

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**TESIS**

**EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES  
SEGÚN LOS MÉTODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE  
SOSTENIMIENTOS, SAN PABLO – CAJAMARCA**

Para optar el Título Profesional de:  
INGENIERO DE MINAS

Autor:  
Bach. Paul Enrique Muñoz Gálvez

Asesor:  
Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

Cajamarca – Perú  
2023

## **CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD**

La que suscribe, Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca certifica:

La originalidad de la tesis denominada **EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS MÉTODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTOS, SAN PABLO – CAJAMARCA**, realizada por el Bachiller en Ingeniería de Minas **Paul Enrique Muñoz Gálvez** de acuerdo al resultado del análisis reportado por su asesor **Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado** con el software antiplagio Turnitin que identifica **5% (cinco por ciento)** de similitud, asignándole el código **oid:3117:300696324**

Se expide el presente certificado para los fines pertinentes.

Cajamarca, 27 de diciembre del 2023

Documento firmado digitalmente

Dra. Yvonne Katherine Fernández León  
Directora Unidad de Investigación Facultad de Ingeniería



Firmado digitalmente por:  
FERNANDEZ LEON Yvonne  
Katherine FAU 20148258001 soft  
Motivo: Soy el autor del  
documento  
Fecha: 27/12/2023 18:35:08-0500

Cc.  
Archivo  
c15723pm.

## **DEDICATORIA**

A mis padres: Carlos y Olga, por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años. Gracias a ustedes he logrado llegar hasta donde me encuentro. Es un privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a DIOS ser maravilloso por darme: vida, salud, sabiduría y guiarme en la superación profesional.

A mis hermanas: Yoeli y Gisela por su guía y ejemplo.

A mis profesores de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Cajamarca que me formaron a lo largo de cinco años compartiendo su conocimiento con dedicación para ser un mejor profesional.

A mi asesor: Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado por su apoyo, orientación y guía para la culminación de esta investigación.

A mis compañeros, quienes intervinieron para el desarrollo de la tesis.

## ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	v
LISTA DE CUADROS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE PLANOS .....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

<b>2.1</b>	<b>Antecedentes Teóricos .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Internacionales .....	3
2.1.2	Nacionales .....	6
2.1.3	Locales .....	8
<b>2.2</b>	<b>Bases Teóricas .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Criterios Empíricos .....	10
2.2.2	Esfuerzo Pre-minado .....	18
2.2.3	Métodos numéricos .....	19
2.2.4	Sostenimiento de excavaciones .....	20
<b>2.3</b>	<b>Definición de términos básicos.....</b>	<b>20</b>

### CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1</b>	<b>Ubicación .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Accesibilidad .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Clima.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>Metodología de la investigación.....</b>	<b>26</b>
3.4.1	Tipo, nivel, diseño y método de investigación .....	26
3.4.2	Población.....	27
3.4.3	Muestra.....	27
3.4.4	Unidad de análisis .....	27
3.4.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	27
3.4.6	Recursos equipos - materiales y soporte técnico .....	29
3.4.7	Operacionalización de variables.....	33
<b>3.5</b>	<b>Geología Local.....</b>	<b>34</b>
<b>3.6</b>	<b>Geología Estructural .....</b>	<b>39</b>

	Pág.
<b>3.7 Hidrología</b> .....	<b>41</b>
<b>3.8 Hidrogeología</b> .....	<b>44</b>
<b>3.9 Sismicidad</b> .....	<b>47</b>
<b>3.10 Geomecánica</b> .....	<b>47</b>
3.10.1 Criterios Empíricos .....	48
3.10.2 Modelo Matemático .....	58
<b>3.11 Sostenimiento</b> .....	<b>65</b>

#### **CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

<b>4.1 Presentación de resultados</b> .....	<b>75</b>
<b>4.2 Contrastación de la hipótesis</b> .....	<b>78</b>

#### **CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>5.1 Conclusiones</b> .....	<b>80</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b> .....	<b>82</b>

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>
-----------------------------------------	-----------

#### **ANEXOS**

<b>ANEXO A REGISTROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS</b> .....	<b>88</b>
<b>ANEXO B FORMATOS PETROGRÁFICOS - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA</b> .....	<b>95</b>
<b>ANEXO C CUENCA HIDROGRÁFICA</b> .....	<b>99</b>
<b>ANEXO D PLANOS</b> .....	<b>101</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

ISSN	:	Número internacional normalizado de publicaciones seriadas.
GDE	:	Geodata Engineering.
MEF	:	Método de elementos finitos
MEC	:	Método de elementos de contorno
MED	:	Método de elementos discretos
$\sigma_{ci}$	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
$\sigma_{3m\acute{a}x}$	:	Tensión de confinamiento.
$\sigma'_t$	:	Resistencia a la tracción
$\sigma_1$	:	Esfuerzo principal mayor.
$\sigma_2$	:	Esfuerzo principal intermedio.
$\sigma_3$	:	Esfuerzo principal menor.
T	:	Esfuerzo de corte.
$\sigma_n$	:	Esfuerzo normal.
$\sigma'_{cm}$	:	Resistencia del macizo rocoso global.
$\sigma_v$	:	Esfuerzo vertical.
$m_i$	:	Constante de Hoek & Brown para piezas de roca intacta.
$m_b$	:	Constante de Hoek & Brown.
$s, a$	:	Constantes de Hoek & Brown.
c	:	Cohesión.
$\varphi$	:	Ángulo de fricción.
$E_i$	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
$E_m$	:	Módulo de deformación.
MR	:	Relación del módulo.
D	:	Factor de perturbación.
$J_n$	:	Número de familias diaclasadas de Q.
$J_r$	:	Índice de rugosidad de las diaclasas de Q.
$J_a$	:	Índice de alteración de las diaclasas de Q.
$J_w$	:	Factor de reducción por agua de las diaclasas de Q.
SRF	:	Factor de reducción de tensiones de Q.
H	:	Altura de sección subterránea.
De	:	Dimensión equivalente del túnel.
ESR	:	Relación de soporte de la excavación.
E	:	Absorción de energía en fibra reforzada con shotcrete.
CF	:	Factor de continuidad
Dt	:	Diámetro o luz del túnel
Db	:	Diámetro equivalente de bloque
Gc	:	Factor de calidad
Sr	:	Factor de escala
Wt	:	Altura de túnel.
Co	:	Factor de ajuste por la orientación de la principal familia de diaclasas o diques
Nj	:	Factor de ajuste por número de familias de diaclasas.
jR	:	Factor de rugosidad de las juntas RMI.

$j_A$	:	Factor de alteración de juntas RMI.
$j_L$	:	Factor de tamaño y continuidad de las diaclasas RMI.
$J_P$	:	Parámetro de diaclasado RMI.
$L_{b_{techo}}$	:	Longitud del bulón en el techo
$L_{b_{hastial}}$	:	Longitud del bulón en la clave
$L_{bpc}$	:	Longitud del bulón promedio comercial
$P_e$	:	Punto de equilibrio.
$U_{pe}$	:	Desplazamiento en el punto de equilibrio
$P_{spe}$	:	Presión sometida en el punto de equilibrio
$U_{io}$	:	Desplazamiento del túnel.
$U_p$	:	Desplazamiento tenso-deformacionales Phase
$U_r$	:	Desplazamiento tenso-deformacionales RocSupport
$P_i$	:	Plastificación inicial.
$P_f$	:	Plastificación final.
$T$	:	Periodo fundamental de la estructura para el análisis estático
$T_P$	:	Periodo que define la plataforma de factor C.
$T_L$	:	Periodo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante
$K_h$	:	Sísmica horizontal
$K_v$	:	Sísmica vertical
$Z$	:	Profundidad.
$m$ o $k$	:	Coefficiente de reparto de tensiones
$\alpha$	:	Ángulo de orientación tensional.
$DD$	:	Dip direction.
$FS$	:	Factor de Seguridad.
$K$	:	Movimiento cinemático
$N_x$	:	Falla normal
$T/P$	:	Tensión/compresión
$PK.$	:	Punto de kilometraje
$PI.$	:	Punto de inicio.
$Plp.$	:	Punto de inicio de by-pass
$TM$	:	Toneladas métricas.
$\%R$	:	Riesgo admisible
$N$	:	Vida útil
$T$	:	Periodo de retorno
$C$	:	Coefficiente de fricción
$m/m$	:	Pendiente.
$T_c$	:	Tiempo de concentración.
$I$	:	Intensidad de precipitación.

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1. Parámetros geomecánicos promedio - El Teniente. ....	4
Cuadro 2.2. Calidad de macizo rocosos en relación con el Índice RMR. ....	10
Cuadro 2.3. Índice de Calidad de la Roca – RQD. ....	11
Cuadro 2.4. Valoraciones del Índice de calidad Q. ....	13
Cuadro 2.5. Índice del macizo rocoso R <sub>Mi</sub> . ....	16
Cuadro 3.1. Coordenadas de bocamina Nivel 4. ....	22
Cuadro 3.2. Delimitación de la zona de investigación – sistema de coordenadas. ....	22
Cuadro 3.3. Accesibilidad a la zona de estudio. ....	23
Cuadro 3.4. Operacionalización de las variables. ....	33
Cuadro 3.5. Precipitación máxima en 24 horas a altitud media de la microcuenca. ....	42
Cuadro 3.6. Parámetros hidrológicos de influencia - excavación subterránea del Nivel 4. ....	43
Cuadro 3.7. Coeficiente de aceleración espectral respecto a cada estación de la labor subterránea - Nivel 4. ....	47
Cuadro 3.8. Resultados de cuantificación geomecánica utilizando criterios empíricos. ....	49
Cuadro 3.9. Constantes elásticas de la masa rocosa. ....	50
Cuadro 3.10. Inestabilidad y comportamiento del macizo rocoso en relación: Campo tensional y continuidad del terreno. ....	65
Cuadro 3.11. Sostenimiento aplicado mediante los criterios: Q-Barton y R <sub>Mi</sub> -Palmström. ....	66
Cuadro 3.12. Longitud de bulones para sostenimiento mediante R <sub>Mi</sub> , excavación subterránea – Nivel 4. ....	66
Cuadro 4.1. Reporte de desplazamiento tenso-deformacionales, aplicando programas numéricos. ....	77
Cuadro 4.2. Curvas de convergencia del túnel y sostenimiento. ....	78
Cuadro EG1: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 1. ....	89
Cuadro EG2: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 2. ....	90
Cuadro EG3: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 3. ....	91
Cuadro EG4: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 4. ....	92
Cuadro EG5: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 5. ....	93
Cuadro EG6: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 6. ....	94
Cuadro FP1: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-1. ....	96
Cuadro FP2: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-2. ....	97
Cuadro FP3: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-3. ....	98

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Hoek-Brown sistema de clasificación de la masa rocosa, 2000.....	12
Figura 2.2. Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q.....	14
Figura 2.3. Sostenimiento para terrenos diaclasados (en bloques), incluyendo zonas débiles.....	17
Figura 2.4. Mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso para facilitar la comprensión del comportamiento del macizo rocoso (Modificado de Lorig, 2009).....	19
Figura 3.1. Bocamina de ingreso al Nivel 4 – Mina Paredones.....	23
Figura 3.2. Ruta de acceso a las instalaciones de la Mina Paredones – Nivel 4.....	24
Figura 3.3. Diagrama estadístico meteorológica – estación San Pablo.....	25
Figura 3.4. Equipo e instrumentos utilizados para obtención de información de campo.....	30
Figura 3.5. Materiales utilizados para el cartografiado.....	31
Figura 3.6. Programas del modelo matemático, utilizados para procesamiento y presentación de la interacción roca-sostenimiento.....	32
Figura 3.7. Brecha de falla ubicado en Pl. + 100 m., presenta: composición mineralógica de covelina, pirita y calcopirita, una matriz cementante de sílice y también se puede observar vetillas de yeso.....	35
Figura 3.8. A. Tajeo del Nivel 4 emplazado en roca andesita la caja: Techo y piso, mostrando la geometría de la excavación subterránea. B. Roca andesita de color verduzco de textura afanítica, ubica en el Pl. + 200 m. de la galería principal (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP1).....	36
Figura 3.9. A. Sección ubicada en el Pl. 80 m., compuesta por alteración argílica avanzada de color gris blanquecina. B. Muestra de alteración argílica avanzada, compuesta por minerales afaníticos de dimensiones equigranulares y subidiomorfos (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP2).....	37
Figura 3.10. A. Diatrema volcánico, conformado por material brechoso de alta resistencia, ubicado en el by-pass del Plp. + 50 m. B. Brecha hidrotermal compuesta de fragmentos de rocas andesíticas angulosas soportada con matriz cementante de sílice y polvo de roca.....	38
Figura 3.11. A. Alteración sílica, ubicada en el by-pass del Plp. + 110 m., paralelo con la Veta murciélagos, formando a Halos de alteración hidrotermal. B. Muestra de alteración sílica, presentando halos de sínter y sílice, en su composición mineralógica (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP3).....	38
Figura 3.12. A. Espejo de falla delimitando a la Veta Murciélagos, con cinemática Normal. B. Indicador cinemático del plano de falla, evidenciándose: Estrías, slickensides y escalones, ubicado en el Pl. + 105 m.....	39

Figura 3.13. Falla sinistral con orientación: Az = 250°, Bz = 31°NW, desplazó a la Veta Murciélago al hastial izquierdo de la galería, con un salto de falla de 1.20 m. La falla sinistral está delimitada por milonita de color: Amarillo a anaranjado, presenta espesor de 0.30 m a 0.35 m., ubicado en el PI. + 475.15 m.....	40
Figura 3.14. Diagrama estadístico de la precipitación máxima - estación San Pablo.....	42
Figura 3.15. Histograma de precipitación máxima anual - estación San Pablo...	43
Figura 3.16. A. Flujo de agua en la clave de la labor discurriendo por el hastial derecho formando mineral hidrocincita por la humedad constante. B. Recristalización de hidrocincita con ancho de 0.30 m., con hábito botroidal, ubicado en el PI. + 145.45 m.....	44
Figura 3.17. A. Emanación de agua en la clave de la labor, formando por su constancia hidrocincita en la clave y maderos, formando por su constancia acumulación de escombros en la solera. B. Hábito botroidal de hidrocincita, ubicado en el PI. + 155.30 m.....	45
Figura 3.18. A. Zona de afectación de humedad constante desde PI. + 190 m. llegando hasta PI. + 200 m., afectando a la tolva, sobre todo en la margen derecha de la labor. B. Los minerales que se originan son: Epsomita e hidrocincita, con hábitos: botroidal a estalactitas..	46
Figura 3.19. Zona de by-pass, afectada por la humedad constante en toda la sección subterránea, desde Punto Inicial de by-pass (PIp). + 69 m. hasta PIp. + 143.50 m.....	46
Figura 3.20. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 1.....	51
Figura 3.21. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 2.....	52
Figura 3.22. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 3.....	53
Figura 3.23. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 4.....	54
Figura 3.24. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 5.....	55
Figura 3.25. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 6.....	56
Figura 3.26. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 7.....	58
Figura 3.27. A. Aplicación del método numérico Phase2 a la sección: 2.00 m. x 2.20 m., mediante la discretización del macizo rocoso, mostrando desplazamientos 1.85 mm. alrededor del túnel de forma concéntrica, desarrollándose más incidencia en la clave la deformación. B. Vectores de desplazamiento tenso-deformacionales, manifestándose en la clave y hastiales, por: presión gravitatoria y litología, estación geomecánica 1.....	59

Figura 3.28.	A. La sección: 4.00 m. x 3.00 m., de la estación geomecánica 2, utilizando la discretización del macizo rocoso mediante el software Phase2, muestra desplazamientos verticales de 3.80 mm. relacionados con la alteración argílica avanzada por baja $\sigma_{ci}$ . B. Los vectores tienen mayor incidencia en la clave y hastiales, manifestándose solo en la alteración argílica avanzada por las envolventes de contorno. ....	60
Figura 3.29.	A. El desplazamiento tenso-deformacional por la discretización es de 7.46 mm. en la estación geomecánica 3, manifestándose en hastiales del túnel excavado. B. Los vectores de desplazamiento muestran recorridos gravitacionales verticales, siguiendo un mismo patrón de orientación vertical o gravitacional, afectando solo la clave y zonas de geometría irregular en la sección de análisis geomecánico. ....	61
Figura 3.30.	A. Las aureolas de desplazamiento tenso-deformacional por la discretización del macizo rocoso muestran incidencias netamente en hastiales, con desplazamientos de 26.19 mm., distribuyéndose en las partes laterales de túnel. B. Los vectores de desplazamiento tienen recorridos verticales por la buena calidad de roca distribuyéndose en un solo sentido de desplazamiento, solo afectando la clave, estación geomecánica 4.....	62
Figura 3.31.	A. La sobrecarga en la parte superior de la excavación, está formando aureolas de desplazamiento vertical de 7.23 mm., proyectándose por debajo de túnel y la discretización está alrededor del túnel. B. Los vectores de desplazamiento están ubicados verticalmente solo afectado la clave de la excavación subterránea, ocasionando movimientos lentos en la clave y hastiales de la parte superior. ....	63
Figura 3.32.	A. La discretización del macizo rocoso se ubica: clave y hastiales, formando areolas distorsionadas a ambos lados del túnel afectando la estabilidad, con desplazamiento de 2.85 mm. B. Los vectores tienen mayor incidencia en la clave por visualizarse vectores de orientación gravitacional, afectando la estabilidad de la labor subterránea. ....	64
Figura 3.33.	Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 2.08$ mm.; $P_{spe} = 0.07$ MPa.) y $U_{io} = 1.36$ mm.; estación geomecánica 1 - RocSupport.....	67
Figura 3.34.	Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 1, RocSupport.....	67
Figura 3.35.	Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 4.26$ mm.; $P_{spe} = 0.14$ MPa.) y $U_{io} = 3.23$ mm.; estación geomecánica 2 - RocSupport.....	68
Figura 3.36.	Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 2, RocSupport.....	68
Figura 3.37.	Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 10.07$ mm.; $P_{spe} = 0.29$ MPa.) y $U_{io} = 9.28$ mm.; estación geomecánica 3 - RocSupport.....	69

Figura 3.38. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 3, RocSupport.....	69
Figura 3.39. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 34.91$ mm.; $P_{spe} = 0.43$ MPa.) y $U_{io} = 32.51$ mm.; estación geomecánica 4 - RocSupport.....	70
Figura 3.40. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 4, RocSupport.....	70
Figura 3.41. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 10.45$ mm.; $P_{spe} = 0.86$ MPa.) y $U_{io} = 8.45$ mm.; estación geomecánica 5 - RocSupport.....	71
Figura 3.42. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 5, RocSupport.....	71
Figura 3.43. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con $P_e$ ( $U_{pe} = 4.41$ mm.; $P_{spe} = 0.29$ MPa.) y $U_{io} = 3.90$ mm.; estación geomecánica 6 - RocSupport.....	72
Figura 3.44. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 6, RocSupport.....	72
Figura 3.45. Sostenimiento por cuadros de madera rectos, de sección cuadrada: 0.25 m x 0.25 m. acompañados de emparrillado y acostillado, ubicado en el Pl. + 190 m.....	73
Figura 3.46. Zona tajeada de la Veta Murciélagu, desde el Pl. + 490 m. hasta Pl. + 609.20 m., formando una cavidad sub-vertical que une el Nivel 4 y 5, autosostenida ambas cajas por: Puntales y anclajes fricción (Split set y mecánico).....	73
Figura 3.47. A. Anclajes sistemáticos - split set, distribuidos en el hastial derecho y clave, de la labor. B. Detalle del anclaje mecánico, constituidos por: Arandela, placa de reparto cuadrada, turca y perno de anclaje, ubicado el Pl. + 523 m. ....	74
Figura 3.48. Puntal con dimensiones: 0.30 m. x 0.30 m. y longitud 2.20 m.; ubicado en el Pl. + 477 m. del hastial izquierdo, soportando la carga de la clave. ....	74

## LISTA DE PLANOS

	Pág.
PLANO H1: CUENCA HIDROGRÁFICA .....	100
PLANO 01: IMAGEN SATELITAL .....	102
PLANO 02: UBICACIÓN – MDT – MDE.....	103
PLANO 03: GEOLOGÍA - ESTRUCTURAL REGIONAL .....	104
PLANO 04: GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL .....	105
PLANO 05: HIDROGEOLÓGICO.....	106
PLANO 06: GEOMECÁNICO.....	107
PLANO 07: TENSO-DEFORMACIONAL .....	108
PLANO 08: ZONIFICACIÓN CRÍTICA .....	109
PLANO 09: SOSTENIMIENTO SUBTERRÁNEO .....	110

## RESUMEN

La empresa MINERA CAJAMARCA S.A.C. desarrolla actividades de extracción de mineral en el proyecto de explotación polimetálico subterráneo Paredones – labor Nivel 4, ubicado en distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca. Geológicamente está emplazado en el Grupo Calipuy del Paleógeno – Neógeno del volcánico Chilete, compuesto por andesitas como roca caja, presentando alteraciones argílicas: avanzada y silicificada. El sistema estructural mayor tiene orientación NW-SE, con  $Az=300^\circ$ ,  $Bz=80^\circ$ NE y  $pitch=86^\circ$ , relacionándose con la Veta Murciélago, cinemáticamente es una falla normal, acompañado de estructuras menores como fallas y discontinuidades que cortan a la veta, formando sobre-excavación en forma de chimeneas verticales a sub-verticales, generando desprendimiento de cuñas y bloques. El objetivo es definir el comportamiento geomecánico empleando Q Barton y R<sub>Mi</sub>, comparar el sostenimiento indicado por ambas clasificaciones geomecánicas. Aplicando la metodología: Cuantitativa, transversal, diseño no experimental, método deductivo-inductivo. Los cartografiados geomecánicos mediante: Q y R<sub>Mi</sub>, clasifican las rocas desde: Buenas a muy malas, relacionado con las unidades de análisis: Inestabilidad geomecánica, precipitación, infiltración y sismicidad. En consecuencia, los modelos numéricos reportan esfuerzos tenso-deformacionales alrededor de la excavación siendo generalmente gravitacionales – Phase2 y variaciones tensiones: E-1, E-2 (Deformación: Clave y hastiales, campo tensional bajo) y E-3, E-4, E-5 y E-6 (Deformación gravitacional – clave y campo tensional medio) - R<sub>Mi</sub>; y mediante programa RocSupport, punto de equilibrio: E-1 (2.08 mm./0.07 MPa.), E-2 (4.26mm./ 0.14 MPa.), E-3 (10.07 mm./0.29 MPa.), E-4 (34.91 mm./0.43 MPa.), E-5 (10.45 mm./0.86 MPa.) y E-6 (4.41 mm./0.29 MPa.) mediante la curva de convergencia.

Palabras claves: Geomecánica, excavación, sostenimiento, campo tensional e inestabilidad.

## ABSTRACT

The company MINERA CAJAMARCA S.A.C. develops mineral extraction activities in the Paredones underground polymetallic exploitation project – Level 4 work, located in the district of San Bernardino, province of San Pablo and department of Cajamarca. Geologically, it is located in the Calipuy Group of the Paleogene – Neogene of the Chilete volcanic, composed of andesites as a box rock, presenting argillic alterations: advanced and silicified. The major structural system has a NW-SE orientation, with  $Az=300^\circ$ ,  $Bz=80^\circ$ NE and  $pitch=86^\circ$ , relating to the Murciélago Vein, kinematically it is a normal fault, accompanied by minor structures such as faults and discontinuities that cut through the vein, forming overexcavation in the form of vertical to sub-vertical chimneys, generating detachment of wedges and blocks. The objective is to define the geomechanical behavior using Q Barton and RMi, compare the support indicated by both geomechanical classifications. Applying the methodology: Quantitative, transversal, non-experimental design, deductive-inductive method. Geomechanical mapping using: Q and RMi, classifies rocks from: Good to very bad, related to the units of analysis: Geomechanical instability, precipitation, infiltration and seismicity. Consequently, the numerical models report tension-strain stresses around the excavation, being generally gravitational – Phase2 and stress variations: E-1, E-2 (Deformation: Key and gables, low stress field) and E-3, E-4, E-5 and E-6 (gravitational deformation – key and mean tension field) - RMi; and through RocSupport, balance point: E-1 (2.08 mm./0.07 MPa.), E-2 (4.26 mm./0.14 MPa.), E-3 (10.07 mm./0.29 MPa.), E-4 (34.91 mm./0.43 MPa.), E-5 (10.45 mm./0.86 MPa.) and E-6 (4.41 mm./0.29 MPa.) using the convergence curve.

Keywords: Geomechanics, excavation, support, stress field and instability.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La empresa MINERA CAJAMARCA S.A.C. en calidad de CESIONARIA de la concesión minera LUMINOSA NUMERO 2A opera el proyecto minero de explotación polimetálico Paredones, el cual se ubica en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca, al SW de la ciudad de Cajamarca. El acceso a la labor subterránea del Nivel 4 se ubica al SE de la mina, donde encontramos la Veta Murciélagos en rocas andesitas del Grupo Calipuy del Paleógeno – Neógeno, específicamente Volcánico Chilete. Las actividades de explotación consisten en la recuperación de plata, plomo y zinc abandonado en las cajas de la galería principal por la empresa Northerm Peru Mining Corporation que operaba anteriormente. La galería presenta redistribución tensional en la periferia de la excavación, originando inestabilidad geomecánica como deformaciones, desprendimiento de bloques y cuñas. También se observan infiltraciones subterráneas que están alterando la roca caja: techo, piso y discontinuidades.

El problema se plantea en: ¿Cuál es la inestabilidad de la labor del Nivel 4, debido al comportamiento geomecánico y las variables precipitación, infiltración y sismicidad? Teniendo como hipótesis: La inestabilidad geomecánica de la labor subterránea del Nivel 4 evidenciada por deformaciones y formación de bloques y cuñas se relaciona con las condiciones actuales de la matriz rocosa, la cual se ve afectada por precipitaciones, infiltraciones y sismicidad, por lo que se requiere aplicar sostenimientos.

La tesis se justifica en que: La inestabilidad geomecánica se manifiesta mediante deformaciones, formación de bloques y cuñas en la galería. La empresa minera para minimizar las ocurrencias geomecánicas de inestabilidad emplea sostenimiento de madera, anclajes y mallas tejidas, por lo que es necesario realizar la caracterización geomecánica y definir los tipos de sostenimientos que se deben

aplicar para contribuir con seguridad e integridad física de los trabajadores, así como no perjudicar la producción y rentabilidad de la empresa.

Los alcances de la investigación son: cuantitativo y nivel descriptivo, correlacional y explicativo. El objetivo general es: definir el comportamiento geomecánico del Nivel 4 de la Mina Paredones mediante la utilización de los métodos Q de Barton y RMi y comparación del tipo de sostenimiento por cada uno en el software RocSupport v3. Se tiene como objetivos específicos: Cartografiar las unidades litológicas del macizo rocoso y las discontinuidades del Nivel 4, determinar la caracterización geomecánica, analizar los estados tensionales mediante el software Phase2 v8, definir las zonas críticas del Nivel 4, determinar el tipo de sostenimiento por el método Q de Barton, determinar el tipo de sostenimiento por el método RMi y analizar el sostenimiento en el software RocSupport v3.

La investigación se expone en cinco capítulos: El Capítulo I contiene el planteamiento y formulación del problema, justificación, delimitación y objetivos de la investigación. El Capítulo II menciona los antecedentes teóricos, las bases teóricas y definición de términos básicos. El capítulo III presenta la ubicación, accesibilidad, clima, metodología de estudio aplicada en la investigación, hidrología, hidrogeología, geología, geología estructural y sismicidad del área de estudio, así como, la geomecánica y sostenimientos a aplicar en las zonas críticas. En el Capítulo IV se realiza la discusión de resultados donde analizamos y exponemos los datos obtenidos para contrastarlos con la hipótesis, por último, el Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones finales.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes Teóricos

#### 2.1.1 Internacionales

**Lostalé (2011).** Investigó: “La central hidroeléctrica subterránea San Esteban II”, se encuentra dentro de la denominada Zona de Galicia Tras-Os-Montes. Durante la excavación de la bóveda se manifestó un cuerpo anómalo dentro del cuerpo intrusivo de composición básica, clasificándolo como un dique del tipo distensivo de fase tardía y posterior al emplazamiento del plutón intrusivo; siendo conformado el entorno de la excavación por: granito, y diques - filones de naturaleza diabásica. Las características geomecánicas del dique corresponden a espesores: 3 m. a 4 m. del tipo continuo, relleno de diabasa de color gris la parte central y verdosa en los contactos, de elevada resistencia e intenso fracturamiento. La calidad del macizo rocoso granítico presenta fuertes variaciones del RMR oscila entre: 40 a 70 puntos, mientras el índice de calidad Q fluctúa entre: 0.50 a 20 puntos, con resistencia a la compresión de la roca entre: 35 a 105 MPa. Los cuatro diques tienen RMR entre: 30 a 45 (Calidad mala a regular) mientras el Q de Barton con valores: 0.20 a 1.50 (Calidad muy mala a mala) y resistencia a compresión simple: 5 a 53 MPa. Para el granito se empleó sostenimiento: Shotcrete 0.15 m. de espesor, bulones 32 mm. y longitud 10 m. en cuadrícula 1 m. x 1 m.; y el dique se reforzó hasta 1.00 m. de profundidad, colocando doble malla electrosoldada de acero: 150 x 150 x 12 mm. entre capas de shotcrete y cerrando la cuadrícula de bulones 0.50 m x 0.50 m. (Inclinados hacia la roca encajonante).

**Arlandi et al. (2013),** mediante el análisis “Predicción empírica del Strainburst y Squeezing en galerías profundas”. Realizó la investigación en la mina El Teniente (Chile), definiendo que está conformado por un túnel doble con 10 m. de diámetro, presentando recubrimiento máximo  $Z = 1,100$  m. y longitud de 9 Km.;

emplazándose en rocas: Dacitas, tonalitas, pórfidos, brechas volcánicas, rocas máficas del Complejo Máfico el Teniente (CMET), etc.; obteniendo el ratio entre la tensión: horizontal y vertical, de 1.50 logrando ser superior localmente en algunos tramos. Concluyendo que las rocas son capaces de acumular suficiente energía deformacional para facilitar el fenómeno de estallido de rocas, de acuerdo a Criterios: Barla (1995), Hoek (1980) y Goel (1994), aplicados coinciden en indicar que son previsibles los fenómenos de squeezing; sin embargo, presentan riesgos de estallido como: No probable (PK. 00+000 – PK. 04+514), posible en alguna zona (PK. 04+514 – PK. 07+747), posible (PK. 07+747– PK. 08+506) y muy posible (PK. 08+506 – PK. 08+863).

Cuadro 2.1. Parámetros geomecánicos promedio - El Teniente.

Parámetros	CMET	Riolita y dacita	Dorita y tonalita	Brecha Braden
Roca intacta				
Em (GPa)	60	30	45	25
$\gamma$ (Ton/m <sup>3</sup> .)	2.80	2.62	2.73	2.61
$\sigma_{ci}$ (MPa)	120	110	140	90
$m_i$	9.10	20.20	9.20	11.60
Macizo rocoso				
GSI	70-85	75-90	70-90	65-100
RQD	20-80	60-90	20-80	>75

La “Inspección y rehabilitación del Túnel Hidráulico de Cerro Azul (Ecuador)”. El túnel Cerro Azul, fue construido en el año 1997 para la transferencia del recurso hídrico desde la cuenca excedentaria del Daule a las áreas áridas de la Península de Santa Elena y Cantón playas de la provincia del Guayas; En el año 2007, en el túnel ocurrió un derrumbe en su parte central formando una caverna 1,300 m<sup>3</sup>, afectando el flujo de agua. Realizándose la inspeccionado y reparación, en el año 2012, evidenciándose una caverna de altura sobre la solera del túnel 15.50 m. y anchura 15.00 m. con dimensionamiento es E-W; constituido por: areniscas, limolitas, margas y calizas; presentando de dos fallas que cortan transversales al eje del túnel de orientación N-130°-E y 80°S; con fracturamientos

de orientación N-200°-E y 80°S; delimitado la clave por el plano de estratificación. El área de geotécnica evidenció el fenómeno de squeezing produciéndose cuando los terrenos soportan presiones superiores al 60% de la resistencia a la compresión de la roca, por consiguiente, se realizó la simulación en la zona de fluencia de la caverna en el programa Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC 3D), con la opción de ubicación de juntas, obteniéndose curvas de evolución de convergencia en función de la velocidad deformacional de 3 micras/día, remediado a partir del 2012. Para obtener esta velocidad de deformación se realizó mejoramientos: Hormigón proyectado 0.20 m. de espesor, inyecciones de lechada de cemento a presiones 3kp/cm<sup>2</sup>, para colmatar los huecos existentes entre el mortero de cemento y terreno y cimbras HEB-160 a distancias entre eje de 1.00 m. **(Bernal et al. 2013).**

**Thomas (2014)** realizó el “Estudio comparativo entre requerimientos de soporte y fortificación de túneles definidos según métodos empíricos de clasificación geomecánica vs. métodos analíticos y numéricos”, utilizando las evaluaciones geotécnicas de clasificación: RMR, R<sub>Mi</sub> y Q; categorizando los volúmenes de cuñas de roca desde 0,40 m<sup>3</sup>. a 0,003 m<sup>3</sup>., en tres escenarios: A, B y C; con fortificación de shotcrete mediante malla y fibras, obteniendo valores de fluctuantes 0.05 m. a 0.20 m. de revestimiento; en cambio el espaciado de anclajes colocados transversalmente varían desde 1.20 m. a 3.60 m. en función del factor de estado de diaclasas. Corroboró el análisis empírico mediante los modelos numéricos: Phase2 V8,0 y Unwedge, obteniendo FS que superan 6.50. Concluyendo su investigación que mediante la utilización del R<sub>Mi</sub> dentro del GSI es cuasi-constante (Escenarios A GSI = 63 – 64, B GSI = 43 – 48 y C GSI = 26 – 33; son utilizados para posteriores identificaciones y combinaciones de diferentes tamaños de bloques y con diferentes grados de alteración. Obteniendo así variaciones en los resultados), mientras que RMR varía escasamente y Q es constante dentro de este grupo de escenarios.

### 2.1.2 Nacionales

**Veyrat et al. (2017).** Realizó la investigación: “Experiencias para mitigación de estallido de roca: Proyecto hidroeléctrico Cheves (Perú)”. El proyecto constituido por 20 Km. de túneles y dos cavernas; durante la excavación se evidencia desde liberación acústica hasta violentos estallidos de roca, conformando 850 eventos de liberación de tensiones. El proyecto se ubica próximo a la placa de Nazca, afectada por tectónica activa, se evidencian rocas: vulcanosedimentarias, volcánicas, plutónicas y formaciones metamórficas. Detectaron la repetición de la misma familia de discontinuidades: J1 (D13/DD294), J2 (D41/DD285), J3 (D52/DD159) y J4 (D78/DD142), confirmando el estallido de rocas están fuertemente controladas por las estructuras geológicas, se deben considerar como un signo de alerta de posibles eventos de relajación de tensiones. La tensión natural se estableció con el ensayo del hidro-fracturación in-situ, definiendo tres valoraciones: Sh 21.70 a 22.10 MPa, Sh 12.80 a 13.70 MPa ( $K_h = 0.62$ ) y Sh 0.30 a 21.30 MPa ( $K_h = 0.96$ ); siendo los eventos más intensos en el cuarzo-monzonita, de menor proporción en brechas volcánicas y en granodioritas sin liberación tensional. La calidad del macizo rocoso RMR, corresponde a rocas de buena calidad.

**Gavilán (2020)** realizó: “Estudio geomecánico del cruceo XC850 – Nivel 4025, mediante la aplicación del gráfico múltiple GDE – Mina Codiciada, Compañía Minera Argentum”. Se encuentran afloramientos de rocas: Vulcanosedimentarias e ígneas como: Andesita ( $N85^{\circ}W/30^{\circ}NE$ ,  $N55^{\circ}E/80^{\circ}SE$  y  $N75^{\circ}W/75^{\circ}SW$ ), veta ( $N45^{\circ}-50^{\circ}W/75^{\circ}-85^{\circ}NE$ ) y caliza ( $N11^{\circ}W/68^{\circ}NE$ ,  $N68^{\circ}E/69^{\circ}SE$ ,  $N13^{\circ}W/63^{\circ}SW$  y  $N70^{\circ}E/13^{\circ}NW$ ). La excavación subterránea presenta una longitud 1.4 Km., con sección de excavación: 4.50 m. x 4.00 m., con cuneta 1.00 m. de ancho y 0.50 m. de profundidad; diseñadas para caudal máximo 0.50 m<sup>3</sup>/s. La geomecánica evidencia que la caja: piso y techo, esta moderadamente fracturada, con  $\sigma_{ci} = 100$  a 140 MPa, RQD = 50 a 70, RMR = 60 a 70, índice Q = 3 a 20; con fracturas cerradas a ligeramente abiertas con rellenos de calcita y sericita; la veta presenta longitudes: 200 m. a 700 m. muy fracturada a intensamente fracturada, con RQD de 40 a 45 y espaciamiento entre fractura 0.10 m. a 0.20 m.; clasificándolo como rocas: Tipo I y II (53%), tipo III (25%), tipo IV (16%) y tipo V (3%); sin embargo a los tipos de rotura del macizo rocoso lo conforman: Estable (20%), Lajamiento (13%),

cuñas (34%), desprendimiento (20%) y deformación (13%); estimando el sostenimiento: Tipo A (20%), tipo B (40%), tipo C (20%), tipo D (15%) y tipo E (5%). Para la estabilización se utilizan anclajes: swellex (7 pies), Split set (7 pies), malla electrosoldada, Shotcrete (2´) y cimbras para el confinamiento de la roca.

