedes. ¡Gracias de todo corazón

Índice general

RESUMEN	ii
ABSTRAT	iii
INTRODUCCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
Índice general	vii
Índice figuras.....	x
Índice de cuadros o tablas	xiii
Glosario.....	xv
Acronimos	xv
Capítulo I.....	16
Planteamiento del problema	16
1.1. Descripción del problema	16
1.1.1. Realidad problemática	16
1.2. Delimitación del problema	17
1.2.1. Espacial (geográfica).	17
1.2.2. Temporal.....	18
1.3. Formulación del problema	18
1.3.1. Formulación del problema general	18
1.3.2. Formulación del problema específico	18
1.4. Justificación e importancia	19
1.1 Justificación teórica	19
1.2 Justificación Práctica	19
1.3 Justificación Metodológica.....	19
1.4 Importancia.....	19
1.5. Limitaciones de la investigación	20
1.6. Objetivo	20
1.6.1. Objetivos generales	20
1.6.2. Objetivos específicos	20
Capitulo II.....	21
Marco teórico	21

2.1.	Antecedentes del problema	21
2.1.1	<i>Antecedentes de investigación internacional</i>	21
2.1.2	<i>Antecedentes de investigación nacional</i>	22
2.2.	Bases teóricas	23
2.2.1.	<i>Sistema de Monitoreo Geotécnico</i>	23
2.2.2.	<i>Instrumentación Geotécnica</i>	24
2.2.3.	<i>Planteamiento de un programa de instrumentación</i>	25
2.2.4.	<i>Implementación de instrumentación geotécnica para monitoreo</i>	27
2.2.4.1.	<i>Sistemas de Medida</i>	27
2.2.4.2.	<i>Selección de equipos</i>	28
2.2.5.	<i>Método de explotación subterráneo Sublevel Caving</i>	29
2.2.5.1.	<i>Condiciones de aplicación</i>	29
2.2.6.	<i>Subcidencia</i>	29
2.2.7.	<i>Minería subterránea subsidencia y geotecnia.</i>	30
2.2.8.	<i>Macizo rocoso</i>	30
2.2.8.1.	<i>Caracterización Geomecánica.</i>	30
2.2.8.2.	<i>Calidad del Macizo Rcoso</i>	31
2.3.	Marco conceptual	34
Capitulo III.....		35
Metodología		35
3.1.	Tipo.....	35
3.2.	Enfoque	36
3.3.	Alcance.....	37
3.4.	Diseño de la investigación.....	38
3.5.	Población y muestra	39
3.6.	Hipotesis.....	39
3.6.1.	Hipotesis general	39
3.6.2.	Hipotesis especifica	40
3.7.	Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.....	41
3.8.	Técnicas e instrumentos.....	42
3.9.	Métodos de análisis de datos	43
3.10.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	45
3.11.	Desarrollo del trabajo de tesis	45
CAPITULO IV.....		51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		51

4.1. Generalidades de la mina.....	51
4.1.1. Ubicación.	51
4.1.2. Accesibilidad.	52
4.2. Marco geológico	53
4.3. Impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico en la evaluación de la subsidencia.....	58
4.3.1. Monitoreo Robot Leica (subsidencia)	58
4.3.2. Monitoreo Microsísmico.	69
4.3.3. Monitoreo del Cable TDR	76
4.3.4. Monitoreo con inclinómetro	78
4.4. Área de influencia de la subsidencia	85
4.5. Subsidencia como resultado de la explotación	85
4.5.1. <i>Modelo de tenso deformacional vista longitudinal</i>	85
4.5.2. <i>Modelo tenso deformacional vista transversal</i>	89
4.6. Análisis en forma integral entre la relavera y tajo central – oficinas.....	96
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXOS	109
Anexo 1: Matriz de consistencia	109
Anexo 2: Plano de Ubicación- Control geotécnico.....	111
Anexo 3: Plano Isométrico - Cono de subsidencia	112
Anexo 4: Plano de ubicación- Inclinómetro.....	113
Anexo 5: Plano en sección INCL-01 y INCL-02.....	114
Anexo 6: Plano de ubicación – Robot leica	118
Anexo 7: Datos del RS2.....	119
Anexo 8 Caracterización y propiedades de la roca	121

Índice figuras

Figura 1	17
<i>Ubicación geográfica</i>	17
Figura 2	24
<i>Diagrama de flujo para monitoreo de proyectos.</i>	24
Figura 3	28
<i>Métodos de Instrumentación Geotécnica</i>	28
Figura 4:	49
<i>Gabinete N°01 – Cuerpo Esperanza.</i>	49
<i>Gabinete N°02 – Cuerpo Catas -Antacaca</i>	49
Figura 6:	50
<i>Gabinete N°03 – Cuerpo Mascota.</i>	50
Figura 7:	51
<i>Localización del proyecto.</i>	51
Figura 8:	55
<i>Columna estratigráfica del área de Yauricocha</i>	55
Figura 9:	59
<i>Plano de Ubicación Monitoreo de subsidencia – Robot leica</i>	59
Figura 9:	60
<i>Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones EM</i>	60
Figura 10:	61
<i>Desplazamiento acumulado (cm), estaciones EM</i>	61
Figura 11:	63
<i>Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones EMR.</i>	63
Figura 12:	64
<i>Desplazamiento acumulado (cm), estaciones EMR</i>	64
Figura 13:	66
<i>Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones ESU</i>	66
Figura 14:	67
<i>Desplazamiento acumulado (cm), estaciones ESU</i>	67
Figura 15:	70
<i>Localización del proyecto y las áreas monitoreadas.</i>	70
Figura 16:	71
<i>Representación del nivel de daño y la Velocidad Pico Partícula (VPP) en relación con la magnitud de los eventos.</i>	71

Figura 18:	72
<i>Zona sismogénica en el área del cono de subsidencia nivel 1070</i>	73
Figura 20:	74
<i>Deformación potencial en (mm)</i>	74
Figura 21:	75
<i>Estrés sísmico (Pa)</i>	75
Figura 22:	75
<i>Plano geomecánico y geológico Nv. 1070 Cuerpo Esperanza</i>	75
Figura 23:	76
<i>Plano de ubicación e interpretación de monitoreo de cable TDR</i>	76
Figura 24:	78
<i>Vista isométrico del cono de fracturamiento producto del minado por SLC el cono de fracturamiento ya se juntaron entre sí</i>	78
.....	78
Figura 25:	79
<i>Deflexión del Inclínómetro 1 (Incl-01), eje A y B</i>	79
Figura 26:	81
<i>Deflexión del inclinómetro 2 (In-02), eje A y B</i>	81
Figura 27:	83
<i>Deflexión del Inclínómetro 3 (Incl-03), eje A</i>	83
Figura 28:	85
<i>Modelo tenso - deformacional minado hasta el Nv.620</i>	86
Figura 29:	86
<i>Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.620</i>	86
Figura 30:	87
<i>Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.870</i>	87
Figura 31:	87
<i>Modelo tenso - deformacional minado y rellenado hasta el Nv.870</i>	87
Figura 32:	88
<i>Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.1120</i>	88
Figura 33:	88
<i>Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.1120</i>	88
Figura 34:	89
<i>Strength factor en el borde del cono de fracturamiento minado y rellenado hasta el Nv.1120</i> ..	89
Figura 35:	89

<i>Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.520</i>	89
Figura 36:	90
<i>Modelo tenso-deformacional minado y relleno hasta el Nv.520</i>	90
Figura 37:	91
<i>Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.770</i>	91
Figura 38:	91
<i>Modelo tenso-deformacional minado y relleno hasta el Nv.770</i>	91
Figura 39:	92
<i>Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.1120</i>	92
Figura 40:	93
<i>Modelo tenso-deformacional minado y relleno hasta el Nv.770</i>	93
Figura 41:	93
<i>Strength factor en el borde del cono de fracturamiento minado y relleno hasta el Nv.1120</i> ..	93
Figura 42:	94
<i>Análisis de la estabilidad del tajeo Central y labores subterráneas con el apoyo del software (Map 3D</i>	94
Figura 43:	96
<i>Sección global para el análisis de estabilidad del tajeo Central y la relavera</i>	96
Figura 44:	96
<i>Vista en sección de la malla de elementos finitos antes de iniciar la simulación</i>	97
Figura 45:	97
<i>Análisis de estabilidad</i>	98
Figura 46:	98
<i>Análisis de estabilidad con la abertura vacío</i>	98
Figura 47:	99
<i>Análisis de estabilidad con la abertura con auto relleno y tanta caja techo y piso estresado</i>	99
Figura 48:	100
<i>Análisis de estabilidad se puede ver sin daño a la zona industrial</i>	100
Figura 49:	101
<i>Análisis de estabilidad con abertura después de la explotación</i>	101
Figura 50	102
<i>Experimentar un desplazamiento total 5.3m eso generaría problema serio en tema de estabilidad global, es importante rellenar mínimo hasta la cota del pique estación en superficie.</i>	102

Índice de cuadros o tablas

Tabla 1	26
Enfoque sistemático del planeamiento de un programa de instrumentación	26
Tabla 2	28
<i>Equipos utilizados en las mediciones geotécnicas</i>	28
Tabla 3	32
<i>Clasificación geomecánica RQD</i>	32
Tabla 4	32
<i>Clasificación geomecánica RQD</i>	32
Tabla 5	33
<i>Calidad del macizo rocoso según clasificación Q de Barton</i>	33
Tabla 6:	41
<i>Matriz de operacionalización</i>	41
Tabla 7:	47
<i>Características de las instalaciones inclinométricas</i>	47
Tabla 8:	47
<i>Características del inclinómetro vertical instalado en el dique</i>	47
Tabla 9:	48
<i>Coordenadas de la ubicación de los geófonos</i>	48
Tabla 10:	52
<i>Rutas de acceso vía aérea</i>	52
Tabla 11:	58
<i>Rango de criticidad según la velocidad de desplazamiento</i>	58
Tabla 12:	62
<i>Resumen de monitoreo de Hitos EM</i>	62
Tabla 13:	65
<i>Resumen de monitoreo de Hitos EMR</i>	65
Tabla 14:	68
<i>Resumen de monitoreo de Hitos ESU</i>	68
Tabla 15:	69
<i>Resumen de eventos microsismicos</i>	69
Tabla 16:	72
<i>Daño por sismicidad</i>	72

Tabla 17:	77
<i>Resumen del Monitoreo Cable TDR.</i>	77
Tabla 18:	79
<i>Rango de criticidad según la velocidad de desplazamiento relativa</i>	79
Tabla 19:	93
<i>Desplazamientos totales vista transversal.</i>	94
Tabla 20:	94
<i>Desplazamientos totales vista longitudinal.</i>	94

Glosario

Subsidencia: Desplazamiento vectorial del suelo o roca debido a la extracción de material en una mina, en este caso, relacionado con el método de explotación Sublevel Caving.

Monitoreo Geotécnico: Proceso de observación y medición continua de las condiciones geotécnicas en una mina, con el objetivo de prevenir y gestionar posibles riesgos como la subsidencia.

Instrumentación Geotécnica: Uso de dispositivos y sensores especializados para medir y registrar parámetros geotécnicos, como desplazamientos, presiones y deformaciones en el entorno minero.

Eficiencia Operativa: Optimización de los procesos mineros para maximizar la producción y minimizar los costos, sin comprometer la seguridad y el respeto al medio ambiente.

Integridad Estructural: Capacidad de las estructuras en la mina para mantener su forma y resistir cargas sin fallas, incluso en condiciones desafiantes como la subsidencia.

Análisis de Datos Geotécnicos: Evaluación de la información recopilada por la instrumentación geotécnica para comprender el comportamiento del terreno y tomar decisiones informadas sobre la seguridad y operación minera.

Extracción Subterránea: Método de obtención de minerales que se realiza debajo de la superficie terrestre, utilizado para acceder a yacimientos profundos de manera segura y eficiente.

Innovación Geotécnica: Introducción de nuevas tecnologías y enfoques en la monitorización y gestión de condiciones geotécnicas para mejorar la seguridad y la eficiencia en operaciones mineras.

Acronimos

SMG: Sistema de Monitoreo Geotécnico.

IMGY: Implementación en la Mina de Yauyos.

IGM: Instrumentación Geotécnica y Monitoreo.

EO.: Eficiencia Operativa.

SM: Sostenibilidad Minera.

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Realidad problemática

La industria minera, como motor económico a nivel global, ha sido una fuente invaluable de recursos naturales, impulsando el desarrollo de numerosos países a lo largo del tiempo. Sin embargo, la adopción de métodos subterráneos, particularmente el Sublevel Caving, no está exenta de desafíos considerables. Uno de los desafíos más prominentes que enfrentan estas operaciones mineras es la subsidencia, un fenómeno que puede tener ramificaciones significativas en términos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad (Álvarez, 2004).

La subsidencia minera, caracterizada por el hundimiento de la superficie terrestre debido a la extracción subterránea de minerales, ha sido una preocupación constante a nivel mundial en la industria minera. Su magnitud y las consecuencias tanto económicas como ambientales han generado una demanda creciente de estrategias efectivas de monitoreo y control para evaluar y gestionar este fenómeno (Landeo et al., 2015).

A nivel mundial, la subsidencia asociada con la explotación minera mediante sublevel caving ha afectado a diversas operaciones mineras en distintas partes del mundo, desde Australia hasta Sudáfrica, y desde España hasta Chile. Este método conlleva el riesgo de deformación y hundimiento del terreno en la superficie debido al colapso de las rocas en el techo y el piso sobre el área minada (Osorio, 2012).

En América Latina, países como Chile, Perú y México han enfrentado casos significativos de subsidencia debido a la minería sublevel caving, con impactos evidentes en infraestructuras, viviendas y el medio ambiente circundante. La falta de un sistema de monitoreo efectivo dificulta la evaluación precisa de la magnitud y evolución de la subsidencia, lo que, a su vez, obstaculiza la aplicación oportuna de medidas preventivas y correctivas.

Dentro del contexto específico en una mina en la provincia de Yauyos, donde se emplea el método de explotación Sublevel Caving, se ha reconocido la imperiosa necesidad de abordar la problemática de la subsidencia. Aunque este método es eficaz en términos de recuperación de minerales, puede desencadenar eventos de hundimiento que afecten tanto la infraestructura minera como la seguridad de los trabajadores. En este escenario, la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico se presenta como una vía fundamental para evaluar y mitigar los riesgos asociados con la subsidencia en esta operación minera específica.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial (geográfica).

La mina objeto de estudio se encuentra estratégicamente ubicada en la provincia de Yauyos, un área geográfica que se caracteriza por su topografía diversa y su rica historia minera. Situada en la región central del Perú, Yauyos se extiende por una serie de valles interandinos, combinando altitudes variables y climas que van desde templados hasta más cálidos en las zonas más bajas.

Figura 1

Ubicación geográfica



1.2.2. Temporal.

Dentro del periodo de estudio del año 2023, se focalizarán exclusivamente en aspectos relacionados con el método de explotación Sublevel Caving y su relación con la problemática de la subsidencia. Este enfoque permite una investigación detallada y específica sobre cómo este método de explotación contribuye a la subsidencia y qué medidas pueden implementarse para su evaluación y control.

Durante este período, se recopilarán datos relevantes sobre la operación minera en cuestión, centrándose en la aplicación del método Sublevel Caving y los eventos de subsidencia asociados.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Formulación del problema general

¿De qué manera la Implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha?

1.3.2. Formulación del problema específico

- ¿Cuál es el impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha?
- ¿Cómo influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico con el equipo Robot Leica en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha?
- ¿Cuál es la influencia de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha?
- ¿De qué manera influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha?

1.4. Justificación e importancia

1.1 Justificación teórica

La subsidencia en la minería sublevel caving es un fenómeno complejo que puede tener impactos significativos en la seguridad de las operaciones mineras, así como en el entorno circundante. La comprensión de los mecanismos que subyacen a este fenómeno es crucial para desarrollar estrategias efectivas de monitoreo y control. Esta tesis se fundamenta en la necesidad de ampliar el conocimiento teórico sobre la relación entre el método de explotación sublevel caving y la subsidencia, así como en la evaluación de diferentes sistemas de monitoreo geotécnico para abordar esta problemática.

1.2 Justificación Práctica

La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico efectivo es fundamental para gestionar de manera proactiva y mitigar los riesgos asociados con la subsidencia en operaciones mineras sublevel caving. Los resultados de esta investigación tendrán aplicaciones prácticas directas en la industria minera, proporcionando información valiosa para mejorar la seguridad de las operaciones, optimizar la eficiencia de los procesos de extracción y minimizar los impactos ambientales y sociales relacionados con la subsidencia.

1.3 Justificación Metodológica

El enfoque metodológico propuesto combina una variedad de técnicas de investigación y monitoreo geotécnico, desde la instalación de inclinómetros hasta el uso de tecnologías avanzadas como el Robot Leica y el monitoreo microsísmico. Esta diversidad metodológica permite abordar la problemática de la subsidencia desde diferentes perspectivas y obtener una comprensión integral de sus causas y efectos en el contexto específico de la mina en la provincia de Yauyos. Además, la aplicación de estos métodos permitirá comparar y evaluar la eficacia relativa de cada sistema de monitoreo geotécnico en la evaluación de la subsidencia, contribuyendo así al desarrollo de mejores prácticas en la industria minera.

1.4 Importancia

La investigación propuesta reviste una importancia fundamental en varios frentes. En primer lugar, ofrece una contribución vital a la seguridad minera al proporcionar herramientas para detectar y mitigar los riesgos asociados con la subsidencia en operaciones sublevel caving, salvaguardando así la integridad de los trabajadores. Además, la optimización de procesos mediante sistemas de monitoreo geotécnico adecuados no solo mejora la eficiencia de las operaciones mineras, sino que también reduce los impactos económicos derivados de interrupciones no planificadas. En términos de sostenibilidad ambiental, la investigación ofrece

la oportunidad de mitigar los efectos adversos de la subsidencia, contribuyendo así a la preservación de los ecosistemas locales y al cumplimiento de estándares más rigurosos de sostenibilidad. Por último, esta investigación también aporta al conocimiento científico en el campo de la geotecnia minera, abriendo nuevas perspectivas para futuras investigaciones y desarrollo tecnológico.

1.5. Limitaciones de la investigación

Esta investigación se limita a establecer los efectos asociadas con la subsidencia en relación con la aplicación del método sub level caving.

1.6. Objetivo

1.6.1. Objetivos generales

Evaluar de qué manera la Implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha.

1.6.2. Objetivos específicos

- Evaluar el impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- Determinar cómo influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico con el equipo Robot Leica en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- Establecer la influencia de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- Determinar como la implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedentes de investigación internacional

López & Gómez, (2014) en su tesis titulada ***“Estudios de subsidencia para excavaciones subterráneas en la primera línea del metro de Bogotá (PLMB) priorizado en el tramo III”***, plantan como objetivo estudiar los fenómenos de la subsidencia y las implicaciones que puede generar en diferentes edificaciones en el Tramo III para la construcción de la primera línea del metro de Bogotá PLMB. Para llevar a cabo el desarrollo de investigación se llevo a cabo un estudio de carácter aplicado, con un enfoque cuantitativo y diseño no experimental. La conclusión del estudio indico que las obras son una solución para ayudar a las necesidades, desarrollo y bienestar de una comunidad, lamentablemente en nuestro país el desarrollo ha sido lenta debido a los malos manejos y decisiones equivocadas. Pero eso no ha sido inconveniente para que se desarrollen nuevos proyectos, ejemplo de ello en Colombia se han realizado obras subterráneas de gran magnitud que se han convertido un reto para la ingeniería, trayendo modernidad, desarrollo y transformación.

Galvis, (2016) en su tesis titulada ***“Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio”*** cuyo objetivo fue implementar la tecnología de detección de imágenes por escaneo de láser, o sus siglas en ingles LiDAR (Light Detection and Ranging), para realizar el monitoreo de una zona específica ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín. Para llevar a cabo es estudio se debe identificar las señales de los movimientos en masa, usualmente se requiere de un observador con entrenamiento en el tema, dichas señales se hacen evidentes cuando el movimiento en masa ha avanzado considerablemente. Finalmente se concluye que: El monitoreo de movimientos en masa, se considera una actividad de gran importancia en la

ejecución de proyectos ingenieriles, particularmente donde se ha modificado la topografía inicial de la zona, y se busca controlar la estabilidad de la nueva topografía. Existen también zonas de inestabilidad local, generadas por agentes naturales o climáticos, y zonas históricamente inestables debido a las propiedades intrínsecas de los materiales que conforman los taludes, las fallas geológicas, acción antrópica, etc.

Gesche, (2016) en su tesis titulada **“Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnico en túneles estación e interestación del metro de Santiago”**, cuyo objetivo fue estudiar y analizar en detalle los resultados obtenidos por el monitoreo geodésico de desplazamientos, tanto a nivel de superficie como en profundidad, para así evaluar el comportamiento del terreno frente a este tipo de excavaciones y el desempeño de los métodos de medición empleados. Para llevar a cabo esta investigación los datos medidos provienen de dos “túneles estación” y del “túnel interestación” entre ambos, todos construidos en suelos granulares gruesos y emplazados bajo la Avenida Carlos Valdovinos, en la comuna de Pedro Aguirre Cerda. Las conclusiones de la investigación En base a los resultados y análisis del monitoreo de los túneles estudiados, y considerando sus condiciones geométricas y geotécnicas, es posible realizar las siguientes conclusiones: El sistema de medición de subsidencias registró con gran precisión el descenso de la superficie debido a cada fase de excavación, y por lo tanto, resultó ser apto y fiable en las condiciones en las que se ejecutó. No obstante a lo anterior, debido a que en algunas (la minoría) secciones la lectura “cero” se realizó de manera tardía, no se logró registrar toda la historia de desplazamientos en ellas.

2.1.2 Antecedentes de investigación nacional

Arcila, (2022). En su tesis **“Predicción de alertas de falla para planes de monitoreo geotécnico aplicando el método del inverso de la velocidad acoplado con algoritmos de aprendizaje supervisado.”** La investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de predicción de niveles de alerta para fallas en geo materiales, combinando el método del Inverso de la Velocidad del Desplazamiento con técnicas de aprendizaje supervisado. Se evaluaron dos métodos, Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y Árboles de Decisión, obteniendo resultados satisfactorios con un rendimiento cercano a 0,6 para SVM y 0,98 para Árboles de Decisión según matrices de confusión. El entrenamiento del modelo se realizó con datos sintéticos y se evaluó con datos reales de fallas geotécnicas. Se destacó la importancia de datos de monitoreo geotécnico automatizado para predicciones casi en tiempo real, así como un registro de datos con intervalos constantes.

Landeo, (2015). en su artículo **“Análisis de control de riesgos por efectos de subsidencia de rocas en la unidad minera Yauricocha”** El artículo se centra en abordar

problemas de seguridad y prevención de colapsos en minas que emplean el método de explotación Sub-Level Caving. Este método implica la caída de material mineralizado por chimeneas hacia niveles inferiores. Se destaca que la presencia de lutitas fisibles y vetas fracturadas representa un desafío geotécnico. Se subraya la necesidad de un sólido sistema de instrumentación y monitoreo diario y continuo para prevenir colapsos en estas condiciones. El artículo destaca la importancia de un enfoque sólido de instrumentación y monitoreo para evitar colapsos en minas que utilizan el método Sub-Level Caving debido a la presencia de lutitas fisibles y vetas fracturadas. La seguridad y prevención de subsidencias son cuestiones centrales en este contexto geotécnico y geomecánica.

Zanabria (2021). en su tesis ***“Evaluación de la subsidencia inducida por la extracción de mineral para determinar la estabilidad del Pique Mascota y Central en la U.M. Yauricocha”***. Este trabajo de investigación se llevó a cabo en la mina "Yauricocha" de Minera "Sociedad Minera Corona S.A." en Lima, y tuvo como objetivo estudiar la subsidencia inducida por la extracción de minerales. Se realizaron diversas actividades, como el monitoreo topográfico con un sistema robótico, mapeo de grietas, modelado estructural, inspecciones en labores subterráneas y revisión de grietas de superficie. El objetivo era desarrollar un modelo de subsidencia que representara la condición actual y sirviera de base para calibrar modelos numéricos. Este estudio cumplió con los requisitos de Sierra Metals/Corona y proporcionó una base de ingeniería para evaluar el impacto de la subsidencia en los piques "Mascota" y "Central".

2.2. Bases teóricas

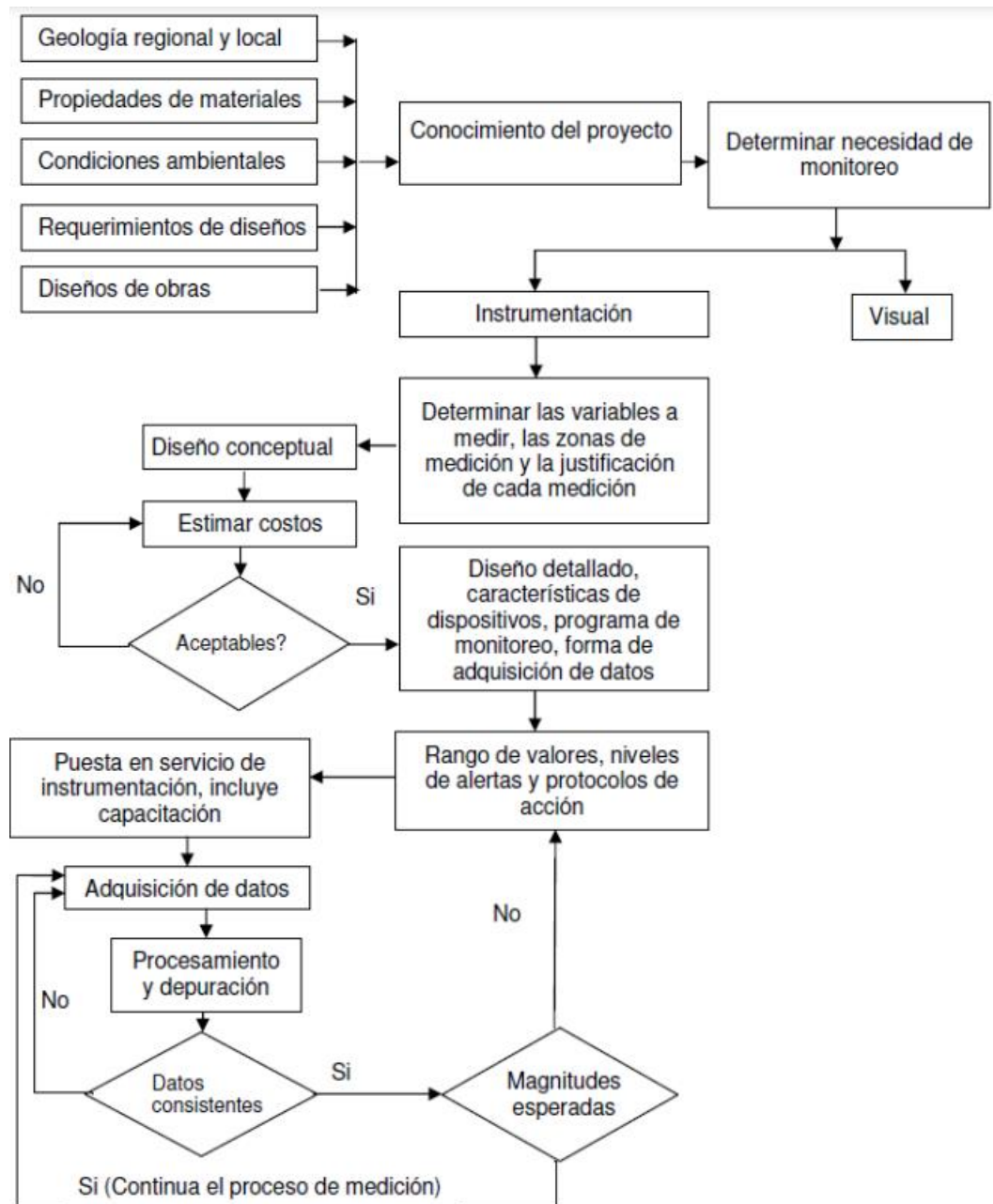
Variable Monitoreo geotécnico

2.2.1. Sistema de Monitoreo Geotécnico

En la actualidad las grandes presas tienen la necesidad de ser sometidas a una vigilancia y control permanente y minucioso mediante un sistema de auscultación y/o implementación de instrumentación geotécnica (Oliva, 2015).

Figura 2

Diagrama de flujo para monitoreo de proyectos.



Nota: (ASCE, 2000).

2.2.2. Instrumentación Geotécnica

En una campaña de instrumentación geotécnica o sistema de auscultación, deben definirse perfectamente las magnitudes que se van a medir, con qué aparatos se van a realizar los registros y con qué periodicidad. Todas ellas se derivan directamente de una correcta definición del problema geotécnico planteado. Así, por ejemplo: no es lo mismo realizar la

auscultación de los movimientos producidos por una tuneladora encargada de excavar un túnel para un metro de una ciudad que realizar mediciones de desplazamientos en una ladera natural sometida a un proceso de creep. En el primer caso deberemos registrar movimientos horizontales y sobre todo verticales, así como controlar la aparición de grietas y su magnitud en edificios próximos. Al tratarse de movimientos relativamente rápidos la periodicidad de medida será alta (diariamente, semanalmente). En el segundo caso, al tratarse de un fenómeno de movimiento lento, la periodicidad será larga (mensualmente, trimestralmente) y la magnitud a medir serán movimientos en la horizontal.

Como conclusión, en toda campaña de instrumentación geotécnica o de auscultación debe quedar perfectamente definido (Herrera y Rivas, 2000):

- Problema geotécnico causante de la necesidad de la campaña de auscultación.
- Parámetro a medir y rango esperado del mismo.
- Instrumentación o aparatos de medida necesarios.
- Ubicación óptima de los aparatos.
- Periodicidad de medida.
- Personal técnico y auxiliar necesario.

La instrumentación geotécnica tiene como uno de sus objetivos básicos medir la respuesta del terreno ante determinadas variaciones, que puedan ocurrir en las condiciones de su entorno, las cuales pueden ser debidas a la ejecución de obras de ingeniería y fenómenos naturales. (Media et. al., 2017).

2.2.3. Planteamiento de un programa de instrumentación

El planeamiento de un programa de instrumentación deber ser lógico y detallado porque la medición de un problema en particular podría requerir de diferentes tipos de instrumentos recolectando información a lo largo de un rango de escalas diferentes. Además, debido a limitaciones físicas y económicas todos los parámetros no podrán ser medidos con igual facilidad y éxito. (Osinermin, 2017).

Todo plan de instrumentación deberá detallar y tomar en cuenta, como mínimo, lo siguiente:

- Secciones de control: La instalación de los instrumentos y el número de ellos se ubican en áreas críticas cuyos parámetros deseamos medir.

- Valores límite: Las mediciones obtenidas de los monitoreos se podrán utilizar como un mecanismo de alerta del programa de gestión de riesgos y se establecerán valores máximos de referencia que no deberán ser sobrepasados.
- Frecuencia de lecturas: El control e interpretación en forma regular del registro de las lecturas del monitoreo permite detectar tendencias anómalas del comportamiento del macizo y tomar las medidas correctivas necesarias.
- Medidas correctivas: En caso de que se estén monitoreando movimientos, y se superen los umbrales establecidos, será necesario instalar elementos de refuerzo en el macizo como parte de las medidas correctivas. En el protocolo de actuación se preverá el refuerzo de la sección, o secciones, del macizo que lo necesiten, mediante estudio individual de cada caso, dependiendo del tipo de explotación e inestabilidades.
- Plan de contingencia: Se establecerá un protocolo de respuesta ante la posibilidad de que los umbrales de deformación sean superados, que incluya la comunicación entre las personas que tienen implicancias en el control del macizo.

En la siguiente tabla se muestra un esquema del planeamiento de un programa de instrumentación:

Tabla 1

Enfoque sistemático del planeamiento de un programa de instrumentación

Paso	Descripción
Planificación	
1	Definir las condiciones del proyecto.
2	Predecir los mecanismos que controlan el comportamiento del macizo rocoso.
3	Definir las preguntas geotécnicas que necesitan ser respondidas
4	Definir el propósito de la instrumentación
5	Seleccionar los parámetros a ser monitoreados
6	Predecir las magnitudes esperadas
7	Establecer las medidas correctivas
8	Asignar tareas para las fases de diseño, construcción y operación

9 Seleccionar los instrumentos

Ejecución

- 10 Determinar la ubicación de los instrumentos
- 11 Establecer procedimientos para asegurar lecturas correctas.
- 12 Listar el propósito específico de cada instrumento instalado.
- 13 Planificar la instalación.
- 14 Planificar la calibración regular y el mantenimiento de los equipos.
- 15 Planificar la frecuencia de la recolección de datos, procesamiento, presentación, interpretación y reporte.
- 16 Establecer valores límites y un plan de contingencia
-

Nota: Osinergmin, 2017

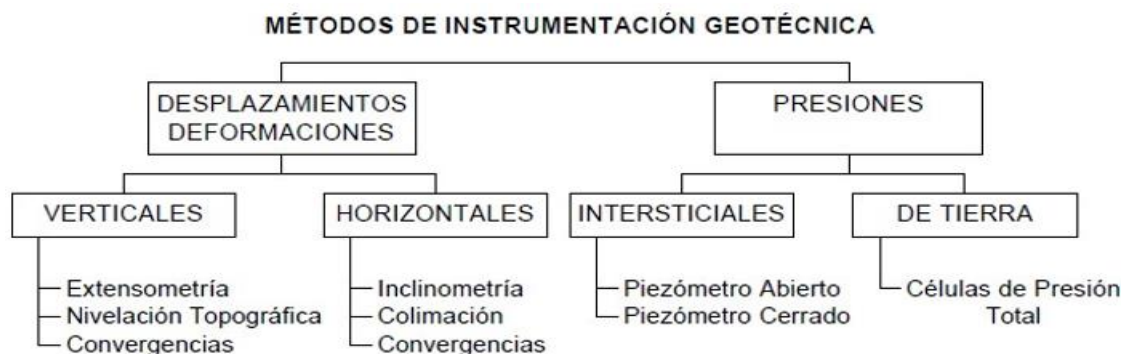
2.2.4. Implementación de instrumentación geotécnica para monitoreo

2.2.4.1. Sistemas de Medida

Son muchos los sistemas de medida utilizados en la instrumentación geotécnica. Puede establecerse una jerarquización dependiendo de la magnitud de la medida, Así tenemos (Herrera y Rivas, 2000):

- Métodos geodésicos (triangulación, trilateración y poligonalización), Nivelación y Colimación, con los que se pueden realizar controles de movimientos superficiales (horizontales y verticales).
- Extensometría e Inclínometría para el control de movimientos verticales y horizontales respectivamente en el interior del terreno.
- Medidores tridimensionales de juntas, cintas de convergencia, potenciómetros y flexímetros para el control de movimientos entre puntos superficiales próximos.
- Pozos de observación, piezómetros abiertos y cerrados, para el control de presiones intersticiales.
- Células de carga y transductores de presión, para el control de fuerzas de anclaje y presiones.

En la figura 3 se muestran cada uno de los métodos o sistemas de medida, relacionados con las magnitudes sometidas a control:

Figura 3*Métodos de Instrumentación Geotécnica*

Nota: (Herrera y Rivas, 2000)

2.2.4.2. Selección de equipos

Para seleccionar el instrumento de medición adecuado se debe tener en cuenta el parámetro geotécnico que se desea monitorear e investigar de acuerdo a la variedad de equipos disponibles. (Osinermin, 2017).

Tabla 2*Equipos utilizados en las mediciones geotécnicas*

Variable	Equipo
	Estación total
	Equipo láser 3D
	Hitos de nivelación / prismas
	GPS
	Clinómetros
Desplazamiento superficial	Fisurómetros (crackmeters)
	Distanciómetro
	Extensómetros
	• Cinta de convergencia
	• Extensómetro de vara telescópica
	Extensómetros
	• Extensómetro de varilla

	<ul style="list-style-type: none"> • Pernos extensométricos • Cable bolt extensométrico (Smart cable)
Desplazamiento en el interior del macizo	Sistema de monitoreo de convergencias Cables TDR Inclínómetros (fijos y portátiles) Columna inclino extensométricas Celdas de presión
Esfuerzos	Celdas de presión en taladros Sistema de micro sismicidad
Presión de poros y nivel de agua	Piezómetro de tubo abierto o de Casagrande Piezómetro de cuerda vibrante

Variable comportamiento de la subsidencia en el método de explotación sublevel caving

2.2.5. Método de explotación subterráneo Sublevel Caving

2.2.5.1. Condiciones de aplicación.

El método SLC se aplica de preferencia en cuerpos de forma tabular, verticales o subverticales, de grandes dimensiones, tanto en espesor como en su extensión vertical. También es aplicable en yacimientos masivos. La roca mineralizada debe presentar condiciones de competencia solo suficientes para que las labores emplazadas en ella permanezcan estables con un mínimo de elementos de refuerzo. La roca circundante, o más específicamente la superpuesta, debe ser poco competente, de modo que se derrumbe con facilidad ocupando el vacío dejado por la extracción de la roca mineralizada. Es deseable que la roca mineralizada y el material estéril superpuesto sean fácilmente diferenciables y separables, en el sentido de minimizar su mezcla y por consiguiente la dilución del mineral.

2.2.6. Subsidencia

Poland et al. (1972) definen la subsidencia como “El hundimiento o asentamiento de la superficie terrestre, que pueden ser debidos a alguno de varios procesos. El término, como es usado normalmente, se refiere a los movimientos verticales descendentes de las superficies naturales, aunque pueden presentarse componentes horizontales de pequeña escala. No se incluye a los desprendimientos de tierra, que conllevan desplazamientos horizontales de gran magnitud, ni a los asientos de rellenos artificiales”.