**Sicilia et al. (2013)**, investigó: “La construcción de los túneles de Toquepala. Mina Toquepala, Tacna, Perú”. En el proyecto se ejecutan dos túneles de 2,063 m. y 154 m. de longitud; y un ancho útil 7.20 m, conformando altura máxima de 5.30 m. y sección de la excavación 35 m<sup>2</sup>. Geológicamente fue excavado en riolitas y andesitas, de buena calidad geotécnica, con RMR superior 50 puntos excepto algunas zonas en el túnel largo asociadas a unidades intrusivas (Diatremas y/o chimeneas volcánicas, pórfidos, brechas de turmalina y diques). Se encuentra ubicado en la zona 3, con aceleración sísmica 0.40g, de acuerdo con el contexto de las tensiones litostáticas, se consideró el coeficiente de esfuerzos  $K_0$  de 1.50 en orientación E-W y 2.00 en la orientación N-S. Se aplicó el Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM), mediante elementos flexibles como: Shotcrete (Resistencia 30 MPa + fibras de polipropileno con dosificación 3 kg/m<sup>3</sup>.), anclajes (10 pies) y marcos metálicos (Reticulados); dependiendo de la calidad geomecánica del macizo rocoso cuantificada por el RMR y consideraciones de Q – Barton; se validó mediante métodos analíticos de estabilidad de bloques (Unwegde) y cálculos tenso-deformacionales mediante diferencias finitas (FLAC).

**Salazar y Córdova (2013)**, realizaron: “Geomecánica del minado masivo tajeos por subniveles con pilares corridos” – En mina Marcapunta Norte – Sociedad Minera El Brocal (Perú). Realizando la zonificación del macizo rocoso del yacimiento está formado por 3 sistemas de discontinuidades: N9°W/11°NE, N8°W/80°NE y N87°E/82°NW; con bajos niveles de agua subterránea observados por: humedad y goteo, teniendo influencia significativa sobre la estabilidad de la excavación. Los esfuerzos verticales: 2.34 a 3.12 MPa, con coeficiente de reparto tensional: 0.90 a 1.10, considerando profundidad de excavación varía de S-N de 90 m. a 120 m. La aplicación de los métodos numéricos fue utilizada para determinar los: esfuerzos y deformaciones, en la masa rocosa mediante el software PHASE2. Los resultados geomecánicos dimensionaron los tajeos varía entre 7 m. y 10 m de ancho para las cámaras, 8 m. y 10 m. de ancho para los pilares corridos,

19 m. y 30 m. de altura de los tajeos y con longitudes de estos entre 30 m. y 53 m. La primera etapa del plan de minado comprende la extracción de los tajeos primarios (cámaras), la cual viene llevándose a cabo con resultados satisfactorios. La segunda etapa del plan de minado contempla la recuperación de los pilares de mineral (tajeos secundarios), para lo cual se realizó una nueva evaluación geomecánica, incluyendo el diseño de un sistema de relleno cementado.

**Álvarez et al. (2014)**, realizó la investigación: “Los túneles Pucará y transandino del proyecto de trasvase Majes – Sigvas II, Arequipa, Perú”. El análisis tectónico permitió establecer tensiones naturales más plausibles en ambos túneles de coeficiente de reparto de tensiones:  $K_{ox} = 0.90$  y  $K_{oz} = 1.4$ , ubicándose en la zona 3 con aceleración sísmica 0.40g. DE acuerdo con los ensayos de permeabilidad, lo clasifica como una roca poco permeable entre:  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  m/s. El análisis de discontinuidades logro determinar el cálculo de cuñas y bloques de roca. El revestimiento estuvo conformado por Shotcrete: 5 cm. (Hastiales y clave) y 15 cm. (Solera), de espesor.; con dosificaciones de  $3 \text{ Kg/m}^3$ . de fibras sintéticas.

### **2.1.3 Locales**

**Montoya (2018)**, en la tesis: “Relación geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Paredones Nivel 5”. Definió con el cartografiado geológico-estructural que el túnel tiene tendencia ENE-WSW, coincidiendo con la secuencia de domos intrusivos y la mineralización con la Veta Murciélago. Además, geotécnicamente el Nivel 5 presenta redistribución de esfuerzos tenso-deformacionales de manera continua y progresiva, logrando un valor promedio del coeficiente de reparto de tensiones  $m = 0.55$  y ángulo de orientación tensional  $\alpha=55^\circ$ . Sin embargo, la investigación muestra además que las labores mineras están siendo susceptibles a cambios tensionales bajos, ligados a fracturamientos moderados a altos, con desplazamientos máximos de geoestructuras del medio plástico: 0.003 m., 0.007 m., 0.013 m., 0.114 m. y 0.782 m. en la periferia de la excavación, afectando la estabilidad de las labores mineras subterráneas, corroborando mediante métodos numéricos Phase2 V8.0 que muestra valores de FS entre: 0.54, 2.35, 3.42, 3.47 y 0.54. Además, utilizando el método empírico de Potvin en función de radio hidráulico y número de estabilidad, define cuatro zonas

como: zona de sostenimiento, zona estable, zona de transición con sostenimiento y zona de hundimiento.

**Benel (2019)** realizó la tesis: “Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo Cajamarca”. Determino el comportamiento del macizo rocoso frente a deformaciones, como: desprendimiento de bloques y estados tensionales; estando ligado a los cambios deformacionales vectoriales y tensionales de cada estación geomecánica, como: la estación 1 y 2 presenta deformaciones en la clave, la estación 3 deformaciones por tensiones en los hastiales y la estación 4 y 5, presenta deformaciones periféricas uniformes por la consistencia de la roca. Así mismo el sostenimiento a aplicar son cuadros de madera rectos (0.25 m. x 0.30 m. sección E-1 y 0.15 m. x 0.25 m. sección E-2), puntales (0.13 m. x 0.13 m. sección y altura 2.10 m., E-3) y anclajes sistemáticos por adherencia (9 pies distribuidos 1.80 m. x 1.80 m. de malla E-3, 6 pies E-4 y 6 pies distribuidos 1.90 m. x 1.90 m. de malla E-5). Geomecánicamente definió en 5 estaciones mediante los métodos empíricos como: RMR de calidad: mala (E-2), media (E-1, E-3 y E-5), buena (E-4) y Q de Barton de calidad: muy mala (E-2), mala (E-1), media (E-3, E-5) y buena (E-4). De acuerdo con estos valores la zonificación se ha dividido en tres zonas de inestabilidad: altamente peligrosa, peligrosa y moderadamente peligrosa; obteniendo también valores de  $\alpha = 49^\circ$  y coeficiente de reparto de tensiones ( $m = 54$ ), relacionados con estados tensionales y deformaciones máximas entre: 0.00010 m. a 0.0299 m.

**Uribe et al. (2011)**, realizó la investigación: “Evaluación geológica preliminar del proyecto Paredones”. Se basó en el enfoque del proyecto mineralógico de la mina Paredones ubicado en San Bernardino, para la reiniciación de las actividades de explotación. Realizando mapeos geológicos superficiales y subterráneos en todo el yacimiento minero, obteniendo un reconocimiento geológico a escala 1/15,000, permitiendo verificar los lugares de interés de las Vetas: Murciélagos (Nivel 5 y Nivel 3), Huayrapongo (Veta 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y Pilcay; enmarcados en el flanco derecho e izquierdo del valle de San Pablo, aportando con la geología de este cuerpo mineralógico dacítico y el control estructural determinada por la falla dextral el río San Pablo y las Vetas: Murciélagos y Pacasmayo.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Criterios Empíricos

#### ❖ *Valuación del Macizo Rocosos (RMR)*

Bieniawski (1976) publicó los detalles de clasificación de macizos rocosos llamada Clasificación Geomecánica o Sistema de Clasificación de Macizos Rocosos (RMR), basada en ella, actualmente tenemos la clasificación (Bieniawski, 1989). Tanto la última versión como de 1976 tratan de estimar la resistencia de macizos rocosos; el sistema RMR actualmente emplea seis parámetros para clasificar un macizo rocoso (Indian Bureau of mines, 2014). El sistema de valoración de masa rocosa (RMR) clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, siendo: 0 para roca muy mala y 100 para roca muy buena (Osinergmin, 2017).

Cuadro 2.2. Calidad de macizo rocosos en relación con el Índice RMR.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100 - 81	> 4	> 45°
II	Buena	80 - 61	3 - 4	35° - 45°
III	Media	60 - 41	2 - 3	25° - 35°
IV	Mala	40 - 21	1 - 2	15° - 25°
V	Muy mala	< 20	< 1	< 15°

Fuente: González de Vallejo (2004).

#### ❖ *Índice de calidad de roca (RQD)*

El índice de calidad de la roca (RQD) fue desarrollado por Deere (Deere et al. 1967) para proporcionar estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso a partir de registros de logueo geotécnico. A menudo, se necesita estimación RQD en áreas donde se ha realizado el mapeo de línea de detalle, obteniéndose el espaciado promedio de las juntas mediante la Ecuación 2 (Número de discontinuidades divididas por longitud transversal), correspondiendo a la relación propuesta por Priest y Hudson (1976), basándose en la fórmula indicada como Ecuación 1:

$$RQD = 100 * e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\lambda = \text{Numero de discontinuidades/Longitud} \quad \text{Ecuación 2}$$

Cuadro 2.3. Índice de Calidad de la Roca – RQD.

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
72 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: Deere (1967)

❖ *Índice de Resistencia Geológica (GSI)*

Los cambios principales de la Figura 2.1. es la presentación de los valores GSI en cada cuadro en la introducción de la clasificación estructural del macizo rocoso laminado/cizallado. La figura 2.1 es ahora el GSI más utilizado en la práctica, se ha ampliado para acomodar algunos de los macizos rocosos más variables y para proyectar la información obtenida desde los afloramientos superficiales hasta la profundidad (Hoek et al. 1998; Marinos & Hoek 2001; Marinos et al. 2005 y Hoek et al. 2005). Como se observa en la Figura 2.1., se deduce que el sistema GSI no debe usarse cuando un sistema estructural dominante claramente definido es evidente en el macizo rocoso. Este es potencialmente el caso de varios de los tipos de rocas nominados en algunas extensiones propuestas del sistema estratificado incluyendo limolitas o lutitas, pizarras, esquistos y gnesis. Estos tipos de rocas solo deben acoplarse si se han dañado tectónicamente y por haber perdido sus condiciones estructurales iniciales (Karzulovic y Read, 2009).

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI</b> <b>JUNTAS DE LA MASA ROCOSA</b> (Modificado por Hoek & Marinos, 2000).  A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI.  No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista de fijar GSI = 35. También notar que esta tabla no se aplica en mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso.  La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultados de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje en rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja en un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
		MUY BUENA Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización.	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxidos.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimientos compacto o rellenos o fragmentos.	MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimientos de arcilla suave o rellenos.
	Intacta o Masivo: Espécimen de roca Intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades.	80	70			
	Moderadamente fracturado: Entrelazado macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.		60	50		
	Muy fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad.			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas.				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte.					10

Figura 2.1. Hoek-Brown sistema de clasificación de la masa rocosa, 2000.  
Fuente: Marinos y Hoek (2000).

❖ *Índice de Calidad Tunelera (Q)*

Barton et al. (1974) del Instituto Geotécnico de Noruega propuso un índice de calidad de excavación de túneles (Q) para la determinación de las características del macizo rocoso y los requisitos de soporte del túnel. El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica desde 0.001 hasta un máximo de 1.000 y se define por:

Tamaño de bloques	$RQD/J_n$
Resistencia al corte entre los bloques	$J_r/J_a$
Influencia del estado tensional	$J_w/SRF$

Cuadro 2.4. Valoraciones del Índice de calidad Q.

Q	Tipo de roca
0.001 - 0.01	Excepcionalmente mala
0.01 - 0.1	Extremadamente mala
0.1 - 1	Muy mala
1 - 4	Mala
4 - 10	Media
10-40	Buena
40 - 100	Muy buena
100 - 400	Excepcionalmente buena
400 - 1000	Extremadamente buena

Fuente: Barton et al. (1974).

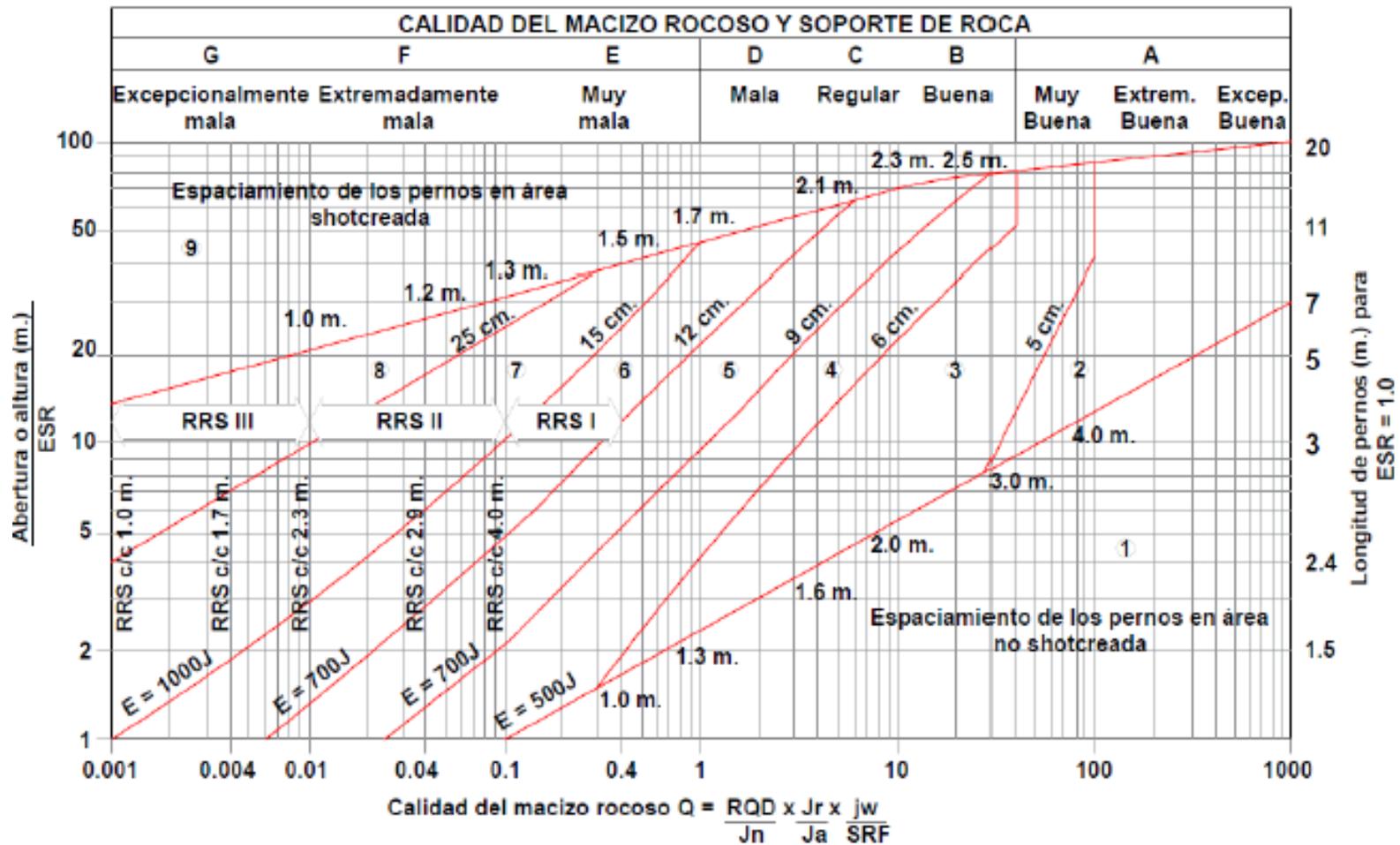


Figura 2.2. Método gráfico de sostenimiento del Sistema Q.  
Fuente: Grimstad y Barton (2007).

Esta actualización también incluyo una investigación analítica respecto al espesor, espaciamiento y reforzamiento de arcos armados de concreto lanzado (RRS) como función de carga y de la calidad del macizo rocoso Grimstad et al. 2002, siendo la última versión del grafico de sostenimiento la que afino Grimstad y Barton (2007). La Figura 2.2 constituye la actualización más reciente del Sistema Q, y muestra las recomendaciones de sostenimiento espesor del concreto lanzado reforzado con fibras (SFR), el espaciamiento entre pernos y la longitud entre los mismos, así como también indica la absorción de energía en fibra reforzada con shotcrete (E) (Osinergmin, 2017).

❖ *Índice del macizo rocoso (RMI)*

Palmstrom (1996), combinó factores: Propiedades inherentes del macizo rocoso, fuerzas actuantes presentes y características de la excavación; que tienen similares efectos en la estabilidad de la excavación. Dividiéndolos en dos grupos:

Terrenos continuos: Ocurren cuando  $CF < 5$  aproximadamente (roca masiva), en la cual dominan las propiedades de la roca intacta; y cuando  $CF > 100$  aproximadamente (Roca altamente diaclasada o particulada tectónicamente) donde el terreno se comporta como una masa material. En estos tipos de terrenos la principal influencia en el comportamiento dentro de una excavación subterránea viene dada por las tensiones. Por tanto, se usa un factor de competencia ( $C_g = \text{resistencia del macizo rocoso} / \text{tensión tangencial aplicada}$ ), expresado para terrenos rocosos: Masivos o altamente diaclasados (Palmstrom, 2000).

Terrenos diaclasado: La estabilidad de un terreno rocoso diaclasado está influenciado principalmente por: Tamaño y forma del bloque, por la resistencia a la cizalladura de las discontinuidades que delimitan el bloque, y por la orientación de las diaclasas o juntas en relación con la orientación que lleve el eje de la excavación. Los parámetros: Calidad del terreno ( $G_c$ ) y escala ( $S_r$ ) incluyen todos los rasgos del diaclasamiento, los cuales se usan para emplear el ábaco de sostenimiento de la Figura 2.3. (Palmstrom, 2000).

Cuadro 2.5. Índice del macizo rocoso R<sub>Mi</sub>.

<b>R<sub>Mi</sub></b>	<b>Condiciones de la sección</b>
< 0.01	Muy bajo
0.01 - 0.1	Bajo
0.1 - 1	Moderado
1 - 10	Alto
> 10	Muy alto

Fuente: Gavilanes y Andrade (2004).

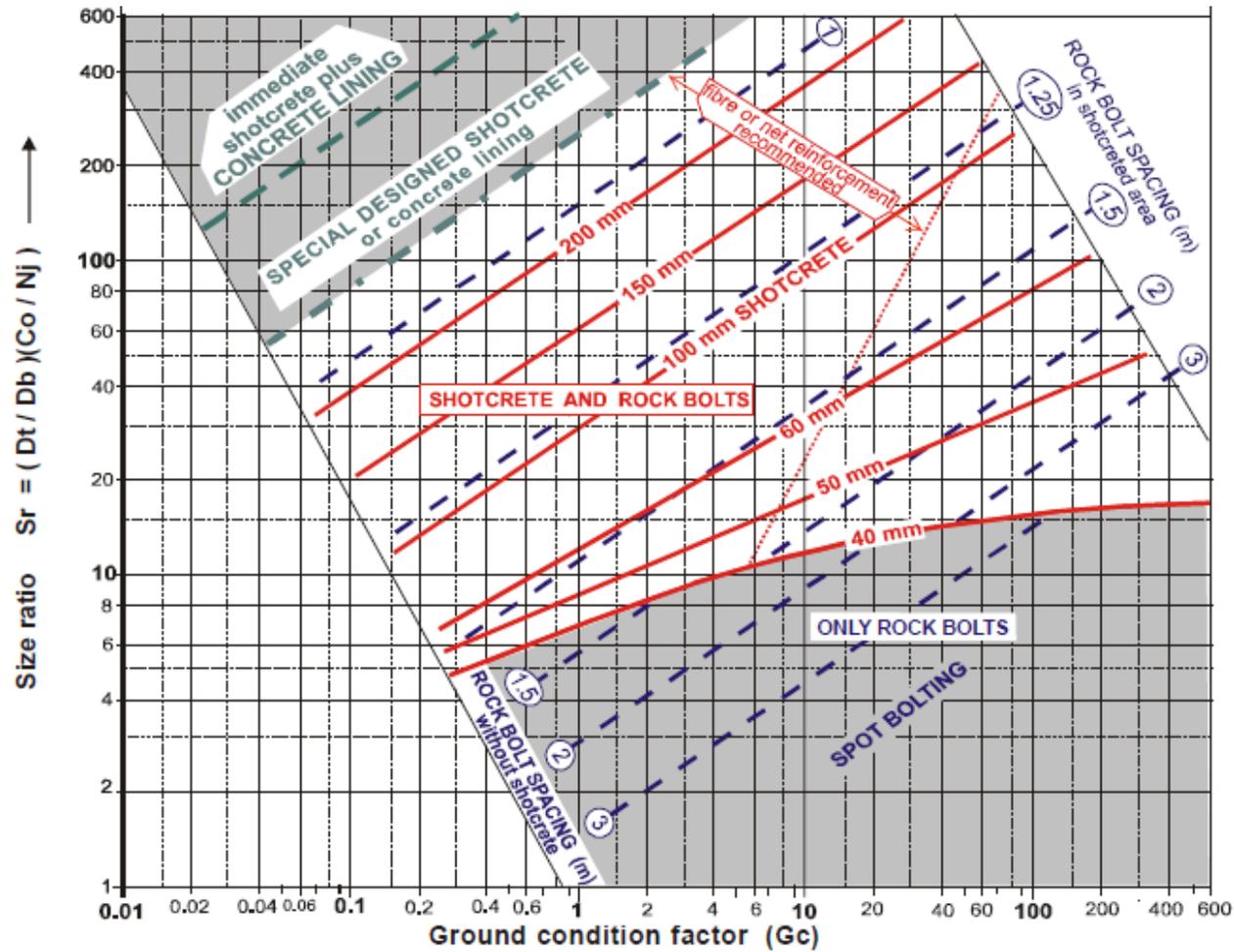


Figura 2.3. Sostenimiento para terrenos diaclasados (en bloques), incluyendo zonas débiles.  
Fuente: Palmstrom (2000).

### 2.2.2 Esfuerzo Pre-minado

Se refiere a la presión del macizo rocoso encerrado en el volumen de roca alrededor del yacimiento antes de explotarlo. Estos esfuerzos son fuentes de energía que podría ocasionar fallas en el macizo rocoso. Por lo tanto, es importante definir el estado de los esfuerzos de pre-minado, ya que constituyen parte importante de la evaluación del peligro relacionado con fallas en el macizo rocoso (Osinergmin, 2017).

#### ❖ *Estimación de esfuerzos in-situ*

Sheorey (1994), desarrollo un modelo de esfuerzos, que permite estimar el valor del coeficiente de reparto de tensiones ( $K_0$ ), indicándose en la Ecuación 3, basándose en propiedades deformacionales, relacionado con la profundidad de la excavación ( $z$ ).

$$K = 0.25 + 7E_h \left( 0.001 + \frac{1}{z} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Z = Profundidad con respecto a superficie.

Eh = Módulo de deformación en GPa de la roca de cobertura medido en dirección horizontal.

#### ❖ *Mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso*

Al definir el mecanismo de falla de una excavación se deben conocer las orientaciones predominantes de los sistemas de discontinuidades que formaran las cuñas, así como la forma, ubicación de cuñas (hastiales o clave), permitiendo determinar el tipo de sostenimiento y el factor de seguridad requerido para estabilizar la cuña. Para este análisis se puede usar el software geotécnico Unwedge (Osinergmin, 2017). La Figura 2.4 se utilizará a partir: Esfuerzos in-situ altos ( $\sigma_1/\sigma_c > 0.40$ ), Esfuerzos in-situ intermedios ( $0.15 > \sigma_1/\sigma_c < 0.40$ ) y Esfuerzos in-situ bajos ( $\sigma_1/\sigma_c < 0.15$ ); (Jordá et al. 2010).

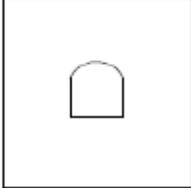
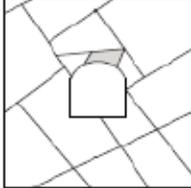
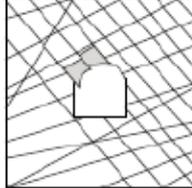
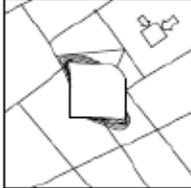
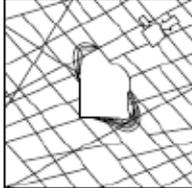
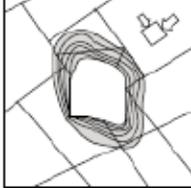
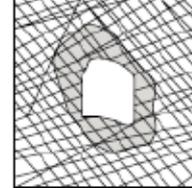
	Masivo (RMR>75)	Moderadamente fracturada (50>RMR<75)	Altamente fracturada (RMR<50)
Esfuerzos in situ bajos	 <p>Respuesta elástica lineal</p>	 <p>Deslizamiento o caídas de bloques y cuñas</p>	 <p>Deslajamiento de la superficie de la excavación</p>
Esfuerzos in situ intermedios	 <p>Falla rígida adyacente al entorno de la excavación</p>	 <p>Falla rígida localizada de roca intacta y movimiento de bloques</p>	 <p>Falla rígida en roca intacta y deslajamiento a lo largo de las discontinuidades</p>
Esfuerzos in situ altos	 <p>Falla rígida alrededor de la excavación</p>	 <p>Falla rígida de roca intacta alrededor de la excavación y movimiento de bloques</p>	 <p>Roca deformable, comportamiento plástico</p>

Figura 2.4. Mecanismos de falla y comportamiento del macizo rocoso para facilitar la comprensión del comportamiento del macizo rocoso (Modificado de Lorig, 2009).  
Fuente: Osinergmin (2017).

### 2.2.3 Métodos numéricos

Sin embargo, en la mayoría de los casos, el modelado numérico solo ayuda en el análisis cualitativo más que cuantitativo. Esto es especialmente cierto en el caso de la mecánica de suelos y rocas, ya que las propiedades geométricas del material y las condiciones de contorno no se conocen con precisión (Indian Bureau of mines, 2014).

El modelado de rocas fracturadas exige métodos numéricos y códigos informáticos de alto rendimiento, especialmente en lo que respecta a las

representaciones de fracturas, la heterogeneidad y la no linealidad de los materiales, el acoplamiento con el flujo de fluidos y la transferencia de calor y los efectos de escala. A menudo es innecesariamente restrictivo usar un solo método, incluso menos un código, para proporcionar representaciones adecuadas para las características y procesos más significativos; en la práctica, a menudo se usan modelos híbridos o códigos de procesos múltiples combinados (Indian Bureau of mines, 2014).

#### **2.2.4 Sostenimiento de excavaciones**

Es el conjunto de elementos resistentes que permiten al terreno excavado trabajar triaxialmente para conseguir la estabilización de la excavación (Celada, 2011), a fin de proporcionar condiciones seguras del trabajo y brindar acceso a las labores subterráneas. El sostenimiento podrá ser activo o pasivo:

Sostenimiento pasivo: Actúan en la superficie de la excavación o en su interior (Cimbras metálicas, cuadros de madera, Shotcrete y pernos cementados). Estos elementos pasivos requieren de la roca se desplace o deforme para recién empezar actuar como soporte (Osinermin, 2017).

Sostenimiento activo: Actúa en el interior del macizo rocoso (anclajes tensados y cables de anclaje tensado). Son capaces de proporcionar refuerzo a la roca desde el instante mismo de su instalación, logrando que la roca forme una zona de compresión y participe en la estabilidad de la excavación (Osinermin, 2017).

### **2.3 Definición de términos básicos**

*Parámetros deformacionales:* Resultado de la rigidez de la matriz rocosa y rigidez de la junta; el equivalente elástico continuo tiene las mismas características en cuanto a la deformación que el macizo rocoso fracturado (Galera, 2011).

*Caída de bloques:* Inducidos por movimientos sísmicos, ocurren cuando se registran aceleraciones de ondas sísmicas de baja frecuencia que afectan a un volumen de roca que es marginalmente estable (Diez y López, 2011).

*Anclaje:* Técnica de sostenimiento que consiste en introducir barras resistentes en taladros perforados en el terreno, solidarizándolos mediante procedimientos químicos o mecánicos para aumentar su resistencia (Celada, 2011).

*Cuadros de madera:* Se utilizan para el sostenimiento de túneles excavados en rocas de muy mala calidad (Muy fracturadas, alteradas, que requiere de soporte inmediato) (Osinergmin, 2017).

*Geomecánica:* Ciencia que se encarga de estudiar, el comportamiento mecánico de la roca, y de la fuerza inducidas, en una excavación subterránea (Berrocal, 2015).

*Métodos tenso-deformacionales:* Estos métodos constituyen una alternativa a los métodos de equilibrio límite, siempre y cuando su utilización esté justificada y sea apropiada para el análisis (González, 2004).

*Zonas críticas:* Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales (Dávila, 2011).

*Dominio estructural:* Es la masa de roca delimitada por discontinuidades geológicas, dentro de la cual la estructura es prácticamente homogénea (Gavilanes y Andrade, 2004).

*Litología:* Ciencia que estudia el origen, evolución y clasificación de las rocas. Se podría considerar como un sinónimo de petrología (Dávila, 2011).

*Emboquille:* Aquella actuación que consiste en excavar a cielo abierto una ladera hasta obtener un talud desde el que se inicia la excavación del túnel (Guerra, 2011).

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Ubicación

La Mina Paredones se ubica geográficamente en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca, al suroeste de la ciudad de Cajamarca. El proyecto minero pertenece a la concesión minera LUMINOSA NUMERO 2A, ubicándose en el cuadrángulo del sistema de Cajamarca 15 - f (cuadrante-IV), utilizando como base gráfica de coordenadas: UTM – DATUM – WGS-84 - ZONA – 17S. El acceso a la labor del Nivel 4 se ubica al sureste de la mina y tiene como coordenadas las siguientes:

Cuadro 3.1. Coordenadas de bocamina Nivel 4.

Ubicación	Este (m.)	Norte (m.)	Cota (msnm.)
Bocamina Nivel 4	740,635.734	9'204,496.816	1,040.000

Se delimita la zona de estudio según el Cuadro 3.2 (revisar Plano 02).

Cuadro 3.2. Delimitación de la zona de investigación – sistema de coordenadas

Vértice	Este (m.)	Norte (m.)
A	740,310.000	9'204,830.000
B	741,460.000	9'204,830.000
C	741,460.000	9'203,800.000
D	740,310.000	9'203,800.000

### 3.2 Accesibilidad

El recorrido inicia en la ciudad de Cajamarca, se toma orientación SSW hacia el distrito de San Juan, posteriormente orientación WNW hacia el distrito de Chilete, se permanece en dirección de la carretera hacia Ciudad de Dios, una vez

ubicados en el puente Kuntur Wasi se sigue orientación NNE hasta llegar al puente de ingreso a las instalaciones de Mina Paredones (Carretera asfaltada en buenas condiciones), finalmente se orienta con dirección ESE llegando a la bocamina del Nivel 4 (Trocha carrozable en malas condiciones).

Cuadro 3.3. Accesibilidad a la zona de estudio.

Tramo		Estado de Vía	Carretera	Transporte	Movilidad	Recorrido	
Desde	Hasta					Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Cajamarca	San Juan	Buena	Asfaltada	Terrestre	Miniván	35+000	00:49
San Juan	Chilete	Buena	Asfaltada	Terrestre	Miniván	50+400	01:03
Chilete	Puente Kuntur Wasi	Buena	Asfaltada	Terrestre	Mototaxi	01+000	00:02
Puente Kuntur Wasi	Puente Mina Paredones	Buena	Asfaltada	Terrestre	Mototaxi	04+900	00:05
Puente Mina Paredones	Nivel 4	Mala	Asfaltada	Terrestre	Mototaxi	01+200	00:03
<b>TOTAL</b>						<b>92+500</b>	<b>02:02</b>



Figura 3.1. Bocamina de ingreso al Nivel 4 – Mina Paredones.

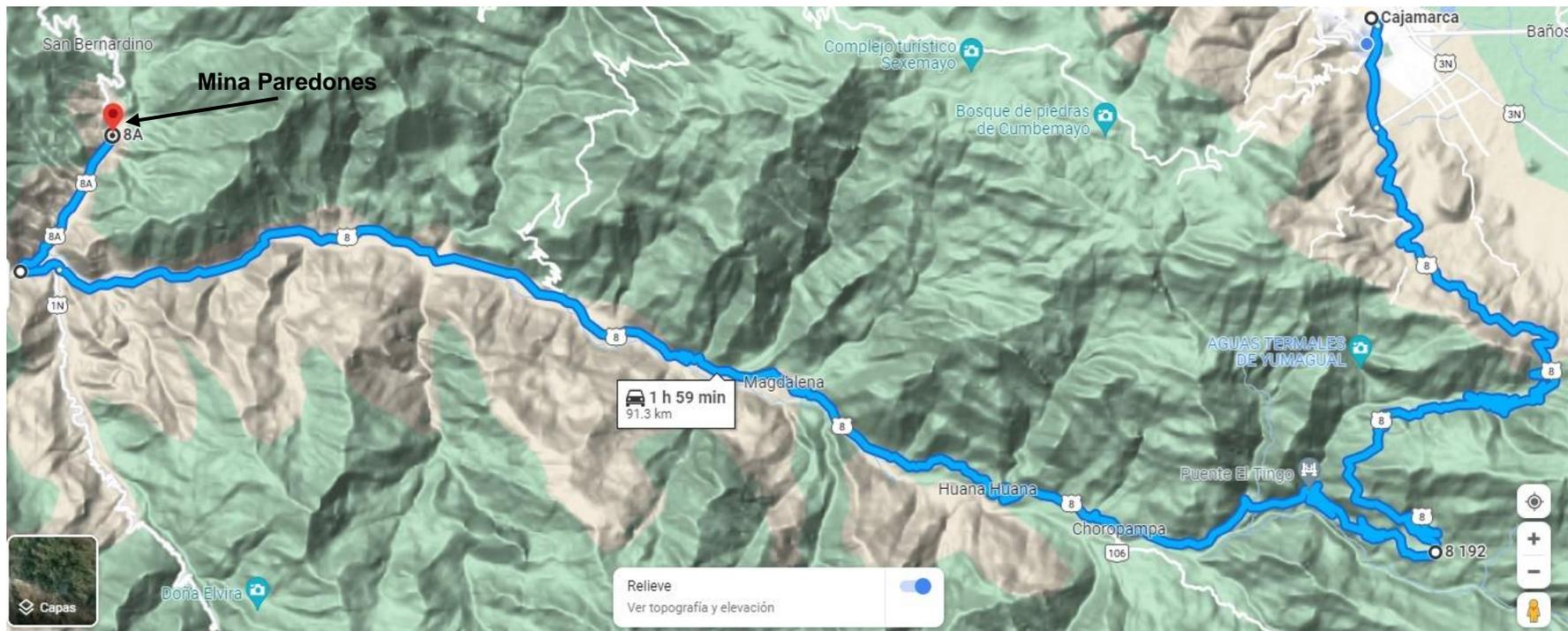


Figura 3.2. Ruta de acceso a las instalaciones de la Mina Paredones – Nivel 4.  
Fuente: Google Maps (2022)

### 3.3 Clima

Los veranos en la ciudad de Chilete son cortos, calurosos y nublados, y los inviernos son cortos, cómodos, secos y mayormente despejados.

La temperatura en Chilete varía generalmente de 13 °C a 26 °C y rara vez es menos de 12 °C o más de 29 °C. La temporada templada comprende desde enero hasta marzo (mes más cálido del año es febrero, con una temperatura máxima promedio de 26 °C y mínima de 16 °C) y la temporada fresca desde junio hasta agosto (el mes más frío del año es julio, con una temperatura mínima promedio de 13 °C y máxima de 25 °C).

La probabilidad de días mojados en Chilete varía durante el año. La precipitación se presenta como: una temporada más mojada que dura 6.7 meses, de octubre a abril, con una probabilidad de más del 14 % de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados en Chilete es marzo y el mes con menos días mojados julio. La información fue recopilada de Weather Spark (<https://es.weatherspark.com/y/19951/Clima-promedio-en-Chilete-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>).

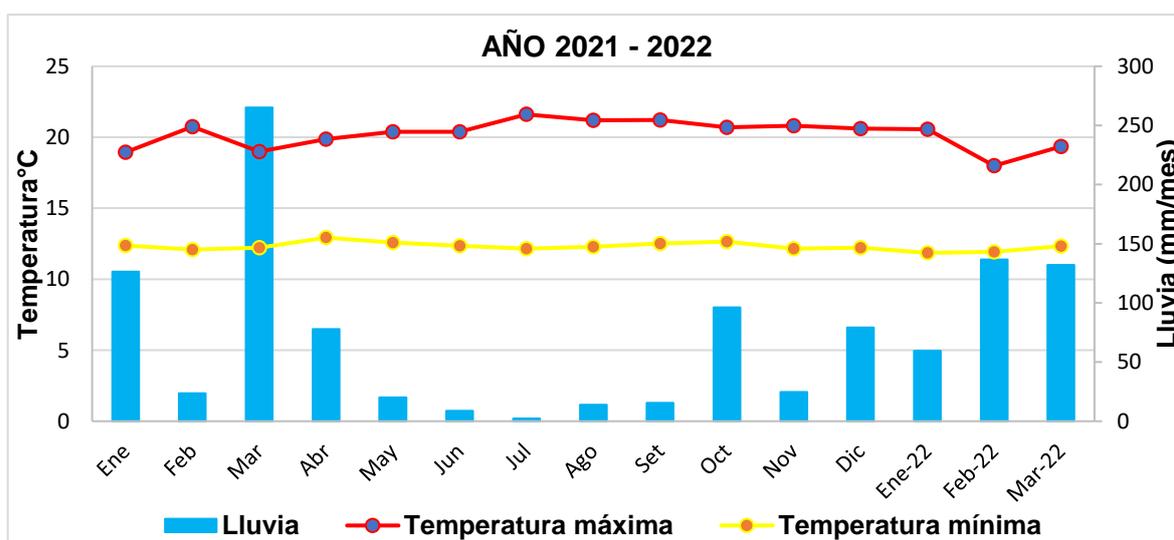


Figura 3.3. Diagrama estadístico meteorológica – estación San Pablo.  
Fuente: SENAMHI (2021-2022).

La estación meteorológica tipo: convencional – San Pablo – 107036, con Latitud: 7° 7' 3.89'', Longitud: 78° 49' 51'' y cota: 2325 msnm.; se encuentra en el distrito: San Pablo, provincia: San Pablo y departamento: Cajamarca. Diagrama de frecuencias estadísticas pertenece al año: 2021 Y 2022 (enero a marzo).

### **3.4 Metodología de la investigación**

La metodología empleada en la labor subterránea del Nivel 4, está conformadas por técnicas y métodos de carácter científico, necesarios para adquirir información de campo, seleccionar y procesar datos, así como, la redacción del documento y emisión de resultados finales enfocados en: caracterización del macizo rocoso y discontinuidades, tensiones, precipitación, infiltración y sismicidad en relación con la inestabilidad geomecánica.

#### **3.4.1 Tipo, nivel, diseño y método de investigación**

La investigación es de tipo cuantitativo: Esta conformado por información numérica de campo y gabinete, la cual está relacionada con los modelos geológico, geomecánico y matemático; para contrastar la hipótesis se emplea herramientas de análisis: Estadístico y matemático (Modelo matemático), para describir, explicar y predecir fenómenos de ocurrencia en las instalaciones subterráneas.

Nivel transversal: Se basa en la observación de campo, en un momento específico, de las condiciones que generan redistribuciones tensionales alrededor de la excavación subterránea y como consecuencia inestabilidad geomecánica. Por consiguiente, mediante el análisis e interpretación de las variables se dará a conocer porque está ocurriendo inestabilidades progresivas en el Nivel 4.

Diseño no experimental: La investigación se basa fundamentalmente en la observación y estudio de fenómenos que están ocurriendo en el entorno de la labor del Nivel 4, en su contexto natural. Para lo cual, se ha tenido que averiguar qué sucesos han ocurrido, por fuentes primarias como: Trabajadores, supervisores e ingenieros de las instalaciones mineras, relacionados con el contexto de la investigación.

Método deductivo – inductivo: Se direcciona al razonamiento para llegar a conclusiones, como primera premisa definir el comportamiento geomecánico mediante métodos: Q de Barton y R<sub>Mi</sub>, teniendo como estrategias de razonamiento lógico y el deductivo basadas en conclusiones específicas como: Cartográfico geológico-geotécnico, caracterización geomecánica, tipo de sostenimiento por: Q de Barton y R<sub>Mi</sub>, análisis tensional Phase2 v8 y sostenimiento por Rocsupport v3; de vital importancia para la fundamentación ingenieril.

### **3.4.2 Población**

Labor subterránea del Nivel 4 – Mina paredones, desde el Pl. + 00 m. hasta el Pl. + 635 m., presentado todas las características de ser: Estudiada, medida y cuantificada finitamente.

### **3.4.3 Muestra**

Para elegir la muestra se realizó procedimientos previos (reconocimiento) y progresivos (recolección de datos), se seleccionaron seis estaciones geomecánicas en función de variables y la interacción de cada una de ellas con la inestabilidad geomecánica de la labor Nivel 4, en consecuencia, el entorno de investigación presenta rocas: Andesitas (principal), diatrema, alteración (Sílica, argílica y argílica avanzada) y dique (estructura), reflejando las características de la población.

### **3.4.4 Unidad de análisis**

La investigación se relaciona con las siguientes unidades de análisis: precipitación, infiltración, sismicidad e inestabilidad geomecánica.

### **3.4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se basó en la recolección sistemática de datos, inicialmente entrevistando a trabajadores antiguos de las labores, obteniendo un panorama general del

entorno del Nivel 4, posteriormente se realizaron inspecciones de campo para obtener información más completa sobre: ocurrencias subterráneas, método de recuperación minera de las cajas y centrándonos en las condiciones de inestabilidad geomecánica actuales. Por consiguiente, la tesis plantea brindar información real y precisa, para el procesamiento, análisis, interpretación y redacción; mediante el cartografiado geológico y geomecánico. Se definen cuatro etapas de recolección de datos:

❖ *Primera etapa: Recopilación de información*

Como primera etapa se realizó la búsqueda de bibliografía relevante mediante fuentes como: papers, artículos científicos, seminarios, libros y tesis. También se emplearon servidores como: Google Maps (visualización de la ruta de acceso en tiempo real a la zona de estudio), Geocatmin (para obtener información de la geología mediante el catastro minero vinculado con el Ingemmet), SASPlanet (descarga de imágenes satelitales de alta resolución) y Global Mapper (Generador de MDT – MDE – MDP, para cálculos cuantitativos y cualitativos), información que se consolida mediante el software ArcGis, empleado para la delimitación de la zona de estudio y elaboración de planos temáticos del Nivel 4.

❖ *Segunda etapa: Campo*

Consistió en el reconocimiento del Nivel 4, mediante visitas exploratorias, obteniendo el cartografiado subterráneo y superficial, mediante el llenado de registros: geológicos, geoestructurales y geomecánico, para ello se obtuvo información cualitativa y cuantitativa, relacionada con las variables planteadas en la tesis de investigación.

❖ *Tercera etapa: Gabinete*

Se llevo a cabo la selección y agrupación de información, realizado en tres fases: Primera fase: Sistematización de datos obtenidos en campo, mediante codificación y tabulación, sirviendo de base para el análisis del entorno geológico-geomecánico; Segunda fase: análisis e interpretación de datos y Tercera fase:

redacción de la tesis final conteniendo resultados la investigación. Empleando adicionalmente programas como: Rocsupport V3 y Phase2 V8, mostrando el comportamiento de la excavación ante interacciones numéricas por cada estación geomecánica.

❖ *Cuarta etapa: Análisis e interpretación de resultados*

Los gráficos y cuadros obtenidos permitieron analizar y dar alcances importantes en la interpretación mediante la etapa de gabinete, aportando datos importantes de cada sección de la labor subterránea Nivel 4, considerando las exigencias de validación y limitaciones en el proceso de la investigación que permitieron verificar la hipótesis planteada, determinando así el estado tenso-deformacional y tipo de sostenimiento (Métodos empíricos y Softwares geotécnicos).

### **3.4.6 Recursos equipos - materiales y soporte técnico**

❖ *Equipos:* Están conformados por:

- Brújula Brunton (Serie: 5631915000), para el levantamiento topográfico y obtener la orientación de las geoestructuras.
- GPS Garmin (Serie: 2DV186166 - Garmin), para referenciar satelitalmente el Punto Inicial (PI.) próximo a la bocamina de Nivel 4.
- Cámara fotográfica (Serie: 8322513), para el registro fotográfico.
- Peine de Barton, nos permitió medir el perfil de rugosidad de las diaclasas.
- Martillo Schmidt (Marca: Controls, modelo: 45-D0561), nos permitió estimar aproximadamente la resistencia a compresión simple de la roca.
- Lupa (Serie: Achromatiz 20x - Iwamoto), para observar a detalle la textura e identificar la composición los minerales y rocas.
- Picota (Modelo: E3-23LP 22 onz - Estwing), para fracturar y extraer muestras de rocas.
- Protactor (C-Thru / Westcott), para medir la abertura de las diaclasas, escalar los datos y elaborar el trazo del Nivel 4 de la mina en campo.
- Rayador (SKU 15-075), para estimar la dureza de minerales y rocas.

- Wincha (SKU: 133632 - Kamasa), para tomar medidas y realizar el levantamiento topográfico.
- Flexómetro (Stanley – SKU: 120250), para el levantamiento topográfico y obtener medidas de las diaclasas.
- Linterna minera (Serie: Opalux KJ3.5LM – 3.5 A<sub>0</sub>), para iluminar el área.
- Casco tipo jockey con portalámpara (Serie: H-700 – 3M), para la protección personal del tesista.



Figura 3.4. Equipo e instrumentos utilizados para obtención de información de campo.

❖ *Materiales:*

- Registro geológico-geotécnico, para registrar los datos geológicos y geoestructurales de manera ordenada.
- Ácido clorhídrico, para identificar minerales carbonatados en las rocas.
- Plano topográfico (escala 1:4000), plano geológico (escala 1:4000) e imagen satelital (escala 1:7000); se emplearon para orientarnos

especialmente, identificar accidentes geográficos y para trazar a mano alzada la labor Nivel 4 empleando el protactor.

- Libreta de campo, portapapeles, lapiceros y colores; para el registro de datos.

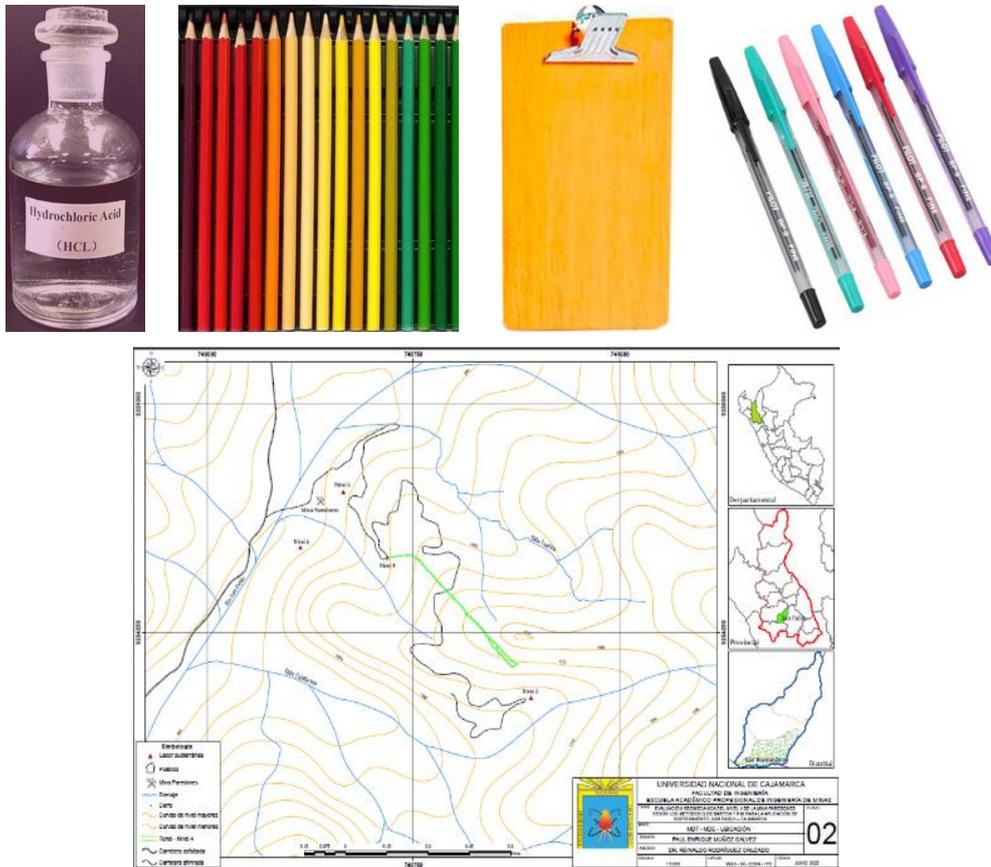


Figura 3.5. Materiales utilizados para el cartografiado.

❖ *Soporte técnico:*

- SASPlanet V22, para obtener imágenes satelitales.
- AutoCad 2020, para elaborar y exportar gráficos.
- Global Mapper 15, para obtener modelos de elevación digital y generar curvas de nivel.
- ArcGis 10.8, para elaboración de mapas temáticos.
- RocData V4, para obtener parámetros geotécnicos de macizos rocosos ante la intervención de esfuerzos.

- Phase2 V8, para calcular los esfuerzos y deformaciones alrededor de las excavaciones.
- Rocsupport V3, para estimar la deformación de excavaciones y la interacción del túnel con diferentes elementos de soporte
- Faultkin V8, para analizar la cinemática de fallas.



Figura 3.6. Programas del modelo matemático, utilizados para procesamiento y presentación de la interacción roca-sostenimiento.

### 3.4.7 Operacionalización de variables

Cuadro 3.4. Operacionalización de las variables.

<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>				
Variables	Definición conceptual	Indicadores	Definición operacional	Parámetro
Precipitación	Es toda forma de humedad que, originándose en las nubes llega hasta la superficie del suelo. La precipitación puede ser en forma de: lluvias, granizadas, garúas y nevadas	Cantidad de agua	Altura de lámina de agua por unidad de tiempo	mm/año
Infiltración	Circulación de agua en los macizos rocosos a través de sus poros o a lo largo de las discontinuidades.	Cantidad de agua	Coefficiente de permeabilidad	mm
Sismicidad	Medida de la actividad sísmica de algún lugar específico, según la intensidad, número y grado de los sismos que se han dado a lo largo del tiempo.	Coefficiente sísmico horizontal	Kh	Adimensional
		Coefficiente sísmico vertical	Kv	Adimensional
<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>				
Variables	Definición conceptual	Indicadores	Definición operacional	Parámetro
Inestabilidad geomecánica	Alteración del estado de equilibrio tensional debido a algún cambio o fenómeno estructural.	Plano de movimiento	Longitud	m.
		Rotura	Probabilidad	%
		Inestabilidad	F.S.	Adimensional

### 3.5 Geología Local

La excavación subterránea del Nivel 4 está emplazada en rocas volcánicas del Paleógeno – Eocena, rocas de la secuencia Volcánica Chilete–Ayambra (54.8 +/- 1.8 Ma), conformado por: Depósitos de flujos de lava andesítica intercalada con depósitos volcanoclásticos lahares y flujos de cenizas gris violáceos, con espesor aproximado de 800 m. (Navarro y Flores, 2007). Sin embargo (Reyes, 1985), manifiesta que está conformado por: Intercalaciones tobáceas, areniscas tobáceas, aglomerados lenticulares y materiales volcánicos retrabajados, mayormente andesíticos, bien estratificados; siendo producto del vulcanismo post-teórico de la región cordillerana y representa un magmatismo efusivo que siguió al emplazamiento del batolito de la costa.

Los cartografiados geológicos del Nivel 4, plasman la litología que conforman actualmente el basamento rocoso volcánico formado por: Eventos volcánicos, tectónicos y mineralizantes, como: Volcánico Chilete, diatrema, dique longitudinal y alteraciones (Sílica, argílica y argílica avanzada).

El Volcánico Chilete es la roca caja (Techo y piso) de la zona de estudio conformada por rocas andesitas ígneas efusivas de grano medio de textura afanítica de color gris verdusco con pseudoestratificación (debido a que es magma expulsado a la corteza terrestre solidificándose formando lava presentando secuencias volcánicas rocosas, progresivas por el enfriamiento delimitado la dirección de flujo principal acompañado de discontinuidades) que presenta orientación: Az = 231° y Bz = 33°NW (Revisar Anexo A: Registros Geológicos-Geotécnicos). Sin embargo, se evidencia una estructura vertical de base elíptica ubicada en el by-pass (Acceso paralelo a la Veta Murciélagos, por haberlo tajeado desde: Pl. + 483 m. hasta Pl. + 609 m. recuperando toda esta zona de enriquecimiento mineral, cortando tres niveles abajo, formando actualmente una chimenea vertical inclinada de Bz = 80°NE a 85°NE) presente desde Plp. + 33 m. hasta Plp. + 85 m., con dimensiones de 55 m. x 20 m. de material brechoso está conformando un diatrema volcánico.

El cartografiado geológico plasma que fue una zona altamente fracturada aprovechada por la cámara magmática para la liberación violenta de gases ocasionado movimiento ascendente de material andesítico, expulsando violentamente a los laterales de la chimenea, para posteriormente originar derrumbes de las paredes de roca hacia el interior del cráter, para ser aprovechados por los fluidos hidrotermales ascendentes, originando cuerpo brechoso freatomagmático mineralizados, compuesto por fragmentos líticos angulosos andesíticos de 7.5 cm. a 10 cm., con matriz cementante de polvo de roca constituyendo el cuerpo mineralizado: Esfalerita, galena, galena argentífera, covelina, cuarzo, yeso, calcopirita, pirita y óxidos de hierro, se evidencia en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Brecha de falla ubicado en PI. + 100 m., presenta: composición mineralógica de covelina, pirita y calcopirita, una matriz cementante de sílice y también se puede observar vetillas de yeso.

Por consiguiente, se cartografiaron dos alteraciones: Sílica y argílica avanzada, afectando la composición: Textural, mineralógica y química, de la roca caja y la Veta Murciélagu. La alteración sílica, se localiza próxima a la Veta Murciélagu, caracterizada por su bajo peso específico compuesto de: Sinter y sílice, afectada por los fluidos hidrotermales ácidos lixiviando el cuerpo mineralógico y roca andesita, ubicándose en bajas proporciones en la galería principal, sin embargo, en el by-pass se encuentra desde Plp. + 85 m. hasta Plp. + 146.50 m., en contacto directo el diatrema en orientación SE, alterando una longitud 61.50 m. y la parte final la Veta Murciélagu (Pl. + 591.50 m. hasta Pl. + 635 m.), formando secciones subterráneas estables geotécnicamente. La alteración argílica avanzada está emplazada en la periferia de la Veta Murciélagu y la roca caja (Andesita) en varios tramos afectando la composición de la misma veta en forma de aureolas compuestas de materiales rocosos andesíticos altamente fracturados en forma de costras nodulares de mala a muy mala calidad rocosa, con superficies: caolinita, alunita y cuarzo; generando zonas peligrosas por su poca resistencia a la carga gravitatoria de los paquetes superiores rocosos, presentado sostenimiento por cuadros de maderos en varios tramos de la galería.

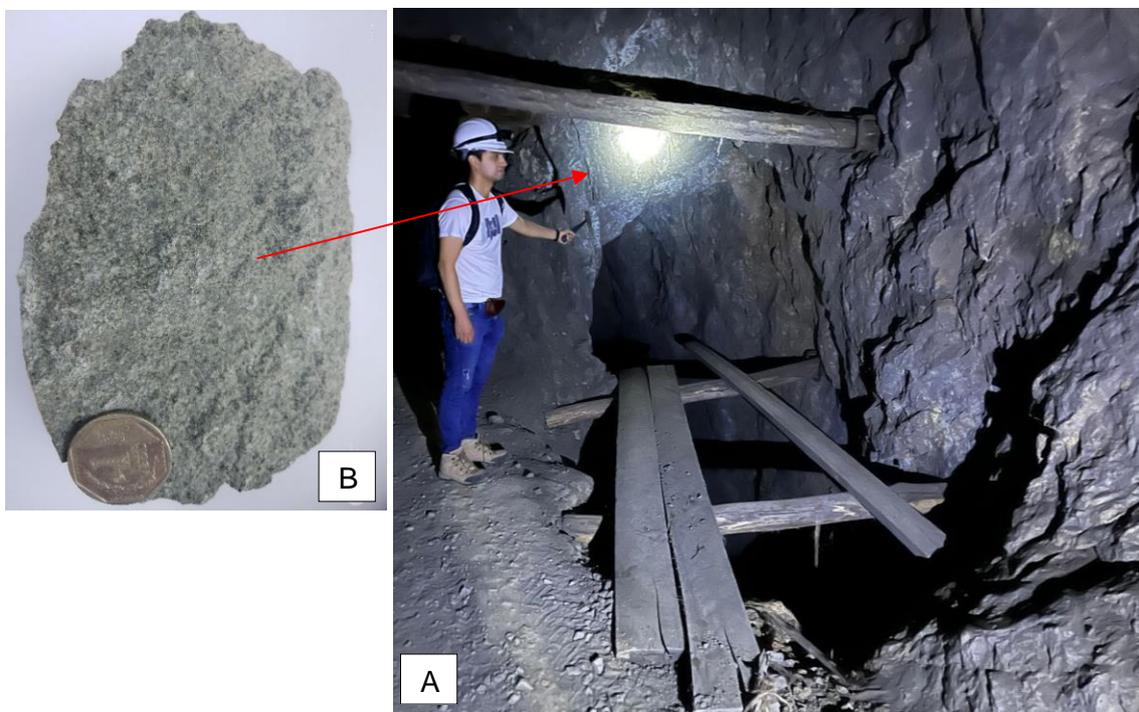


Figura 3.8. A. Tajeo del Nivel 4 emplazado en roca andesita la caja: Techo y piso, mostrando la geometría de la excavación subterránea. B. Roca andesita de color verduzco de textura afanítica, ubica en el Pl. + 200 m. de la galería principal (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP1).

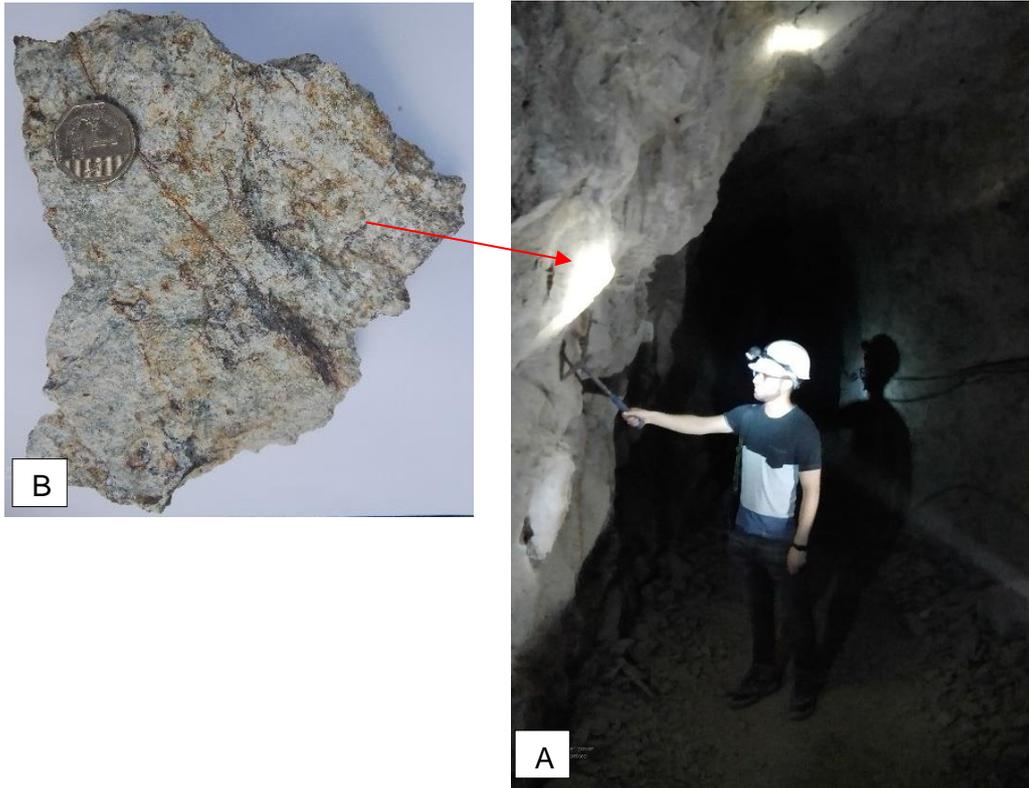


Figura 3.9. A. Sección ubicada en el PI. 80 m., compuesta por alteración argílica avanzada de color gris blanquecina. B. Muestra de alteración argílica avanzada, compuesta por minerales afaníticos de dimensiones equigranulares y subidiomorfos (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP2).

La Veta Murciélago tiene una longitud +/- 1000 m. y espesor: de 0.90 m a 1.20 m., efectivamente es la litología de mayor importancia, para el proyecto minero de la empresa MINERA CAJAMARCA S.A.C., para su rentabilidad, sin embargo, la antigua empresa Northerm Peru Mining Corporation realizó una cortada de orientación N80°E, ubicándose el dique a PI. + 80 m. de la bocamina del Nivel 4, presentando orientación: Az = 300°, Bz = 80°NE y pitch = 86°, geológicamente se originó por distensión de las cajas del dique, considerándolo tectónicamente zona deformacional de gran envergadura por presentar enjambres de diques paralelos a esta estructura de la Veta Murciélago, observando en su emplazamiento del borde externo materiales de composición de grano fino, presentando cizalla por la superficie de despegue entre ambos planos falla. El núcleo está constituyendo más de 2/3 partes de la veta, compuesto por roca masiva de grano grueso de alta resistencia, por las texturas de flujo magmático reconocidas por el alineamiento de los fenocristales de mineralización. De acuerdo con los cartográficos es un dique longitudinal asociado a rifts continentales divergentes (Fallas transformantes).

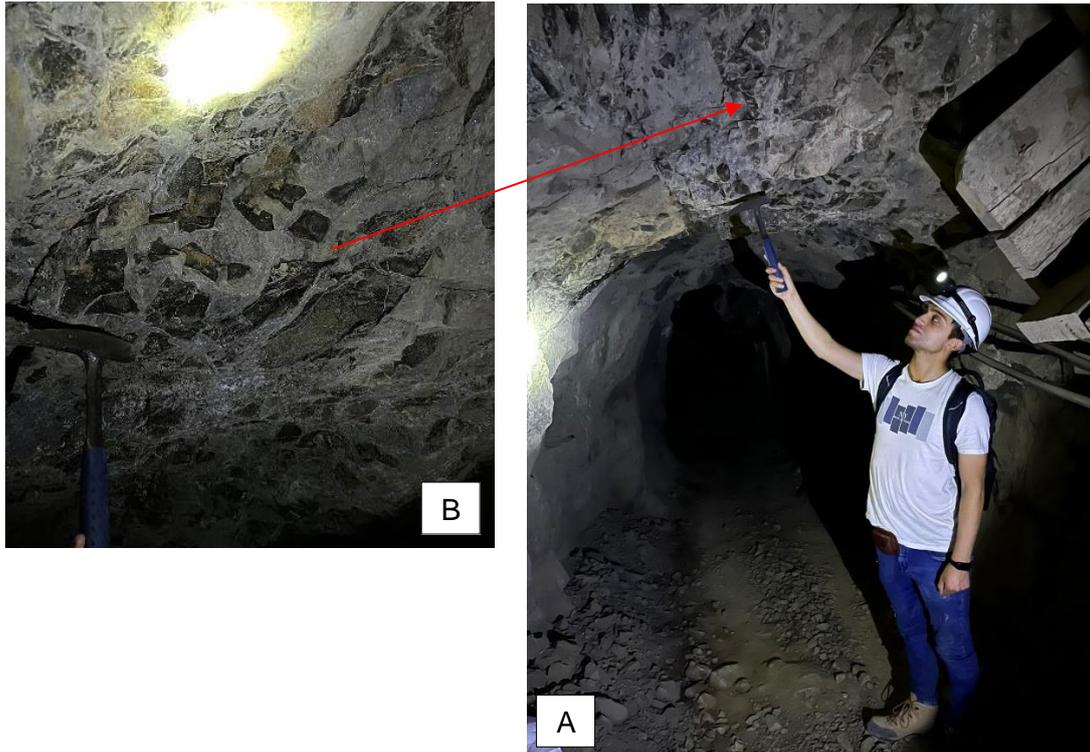


Figura 3.10. A. Diatreme volcánico, conformado por material brechoso de alta resistencia, ubicado en el by-pass del PIP. + 50 m. B. Brecha hidrotermal compuesta de fragmentos de rocas andesíticas angulosas soportada con matriz cementante de sílice y polvo de roca.

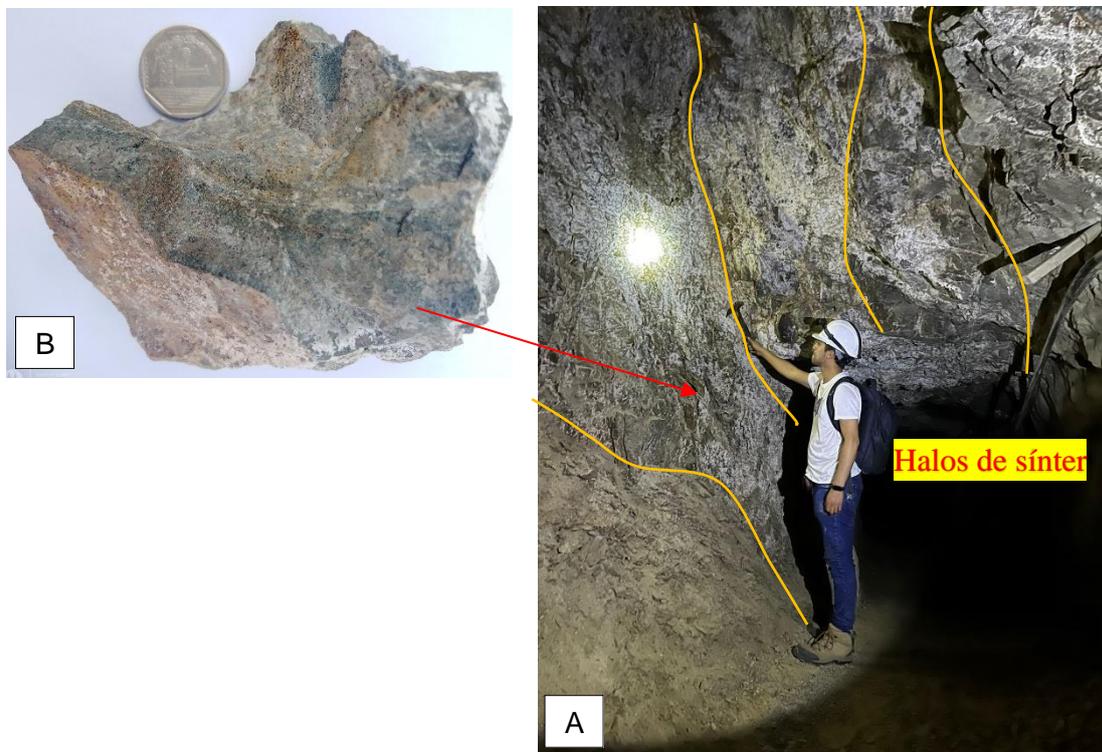


Figura 3.11. A. Alteración sílice, ubicada en el by-pass del PIP. + 110 m., paralelo con la Veta murciélago, formando a Halos de alteración hidrotermal. B. Muestra de alteración sílice, presentando halos de sínter y sílice, en su composición mineralógica (revisar Anexo B: Formatos Petrográficos, Cuadro FP3).

### 3.6 Geología Estructural

El sistema estructural predominante en el proyecto es NW, coincidente con el alineamiento andino. Las vetas presentan rumbos que varían de N 50° a 65° W y buzamientos de 75° a 82° NE a 78° a 85° SW. Algunas Fallas identificadas cortan algunas estructuras mineralizadas con desplazamientos de rumbo sinestrales, presentan rumbos desde N 30° a 50° W y buzamientos 78° NE a 87° SW, sistema reconocido en un corte de la carretera hacia Cajamarca. Probablemente el sistema de Vetas: Murciélago y Pacasmayo, estén controlados por dos fallas transcurrentes dextrales del sistema E-W, que coinciden con las quebradas California y El Ingenio (Uribe, et al., 2011) y la falla dextral del río San Pablo con orientación NE – SW (Benel, 2019).

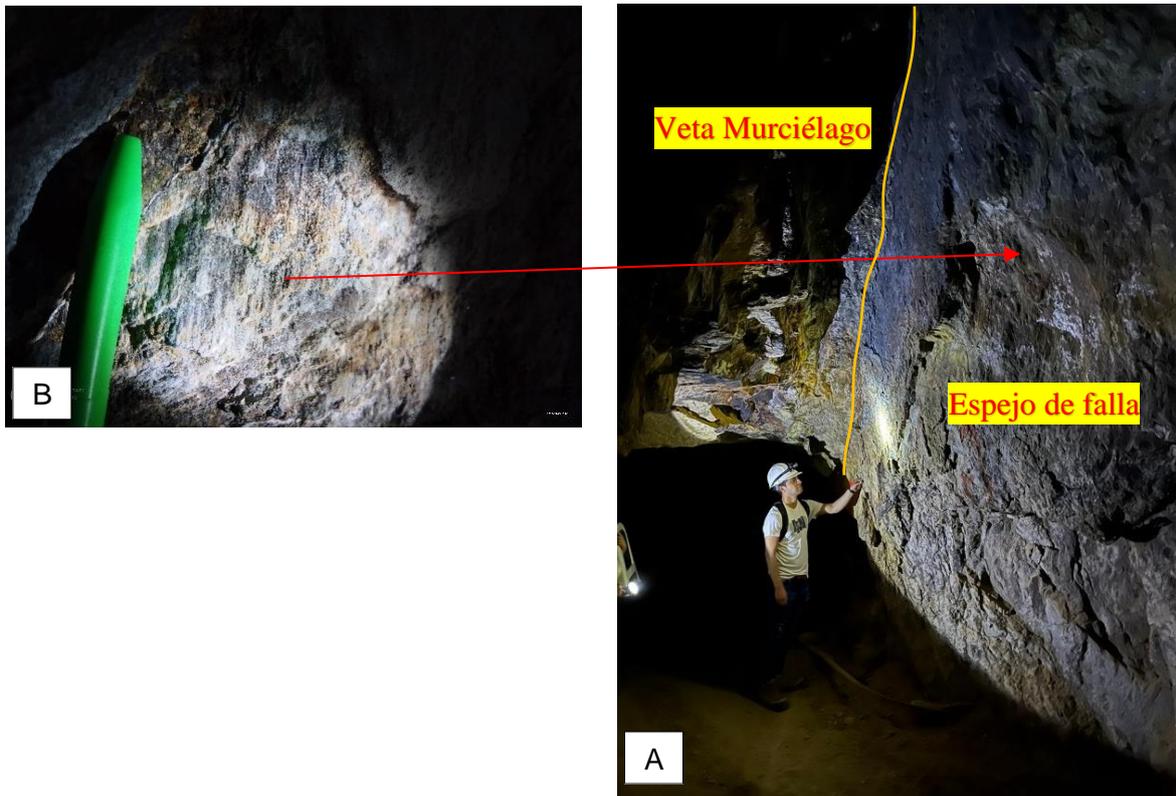


Figura 3.12. A. Espejo de falla delimitando a la Veta Murciélago, con cinemática Normal. B. Indicador cinemático del plano de falla, evidenciándose: Estrías, slickensides y escalones, ubicado en el PI. + 105 m.

La inestabilidad del Nivel 4 está relacionada con las estructuras: Mayores y menores, proporcionando información: Cuantitativa y cuantitativa, para su interpretación y análisis. Sin embargo, la estructura mayor está definida por la Veta Murciélago generado por movimientos tectónicos de la corteza terrestre, formando la mineralización de Mina Paredones, para la cual se obtuvo 20 indicadores cinemáticos de campo de la Veta Murciélago plasmando una orientación promedio: Az = 300°, Bz = 80°NE, pitch = 86°, K = Nx, y paleoesfuerzos resultando en (T/P) :  $\sigma_1 = 225.50/58.80$ ,  $\sigma_2 = 129.00/3.90$  y  $\sigma_3 = 36.70/30.90$ , de orientación NW-SE, obteniéndose de los planos de debilidad paralelos a la caja techo y piso, del cuerpo mineralizado. Categorizándolo en este grupo fallas que cortan transversalmente: El Eje del túnel y la Veta Murciélago, han sido originadas por fallas tipo Normales, inversas y de rumbo (Dextrales y sinestrales), generando movimientos cinemáticos de importancia para la interpretación: Litológica, estructural, hidrológica e hidrogeológica, en la excavación subterránea, aplicando los modelos dinámicos de diedros rectos de Anderson (1905 y 1951) y la Teoría de Ramsay (1967).