Por otra parte, Tomás et al. (2009) establecen las siguientes definiciones:

- a) “La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación”.
- b) “La subsidencia del terreno es un fenómeno consistente en el hundimiento de la superficie terrestre cuyo origen puede deberse a diversas causas generando cuantiosos daños en aquellas infraestructuras que se asientan sobre ella”.

2.2.7. Minería subterránea subsidencia y geotecnia.

El trabajo en una mina subterránea, que se desarrolla en el interior de un macizo rocoso y a gran profundidad, requiere una infraestructura especial compuesta generalmente, por: pozo de acceso, plantas generales, galerías, pozos de comunicación entre plantas y explotaciones, formando un todo uno que permita definir un circuito primario de ventilación y, teniendo, las labores mencionadas, las secciones necesarias para permitir que el tránsito del personal y el movimiento de las máquinas se realicen en buenas condiciones de seguridad.

La geotecnia se encuentra íntimamente ligada a la seguridad de las labores mineras, y su principal objetivo es obtener un profundo conocimiento del macizo rocoso para realizar en condiciones de seguridad el desarrollo de las siguientes actividades:

- Diseñar excavaciones seguras para el personal.
- Predecir el comportamiento esperado del macizo rocoso ante la actividad minera.
- Solucionar, en la forma más eficiente y rápida que sea posible.

2.2.8. Macizo rocoso.

Los macizos rocosos son formaciones naturales presentes en entornos geológicos afectados por planos de discontinuidad o debilidad que separan los bloques de matriz rocosa. Tanto la matriz rocosa como las discontinuidades conforman el macizo rocoso. Se trata de un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo compuesto por bloques de matriz rocosa y diversos tipos de discontinuidades que afectan mecánicamente al medio rocoso. En términos de resistencia a la tracción, se considera que los macizos rocosos presentan una resistencia nula. El comportamiento mecánico global del macizo rocoso está gobernado por el conjunto de discontinuidades y bloques de matriz, por lo que para estudiar su comportamiento es necesario analizar las propiedades tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades.

2.2.8.1. Caracterización Geomecánica.

La caracterización de un suelo rocoso implica comprender los parámetros fundamentales de la roca, sus discontinuidades y estructura. Esto incluye conocer la cantidad de familias de

discontinuidades presentes, el espacio medio de los planos de discontinuidad y las características geomecánicas esenciales de estas discontinuidades. También es crucial determinar el estado de tensiones en el lugar y, en caso necesario, los cambios causados por las excavaciones.

Para lograr una caracterización geomecánica completa, se analizan detalladamente los resultados provenientes de laboratorio y de las mediciones realizadas en campo, específicamente en afloramientos del macizo rocoso. Estos datos se procesan estadísticamente para establecer modelos constitutivos apropiados para el tipo de roca, lo que implica conocer sus parámetros de resistencia y deformación. En este proceso, se utilizan métodos de clasificación que combinan los diferentes parámetros de la matriz rocosa para obtener un valor único que representa la calidad general de la roca.

Este enfoque de caracterización geomecánica es esencial para comprender y evaluar la estabilidad de los taludes y macizos rocosos en la mina. Permite tomar decisiones fundamentales en cuanto a la seguridad y diseño de las operaciones mineras, incluyendo la ampliación del botadero en la mina Poderosa en el año 2023. Además, al contar con modelos constitutivos adecuados, se facilita el análisis de estabilidad y la planificación de las actividades mineras, asegurando una operación segura y eficiente.

2.2.8.2. *Calidad del Macizo Rcoso.*

El parámetro geomecánico es una herramienta que permite realizar una clasificación a gran escala de la roca, basándose en sus propiedades. Los sistemas de clasificación geomecánica buscan cuantificar los parámetros de resistencia asignando un solo valor, lo que resulta útil para identificar el dominio geomecánico dentro de una mina.

Entre las clasificaciones geomecánicas más utilizadas se encuentran el Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, el Q de Barton, Lien y Lunde, y el sistema GSI (Geological Strength Index) de Hoek - Brown. Estas clasificaciones se basan en diferentes parámetros y criterios para evaluar el estado del macizo rocoso. Algunas de ellas utilizan el parámetro RQD (Designation of Rock Quality) como base para la clasificación de Deere.

Estos métodos de clasificación son ampliamente aplicados en la industria minera para evaluar la estabilidad de los taludes, identificar zonas de mayor riesgo geomecánico y diseñar medidas de mitigación. La elección del método de clasificación adecuado dependerá de las características específicas del yacimiento y las condiciones geológicas y geomecánicas presentes.

- El índice de la calidad de roca RQD cuantifica el grado de fracturamiento del macizo, de las rocas de prueba de diámetro de superior a 10 cm, determinando por el muestreo in situ (Ecuación 1) o por la cantidad de uniones por metro cúbico (J_v) observadas durante una erución (ecuación 2). Utilizando la definición de 1964 de Deere de RQD, se plantea la calificación sencilla de la calidad de la roca en cinco clases en la tabla 3 (Belandria & Bongiorno, 2016)

$$RQD = \frac{\sum \text{Trozos mayores a 10 cm}}{\text{Longitud de perforación}} \dots (\text{ecuación 1})$$

$$RDQ = 115 - 3.3J_v \dots (\text{ecuación 2})$$

Tabla 3

Clasificación geomecánica RQD

Índice de calidad RQD (%)	Calidad
0 – 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

Tabla 4

Clasificación geomecánica RQD

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Angulo de rozamiento
I	Muy bueno	100 – 81	4 kg/cm ²	> 45°
II	Bueno	80 – 61	3 – 4 kg/cm ²	35° - 45°
III	Medio	60 – 41	2 – 3 kg/cm ²	25° - 35°
IV	Malo	40 – 21	1 – 2 kg/cm ²	15 – 25°
V	Muy Malo	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

“Desde su publicación, estos sistemas RMR y Q se han aplicado a una variedad de proyectos con patologías variadas como el tamaño de excavación, la calidad de roca, la profundidad, entre otros, y sus autores resguardan su validez y generalidad en una serie de

artículos. Numerosos autores han propuesto correlaciones entre los índices Q y RMR basándose en las siguientes ecuaciones". (Belandria & Bongiorno, 2016):

$$RMR = 13.5 \log(Q) + 43 \dots (\text{ecuacion 3})$$

$$RMR = 12.5 \log(Q) + 55.2 \dots (\text{ecuacion 4})$$

- La clasificación Q de Barton fue desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974 como resultado de su estudio de múltiples túneles. Es un sistema que clasifica el macizo rocoso (tabla 3) permitiendo la estimación de los parámetros geotécnicos y el diseño de refugios para túneles y cuevas subterráneas a través del análisis de seis parámetros según la ecuación 5 (Belandria & Bongiorno, 2016).

Tabla 5

Calidad del macizo rocoso según clasificación Q de Barton

<i>Tipo de roca</i>	<i>Valor de Q</i>
Excepcionalmente mala	0.001 – 0.01
Extremadamente mala	0.01 – 0.1
Muy mala	0.1 – 1
Mala	1 – 4
Media	4 – 10
Buena	10 – 40
Muy buena	40 – 100
Extremadamente buena	100 – 400
Excepcionalmente buena	400 – 1000

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_a}{J_n} * \frac{J_w}{SRF} \dots (\text{ecuacion 5})$$

Donde:

J_n : Numero de familias de diaclasas.

J_r : Rugosidad de las superficies de discontinuidades.

J_a : Alteracion de las diaclasas.

J_v : Coeficiente reductor de presencia de agua.

SRF : Factor de reduccion de esfuerzo.

El principal cociente denota la dimensión de bloques, el segundo denota su resistencia al corte y el tercero denota el estado tensional del macizo rocoso.

2.3. Marco conceptual

Sistema de Monitoreo Geotécnico: Un conjunto de instrumentos, dispositivos y tecnologías diseñados para recopilar datos relacionados con las condiciones geotécnicas de un área específica, con el propósito de evaluar y gestionar la estabilidad del terreno.

Subsidencia: El hundimiento o descenso del terreno debido a la extracción de minerales o cualquier otra actividad que cause la disminución de la presión en las capas subterráneas, provocando deformaciones en la superficie.

Método de Explotación Subnivel: Una técnica de minería subterránea en la cual se crea una secuencia de cámaras o subniveles bajo el mineral a medida que se extrae, permitiendo que el mineral caiga por gravedad hacia abajo para su recuperación.

Parámetros Geotécnicos: Medidas cuantitativas de las propiedades mecánicas y físicas del suelo y las rocas en un área específica, que incluyen características como la resistencia, la permeabilidad, la deformación y la cohesión.

Deformación del Terreno: Cambios en la forma o posición del terreno, que pueden ocurrir como resultado de la extracción de minerales y la subsiguiente redistribución de las capas subterráneas.

Instrumentación Geotécnica: Dispositivos y equipos utilizados para medir y registrar cambios en las condiciones geotécnicas del terreno, incluyendo inclinómetros, extensómetros, acelerómetros, estaciones totales y otros instrumentos especializados.

Presión de las Cavidades: La fuerza ejercida por el material circundante sobre las cavidades formadas durante la extracción de minerales, que puede afectar la estabilidad del terreno circundante.

Frecuencia de Monitoreo La periodicidad con la que se realizan las mediciones geotécnicas, ya sea en tiempo real o a intervalos regulares, para capturar cambios en el comportamiento del terreno.

Mitigación de Subsistencia: Acciones y estrategias implementadas para reducir o prevenir los efectos negativos de la subsidencia, como ajustes en la planificación minera, técnicas de relleno, o modificaciones en la secuencia de extracción.

Interpretación de Datos Geotécnicos: El proceso de analizar y comprender los resultados de las mediciones geotécnicas para evaluar la estabilidad del terreno, identificar posibles riesgos y tomar decisiones informadas sobre la gestión de la subsidencia.

Capítulo III

Metodología

La implementación del sistema de monitoreo geotécnico en el método de explotación Sublevel Caving (SLC) es fundamental para evaluar y comprender el comportamiento de la subsidencia en este tipo de operaciones mineras. En esta introducción metodológica, se abordarán los principales aspectos relacionados con el diseño, la instalación y la gestión de dicho sistema, destacando la importancia de la recolección y análisis de datos en tiempo real para la toma de decisiones efectivas en la gestión de riesgos y la optimización de la operación minera.

La metodología se centra en la selección adecuada de los instrumentos de monitoreo geotécnico, tales como extensómetros, inclinómetros, piezómetros, entre otros, así como en la ubicación estratégica de estos dispositivos dentro y alrededor de la zona de explotación SLC. Además, se considera la integración de tecnologías de telemetría y sistemas de adquisición de datos para garantizar la transmisión eficiente y la gestión centralizada de la información obtenida.

El proceso de implementación se lleva a cabo en varias etapas, que incluyen la planificación detallada, la instalación cuidadosa de los instrumentos, la calibración inicial y continua, y la interpretación de los datos recopilados mediante técnicas de análisis geotécnico. Se hace énfasis en la necesidad de establecer protocolos claros para la respuesta ante alarmas o eventos inesperados, así como en la comunicación efectiva entre los equipos operativos, de monitoreo y de gestión.

3.1. Tipo

Según Ñaupas, et al., (2018), la investigación aplicada se caracteriza por su enfoque en la generación de conocimiento con aplicaciones directas a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta perspectiva se fundamenta en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica y se centra en el proceso de enlace entre la teoría y el producto. En este contexto, la presente investigación se alinea con los principios de la investigación aplicada, ya que busca abordar directamente la problemática de la subsidencia en la minería sublevel caving,

proporcionando soluciones prácticas y aplicables a las operaciones mineras en la provincia de Yauyos.

La presente tesis se distingue por su naturaleza eminentemente aplicada, en consonancia con los principios expuestos por Ñaupas, et al., (2018). En primer lugar, la investigación se centra en abordar un problema específico y relevante para la industria minera: la subsidencia en el método de explotación sublevel caving. Este fenómeno conlleva riesgos significativos para la seguridad de los trabajadores, la eficiencia de las operaciones y la sostenibilidad ambiental, lo que justifica la necesidad de soluciones prácticas y aplicables.

Además, la investigación se fundamenta en la integración de diversos sistemas de monitoreo geotécnico, como inclinómetros, equipos Robot Leica, tecnología de monitoreo microsísmico y cables TDR. Estos sistemas están diseñados para proporcionar datos en tiempo real sobre la deformación del terreno y los riesgos potenciales de subsidencia, lo que permite una evaluación precisa y oportuna de la situación en la mina de la provincia de Yauyos.

Asimismo, la tesis tiene como objetivo no solo comprender los mecanismos subyacentes de la subsidencia, sino también proponer soluciones prácticas y aplicables para su gestión y control. Esto implica la identificación de áreas críticas, la implementación de sistemas de monitoreo geotécnico adecuados y el desarrollo de estrategias de mitigación efectivas.

3.2. Enfoque

Según Hurtado (2011), el enfoque de investigación se refiere a la naturaleza del estudio y se clasifica como cuantitativo, cualitativo o mixto. Cada enfoque presenta características particulares con respecto a diversos aspectos de la investigación. Algunos aspectos clave para comprender la comparación de los enfoques cuantitativos y cualitativos de investigación científica incluyen el tipo de realidad que estudia, las metas de la investigación, entre otros. Este enfoque metodológico será crucial para determinar el diseño y la ejecución de la investigación propuesta, ya que influirá en la recopilación, análisis e interpretación de datos.

La elección de un enfoque cuantitativo para esta tesis se justifica por varias razones fundamentales. En primer lugar, dado que la investigación se centra en evaluar el impacto de diferentes sistemas de monitoreo geotécnico en la evaluación de la subsidencia en la minería sublevel caving, un enfoque cuantitativo proporciona datos numéricos y estadísticos sólidos que permitió una medición precisa y objetiva de los resultados.

Además, un enfoque cuantitativo es altamente adecuado para estudiar fenómenos que pueden ser cuantificados de manera objetiva, como la deformación del terreno, la frecuencia de

eventos microsísmicos o las lecturas de inclinación. Esto facilita la comparación cuantitativa entre diferentes sistemas de monitoreo geotécnico y su efectividad en la detección y evaluación de la subsidencia.

Otra razón para optar por un enfoque cuantitativo radica en la posibilidad de realizar análisis estadísticos robustos para identificar correlaciones significativas entre variables, como la relación entre la precisión de los inclinómetros y la magnitud de la subsidencia observada. Estos análisis cuantitativos permiten extraer conclusiones sólidas y fundamentadas sobre la eficacia de los sistemas de monitoreo geotécnico.

3.3. Alcance

Según Hernández (2014), los alcances del estudio dependen de la estrategia de investigación. Así, el diseño, los procedimientos y otros componentes del proceso serán distintos en estudios con alcance exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. Sin embargo, en la práctica, cualquier investigación puede incluir elementos de más de uno de estos cuatro alcances. Los estudios exploratorios sirven para preparar el terreno y, por lo común, anteceden a investigaciones con alcances descriptivos, correlacionales o explicativos. Por lo general, los estudios descriptivos son la base de las investigaciones correlacionales, las cuales a su vez proporcionan información para llevar a cabo estudios explicativos que generan un sentido de entendimiento y están muy estructurados. Esta perspectiva teórica proporciona un marco sólido para comprender cómo el diseño y los alcances del estudio pueden influir en la metodología y los procedimientos de investigación utilizados en la tesis propuesta.

La presente investigación tuvo un alcance Alcance:

Exploratorio dada la complejidad de la problemática de la subsidencia en la minería sublevel caving y la diversidad de sistemas de monitoreo geotécnico disponibles, es necesario realizar una exploración inicial para comprender mejor el fenómeno y los métodos de monitoreo existentes. Este alcance exploratorio permitirá identificar tendencias, patrones y posibles relaciones entre variables que puedan orientar la investigación hacia áreas de interés específicas.

Alcance Descriptivo:

Una vez que se haya explorado el tema y se hayan identificado los sistemas de monitoreo geotécnico relevantes, la investigación requerirá una fase descriptiva para caracterizar en detalle cada sistema, incluyendo sus características técnicas, métodos de implementación, áreas de aplicación y limitaciones. Este alcance descriptivo proporcionará una visión comprensiva y detallada de los sistemas de monitoreo geotécnico en estudio.

Alcance Correlacional:

Con base en la información recopilada durante las fases exploratoria y descriptiva, la investigación buscará establecer relaciones correlacionales entre los diferentes sistemas de monitoreo geotécnico y la evaluación de la subsidencia en la minería sublevel caving. Se explorarán posibles correlaciones entre variables como la precisión de los datos obtenidos, la detección temprana de eventos de subsidencia y la efectividad en la gestión de riesgos. Este alcance correlacional permitirá identificar qué sistemas de monitoreo están más estrechamente relacionados con una evaluación precisa de la subsidencia y cómo pueden influir en la toma de decisiones en el ámbito minero.

3.4. Diseño de la investigación

Según Carrasco (2005), el diseño de investigación es el plan y la estructura del estudio de investigación. Este diseño responde al tipo de método que se ha seleccionado y conduce a una planeación cuidadosa de la obtención y procesamiento de los resultados de la investigación. Esta teoría resalta la importancia del diseño de investigación como un elemento fundamental para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos. Un diseño de investigación adecuado proporciona una guía clara para la recopilación y análisis de datos, asegurando que se cumplan los objetivos del estudio de manera efectiva.

En el contexto de la tesis propuesta, el diseño de investigación será crucial para estructurar el proceso de evaluación de los sistemas de monitoreo geotécnico y su impacto en la evaluación de la subsidencia en la minería sublevel caving.

La tesis propuesta sobre la evaluación de los sistemas de monitoreo geotécnico y su impacto en la evaluación de la subsidencia en la minería sublevel caving se fundamentó en un diseño no experimental, considerado apropiado debido a la naturaleza observacional del estudio y la necesidad de flexibilidad en la recopilación de datos en un entorno minero complejo. Además, el acceso limitado para manipular variables de interés respaldó la elección de este diseño. La investigación se centró en comprender la efectividad de los sistemas de monitoreo geotécnico sin intervenir en las condiciones naturales del proceso minero, lo que permitió un análisis exhaustivo de los factores que influyen en la subsidencia. Este enfoque no experimental proporcionó una base sólida para abordar las complejidades del tema y contribuyó significativamente al avance del conocimiento en ingeniería minera.

3.5. Población y muestra

Población

Según Carrasco (2005), la población de investigación se refiere al conjunto completo de elementos o individuos que son objeto de estudio en una investigación específica. En el contexto de la investigación, la población se define como el grupo que posee las características o cualidades que el investigador desea examinar o analizar. Esta teoría resalta la importancia de definir claramente la población de estudio para garantizar la representatividad y la validez de los resultados obtenidos. En el contexto de la tesis propuesta, la identificación precisa de la población de investigación permitirá enfocar adecuadamente el estudio en el grupo relevante de individuos o elementos afectados por la subsidencia en la minería sublevel caving.

La población en esta investigación estuvo conformada por todos los fenómenos de subsidencia en la unidad minera Yauricocha.

Muestra

Según Valderrama (2002), la muestra de investigación se refiere a un subconjunto de la población completa seleccionada de manera sistemática o aleatoria para ser estudiada y analizada en un estudio de investigación. La muestra es una parte representativa de la población de interés y se elige con el objetivo de obtener información confiable sobre la población válida en su conjunto. Esta teoría enfatiza la importancia de seleccionar una muestra representativa para garantizar la validez y la generalización de los resultados obtenidos en el estudio. En el contexto de la tesis propuesta, la selección cuidadosa de la muestra de investigación permitirá obtener conclusiones sólidas y confiables sobre el impacto de los sistemas de monitoreo geotécnico en la evaluación de la subsidencia en la minería sublevel caving.

Las muestras estuvieron conformadas por los piques y el dique de la presa de relaves de la unidad minera Yauricocha.

3.6. Hipotesis

3.6.1. Hipotesis general

La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permitirá evaluar de manera precisa y oportuna el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha.

3.6.2. Hipotesis específica

- La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando inclinómetros tendrá un efecto significativo en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando el equipo Robot Leica influirá positivamente en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico influenciará de manera significativa en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.
- La implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, tendrá un efecto positivo en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.

3.7. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Tabla 6:

Matriz de operacionalización

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
<u>Variable Independiente:</u>	Se refiere al proceso de instalar y utilizar dispositivos y tecnologías para monitorear la estabilidad del terreno en una mina.	Medida mediante la presencia y el funcionamiento de inclinómetros, equipo Robot Leica, tecnología de monitoreo microsísmico y monitoreo a través del cable TDR.	Equipos de monitoreo geotécnico	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de inclinómetros. • Uso de equipo Robot Leica. • Uso de tecnología de monitoreo microsísmico. • Uso de monitoreo a través del cable TDR.
Implementación del sistema de monitoreo geotécnico.				
<u>Variable Dependiente:</u>	Se refiere a los cambios en la superficie terrestre debido a la extracción de minerales mediante el método sub-level caving.	Medida a través de la magnitud de la subsidencia, la frecuencia de eventos de subsidencia, la deformación del terreno, los riesgos para la seguridad y la infraestructura, así como la eficiencia operativa.	Comportamiento de la subsidencia	<ul style="list-style-type: none"> • Magnitud de la subsidencia. • Frecuencia de eventos de subsidencia. • Deformación del terreno. • Cambios en la geometría de la mina. • Riesgos para la seguridad de los trabajadores y la infraestructura minera.
Comportamiento de la subsidencia en el método de explotación sub-level caving				

3.8. Técnicas e instrumentos

Técnicas de recolección de datos

Según Hernández et al., (2010), las técnicas de recolección de datos son los métodos y procedimientos utilizados para obtener información relevante y precisa en el contexto de una investigación o estudio. Estas técnicas se utilizan para recopilar datos primarios, es decir, datos que se obtienen directamente de la fuente original, en contraposición a los datos secundarios, que son recopilados de fuentes existentes. Esta teoría destaca la importancia de seleccionar adecuadamente las técnicas de recolección de datos para garantizar la calidad y fiabilidad de la información obtenida en un estudio de investigación.

En el contexto del estudio, se llevó a cabo un proceso riguroso de recopilación de datos.

Observación Directa: Se llevó a cabo una observación directa en el sitio minero en la provincia de Yauyos para recopilar datos sobre la topografía del terreno, la configuración de la mina y cualquier evidencia visual de subsidencia. Esta técnica permitió obtener información de primera mano sobre el comportamiento del terreno y la incidencia de la subsidencia en el área de estudio.

Revisión Documental: Se realizó una exhaustiva revisión de literatura científica, informes técnicos y documentos relacionados con la minería sub-level caving, la geotecnia y los sistemas de monitoreo geotécnico. Esta revisión documental proporcionó una base sólida de conocimiento teórico y práctico que respaldó la interpretación de los datos recopilados a través de otras técnicas.

Análisis de Datos Históricos: Se recopilaron y analizaron datos históricos de monitoreo geotécnico y registros de eventos de subsidencia en la mina en estudio. Este análisis permitió identificar tendencias a lo largo del tiempo y evaluar la efectividad de los sistemas de monitoreo previamente implementados.

Instrumento

Se utilizaron los siguientes instrumentos de recolección de datos:

Lista de verificación de observación: Se desarrolló una lista de verificación que incluía aspectos relevantes a observar durante la visita al sitio minero en la provincia de Yauyos, como la topografía del terreno, la presencia de sistemas de monitoreo y cualquier evidencia visual de subsidencia. Esta lista de verificación se utilizó durante la visita para asegurar una recolección sistemática de datos.

Revisión Documental: Se utilizó un software de gestión de referencias bibliográficas para organizar y almacenar los documentos recopilados durante la revisión de literatura. Los documentos incluidos en la revisión fueron seleccionados según su relevancia para el tema de estudio y se utilizaron para fundamentar teóricamente el estudio.

Análisis de Datos Históricos: Se empleó un software de análisis de datos para organizar, procesar y analizar los datos históricos de monitoreo geotécnico y registros de eventos de subsidencia. Se utilizaron herramientas estadísticas para identificar tendencias y patrones en los datos, lo que proporcionó información importante para el análisis del comportamiento de la subsidencia en la mina.

3.9. Métodos de análisis de datos

Investigaciones Básicas

Monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros:

- Identificación de áreas críticas: Se realizará un análisis geotécnico detallado para identificar las zonas de la mina más propensas a la subsidencia.
- Instalación de inclinómetros: Se seleccionarán ubicaciones estratégicas dentro de la mina donde se instalarán inclinómetros para monitorear la deformación del terreno.
- Recopilación de datos: Se registrarán las lecturas de inclinación de forma regular, utilizando protocolos estandarizados.
- Análisis de datos: Se analizarán los datos recopilados para evaluar la relación entre las lecturas de inclinación y la subsidencia observada, identificando patrones y tendencias.
- Evaluación del impacto: Se compararán los datos de monitoreo antes y después de la implementación del sistema de inclinómetros para determinar el impacto en la evaluación de la subsidencia.

Monitoreo geotécnico con el equipo Robot Leica:

- Preparación del equipo: Se asegurará que el Robot Leica esté correctamente configurado y calibrado para su uso en el entorno minero.

- Planificación de la ruta: Se diseñará una ruta de inspección que cubra áreas críticas identificadas previamente para el monitoreo de la subsidencia.
- Ejecución del monitoreo: Se desplegará el Robot Leica siguiendo la ruta planificada, recopilando datos de imágenes y vídeos de alta resolución.
- Análisis de datos: Se procesarán las imágenes y vídeos capturados por el Robot Leica utilizando software especializado para identificar cambios en la topografía y posibles indicios de subsidencia.
- Interpretación de resultados: Se interpretarán los datos obtenidos para evaluar la influencia del monitoreo con el Robot Leica en la detección y evaluación de la subsidencia.

Monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico:

- Instalación de sensores: Se instalarán sensores de monitoreo microsísmico en áreas clave de la mina para detectar eventos de microsismicidad asociados con la subsidencia.
- Configuración del sistema: Se configurará el sistema de monitoreo para registrar y analizar los datos de microsismicidad de manera continua.
- Análisis de datos: Se analizarán los datos registrados por los sensores para identificar patrones de actividad microsísmica relacionados con la subsidencia.
- Correlación con otros datos: Se compararán los datos de monitoreo microsísmico con otros parámetros geotécnicos para evaluar su utilidad en la detección y evaluación de la subsidencia.

Monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR:

- Instalación de cables TDR: Se instalarán cables TDR en áreas críticas de la mina para medir la deformación del terreno de forma continua.
- Configuración del sistema: Se configurará el sistema de monitoreo TDR para registrar y analizar las lecturas de deformación del terreno.
- Recopilación de datos: Se registrarán las lecturas de deformación del terreno de manera regular utilizando los cables TDR.
- Análisis de datos: Se analizarán los datos de deformación del terreno para evaluar su relación con la subsidencia y su utilidad en la evaluación del comportamiento geotécnico.

- Comparación con otros métodos: Se compararán los datos obtenidos a través del monitoreo con cables TDR con los datos de otros métodos de monitoreo geotécnico para evaluar su complementariedad y fiabilidad en la detección de la subsidencia.

3.10. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.

Los datos acopiados, medidos y monitoreados se procesarán por medio de estadísticas, promedios y se calculará el promedio general de la medición del factor de seguridad en el sistema de pernos de sostenimiento empleado, cuadros comparativos de los resultados entre el diseño anterior y el diseño implementado como estándar de trabajo

Después de confirmar la normalización de los datos, se realiza una prueba t de Student para evaluar la homogeneidad de la varianza entre los tratamientos estándar. Si es similar, se rechaza la hipótesis nula de que no hay diferencia en las varianzas de ambos grupos si el valor p de la prueba t es menor que 0.05.

3.11. Desarrollo del trabajo de tesis

3.11.1. Monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros

Se instalaron dos inclinómetros verticales se han instalado en las proximidades de los piques de la Unidad Minera Yauricocha ubicada en el departamento de Lima, provincia de Yauyos.

Adicionalmente, se tomaron también lecturas de otro inclinómetro vertical instalado en el dique de la presa.

El objeto principal de la auscultación geotécnica es comprobar que el comportamiento del terreno o de la estructura estudiada está en concordancia con los estudios de estabilidad realizados en la fase de diseño, y en caso contrario aportar datos que permitan corregir las hipótesis efectuadas para la predicción de su comportamiento, de forma que se puedan tomar, cuando sea necesario, las medidas oportunas para garantizar su seguridad.

De acuerdo con este objetivo las magnitudes que usualmente se deben controlar son las siguientes:

- Movimientos superficiales, mediante métodos topográficos que permiten definir la extensión superficial de la posible zona afectada por el fenómeno de inestabilidad.

- Movimientos en el interior del terreno, mediante equipos instalados en sondeos o directamente durante la construcción de la obra que permiten definir la profundidad de la zona afectada por los movimientos y controlar su comportamiento.
- Presiones intersticiales en el interior del terreno, y control de sus variaciones, ya sean producidos los cambios por motivos estacionales o provocados por la propia construcción de la estructura, obras de drenaje, etc., de forma que se pueda deducir su influencia en los movimientos.

Se describe a continuación la instrumentación instalada como elemento de control geotécnico del macizo rocoso donde se ubican los piques de la unidad minera.

3.11.1.1. Instrumentación inclinométrica

La instrumentación mediante inclinometría permite localizar y medir los desplazamientos laterales y deformaciones del terreno. La metodología para la medida de los inclinómetros es la recomendada por la norma ASTM D6230-13 (2013): “Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers”, para la instrumentación del terreno mediante inclinómetros.

Básicamente la metodología para la obtención de resultados inclinométricos es la siguiente:

- Instalación de la tubería inclinométrica.
- Realización de la primera lectura, considerada medida origen o Línea Base. Esta lectura sirve de referencia a las posteriores para conocer los desplazamientos existentes y para obtener el perfil de la tubería instalada.
- Medidas posteriores de seguimiento.

3.11.1.2. Trabajos realizados

Se ha realizado la instalación de dos (02) inclinómetros verticales en la Unidad Minera Yauricocha y la toma de las lecturas que conforman la Línea Base, incluyendo la capacitación al personal de mina para que puedan realizar el monitoreo periódico con toma de medidas inclinométricas de seguimiento.

Los inclinómetros se han instalado para el control de la estabilidad del macizo rocoso donde se ubican los piques de la unidad minera.

En la tabla 7 se resumen las características de los inclinómetros instalados.

Tabla 7:

Características de las instalaciones inclinométricas

Inclinómetro ID	Profundidad Inclinómetro (m)	Coordenadas UTM			Sobran te (m)	Incl.	Orientación A+ (°)
		Norte	Este	Cota (m.s.n.m .)			
INCL-1	200.00			4645.14	0.30	-90	N 122
IN-2	199.50			4645.10	0.45	-90	N 075

Adicionalmente se tomaron también lecturas del inclinómetro IN-3 que está instalado en el dique de la presa de relaves de la unidad. En la tabla 8 se presentan las principales características de este sondeo inclinométrico.

Tabla 8:

Características del inclinómetro vertical instalado en el dique

Inclinómetro ID	Profundidad Inclinómetro (m)	Coordenadas UTM			Sobran te (m)	Incl.	Orientación A+ (°)
		Norte	Este	Cota (m.s.n.m .)			
INCL-03	49.5	8638835.8	423353.36	4532.98	0.10	-90	N 005

3.11.2. Monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico:

Se realiza mediante el registro e interpretación de señales microsísmicas, producto del reacomodo de esfuerzos posterior al minado, como por sismicidad inducida por las voladuras, que para eventos recurrentes y de altas magnitudes podrían afectar el sostenimiento de las labores.

Analiza los sismos de pequeña escala que ocurren en la operación minera debido a actividades mineras, La ciencia microsísmica se originó a partir de los terremotos ($M_w < 0$). Estos eventos son demasiado bajos por lo que no se puede sentir en la superficie, pero estos eventos son detectados por los geófonos, el monitoreo es un método pasivo, significando que se puede escuchar la liberación de energía que se ha producido bajo tierra. La sismicidad pasiva se denomina "Actividad". Error en localización:

El sistema actual, está conformado por un total de 10 geófonos sistema permanente, una incertidumbre de 5% en V_p y V_s (velocidades de las ondas P y S) respectivamente de acuerdo con la recomendación de IMS.

Tabla 9:

Coordenadas de la ubicación de los geófonos

Gabinete	N° GEOFONO	LABOR	NIVEL	PISO	Ubicación Geofono				Tipo de medición	Serie de medición	Smart Sensor PCB	Serie	Junctio n Box PCB	Serie
					ESTE	NORTE	COTA	AZIMUTH						
C. Catas NV 1120 P.05	1	CX.3898 NW	1020	0	23586.38	15148.91	3840.172	316d23'49"	Uniaxial	200006.15	SENS-PCB-016-6	ZT0007513	JB-PCB-002-6	ZT0007139
	2	SN 7105 NE	1120	0	23919.48	15173.56	3824.442	53°57'59.2"	Triaxial	200105.15	SENS-PCB-016-6	ZT0008134	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0007954
	3	SN 7615 SW	1120	5	23932.57	15054.45	3813.747	172°31'58.7"	Triaxial	200136.15	SENS-PCB-016-6	ZT0008367	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0008006
	4	ES.3668 NW	1070	0	23866.77	15082.69	3840.733	349d30'58"	Uniaxial	200095.15	SENS-PCB-016-6	ZT0008132	JB-PCB-SUB-002-6	ZT0007952
C. MASCOTA NV 1220 P.05	5	SN2295 NE	1170	0	23707.94	15331.38	3742.108	35°6'41"	Triaxial	190007.15	SENS-PCB-016-7	ZT0008133	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0004773
	6	SN8133 SE	1220	16	23642.86	15274.55	3709.92	96°46'6.0"	Uniaxial	200007.15	SENS-PCB-016-6	ZT0007514	JB-PCB-002-6	ZT0007192
C. Esperanza NV 1120 P.11	7	CX.1566 SE	1070	0	23580.61	15902.51	3836.81	175°17'39.5"	Triaxial	190006.15	SENS-PCB-016-6	ZT0005227	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0004762
	8	ES.3418 NW	1020	0	23632.07	15725.73	3890.179	171°10'0.7"	Uniaxial	200081.15	SENS-PCB-016-6	ZT0007617	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0007971
	9	SN.6102 SE	1120	11	23647.93	15682.34	3825.685	166°27'12.2"	Triaxial	200137.15	SENS-PCB-016-6	ZT0008368	JB-GEO-SUB-001-2	ZT0008007
	10	SN.2383 W	1070	0	23560.14	15520.94	3846.321	259d35'46"	Uniaxial	200093.15	SENS-PCB-016-6	ZT0008118	JB-PCB-002-6	ZT0007924

Figura 4:
Gabinete N°01 – Cuerpo Esperanza.