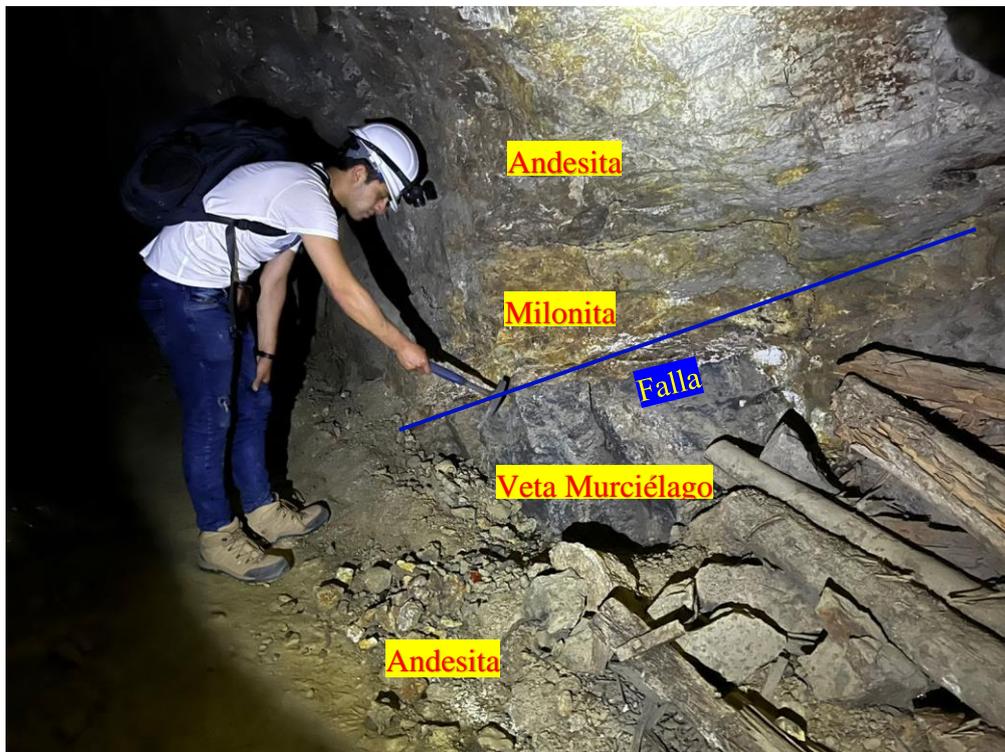


Figura 3.13. Falla sinistral con orientación: Az = 250°, Bz = 31°NW, desplazó a la Veta Murciélago al hastial izquierdo de la galería, con un salto de falla de 1.20 m. La falla sinistral está delimitada por milonita de color: Amarillo a anaranjado, presenta espesor de 0.30 m a 0.35 m., ubicado en el Pl. + 475.15 m.

Por consiguiente, también el cartografiado geomecánico muestra 4 discontinuidades de mayor incidencia definidas por (Az/Bz): 215/21, 121/56, 330/64 y 32/72 y 2 ocasionales definidas por (Az/Bz): 265/52 y 162/48; formando sobre-excavaciones en forma de chimeneas verticales a sub verticales con alturas de: 5.50 m. a 6.50 m., desde: Pl. + 80 m. hasta Pl. + 635 m.; por el contrario, la cortada y by-pass, forman secciones en forma: Cuadra o baúl, por presentar desclasamientos inclinados a horizontales, generando desprendimiento de bloques en forma: Triedros tetraedros, prisma truncado y prisma doblemente truncado, formando secciones estables por la poca vulnerabilidad del desprendimiento de bloques, con secciones: 2.10 m. x 2.20 m. (Cortada) y 3.30 m. x 2.05 m. (By-pass).

### **3.7 Hidrología**

El drenaje está definido por el río San Pablo (Río Llaminchad), emplazado en un acuífero volcánico, en la subcuenca del río del mismo nombre de la Cordillera Occidental de la provincia de San Pablo, teniendo como nacimiento en la parte superior la unión de los ríos: Magdalena y Socosmayo, en la cota 1,120 msnm. en el distrito de San Bernardino, con orientación N-S, con una longitud de 2,300 m., luego cambiando a orientación NNE-SSW interceptado agua abajo a los 963 msnm. con la quebrada El Ingenio a una distancia de 305 m., formando el mismo río San Pablo, siguiendo su curso se intercepta con la quebrada Lupita a los 952 msnm. a una distancia de 350 m. formando el mismo río del mismo nombre, conformando una longitud de 6,905 m. desde su nacimiento a evacuación final; confluyendo y formando el río Magdalena en la cota 850 msnm. y a su vez formando aguas abajo el río Chilete con orientación ESE-WNW, con una longitud de 10,200 m., cambiando de nombre a río Jequetepeque en el centro poblado Salitral en la cota 710 msnm. recorriendo orientación ENE-WSW, con una longitud 88,500 m.; desembocando las aguas en el Océano Pacífico, en el centro poblado: La Boca del Río, perteneciente al departamento: La Libertad, provincia: Pacasmayo y distrito: Jequetepeque.

Cuadro 3.5. Precipitación máxima en 24 horas a altitud media de la microcuenca.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MÁXIMA
2018	79.60	101.80	214.40	112.30	48.10	13.80	0.00	10.40	25.30	27.70	16.30	75.50	214.40
2019	72.80	236.80	186.30	63.20	24.70	4.20	1.30	0.00	4.60	46.00	17.90	117.80	236.80
2020	22.20	48.50	43.30	15.76	0.00	21.74	7.30	0.00	8.10	6.20	20.10	93.00	93.00
2021	126.50	23.60	265.20	77.80	20.10	8.70	2.20	14.00	15.60	96.30	24.60	79.10	265.20
2022	59.40	136.60	132.20	70.60	0.00	36.78	24.58	46.78	60.45	20.00	78.56	86.13	132.20
Promedio	72.1	109.5	168.3	67.9	18.6	17.0	7.1	14.2	22.8	39.2	31.5	90.3	188.3

Fuente: SENAMHI, 2018 - 2022.

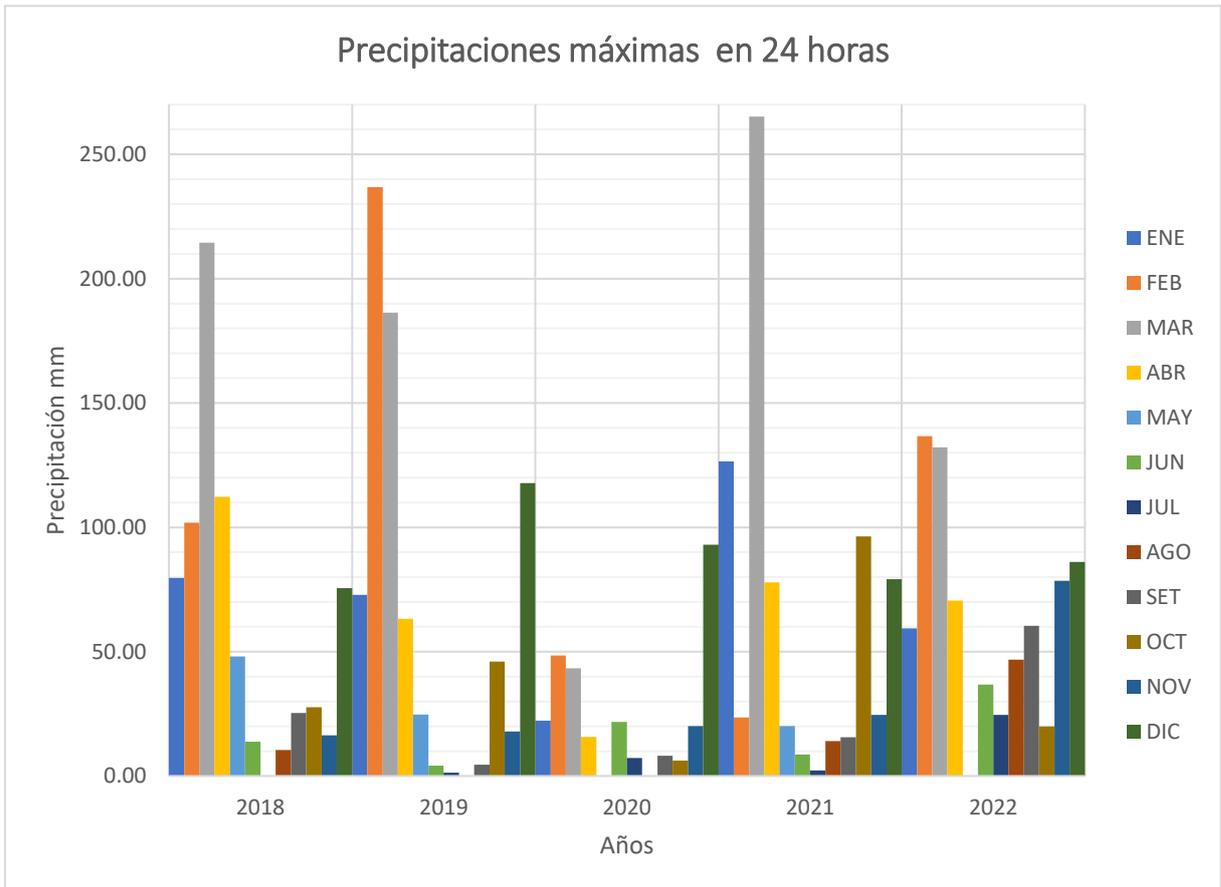


Figura 3.14. Diagrama estadístico de la precipitación máxima - estación San Pablo.  
Fuente: SENAMHI, 2022.

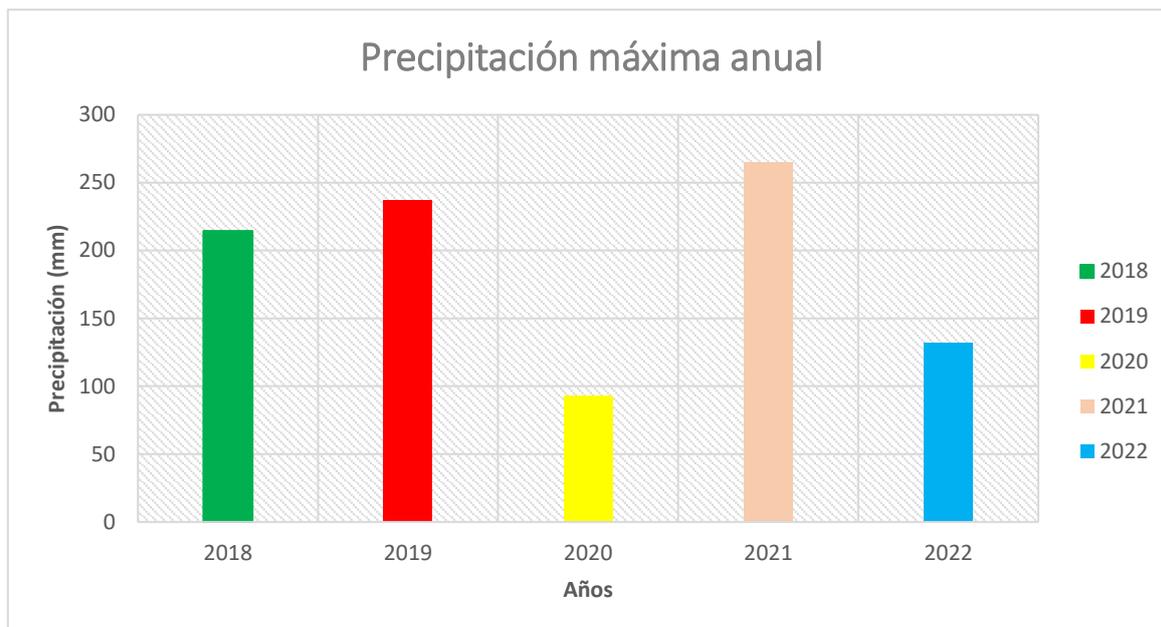


Figura 3.15. Histograma de precipitación máxima anual - estación San Pablo.  
Fuente: SENAMHI, 2022.

La excavación subterránea del Nivel 4, se encuentra ubicada paralela a la quebrada Lupita, a 250 m. a 350 m. de distancia, en orientación NE, sin embargo, la quebrada Lupita evacua sus aguas pluviales en orientación SE-NW, delimitándose por la microcuenca Lupita con área 0.42 Km<sup>2</sup>., evidenciándose por: Humedad e infiltración, en las instalaciones subterráneas, generando inestabilidades progresivas, obteniéndose valores de precipitación máximas en 24 horas por año, de la estación meteorológica tipo: convencional – San Pablo. Los cálculos cuantitativos muestran que la labor del Nivel 4 presenta: Riesgo admisible (R% = 35), vida útil (n = 15 años) y periodo de retorno (T = 35.32 años), variaciones del tiempo de retención promedio de agua de 10 min en la superficie del suelo, con intensidad promedio de 93.33 mm/hora y caudal promedio de 0.75 m<sup>3</sup>/s en la microcuenca Lupita.

Cuadro 3.6. Parámetros hidrológicos de influencia - excavación subterránea del Nivel 4.

Nombre de cuenca	C	Área (Km <sup>2</sup> .)	Long. cauce principal (Km.)	Cota mayor (msnm.)	Cota menor (msnm.)	Pendiente (m/m)	Tc (min.)	I (mm/hora)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
MC-1	0.30	0.22	0.55	1,293.00	1,083	0.38	12.00	35.75	0.66
MC-2	0.30	0.07	0.21	1,211.00	1,082	0.63	5.40	212.18	1.24
MC-3	0.30	0.13	0.55	1,193.00	1,003	0.35	12.60	32.06	0.35

### 3.8 Hidrogeología

Las condiciones de agua evidenciadas en campo en relación con la clasificación de Bieniawski 1989, presentan condiciones de: seco, húmedo, mojado, goteo y flujo, por la constante infiltración de agua, preguntándose los encargados e ingenieros de las labores porque ocurre humedad en varios tramos, sabiendo que se encuentra ubicada a una cota elevada en el área del proyecto minero. Sin embargo, de acuerdo con los cálculos hidrológicos presenta caudal promedio que superan  $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ , por las escorrentías de la microcuenca Lupita; ubicada a altitudes: 1,077.000 msnm., 1,110.000 msnm. y 1,149.000 msnm. (Eje de quebrada Lupita), en cambio la bocamina a 1,040.000 msnm. de altitud, observándose una variación vertical: 37 m., 70 m. y 109 m.; por consiguiente, las infiltraciones en la clave y hastiales cada vez son más constantes generando: recristalización de minerales, esponjamientos de la roca y alteraciones (argílica avanzada y silicificada). Acotando que las líneas de flujo tienen orientación NE-SW, reflejándose en la periferia de la excavación; por consiguiente, están afectado: Cuadros de maderos y anclajes, formando en su superficie: Recristalización de minerales, putrefacción, oxidación y corrosión, por la influencia de las aguas subterráneas.



Figura 3.16. A. Flujo de agua en la clave de la labor discurriendo por el hastial derecho formando mineral hidrocincita por la humedad constante. B. Recristalización de hidrocincita con ancho de 0.30 m., con hábito botroidal, ubicado en el PI. + 145.45 m.

Se manifiestan humedad desde PI. + 070 m. hasta PI. + 145 m., por la recristalización de minerales: sulfatados (Epsomita) y carbonatados (Hidrocincita), en: clave y hastiales. Por consiguiente, desde PI. + 178.50 m. hasta PI. + 232 m., presenta humedad constante por los desplazamientos de los flujos de materiales acumulados en las tolvas en algunos casos formando lodos afectando el traslado de los coches mineros. En consecuencia, PI. + 350 m. a PI. + 405 m. hay presencia de flujos de agua ubicados en el hastial derecho. Sin embargo, ubicado en el by-pass desde PI. + 073 m. hasta PI. + 155 m., se evidencia humedad afectando: hastiales y claves, conformado alteraciones: Argílica avanzada y silicificada.

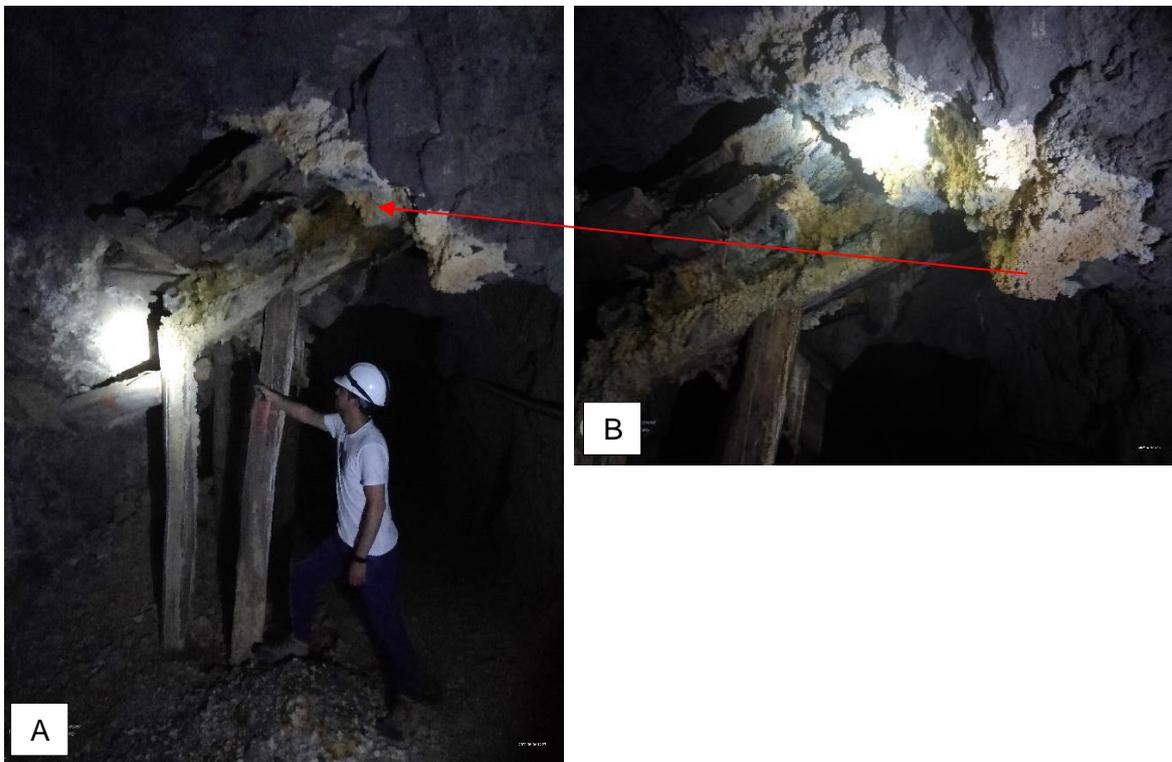


Figura 3.17. A. Emanación de agua en la clave de la labor, formando por su constancia hidrocincita en la clave y maderos, formando por su constancia acumulación de escombros en la solera. B. Hábito botroidal de hidrocincita, ubicado en el PI. + 155.30 m.



Figura 3.18. A. Zona de afectación de humedad constante desde Pl. + 190 m. llegando hasta Pl. + 200 m., afectando a la tolva, sobre todo en la margen derecha de la labor. B. Los minerales que se originan son: Epsomita e hidrocincita, con hábitos: botroidal a estalactitas.



Figura 3.19. Zona de by-pass, afectada por la humedad constante en toda la sección subterránea, desde Punto Inicial de by-pass (Plp). + 69 m. hasta Plp. + 143.50 m.

### 3.9 Sismicidad

Las labores del Nivel 4, están conformadas por rocas de buena a mala calidad, siendo importante identificar la zona sísmica donde se ubica el proyecto, con la finalidad de obtener los coeficientes sísmicos horizontal ( $K_h$ ) y vertical ( $K_v$ ). También influye la altura de la columna de roca que se encuentra sobre cada estación geomecánica. Aplicando la Norma Técnica E.30 Diseño Sismorresistente, obtenemos que el proyecto se encuentra en la zona sísmica  $Z_2 = 0.25$ , con un periodo de retorno de 50 años en suelos rígidos con tipo de suelo: S0 y S1, de acuerdo con el cartografiados geológicos de campo. Se consideró las ondas de corte: 500 m/s a 1500 m/s para el diseño geotécnico mediante el modelo matemático. De acuerdo con el factor de amplificación sísmica (C), se ubica entre:  $T < T_P$  y  $T_P < T < T_L$ , no logrando ser  $\geq 0.11$ , en relación de fuerza cortante en la base de la columna de roca. Por consiguiente, el Cuadro 3.7 reporta el coeficiente de aceleración espectral, obteniendo coeficiente sísmico horizontal entre los rangos: 0.013 a 0.094 y sísmica vertical entre 0.033 a 0.242.

Cuadro 3.7. Coeficiente de aceleración espectral respecto a cada estación de la labor subterránea - Nivel 4.

	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
$K_h$	0.094	0.091	0.019	0.013	0.012	0.025
$K_v$	0.250	0.242	0.051	0.034	0.033	0.066

Fuente: Propia.

### 3.10 Geomecánica

La geomecánica está relacionada con la ingeniería de rocas en las labores del Nivel 4, siendo constantemente utilizada para estudiar el comportamiento del basamento rocoso frente cambios de esfuerzos y deformaciones, generados por las presiones gravitatorias de las columnas de rocas, originados por las nuevas aberturas o tajeos, es decir con la roca circundante y la roca mineralizada. Sin embargo, los cambios se evidencian por: Desprendimientos, estallido de rocas, deformaciones de las cajas y sonidos traquelamiento; en contingencia a estos fenómenos naturales se aplica metodologías empíricas: Índice de calidad de roca

(RQD), valoración de la masa rocosa (RMR), índice geológico de resistencia (GSI), estimación de esfuerzos insitu, índice de Índice de Calidad de Tunelería (Q) y índice del macizo rocoso (RMi). Para posteriormente ingresar información: cualitativa y cuantitativa, a los modelos matemáticos: Phase2 v8 y Rocsupport v3; para así visualizar el comportamiento en el entorno de la excavación, frente a cambios: Litológicos, geoestructurales, sísmicos e hidrogeológicos, para finalmente proponer el tipo de sostenimiento de acuerdo con las caracterizaciones antes propuestas por mi investigación del Nivel 4 – Mina Paredones.

### **3.10.1 Criterios Empíricos**

Las labores del Nivel 4, se encuentran en constante pérdida de resistencia reflejadas por seguir generados aberturas en el basamento rocoso, ligadas a la recuperación de mineral metálico y afectadas por la presión litostática, por consiguiente, para determinar la calidad de la roca circundante se realizó el modelo geológico teniendo en cuenta las características: Litológicas, geoestructurales, flujo de agua y tensionales; aportando información en la fase preliminar, para la clasificación geomecánica mostrando resultados cualitativos de acuerdo a la sección evaluada clasificándolo desde: Muy mala a buena calidad. El RQD fue definido por el conteo de discontinuidades, en el metro lineal, basado en el mapeo geomecánico por la línea de detalle, siendo dicha información registrada en los registros geomecánicos y calculada por la ecuación de Priest y Hudson (1976). El RMR se realizó una caracterización visual a escala del cartografiado basándose en la versión RMR89 + corrección por la orientación del túnel, mostrando valores: cualitativos y cuantitativos, de la masa rocosa. La estimación de esfuerzos  $m$  o  $k$ , fueron entrelazados por el modelo matemático RocData para obtener: Módulo de deformación (GPa) y esfuerzo máximo (MPa), con resultados de  $m$ : 0.49 a 0.62 y también:  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , definiendo el campo tensional en la periferia de la excavación con ángulo de orientación ( $\alpha$ )  $50^\circ$ . El Q, criterio utilizado básicamente para excavaciones subterráneas, estimando por seis parámetros independientes clasificándolos desde: Muy mala a buena calidad. El RMi, utilizado para representar la resistencia del macizo rocoso y estimación del sostenimiento, obteniendo valores: 0.786 a 59.399, desde rocas de moderada a alta resistencia.

Cuadro 3.8. Resultados de cuantificación geomecánica utilizando criterios empíricos.

Criterios empíricos			Estación					
			E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
$\sigma_{ci}$ (MPa)			125	45	62	135	192	35
RQD (%)	Puntaje	Cuantitativo	73.58	46.77	73.58	78.81	89.25	40.60
		Cualitativo	Regular	Pobre	Regular	Buena	Buena	Pobre
RMR	Puntaje	Cuantitativo	59	34	48	58	66	36
		Cualitativo	Media	Mala	Media	Media	Buena	Mala
GSI	Puntaje	Cuantitativo	54	29	43	53	61	31
		Cualitativo	Regular	Mala	Regular	Regular	Buena	Mala
m	H(m.)		14	31	89	134	136	113
	$\sigma_1$ (MPa)		0.39	0.67	2.33	3.685	3.74	2.486
	$\sigma_3$ (MPa)		0.24	0.37	1.22	2.00	2.09	1.23
	Valor		0.62	0.55	0.52	0.54	0.59	0.49
	Forma sección		Baúl	Baúl	Baúl	Baúl	Baúl	Baúl
Q	RQD (%)		73.58	46.77	73.58	78.81	89.25	40.6
	Jn		9	15	9	12	12	15
	Jr		2	1.5	1	1.5	1.5	2
	Ja		1	4	1	1	0.75	3
	Jw		1	0.66	0.66	1	1	0.66
	SRF		2.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Puntaje	Cuantitativo	6.54	0.77	5.40	9.85	14.88	1.19
Cualitativo		Media	Muy mala	Media	Media	Buena	Mala	
RMI	jR		2	1.5	2	1.5	2	1.5
	jA		2	4	1	1	1	4
	jL		2	3	2	1	2	2
	jP		0.202	0.018	0.320	0.212	0.309	0.029
	Cuantitativo		25.211	0.786	19.825	28.548	59.399	0.997
	Puntaje Cualitativo		Alta resistencia	Moderada resistencia	Alta resistencia	Alta resistencia	Alta resistencia	Moderada resistencia

En consecuencia, el Cuadro 3.8 muestra de forma resumida la cuantificación obtenida por cada parámetro empírico, siendo de gran importancia para: La caracterización geomecánica, dimensionamiento de las labores y mejoramientos de la estabilización de cada sección de la excavación subterránea del Nivel 4 – Mina Paredones. Visualizándose la resistencia a la compresión

uniaxial: 35 MPa a 192 MPa, describiéndolas como roca: Muy fuerte a débil, desde: R2 a R5, por: Cizallamiento y deformabilidad.

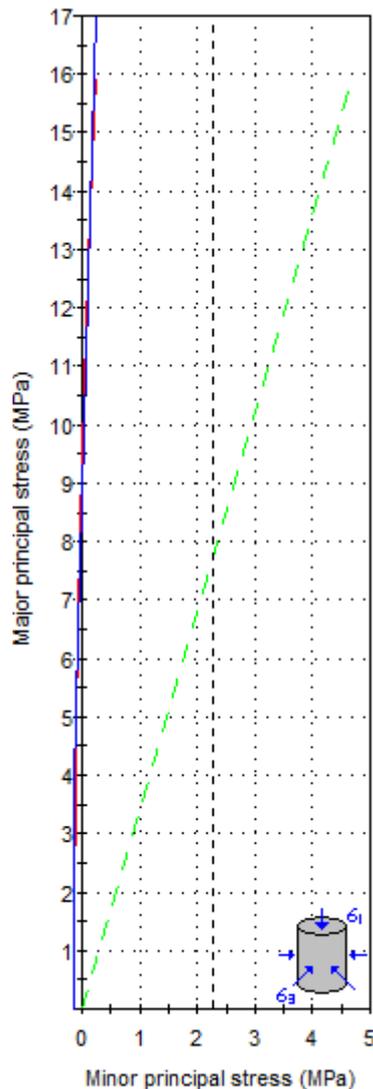
El Cuadro 3.9, muestra los resultados de las constantes elásticas, obtenidas del programa numérico RocData, configurado por criterios de rotura: No lineales y lineales, basados en la anisotropía de los planos de debilidad. La consignación de la constante del macizo rocoso para roca intacta  $m_i$  presenta variaciones numéricas por: tipo de roca, textura, alteración, relleno, etc. definiendo este valor sin embargo correlacionado con el  $m_b$  por la calidad de roca. El factor de perturbación (D), fue visualizada por la afectación de daño en la periferia de la excavación, por consiguiente, el valor s muestra que son rocas alteradas y también de valor a plasma claramente el criterio empírico de Hoek y Brown. Finamente c y  $\varphi^\circ$ , varia por el grado de cementación y composición mineralogía de la roca. Sin embargo, la estación E-7, enmarca en esta etapa solo para obtener resultados de la Veta Murciélago, por ser una estructura adicional de ingreso al modelo numérico, siendo de vital importancia por presentar otras características litológicas a las cajas.

Cuadro 3.9. Constantes elásticas de la masa rocosa.

Criterios	Estación							
	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
Clasificación Hoek - Brown	$m_i$	28	20	26	29	27	21	30
	D	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ei (MPa)	60,000	13,500	25,420	66,150	80,640	10,850	128,625
	MR	480	300	410	490	420	310	525
Criterio Hoek - Brown	$m_b$	5.416	0.292	3.395	5.413	6.706	1.786	10.276
	s	0.0060	0.0000	0.0018	0.0054	0.0131	0.0005	0.0357
	a	0.504	0.524	0.509	0.505	0.503	0.501	0.501
Parámetros masa rocosa	$\sigma_t$ (MPa)	-0.139	-0.003	-0.032	-0.135	-0.376	-0.009	-0.851
	$\sigma_c$ (MPa)	9.793	0.161	2.464	9.678	21.745	0.645	46.066
	$\sigma_{ct}$ (MPa)	38.929	2.832	14.893	41.926	67.662	5.771	109.482
	Em (MPa)	23,215.180	429.280	4,975.810	24,215.460	43,764.270	942.150	94,258.210
Criterio Mohr - Coulomb	c	0.749	0.108	0.664	1.547	2.470	0.418	4.444
	$\varphi^\circ$	70.65	42.59	56.70	61.66	64.29	47.01	66.57

❖ Estación 1

Se ubica desde el PI. + 00 m. hasta el PI. + 45 m., conformado por roca andesita de con resistencia a la compresión uniaxial 125 MPa., relacionado con 3 golpes (R5), conformado por tres familias, con espesor: 0.25 m. a 0.35 m., con superficies onduladamente lisa a suave, con rellenos: Arcilla, calcita, óxidos y yeso. Presentando planos de debilidad ligeramente alterados a inalterados, en condiciones secas el afloramiento rocoso. Presentando condiciones superficiales regulares y estructuras levemente fracturadas.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 125 MPa

GSI = 54  $m_i = 28$  Factor de disturbancia = 0.00

Módulo intacto ( $E_i$ ) = 60,000 MPa

Modulus ratio (MR) = 480

Criterio Hoek - Brown

$m_b = 5.416$   $s = 0.0060$   $a = 0.504$

Morh - Coulomb

Cohesión = 0.749 MPa Ángulo de fricción = 70.65°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.139 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 9.493 MPa

Resistencia global = 38.929 MPa

Módulo de deformación = 23,215.180 MPa

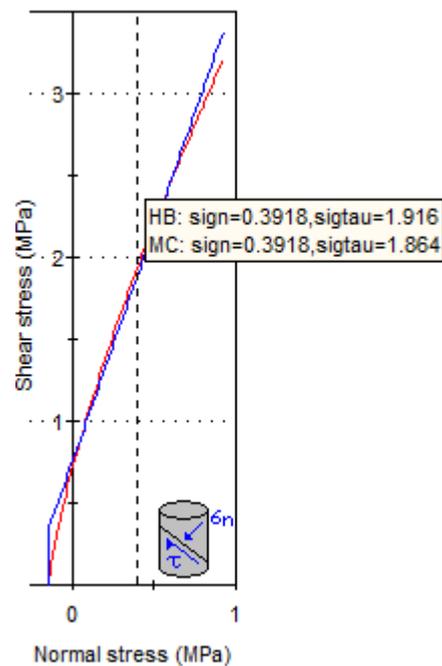


Figura 3.20. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Mohr - Coulomb. Estación geomecánica 1.

❖ Estación 2

La zona de inestabilidad se encuentra ubicada desde el PI. + 85 m. hasta el PI. + 140.45 m., conformada la sección por roca de alteración argílica avanzada de mediana resistencia 45 MPa., con espesores de bloques de 0.20 a 0.06 m., con persistencia < 1 m., con superficies rugosas a ligeramente rugosas, con aberturas 1 mm. a > 5 mm. y con meteorización ligera a moderada. La sección está ligeramente húmeda a húmeda, presentando en su superficie minerales como: Epsomita, hidrocincita y óxidos. La Figura 3.21, muestra el método equivalencia de áreas, obteniendo los parámetros elásticos por el software RocData, para el modelo numérico del túnel.

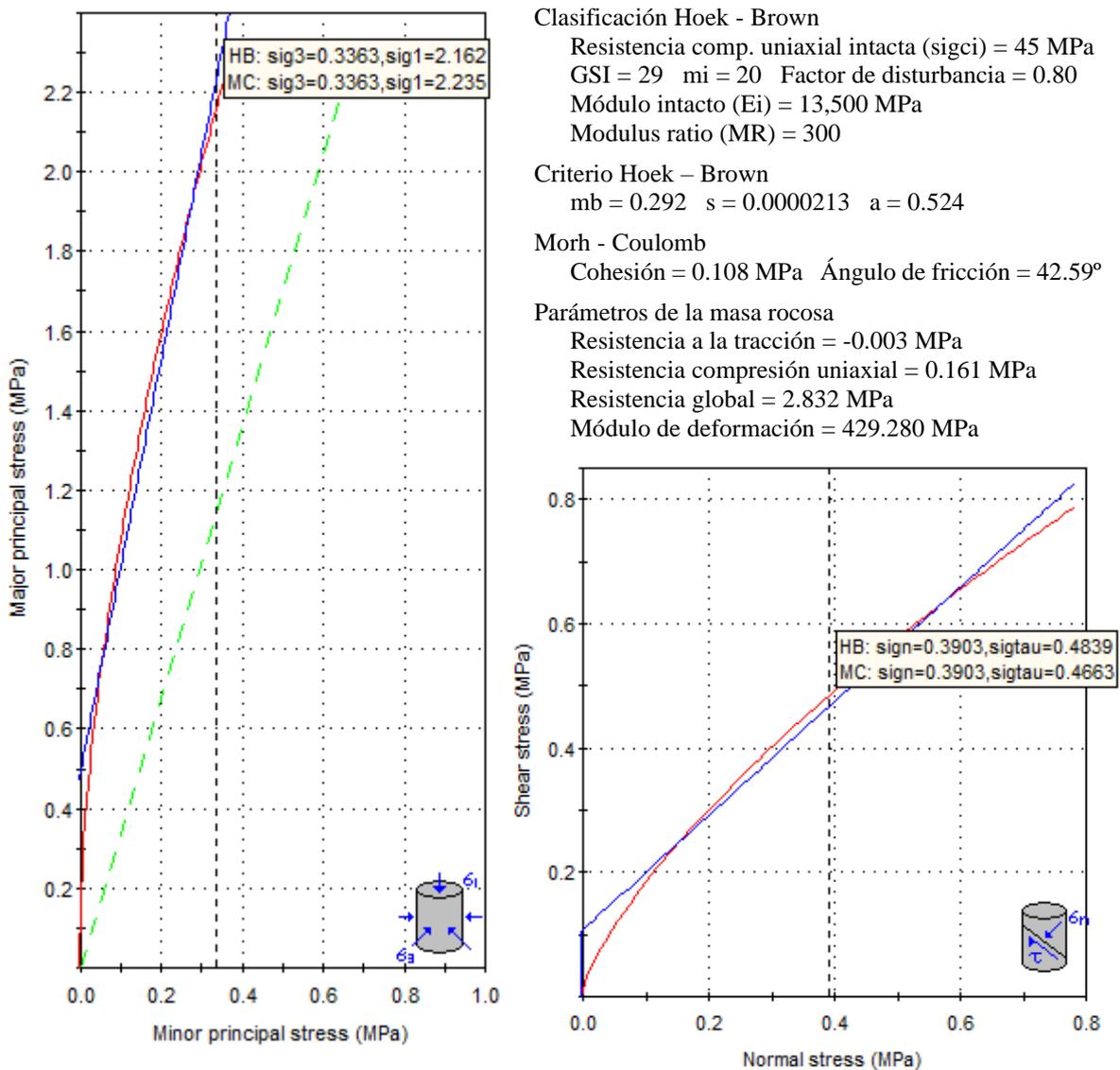
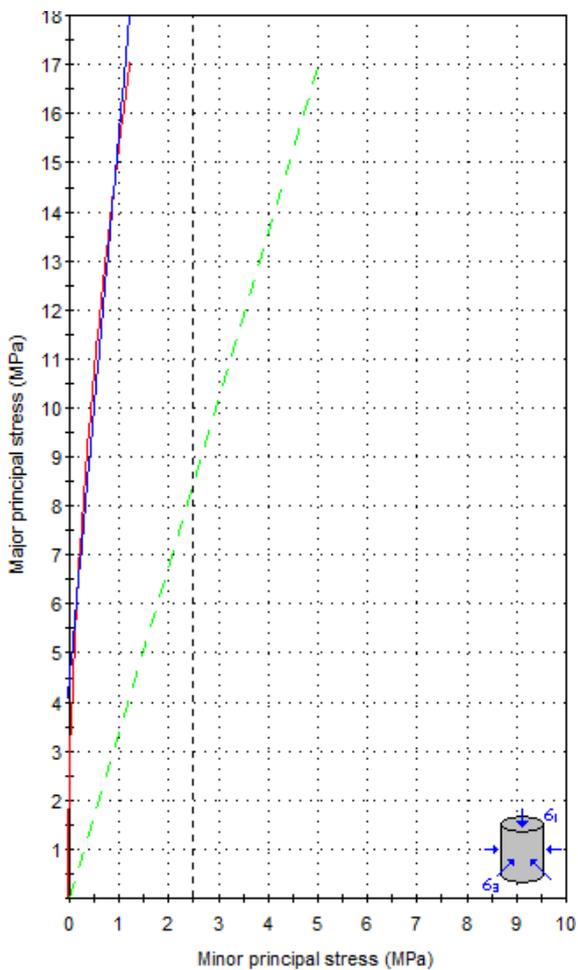


Figura 3.21. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 2.

❖ Estación 3

Está ubicada desde el PI. + 278.50 m. hasta PI. + 290.85 m., conformado por rocas andesitas, con sección en forma de baúl de dimensiones simétricas, compuesto por rocas andesitas levemente meteorizadas, con mediano grado de fracturamiento, con 3 familias de discontinuidades, con resistencia a la compresión uniaxial 62 MPa. Los bloques presentan espesores: 0.60 m. a 0.06 m., con superficies: Inalteradas a ligeramente alteradas, con contenidos de agua, ligera humedad y humedad en algunos casos.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 62 MPa  
 GSI = 43  $m_i = 26$  Factor de disturbancia = 0.00  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 25,420 MPa  
 Modulus ratio (MR) = 410

Criterio Hoek - Brown

$m_b = 3.395$   $s = 0.0018$   $a = 0.509$

Morh - Coulomb

Cohesión = 0.664 MPa Ángulo de fricción = 56.70°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.032 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 2.464 MPa  
 Resistencia global = 14.893 MPa  
 Módulo de deformación = 4,975.810 MPa

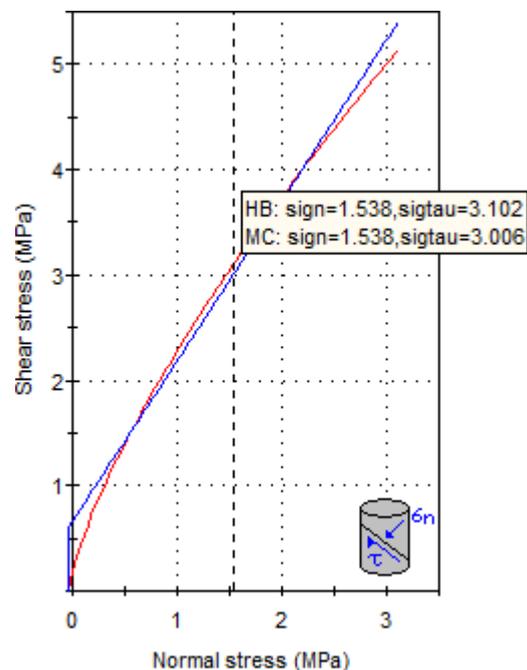
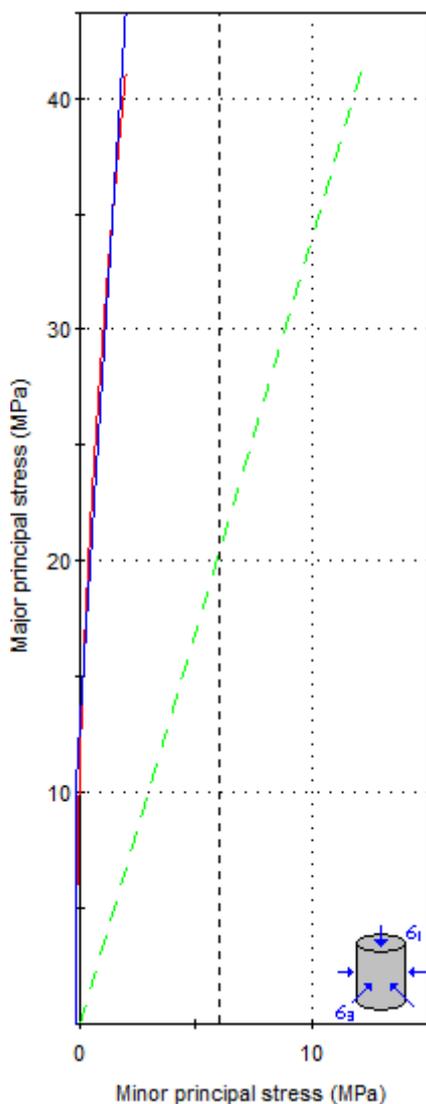


Figura 3.22. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh - Coulomb. Estación geomecánica 3.

❖ Estación 4

Está ubicada desde el PI. + 412 m. hasta PI. + 442 m., en zona con presencia de mineral de espesor: 2.00 m. a 2.10 m., formando secciones en forma de chimenea: sub-vertical a vertical, paralelo a la Veta Murciélagu delimitado por las cajas de roca andesita de resistencia 135 MPa. compuesto por tres discontinuidades más una aislada, con espesor: 2.00 m. a 0.20 m. con persistencia < 1.00 m. a 3.00 m., con apertura: cerrada a < 0.1 mm., con superficie: ondulada – lisa a suave, inalteradas a ligeramente alteradas y sección en condiciones secas.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 135 MPa

GSI = 53  $m_i$  = 29 Factor de disturbancia = 0.00

Módulo intacto ( $E_i$ ) = 66,150 MPa

Modulus ratio (MR) = 490

Criterio Hoek – Brown

$m_b$  = 5.413  $s$  = 0.0054  $a$  = 0.505

Morh - Coulomb

Cohesión = 1.547 MPa Ángulo de fricción = 61.66°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.135 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 9.678 MPa

Resistencia global = 41.926 MPa

Módulo de deformación = 24,215.460 MPa

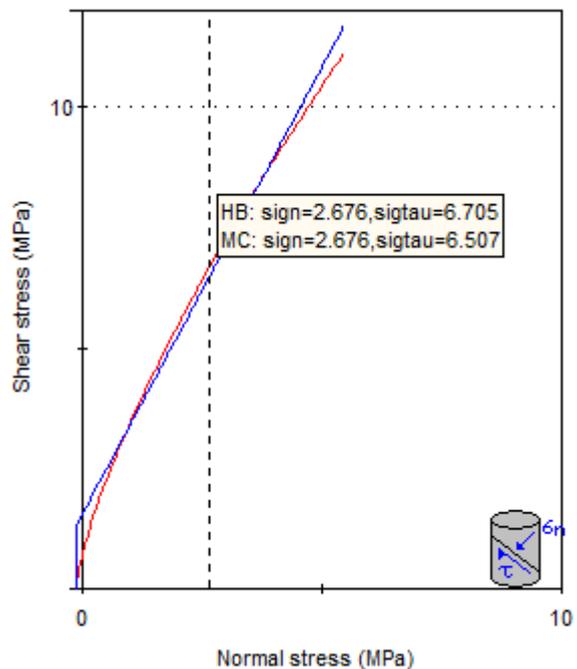
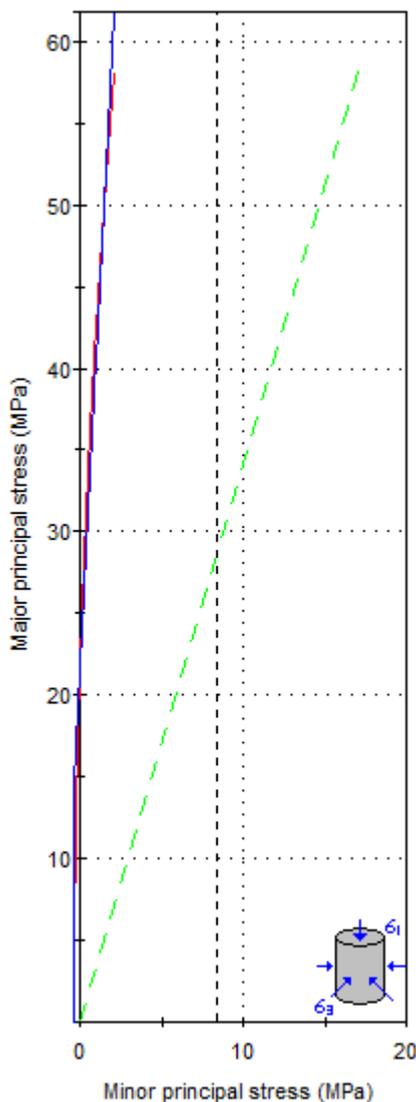


Figura 3.23. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 4.

❖ Estación 5

Está ubicada con referencia a la galería principal en el Pl. + 475.15 m. iniciado a partir de este tramo a la mano izquierda un by-pass, ubicándose una estación geomecánica desde el Plp. + 14.60 m. a Plp. + 24.60 m., con dimensiones de sección: 3.80 m. x 2.05 m., emplazado en rocas andesitas de buena calidad, con meteorización fresca, con bajo fracturamiento, con resistencia a la compresión uniaxial 192 MPa., compuesto por tres discontinuidades + una aislada, con espesores: 0.60 m. a 0.20 m., con persistencia: <1.00 m. a 10.00 m., con apertura: cerrada a < 0.1 mm., con superficies: onduladas-lisa a suave. No presentando agua.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 192 MPa

GSI = 61  $m_i$  = 27 Factor de disturbancia = 0.00

Módulo intacto ( $E_i$ ) = 80,640 MPa

Modulus ratio (MR) = 420

Criterio Hoek - Brown

$m_b$  = 6.706  $s$  = 0.0131  $a$  = 0.503

Morh - Coulomb

Cohesión = 2.470 MPa Ángulo de fricción = 64.29°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.376 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 21.745 MPa

Resistencia global = 67.662 MPa

Módulo de deformación = 43,764.270 MPa

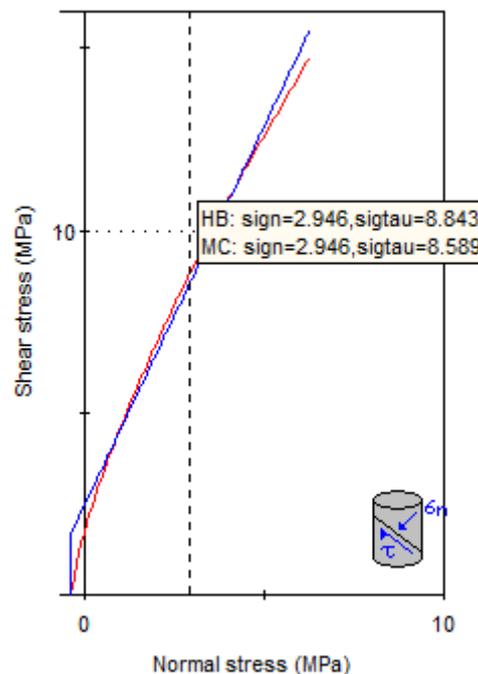
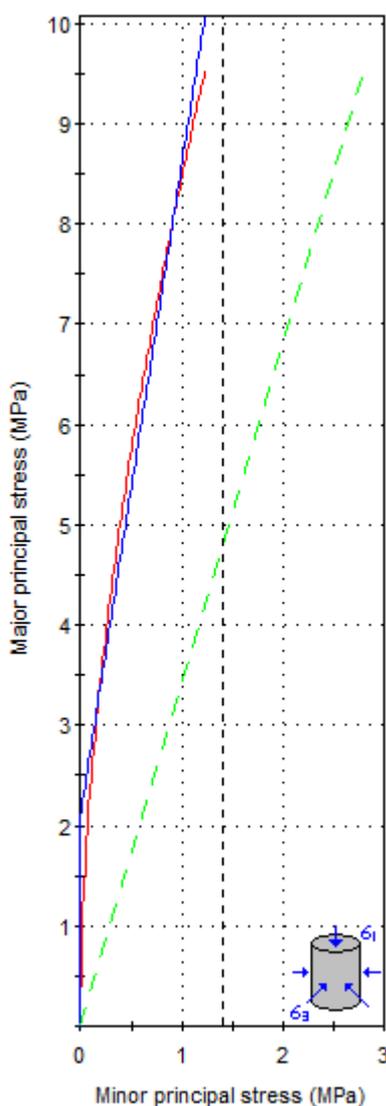


Figura 3.24. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh - Coulomb. Estación geomecánica 5.

❖ Estación 6

Está ubicada en el by-pass, desde el Plp. + 93 m. a Plp. + 154 m., conformado por roca silicificada (alteración hidrotermal), de coloraciones grises con quemaduras en su composición litológica por el reemplazamiento mineralizante, presentando alto grado de fracturamiento, con meteorización moderada, con resistencia a la compresión uniaxial 35 MPa. La Figura 3.25, muestra la convergencia de criterios, obteniendo valores cuantitativos de interpretación para el mejoramiento del diseño de la excavación.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 35 MPa

GSI = 31  $m_i$  = 21 Factor de disturbancia = 0.00

Módulo intacto ( $E_i$ ) = 10,850 MPa

Modulus ratio (MR) = 310

Criterio Hoek - Brown

$m_b$  = 1.786  $s$  = 0.0005  $a$  = 0.501

Morh - Coulomb

Cohesión = 0.418 MPa Ángulo de fricción = 47.07°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.009 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 0.645 MPa

Resistencia global = 5.771 MPa

Módulo de deformación = 942.150 MPa

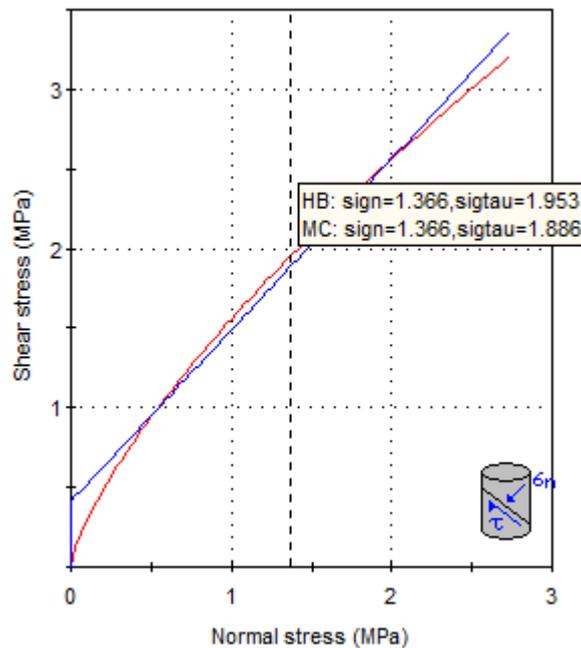


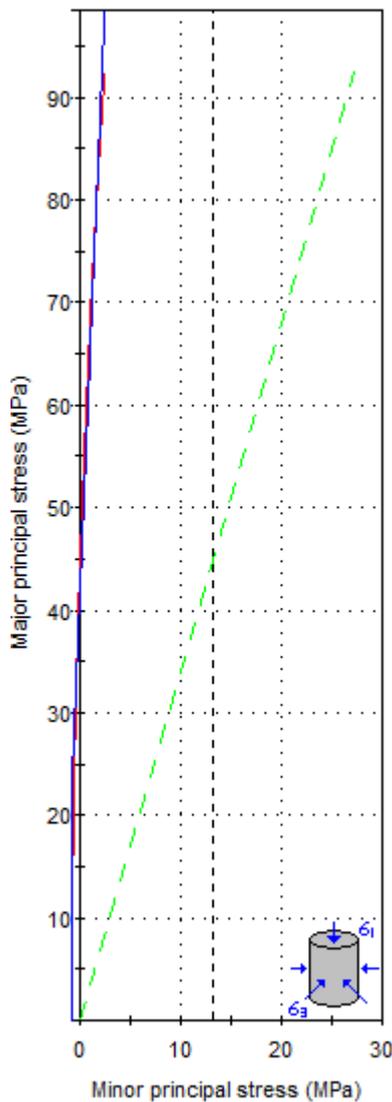
Figura 3.25. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh - Coulomb. Estación geomecánica 6.

Las geoestructuras están definidas por cuatro familias + una aislada, con espaciado: 0.2 m. a <0.06 m., con persistencia < 1.00 m. a 3 m., con abertura: 0.1 mm. a >5 mm., con superficies: ligeramente rugosas a ondulada-lisa, con meteorización: moderada a muy alterada. Presentado la sección: humedad a ligeramente húmedo la superficie, siendo aprovecha por: Epsomita e hidrocincita. La Figura 3.25 muestra los resultados del comportamiento de la caracterización de la masa rocosa mediante el método de equivalencia de áreas, obteniendo la tensión de confinamiento máximo 2.49 MPa.

#### ❖ *Estación 7*

Se realizó esta estación geomecánica, para determinar los parámetros geotécnicos de la Veta Murciélagu, relacionados con el comportamiento frente a acciones de esfuerzos tensionales en el entorno de la excavación subterránea. Se ubican en el hastial izquierdo de la galería principal en el Pl. + 475.15 m., desplazada por una sinistral, presentando espesores: 2.00 m. a 2.10 m., con resistencia a la compresión uniaxial 245 MPa. categorizándolo como roca muy resistente (R5), con persistencia 3.00 m. a 10.00 m., con abertura: nada a < 1 mm., con rugosidad: muy rugosa a rugosa, con dureza: > 5 mm., con grado de meteorización inalterada. Geoestructuralmente presenta dos familias de discontinuidades, formando desprendimientos en forma de bloques tabulares, paralelos a las cajas andesíticas de la Veta.

La Figura 3.26, muestra la utilización los criterios: Lineal y no lineal, por el método numérico (RocData), determinando los parámetros de la masa rocosa, plasmados por las constantes elásticas, mostrando valores importantes de la calidad de roca para el modelo numérico (Phase2). Por consiguiente, el valor  $D = 0$ , muestra que la sección de minado presenta el Factor de Perturbación circundante mínima, obteniendo valores de  $s = 0,0357$  superiores a las otras estaciones geomecánicas y con altos valores en la  $c$  y  $\varphi^0$ ; con moderado valor del  $Em$ . Para obtener los valores se utilizó el método de equivalencia de áreas, mostrando un confinamiento máximo  $\sigma_{3m\acute{a}x} = 2.39$  y resistencia a la tracción  $\sigma'_t = -0.851$  MPa, la masa rocosa.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 245 MPa  
 GSI = 70  $m_i$  = 30 Factor de disturbancia = 0.00  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 128,625 MPa  
 Modulus ratio (MR) = 525

Criterio Hoek – Brown

$m_b$  = 10.276  $s$  = 0.0357  $a$  = 0.501

Morh - Coulomb

Cohesión = 4.444 MPa Ángulo de fricción = 66.57°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.851 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 46.066 MPa  
 Resistencia global = 109.482 MPa  
 Módulo de deformación = 94,258.210 MPa

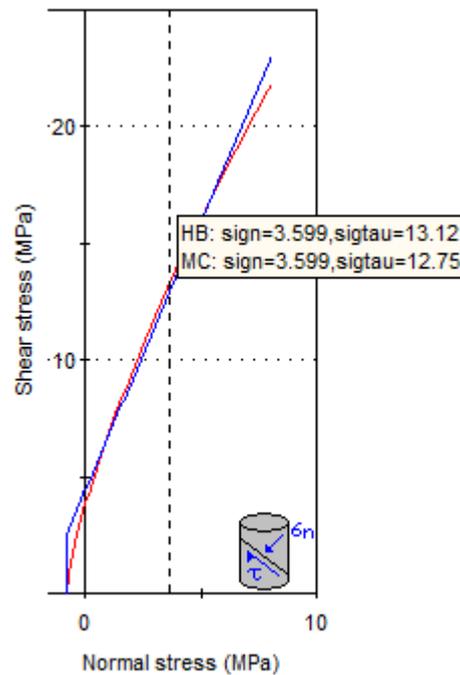


Figura 3.26. Envolvente de Hoek y Brown, y linealización de Morh – Coulomb. Estación geomecánica 7.

### 3.10.2 Modelo Matemático

Para visualizar el comportamiento de la excavación del Nivel 4, se utilizará este modelo numérico, basado en la integración del modelo: Geológico y geomecánico, desarrollados anteriormente para simular el comportamiento mecánico en el entorno de la excavación. Primeramente, consistiendo en asegurar el nivel tensional en la periferia de la excavación en relación a la resistencia del macizo rocoso; y la segunda definir el diseño de la sección asegurando la estabilidad para el tipo de vida útil de la excavación subterránea, aplicando:

Phase2 v8 y Rocsupport v3; basándose en las relaciones tenso-deformacionales, con la utilización de medios: Continuos y discontinuos, aplicando los modelos híbridos (MEF, MEC Y MED), para una mejor interacción abertura y roca.

❖ Estación 1

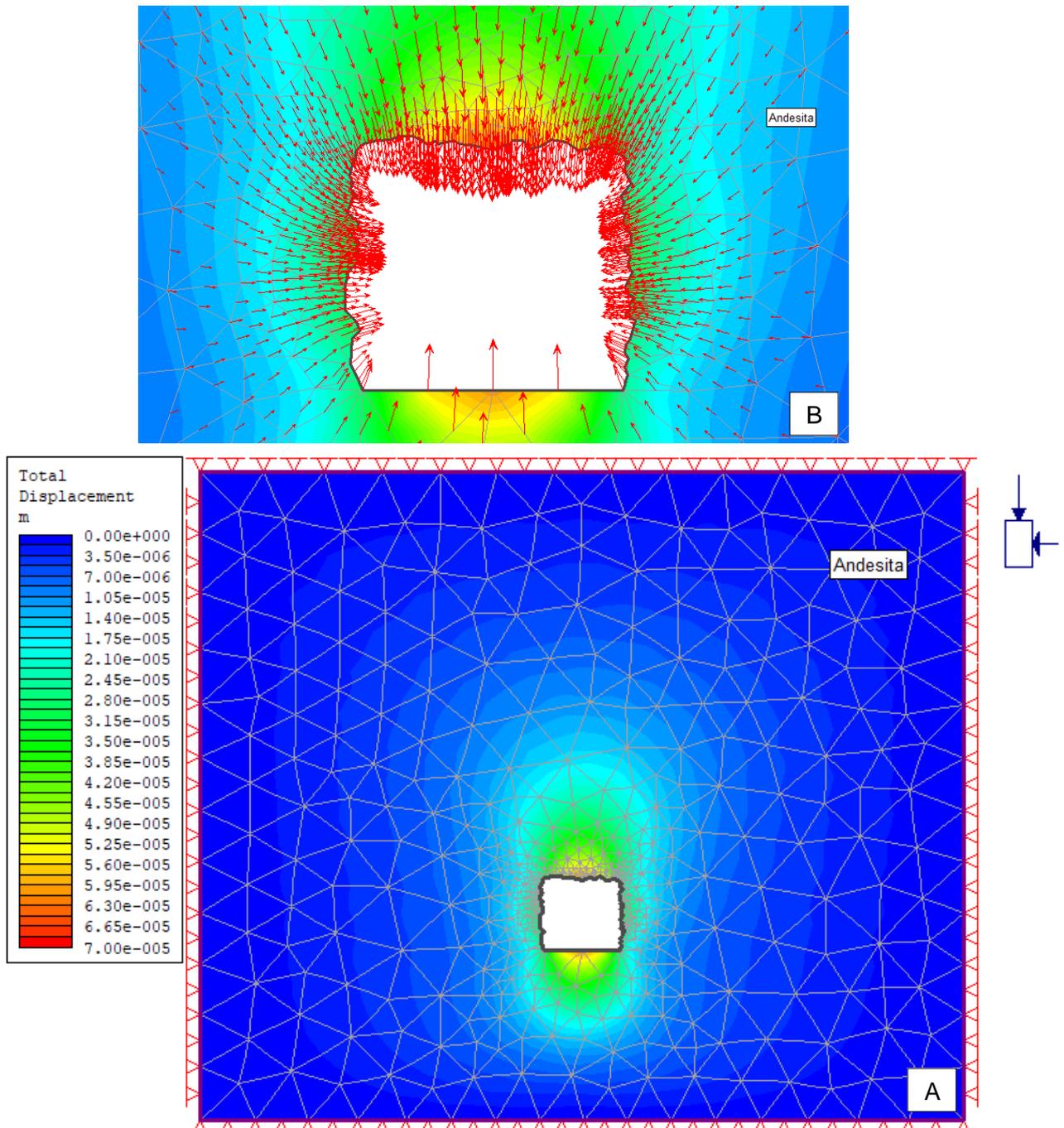


Figura 3.27. A. Aplicación del método numérico Phase2 a la sección: 2.00 m. x 2.20 m., mediante la discretización del macizo rocoso, mostrando desplazamientos 1.85 mm. alrededor del túnel de forma concéntrica, desarrollándose más incidencia en la clave la deformación. B. Vectores de desplazamiento tenso-deformacionales, manifestándose en la clave y hastiales, por: presión gravitatoria y litología, estación geomecánica 1.

❖ Estación 2

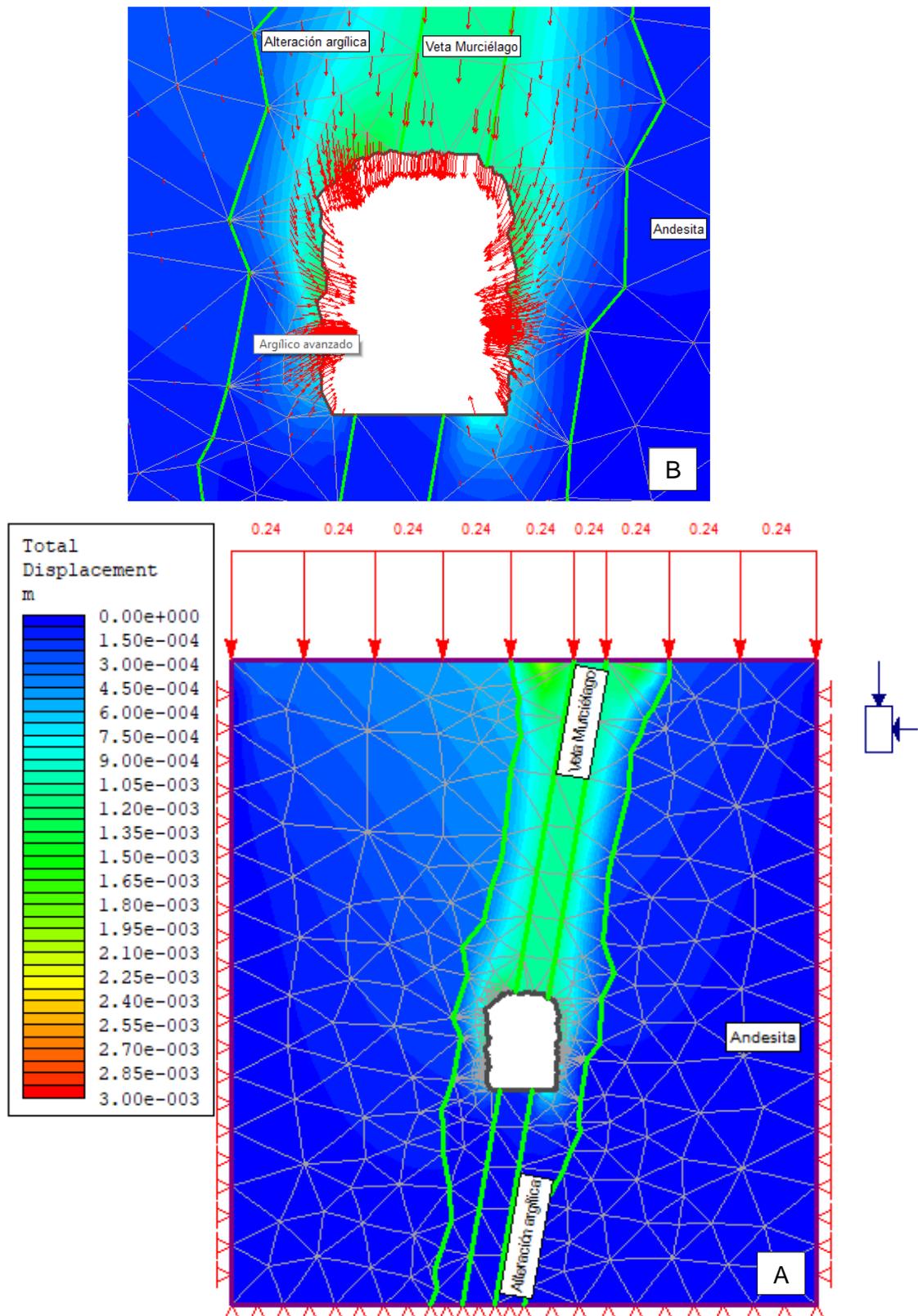


Figura 3.28. A. La sección: 4.00 m. x 3.00 m., de la estación geomecánica 2, utilizando la discretización del macizo rocoso mediante el software Phase2, muestra desplazamientos verticales de 3.80 mm. relacionados con la alteración argílica avanzada por baja  $\sigma_{ci}$ . B. Los vectores tienen mayor incidencia en la clave y hastiales, manifestándose solo en la alteración argílica avanzada por las envolventes de contorno.

❖ Estación 3

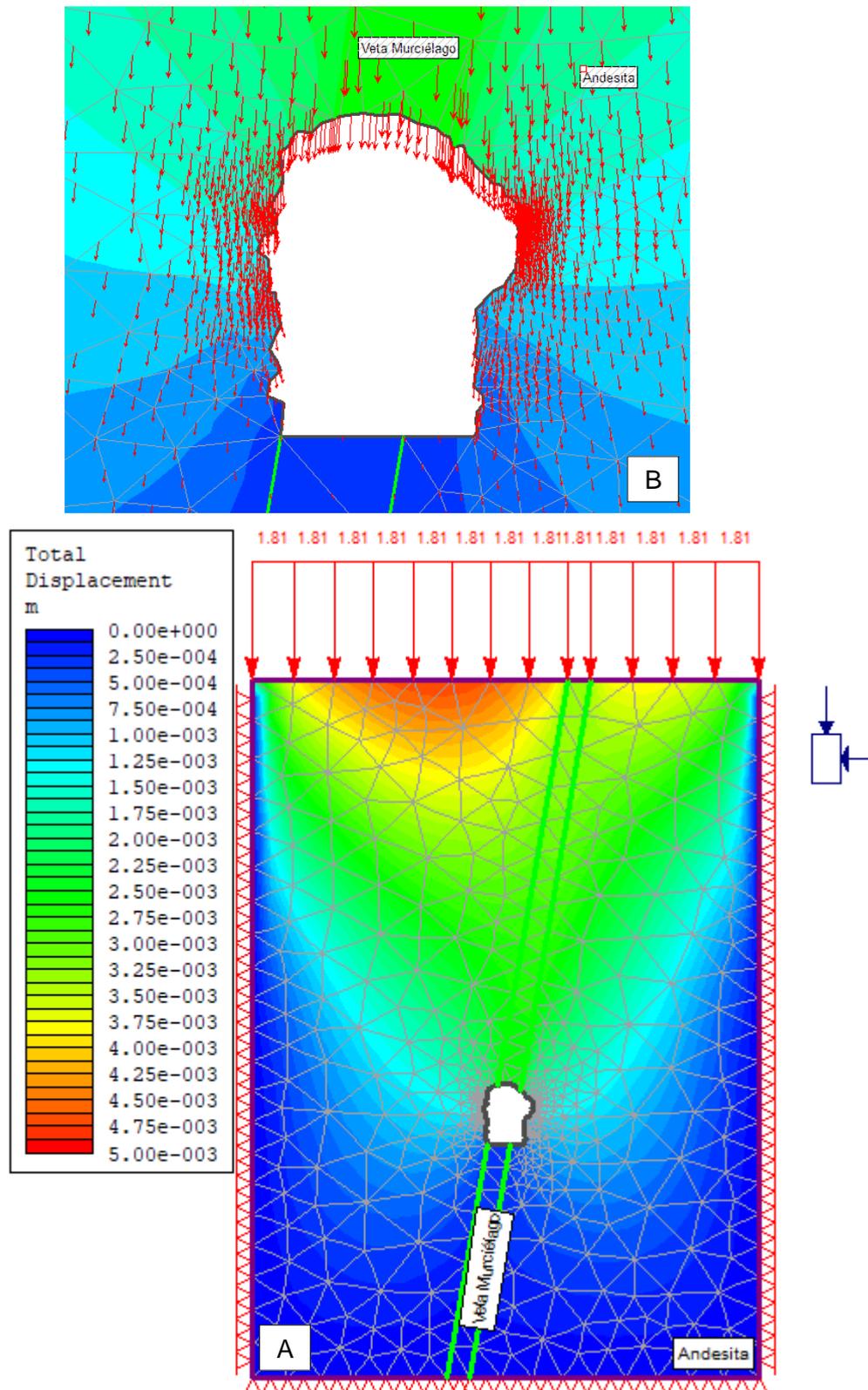


Figura 3.29. A. El desplazamiento tenso-deformacional por la discretización es de 7.46 mm. en la estación geomecánica 3, manifestándose en hastiales del túnel excavado. B. Los vectores de desplazamiento muestran recorridos gravitacionales verticales, siguiendo un mismo patrón de orientación vertical o gravitacional, afectando solo la clave y zonas de geometría irregular en la sección de análisis geomecánico.

❖ Estación 4

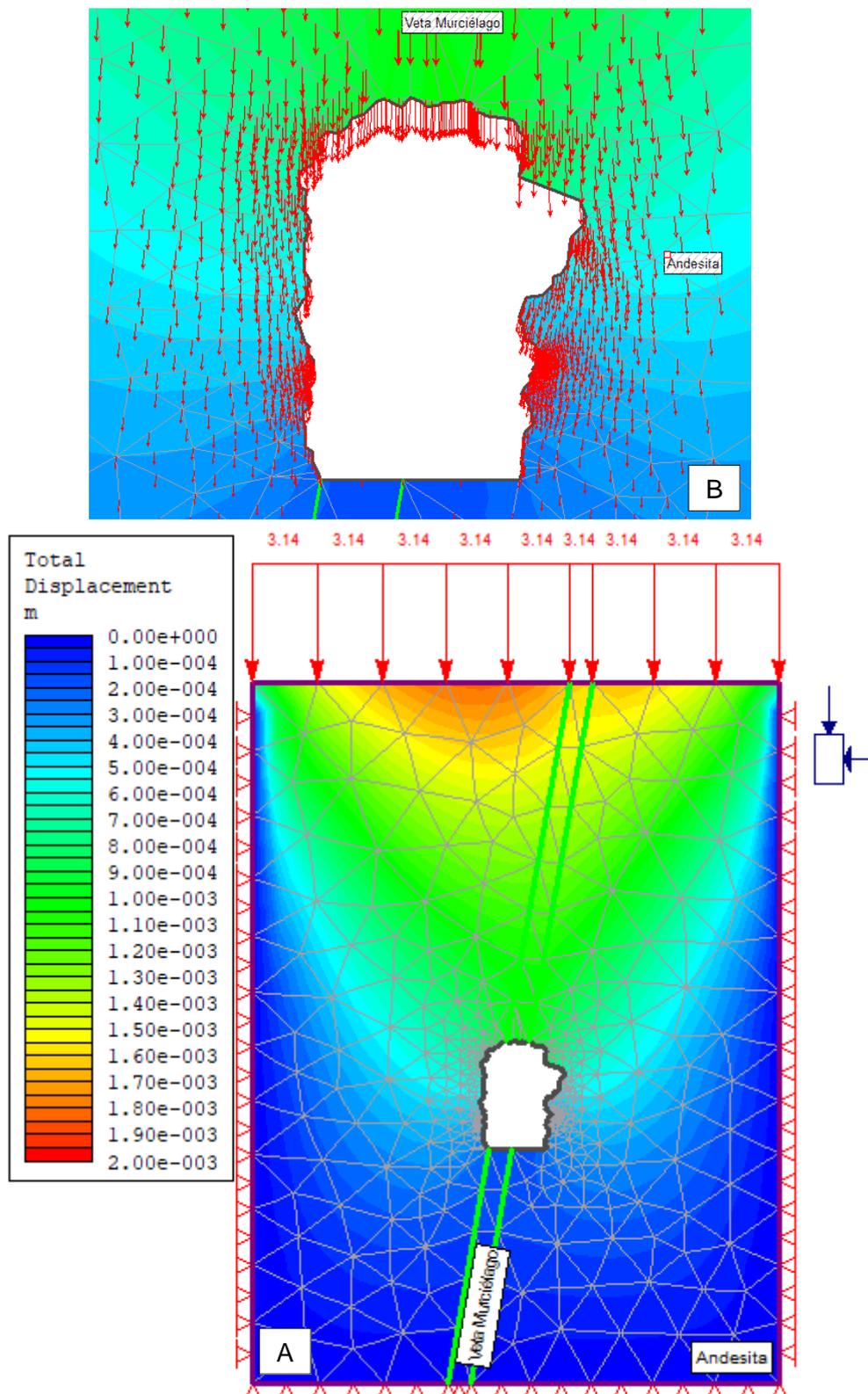


Figura 3.30. A. Las aureolas de desplazamiento tenso-deformacional por la discretización del macizo rocoso muestran incidencias netamente en hastiales, con desplazamientos de 26.19 mm., distribuyéndose en las partes laterales de túnel. B. Los vectores de desplazamiento tienen recorridos verticales por la buena calidad de roca distribuyéndose en un solo sentido de desplazamiento, solo afectando la clave, estación geomecánica 4.