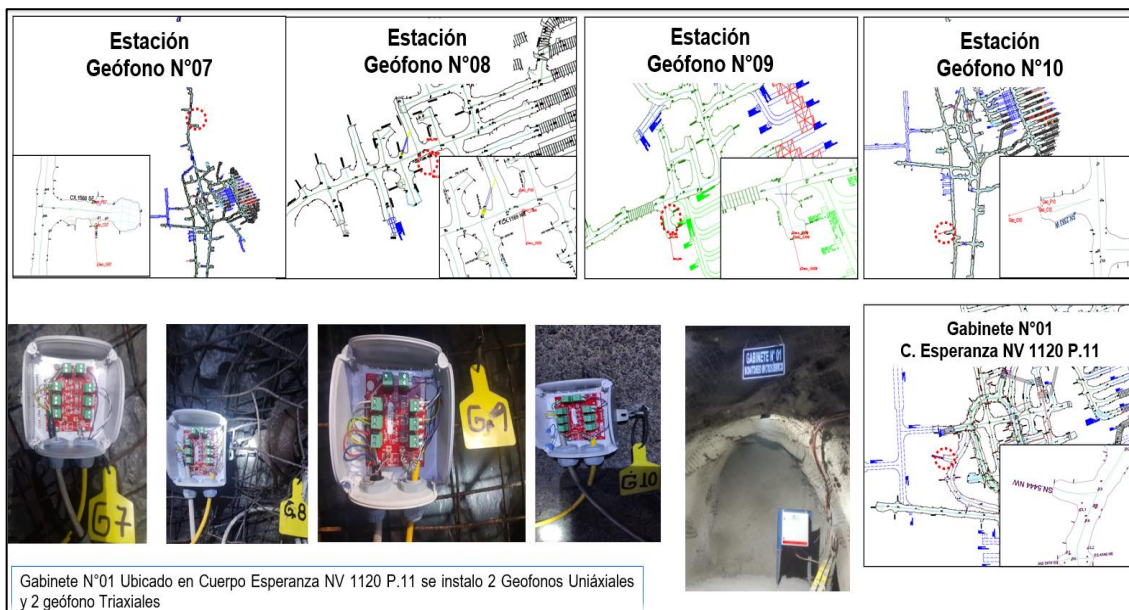


Figura 5:
Gabinete N°02 – Cuerpo Catas -Antacaca

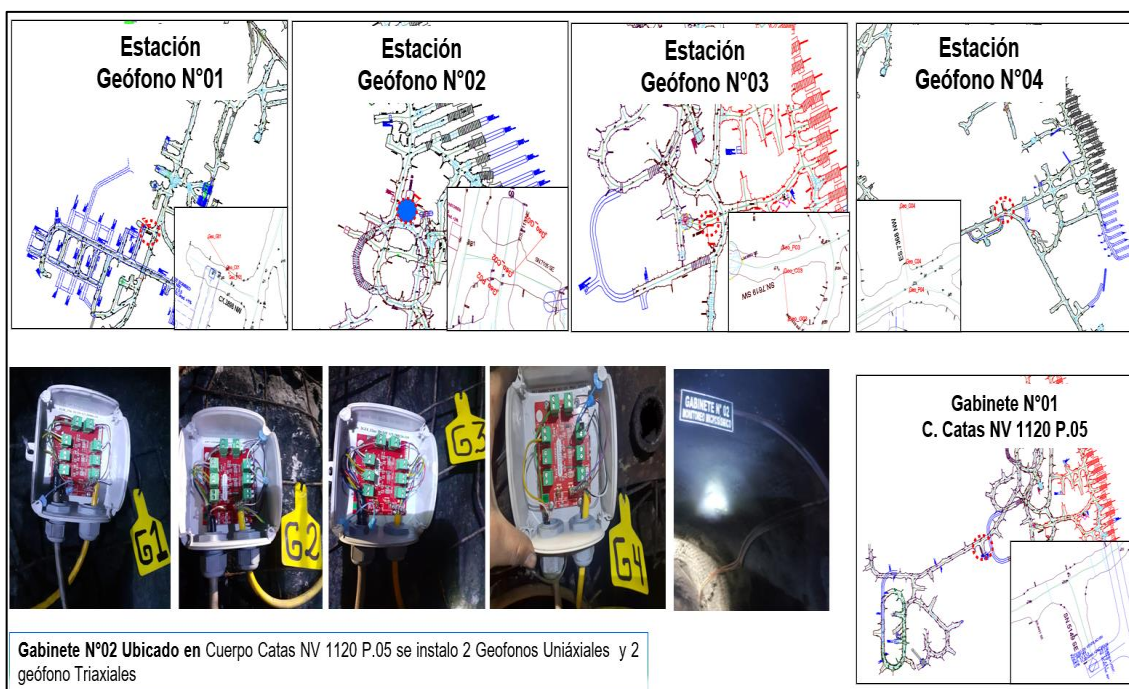
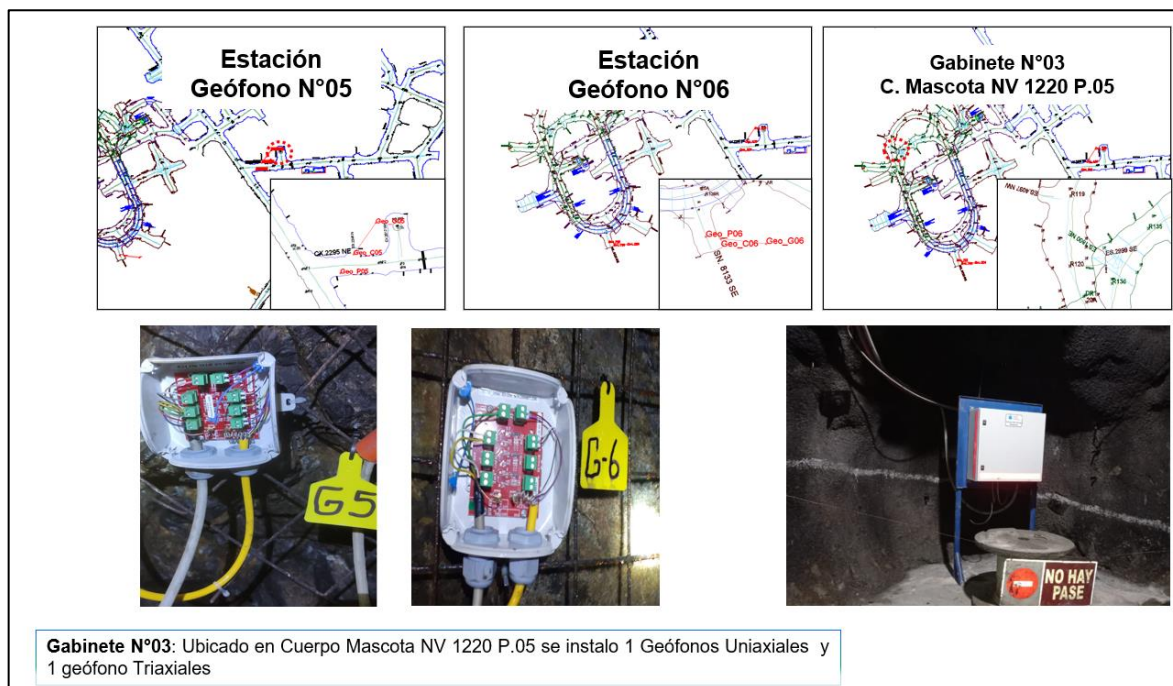


Figura 6:

Gabinete N°03 – Cuerpo Mascota.



3.11.3. Monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR:

Es una técnica de seguimiento y diagnóstico utilizada en la industria de la minería y otras aplicaciones industriales para evaluar la integridad y el estado de los cables conductores enterrados o instalados en condiciones subterráneos. Esta técnica se basa en la medición de las reflexiones de las señales electromagnéticas enviadas a lo largo del cable.

El proceso de monitoreo del Cable TDR implica el envío de pulsos de señales electromagnéticas a través del cable en cuestión. Estos pulsos se propagan a lo largo del cable y generan reflexiones cuando encuentran cambios en la impedancia, como discontinuidades, roturas o daños en el cable. Estas reflexiones son detectadas y registradas por un equipo TDR, que calcula la ubicación y la magnitud de las reflexiones, lo que permite identificar la posición y la naturaleza de los posibles problemas en el cable.

El monitoreo del Cable TDR es valioso en entornos mineros y subterráneos porque permite detectar de manera temprana problemas en los cables, como roturas o daños, lo que contribuye a la seguridad de las operaciones y a la planificación de mantenimiento preventivo. Además, esta técnica puede utilizarse para evaluar la longitud de un cable y detectar cambios en su longitud que podrían indicar deformaciones o movimientos en la geología circundante. 50

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La explotación en mina Yauricocha no se detiene, se sabe que el método aplicado es el Sub Level Caving (hundimiento por subniveles) el presente método se aplica sobre todo cuando la estructura mineralizada es de cuerpos masivo y cuando el tipo de roca es débil ya que se aprovecha de esto para hacer el minado masivo aprovechando el flujo gravitacional, Yauricocha cumple con esa condición principal y hasta la actualidad se sigue explotando de esa manera y la condición del macizo rocoso se encuentra dentro de lo aceptable en temas de estabilidad.

4.1. Generalidades de la mina

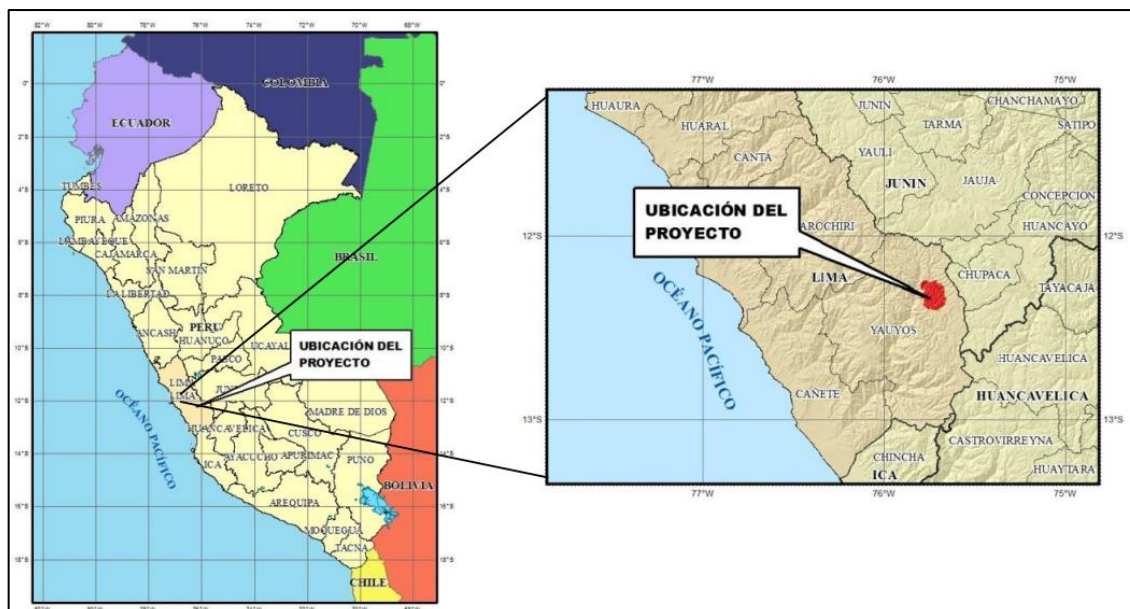
4.1.1. Ubicación.

La UP Yauricocha, tiene como titular a la empresa Sociedad Minera Corona S.A., la misma que se encuentra ubicado en el distrito de Alis, provincia de Yauyos,

departamento de Lima, sobre la cabecera del río Cañete. Desde el punto de vista geográfico se ubica en la Sierra Central del Perú, en el flanco oeste de la cordillera Occidental de los Andes, entre los 4,150 y 5,000 msnm.

Figura 7:

Localización del proyecto



4.1.2. Accesibilidad.

Para acceder a la UP Yauricocha, se utiliza cualquiera de las 03 rutas de accesos partiendo desde la ciudad de Lima, tomando como vías principales las Carreteras Panamericana Sur y Central.

El recorrido se indica en la siguiente tabla:

Tabla 10:

Rutas de acceso via aérea

Tramo				Distancia (km)	Tiempo (hr:min)	Medio
Lima	La Oroya	Pachayo	Yauricocha	330	00:45	Avión
Lima	La Oroya	Huancayo	Yauricocha	420	00:60	Avioneta
Lima	Cañete	Lunahuaná	Yauricocha	343	00:55	Camioneta
Total:					02:40	

a

4.2. Marco geológico

Geomorfología

El área de la Mina Yauricocha se caracteriza por formar parte de la cabecera de cuenca del río Cañete, por ser la naciente de la quebrada Chumpe, tributaria del río Cañete.

Debido al marcado intemperismo de las formaciones geológicas piritosas en la zona se ha desarrollado principalmente una geomorfología de origen glacial, con valles en "U" que se suceden en forma descendente formando terrazas cortas en las cuales se ubican lagunas dispuestas en forma escalonada.

El área se encuentra limitada por cerros cuyas cumbres muestran un rápido descenso de nivel debido a sus laderas empinadas. La cuenca de Yauricocha está alojada en depresiones onduladas mayormente con superficies rocosas, rodeada de cumbres que en promedio bordean los 4,850 msnm, siendo la cumbre más alta el cerro Astomarca con una altitud de 5,019.8 msnm.

Geología regional

A nivel regional la zona está conformada por capas de rocas sedimentarias que presentan una orientación aproximada de NW-SE, asociadas a un fuerte plegamiento que ha generado la formación de anticlinales y sinclinales en toda la zona.

La presencia de stocks de origen ígneo intrusivo y extrusivo, que tienen geometrías irregulares y que están distribuidas de manera errática, al contacto con las capas sedimentarias, han formado concentraciones de mineral económico en gran parte de ellos.

Entre las capas sedimentarias más potentes están la Formación Jumasha, Formación Casapalca y Formación Celendín.

Estratigrafía

Según la apreciación de campo, la Columna Estratigráfica Regional y la Columna Estratigráfica Generalizada del Perú, Central Cordilleras Occidental y Oriental, se determina

que la estratigrafía del área de estudio de la más antigua a la más reciente está conformada de la siguiente manera:

Formación Carhuáz – Grupo Goyllarisquiza – Cretáceo Inferior

Constituida por lutitas con intercalaciones de areniscas, yeso y capas delgadas de calizas en la parte inferior, correspondientes al Valanginiano-Barremiano, los cuales se aprecian al NE y NW del área de estudio.

Formación Farrat – Grupo Goyllarisquizga – Cretáceo Inferior

Constituida por bancos de areniscas y cuarcitas grises blanquecinas con estratificación cruzada, intercaladas con lutitas grises a pardo rojizas. Su edad corresponde al Aptiano. En el área de influencia de la Mina Yauricocha no se observan directamente las rocas de esta formación.

Formación Pariahuanca – Cretáceo Inferior

Constituida por calizas arenosas, gris pardo, intercalada con lutitas y areniscas de colores pardos amarillentos y rojizos, correspondientes al Barremiano, se aprecian al NE-E, NW y SW del área de estudio.

Formación Chulec – Cretáceo Inferior

Constituida por calizas, areniscas calcáreas, margas y lutitas de color blanquecino a gris parduzco y calizas margosas de color pardo amarillento en la parte superior. Su edad corresponde al Barremiano. Se aprecia al NE-E, NW y SW del área de estudio.

Formación Pariatambo – Cretáceo Inferior

Constituida por calizas de color oscuro a negras, intercaladas con margas y lutitas calcáreas de color gris oscuro. Su edad corresponde a Barremiano a Aptiano. Se aprecia al NE-E y NW del área de estudio.

Formación Jumasha – Cretáceo Superior

Constituida por calizas masivamente estratificadas en bancos medianos y gruesos con intercalaciones lutáceas en la base, alcanzando una potencia de 800 m. Su edad corresponde del Aptiano al Turoniano. Se aprecia al NE, N y todo el flanco E del área de estudio.

Formación Celendín – Cretáceo Superior

Constituida por chert y lutitas, es una unidad litológica de facie más arcillosa presentando potencias de 100 a 300 m. Su edad corresponde al Coniaciano-Santoniano. Se aprecia en todo el flanco E de la mina, hacia el contacto con la caliza. Es conocida localmente como France Chert.

Formación Casapalca – Cretáceo Superior a Terciario Inferior

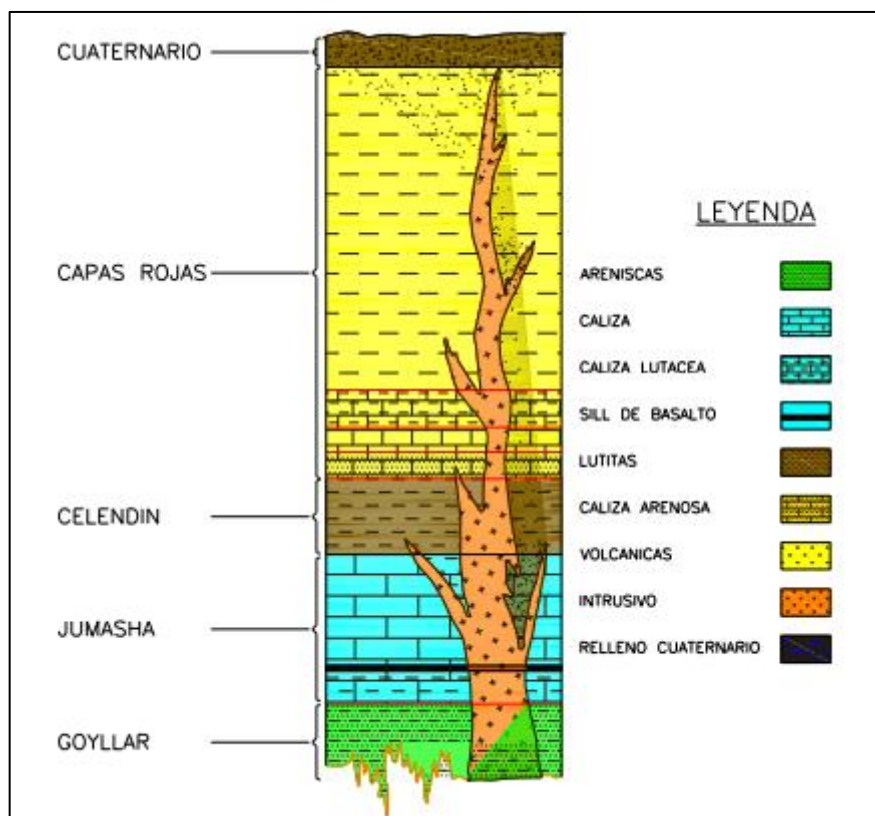
Constituida por areniscas, lutitas y calizas arenosas correspondientes al Campaniano Paleoceno. Su potencia varía de 500 a 2000 m. Se aprecia en el N, E y SE del área de influencia de la mina.

Formación Tantará – Eoceno Superior

Compuesta por rocas volcánicas neógenas, derrames volcánicos de composición andesítica a riolítica discordantes a la Formación Casapalca.

Figura 8:

Columna estratigráfica del área de Yauricocha



Geología local

El área está conformada por capas sedimentarias que han sido intruidas por plutones de composición granodiorítica a cuarzo-monzonítica, que ha dado lugar a un metamorfismo de contacto que está controlado por la orientación del plegamiento de los estratos siguiendo un rumbo NW-SE, ocurriendo la mineralización a través de este control estructural, existen también

estructuras tensionales (vetas). En algunas zonas se aprecia pseudo-capas volcánicas como en la Formación Tantará.

Los cuerpos mineralizados están emplazados en la caliza Jumasha y se encuentran agrupados tanto dentro de la caliza como a lo largo del contacto con las lutitas Celendín (France Chert) y en contacto con las masas intrusivas. Son de configuración irregular, presentan forma lenticular con sus ejes mayores paralelos al rumbo general de los estratos (NW-SE) y buzan a gran ángulo al NE o son aproximadamente verticales.

Las vetas ocurren tanto en el intrusivo como en la caliza Jumasha, pero parecen desarrollarse mejor en el primero, siendo su potencia variable de 0.50 m a 2.50 m.

La litología local está constituida por las Formaciones Goyllarisquizga, Jumasha, Celendín y Casapalca.

- La Formación Goyllarisquizga presenta una potencia de 300 m y está conformada por areniscas gruesas blancas a grises, bandeadas con lutitas carbonáceas, así como pequeños mantos de carbón de mala calidad y arcilla.
- La Formación Jumasha está compuesta por caliza masiva de color gris claro sucedida por lentes discontinuos de calizas marrones y grises, cerca al contacto se aprecia lutitas carbonosas, también están presentes pseudo-brechas de probable origen sedimentario y un sill de basalto.
- La Formación Celendín está compuesta por lutitas silicificadas con intercalaciones de caliza recristalizada.
- La Formación Casapalca está compuesta de lutitas rojas calcáreas, calizas puras y calizas arenosas rojizas, ocasionalmente se ha reportado la presencia de flujos de lavas y capas tufáceas.

Localmente no se aprecian las Formaciones Chulec, Pariahuanca y Pariatambo. Las rocas intrusivas presentan contactos definidos y de gran ángulo con las capas sedimentarias, así como una tendencia a seguir el rumbo regional y plano de estratificación, son de composición granodiorítica a cuarzo-monzonítica. Varían gradualmente de tamaño desde unos cuerpos de unos cientos de metros cuadrados hasta grandes masas que han cubierto varios kilómetros cuadrados. Es común la ocurrencia de apófisis pequeños en los bordes de los intrusivos mayores.

Geología estructural

Las capas sedimentarias muestran una orientación de NW-SE coincidente con el plegamiento que afecta toda la zona, pudiéndose ver como consecuencia de ello la formación de varios anticlinales y sinclinales, varios de los cuales presentan un alto valor de buzamiento en las capas sedimentarias.

Debido a una falla de desgarre del basamento, el rumbo NW de los sedimentos plegados fue rotado por esfuerzos horizontales en un ángulo de 20° a 30° en sentido horario y como resultado de esta rotación se desarrollaron tres sistemas principales de cizallamiento y fracturamiento con rumbos de E-W, NW-SE y NE-SW. El primer sistema es casi vertical con buzamiento 80° al N o S, el segundo tiene buzamiento de 70° al NE debido a la influencia de los estratos en la dirección del cizallamiento, y el tercer sistema tiene buzamiento 75°SE.

En el área de Yauricocha se aprecia el Anticlinal Purísima Concepción y el Sinclinal France Chert en la Mina Central, el Anticlinal Cachi Cachi y el Sinclinal Huamanripa al Norte y el Sinclinal Quimpara inmediatamente al Sur de la laguna Pumacocha, Norte de la Mina San Valentín.

El Anticlinal Purísima Concepción es una estructura local apretada y definida por un sill de basalto de 17 m de espesor. El "trend" de su eje es aproximadamente N50°W con suave "plunge" de 20° al SE. El Sinclinal France Chert, ubicado al NE de la mina, es un pliegue igualmente apretado con el "trend" de su eje que cambia de N35°W (en el S) a N65°W (en el N) y suave "plunge" de 40° al SE. El Anticlinal Cachi-Cachi- Prometida, tiene su eje con rumbo aproximado de N80°W a N70°W, y sus flancos buzanan respectivamente al Norte (Prometida) y Sur (Cachi-Cachi) con plunge al E, el área se encuentra en el extremo Norte del intrusivo mayor a 2 km al N de Mina Central.

El Sinclinal Quimpara se ubica inmediatamente 1 km al Sur del desagüe de la laguna Pumacocha, tiene un eje con rumbo N45°W, su flanco Este descansa sobre el intrusivo con ángulo de 70° a 75° al W y el flanco Oeste con aproximadamente 80°E.

Durante el plegamiento, evento pre y/o contemporáneo al intrusivo, tuvo lugar la primera fracturación desarrollándose fallas longitudinales paralelas al rumbo regional de la estratificación. De todas estas fallas, resalta la falla Yauricocha que aparece a lo largo del contacto caliza Jumasha-lutita Celendín la cual se extiende a gran distancia al SE de la mina Ipillo y continua al N, detrás del cerro Huamanripa, paralelo y a lo largo de la laguna Silacocha.

Este conjunto de fracturas que forman bloques fallados, a través de los dominios litológicos del área, juntamente con la falla Yauricocha representan la fracturación más importante y ejercieron un fuerte control en el emplazamiento de la mineralización.

Las vetas pueden agruparse en tres sistemas principales: el primer sistema de rumbo N70°-80°W con buzamiento 60°-80°SW o NE; el segundo sistema de rumbo N70°-80°E con buzamiento 65°-80° NW; y el tercer sistema de rumbo ligeramente E-W con buzamiento N y S. El contacto caliza Jumasha - France Chert ha influenciado fuertemente en la forma y posición de los cuerpos Cuye y Catas. Este contacto tiene un rumbo de NW a SE y buza entre 85° y 70° al NE.

4.3. Impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico en la evaluación de la subsidencia

4.3.1. Monitoreo Robot Leica (subsidencia)

Sistema empleado para medir el asentamiento y desplazamiento superficial de hitos o estaciones, dichos hitos están constituidos por una base de concreto, una varilla metálica anclada a la base y en el extremo superior de la varilla se ubica un prisma.

En la unidad minera Acumulación Yauricocha se han instalado un total de 36 hitos superficiales, el monitoreo de estos hitos se realiza con el robot Leica Nova TM50, equipo que cuenta con un alcance de 3500 m con una precisión de (0.6 mm+1 ppm/typ. 2.4 s).

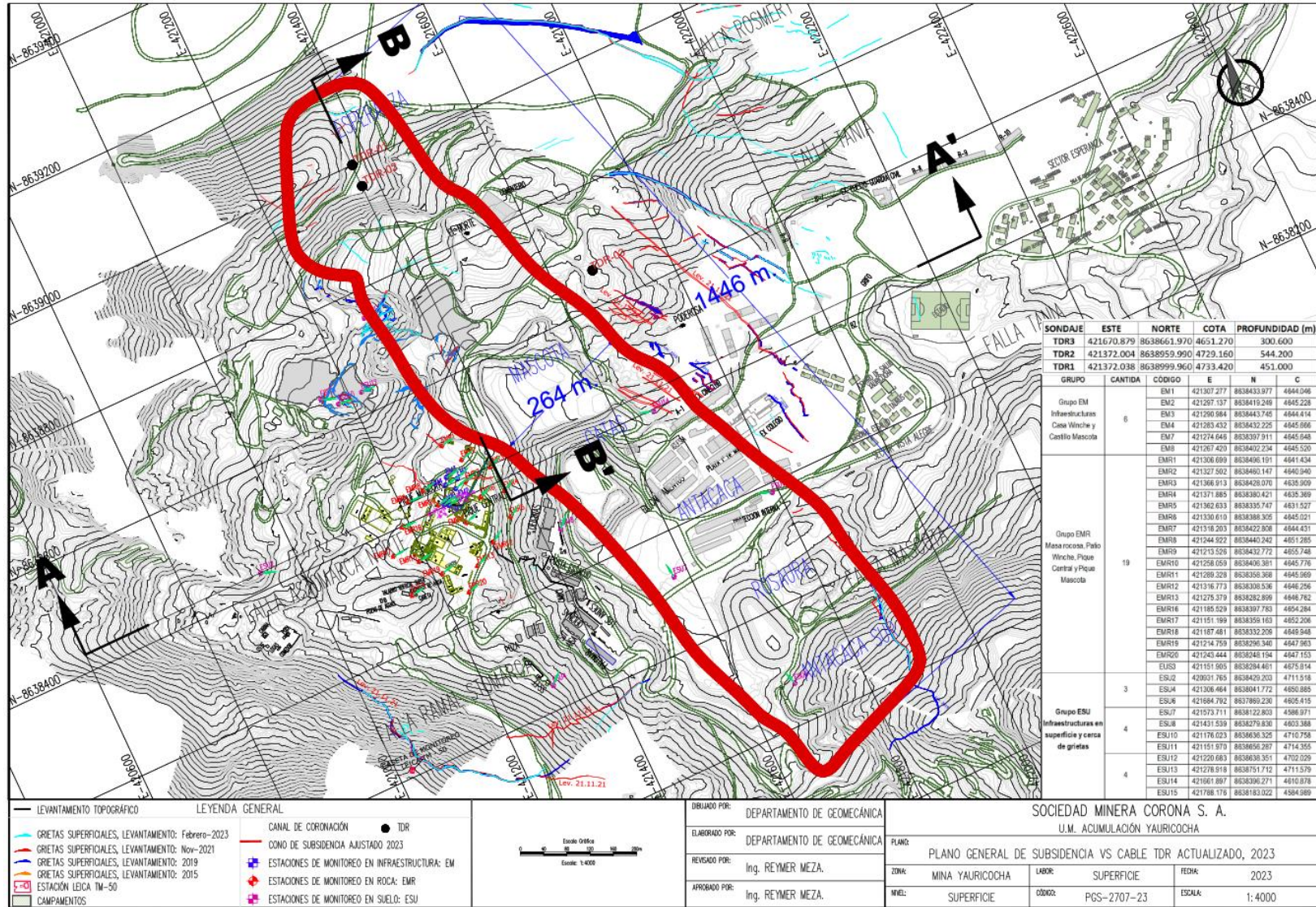
En el siguiente cuadro se presentan los rangos correspondientes a los 3 niveles de criticidad empleados en el análisis riesgo de la velocidad de desplazamiento para cada hito.

Tabla 11:

Rango de criticidad según la velocidad de desplazamiento

Nivel de criticidad	Velocidad de desplazamiento	Medida de Control
Nivel 3	Peligro >2 cm/día	Paralización inmediata, reunión inmediata con los involucrados para decidir acciones correctivas a tomar.
Nivel 2	Advertencia de peligro >1 cm/día o <=2 cm/día	Incrementar la frecuencia de monitoreo de 24 a 48 lecturas al día.
Nivel 1	Desplazamiento normal <=1 cm/día	Elaborar informe semanal para Gerencia de Operaciones, continuar con el monitoreo normal de 24 lecturas al día.

Figura 9:
Plano de Ubicación Monitoreo de subsidencia – Robot leica



Registro de monitoreo

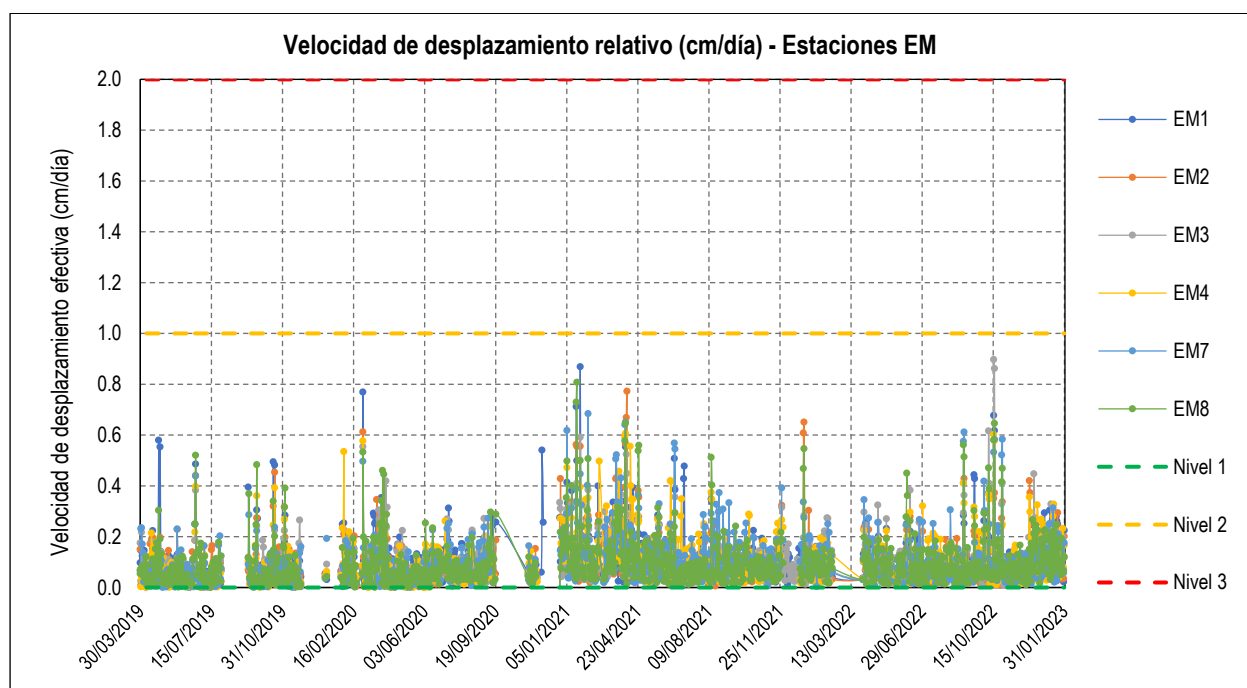
Estaciones EM, instaladas cerca de infraestructuras: Casa Winche y Castillo Mascota

Velocidad de desplazamiento

Los 6 hitos, situados cerca de infraestructuras principales, han registrado hasta enero de 2023 velocidades de desplazamiento en un nivel de criticidad tolerable: Nivel 1.

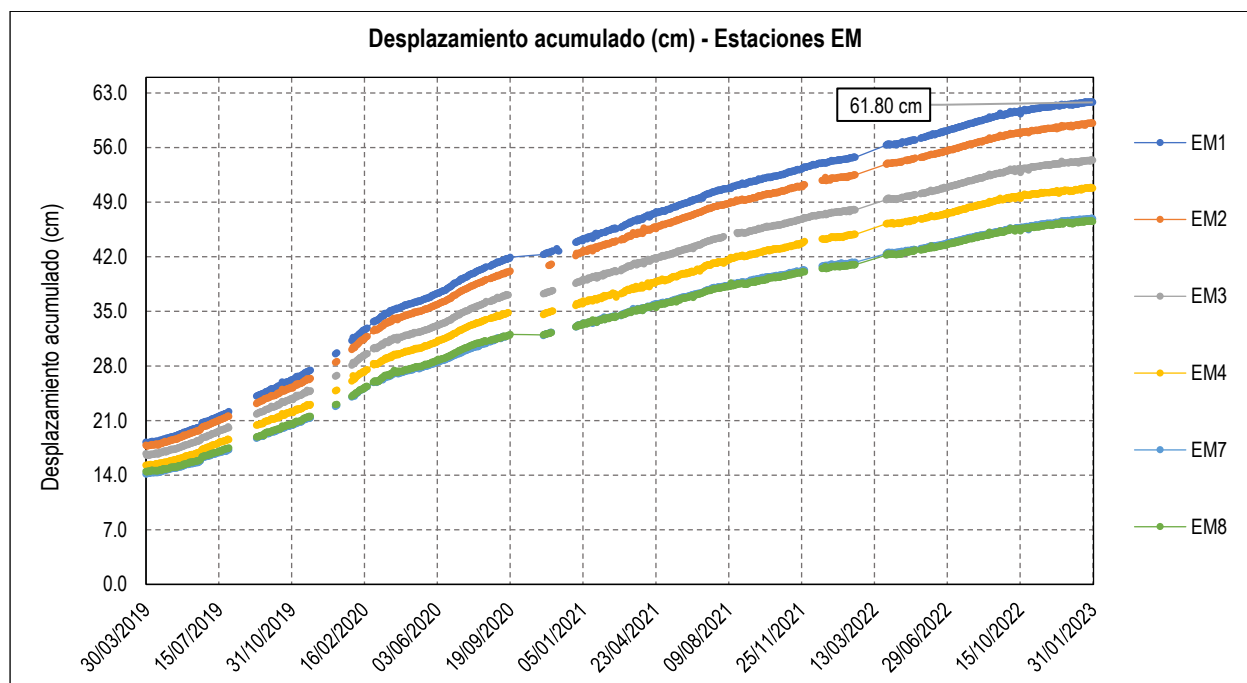
Figura 10:

Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones EM



Desplazamiento acumulado

La estación EM1, situada al este de la Casa Winche del Pique Mascota, ha registrado el mayor desplazamiento acumulado, con un total de 61,80 cm desde septiembre de 2017, según la interpretación geotécnica.

Figura 11:*Desplazamiento acumulado (cm), estaciones EM***Interpretación de los datos registrados en las estaciones EM**

El desplazamiento relativo de las estaciones EM, monitoreado entre el 29 de diciembre de 2022 y el 31 de enero de 2023 (33 días), varió de 0,24 cm (EM8) a 0,33 cm (EM1) con dirección al NE, a una velocidad de 0,01 cm/día. y en un nivel de criticidad tolerable (Nivel 1)

El desplazamiento acumulado de las estaciones EM, monitoreado entre el 4 de septiembre de 2017 y el 31 de enero de 2023 (5.4 años), varió de 46,52 cm (EM8) a 61,80 cm (EM1) con dirección al NE, a una velocidad de 0,03 cm/día y en un nivel de criticidad tolerable (Nivel 1).

Tabla 12:

Resumen de monitoreo de Hitos EM.

PUNTOS DE MONITOREO				ANÁLISIS DE MONITOREO														
				MOVIMIENTO RELATIVO					MOVIMIENTO ACUMULADO				Azimut (°)	Orientación	Nivel de alarma	Tendencia		
				Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)						
Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)	Dxy	Dz	Dxyz													
CÓDIGO	Fecha de medición			N° de días	Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)	Velocidad instantánea (cm/día)	N° de días acumulados	Dxy	Dz	Dxyz	Velocidad acumulada (cm/día)	Azimut (°)	Orientación	Nivel de alarma	Tendencia	
	Inicial 2017	Fecha anterior	Fecha actual															
EM1	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.22	-0.24	0.33	0.01	1974	40.9	-46.3	61.8	0.031	72°	NE	0.01	Constante	
EM2	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.24	-0.22	0.33	0.01	1974	42.7	-40.8	59.1	0.03	73°	NE	0.01	Constante	
EM3	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.25	-0.17	0.3	0.009	1974	35.2	-41.4	54.36	0.028	82°	NE	0.009	Constante	
EM4	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.28	-0.15	0.32	0.01	1974	31.3	-40	50.78	0.026	83°	NE	0.01	Constante	
EM7	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.24	-0.16	0.29	0.009	1974	29.5	-36.4	46.86	0.024	78°	NE	0.009	Constante	
EM8	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.24	-0.03	0.24	0.007	1974	27.9	-37.2	46.52	0.024	78°	NE	0.007	Constante	
PROMEDIO				33	0.24 cm	-0.16 cm	0.30 cm		1974	34.59 cm	-40.36 cm	53.24 cm		78°			0.009	
					0.007 cm/día	-0.005 cm/día	0.009 cm/día	0.009 cm/día		0.018 cm/día	-0.020 cm/día	0.027 cm/día	0.027 cm/día					
					2.70 cm/año	-1.81 cm/año	3.32 cm/año	3.32 cm/año		6.40 cm/año	-7.46 cm/año	9.84 cm/año	9.84 cm/año					

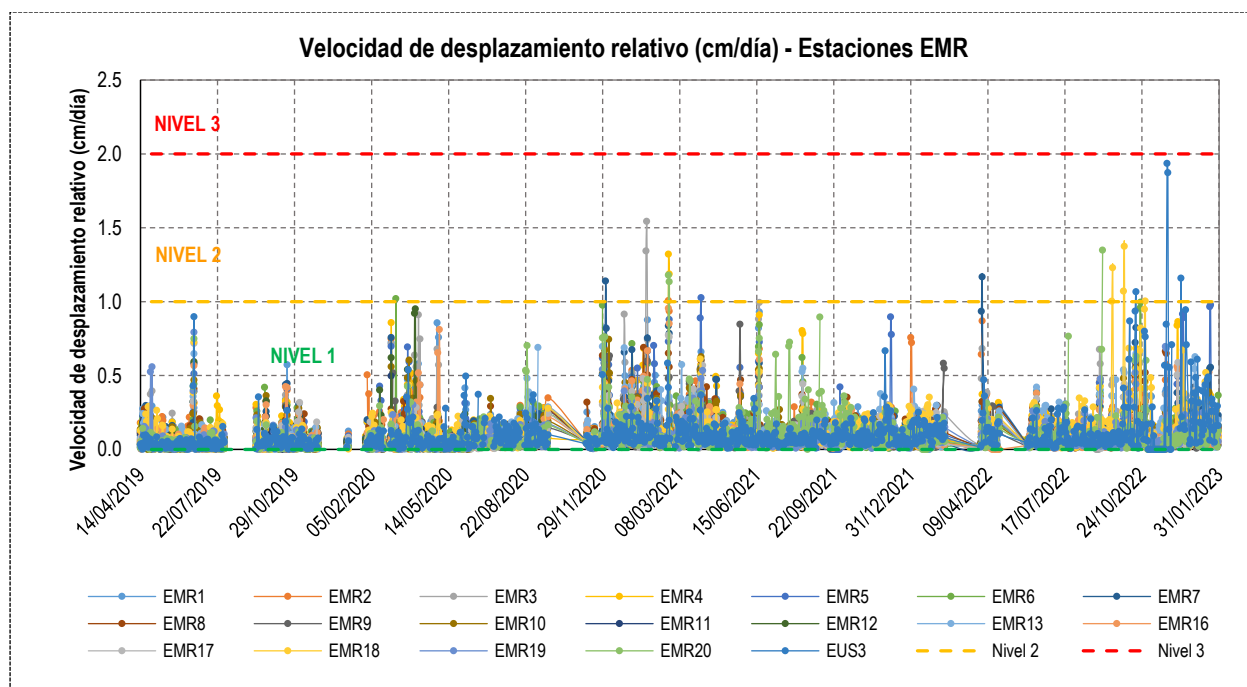
Estaciones EMR, instaladas sobre masa rocosa: Patio Winche, Pique Central y Pique Mascota

Velocidad de desplazamiento

los 19 hitos, situados sobre masa rocosa cerca de infraestructuras principales, registraron hasta enero de 2023 velocidades de desplazamiento con criticidad Nivel 1, sin cambios anómalos y en condiciones tolerables..