❖ Estación 5

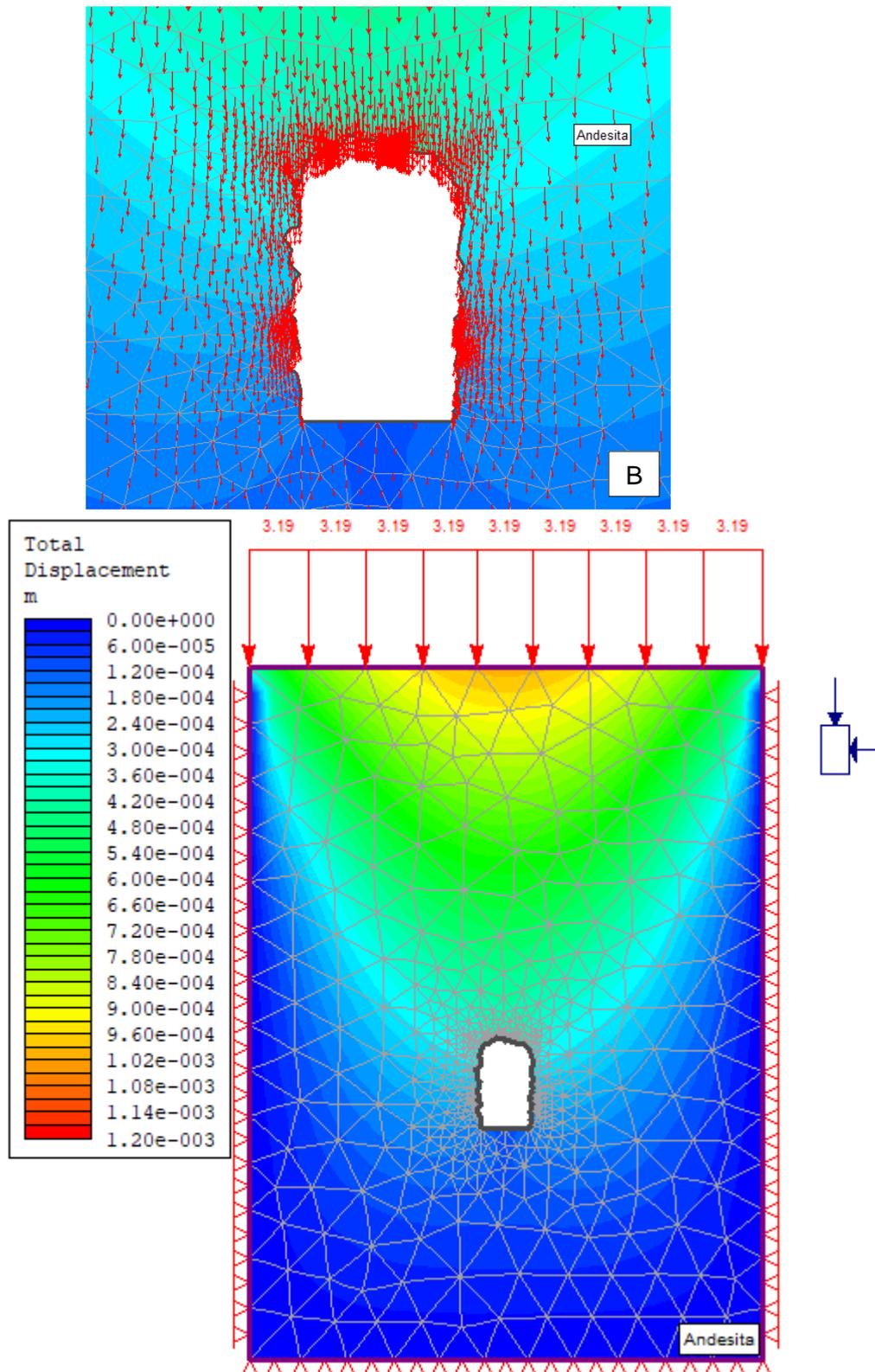


Figura 3.31. A. La sobrecarga en la parte superior de la excavación, está formando aureolas de desplazamiento vertical de 7.23 mm., proyectándose por debajo de túnel y la discretización está alrededor del túnel. B. Los vectores de desplazamiento están ubicados verticalmente solo afectado la clave de la excavación subterránea, ocasionando movimientos lentos en la clave y hastiales de la parte superior.

❖ Estación 6

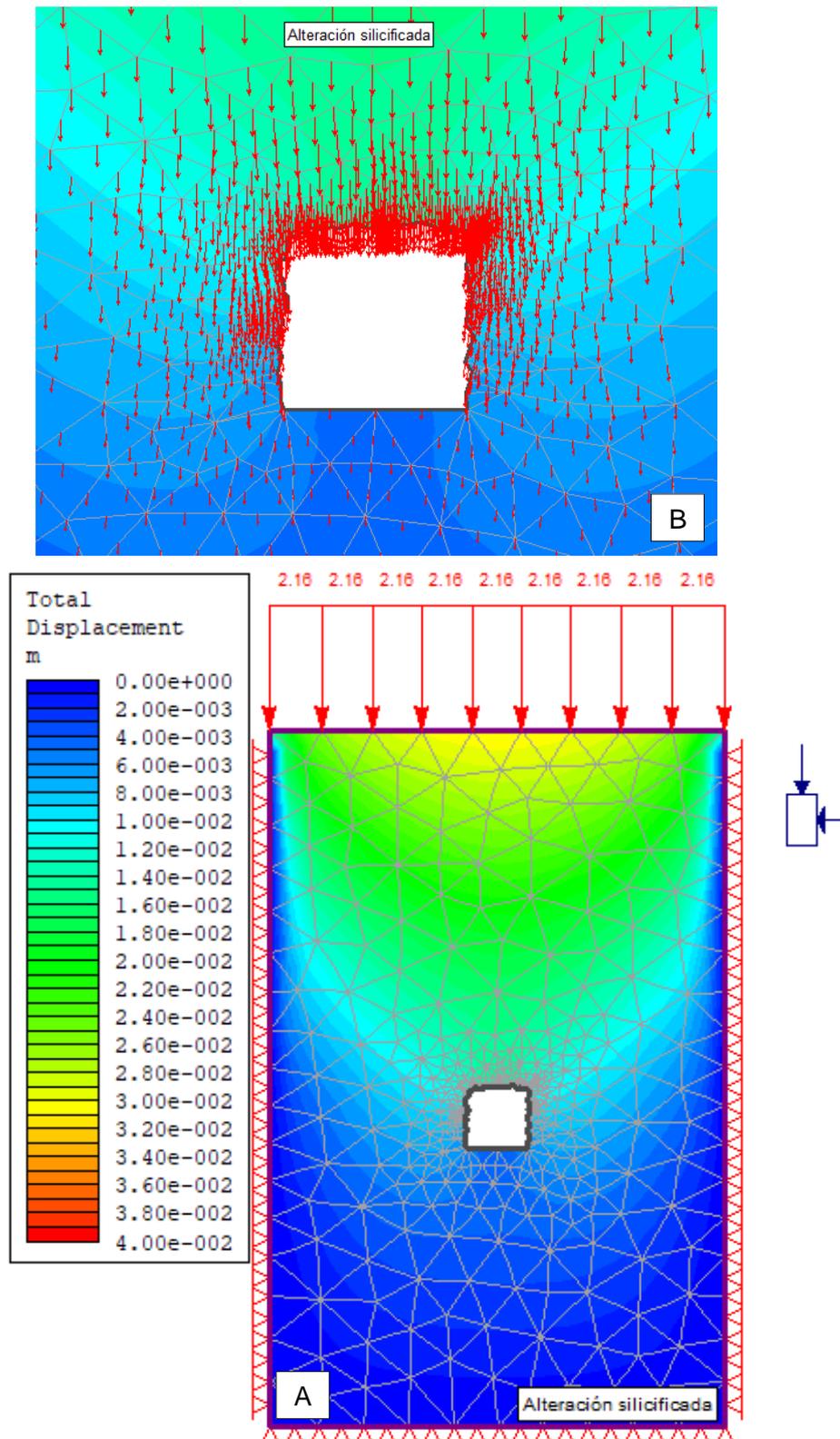


Figura 3.32. A. La discretización del macizo rocoso se ubica: clave y hastiales, formando areolas distorsionadas a ambos lados del túnel afectando la estabilidad, con desplazamiento de 2.85 mm. B. Los vectores tienen mayor incidencia en la clave por visualizarse vectores de orientación gravitacional, afectando la estabilidad de la labor subterránea.

### 3.11 Sostenimiento

Para proponer el sostenimiento del Nivel 4, primero se evaluó los estados tensionales alrededor de la excavación en función de tres criterios empíricos: RMR, Q y RMi; sin embargo, utilizando los ábacos: RMR ( $\sigma_1/\sigma_{ci}$ ) y Q ( $\sigma_{ci}/\sigma_1$ ), muestran interacciones similares en la periferia de la excavación, en consecuencia el RMi muestra resultados más detallados de ocurrencia del comportamiento de la masa rocosa frente a estados de debilidad de la periferia rocosa, obtenidos con el factor de continuidad (CF), como se muestra en el cuadro 3.10.

Cuadro 3.10. Inestabilidad y comportamiento del macizo rocoso en relación: Campo tensional y continuidad del terreno.

Estación	Clasificación geomecánica						
		RMR		Q			
E-1	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.003	Tensiones bajas	320.51	3.14	Deformación plástica
E-2	Altamente fracturada	Bajos esfuerzos	0.015	Tensiones bajas	67.16	30.00	Desprendimiento de rocas - hinchamiento
E-3	Altamente fracturada	Bajos esfuerzos	0.038	Tensiones medias	26.61	1.95	Deformación plástica
E-4	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.027	Tensiones medias	36.64	2.76	Deformación plástica
E-5	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.019	Tensiones medias	51.34	2.77	Deformación plástica
E-6	Altamente fracturada	Bajos esfuerzos	0.071	Tensiones medias	14.08	9.77	Desprendimiento de bloques, ruptura gradual e hinchamiento

El Cuadro 3.10, definió la interacción tenso-deformacional abertura y roca, mostrando el comportamiento que se está originando actualmente en el Nivel 4 de las labores subterráneas. Por consiguiente, se muestra el Cuadro 3.11, visualizando el tipo de sostenimiento a emplear en cada sección subterráneas basándose en la utilización de ábacos por la interpolación en ambos casos del criterio empírico: Q y RMi. Para el Q Barton se tuvo consideraciones en la altura de la excavación, por ser la zona para mejorar, para mejores metrados de estabilización en su periferia, en cambio para RMi se consideró como entorno discontinuo (Terreno diaclasado), utilizando el factor: Calidad (Gc) y Escala (Sr).

Cuadro 3.11. Sostenimiento aplicado mediante los criterios: Q-Barton y RMI-Palmström.

Estación	Q			RMI		
	De	Q	Sostenimiento	Gc	Sr	Sostenimiento
E-1	1.28	6.54	Sin soporte	12.61	2.57	Bulones puntuales
E-2	2.54	0.77	Empernado sistemático, mas shotcrete con espesor 6 - 9 cm. con fibras, B + Sfr	0.79	46.15	Bulones sistemáticos con espaciado 1.00 a 1.25 m., con espesor 70 mm. de shotcrete, con reforzamiento de fibras
E-3	1.63	5.40	Empernado puntual	19.83	1.56	Bulones puntuales
E-4	2.81	9.85	Empernado puntual	28.55	1.08	Bulones puntuales
E-5	2.38	14.88	Empernado puntual	59.40	1.03	Bulones puntuales
E-6	1.34	1.19	Empernado puntual	1.50	4.55	Bulones puntuales con espaciado 1.50 a 2.00 m.

El Cuadro 3.12, muestra la longitud de bulón a utilizar para el sostenimiento de cada estación geomecánica, teniendo coherencias con el Cuadro 3.10, para su estabilización, recomendando utilizar barras helicoidales corrugadas de 3/4" con lechadas de concreto en el interior del bulón. Recomendando utilizar el Método Austriaco por su mejor eficiencia en zonas rocosas de mala a muy mala calidad.

Cuadro 3.12. Longitud de bulones para sostenimiento mediante RMI, excavación subterránea – Nivel 4.

Estación	Dimensionamiento de la excavación			Longitud de bulón			
	Dt (m.)	Wt (m.)	Db (m.)	Lb <sub>techo</sub> (m.)	Lb <sub>hastial</sub> (m.)	Lbpc (m.)	Lbpc (pies)
E-1	2.20	2.05	0.70	1.80	1.69	1.80	6.00
E-2	3.00	4.05	0.10	2.36	2.20	2.40	8.00
E-3	1.50	2.60	0.77	1.67	1.65	1.80	6.00
E-4	2.40	4.50	0.87	1.83	1.81	2.10	7.00
E-5	2.05	3.80	0.74	1.77	1.76	1.80	6.00
E-6	2.15	2.15	0.22	1.90	1.78	2.10	7.00

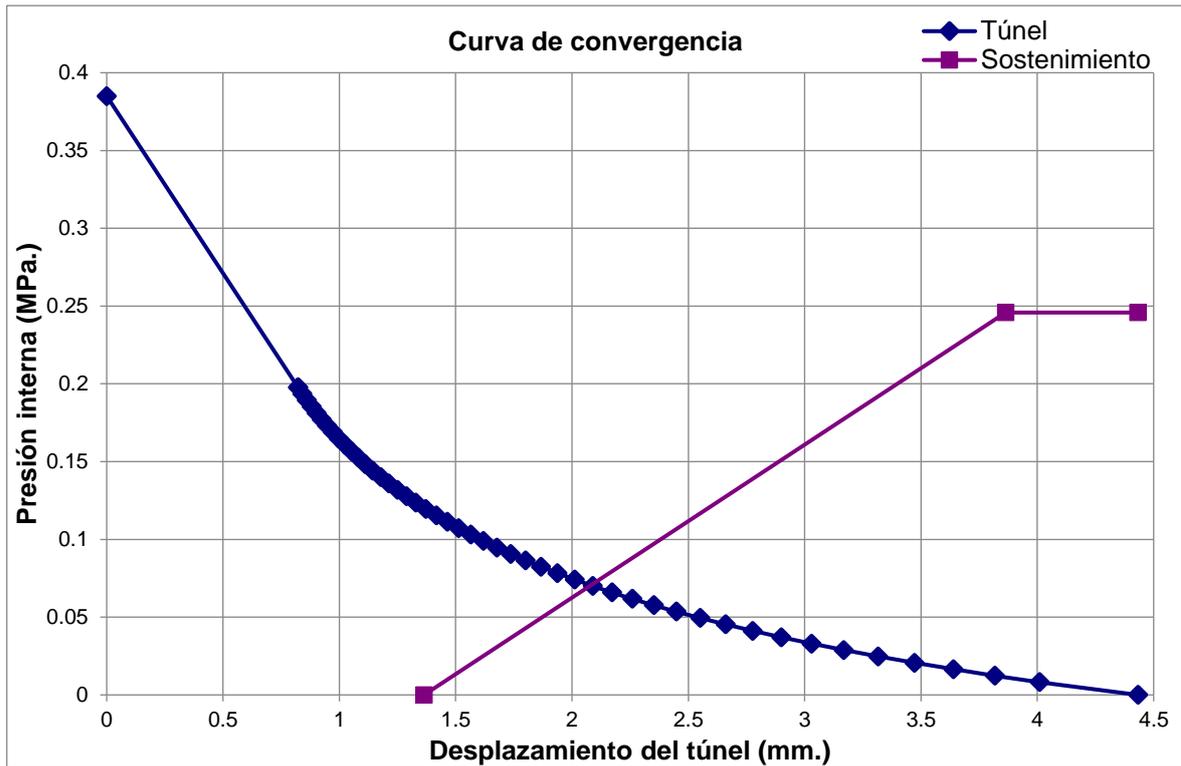


Figura 3.33. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 2.08$  mm.;  $P_{spe} = 0.07$  MPa.) y  $U_{io} = 1.36$  mm.; estación geomecánica 1 - RocSupport.

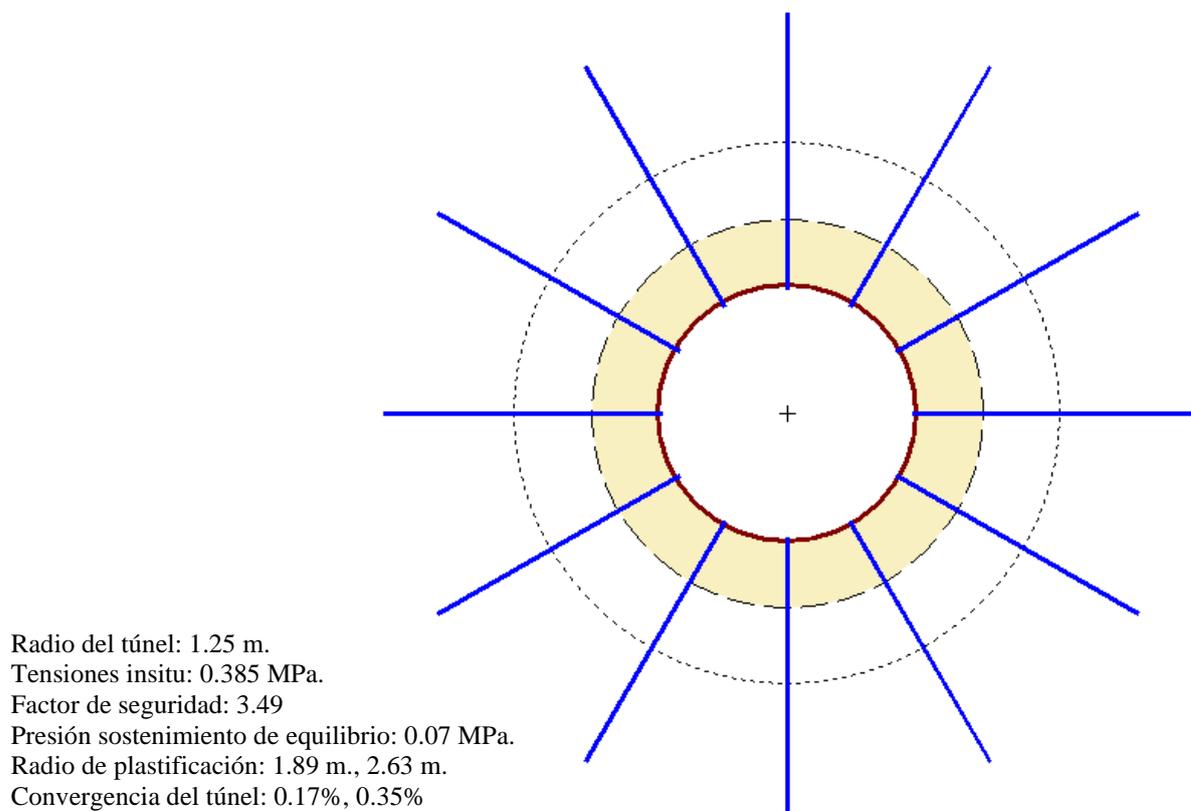


Figura 3.34. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 1, RocSupport.

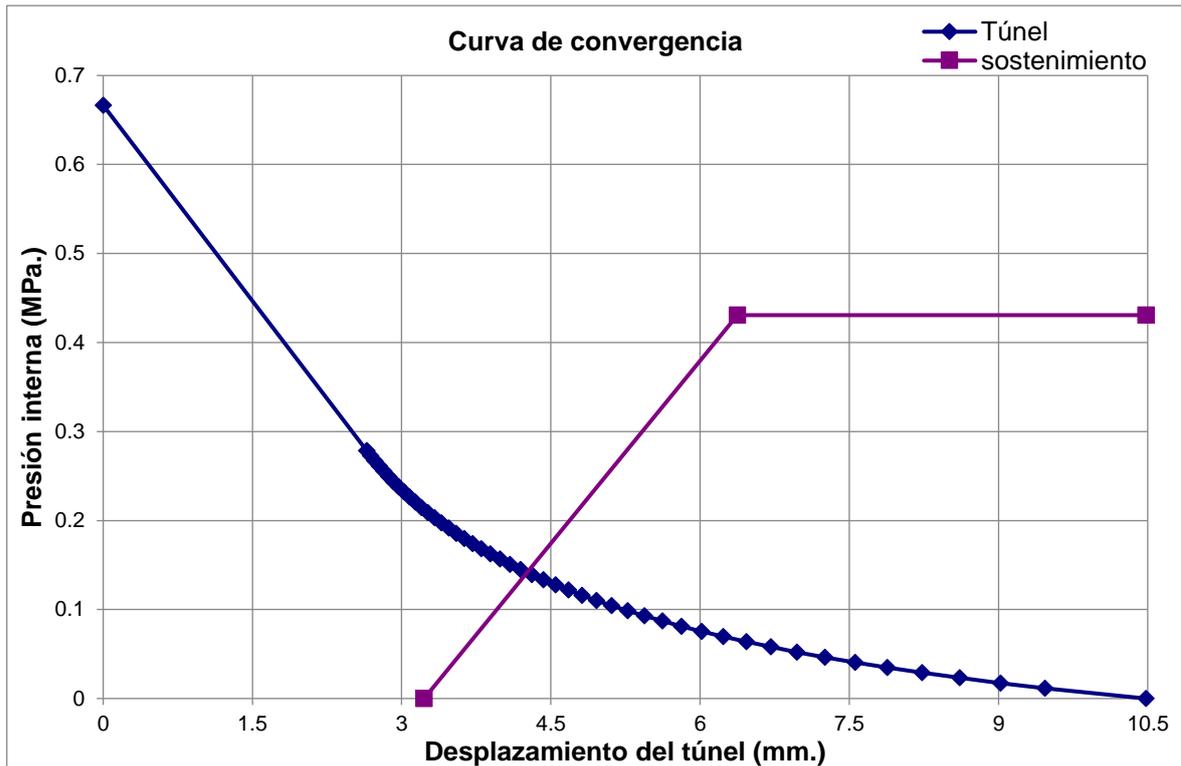


Figura 3.35. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 4.26$  mm.;  $P_{spe} = 0.14$  MPa.) y  $U_{io} = 3.23$  mm.; estación geomecánica 2 - RocSupport.

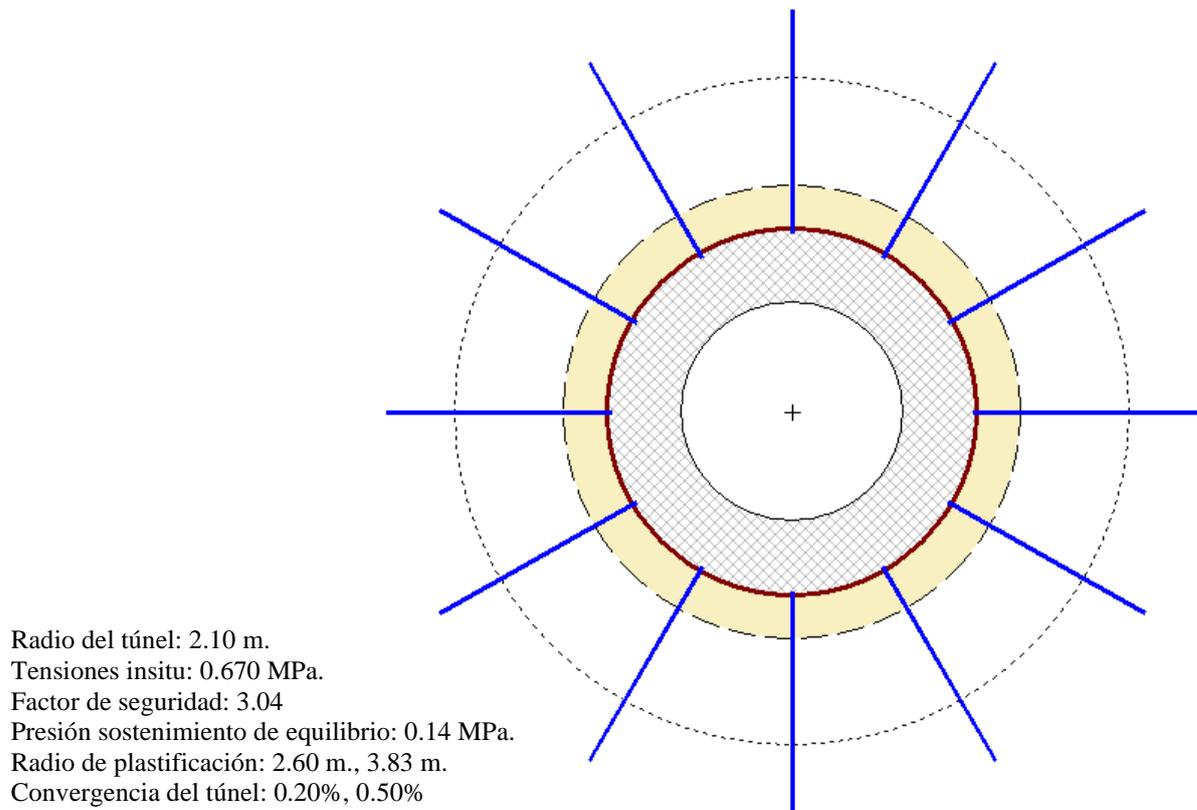


Figura 3.36. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 2, RocSupport.

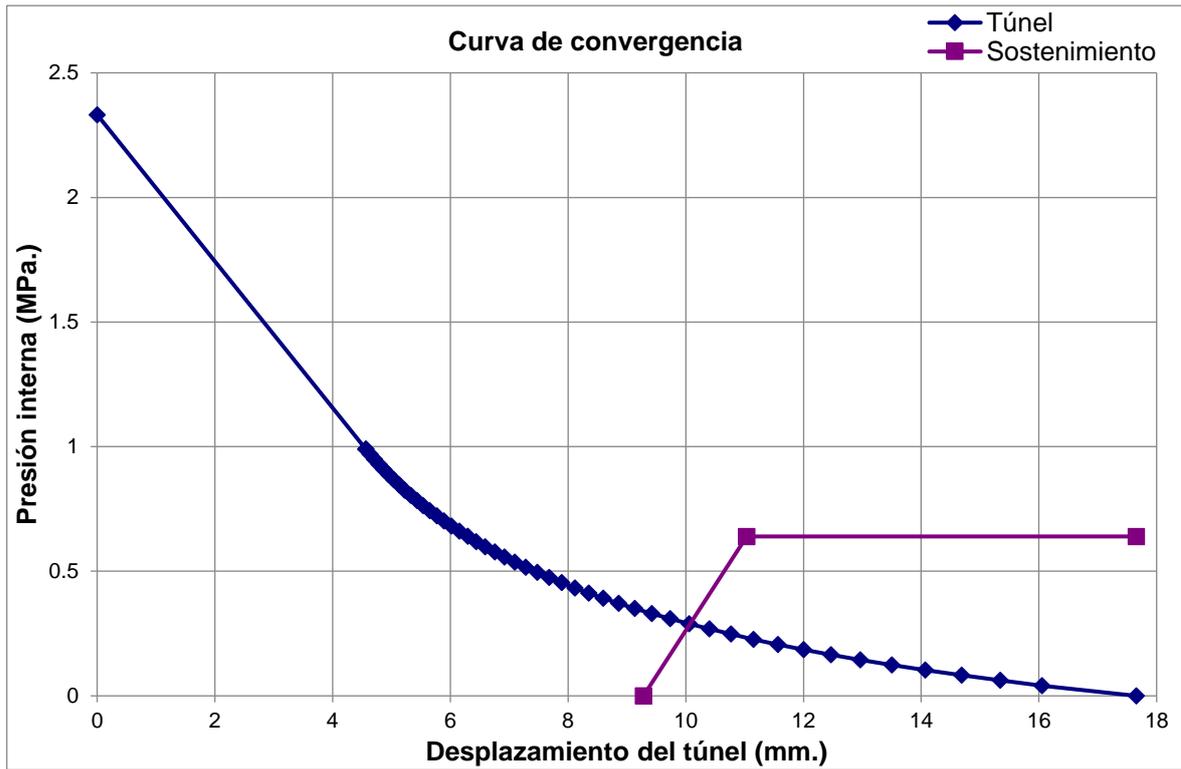
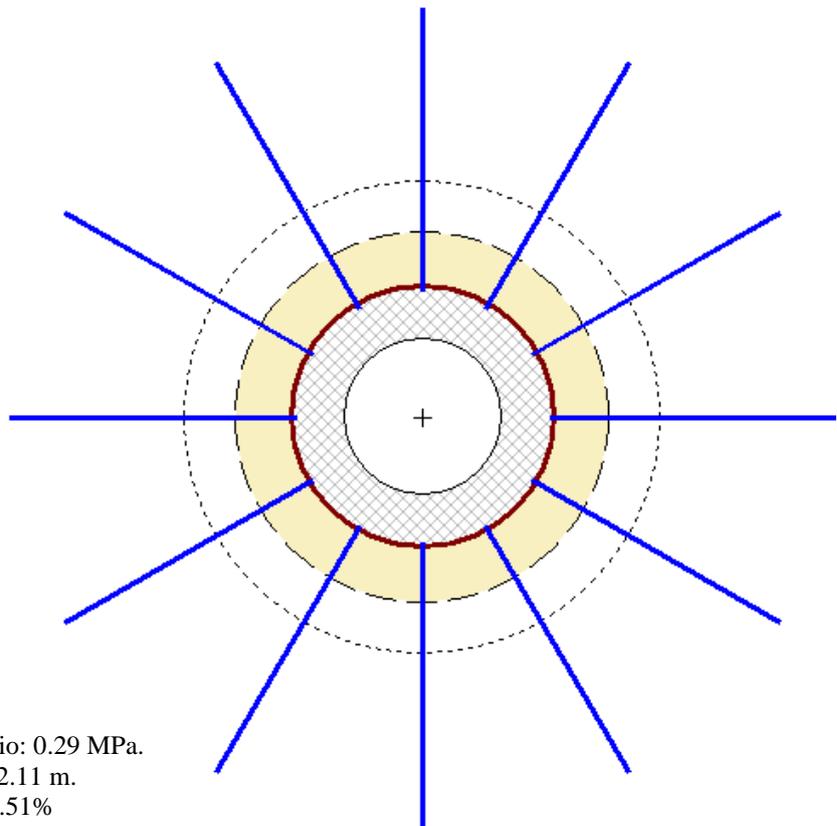


Figura 3.37. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 10.07$  mm.;  $P_{spe} = 0.29$  MPa.) y  $U_{io} = 9.28$  mm.; estación geomecánica 3 - RocSupport.



Radio del túnel: 1.17 m.  
 Tensiones insitu: 2.33 MPa.  
 Factor de seguridad: 2.22  
 Presión sostenimiento de equilibrio: 0.29 MPa.  
 Radio de plastificación: 1.66 m., 2.11 m.  
 Convergencia del túnel: 0.86%, 1.51%

Figura 3.38. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 3, RocSupport.

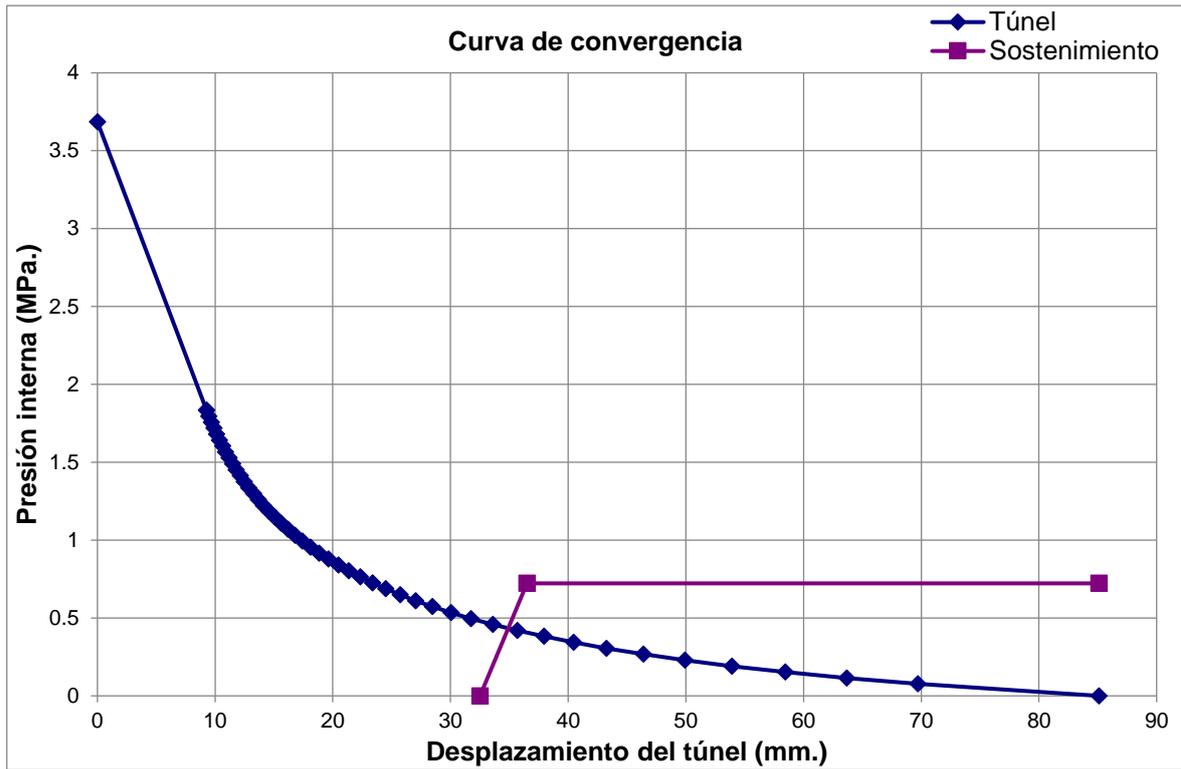


Figura 3.39. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 34.91$  mm.;  $P_{spe} = 0.43$  MPa.) y  $U_{io} = 32.51$  mm.; estación geomecánica 4 - RocSupport.

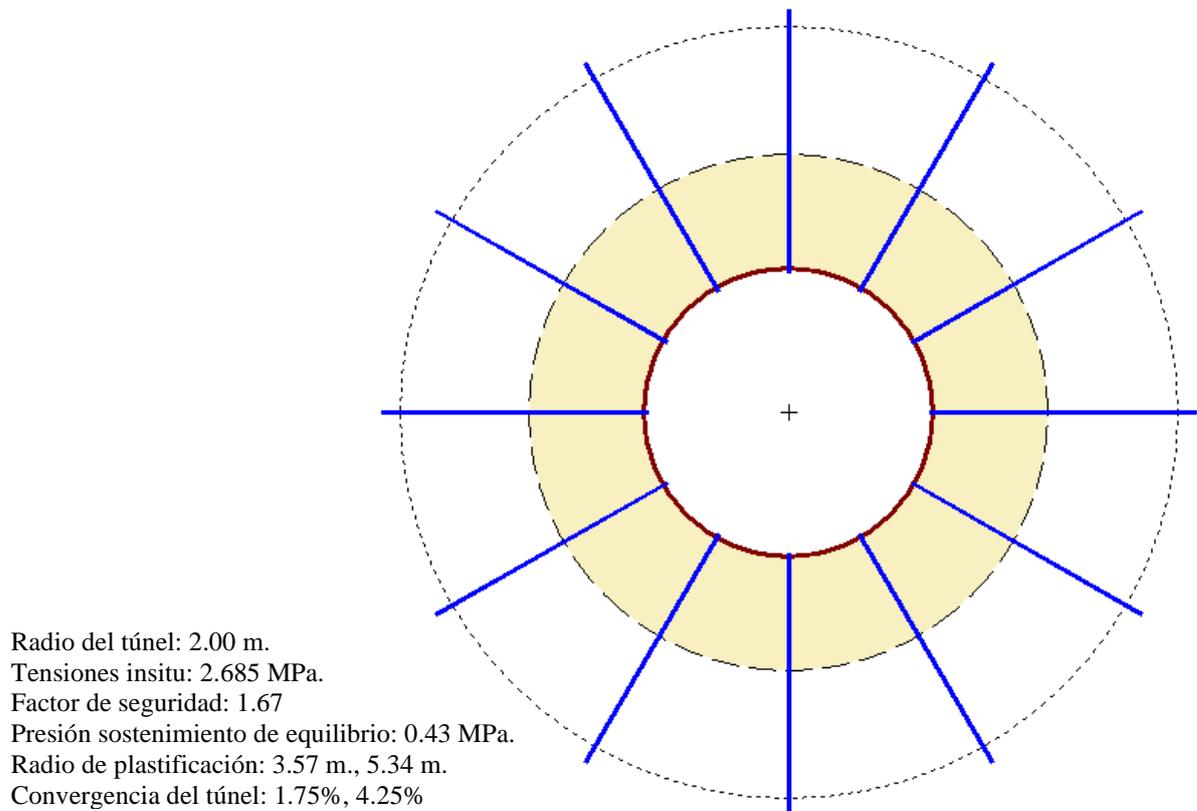


Figura 3.40. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 4, RocSupport.

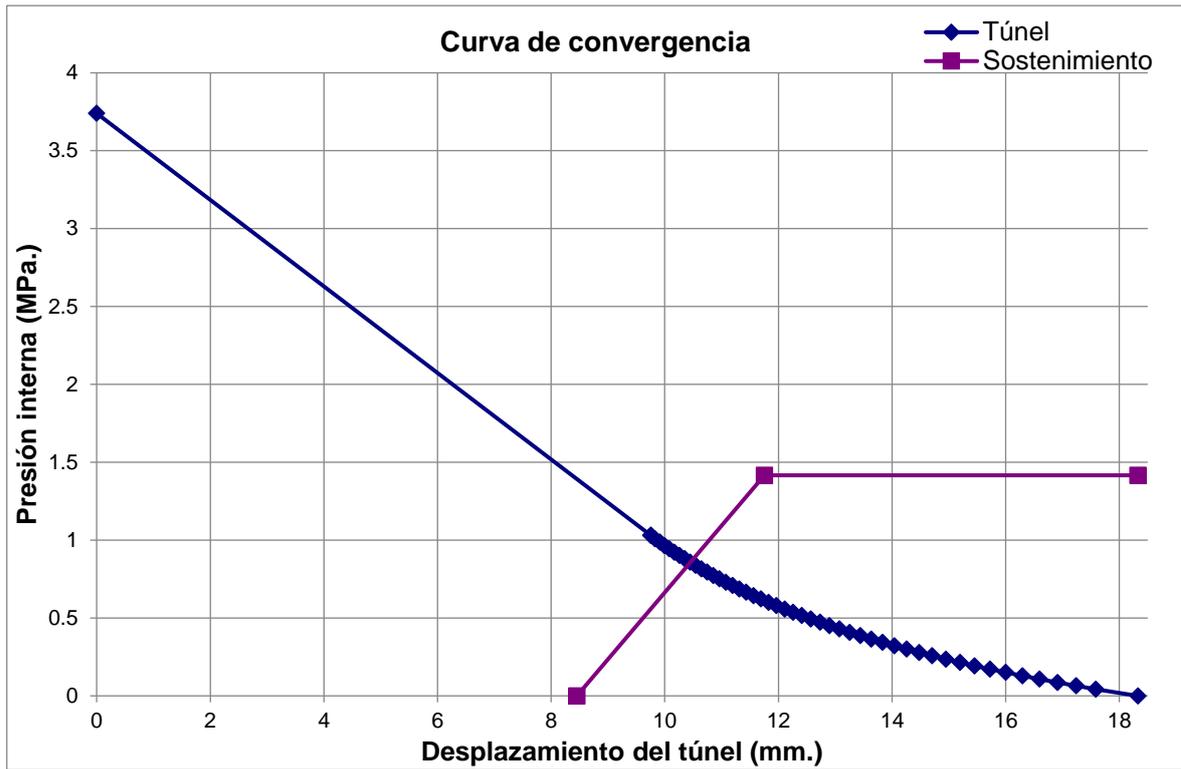


Figura 3.41. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 10.45$  mm.;  $P_{spe} = 0.86$  MPa.) y  $U_{io} = 8.45$  mm.; estación geomecánica 5 - RocSupport.

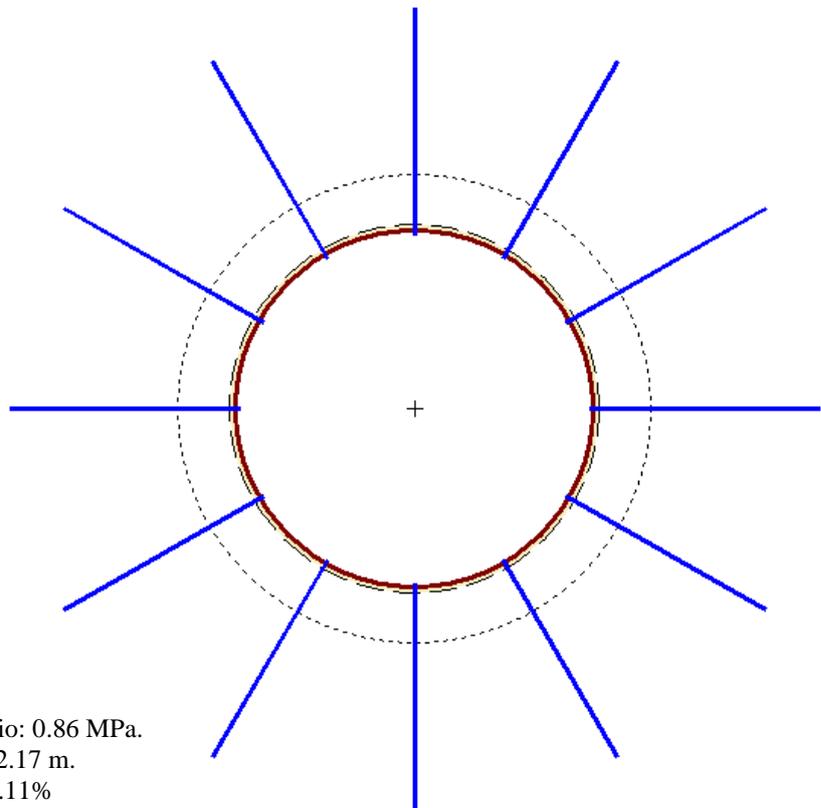


Figura 3.42. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 5, RocSupport.

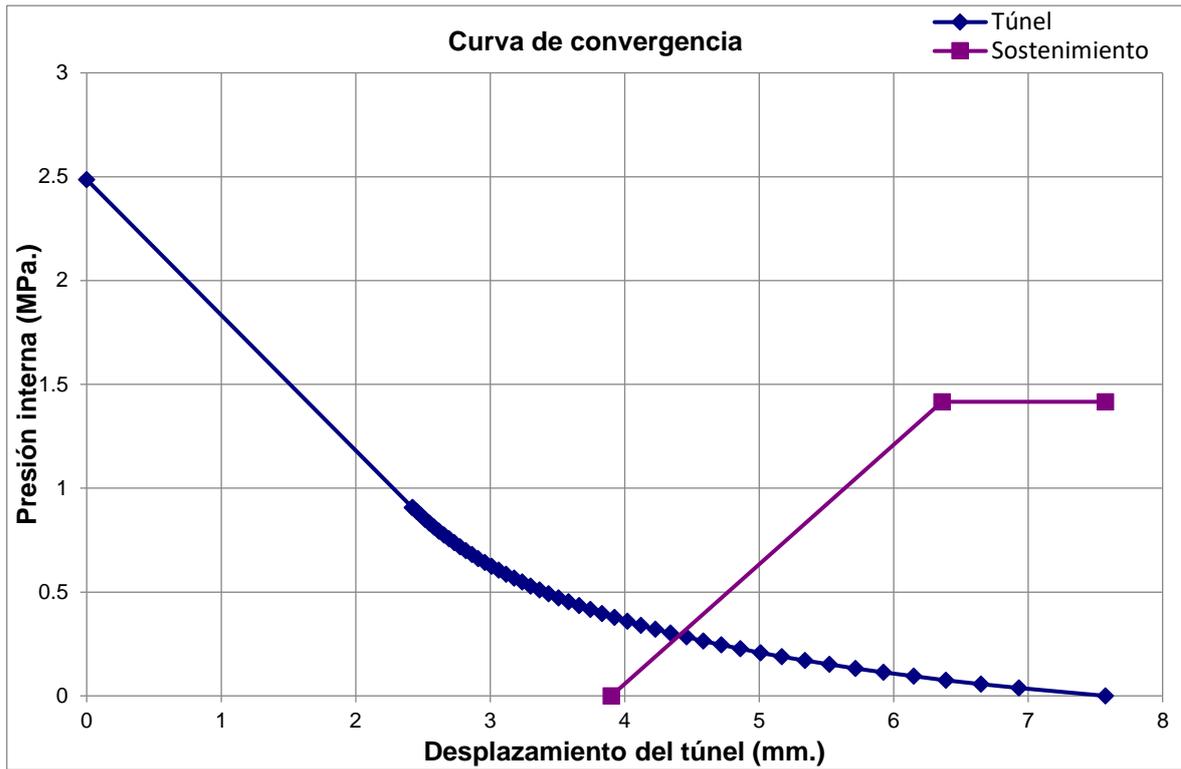


Figura 3.43. Curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, con  $P_e$  ( $U_{pe} = 4.41$  mm.;  $P_{spe} = 0.29$  MPa). y  $U_{io} = 3.90$  mm.; estación geomecánica 6 - RocSupport.

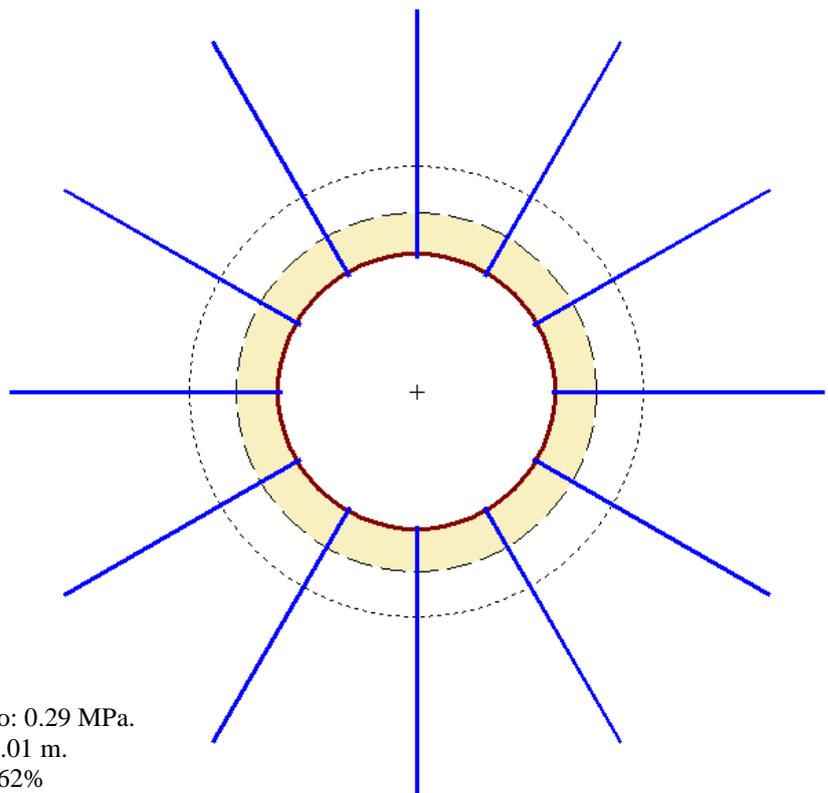


Figura 3.44. Sección transversal del túnel con interacción: Medio plástico vs. sostenimiento, estación geomecánica 6, RocSupport.



Figura 3.45. Sostenimiento por cuadros de madera rectos, de sección cuadrada: 0.25 m x 0.25 m. acompañados de emparrillado y acostillado, ubicado en el Pl. + 190 m.



Figura 3.46. Zona tajada de la Veta Murciélago, desde el Pl. + 490 m. hasta Pl. + 609.20 m., formando una cavidad sub-vertical que une el Nivel 4 y 5, autosostenida ambas cajas por: Puntales y anclajes fricción (Split set y mecánico).



Figura 3.47. A. Anclajes sistemáticos - split set, distribuidos en el hastial derecho y clave, de la labor. B. Detalle del anclaje mecánico, constituido por: Arandela, placa de reparto cuadrada, turca y perno de anclaje, ubicado el PI. + 523 m.



Figura 3.48. Puntal con dimensiones: 0.30 m. x 0.30 m. y longitud 2.20 m.; ubicado en el PI. + 477 m. del hastial izquierdo, soportando la carga de la clave.

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Presentación de resultados

La empresa MINERA CAJAMARCA S.A.C. en calidad de CESIONARIA de la concesión minera LUMINOSA NUMERO 2A, viene desarrollando actividades metálicas de extracción: Plata, plomo, zinc y cobre, en el proyecto de explotación polimetálico subterráneo Paredones - Nivel 4, siendo influenciada sus labores por variables: Litológicas, goestructurales, tensionales, precipitacionales, infiltracionales, sismicidad e inestabilidad, en los tajeos de explotación de la mina subterránea. Sin embargo, el proyecto minero Paredones Nivel 4, presenta rentabilidad por la Veta Murciélago emplazada en la roca andesita de grano medio de textura afanítica de coloración gris verduzco, con pseudoestratificación de orientación: Az = 231° y Bz = 33°NW, de espesor: 0.25 m. a 0.35 m.; en consecuencia, es un yacimiento de baja sulfuración, presentando alteración: Sílica (Compuesta por: Sinter y sílice, afectada por los fluidos hidrotermales ácidos lixiviando el cuerpo mineralógico y roca andesita, ubicándose en bajas proporciones en la galería principal, sin embargo, en el by-pass se encuentra desde Plp. + 85 m. hasta Plp. + 146.50 m., en contacto directo el diatrema en orientación SE) y argílica avanzada (Ubicada en la periferia de la Veta Murciélago y la roca caja (Andesita) en varios tramos afectando la composición de la misma veta en forma de aureolas compuestas de materiales rocosos andesíticos altamente fracturados en forma de costras nodulares de mala a muy mala calidad rocosa, con superficies: caolinita, alunita y cuarzo) y diatrema volcánico (Estructura vertical de base elíptica con dimensiones: 55 m. x 20 m. ubicada en el by-pass, desde Plp. + 33 m. hasta Plp. + 85 m., compuesto de material brechoso freatomagmático mineralizado, compuesto por fragmentos líticos angulosos andesíticos de 7.5 cm. a 10 cm., con matriz cementante de polvo de roca constituyendo el cuerpo mineralizado: Esfalerita, galena, galena argentífera, covelina, cuarzo, yeso, calcopirita, pirita y óxidos de hierro).

La hidrogeología fue interpretada por la estación meteorológica tipo: convencional – San Pablo, obteniéndose valores de precipitación máximas en 24 horas por año, obtenido cálculos cuantitativos de la labor del Nivel 4, en función de la microcuenca de la quebrada Lupita, mostrando: Riesgo admisible ( $R\% = 35$ ), vida útil ( $n = 15$  años) y periodo de retorno ( $T = 35.32$  años), con variaciones del tiempo de retención promedio de agua de 10 min. en la superficie del suelo, con intensidad promedio de 93.33 mm./hora y caudal promedio de 0.75 m<sup>3</sup>/s.

Hidrogeológicamente la excavación subterránea del Nivel 4, se encuentra ubicada paralela a la quebrada Lupita, a 250 m. a 350 m. de distancia, en orientación NE, sin embargo, la quebrada Lupita evacua sus aguas pluviales en orientación SE-NW, delimitándose por la microcuenca Lupita con área 0.42 Km<sup>2</sup>., con caudal promedio que superan 0.50 m<sup>3</sup>/s, por las escorrentías de la microcuenca Lupita; ubicada a altitudes: 1,077.000 msnm., 1,110.000 msnm. y 1,149.000 msnm. (Eje de quebrada Lupita), en cambio la bocamina a 1,040.000 msnm. de altitud, observándose una variación vertical: 37 m., 70 m. y 109 m.; por consiguiente, las infiltraciones en la clave y hastiales, cada vez son más constantes generando: recristalización de minerales (Epsomita e hidrocincita) y esponjamientos de la roca, por la constante: Humedad e infiltración, en las instalaciones subterráneas, generando inestabilidades progresivas en las secciones de las labores, utilizando la clasificación de Bieniawski por la presencia de agua como: Seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando y flujo de agua, afectando tramos de las labores del Nivel 4.

Geoestructuralmente la estructura mayor presenta orientación: Az = 300°, Bz = 80°NE, pitch = 86°, con movimiento cinemático Normal y paleoesfuerzos (T/P):  $\sigma_1 = 225.50/58.80$ ,  $\sigma_2 = 129.00/3.90$  y  $\sigma_3 = 36.70/30.90$ , de orientación NW-SE, formando la mineralización (Veta Murciélagos) de Mina Paredones, acompañados por fallas: Normales, inversas y rumbo (Dextrales y sinestrales), cortando transversalmente a la estructura principal; generando movimientos cinemáticos de importancia para la interpretación: Litológica, estructural, hidrológica e hidrogeológica. Sin embargo, presenta estructuras menores definidas por cuatro discontinuidades de mayor incidencia definidas por (Az/Bz): 215/21, 121/56, 330/64 y 32/72 y 2 ocasionales por: (Az/Bz): 265/52 y 162/48; formando sobre

excavaciones en forma de chimeneas verticales a sub-verticales con alturas de: 5.50 m. a 6.50 m., desde: Pl. + 80 m. hasta Pl. + 635 m.; por el contrario, la cortada y by-pass, forman secciones en forma: Cuadra o baúl, por presentar diaclasamientos inclinados a horizontales, generando desprendimiento de bloques en forma: Triedros tetraedros, prisma truncado y prisma doblemente truncado.

El coeficiente de aceleración espectral reporta valores del sísmico horizontal desde: 0.013 a 0.094 y sísmica vertical desde: 0.033 a 0.242, ubicándose:  $Z_2 = 0.25g$ , con un periodo de retorno de 50 años en suelos rígidos con tipo de suelo: S0 y S1, con ondas de corte: 500 m/s a 1500 m/s de gran importancia para el diseño geotécnico mediante el modelo matemático.

Geomecánicamente de acuerdo con los reportes del basamento rocoso lo clasifica empíricamente en función de la calidad como: RQD % (Pobre, regular y buena), RMR (Mala, media y buena), GSI (Mala, regular y buena), Q (Muy mala, mala, media y buena) y R<sub>Mi</sub> (Moderada a alta resistencia). En consecuencia, ya obtenidos los parámetros antes mencionados se ingresó a los modelos numéricos reportando esfuerzos tenso-deformaciones, alrededor de la excavación aplicando: Phase2 y Rocsupport.

Cuadro 4.1. Reporte de desplazamiento tenso-deformacionales, aplicando programas numéricos.

Estación	Phase2 <i>U<sub>p</sub></i> (mm.)	RocSupport <i>U<sub>r</sub></i> (mm.)
E-1	1.85	1.36
E-2	3.80	3.23
E-3	7.46	9.28
E-4	26.19	32.51
E-5	7.23	8.45
E-6	2.85	3.90

Sin embargo, aplicando los criterios empíricos: Q y R<sub>Mi</sub>, para el sostenimiento, ambos criterios tienen ventajas y desventajas, teniendo como finalidad, el mejoramiento de la labor subterránea mediante la aplicación

sostenimiento pasivo como: Cuadros de madera, bulones fricción (Split set y mecánico) y shotcrete con fibras. En consecuencia, el RMI presenta resultados más precisos en determinar la longitud del bulón, en comparación con el Q Barton, en relación con el dimensionamiento de la labor subterránea.

El Cuadro 4.2, reporta los resultados de la curva de convergencia: Túnel vs. Sostenimiento, se determinó la curva característica por la superposición mostrando la carga máxima del sostenimiento llegando a estado plástico y elastoplástico, frente a la interacción de deformaciones tenso-deformacionales del macizo rocoso cambiando progresivamente de tramo: Elástico a plástico.

Cuadro 4.2. Curvas de convergencia del túnel y sostenimiento.

Estación	Punto de equilibrio		Plastificación	
	<i>U<sub>pe</sub></i> (mm.)	<i>P<sub>spe</sub></i> (Mpa.)	Pi (m.)	Pf (m.)
E-1	2.08	0.07	1.89	2.63
E-2	4.26	0.14	2.60	3.82
E-3	10.07	0.29	1.60	2.11
E-4	34.91	0.43	3.57	5.34
E-5	10.45	0.86	1.71	2.17
E-6	4.41	0.29	1.60	2.01

#### 4.2 Contrastación de la hipótesis

Las labores subterráneas del Nivel 4 - Mina Paredones, presenta inestabilidades progresivas logrando corroborar con la aplicación de modelos numéricos obteniendo desplazamientos promedio de 8.23 mm., influenciada por la carga gravitatoria, siendo muy variante en varios tramos por la altura de la columna de roca, litología circundante como: Andesita, brecha hidrotermal y alteraciones (Argílica avanzada y silicificada). Sin embargo, la geoestructura mayor o Veta Murciélago tiene orientación NW-SE con interacción de paleoesfuerzos NNE-SSW, generando inestabilidades en la clave y hastiales, influenciadas también por la precipitación máxima anual 169.88 mm. En consecuencia, las infiltraciones son generadas por la quebrada Lupita afectando las labores subterráneas por: Humedad, flujo y goteo, en varios tramos de las labores; en consecuencia, están

acompañadas por la sismicidad: Horizontal (0.042) y vertical (0.113), afectando la excavación subterránea por: Deformaciones, desprendimiento bloques y formación de cuñas, relacionándose con las condiciones actuales de la matriz rocosa afectada. Proponiéndose mejorar por medio de estabilización por: Anclajes, shotcrete y cuadros de madera, analizados por la investigación.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- El Nivel 4 - Mina Paredones, está emplazada en el Volcánico Chilete conformando la roca caja (Techo y piso) por rocas andesitas ígneas efusivas de grano medio de textura afanítica de color gris verdusco con seudoestratificación de orientación: Az = 231° y Bz = 33°NW de espesor: 0.25 m. a 0.35 m. y litologías compuestas por alteración: Sílica y argílica avanzada; y diatrema volcánico.
- La caracterización geomecánica define rocas de calidad: Muy mala, mala, regular y buena; por: E-1 (RQD = 73.58, RMR = 59, GSI = 54, Q = 6.54, RMi = 25.211), E-2 (RQD = 46.77, RMR = 34, GSI = 29, Q = 0.77, RMi = 0.786), E-3 (RQD = 73.58, RMR = 48, GSI = 43, Q = 5.40, RMi = 19.825), E-4 (RQD = 78.81, RMR = 58, GSI = 53, Q = 9.85, RMi = 28.548), E-5 (RQD = 89.25, RMR = 66, GSI = 61, Q = 14.88, RMi = 59.399) y E-6 (RQD= 40.60, RMR = 36, GSI = 31, Q = 1.19, RMi = 0.997).
- Los estados tensionales, están definidos por la columna de roca que interactúa en cada estación geomecánica: E-1 ( $m = 0.62$ ,  $U_p = 1.85$  mm.), E-2 ( $m = 0.55$ ,  $U_p = 3.80$  mm.), E-3 ( $m = 0.52$ ,  $U_p = 7.46$  mm.), E-4 ( $m = 0.54$ ,  $U_p = 26.19$  mm.), E-5 ( $m = 0.59$ ,  $U_p = 7.23$  mm.) y E-6 ( $m = 0.49$ ,  $U_p = 2.85$  mm.), con variaciones tensionales: E-1, E-2 (deformación: clave y hastiales, campo tensional bajo) y E-3, E-4, E-5 y E-6 (deformación gravitacional – clave y campo tensional medio).

- Se clasificó en cuatro zonas de peligrosidad crítica: Muy alta, alta, media y baja, en función de la calidad de roca y la influencia de agua, generando constantes instabilidades en las labores del Nivel 4.
- El sostenimiento mediante el criterio Q: Sin soporte (E-1), Anclaje sistemático, mas shotcrete con espesor 6 – 9 cm. con fibras, B + Sfr (E-2), Anclaje puntual (E-3, E-4, E-5 y E-6), lo definió en tres campos de mejoramiento geomecánico, basados: De y Q.
- El sostenimiento mediante el criterio R<sub>Mi</sub>: Anclajes puntuales, con L<sub>pc</sub> = 6 pies (E-1, E-3, E-4 y E-5), Anclaje sistemático, con L<sub>pc</sub> = 8 pies, con espaciado 1.00 m. a 1.25 m., con espesor 70 mm. de shotcrete, con reforzamiento de fibras (E-2) y Bulones puntuales, con L<sub>pc</sub> = 7 pies, con espaciado 1.50 m. a 2.00 m. (E-6).
- El RocSupport, muestra la curva de convergencia: Túnel vs. sostenimiento, obteniendo el punto de equilibrio para cada estación geomecánica:  
E-1 (2.08 mm./0.07 MPa.), E-2 (4.26 mm./0.14 MPa.),  
E-3 (10.07 mm./0.29 MPa.), E-4 (34.91 mm./0.43 MPa.),  
E-5 (10.45 mm./0.86 MPa.) y E-6 (4.41 mm./0.29 MPa.).

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda a la empresa encargada del proyecto y futuros tesisistas realizar ensayos triaxiales, constantes elásticas y módulos, para obtener valores reales de la resistencia a la compresión uniaxial de roca.
- Se sugiere a la empresa y futuros tesisistas realizar el ensayo de celdas de presión total para obtener valores de los esfuerzos en el macizo rocoso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E; Boisán, M; Cabo, M; Chaves, E; Pozo, V. 2014. Los túneles Pucará y transandino del proyecto de trasvase Majes – Sigvas II, Arequipa, Perú. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente. ISSN 1136-4785, N°. 233, 2014: 8-24. Consultado 2 ago. 2022. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4721672>.
- Arlandi, R; Bernardo, S; Jordá, B. 2013. Predicción empírica del Strainburst y Squeezing en galerías profundas - Mina El Teniente (Chile). Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 224, 2013: 28-33. Consultado 2 ago. 2022. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4248210>
- Barton, N; Lien, R; Lunde, J. 1974. Clasificación ingenieril de la masa rocosa para el diseño del sostenimiento de túneles. Mecánica de rocas 6: 189–236. Consultado 2 ago. 2022. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/226039636\\_Engineering\\_Classification\\_of\\_Rock\\_Masses\\_for\\_the\\_Design\\_of\\_Tunnel\\_Support](https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support)
- Benel, R. 2019. Comportamiento geomecánico según los métodos RMR y Q de Barton del Nivel 3 de la Mina Paredones San Pablo – Cajamarca. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, UNC. 140 p.
- Bernal, C; Cevallos, J; Celada, B; Tardáguila, I. 2013. Inspección y rehabilitación del Túnel Hidráulico de Cerro Azul (Ecuador). Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 230, 2013: 20-25. Consultado 2 ago. 2022. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4787816>
- Berrocal, M. 2015. Estabilidad de Excavaciones Subterráneas. Lima - Perú: Ventura Graf.
- Celada, T. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas tomo 1: Concepto y diseño del sostenimiento de túneles: 815 – 854. Móstoles – Madrid: Graficas arias montano, S.A.

- El clima y el tiempo promedio en todo el año en Chilete Perú (en línea, sitio web). Consultado 10 ago. 2022. Disponible en <https://es.weatherspark.com/y/19951/ClimapromedioenChiletePer%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Dávila, B. 2011. Diccionario geológico. INGEMMET, Lima, Perú, Arth Grouting S.A.C.
- Deere, D; Hendron, A; Patton, F; Cording, E. 1967. Diseño de superficies y superficies del entorno de excavación en roca. 8vo. Simposium de mecánica de rocas en procedimientos. Fracturamiento y reforzamiento en roca: 237 - 302. New York – Estados Unidos: AIME.
- Gavilanes, J; Andrade, H. 2004. Introducción a la ingeniería túneles: Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. Quito – Ecuador. Asociación de ingenieros de minas del Ecuador (AIME).
- Gavilan, R. 2020. Estudio geomecánico del cruceo XC850 – Nivel 4025, mediante la aplicación del gráfico múltiple GDE – Mina Codiciada, Compañía Minera Argentum. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, UNC.
- Guerra, T. 2011. Manual de túneles y obras subterráneas: Emboquille de túneles. Tomo II. Madrid – España: Gráficas Arias Montano, S.A.
- Gonzalez de Vallejo, LI. 2002. Ingeniería Geológica. Madrid, Prentice Hall.
- Grimstad, E; Barton, N. 2007. Cuarenta años con el sistema Q en noruega y en el extranjero fortificando por medio Q sistemáticamente utilización en Noruega. Consultado 10 ago. 2022. Disponible en <http://nff.no/wpcontent/uploads/2016/01/BartonN.andGrimstadE.2014FortyyearswiththeQsysteminNorwayandabroad.Fjellsprengningsteknikk-NFF-Oslo-25p.pdf>
- Jordá, B; Jordá, B; Fernández, A. 2010. Contribución al conocimiento geotécnico de la Mina Mochi de cara a su musealización. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 195, 2010: 28 - 33. Consultado 21 ago. 2022. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/318338944\\_Contribucion\\_al\\_conocimiento\\_geotecnico\\_de\\_la\\_Mina\\_Monchi\\_de\\_cara\\_a\\_su\\_musealizacion](https://www.researchgate.net/publication/318338944_Contribucion_al_conocimiento_geotecnico_de_la_Mina_Monchi_de_cara_a_su_musealizacion).
- Karzulovic, A; Read, J. 2009. Guidelines for open pit slope design: Capítulo 5 Modelo de la masa rocosa. Australia – Nueva Zelanda y Sudáfrica. CSIRO Publishing: 83 – 138.

- Lostalé, A. 2011. La central hidroeléctrica subterránea San Esteban II. Ingeopres 209: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N° 209, 2011: 42-49. Consultado 10 ago. 2022. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/293594>.
- Marinos, P; Hoek, E. 2000. GSI: Una herramienta geológicamente sencilla para la estimación de resistencia de la masa rocosa. Conferencia en procedimientos de GeoEng2000 1: 1422-1440. Consultado 10 ago. 2022. Recuperado de <http://www.geoplanning.it/test/wp-content/uploads/2012/02/GSI.pdf>.
- Ministerio de vivienda. 2019. Norma técnica E.30 – Diseño sismorresistente del reglamento nacional de edificaciones. Resolución ministerial N° 043-2019-vivienda. Lima – Perú: Ministerio de vivienda. Recuperado de [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856\\_opt.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf).
- Montoya, T. 2018. Relación geotécnica y litomorfoestructural del túnel de la Mina Paredones Nivel 5 San Pablo – Cajamarca (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Cajamarca. 159 p.
- Navarro, C; Flores, R. 2007. Mapa geológico del cuadrángulo de Cajamarca, escala 1/50,000 hoja 15-f cuadrante-IV. Lima – Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Osinergmin, 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Magdalena del Mar, Lima, Perú. INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Palmstrom, A. 2000. Recientes desarrollos en la estimación del sostenimiento en roca mediante RMi. published in: Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology 6 (1): 1-19.
- Ramírez, O; De La Cuadra, I; Laín, H; Grijalbo, O. 2008. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea. Instituto geológico y minero de España.
- Reyes, R. 1980. Boletín N° 31 Serie A. Carta Geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Lima – Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

- Salazar, D; Córdova, R. 2013. Geomecánica del minado masivo tajeos por subniveles con pilares corridos - Mina Marcapunta Norte – Sociedad Minera El Brocal (Perú). Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 224, 2013: 46-51. Consultado 10 ago. 2022. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4248238>.
- Sicilia, A; Nuñez, I; Galera, F; Santos, D. 2013. La construcción de los túneles de Toquepala. Mina Toquepala, Tacna, Perú. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 230, 2013: 29-33. Consultado 6 ago. 2022. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4787835>.
- Thomas, C. 2014. Estudio comparativo entre requerimientos de soporte y fortificación de túneles definidos según métodos empíricos de clasificación geomecánica versus métodos analíticos y numéricos. 194, N°. 8. Consultado 6 ago. 2022. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132024>.
- Uribe, P; Cabrera, G; Zapana, E. 2011. Evaluación geológica preliminar del proyecto Paredones. Compañía minera Raura – Exploraciones.
- Veyrat, S; Galera, F; Sancho, M; Andersson, H; Thoese, W; Rietschel, C. 2017. Experiencias para mitigación de estallido de roca: Proyecto hidroeléctrico Cheves (Perú). Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, N°. 257, 2017: 22-33. Consultado 12 ago. 2022. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5961734>.

## **ANEXOS**

**ANEXO A:** REGISTROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS

**ANEXO B:** FORMATOS PETROGRÁFICOS - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA

**ANEXO C:** CUENCA HIDROGRÁFICA

**ANEXO D:** PLANOS

## **ANEXO A**

### **REGISTROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS**

- Cuadro EG1: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 1.
- Cuadro EG2: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 2.
- Cuadro EG3: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 3.
- Cuadro EG4: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 4.
- Cuadro EG5: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 5.
- Cuadro EG6: Registro Geológico Geotécnico – Estación Geomecánica 6.

Cuadro EG1: Registro Geológico Geotécnico - Estación Geomecánica 1.

REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO															TESIS		EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS MÉTODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA										TENSIONES		Subterráneo									
UBICACIÓN															TRAMO		NIVEL 4 -MINA PAREDONES										Parametros											
E-1															1		DE					PI. + 00 m.					PI. + 45 m.					valores						
Paul Enrique Muñoz Gálvez															1		COORDENADAS					NORTE (m.)					COTA (msnm.)					14						
HOJA N°															1		Emboquille					ESTE (m.)					92044496.816					1040.000					0.39	
EJECUTADO POR															1		Paul Enrique Muñoz Gálvez					FECHA					15/05/2022					0.24		0		50°		
WGS															84		ZONA 17S										03 (Mpa.)		0.24		m		0.62					
DIS. Nro	DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN					LITOLÓGIA FORMAC.	MACIZO ROCOSO					TIPOS		RESIST. COMP. UNIAX.		ROD TRAMO		ORIENTACIÓN				ESPACIADO (m)		PERSIST. (m)		ABERTURA (mm)		RUGOS.		RELLENO		ALTERAC. METEOR.		AGUA		CALIDAD DE INFORMACIÓN		
	FORMA DE EXCAVACIÓN						METEORIZACIÓN					E=Estratificada o Seudo		ND		DIRECCIÓN				1= >2		1= <1		1= Nada		1= Muy Rug.		1= Arcilloso		1= Inalterada		1= Seco		1= Lec. Real				
	OPCION						GRADO FRACT.					D=Diapirica		L		COMPOBACION				2= 2-0.6		2= <0.1		2= Rugosa		2= Qz		2= Duro<5mm		2= Lig. ALT.		2= Húmedo		2= Lec. Apar.				
	1= Baul						1= Fresco					F=F.Normal		23		Z/R				3= 0.6-0.2		3= 3-10		3= 0.1-1		3= Lig. Rug.		3= Calcita		3= Duro<5mm		3= Mod. ALT.		3= Mojado		3= Lec. Proy.		
	2= Circular						2= Lev. Met.					F=F.Inversa		10.00		DIP				4= 0.2-0.06		4= 10-20		4= 1-5		4= Ondulad.-lisa		4= Óxidos		4= Suave<5mm		4= Muy ALT.		4= Goteo				
	3= Hexadura						3= Mod					m=Microfalla		Y <sub>p</sub>		DD				5= <0.06		5= >20		5= >5		5= Suave		5= Roca Tritur.		5= Suave>5mm		5= Descomp.		5= Flujo				
	4= Cuadrada						4= Alt. Met.					SE= Sobrees.		73.58		COMPOBACION				6= <0.06		6= >20		6= >5		6= Bx		6= Panizo		6= Veta		6= Epsomita		6= Hidrocinclita		6= Yeso		
	5= Rectangular						5= Compl.					C=Contacto		73.58		COMPOBACION				7= <0.06		7= >20		7= >5		7= Bx		7= Panizo		7= Veta		7= Epsomita		7= Hidrocinclita		7= Yeso		
	6= Elíptica						6= Compl.					C=Contacto		73.58		COMPOBACION				8= <0.06		8= >20		8= >5		8= Bx		8= Panizo		8= Veta		8= Epsomita		8= Hidrocinclita		8= Yeso		
	7= Irregular						7= Compl.					C=Contacto		73.58		COMPOBACION				9= <0.06		9= >20		9= >5		9= Bx		9= Panizo		9= Veta		9= Epsomita		9= Hidrocinclita		9= Yeso		
HASTIAL DER. (m.)	APICE MAYOR (m.)	HASTIAL IZQ. (m.)	ANCHO DE CÁMARA (m.)	CUNETA (m.)																																		
1	2.00	2.05	2.10	2.20	-	Andesita	1	2	2	E	R5 (125 MPa)	73.58	215	21	305	V	3	2	1	4	3	2	1	4	-	-	1	1	1	1								
2										R5 (125 MPa)	73.58	223	30	313	V	2	1	2	4	1	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1								
3										R5 (125 MPa)	73.58	233	25	323	V	2	2	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
4										R5 (125 MPa)	73.58	220	23	310	V	2	3	3	2	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1								
5										R5 (125 MPa)	73.58	228	28	318	V	2	1	1	5	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
6										R5 (125 MPa)	73.58	219	31	309	V	3	2	1	4	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
7										R5 (125 MPa)	73.58	220	28	310	V	3	1	2	5	4	2	2	1	4	2	1	1	1	1	1								
8										R5 (125 MPa)	73.58	227	31	317	V	3	2	1	4	-	-	2	1	4	-	2	1	1	1	1								
9										R5 (125 MPa)	73.58	218	26	308	V	3	2	2	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
10										R5 (125 MPa)	73.58	225	34	315	V	2	1	3	4	4	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1								
11										R5 (125 MPa)	73.58	237	29	327	V	2	1	1	4	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
12										R5 (125 MPa)	73.58	230	24	320	V	2	2	3	5	4	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1								
13										R5 (125 MPa)	73.58	223	34	313	V	2	2	3	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
14									D-1	R5 (125 MPa)	73.58	116	12	206	V	3	1	1	4	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
15										R5 (125 MPa)	73.58	192	26	282	V	3	3	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1								
16										R5 (125 MPa)	73.58	153	15	243	V	4	3	2	4	4	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1	1							
17										R5 (125 MPa)	73.58	149	22	239	V	4	2	3	5	11	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
18										R5 (125 MPa)	73.58	137	21	227	V	3	2	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
19										R5 (125 MPa)	73.58	146	19	236	V	4	3	2	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
20										R5 (125 MPa)	73.58	181	20	271	V	3	2	3	5	4	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1	1							
21										R5 (125 MPa)	73.58	155	24	245	V	4	3	2	5	4	2	2	1	4	2	2	1	1	1	1	1							
22										R5 (125 MPa)	73.58	142	19	232	V	3	2	3	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
23										R5 (125 MPa)	73.58	146	13	236	V	3	3	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
24										R5 (125 MPa)	73.58	166	21	256	V	3	3	3	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
25										R5 (125 MPa)	73.58	172	26	262	V	3	2	3	4	11	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
26									D-2	R5 (125 MPa)	73.58	315	72	45	V	3	2	4	4	5	3	2	1	4	2	1	1	1	1	1	1							
27										R5 (125 MPa)	73.58	300	80	30	V	4	1	1	3	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
28										R5 (125 MPa)	73.58	295	62	25	V	4	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
29										R5 (125 MPa)	73.58	308	64	38	V	3	1	2	3	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
30										R5 (125 MPa)	73.58	297	69	27	V	3	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
31										R5 (125 MPa)	73.58	311	72	41	V	4	1	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
32										R5 (125 MPa)	73.58	299	60	29	V	3	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
33										R5 (125 MPa)	73.58	314	74	44	V	4	1	1	4	1	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
34										R5 (125 MPa)	73.58	289	61	19	V	3	1	2	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
35										R5 (125 MPa)	73.58	310	58	40	V	3	1	1	3	1	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
36										R5 (125 MPa)	73.58	309	64	39	V	4	1	2	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
37										R5 (125 MPa)	73.58	305	72	35	V	3	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
38										R5 (125 MPa)	73.58	302	64	32	V	3	1	1	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
39										R5 (125 MPa)	73.58	313	64	43	V	3	1	2	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
40									D-3	R5 (125 MPa)	73.58	32	75	122	V	4	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
41										R5 (125 MPa)	73.58	43	74	133	V	4	1	3	4	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
42										R5 (125 MPa)	73.58	40	62	130	V	4	1	4	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
43										R5 (125 MPa)	73.58	35	65	125	V	4	1	3	4	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
44										R5 (125 MPa)	73.58	39	70	129	V	4	1	4	5	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
45										R5 (125 MPa)	73.58	41	63	131	V	3	1	2	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
46										R5 (125 MPa)	73.58	36	61	126	V	4	1	3	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
47										R5 (125 MPa)	73.58	39	72	129	V	4	1	3	4	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
48										R5 (125 MPa)	73.58	41	63	131	V	4	1	4	4	4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
49										R5 (125 MPa)	73.58	32	70	122	V	3	1	2	5	1	5	1	1															









Cuadro EG6: Registro Geológico Geotécnico - Estación Geomecánica 6.