Figura 12:

Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones EMR

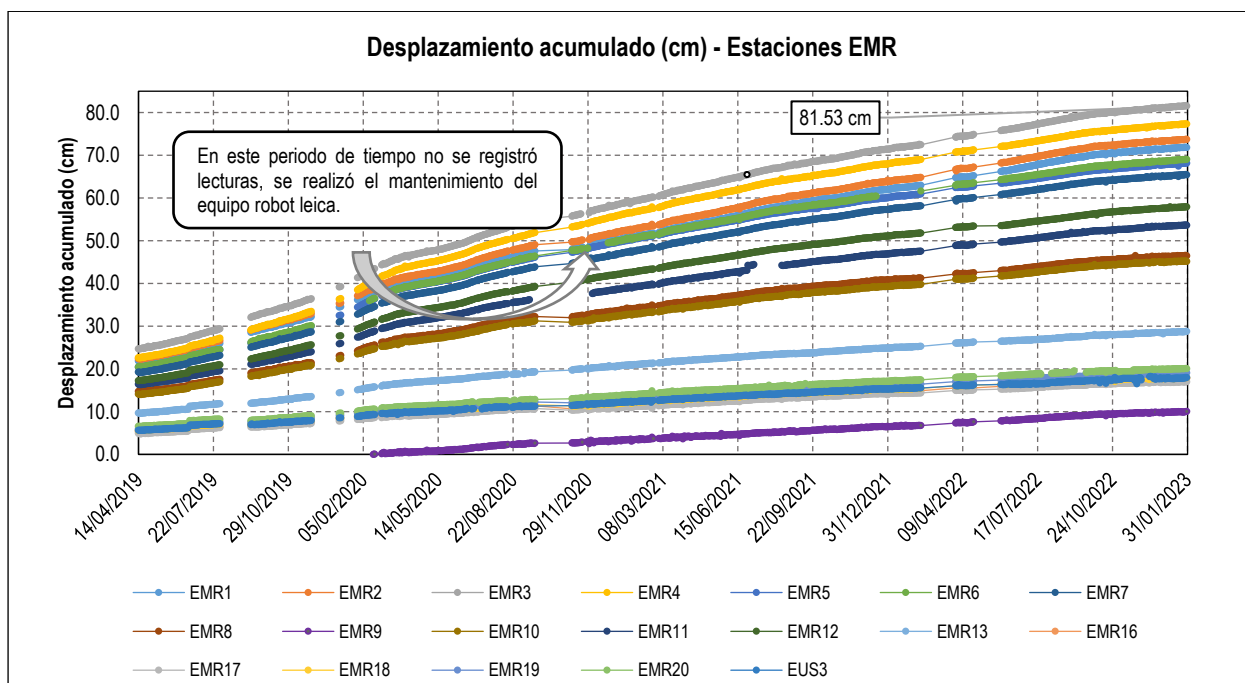


Desplazamiento acumulado

La estación EMR3, ubicada al este de la Casa Winche del Pique Mascota, ha registrado el mayor desplazamiento acumulado con un total de 81,53 cm desde septiembre de 2017.

Figura 13:

Desplazamiento acumulado (cm), estaciones EMR



Interpretación de los datos registrados en las estaciones EMR

Entre el 29 de diciembre de 2022 y el 31 de enero de 2023, el desplazamiento relativo de la estación EMR osciló entre 0,18 cm (RMR20) y 1,23 cm (EMR5), con dirección NE y una velocidad de 0,01 cm/día, manteniéndose en un Nivel 1 de criticidad tolerable. El desplazamiento acumulado, monitoreado desde el 4 de septiembre de 2017 hasta el 31 de enero de 2023, varió entre 10,05 cm (EMR9) y 81,53 cm (EMR3), también con dirección NE y una velocidad constante de 0,02 cm/día.

Tabla 13:

Resumen de monitoreo de Hitos EMR.

ANÁLISIS DE MONITOREO																	
Registro de monitoreo				MOVIMIENTO RELATIVO					MOVIMIENTO ACUMULADO				Azimut (°)	Orientación	Nivel de alarma (cm/día)	Tendencia	
				CÓDIGO	Fecha de medición			N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)					N° de días acumulados
Inicial	Medición anterior	Última medición	Dxy		Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)	Dxy		Dz	Dxyz							
2017																	
EMR1	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.43	-0.2	0.48	0.014	1974	47.55	-53.84	71.83	0.036	71°	NE	0.01	Constante
EMR2	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.35	-0.22	0.41	0.012	1974	49.4	-54.76	73.75	0.037	70°	NE	0.01	Constante
EMR3	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.35	-0.28	0.45	0.014	1974	52.99	-61.95	81.53	0.041	63°	NE	0.01	Constante
EMR4	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.44	-0.17	0.47	0.014	1974	54.42	-54.94	77.33	0.039	59°	NE	0.01	Constante
EMR5	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	1.02	-0.69	1.23	0.037	1974	48.7	-47.67	68.15	0.035	58°	NE	0.04	Constante
EMR6	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.24	-0.48	0.53	0.016	1974	50.63	-46.98	69.07	0.035	65°	NE	0.02	Constante
EMR7	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.28	-0.28	0.39	0.012	1974	46.56	-45.97	65.43	0.033	70°	NE	0.01	Constante
EMR8	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.19	-0.08	0.2	0.006	1974	30.15	-35.36	46.47	0.024	80°	NE	0.01	Constante
EMR9	19/02/2020	29/12/2022	31/01/2023	33	0.29	0	0.29	0.009	1077	7.93	-6.18	10.05	0.009	80°	NE	0.01	Constante
EMR10	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.2	-0.06	0.21	0.006	1974	27.41	-35.9	45.17	0.023	77°	NE	0.01	Constante
EMR11	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.28	-0.16	0.32	0.01	1974	34.11	-41.38	53.63	0.027	73°	NE	0.01	Constante
EMR12	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.31	-0.13	0.34	0.01	1974	39.96	-42.14	58.07	0.029	59°	NE	0.01	Constante
EMR13	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.17	-0.3	0.34	0.01	1974	23.24	-17	28.79	0.015	63°	NE	0.01	Constante
EMR16	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.19	0	0.19	0.006	1974	13.18	-11.99	17.82	0.009	84°	NE	0.01	Constante
EMR17	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.2	0.07	0.22	0.007	1974	12.57	-11.41	16.97	0.009	81°	NE	0.01	Constante
EMR18	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.19	0.08	0.2	0.006	1974	13.61	-11.65	17.92	0.009	78°	NE	0.01	Constante
EMR19	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.2	0	0.2	0.006	1974	13.82	-13.19	19.11	0.01	74°	NE	0.01	Constante
EMR20	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.18	-0.01	0.18	0.006	1974	14.83	-13.5	20.05	0.01	71°	NE	0.01	Constante
EUS3	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.19	-0.44	0.47	0.014	1974	13.99	-11.36	18.02	0.009	77°	NE	0.01	Constante
PROMEDIO				33	0.30 cm	-0.18 cm	0.38 cm		1974	32.62 cm	-33.94 cm	47.17 cm		71°		0.01	
					0.009 cm/día	-0.005 cm/día	0.011 cm/día	0.011 cm/día		0.02 cm/día	-0.017 cm/día	0.024 cm/día	0.024 cm/día				
					3.32 cm/año	-1.94 cm/año	4.15 cm/año	4.15 cm/año		6.03 cm/año	-6.28 cm/año	8.72 cm/año	8.72 cm/año				

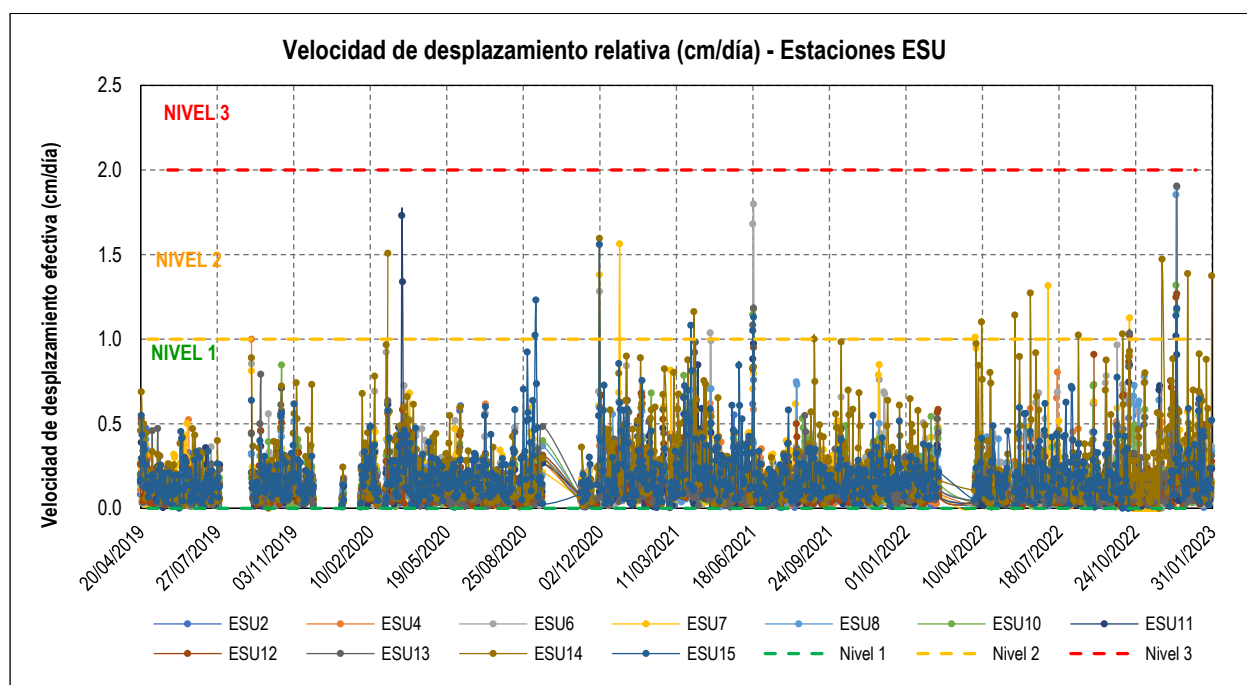
Estaciones ESU, instalados cerca de infraestructuras y grietas

Velocidad de desplazamiento

Los 11 hitos, ubicados cerca de infraestructuras y grietas, registraron hasta enero velocidades de desplazamiento con criticidad Nivel 1. En general, las condiciones son tolerables y no se han observado cambios.

Figura 14:

Velocidad de desplazamiento (cm/día), estaciones ESU

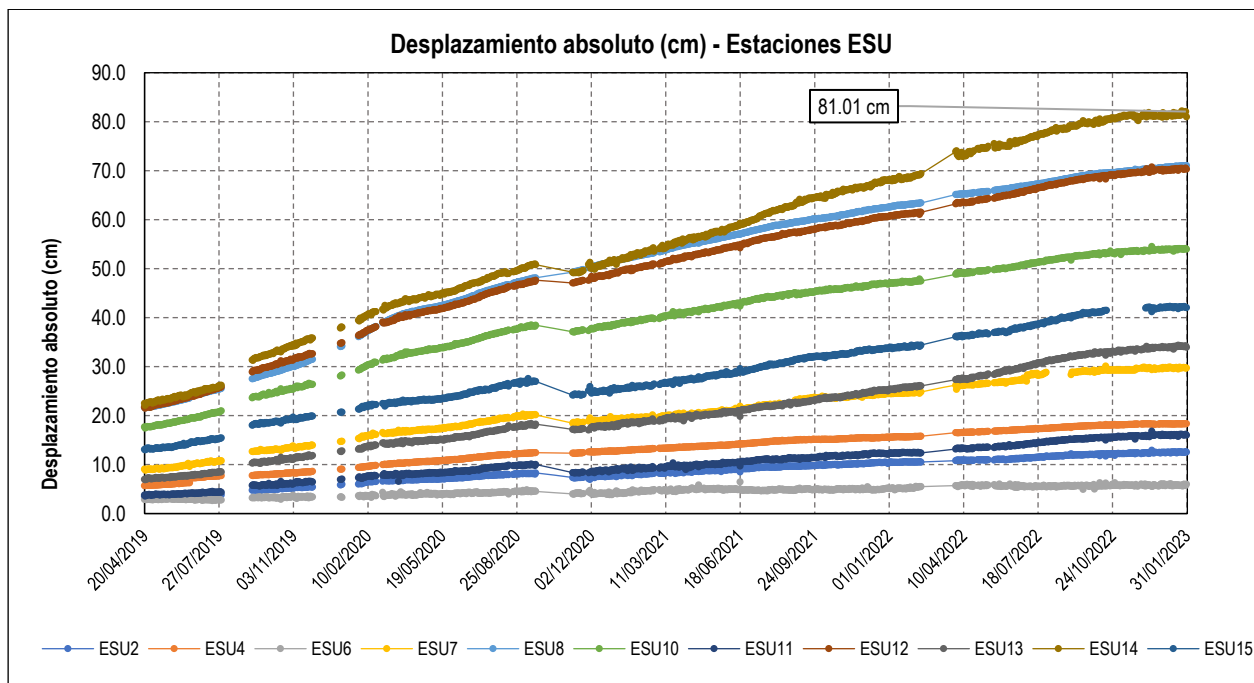


Desplazamiento acumulado

La estación ESU 14, ubicada al este del tajío abierto Central, ha registrado el mayor desplazamiento acumulado, con un total de 81,01 cm.

Figura 15:

Desplazamiento acumulado (cm), estaciones ESU



Interpretación de los datos registrados en las estaciones ESU

Entre el 29 de diciembre de 2022 y el 31 de enero de 2023, el desplazamiento relativo de las estaciones ESU varió de 0,07 m (ESU11) a 0,51 m (ESU8), con dirección hacia NE, SE y NW, y una velocidad de 0,01 cm/día, manteniéndose en un Nivel 1 de criticidad tolerable. El desplazamiento acumulado promedio desde el 4 de septiembre de 2017 hasta el 31 de enero de 2023 osciló entre 6,02 cm (ESU6) y 81,01 cm (ESU14), con la misma dirección y una velocidad de 0,02 cm/día, también en un nivel.

Tabla 14:

Resumen de monitoreo de Hitos ESU.

PUNTOS DE MONITOREO				ANÁLISIS DE MONITOREO														
				MOVIMIENTO RELATIVO					MOVIMIENTO ACUMULADO				Azi mut (°)	Orientación	Nivel de alarm a (cm/d ía)	Tende ncia		
				N° de dí as	Desplazamientos relativos (cm)			Velocida d instanta nea (cm/día)	N° de días acumula dos	Desplazamientos Acumulados (cm)							Velocida d acumula da (cm/día)	
Fecha de medición	Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)		Dxy	Dz	Dxyz											
CÓDIGO	Inicial 2017	Fecha anterior	Fecha actual															
ESU2	05/11/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.09	0.03	0.09	0.003	1913	10.54	-6.78	12.53	0.007	104°	SE	0	Constante	
ESU4	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.24	0.22	0.33	0.01	1974	14.45	-11.32	18.35	0.009	51°	NE	0.01	Constante	
ESU6	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.07	0.29	0.3	0.009	1974	5.93	-1.03	6.02	0.003	359°	NW	0.01	Constante	
ESU7	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.31	0.09	0.32	0.01	1974	20.57	-21.45	29.72	0.015	358°	NW	0.01	Constante	
ESU8	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.42	-0.28	0.51	0.015	1974	49.04	-51.44	71.07	0.036	43°	NE	0.02	Constante	
ESU10	05/11/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.18	-0.03	0.19	0.006	1913	33.21	-42.53	53.96	0.028	94°	SE	0.01	Constante	
ESU11	05/11/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.06	0.03	0.07	0.002	1913	12.35	-10.17	16	0.008	101°	SE	0	Constante	
ESU12	05/11/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.27	-0.1	0.29	0.009	1913	49.48	-49.95	70.31	0.037	93°	SE	0.01	Constante	
ESU13	05/11/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.1	0.08	0.13	0.004	1913	29.04	-17.56	33.94	0.018	109°	SE	0	Constante	
ESU14	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.31	0.01	0.31	0.009	1974	42.16	-69.17	81.01	0.041	297°	NW	0.01	Constante	
ESU15	04/09/2017	29/12/2022	31/01/2023	33	0.22	0.22	0.31	0.009	1974	32.08	-27.18	42.05	0.021	298°	NW	0.01	Constante	
PROMEDIO				33	0.21 cm	0.05 cm	0.26 cm		1946	27.17 cm	-28.05 cm	39.54 cm		173°			0.01	
					0.006 cm/día	0.002 cm/día	0.008 cm/día	0.008 cm/día		0.014 cm/día	-0.014 cm/día	0.020 cm/día	0.020 cm/día					
					2.28 cm/año	0.57 cm/año	2.85 cm/año	2.85 cm/año		5.10 cm/año	-5.26 cm/año	7.42 cm/año	7.41 cm/año					

4.3.2. Monitoreo Microsísmico.

El presente estudio aborda la sismicidad inducida en la unidad minera Yauricocha, focalizándose en los cuerpos Esperanza, Catas y Mascota. Este estudio se fundamenta en la implementación de un sistema de monitoreo microsísmico desde octubre de 2021, con el objetivo de detectar y analizar los eventos microsísmicos ocurridos en la mina. El sistema de monitoreo está compuesto por geófonos distribuidos en diversos niveles, que permiten la detección de sismos provocados por las actividades mineras.

- Se registraron un total de 3,292 eventos microsísmicos entre octubre de 2021 y 30 de enero de 2023, de los cuales 31 eventos tuvieron una magnitud superior a 1 en la escala de momento magnitud.

- La mayor recurrencia de sismos se detectó entre los niveles 820 y 1120, destacándose áreas críticas como el cono de subsidencia en el nivel 1070.

- Los eventos de mayor magnitud no causaron daños severos en las labores subterráneas, ya que la energía liberada por los mismos fue baja, con un PPV inferior a 50 mm/s, lo que representa un riesgo bajo.

- Se evaluó la proyección de roca y su impacto en las labores subterráneas, concluyendo que la mayoría de los eventos presentan un riesgo bajo a moderado de daño

A lo largo del estudio se presentaron diversas gráficas y diagramas que complementan el análisis de la sismicidad inducida y su impacto en la estabilidad del macizo rocoso. A continuación, se mencionan las gráficas más relevantes

Tabla 15:

Resumen de eventos microsismicos.

Momento Magnitud (Mw)	Eventos
Mw < -1.0	244
Mw < -1.0 - 0.4 >	2869
Mw < 0.5 - 0.9 >	148
Mw >= 1.0	31
Total, de evento	3292

Figura 15:

Localización del proyecto y las áreas monitoreadas.

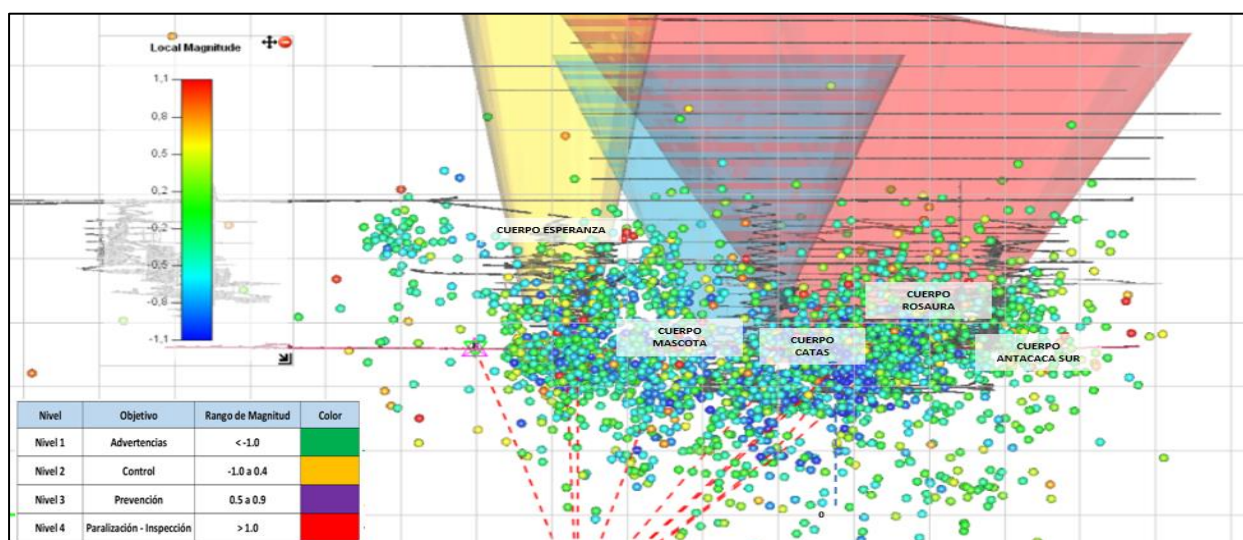
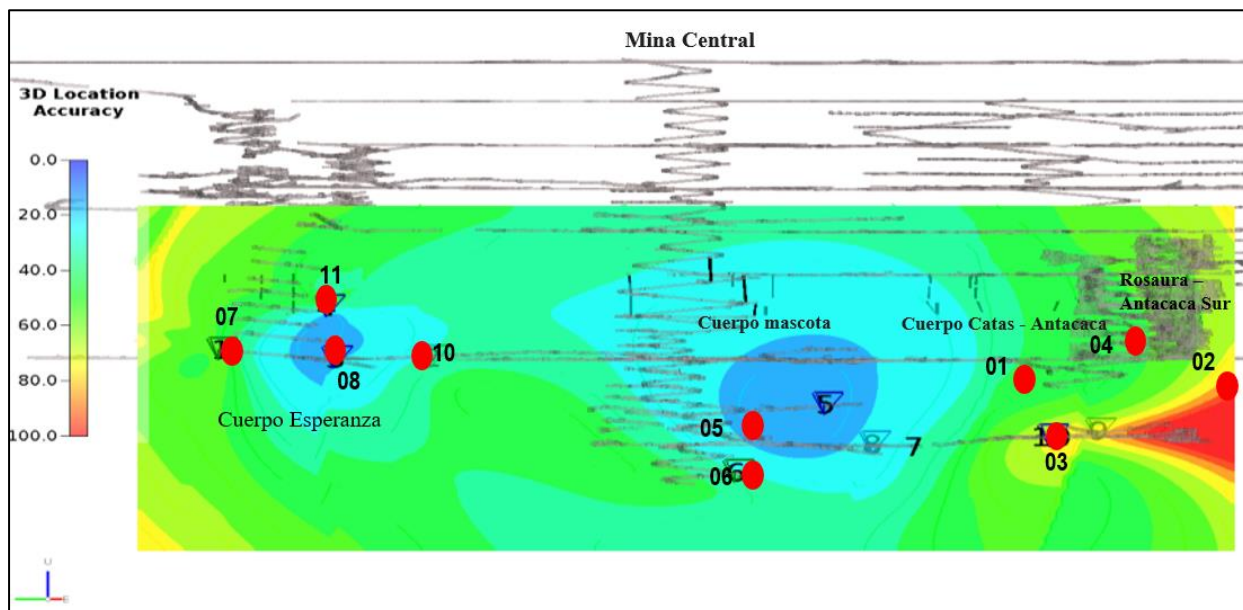
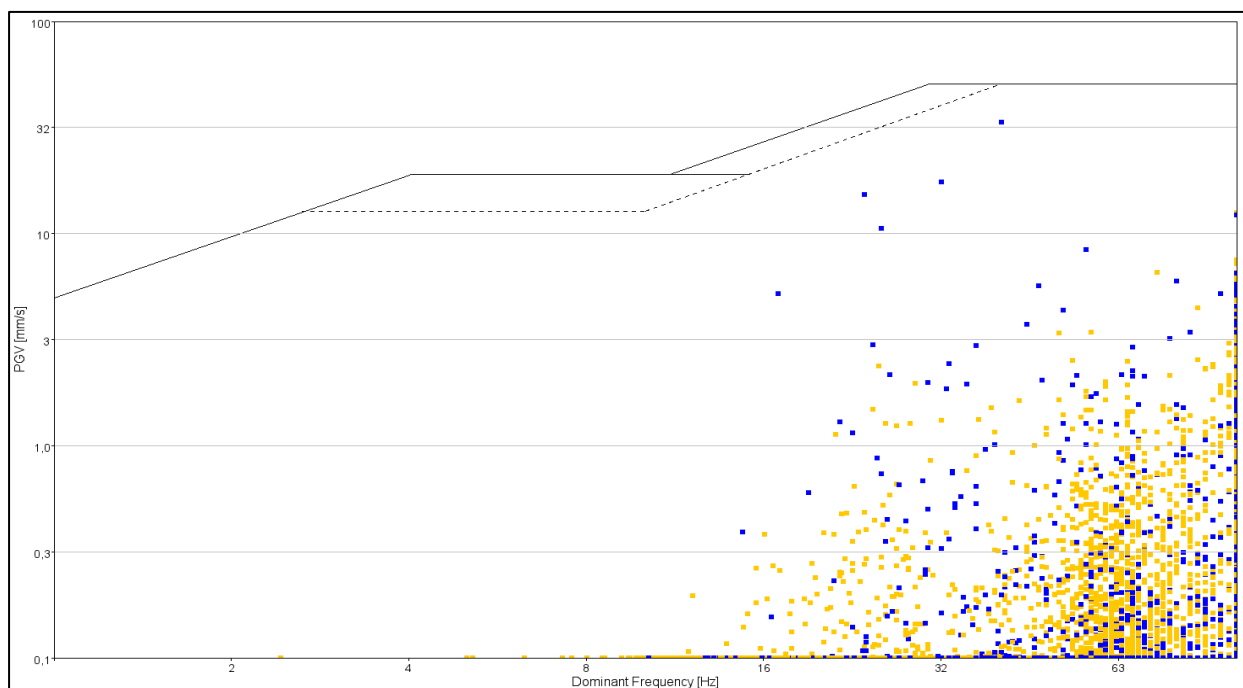


Figura 16:

Representación del nivel de daño y la Velocidad Pico Partícula (VPP) en relación con la magnitud de los eventos.



Los puntos de datos azules y amarillos representan eventos sísmicos y voladura respectivamente, niveles seguros de vibraciones de voladura para viviendas (construcciones con drywall) según oficina de minas de EE.UU. Informe de investigación 8507 respuesta estructura y daños producidos por la vibración del suelo por voladura de minas a cielo abierto

El monitoreo microsísmico permite registrar los eventos sísmicos y las vibraciones inducidas por las voladuras, proporcionando datos esenciales para evaluar las deformaciones del terreno. En el caso de Yauricocha, la velocidad máxima registrada de pico de partícula es de 38 mm/segundo, lo que se encuentra dentro de los parámetros de seguridad esperados. Esto indica que el comportamiento del terreno está bajo control y dentro de los límites establecidos para prevenir impactos negativos en la operación minera y en las construcciones cercanas.

Tabla 16:

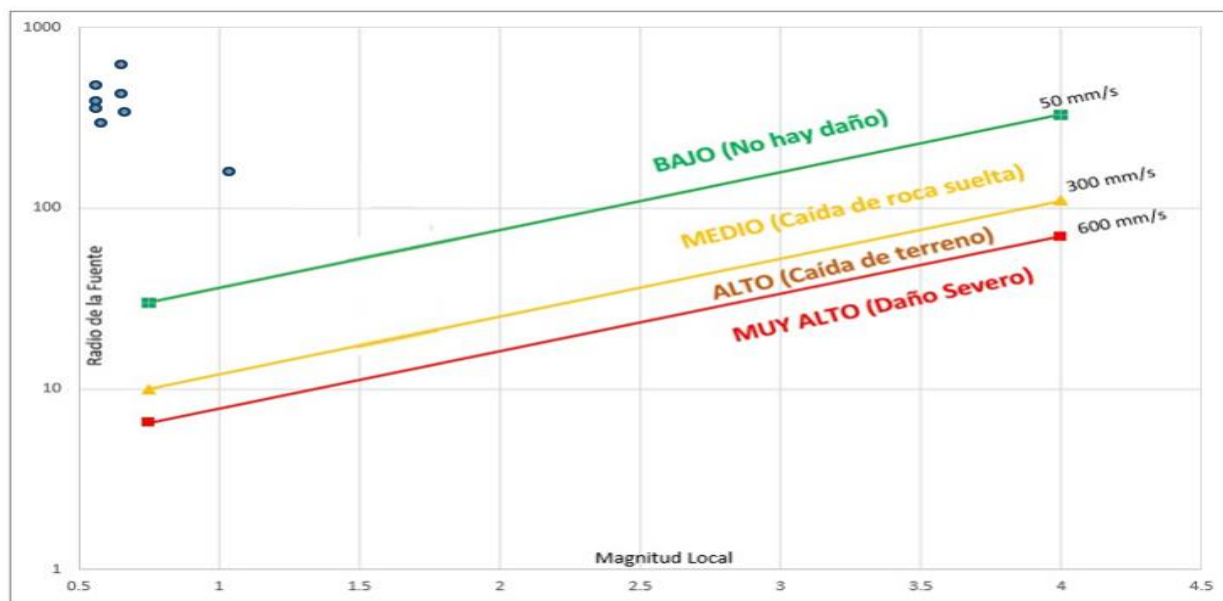
Daño por sismicidad.

Riesgo	PPV (mm/s)	Nivel de Daño
BAJO	< 50	No hay Daño
MEDIO	50 < PPV < 300	Caída de Roca Suelta
ALTO	300 < PPV < 600	Caída de Terreno
MUY ALTO	PPV < 600	Daño Severo

Modelo de Hedley 1992, Este modelo es concordante con el modelo de HOOK Y BRAY empleado para análisis de daños por sismicidad.

Figura 18:

Representación del nivel de daño y la VPP con respecto a la magnitud del evento



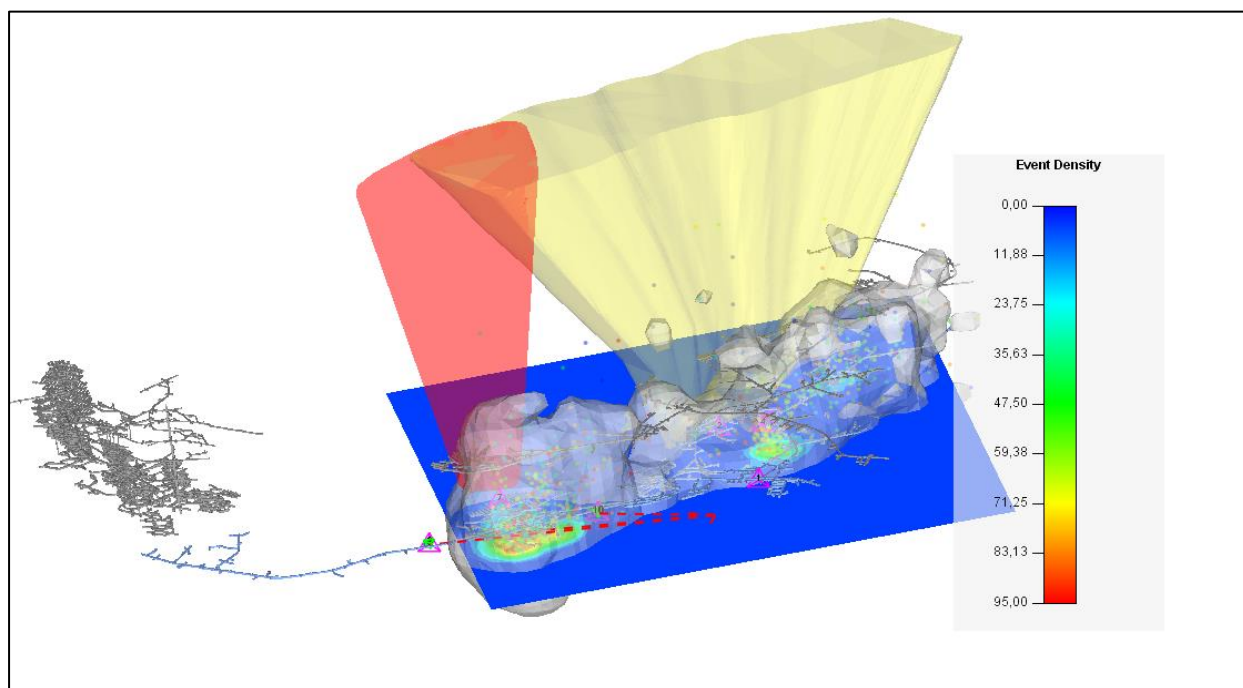
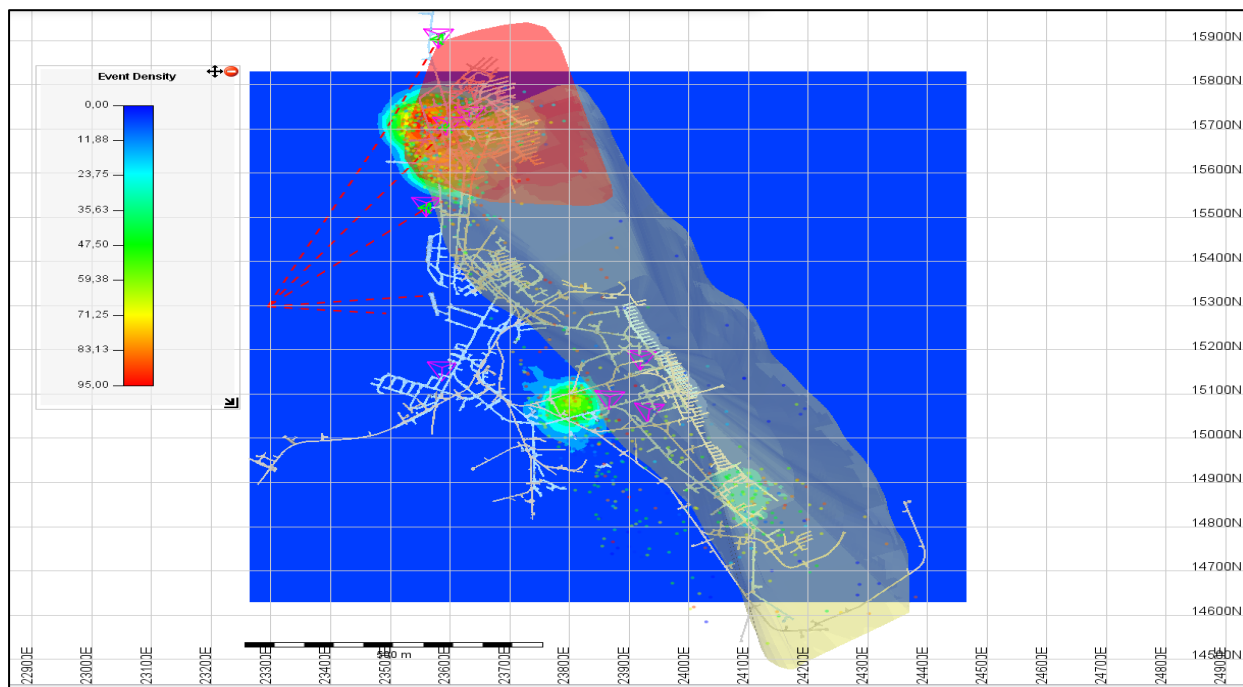
Fuente: Tomada del Control of rockburst damage, Hedley, 1992

Para el análisis de daño por sismicidad se procede al ploteo de los eventos de momento magnitud superiores a 1, registrados entre los meses de octubre 2022 a enero 2023, todos ellos se

clasifican dentro de la escala de Hedley, como de riesgo medio con probabilidad de caída de roca suelta (roca sin sostenimiento).