REGISTRO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO																				TESIS		EVALUACIÓN GEOMECAÍNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGUN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA										TENSIONES		Subterráneo																			
CÓDIGO		E-6		UBICACIÓN		6		DE		Plp. + 93 m.		A		Plp. + 154 m.		Parametros		valores																																			
RESPONSABLE		Paul Enrique Muñoz Gálvez		TRAMO		6		COORDENADAS		Bay-pass		ESTE (m.)		NORTE (m.)		COTA (msnm)		Profundidad (m.)		113																																	
SISTEMA		WGS		84		ZONA 17S		EJECUTADO POR		Paul Enrique Muñoz Gálvez		FECHA		15/05/2022		σ1 (Mpa.)		2.49		0		50°																															
DIS. Nro		DIMENSIONES DE EXCAVACIÓN				MACIZO ROCOSO				TIPOS				PROPIEDADES DE LAS DISCONTINUIDADES CARTOGRAFIADAS				RELLENO				ALTERAC. METEOR.		AGUA		CALIDAD DE INFORMACIÓN																											
		FORMA DE EXCAVACIÓN		OPCION																																																	
		1= Bañl																																																			
		2= Circular																																																			
		3= Herradura																																																			
		4= Cuadrada																																																			
		5= Rectangular																																																			
		6= Elíptica																																																			
		7= Irregular																																																			
		HASTIAL DER. (m.)		APICE MAYOR (m.)		HASTIAL IZQ. (m.)		ANCHO DE CÁMARA (m.)		CUNET. (m.)		LITOLÓGIA FORMAC.																																									
												METEORIZACIÓN				GRADO FRACT.				GSI				E=Estratificada o Seudo				RESIST. COMP. UNIA.		ROD TRAMO		ORIENTACIÓN				ESPACIADO (m)		PERSIST. (m)		ABERTURA (mm)		RUGOS.		TIPO		DUREZA		ALTERAC. METEOR.		AGUA		CALIDAD DE INFORMACIÓN	
												1=Fresco				1=Alto				1=Bloq-Regul.				Fn=F. Normal				σ <sub>ci</sub>		ND		DIRECCIÓN				1=> 2		1=< 1		1= Nada		1=Muy Rug.		1=Arcilloso		1=Ninguna		1=Inalterada		1=Seco		1=Lec. Real	
												2=Lev. Met.				2=Mediano				2=Bloq-Irreg.				Fi=F. Inversa				L		2= 2.0-6				2= 2-0.6		2=< 0.1		2=Rugosa		2=Duro<5mm		2=Lig. ALT.		2=Humedo		2=Lec. Apar.							
												3=Mod				3=Bajo				3=Bloq-Capas				Fd=F. Directa				1.75		3= 0.6-0.2				3= 3-10		3= 0.1-1		3=Lig. Rug.		3=Calcila		3=Duro<5mm		3=Mod. ALT.		3=Mojado		3=Lec. Proy.					
												4=Alt. Met.				4=Fract-Intenso				m=Microfalla				20.00		4= 0.2-0.06				4= 10-20		4= 1-5		4=Ondulad.-lisa		4=Óxidos		4=Suave<5mm		4=Muy ALT.		4=Goceo											
												5=Compl.				Agregar MB,B,M,P,MP				SE=Sobrees.				40.60		5=< 0.06				5=> 20		5=> 5		5=Suave		5=Roca Tritur.		5=Suave<5mm		5=Descomp.		5=Flujo											
												C=Contacto				SE=Sobrees.				40.60		Z/R				DIP		DD		COMPOBACION																							
												1 - 2 Golp				Y <sub>p</sub>				40.60																																	
1		2.10		2.15		2.05		2.15		-	Alteración silicificación		3		1		3		E		R3 (35 MPa)	40.60	219	52	309	V	4		2	4	3	1	5	3	2	1																	
2																					R3 (35 MPa)	40.60	220	41	310	V	4	1	5	3	9	5	4	3	1																		
3																					R3 (35 MPa)	40.60	207	56	297	V	4	2	4	4	1	5	3	2	1																		
4																					R3 (35 MPa)	40.60	223	39	313	V	5	1	4	3	4	2	4	2	1																		
5																					R3 (35 MPa)	40.60	209	46	299	V	5	1	4	4	9	5	3	3	1																		
6																					R3 (35 MPa)	40.60	214	49	304	V	4	2	5	4	10	5	3	2	1																		
7																					R3 (35 MPa)	40.60	228	52	318	V	5	1	4	5	1	5	3	3	1																		
8																					R3 (35 MPa)	40.60	205	44	295	V	4	2	4	5	1	5	4	2	1																		
9																					R3 (35 MPa)	40.60	221	50	311	V	5	1	5	5	4	2	3	2	1																		
10																					R3 (35 MPa)	40.60	213	37	303	V	4	1	5	3	4	2	3	3	1																		
11																					R3 (35 MPa)	40.60	234	32	324	V	3	2	4	5	4	2	4	2	1																		
12																					R3 (35 MPa)	40.60	217	39	307	V	5	1	5	3	9	4	2	1																			
13																					R3 (35 MPa)	40.60	206	48	296	V	5	1	4	4	10	5	3	2	1																		
14																					R3 (35 MPa)	40.60	303	79	33	V	4	2	4	4	4	2	3	2	1																		
15																					R3 (35 MPa)	40.60	308	82	38	V	5	2	5	3	9	5	4	3	1																		
16																					R3 (35 MPa)	40.60	300	72	30	V	4	2	4	3	10	5	4	2	1																		
17																					R3 (35 MPa)	40.60	310	85	40	V	5	2	5	3	4	2	3	3	1																		
18																					R3 (35 MPa)	40.60	298	73	29	V	4	2	4	4	4	5	4	2	1																		
19																					R3 (35 MPa)	40.60	315	84	45	V	4	2	4	4	4	2	3	2	1																		
20																					R3 (35 MPa)	40.60	321	80	51	V	4	1	5	4	9	5	3	2	1																		
21																					R3 (35 MPa)	40.60	289	72	19	V	5	2	2	3	9	5	3	3	1																		
22																					R3 (35 MPa)	40.60	296	69	26	V	4	1	5	4	4	2	4	3	1																		
23																					R3 (35 MPa)	40.60	305	64	35	V	5	2	5	3	10	5	4	2	1																		
24																					R3 (35 MPa)	40.60	317	73	47	V	4	1	4	4	10	5	3	2	1																		
25																					R3 (35 MPa)	40.60	305	70	35	V	5	2	4	3	4	2	4	3	1																		
26																					R3 (35 MPa)	40.60	301	62	31	V	5	1	5	4	1	5	3	3	1																		
27																					R3 (35 MPa)	40.60	121	81	211	V	4	2	3	3	4	2	4	2	1																		
28																					R3 (35 MPa)	40.60	126	69	216	V	4	1	2	5	9	5	3	2	1																		
29																					R3 (35 MPa)	40.60	112	72	202	V	4	1	4	4	4	2	3	2	1																		
30																					R3 (35 MPa)	40.60	119	65	209	V	4	2	3	3	9	5	4	3	1																		
31																					R3 (35 MPa)	40.60	108	72	198	V	5	1	2	4	9	5	4	2	1																		
32																					R3 (35 MPa)	40.60	123	61	213	V	4	1	4	4	10	5	3	3	1																		
33																					R3 (35 MPa)	40.60	107	59	197	V	5	2	3	3	1	5	4	3	1																		
34																					R3 (35 MPa)	40.60	124	78	214	V	4	2	1	3	10	5	3	2	1																		
35																					R3 (35 MPa)	40.60	120	53	210	V	3	2	3	4	9	5	4	3	1																		
36																					R3 (35 MPa)	40.60	115	49	205	V	5	1	1	3	10	5	3	2	1																		
37																					R3 (35 MPa)	40.60	104	72	194	V	4	1	4	3	9	5	3	3	1																		
38																					R3 (35 MPa)	40.60	127	69	217	V	5	1	3	3	4	2	4	2	1																		
39																					R3 (35 MPa)	40.60	129	60	219	V	4	2	4	5	4	2	3	2	1																		
40																					R3 (35 MPa)	40.60	61	76	151	V	3	1	3	5	10	5	3	3	1																		
41																					R3 (35 MPa)	40.60	73	52	163	V	4	1	1	5	1	5	3	2	1																		
42																					R3 (35 MPa)	40.60	52	71	142	V	4	1	2	3	4	2	4	3	1																		
43																					R3 (35 MPa)	40.60	70	59	160	V	3	1	3	4	10	5	4	2	1																		
44																					R3 (35 MPa)	40.60	67	68	157	V	5	1	1	3	10	5	3	2	1																		
45																					R3 (35 MPa)	40.60	59	70	149	V	4	1	2	4	9	5	3	2	1																		
46																																																					

## **ANEXO B**

### **FORMATOS PETROGRÁFICOS - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA**

- Cuadro FP1: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-1.
- Cuadro FP2: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-2.
- Cuadro FP3: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica M-3.

Cuadro FP1: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica

FORMATO PETROGRÁFICO - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA							
<b>I. LOCALIZACIÓN Y CÓDIGO DE LA MUESTRA</b>							
Código	Ubicación					Coordenadas UTM	
M-1	País	Región	Provincia	Distrito	Centro poblado	Este (m.)	Norte (m.)
	Perú	Cajamarca	Cajamarca	San Bernardino	Paredones	-	-
Unidad geológica: Volcánico Chilete							
<b>II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>							
Color superficie de roca	Fractura	Dureza	Reacción HCL				
Verduzca	Irregular	5	No				
<b>III. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES</b>							
3.1 Grado de cristalización y cristalinidad							
Hipocristalina							
3.2 Tamaño de cristales							
Grado de visibilidad	Dimensiones absolutas	Dimensiones relativas					
Fanerítica	Inequigranular	Grano fino (< 2 mm)					
3.3 Forma de cristales							
Subidiomorfos							
3.4 Relaciones mutuas de los cristales							
Idiomorfos							
Texturas macroscópicas: Hipocristalina							
<b>IV. COMPONENTES MINERALÓGICOS</b>							
Minerales esenciales							
Cuarzo (Q)	Plagioclasa (P)	Feldespato alcalino (A)	Minerales máficos	Matriz y otros	Minerales accesorios	Minerales secundarios	
4%	50%	6%	15%	25%	-	-	
<b>V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS</b>							
Fisher, 1966			Schmid, 1981				
Ceniza (<2 mm.)	Lapilli (2 mm - 64 mm)	Bloques y bombas (>64 mm)	Vidrio	Cristales	Fragmentos líticos		
74%	21%	5%	32%	65%	3%		
<b>VI. CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS</b>							
6.1 Según contenido de sílice		6.2 Según índice de máficos (M)		6.3 Modo de ocurrencia			
Intermedio		Hololeucocrática		Flujos piroclásticos de ceniza y lapilli			
6.4 Streckeisen, 1979		6.5 Fisher, 1966		6.6 Schmid, 1981			
Andesita calcoalcalina		Toba de ceniza		Toba cristalina			
Observaciones: ---							
Abreviaturas: NA.: No aplica; HCL: Ácido clorhídrico							

Fuente: Arapa, 2020.

Cuadro FP2: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica

FORMATO PETROGRÁFICO - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA							
<b>I. LOCALIZACIÓN Y CÓDIGO DE LA MUESTRA</b>							
Código	Ubicación					Coordenadas UTM	
M-2	País	Región	Provincia	Distrito	Centro poblado	Este (m.)	Norte (m.)
	Perú	Cajamarca	Cajamarca	San Bernardino	Paredones	-	-
Unidad geológica: Volcánico Chilete							
<b>II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>							
Color superficie de roca	Fractura	Dureza	Reacción HCL				
Gris blanquecina	Escalonado	4	No				
<b>III. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES</b>							
3.1 Grado de cristalización y cristalinidad							
Vitrea							
3.2 Tamaño de cristales							
Grado de visibilidad	Dimensiones absolutas		Dimensiones relativas				
Afanítica	Equigranular		-				
3.3 Forma de cristales							
Subidiomorfos							
3.4 Relaciones mutuas de los cristales							
Hipidiomorficos							
Texturas macroscópicas: Perlítica							
<b>IV. COMPONENTES MINERALÓGICOS</b>							
Minerales esenciales							
Cuarzo (Q)	Plagioclasa (P)	Feldespato alcalino (A)	Minerales máficos	Matriz y otros	Minerales accesorios	Minerales secundarios	
6%	8%	46%	15%	25%	-	-	
<b>V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS</b>							
Fisher, 1966			Schmid, 1981				
Ceniza (<2 mm.)	Lapilli (2 mm - 64 mm)	Bloques y bombas (>64 mm)	Vidrio	Cristales	Fragmentos líticos		
65%	25%	10%	32%	63%	5%		
<b>VI. CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS</b>							
6.1 Según contenido de sílice		6.2 Según índice de máficos (M)		6.3 Modo de ocurrencia			
Intermedia		Hololeucocrática		Flujos piroclásticos			
6.4 Streckeisen, 1979		6.5 Fisher, 1966		6.6 Schmid, 1981			
Cuarzo-traquita		toba de ceniza		Toba vítrea			
Observaciones: ---							
Abreviaturas: NA.: No aplica; HCL: Ácido clorhídrico							



Fuente: Arapa, 2020.

Cuadro FP3: Formato Petrográfico - Descripción Macroscópica

FORMATO PETROGRÁFICO - DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA							
<b>I. LOCALIZACIÓN Y CÓDIGO DE LA MUESTRA</b>							
Código	Ubicación					Coordenadas UTM	
M-3	País	Región	Provincia	Distrito	Centro poblado	Este (m.)	Norte (m.)
	Perú	Cajamarca	Cajamarca	San Bernardino	Paredones	-	-
Unidad geológica: Volcánico Chilete							
<b>II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>							
Color superficie de roca	Fractura	Dureza	Reacción HCL				
Verduzca	Ganchuda	7	No				
<b>III. CARACTERÍSTICAS TEXTURALES</b>							
3.1 Grado de cristalización y cristalinidad							
Perlítica							
3.2 Tamaño de cristales							
Grado de visibilidad	Dimensiones absolutas		Dimensiones relativas				
Fanerítica	Inequigranular		Grano fino (< 2 mm)				
3.3 Forma de cristales							
Subidiomorfos							
3.4 Relaciones mutuas de los cristales							
Hipidiomorficos							
Texturas macroscópicas: Holohialina							
<b>IV. COMPONENTES MINERALÓGICOS</b>							
Minerales esenciales							
Cuarzo (Q)	Plagioclasa (P)	Feldespato alcalino (A)	Minerales máficos	Matriz y otros	Minerales accesorios	Minerales secundarios	
5%	51%	4%	28%	12%	-	-	
<b>V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS</b>							
Fisher, 1966			Schmid, 1981				
Ceniza (<2 mm.)	Lapilli (2 mm - 64 mm)	Bloques y bombas (>64 mm)	Vidrio	Cristales	Fragmentos líticos		
70%	28%	2%	56%	42%	2%		
<b>VI. CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS</b>							
6.1 Según contenido de sílice		6.2 Según índice de máficos (M)		6.3 Modo de ocurrencia			
Intermedio		Hololeucocrática		Flujos piroclásticos			
6.4 Streckeisen, 1979		6.5 Fisher, 1966		6.6 Schmid, 1981			
Andesita calcoalcalina		Toba de ceniza		Toba cristalina			
Observaciones: ---							
Abreviaturas: NA.: No aplica; HCL: Ácido clorhídrico							

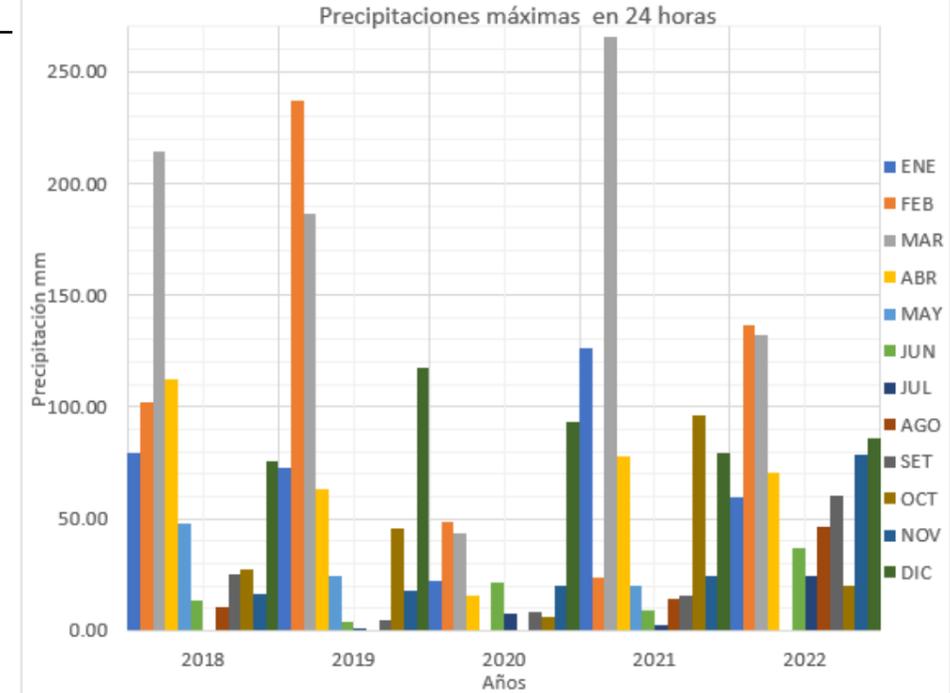
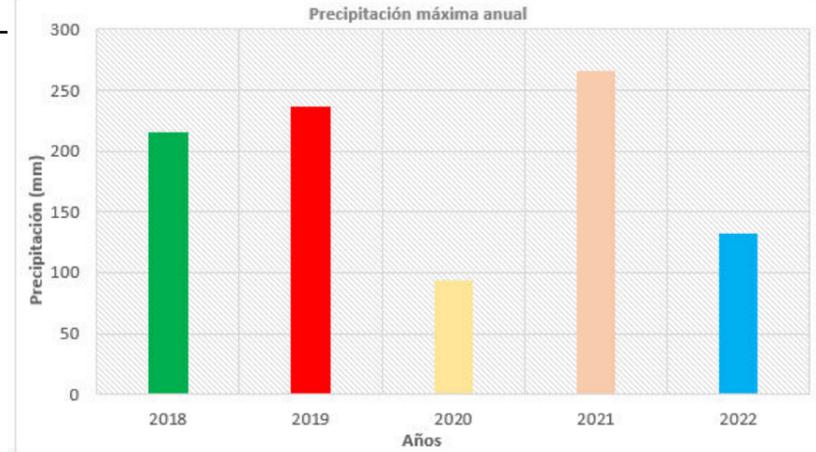
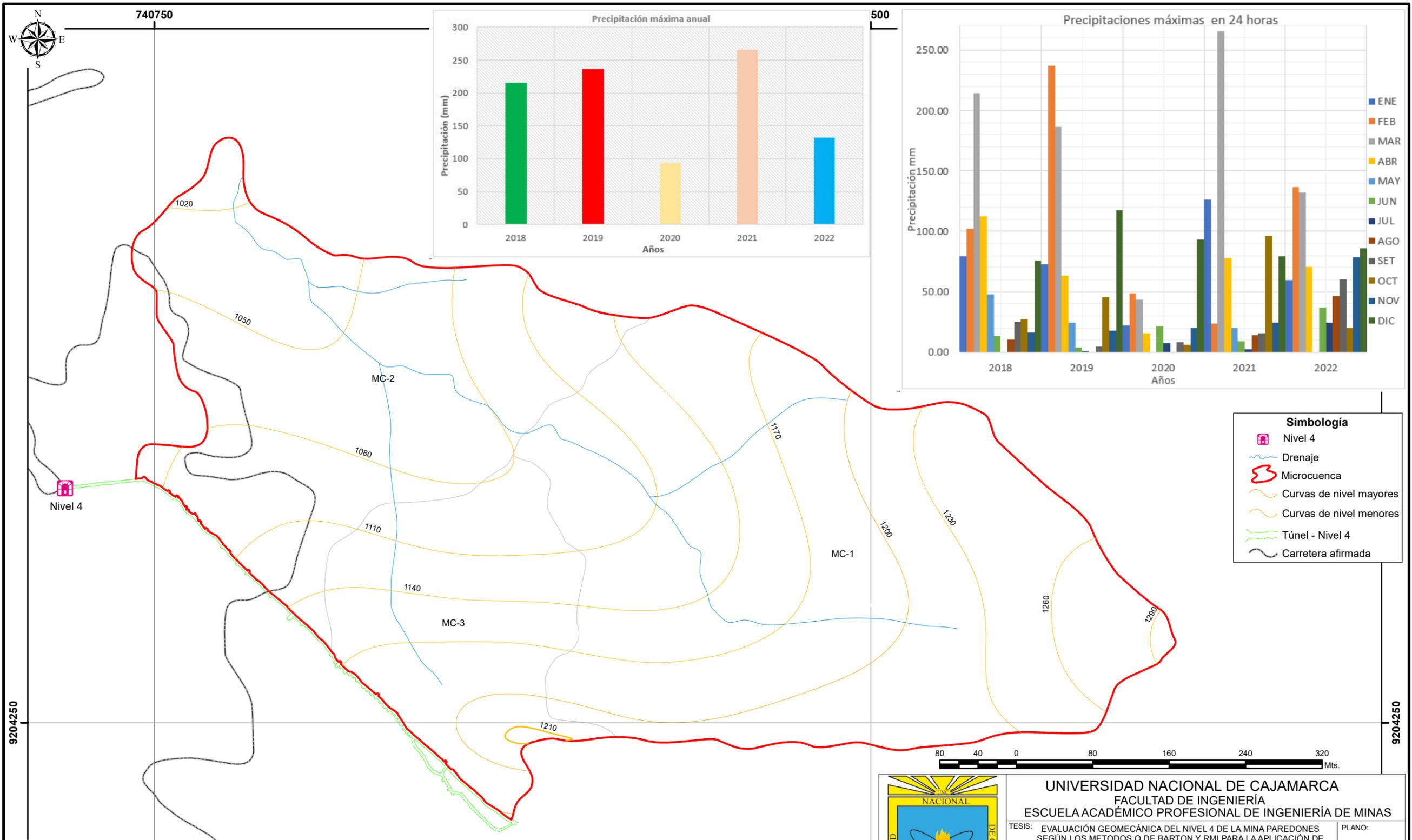


Fuente: Arapa, 2020.

## **ANEXO C**

### **CUENCA HIDROGRÁFICA**

- PLANO H1: CUENCA HIDROGRÁFICA



- Simbología**
- Nivel 4
  - Drenaje
  - Microcuencia
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada



Resultados de la microcuencia de precipitación e infiltración de agua

Nombre de microcuencia	Área (Km <sup>2</sup> .)	Long. de cauce principal (Km.)	Cota mayor (msnm.)	Cota menor (msnm.)	Pendiente (m/m)	Tc (min.)	I (mm/hora)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Precipitación promedio (mm./año)
MC-1	0.22	0.55	1,293.00	1,083.00	0.38	12.00	35.75	0.66	169.88
MC-2	0.07	0.21	1,211.00	1,082.00	0.63	5.40	212.18	1.24	
MC-3	0.13	0.55	1,193.00	1,003.00	0.35	12.60	32.06	0.35	



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA

MAPA: CUENCAS HIDROGRÁFICAS

TESISTA: PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

ESCALA: 1:4,000      DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S      FECHA: DICIEMBRE, 2023

**H1**

## **ANEXO D**

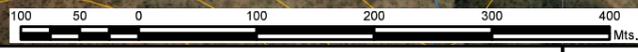
### **PLANOS**

- PLANO 01: IMAGEN SATELITAL SASPLANET - BING MAPS.
- PLANO 02: UBICACIÓN – MDT – MDE.
- PLANO 03: GEOLOGÍA - ESTRUCTURAL REGIONAL.
- PLANO 04: GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL.
- PLANO 05: HIDROGEOLÓGICO.
- PLANO 06: GEOMECÁNICO.
- PLANO 07: TENSO-DEFORMACIONAL.
- PLANO 08: ZONIFICACIÓN CRÍTICA.
- PLANO 09: SOSTENIMIENTO SUBTERRÁNEO.

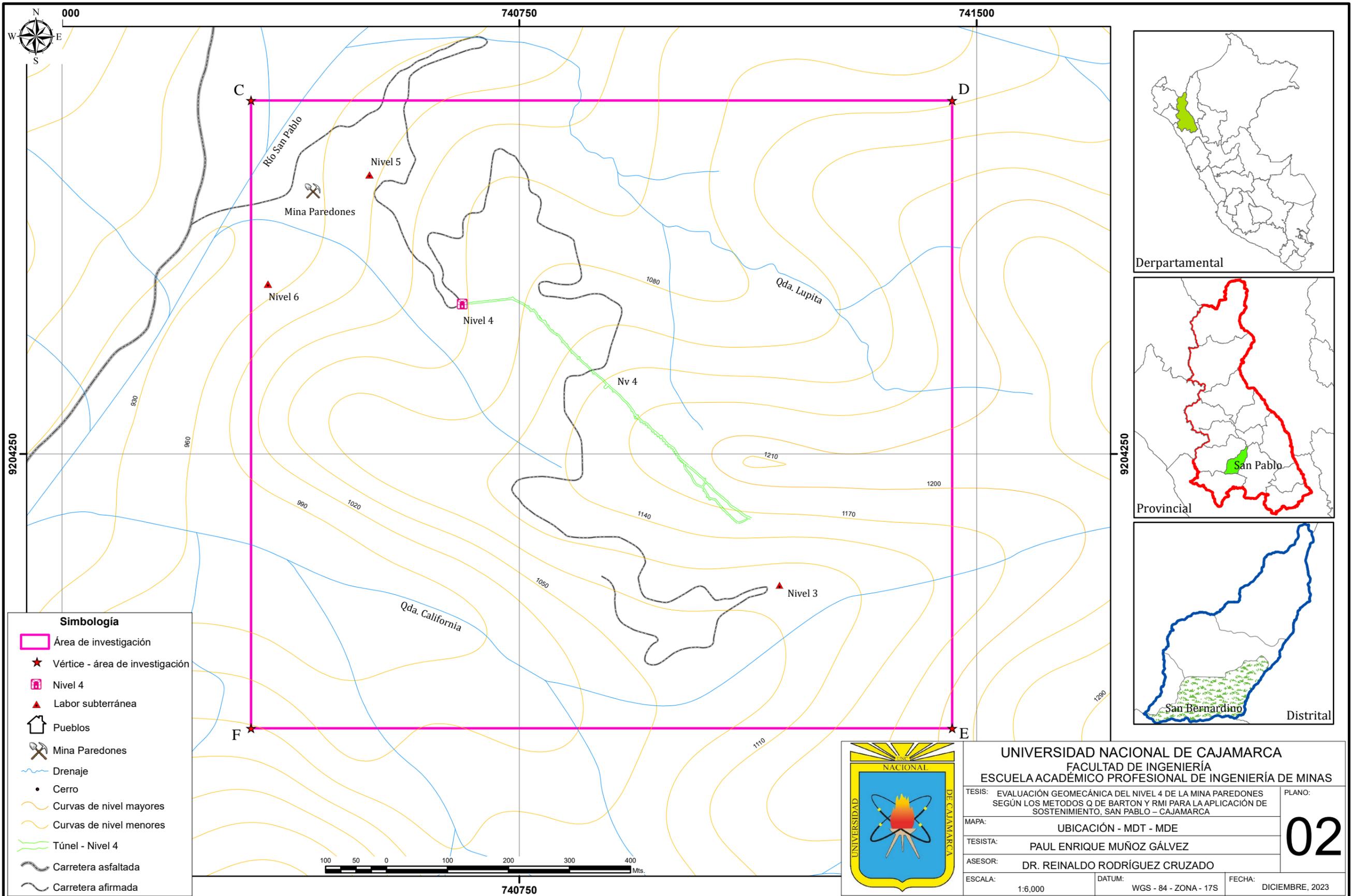


**Simbología**

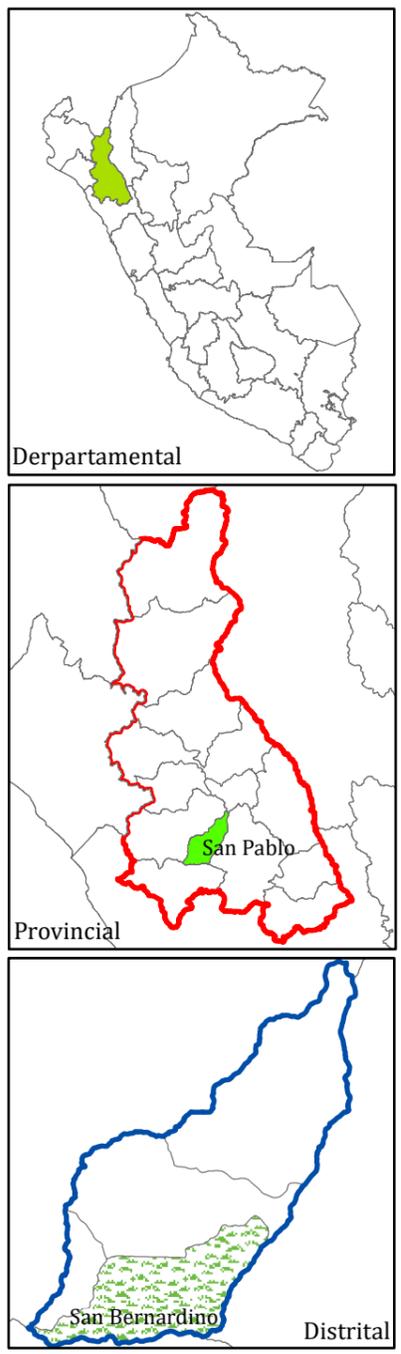
	Nivel 4
	Labor subterránea
	Pueblos
	Mina Paredones
	Drenaje
	Cerro
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel - Nivel 4
	Carretera asfaltada
	Carretera afirmada



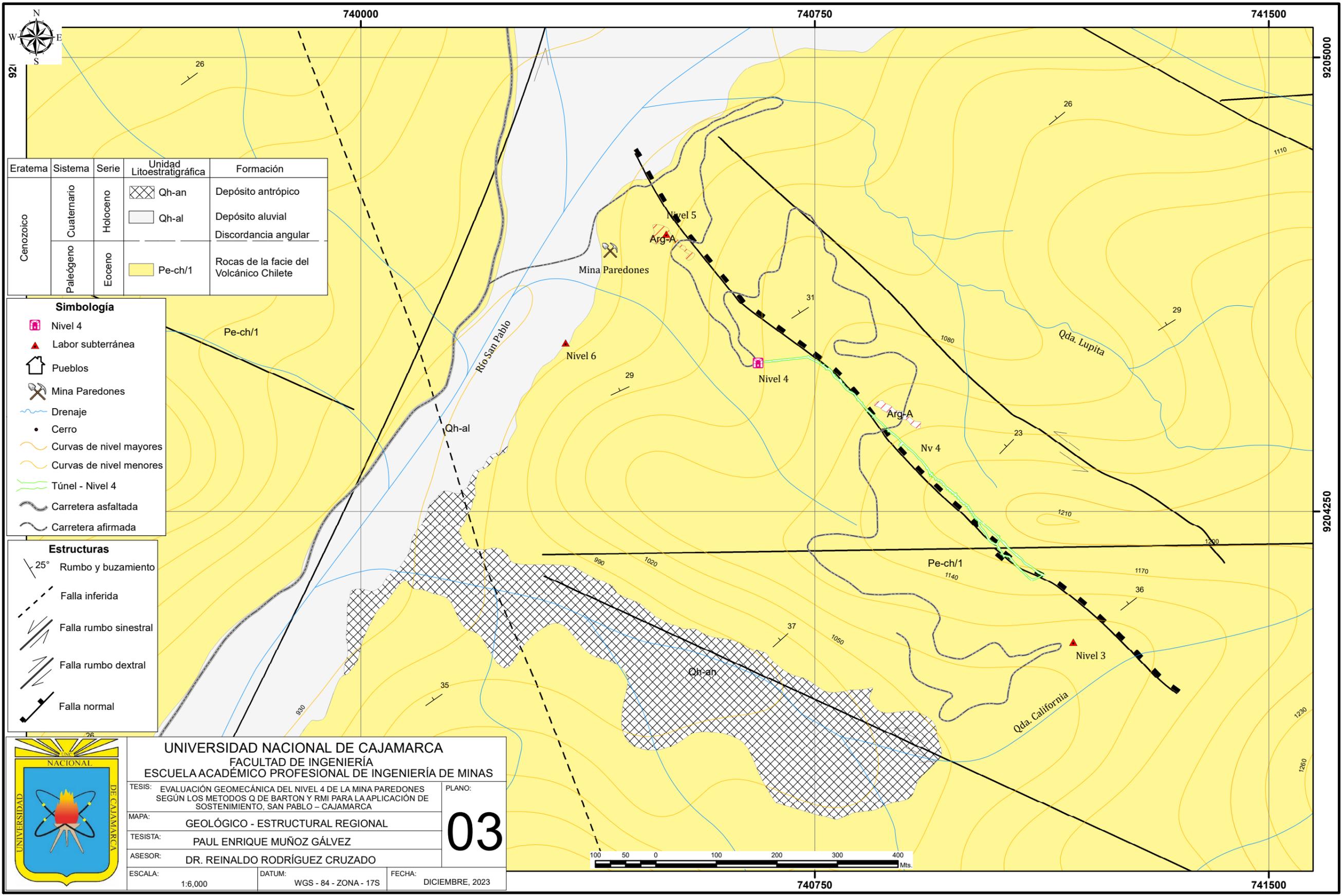
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b> FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA		PLANO: <div style="font-size: 2em; font-weight: bold; text-align: center;">01</div>
MAPA: IMAGEN SATELITAL		
TESISTA: PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ		
ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO		
ESCALA: 1:6,000	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S	FECHA: DICIEMBRE, 2023



- Simbología**
- Área de investigación
  - ★ Vértice - área de investigación
  - Nivel 4
  - ▲