Figura 19:

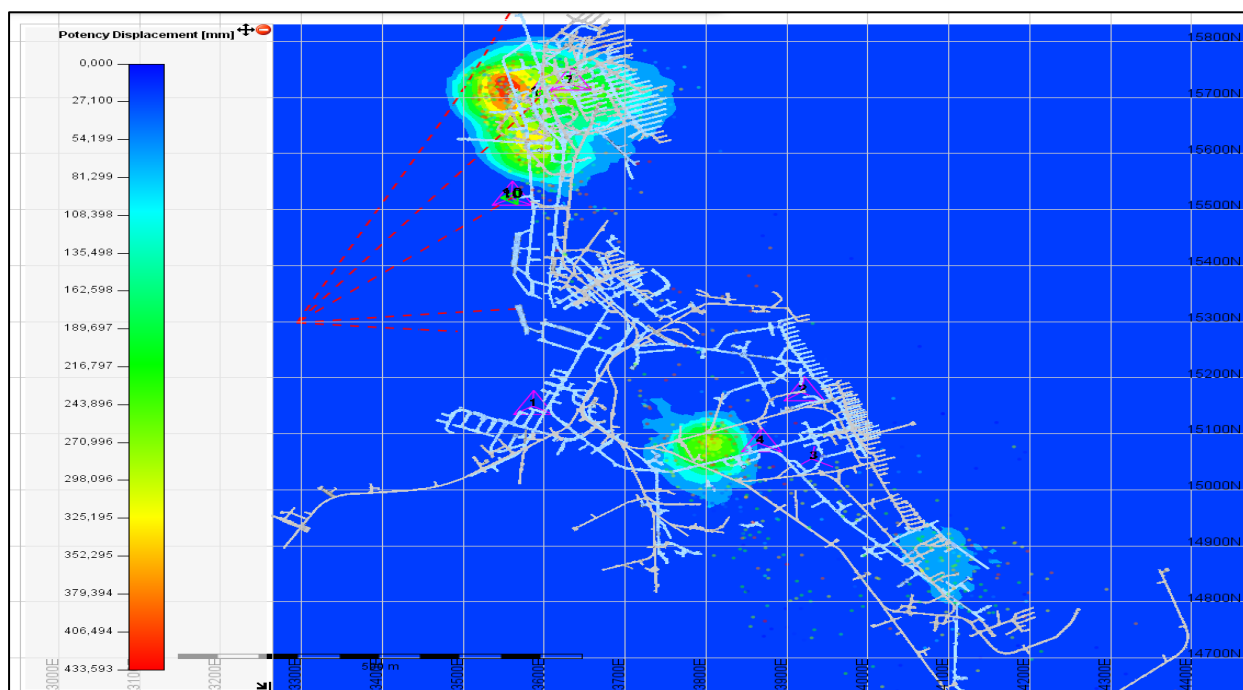
Zona sismogénica en el área del cono de subsidencia nivel 1070



El plano de densidad de eventos en el nivel 1070 muestra la distribución de eventos microsísmicos en relación con el cono de subsidencia en la zona de la mina central. Utilizando una representación de colores, se identifican las áreas con diferentes densidades de eventos: desde zonas con densidad mínima (representadas en celeste, >12 eventos) hasta zonas de mayor concentración de eventos (en rojo, <95 eventos). Esto ayuda a visualizar y evaluar las áreas de mayor actividad sísmica ya identificar posibles riesgos relacionados.

Figura 20:

Deformación potencial en (mm).



El rango de deformación de 81 a 403 mm el área de minado está experimentando un proceso de acomodación del terreno, lo cual es común en métodos como el SLC. El monitoreo microsísmico ayuda a identificar qué áreas están experimentando mayores tensiones y cuáles podrían estar alcanzando límites de seguridad, permitiendo ajustes en el proceso de explotación.

Figura 21:
Estrés sísmico (Pa).

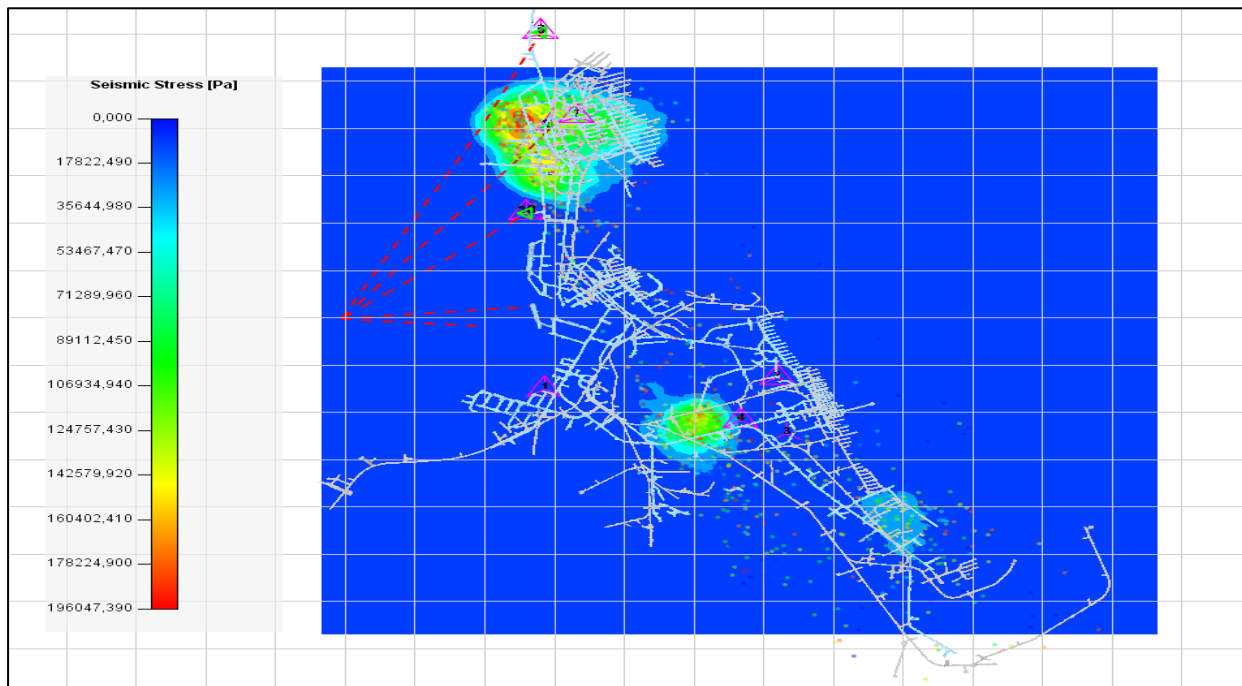
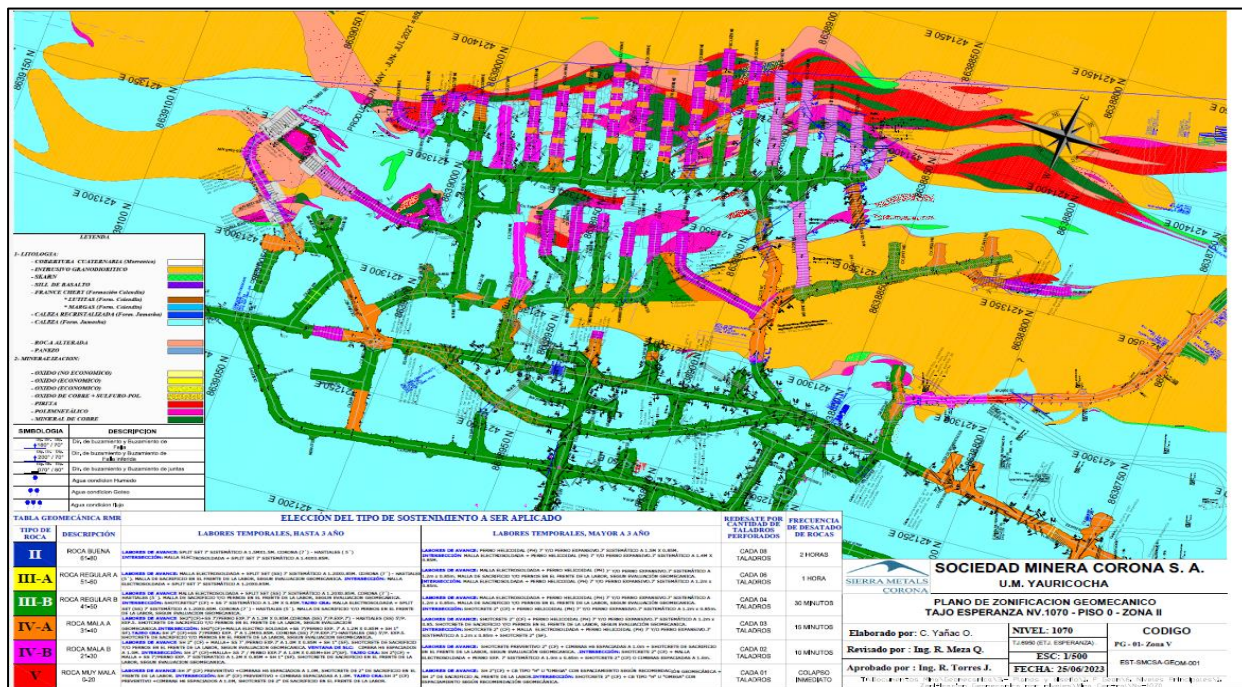


Figura 22:
Plano geomecánico y geológico Nv. 1070 Cuerpo Esperanza.



4.3.3. Monitoreo del Cable TDR

En la unidad minera Yauricocha el cable TDR es una técnica de control geotécnico que se utiliza para evaluar la subsidencia a través de los cables instalados de superficie hacia la bóveda del cono de subsidencia esperanza.

Figura 23:

Plano de ubicación e interpretación de monitoreo de cable TDR

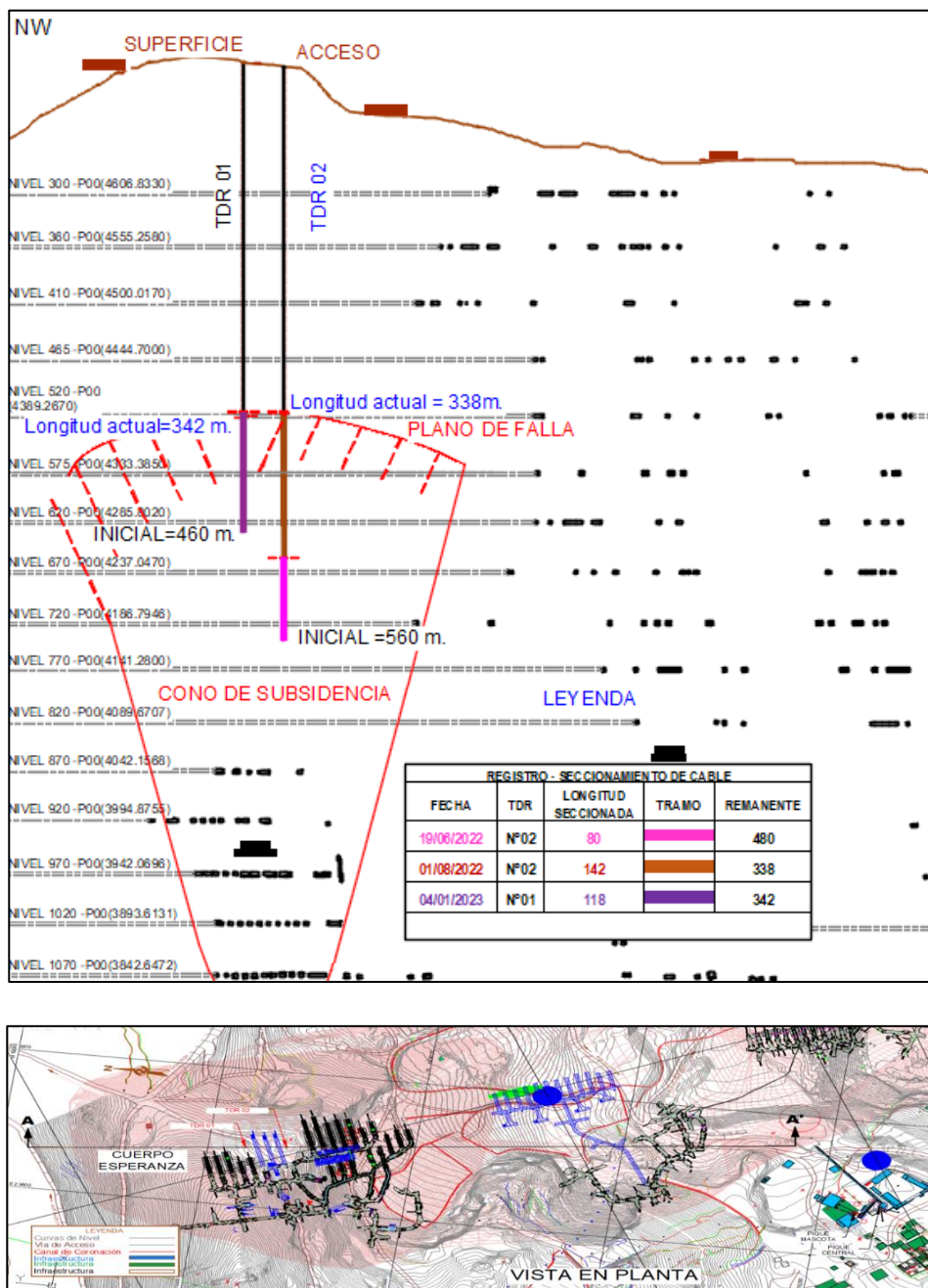
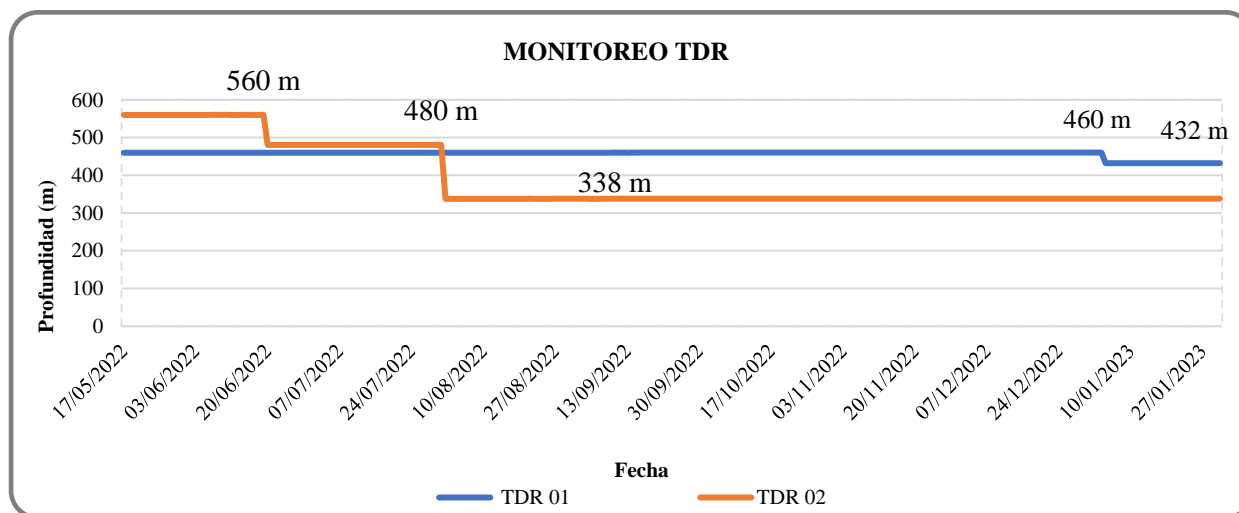


Tabla 17:

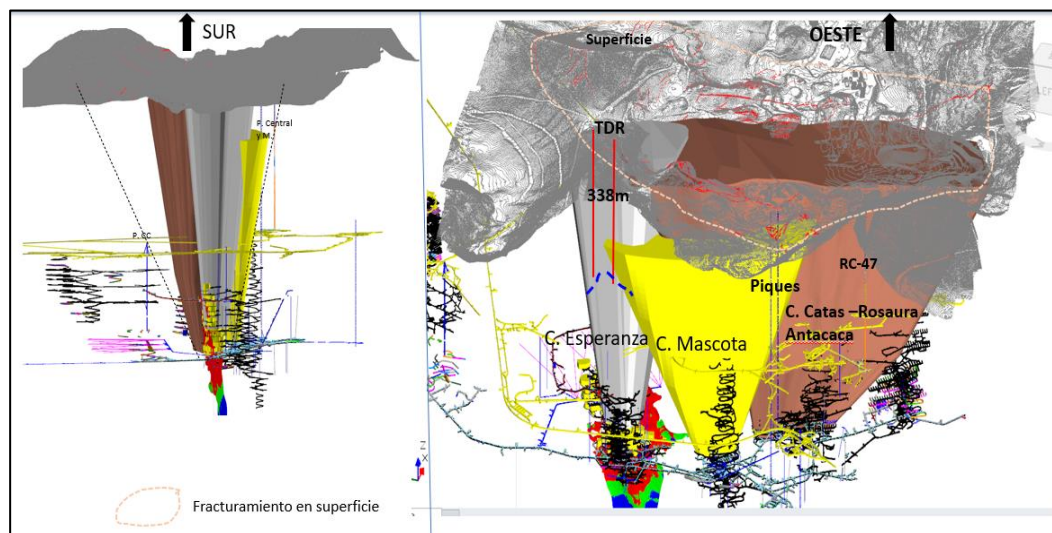
Resumen del Monitoreo Cable TDR.



NOD O (ID)	CABL E	COORDENADAS			PROFUNDID AD DE INSTALACIÓ N	CONDICIÓN		
		ESTE	NORTE	COTA		SECCIONAMIENTO		
						19/06/20 22	01/08/20 22	04/01/20 23
8935	TDR- 02	421372.0 04	8638959. 99	4729.1 6	560 m.	480 m.	338 m.	338 m.
8922	TDR- 01	421372.0 38	8638999. 96	4733.4 2	460 m.	460 m.	460 m.	342 m.

Figura 2416:

Vista isométrico del cono de fracturamiento producto del minado por SLC el cono de fracturamiento ya se juntaron entre sí



El 19 de junio del 2022 se registró una anomalía de seccionamiento, lo que resultó en una pérdida de 80 m de longitud del cable con una velocidad relativa de 2.42m /día. Es importante destacar que este evento no afectó el funcionamiento o la operación en el interior de la mina

El 1 de agosto de 2022 se registró otra anomalía de seccionamiento, lo que resultó en una pérdida de 142 m de longitud del cable con una velocidad de 3m/día.

Según la interpretación, actualmente, el cable tiene una longitud de 338 y 432 m, considerado como un puente entre la bóveda del cono de subsidencia y la superficie. Se estima que podrían surgir anomalías en la superficie en un rango de tiempo que varía entre 1.3 años (29/01/2025) y 5.4 años (03/03/2029). Este rango está determinado por la velocidad del proceso de minado directamente proporcional a la velocidad de fracturamiento de la bóveda del cono de subsidencia.

4.3.4. Monitoreo con inclinómetro

Dicho equipo nos ayuda a complementar al monitoreo geotécnico, donde este instrumento nos permite medir los desplazamientos horizontales en el cono de fracturamiento.

En la misma influencia del cono de subsidencia se tiene instalados 02 inclinómetros, el cual nos brinda información del desplazamiento masal.

Nivel de criticidad para el monitoreo del inclinómetro Pique.

El departamento de geomecánica y geotecnia emplea el siguiente cuadro como guía para la evaluación del nivel de criticidad y su medida de control en base a la velocidad de desplazamiento relativo y acumulado.

Tabla 158:

Rango de criticidad según la velocidad de desplazamiento relativa

Nivel	Resultado de medición	Condición de riesgo	Acciones correctivas
Nivel 3	La velocidad de desplazamiento relativo > 1.2 mm/día.	Muy Crítico	Comunicar a la Gerencia General para activar los planes de contingencia
	La velocidad de desplazamiento acumulado > 0.3 mm/día.		Verificar posibles filtraciones e infiltraciones en el cuerpo del Pique. Verificar si existen hundimientos en superficie Piques, fisuras, abombamientos o desniveles en todo el cuerpo del Pique.
Nivel 2	La velocidad de desplazamiento relativo > 0.6 mm/día, < = 1.2 mm/día.	Crítico	Comunicar a la Gerencia de Operaciones y Superintendencia de Mina
	La velocidad de desplazamiento acumulado > 0.2 mm/día, < = 0.3 mm/día.		Incrementar el monitoreo a frecuencia Semanal. Realizar el cruce de información con los desplazamientos de los hitos prismáticos, hitos topográficos.
Nivel 1	La velocidad de desplazamiento relativo < = 0.6 mm/día.	Tolerable	Continuar el monitoreo con frecuencia mensual y reportar en el informe mensual de Estabilidad.
	La velocidad de desplazamiento acumulado < = 0.2 mm/día.		
	Durante las etapas de construcción podría superar estos valores, pero no debe mostrar aceleración.		

Inclinómetro 1 (Incl-01), ubicado frente al Pique Mascota

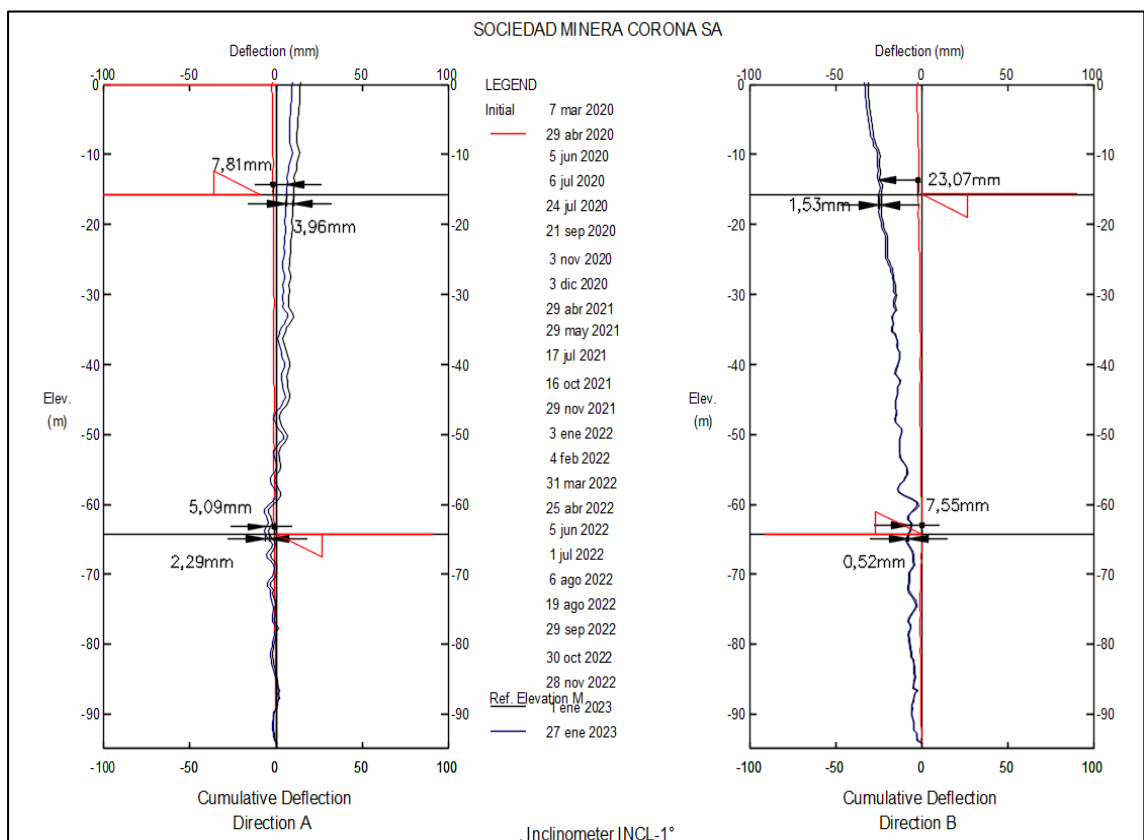
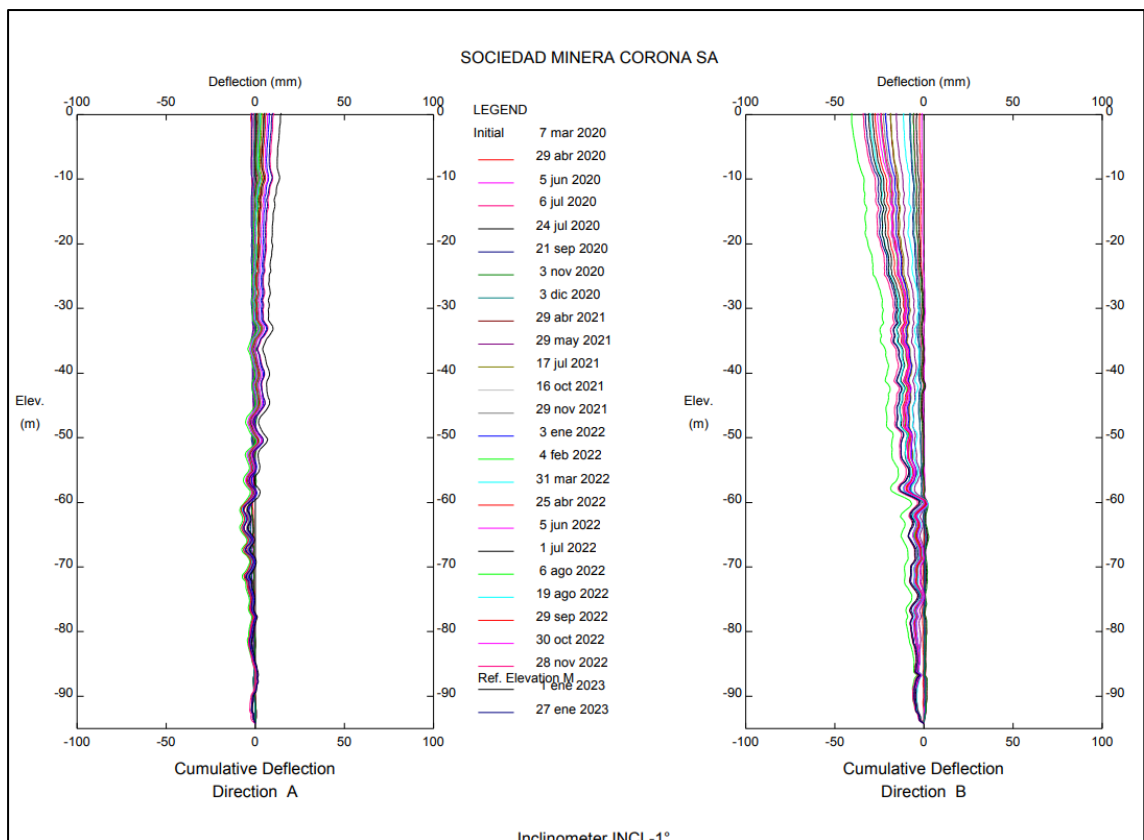
El inclinómetro cuenta con una profundidad de 95 metros ubicada frente a la tolva del Pique Mascota, la frecuencia de monitoreo es mensual.

A la fecha se cuenta con 26 mediciones desde marzo del 2020

Monitoreo en la dirección A, orientado hacia el SE

Figura 25:

Deflexión del Inclinómetro 1 (Incl-01), eje A y B



Deformación acumulada en la dirección eje A

Dirección A+, orientado hacia el SE, presenta un pico de deflexión de 7.81 mm a los -15.70 m de profundidad.

Dirección A-, orientado hacia el NW, presenta un pico de deflexión de 5.09 mm a los -64.24 m de profundidad.

De los datos analizados el eje A (+), presenta la deflexión máxima 7.81 mm a los -15.70 m de profundidad; en dirección SE

Deformación acumulada en la dirección eje B

Dirección B-, orientado hacia el NE, presenta un pico de deflexión de 23.07 mm a los -15.70 m de profundidad.

Dirección B+, orientada hacia el SW, presenta un pico de deflexión de 7.55 mm a los -64.24 m de profundidad.

De los datos analizados el eje B (-), presenta la deflexión máxima con desplazamiento de 21.54 mm; en la dirección NE.

Para un mayor detalle de los reportes de deflexión del Inclinómetro 1, ver el Anexo B: Datos registrados y cuadros de Análisis

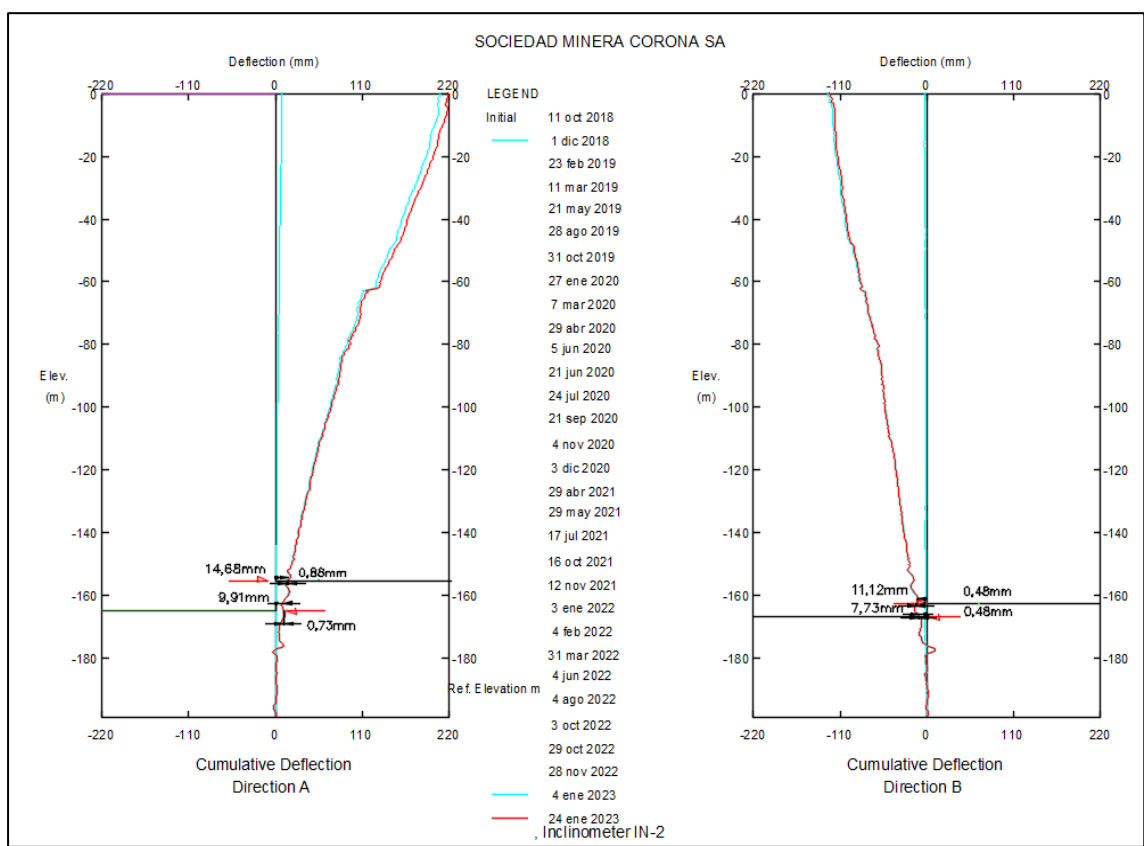
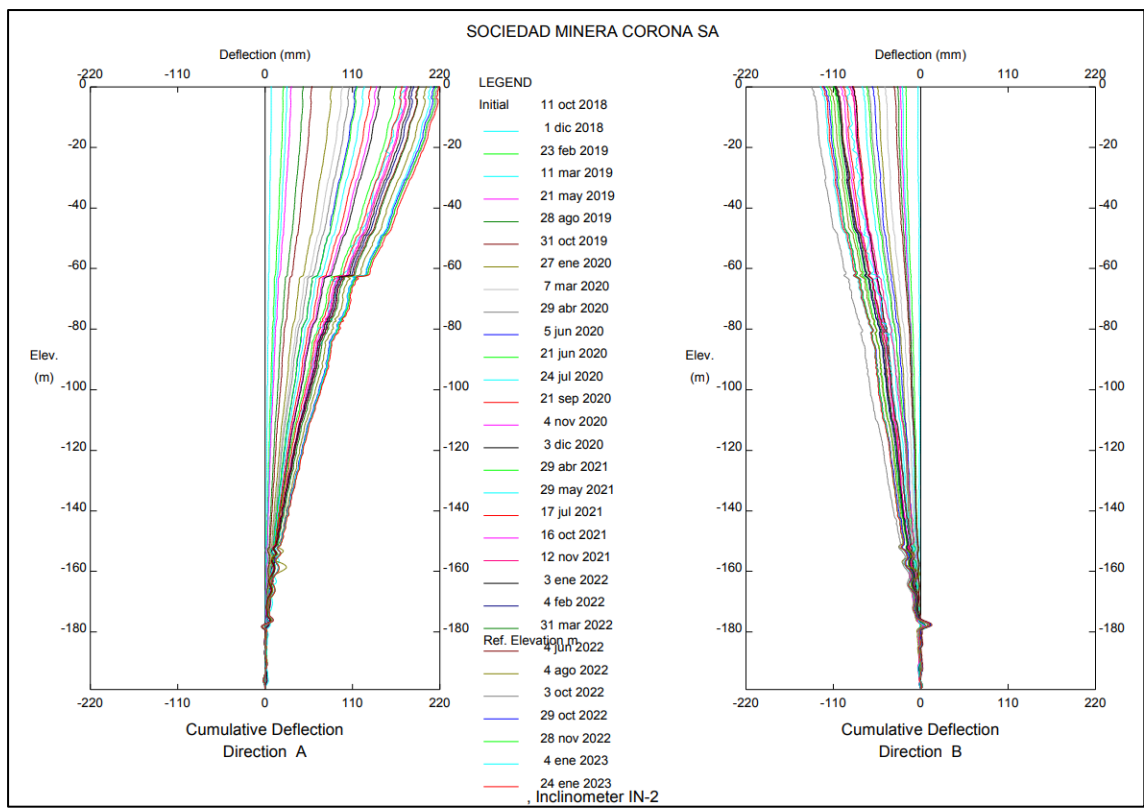
Inclinómetro 2 (In-02), ubicado frente al Pique Central

El inclinómetro con una profundidad de 199.5m se ubica frente al Pique Central, la frecuencia de monitoreo es mensual.

A la fecha se cuenta con 63 mediciones desde enero del 2018.

Figura 26:

Deflexión del inclinómetro 2 (In-02), eje A y B



Deformación acumulada en la dirección A

Dirección A+, orientado hacia el SW, presenta un pico de deflexión de 14.68 mm a los -155.63 m. de profundidad.

Dirección A-, orientado hacia el NE, presenta un pico de deflexión de -9.91 mm a los -165.23 m de profundidad.

De los datos analizados el eje A (+), presenta la deflexión máxima con desplazamiento de 14.68 mm; en la dirección SW.

Deformación acumulada en la dirección B

Dirección B+, orientado hacia el NW, presenta un pico de deflexión de -11.12 mm a los -163.20 m de profundidad.

Dirección B-, orientado hacia el SE, presenta un pico de deflexión de 7.73 mm a los -167.20 m de profundidad.

De los datos analizados el eje B (-), presenta la deflexión máxima con desplazamiento de -11.12 mm; en la dirección NW.

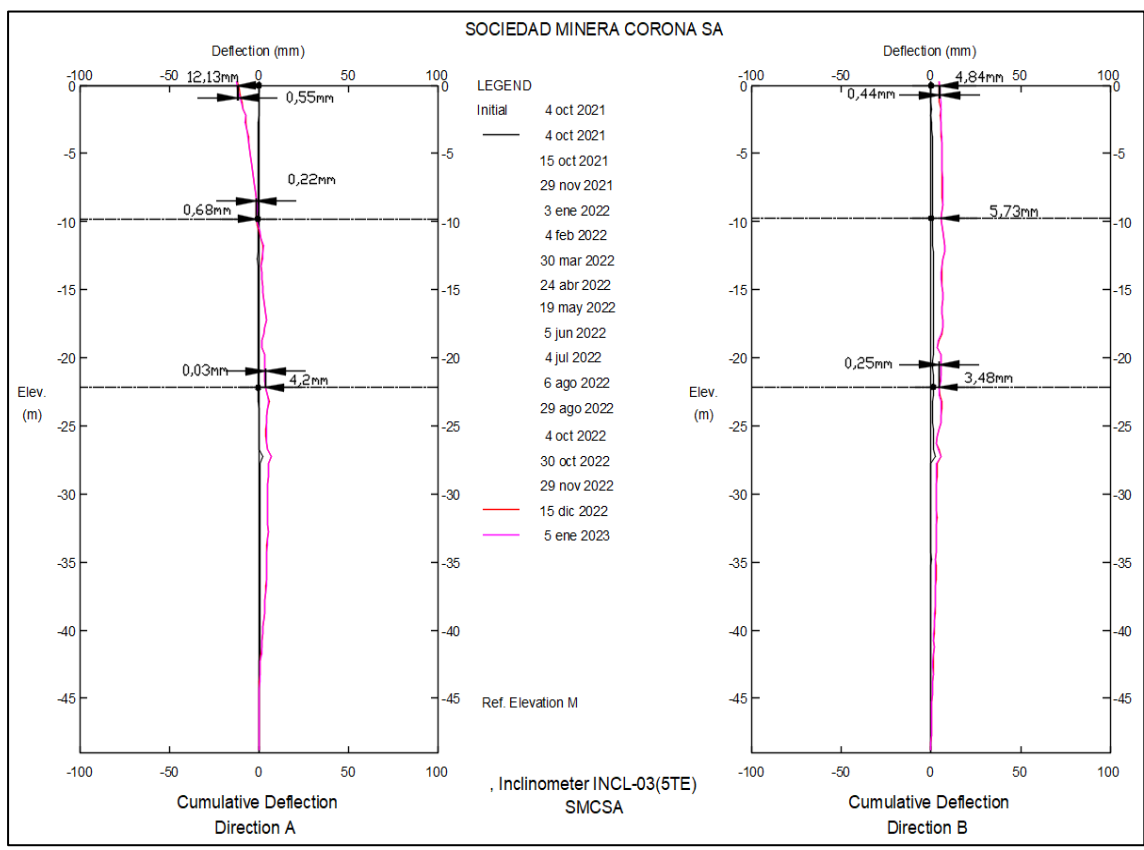
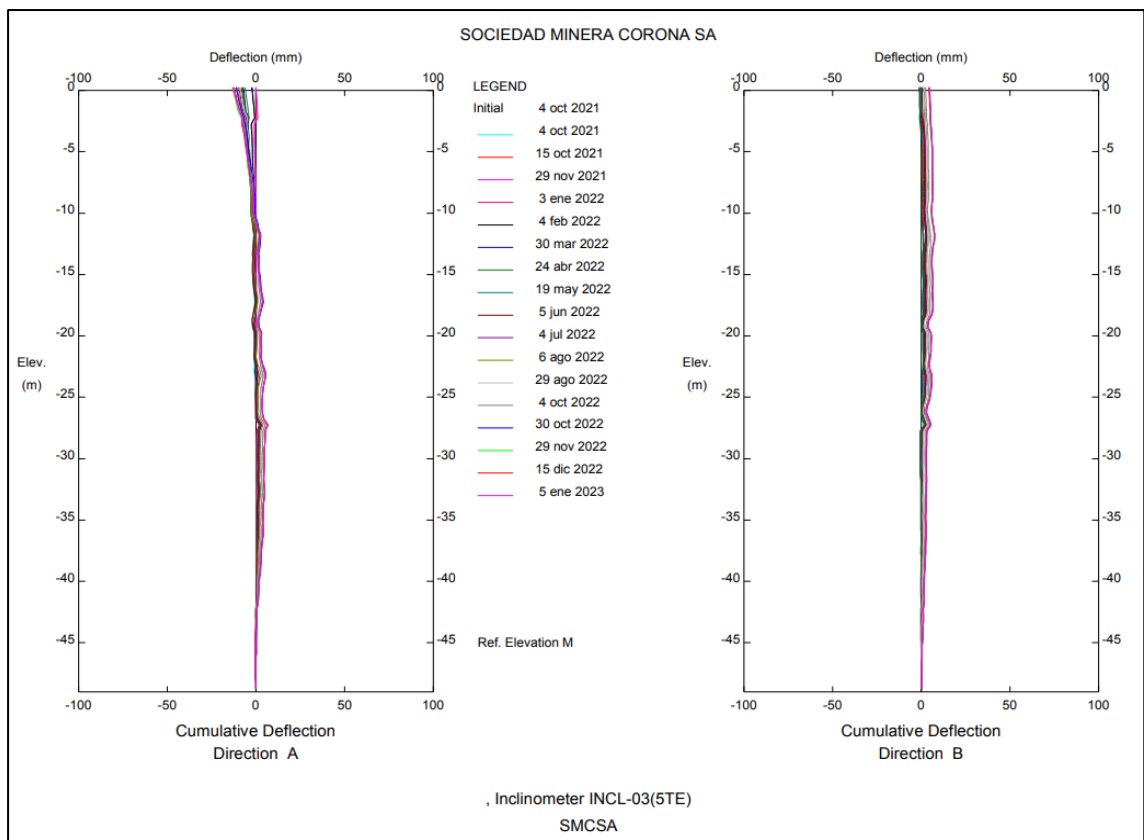
El inclinómetro 3 (Incl-03), ubicado en dique de Relave.

El inclinómetro con una profundidad de 49.5 m se ubica en dique de presa relave, la frecuencia de monitoreo es mensual.

A la fecha se cuenta con 18 mediciones desde octubre del 2021

Figura 17:

Deflexión del Inclinómetro 3 (Incl-03), eje A



Deformación acumulada en la dirección A

Dirección A-, orientado hacia el SW, presenta un pico de deflexión de 12.13 mm a los -0.00 m de profundidad.

Dirección A+, orientado hacia el NE, presenta un pico de deflexión de 4.20 mm a los -22 m de profundidad.

De los datos analizados el eje A (-), presenta la deflexión máxima 12.13 mm a los -0.00 m de profundidad; en dirección SW

Deformación acumulada en la dirección B

Dirección B+, orientado hacia el SE, presenta un pico de deflexión de 4.84 mm a los -0.00 m de profundidad.

Dirección B+, orientada hacia el SE, presenta un pico de deflexión de 5.73 mm a los -9.8 m de profundidad.

De los datos analizados el eje B (+), presenta la deflexión máxima con desplazamiento de 5.73 mm; en la dirección SE.

Para un mayor detalle de los reportes de deflexión del Inclinómetro 1, ver el Anexo B: Datos registrados y cuadros de Análisis.

4.4. Área de influencia de la subsidencia

El área de influencia de la subsidencia se basa conforme se va profundizando y de la longitud en altura y potencia del cuerpo mineralizado explotado, ya que cuando se deja el vacío y este se va rellenando por el flujo gravitacional se incrementa la bóveda y la subsidencia el cual se evidencia en la superficie, además este vacío genera el desplome de las paredes rocosas de la bóveda y generando un fracturamiento y tiene una influencia y proyección en la superficie, hasta la fecha esta influencia tiene 1380 m (ancho) x 1500 m (largo).

4.5. Subsidencia como resultado de la explotación

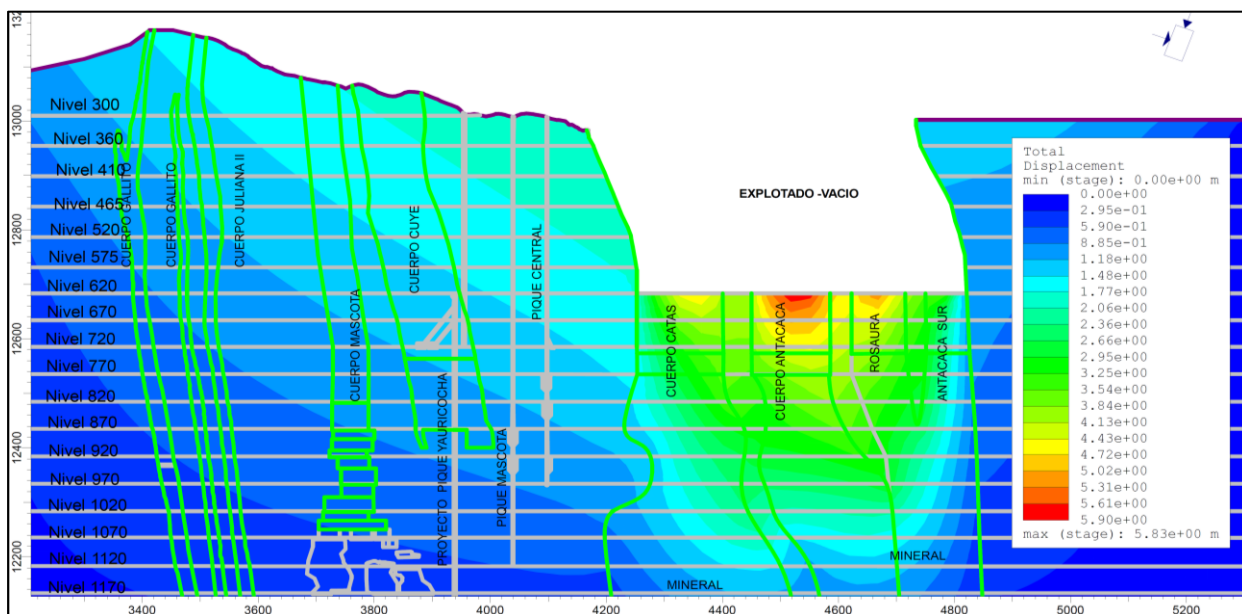
Sociedad Minera Corona S.A., viene realizando la explotación de su yacimiento utilizando el método de minado “hundimiento por subniveles” (Sub Level Caving – SLC) y a consecuencia de este minado se ha generado la subsidencia en el área superficial de la mina.

4.5.1. Modelo de tenso deformacional vista longitudinal

La herramienta de cálculo empleada ha sido el programa RS2 perteneciente a Rocscience Inc. El uso de este programa nos permite obtener resultados en el cálculo de los esfuerzos actuantes y desplazamientos generados en torno a las excavaciones simuladas.

Figura 18:

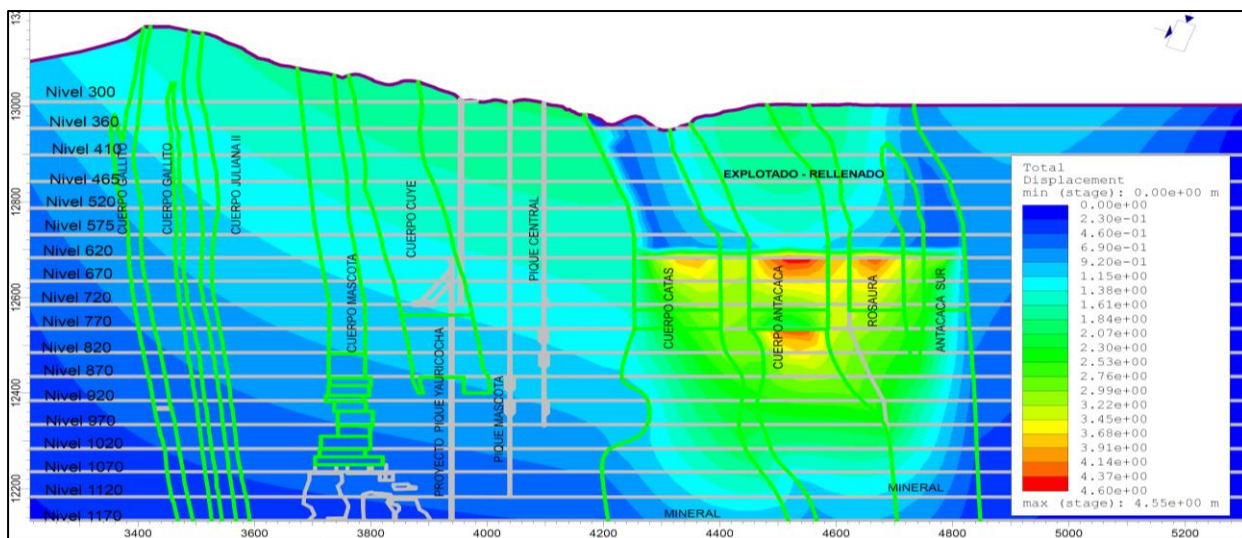
Modelo tenso - deformacional minado hasta el Nv.620



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.620, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 5.83278m.

Figura 19:

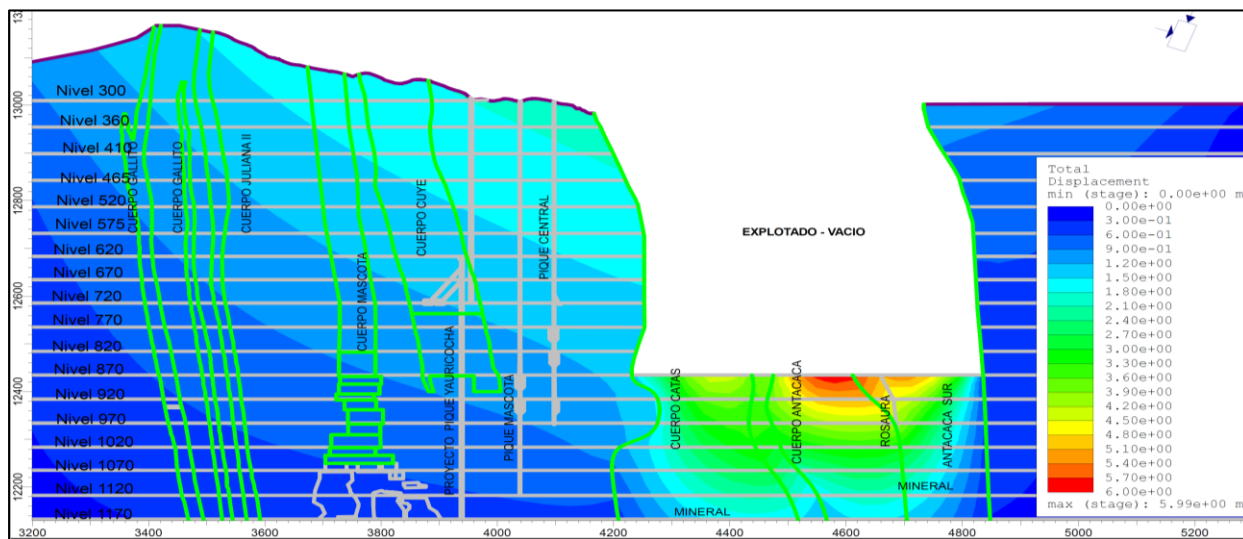
Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.620



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.620 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 4.55419m.

Figura 200:

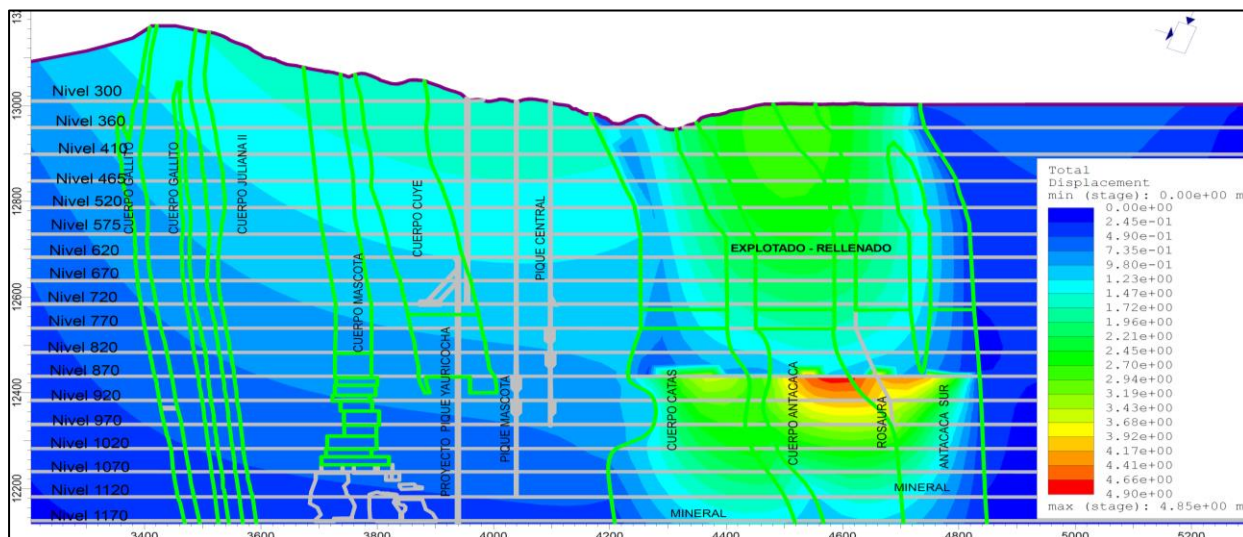
Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.870



Nota: en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.870, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 5.99309m.

Figura 31:

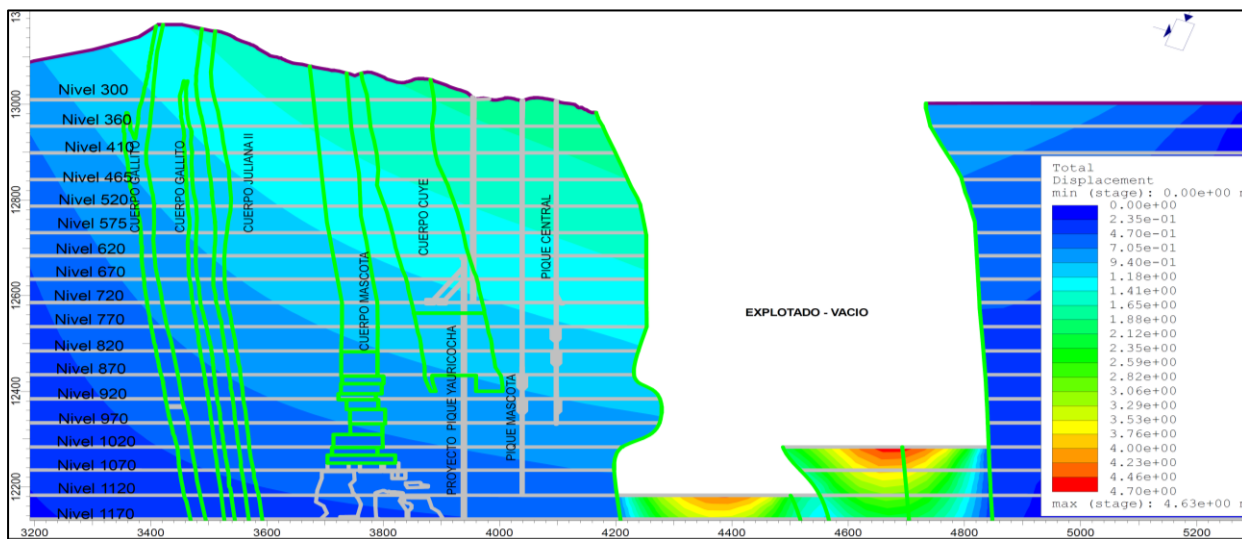
Modelo tenso - deformacional minado y relleno hasta el Nv.870



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.870 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 4.84807m.

Figura 21:

Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.1120



Nota: en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.1120, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 4.62657m.

Figura 22:

Modelo tenso-deformacional minado y relleno hasta el Nv.1120.

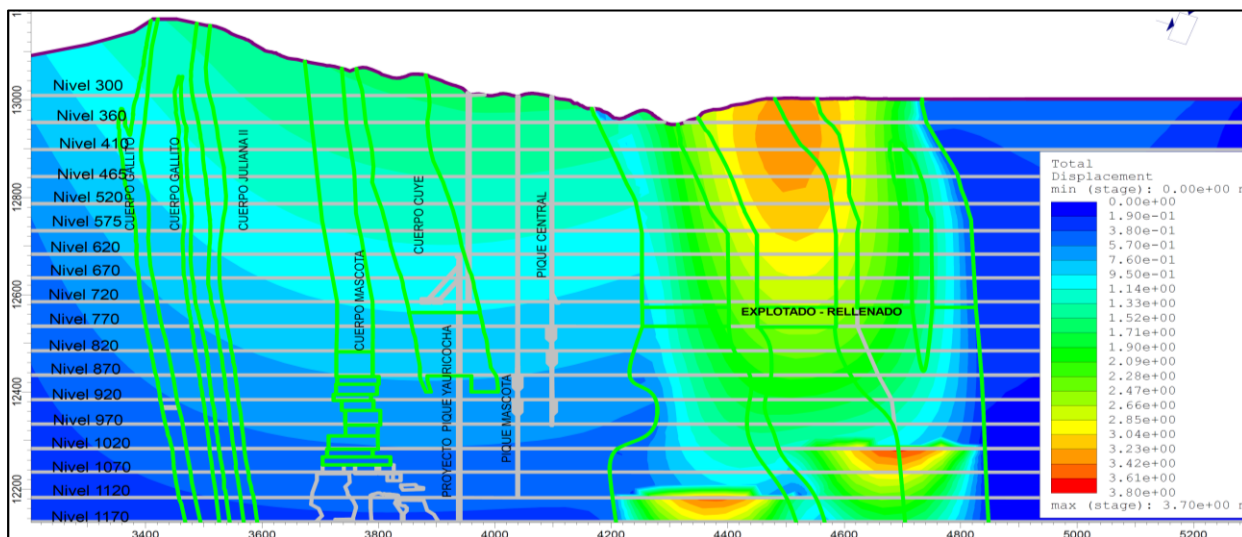
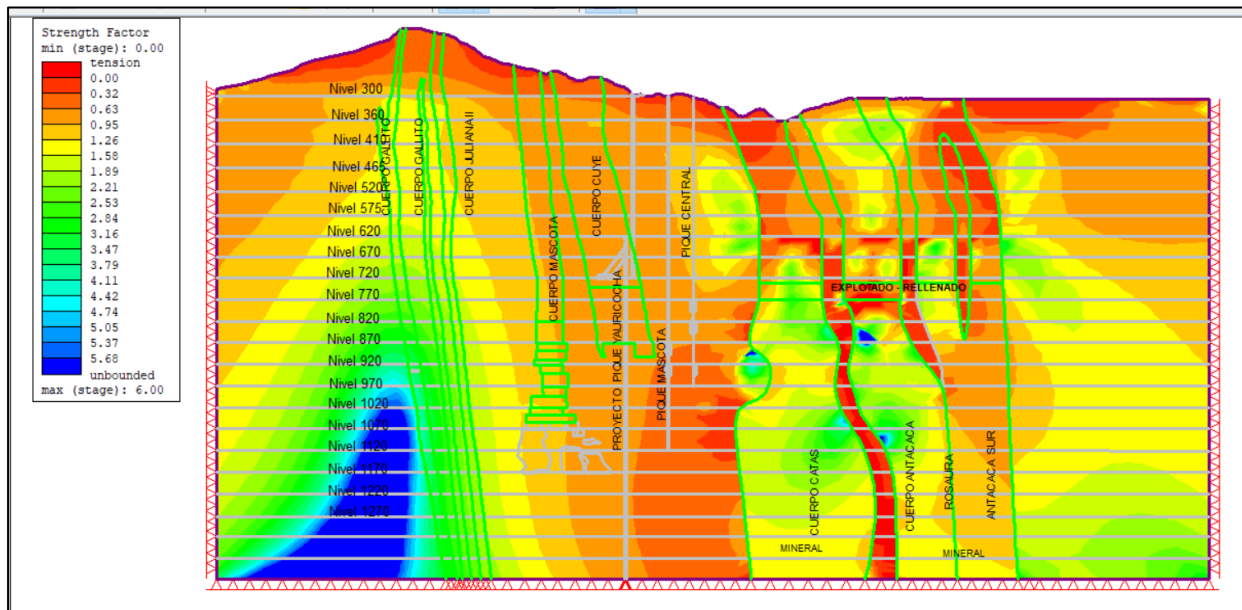


Figura 34:

Strength factor en el borde del cono de fracturamiento minado y rellenado hasta el Nv.1120



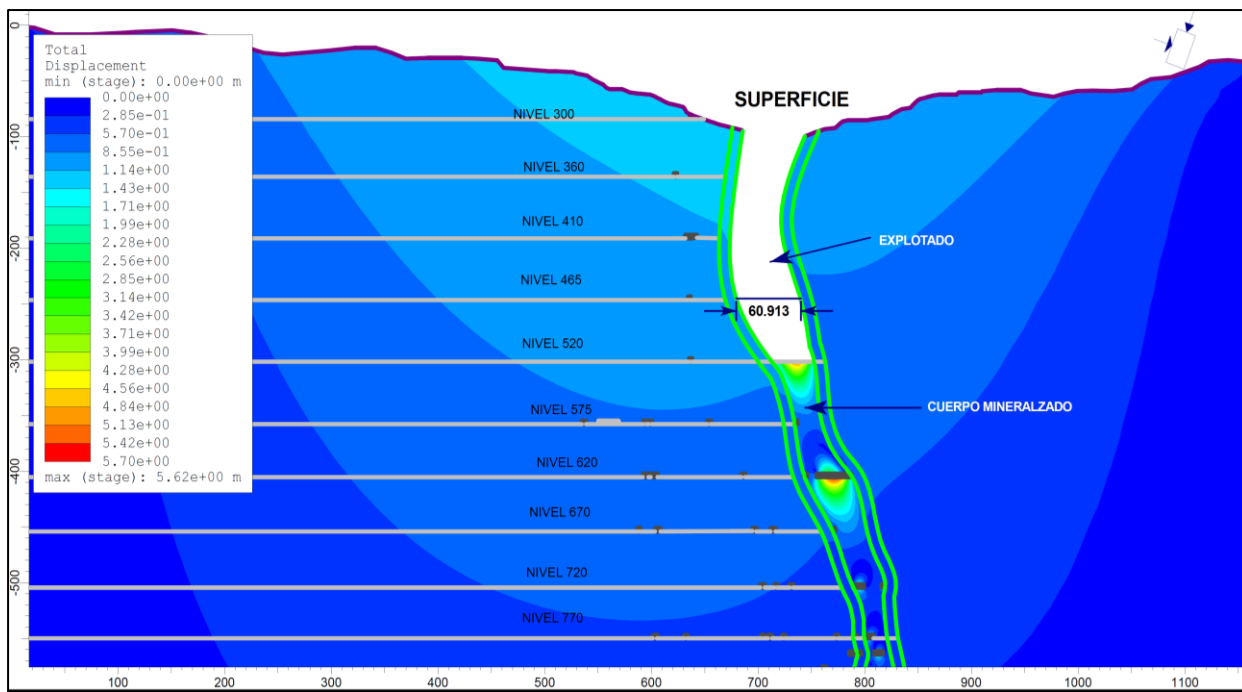
Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.1120 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 3.70005m.

4.5.2. Modelo tenso deformacional vista transversal

La herramienta de cálculo empleada ha sido el programa RS2 perteneciente a Rocscience Inc. (2008). El uso de este programa nos permite obtener resultados en el cálculo de los esfuerzos actuantes y desplazamientos generados en torno a las excavaciones simuladas.

Figura 23:

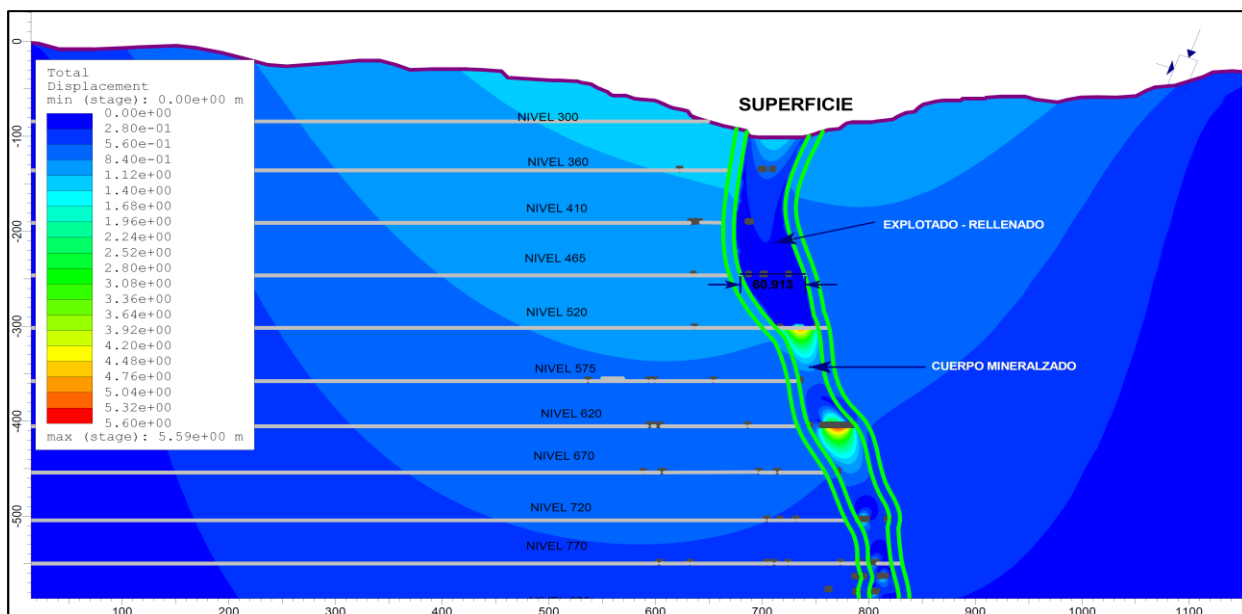
Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.520.



Nota: en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.1120, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 5.61958m.

Figura 24:

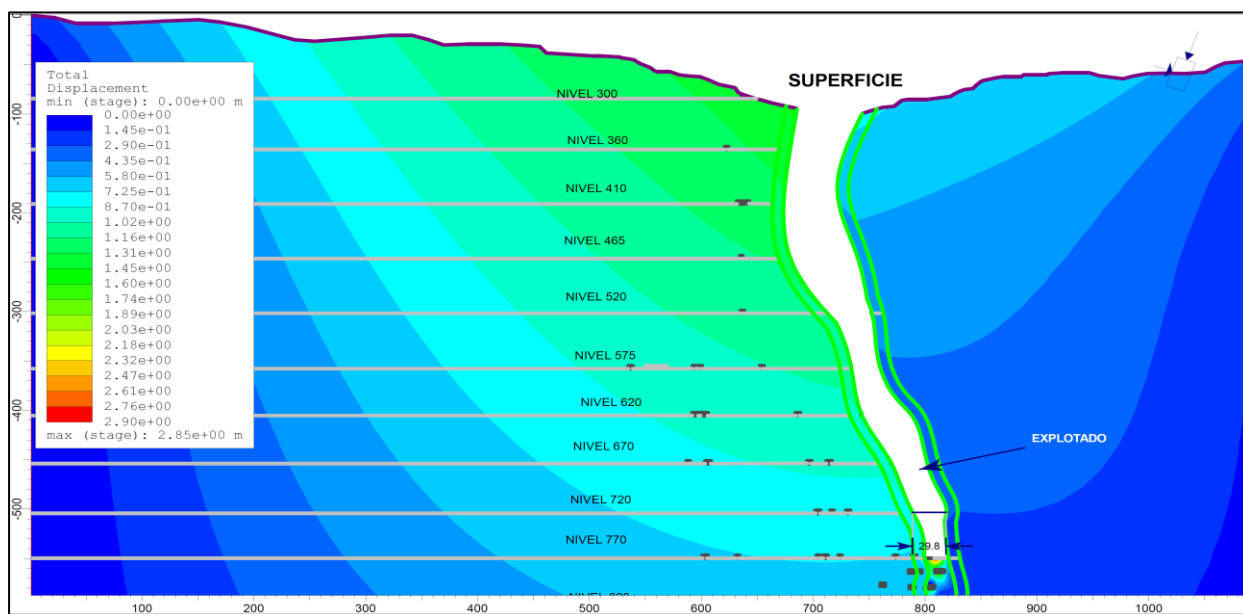
Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.520



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.520 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 5.59157m.

Figura 25:

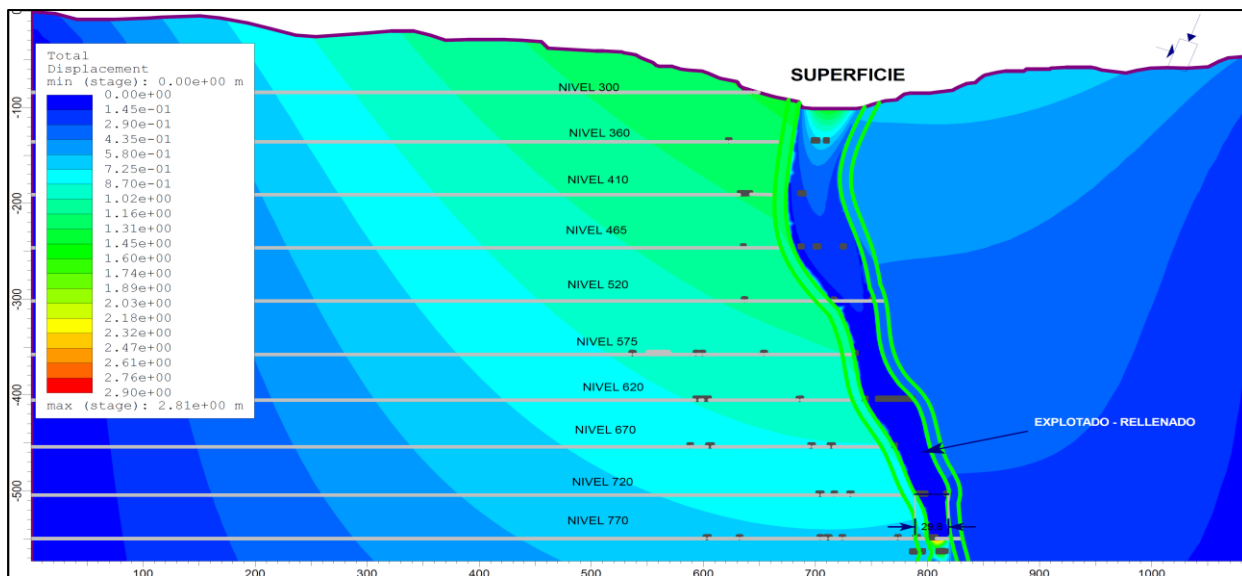
Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.770



Nota: en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.770, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 2.85192m.

Figura 26:

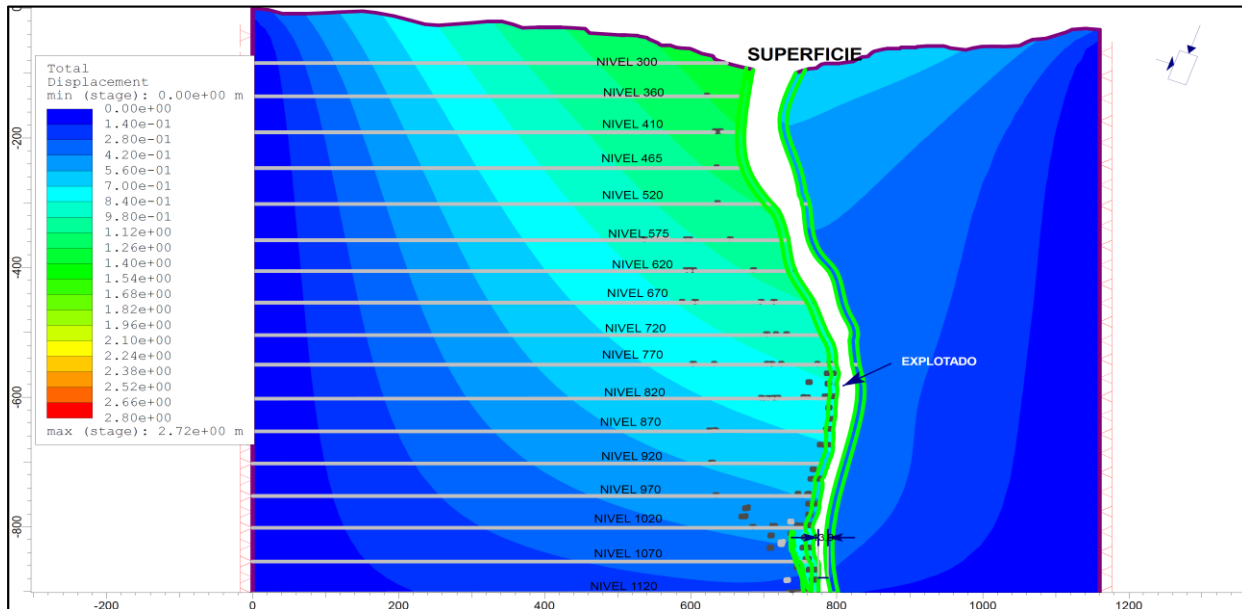
Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.770



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.770 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 2.80779m.

Figura 27:

Modelo tenso-deformacional minado hasta el Nv.1120.



Nota: en este caso se simula la explotación y en el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el Nv.1120, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome. Se puede determinar un desplazamiento total de 2.72284m.

Figura 40:

Modelo tenso-deformacional minado y rellenado hasta el Nv.770

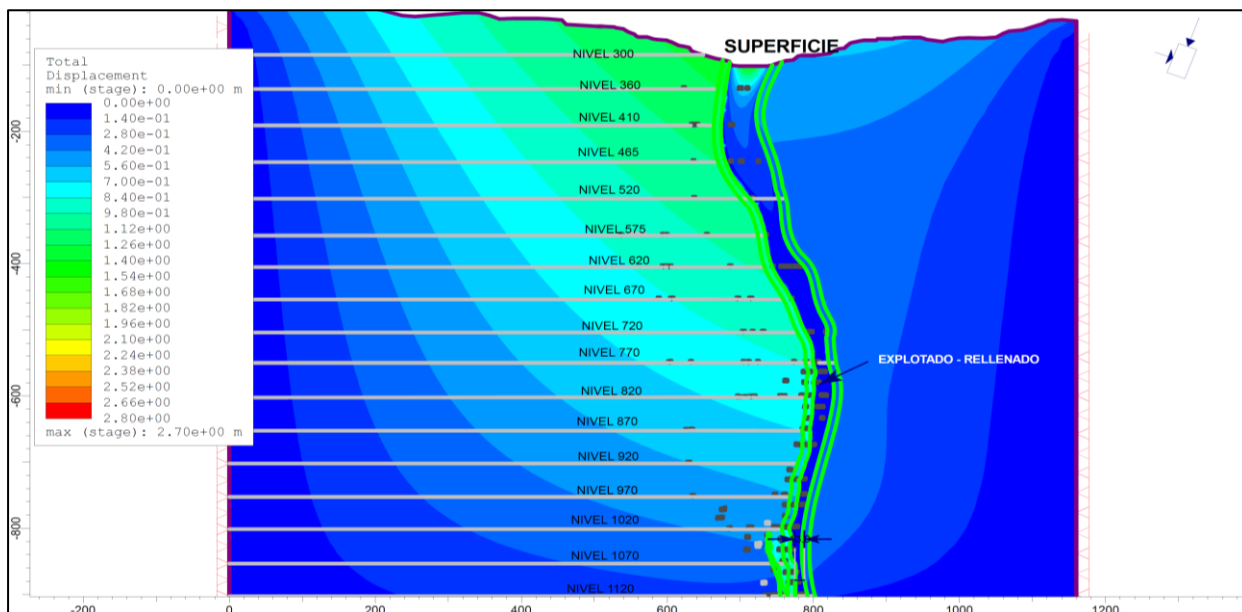
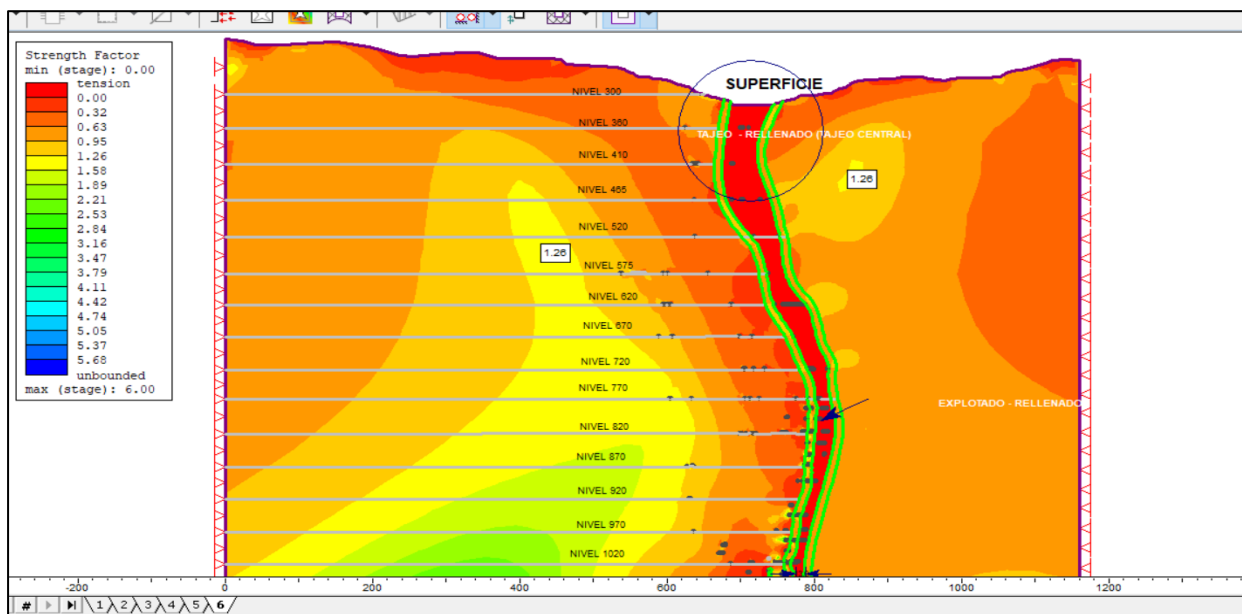


Figura 41:

Strength factor en el borde del cono de fracturamiento minado y rellenado hasta el Nv.1120



Nota: La simulación efectuada nos permite conocer las condiciones de estabilidad, en este caso se simula la explotación hasta el Nv.1120 y su posterior relleno detrítico, se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 2.70292m.

Tabla 19:

Desplazamientos totales vista transversal.

Minado	Desplazamiento explotado (m)	Tajo	Desplazamiento rellenado (m)	tajo	Desplazamiento
Minado al Nv. 620	5.620		5.592		0.028
Minado al Nv. 870	2.852		2.808		0.044
Minado al Nv. 1120	2.723		2.703		0.020

Tabla 20:

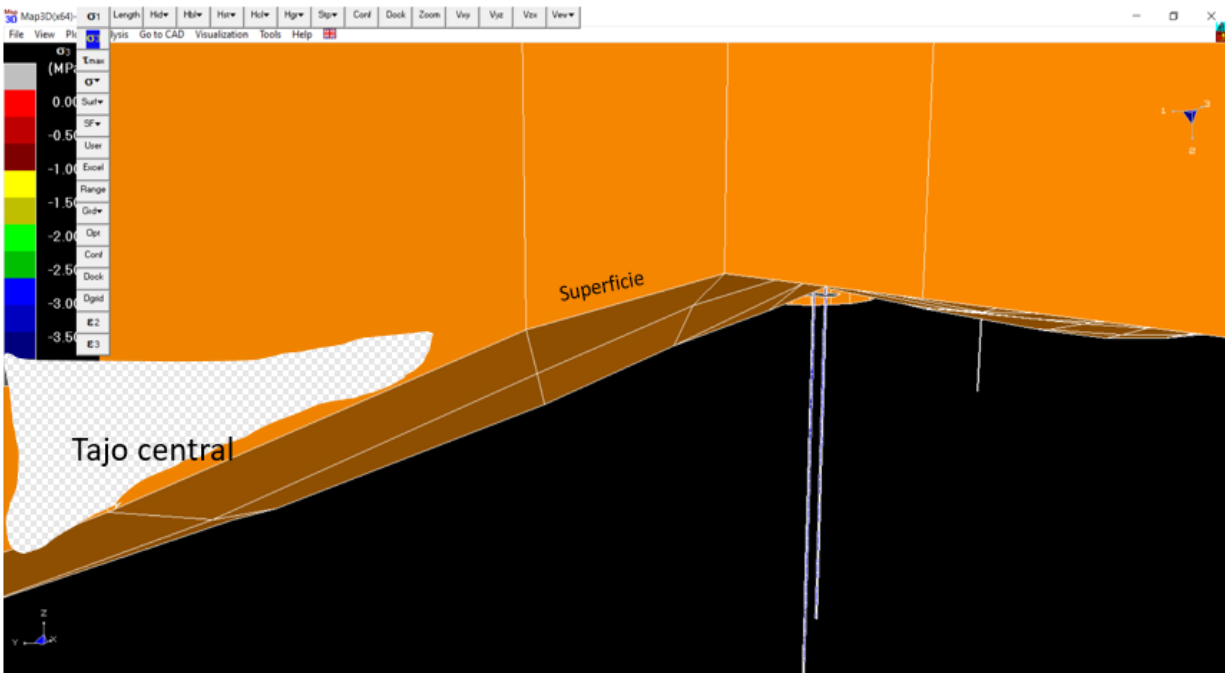
Desplazamientos totales vista longitudinal.

Minado	Desplazamiento explotado (m)	Tajo	Desplazamiento rellenado (m)	tajo	Desplazamiento
Minado al Nv. 520	5.833		4.554		1.279
Minado al Nv. 770	5.993		4.848		1.145
Minado al Nv. 1120	4.627		3.7001		0.927

En función del modelamiento geomecánico por el método de elementos finitos (RS2) de la empresa Rocscience, programa 2D para análisis de elementos finitos y análisis de estrés para excavaciones subterráneas, analizamos el comportamiento de los desplazamientos existentes en el minado por Sub Level Caving, desde superficie, hasta el Nv.1120.

Figura 28:

Análisis de la estabilidad del tajeo Central y labores subterráneas con el apoyo del software (Map 3D

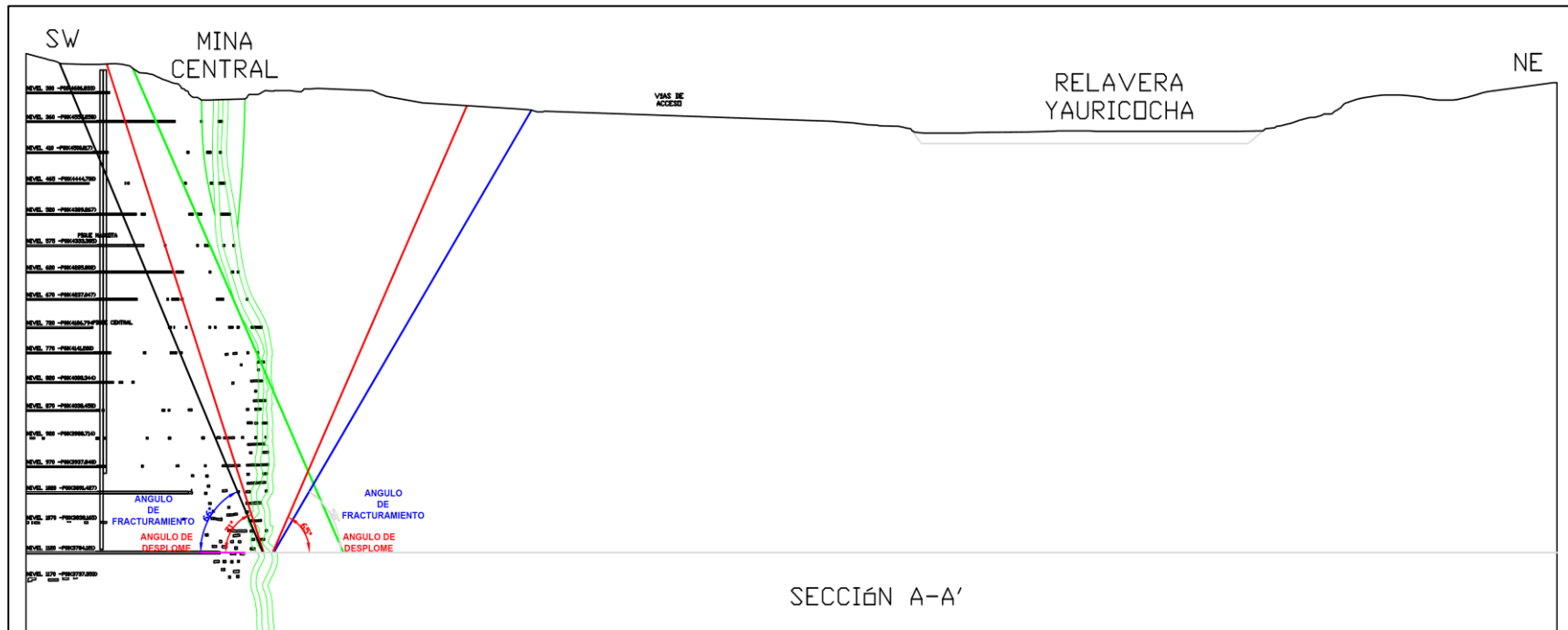


De acuerdo al modelamiento con el Map 3D, según el módulo de deformación generada por la subsidencia los esfuerzos de corte y tracción en la masa rocosa que engloba a la zona de explotación por Sub Level Caving hace que el desplazamiento masal acelere afectando al medio; pero en caso de no rellenar al pit central traerá problemas serios de estabilidad en superficie; motivo por el cual es necesario rellenar el tajeo en la superficie para evitar accidentes con problemas ambientales y la infraestructura de la mina.

4.6. Análisis en forma integral entre la relavera y tajo central – oficinas

Figura 29:

Sección global para el análisis de estabilidad del tajo Central y la relavera



Ángulos de fracturamiento y desplome producto del minado por SLC. Según el informe realizado por la empresa DCR ingenieros (Estudio actualizado de Estabilidad Física de los Piques Mascota y Central), se realizó el diseño correspondiente, se consideró ángulos de fracturamiento de la caja techo de 58° , el ángulo de desplome de 65° . En la caja piso se consideró ángulo de fracturamiento de 66° , el ángulo de desplome de 71° .

Figura 44:

Vista en sección de la malla de elementos finitos antes de iniciar la simulación

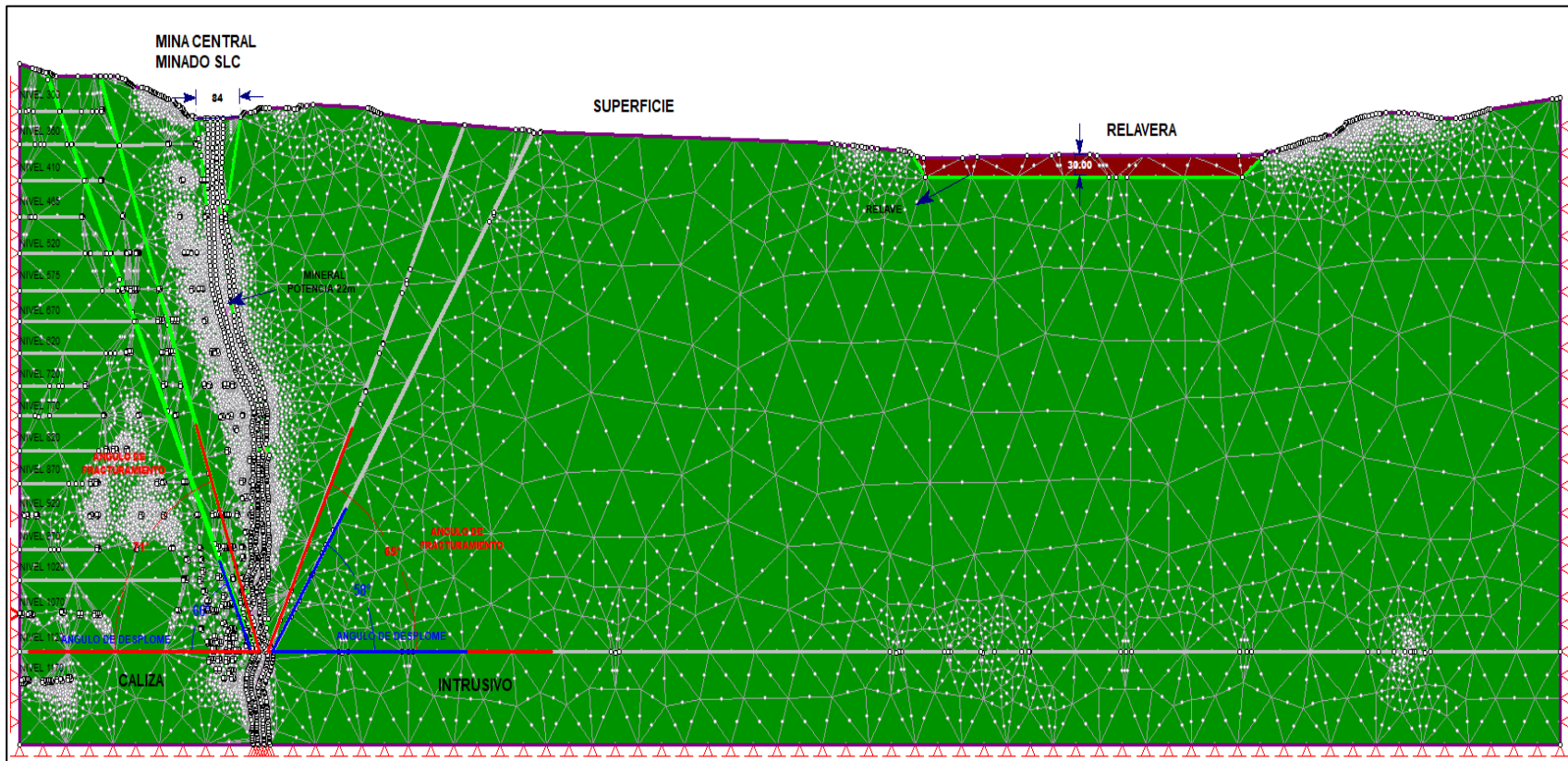
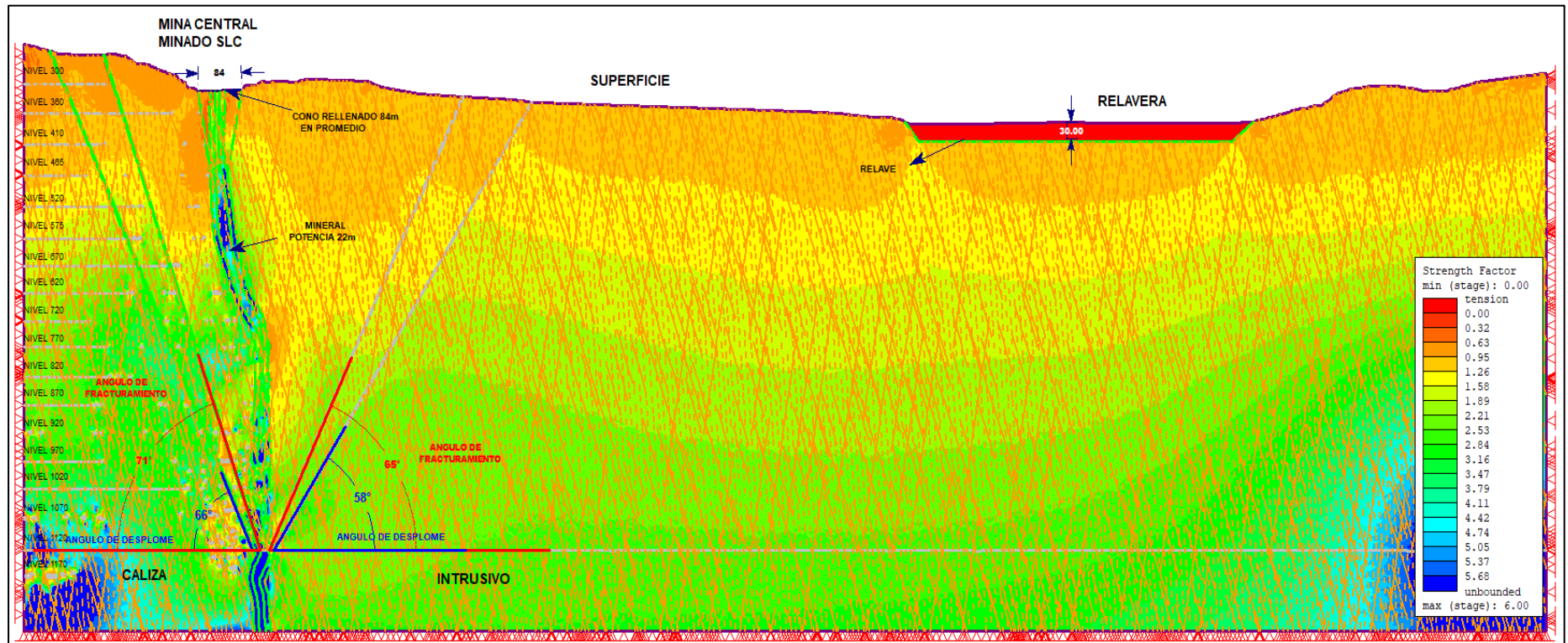


Figura 45:

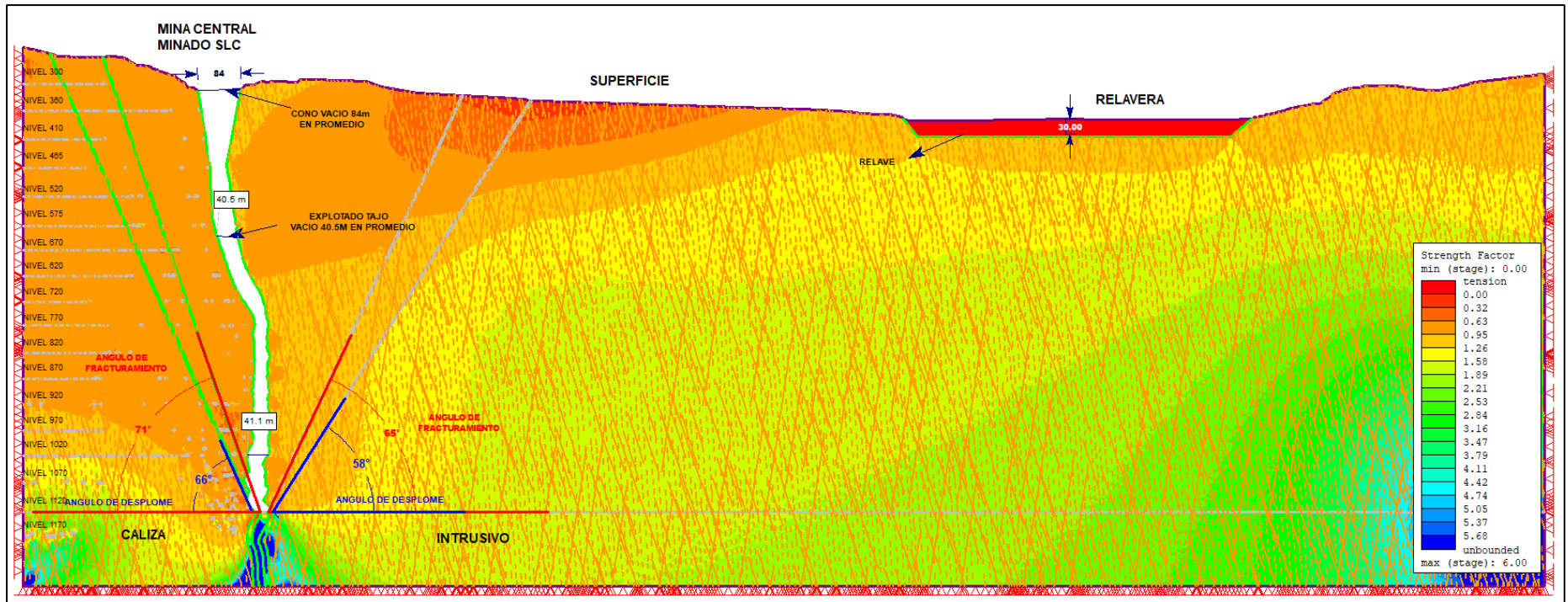
Análisis de estabilidad



Vista en sección. En este modelo se está simulando, el cuerpo mineralizado sin explotar, se considera una potencia mineralizada de 22m en promedio. Se aprecia que la zona de plastificación entre el tajo y la relavera son superiores a la unidad. No compromete la estabilidad de la relavera.

Figura 46:

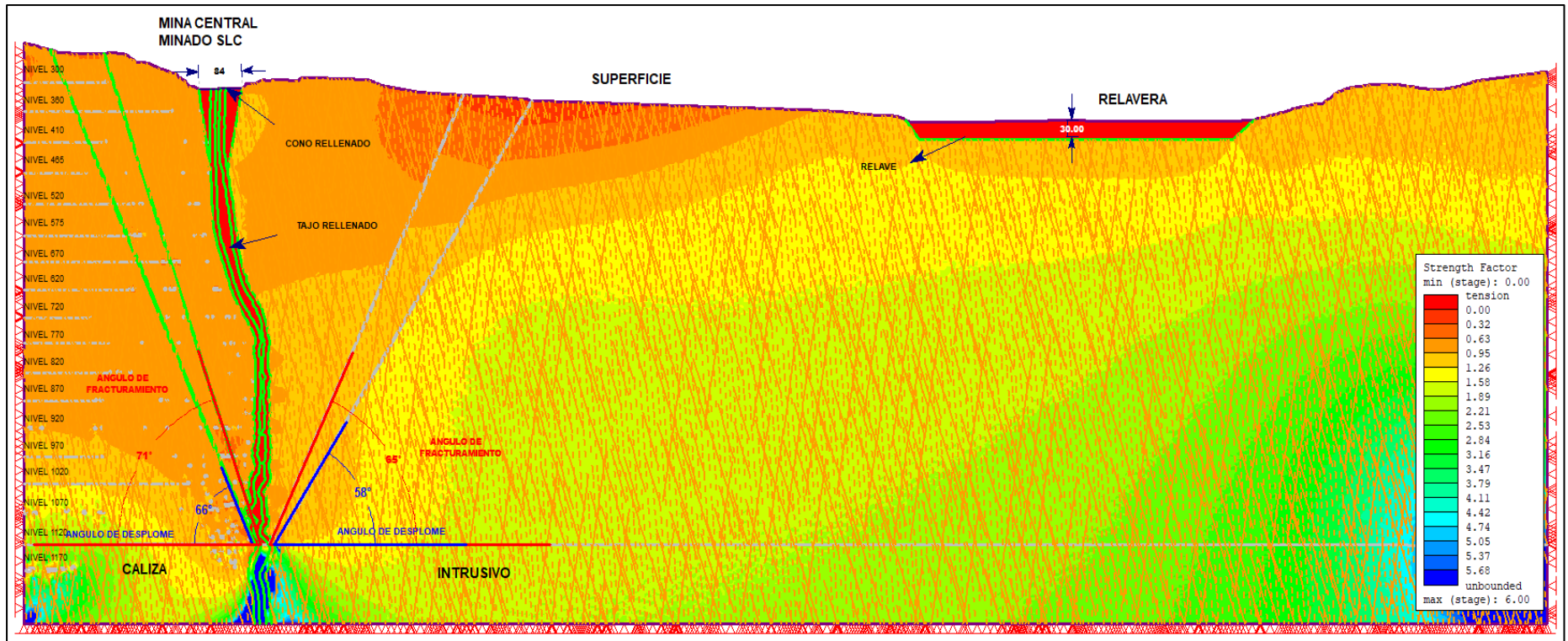
Análisis de estabilidad con la abertura vacío



Vista en sección. En este modelo se está simulando la explotación hasta el Nv.1120 piso 0 y el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el piso cero del Nv.1120, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome, pero es una idea de la perturbación generada. Se aprecia que la zona de plastificación menor a 1 aumenta considerablemente entre el tajo y la relavera, caso que no lo es, ya que actualmente el tajo este relleno con relleno detrítico. No compromete la estabilidad de la relavera.

Figura 47:

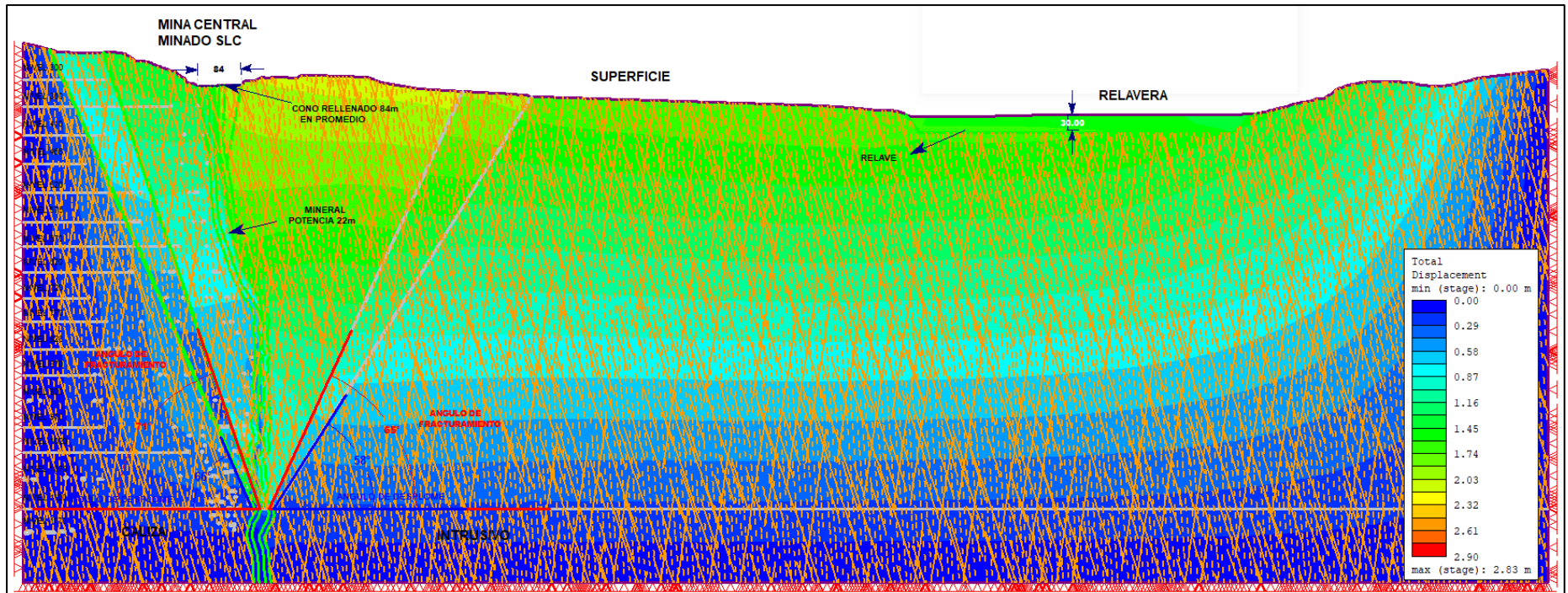
Análisis de estabilidad con la abertura con auto relleno y tanta caja techo y piso estresado



Vista en sección. En este modelo se simula la explotación hasta el Nv.1120 y su posterior relleno detrítico, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo está siendo ocupado por material estéril, producto del desplome y del relleno detrítico que se realiza actualmente. Se aprecia que la zona de plastificación entre el tajo y la relavera son superiores a la unidad. No compromete la estabilidad de la relavera.

Figura 48:

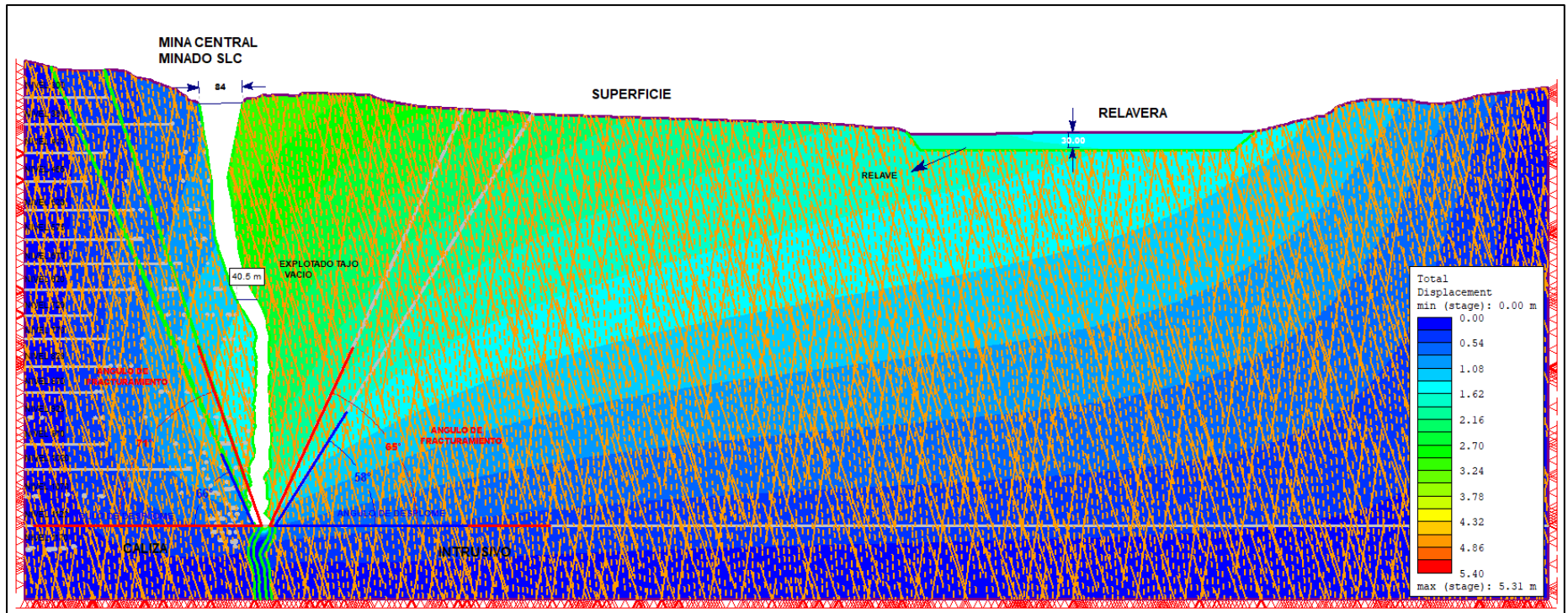
Análisis de estabilidad se puede ver sin daño a la zona industrial



Vista en sección. En este modelo se está simulando, el cuerpo mineralizado sin explotar, se considera una potencia mineralizada de 22m en promedio. Se puede determinar un desplazamiento total de 2.83334m.

Figura 49:

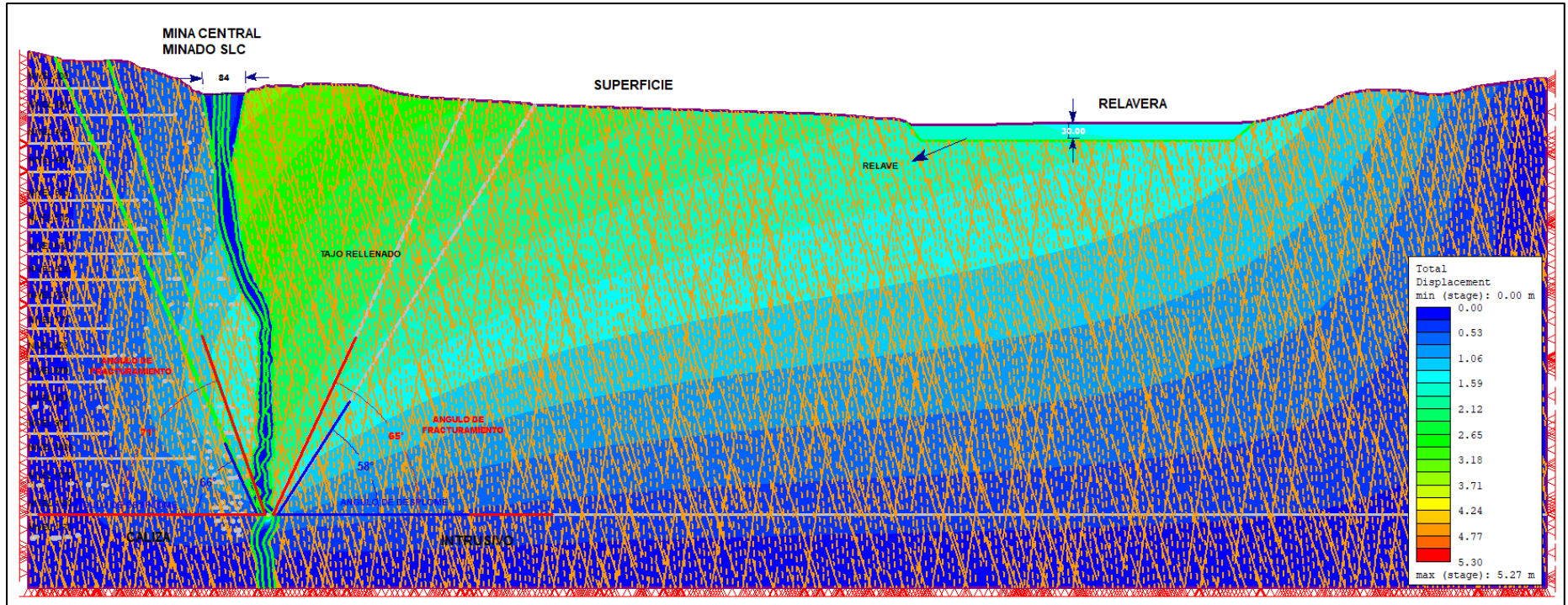
Análisis de estabilidad con abertura después de la explotación



Vista en sección. En este modelo se está simulando la explotación hasta el Nv.1120 piso 0 y el caso hipotético de dejar abierto toda el área minada hasta el piso cero del Nv.1120, caso que no lo es, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo estaría siendo ocupado por material estéril, producto del desplome, pero es una idea de la perturbación generada. Se puede determinar un desplazamiento total de 5.31168m.

Figura 50

Experimentar un desplazamiento total 5.3m eso generaría problema serio en tema de estabilidad global, es importante rellenar mínimo hasta la cota del pique estación en superficie.



Vista en sección. En este modelo se simula la explotación hasta el Nv.1120 y su posterior relleno detrítico, ya que a medida que el minado avanza, la zona superior del tajeo está siendo ocupado por material estéril, producto del desplome y del relleno detrítico que se realiza actualmente. Se puede determinar que los desplazamientos totales disminuyeron a 5.27331m.

CONCLUSIONES

1. En base a los resultados obtenidos a través de la implementación de diferentes sistemas de monitoreo geotécnico en la mina de la provincia de Yauyos, se puede concluir que estos sistemas han desempeñado un papel fundamental en la evaluación y gestión de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving. Desde la utilización de inclinómetros para medir desplazamientos en diferentes direcciones, hasta el empleo de tecnologías avanzadas como el Robot Leica y el monitoreo microsísmico, cada herramienta ha contribuido significativamente a comprender mejor los procesos geotécnicos involucrados y a identificar potenciales riesgos de estabilidad. La integración de estos sistemas ha permitido una evaluación más completa y precisa de la subsidencia, lo que a su vez ha facilitado la toma de decisiones informadas para garantizar la seguridad de la operación minera y minimizar el impacto ambiental. En resumen, la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral se revela como una estrategia efectiva para mitigar los riesgos asociados con la explotación minera mediante el método Sublevel Caving en la provincia de Yauyos.

2. La implementación de inclinómetros ha sido fundamental para monitorear la subsidencia en la mina de Yauricocha, proporcionando mediciones precisas sobre la evolución de la deformación del terreno. Estos dispositivos han permitido identificar desplazamientos significativos en diversas direcciones y profundidades, facilitando la evaluación de riesgos geotécnicos y contribuyendo a la seguridad de las operaciones mineras.
 A través del monitoreo continuo en los puntos estratégicos como el Pique Mascota e Inclinómetro Central, se ha logrado obtener información crítica sobre las deformaciones acumuladas en el macizo rocoso:
 Inclinómetro 1 (Incl-01): Ubicado frente al Pique Mascota a 95 m de profundidad, con 26 mediciones realizadas desde marzo de 2020, ha revelado picos de deflexión de 7.81 mm en la dirección A+ (SE), 5.09 mm en A- (NW), y 23.07 mm en el eje B- (NE).
 Inclinómetro 2 (Incl-02): Frente al Pique Central, con 63 mediciones desde enero de 2018, mostró una deflexión máxima de 14.68 mm en la dirección A+ (SW) y -11.12 mm en B+ (NW). Se encuentran dentro de los parámetros permisibles, condición estable.

3. La introducción del Robot Leica ha mejorado significativamente el monitoreo de la subsidencia en la mina de Yauricocha, permitiendo mediciones precisas a larga distancia. Esto ha facilitado el análisis detallado de los desplazamientos superficiales, proporcionando datos clave sobre la magnitud y distribución de la subsidencia. La información recopilada ha

sido fundamental para tomar decisiones informadas que garanticen la estabilidad de la mina y la seguridad del entorno.

Entre el 29 de diciembre de 2022 y el 31 de enero de 2023, los desplazamientos relativos en las estaciones EM, EMR y ESU variaron entre 0,07 m y 0,51 m, con velocidades de 0,01 cm/día, manteniéndose en un Nivel 1 de criticidad tolerable.

En el análisis acumulado desde el 4 de septiembre de 2017 hasta el 31 de enero de 2023, los desplazamientos oscilaron entre 6,02 cm y 81,53 cm, con velocidades de 0,02-0,03 cm/día, manteniéndose dentro del mismo nivel de criticidad.

Estos resultados reflejan estabilidad dentro de los límites establecidos y destacan el impacto del Robot Leica en el monitoreo y control de subsidencia en la mina.

4. La integración de tecnología de monitoreo microsísmico ha transformado significativamente la evaluación de la subsidencia y los riesgos geotécnicos en la unidad minera Yauricocha, especialmente en los cuerpos Esperanza, Catas y Mascota. Desde su implementación en octubre de 2021, este sistema ha permitido registrar 3,292 eventos microsísmicos, de los cuales solo 31 eventos superaron la magnitud 1 en la escala de momento magnitud (Mw), confirmando una baja incidencia de eventos de alta energía.

El monitoreo ha identificado zonas críticas, como el nivel 1070, en el cono de subsidencia, donde se concentra la mayor densidad de eventos, especialmente entre los niveles 820 y 1120. Sin embargo, los eventos registrados no han causado daños severos en las labores subterráneas, con velocidades de pico de partícula (PPV) de 38 mm/s, manteniéndose dentro de los parámetros de seguridad.

Además, se ha confirmado que la mayoría de los eventos presentan un riesgo bajo a moderado, lo que refleja un proceso de acomodación del terreno característico del método de explotación Sublevel Caving (SLC). Este análisis, complementado con gráficas de densidad y distribución de eventos, ha sido fundamental para planificar ajustes operativos y aplicar medidas preventivas, garantizando la estabilidad del terreno y la seguridad de la operación minera.

En síntesis, el sistema de monitoreo microsísmico no solo ha permitido una comprensión más profunda de los procesos que contribuyen a la subsidencia, sino que también ha sido una herramienta clave para gestionar los riesgos y asegurar la continuidad sostenible de las actividades mineras.

5. La implementación del monitoreo mediante cable TDR ha mejorado significativamente la evaluación de la subsidencia en la mina de Yauyos, proporcionando información detallada sobre la evolución de la bóveda del cono de subsidencia. Esta tecnología, integrada con otros

sistemas de monitoreo geotécnico, ha permitido identificar áreas de riesgo potencial y aplicar medidas preventivas para garantizar la estabilidad del terreno y la seguridad de las operaciones mineras.

Las anomalías de seccionamiento registradas en 2023, con pérdidas de 80 m y 142 m de cable a velocidades de 2,42 m/día y 3 m/día, reflejan un proceso activo de deformación en el subsuelo, aunque sin afectar las operaciones actuales. Actualmente, los cables de 338 m y 432 m sirven como indicadores del avance del cono de subsidencia hacia la superficie, proyectándose posibles anomalías entre enero de 2025 y marzo de 2029, dependiendo de la velocidad del proceso de minado y fracturamiento del macizo.

Estos resultados destacan la relevancia del monitoreo continuo para anticipar impactos potenciales, mitigar riesgos y garantizar la sostenibilidad operativa.

RECOMENDACIONES

Se sugiere continuar utilizando inclinómetros como parte integral del sistema de monitoreo geotécnico. Es importante mantener un programa de monitoreo regular y sistemático para detectar cambios en los desplazamientos del terreno a tiempo y tomar medidas preventivas cuando sea necesario.

Mantener y mejorar el uso del equipo Robot Leica para el monitoreo de desplazamientos superficiales. Esto implica seguir calibrando y actualizando el equipo según sea necesario, así como también considerar la expansión del programa de monitoreo para abarcar áreas más extensas de la mina.

Continuar utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico como complemento al monitoreo tradicional. Es importante seguir investigando y desarrollando métodos de análisis de datos para aprovechar al máximo la información proporcionada por esta tecnología y mejorar la comprensión de los procesos geotécnicos.

Continuar y expandir el monitoreo a través del cable TDR para comprender mejor la variación de la humedad y la temperatura en el subsuelo. Esto implica considerar la instalación de más puntos de monitoreo en áreas críticas y desarrollar sistemas de análisis de datos que permitan una interpretación más precisa de la información recopilada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez Fernández, M. I. (2004). Predicción y control de subsidencia por excavaciones subterráneas. <http://hdl.handle.net/10651/17043>
2. Arcila, J. (2022). Predicción de alertas de falla para planes de monitoreo geotécnico aplicando el método del inverso de la velocidad acoplado con algoritmos de aprendizaje supervisado. *Tesis de Doctorado*, Pontificia Universidad Católica del Perú.
3. Barton Hoek Brown, Romana, B., & Belandria, N., & Bongiorno, F. (2016). Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos según: Geotecnia aplicada.
4. Belandria, F., & Bongiorno, F. (2016). Clasificación geomecánica RQD y Q. *International Journal of Rock Mechanics*, 42(3), 123-145.
5. Galvis, A. (2016). Monitoreo superficial de movimientos en masa empleando tecnología LiDAR relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio. *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional de Colombia.
6. Gesche, R. (2016). Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnico en túneles estación e interestación del metro de Santiago. *Tesis de Maestría*, Universidad de Chile.
7. Herrera, P., & Rivas, L. (2000). Sistemas de medida en la instrumentación geotécnica. *Journal of Civil Engineering*, 18(2), 75-83.
8. Landeo, J., Rivera, H., & Breña, C. (2015). Análisis de control de riesgos por efectos de subsidencia de rocas en la unidad minera Yauricocha. *Revista de Geotecnia y Minería*, 18, 45-60.
9. López, M., & Gómez, R. (2014). Estudios de subsidencia para excavaciones subterráneas en la primera línea del metro de Bogotá (PLMB) priorizado en el tramo III. *Tesis de Maestría*, Universidad de los Andes.
10. Oliva, J. (2015). Vigilancia y control permanente de presas mediante instrumentación geotécnica. *Revista Internacional de Ingeniería Civil*, 23(4), 122-130.
11. OSINERGMIN. (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Gerencia de Supervisión Minera.
12. Osorio, O. (s.f.). La gran minería... ¿beneficios o perjuicios? <http://www.canonistas.com/foros/otras/201841-maquinaria->
13. Poland, J., et al. (1972). Definición de subsidencia. *Journal of Geological Research*, 50(1), 20-35.
14. Tomás, R., et al. (2009). Subsidencia del terreno: definiciones y manifestaciones. *Geotechnique Today*, 21(5), 90-105.
15. Zanabria, R. (2021). Evaluación de la subsidencia inducida por la extracción de mineral para determinar la estabilidad del Pique Mascota y Central en la U.M. Yauricocha. *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

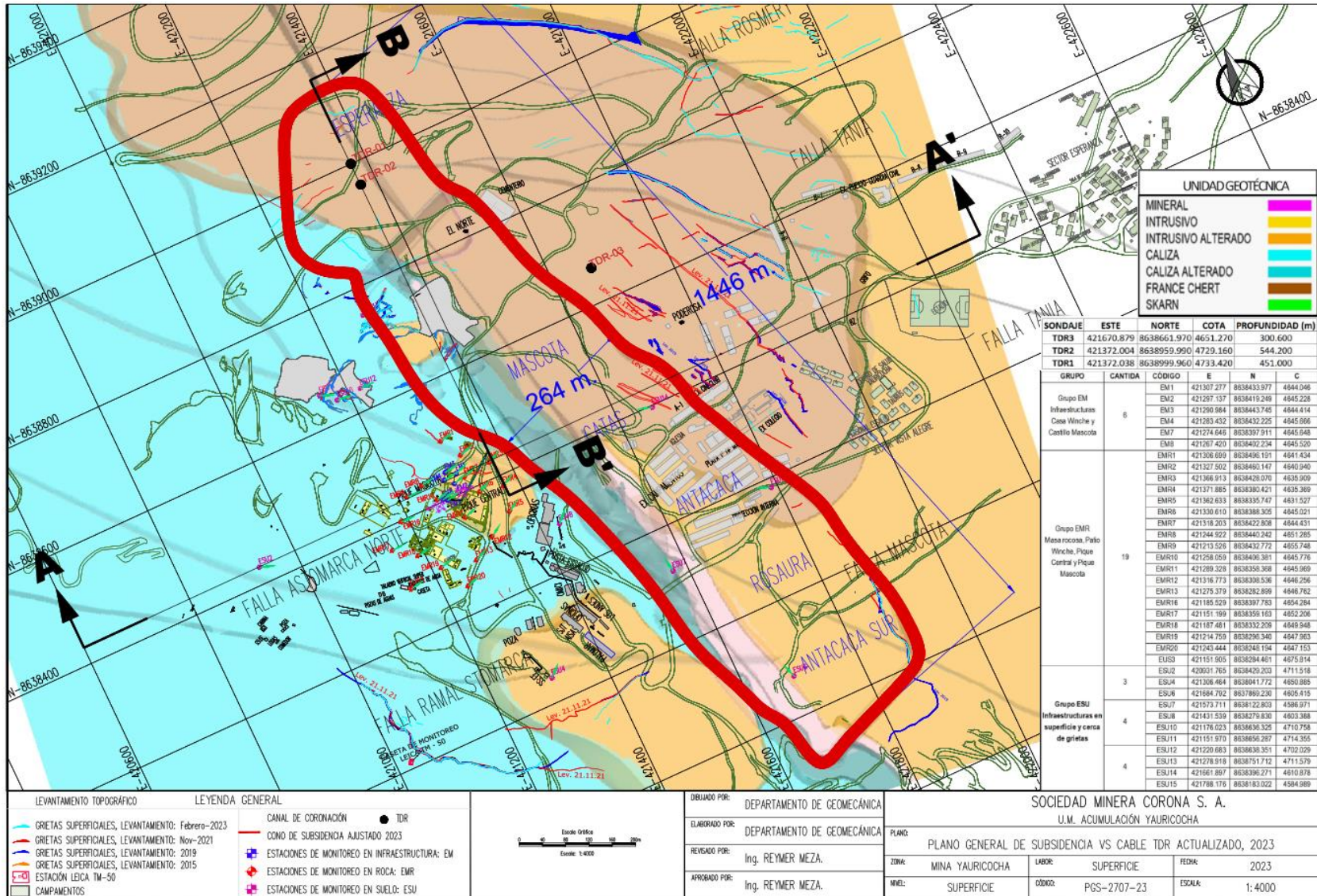
ANEXOS
Anexo 1: Matriz de consistencia
MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: “IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE LA SUBSIDENCIA EN EL MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUBLEVEL CAVING EN LA UNIDAD MINERA YAURICOCHA”

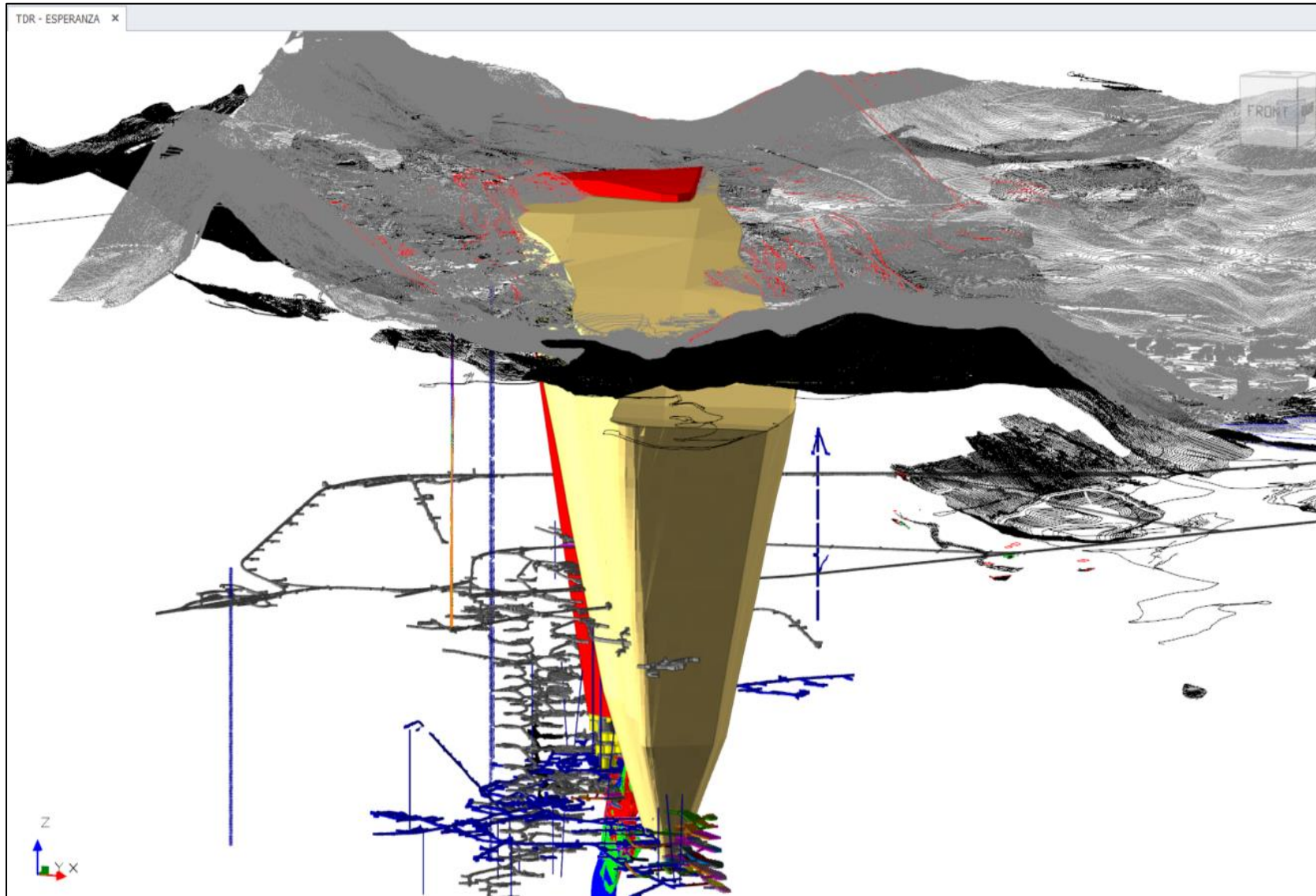
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿De qué manera la Implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha?</p>	<p>Objetivo general Evaluar de qué manera la Implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha.</p>	<p>Hipótesis general La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permitirá evaluar de manera precisa y oportuna el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación sublevel caving en la unidad minera Yauricocha.</p>	<p>Ámbito: – Temporal : 2023 Espacial : Mina Yauricocha Tipo de investigación Aplicada para resolver problemas mineros.</p> <p>Nivel de investigación Explicativo</p> <p>Método de investigación General: Científico Específico: Inductivo–deductivo</p> <p>Diseño de estudio No experimental, observación sin intervención</p> <p>Instrumento y técnica ficha de mapeo Observación</p> <p>Procesamiento Presentación descriptiva con tablas de frecuencia, gráficos y estadística inferencial.</p>
<p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> – ¿Cuál es el impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha? – ¿Cómo influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico con el equipo Robot Leica en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha? – ¿Cuál es la influencia de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving 	<p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> – Evaluar el impacto de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico a través del uso de inclinómetros en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. – Determinar como influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico con el equipo Robot Leica en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. – Establecer la influencia de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. 	<p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> – La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando inclinómetros tendrá un efecto significativo en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. – La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando el equipo Robot Leica influirá positivamente en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. – La implementación del sistema de monitoreo geotécnico utilizando la tecnología de monitoreo microsísmico influenciará de manera significativa en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. 	

<p>en la unidad minera Yauricocha?</p> <ul style="list-style-type: none"> - ¿De qué manera influye la implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha? 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar como la implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha.. 	<ul style="list-style-type: none"> - La implementación del sistema de monitoreo geotécnico, incluyendo el monitoreo a través del cable TDR, tendrá un efecto positivo en la evaluación de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. 	
---	--	---	--

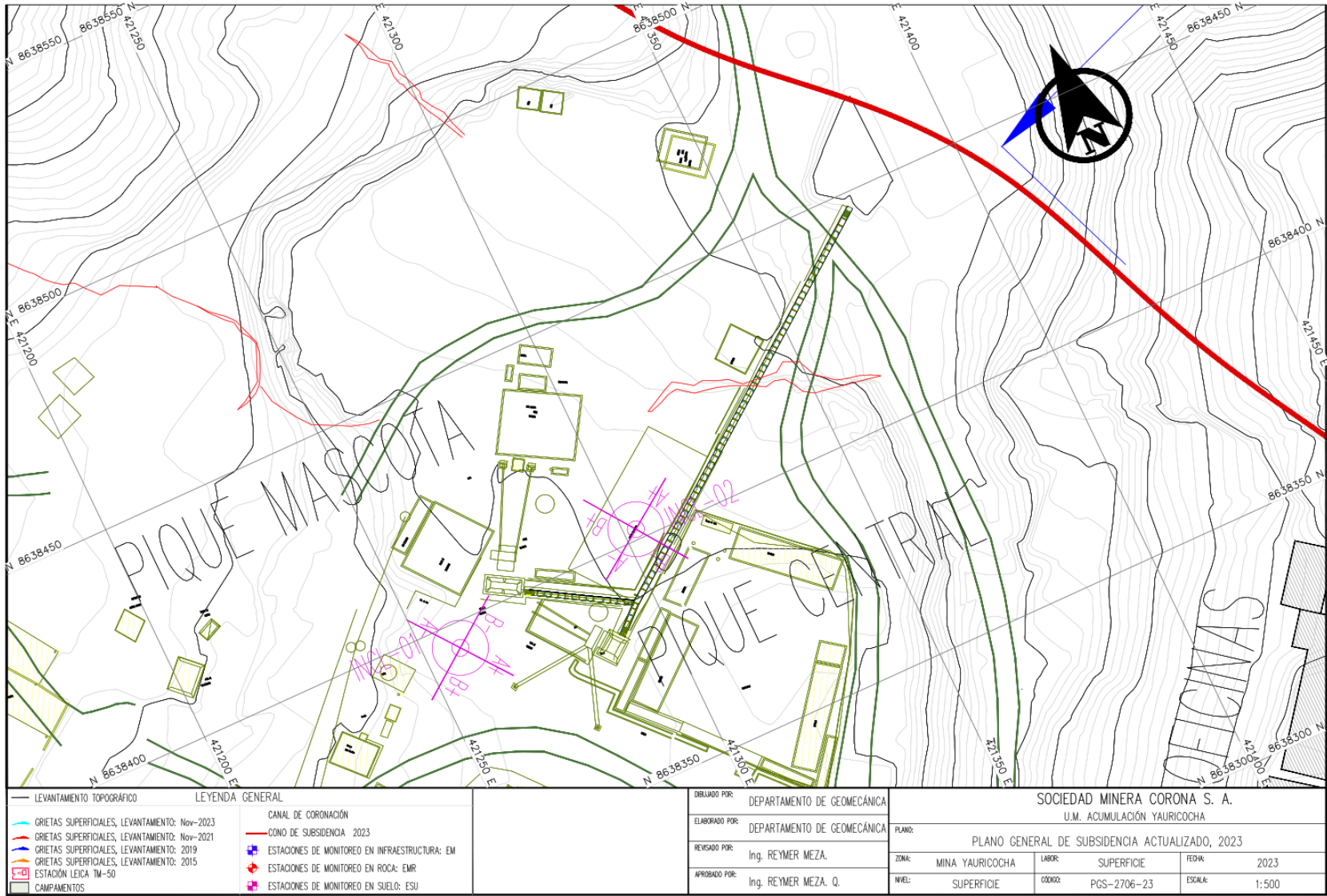
Anexo 2: Plano de Ubicación- Control geotécnico



Anexo 3: Plano Isométrico - Cono de subsidencia



Anexo 4: Plano de ubicación- Inclínómetro



INCLINÓMETRO 1

PIQUE MASCOTA: ANÁLISIS DEL INCLINÓMETRO 1° - ENERO 2023									
Fecha de monitoreo	Parámetros	Con dirección a la cara del talud (SE)		Con dirección opuesta a la cara del talud (NW)		Con dirección al flanco SW		Con dirección al flanco NE	
		A+		A-		B+		B-	
		Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura
07/03/2020	Inicio de monitoreo	15.70 m	0.0000 mm	64.24 m	0.0000 mm	64.24 m	0.0000 mm	15.70 m	0.0000 mm
Fecha del monitoreo del mes anterior	Deformación relativa*		-3.9600 mm		2.2900 mm		0.5200 mm		1.5300 mm
	Nº de días		26.0 días		26.0 días		26.0 días		26.0 días
01/01/2023	Velocidad relativa		0.1523 mm/día		0.0881 mm/día		0.0200 mm/día		0.0588 mm/día
Fecha último monitoreo	Deformación acumulada		7.8100 mm		5.0900 mm		-7.5500 mm		23.0700 mm
27/01/2023	Nº de días acumulados	1056.0 días	1056.0 días	1056.0 días	1056.0 días				
	Velocidad acumulada	0.0074 mm/día	0.0048 mm/día	0.0071 mm/día	0.0218 mm/día				

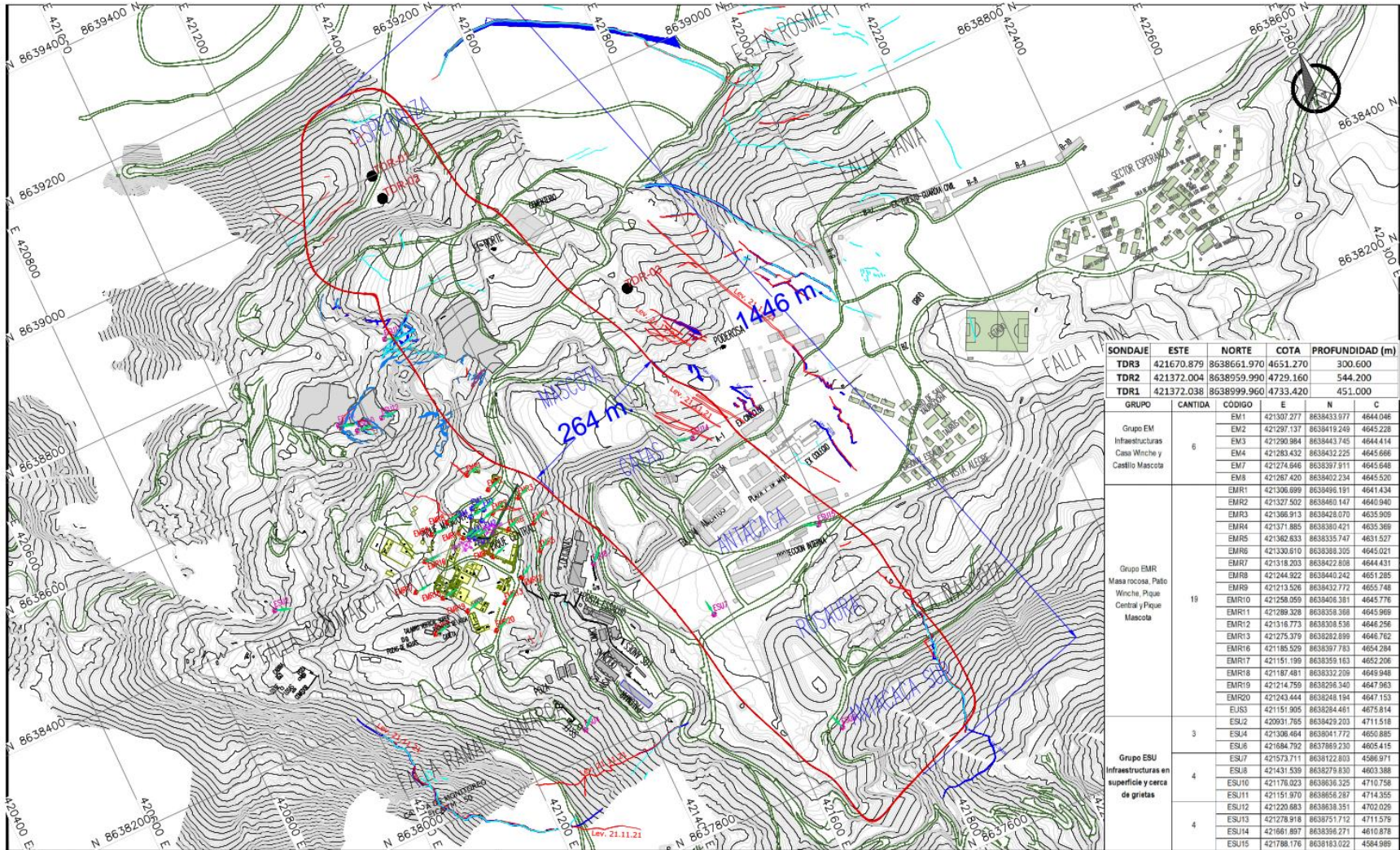
INCLINÓMETRO 2

<u>PIQUE CENTRAL: ANÁLISIS DEL INCLINÓMETRO 2 - ENERO 2023</u>									
Fecha de monitoreo	Parámetros	Con dirección a la cara del talud (SW)		Con dirección opuesta a la cara del talud (NE)		Con respecto al eje paralelo a la dirección al flanco NW		Con dirección al flanco SE	
		A+		A-		B+		B-	
		Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura
09/01/2018 Inicio de monitoreo	Inicio de monitoreo	155.63 m	0.0000 mm	165.23 m	0.0000 mm	163.20 m	0.0000 mm	167.20 m	0.0000 mm
Fecha del monitoreo del mes anterior 04/01/2023	Deformación relativa*		0.8800 mm		0.7300 mm		0.4800 mm		0.4800 mm
	N° de días		20.0 días		20.0 días		20.0 días		20.0 días
	Velocidad relativa		0.0440 mm/día		0.0365 mm/día		0.0240 mm/día		0.0240 mm/día
Fecha último monitoreo 24/01/2023	Deformación acumulada		14.6800 mm		-9.9100 mm		-11.1200 mm		7.7300 mm
	N° de días acumulados		1841.0 días		1841.0 días		1841.0 días		1841.0 días
	Velocidad acumulada		0.0080 mm/día		-0.0054 mm/día		-0.0060 mm/día		0.0042 mm/día

INCLINÓMETRO 3

PRESA DE RELAVE: ANÁLISIS DEL INCLINÓMETRO INCL-03(5TE) ° ENERO 2022													
Fecha de monitoreo	Parámetros	Con dirección opuesta a la cara del talud (SW)		Con dirección opuesta a la cara del talud (SW)		Con dirección a la cara del talud (NE)		Con respecto al eje paralelo a la presa con dirección al flanco (SE)		Con respecto al eje paralelo a la presa con dirección al flanco (SE)		Con respecto al eje paralelo a la presa con dirección al flanco (SE)	
		A-		A-		A+		B+		B+		B+	
		Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura
04/10/2021 Inicio de monitoreo	Inicio de monitoreo		0.0000 mm		0.0000 mm		0.0000 mm		0.0000 mm		0.0000 mm		0.0000 mm
Fecha del monitoreo del mes anterior 15/12/2022	Deformación relativa*		0.5500 mm		-0.2200 mm		0.0300 mm		0.4400 mm		0.0000 mm		0.2500 mm
	N° de días		21.0 días		21.0 días		21.0 días		21.0 días		21.0 días		21.0 días
	Velocidad relativa	0.00 m	0.0262 mm/día	9.80 m	-0.0105 mm/día	22.00 m	0.0014 mm/día	0.00 m	0.0210 mm/día	9.80 m	0.0000 mm/día	22.00 m	0.0119 mm/día
Fecha último monitoreo 05/01/2023	Deformación acumulada		12.1300 mm		0.6800 mm		4.2000 mm		4.8400 mm		5.7300 mm		3.4800 mm
	N° de días acumulados		458.0 días		458.0 días		458.0 días		458.0 días		458.0 días		458.0 días
	Velocidad acumulada		0.0265 mm/día		0.0015 mm/día		0.0092 mm/día		0.0106 mm/día		0.0125 mm/día		0.0076 mm/día

Anexo 6: Plano de ubicación – Robot leica



SONDAJE	ESTE	NORTE	COTA	PROFUNDIDAD (m)
TDR3	421670.879	8638661.970	4651.270	300.600
TDR2	421372.004	8638959.990	4729.160	544.200
TDR1	421372.038	8638999.960	4733.420	451.000

GRUPO	CANTIDA	CODIGO	E	N	C
Grupo EM Infraestructuras Casa Winche y Castillo Maecota	6	EM1	421507.277	8638633.977	4644.046
		EM2	421207.137	8639419.248	4645.228
		EM3	421290.984	8638443.746	4644.414
		EM4	421283.432	8638432.225	4645.666
		EM7	421274.646	8638397.911	4645.648
		EM8	421267.420	8638402.234	4645.520
Grupo EMR Masa rocosa, Páto Winche, Pique Central y Pique Maecota	19	EMR1	421306.899	8638496.191	4641.434
		EMR2	421327.502	8638460.147	4640.940
		EMR3	421366.913	8638428.070	4635.909
		EMR4	421371.885	8638380.421	4635.369
		EMR5	421362.633	8638335.747	4631.527
		EMR6	421330.610	8638388.305	4645.021
		EMR7	421318.203	8638422.808	4644.431
		EMR8	421244.922	8638440.242	4651.285
		EMR9	421213.526	8638432.772	4655.746
		EMR10	421258.059	8638406.381	4645.776
		EMR11	421269.328	8638359.358	4645.969
		EMR12	421316.773	8638308.638	4646.256
		EMR13	421275.379	8638282.699	4646.762
EMR16	421185.529	8638397.783	4654.294		
EMR17	421151.199	8638356.163	4652.206		
EMR18	421187.481	8638332.209	4649.948		
EMR19	421214.759	8638296.340	4647.153		
EMR20	421243.444	8638248.194	4647.153		
ESU3	421151.905	8638284.481	4647.814		
Grupo ESU Infraestructuras en superficie y cerca de grietas	3	ESU2	420931.765	8638429.203	4711.518
		ESU4	421306.464	8638041.772	4650.885
		ESU6	421684.792	8637869.230	4605.415
	4	ESU7	421573.711	8638122.803	4586.971
		ESU8	421431.539	8638279.830	4603.388
		ESU10	421176.023	8638636.325	4710.758
		ESU11	421151.970	8638656.267	4714.355
	4	ESU12	421220.883	8638838.351	4702.026
		ESU13	421278.918	8638751.712	4711.576
		ESU14	421661.897	8638398.271	4610.878
		ESU15	421788.176	8638183.022	4584.989

LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO	LEYENDA GENERAL	DIBUJADO POR: DEPARTAMENTO DE GEOMECÁNICA	SOCIEDAD MINERA CORONA S. A. U.M. ACUMULACION YAURICOCHA					
<ul style="list-style-type: none"> GRIETAS SUPERFICIALES, LEVANTAMIENTO: Febrero-2023 GRIETAS SUPERFICIALES, LEVANTAMIENTO: Nov-2021 GRIETAS SUPERFICIALES, LEVANTAMIENTO: 2019 GRIETAS SUPERFICIALES, LEVANTAMIENTO: 2015 ESTACIÓN LEICA TM-50 CAMPAMENTOS 	<ul style="list-style-type: none"> CANAL DE CORONACIÓN CONO DE SUBSIDENCIA AJUSTADO 2023 ESTACIONES DE MONITOREO EN INFRAESTRUCTURA: EM ESTACIONES DE MONITOREO EN ROCA: EMR ESTACIONES DE MONITOREO EN SUELO: ESU TDR 	ELABORADO POR: DEPARTAMENTO DE GEOMECÁNICA	PLANO:	PLANO GENERAL DE SUBSIDENCIA VS CABLE TDR ACTUALIZADO, 2023				
		REVISADO POR: Ing. REYMER MEZA.	ZONA:	MINA YAURICOCHA	LABOR:	SUPERFICIE	FECHA:	2023
		APROBADO POR: Ing. REYMER MEZA.	NIVEL:	SUPERFICIE	CODIGO:	PGS-2707-23	ESCALA:	1:4000

Anexo 7: Datos del RS2

Phase2 Analysis Information ***EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE SUBSIDENCIA***

Project Summary

File Name: 1.- Plano Longitudinal Mina Yauricocha_2023
Last saved with Phase2 version: 8.005
Project Title: EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE SUBSIDENCIA

General Settings

Number of Stages: 6
Analysis Type: Plane Strain
Solver Type: Gaussian Elimination
Units: Metric, stress as MPa

Analysis Options

Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Convergence Type: Square Root Energy
Tensile Failure: Reduces Shear Strength
Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

Groundwater Analysis

Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981 MN/m³
Probability: None

Field Stress

Field stress: constant
Sigma one: 25.1 MPa (compression positive)
Sigma three: 14 MPa (compression positive)
Sigma Z: 16.3 MPa (compression positive)
Angle from the horizontal to sigma 1: 70 degrees (counter-clockwise)

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 6 noded triangles
Number of elements on : 4653
Number of nodes on : 9630
Number of elements on : 5253
Number of nodes on : 10931
Number of elements on : 4444
Number of nodes on : 9235
Number of elements on : 5259
Number of nodes on : 10936
Number of elements on : 4252
Number of nodes on : 8911
Number of elements on : 5257
Number of nodes on : 10935

Mesh Quality


178 of 5259 Elements (3.4 % of elements) are poor quality elements
120 of 5259 Elements (2.3 % of elements) are poor quality elements because of the side length ratio
177 of 5259 Elements (3.4 % of elements) are poor quality elements because of the minimum interior angle
6 of 5259 Elements (0.1 % of elements) are poor quality elements because of the maximum interior angle
0 of 5259 Elements (0.0 % of elements) are poor quality elements because they are inverted
Note: Elements can be of poor quality for more than one reason

Poor quality elements defined as:


Side length ratio (maximum / minimum) > 30.00
 Minimum interior angle < 2.0 degrees
 Maximum interior angle > 175.0 degrees

Material Properties


Material: III-B

Color	
Initial element loading	field stress only
Elastic type	isotropic
Young's modulus	12640 MPa
Poisson's ratio	0.28
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Elastic
Compressive strength	180.3 MPa
mb parameter	4.05826
s parameter	0.00277
a parameter	0.50705
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: Relleno

Color	
Initial element loading	body force only
Unit weight	0.021 MN/m3
Elastic type	isotropic
Young's modulus	729 MPa
Poisson's ratio	0.3
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Elastic
Compressive strength	20 MPa
mb parameter	0.480403
s parameter	7.91279e-005
a parameter	0.561101
Piezo to use	None
Ru value	0

Material: IV-B

Color	
Initial element loading	field stress only
Elastic type	isotropic
Young's modulus	1000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	24 degrees
Peak cohesion	0.0460913 MPa
Material type	Elastic
Piezo to use	None
Ru value	0

Anexo 8 Caracterización y propiedades de la roca

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA										
Unidad Geotécnica		RMR89 (*) (Rock Mass Rating)			GSI (**) (Geological Strength Index)			RQD (%) (Rock Quality Designation)		
		Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
INTR	Intrusivo	42	55	67	37	50	62	21	60	91
CLZ	Caliza	39	51	62	34	46	57	39	51	62
CLZ ALT	Caliza Alterada	28	41	53	23	36	48	0	28	66
INTR ALT	Intrusivo Alterado	25	38	48	20	33	43	0	23	53
MIN	Mineral	23	32	43	18	27	38	0	17	50
CHERT	France Chert	38	50	60	33	45	55	13	46	88
SKRN	Skarn	34	43	53	29	38	48	13	31	45

PROPIEDADES DE LA ROCA INTACTA									
Unidad Geotécnica	Densidad (kN/m ³)	σ_{cd} (MPa)			Constante de Hoek & Brown "m _i "			Propiedades elásticas	
		Prom	Mín	Máx	Mín	Prom	Máx	Módulo de Young "E" (GPa)	Coefficiente de Poisson "v"
Intrusivo	26.6	75	119	170	13	15	17	20.6	0.21
Caliza	26.6	36	53	78	9.0	10.9	12.5	16.9	0.25
Caliza Alterada	26.3	28	46	72	10	11.6	13	22.9	0.19
Intrusivo Alterado	24.8	41	68	111	13.5	14.7	16.5	20.6	0.19
Mineral	36.5	26	40	61	15	16.6	18	2.5	0.36
France Chert	-	23	38	60	16.5	19.2	21	-	-
Skarn	28.1	65	82	110	13	15.4	18	23.3	0.36

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 087-2024-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 732-2024-FIMGC-D**, a los veinte y un días del mes de noviembre de 2024, siendo las 4:00 p.m. reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS y los miembros; Dr. Andrés PORTUGAL PAZ, Ing. Miguel PRADO ARONES y Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES actuando como secretario docente el MSc. Ing. Kelvis BERROCAL, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

Reymer Donato MEZA QUINTANA

Quien presentó la tesis denominada:

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO NOTA DIECISEIS (16)

Siendo las 05:50 p.m. del día 21 de noviembre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

Msc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

Dr. Andrés PORTUGAL PAZ
Miembro

Ing. Miguel PRADO ARONES
Miembro

Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES
Miembro

MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente

cc:
Archivo



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : MEZA QUINTANA, Reymer Donato
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de la Tesis : Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024
- Evaluación de la originalidad : 27% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente la constancia de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 23 de diciembre de 2024

.....
MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024

por Reymer Donato Meza Quintana

Fecha de entrega: 23-dic-2024 10:00a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2557744856

Nombre del archivo: TESIS_REYMER_DONATO_MEZA_QUINTANA.pdf (16.28M)

Total de palabras: 23876

Total de caracteres: 146309

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

27%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

15%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	7%
2	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	6%
3	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	4%
4	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	2%
5	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	1%
7	escuelaing.metabiblioteca.org Fuente de Internet	1%

8	Fuente de Internet	1 %
9	hdl.handle.net Fuente de Internet	1 %
10	repository.ucatolica.edu.co Fuente de Internet	1 %
11	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1 %
12	Gamaniel Curasma Ramos, Jaime César Mayorga Rojas. "Aplicación del arco peruano para minado de altos esfuerzos Sublevel Caving – Mina Yauricocha", Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 2023 Publicación	1 %
13	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %

17 pt.scribd.com Fuente de Internet <1 %

18 repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet <1 %

19 Submitted to ESIC Business & Marketing School Trabajo del estudiante <1 %

20 repositorio.upse.edu.ec Fuente de Internet <1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo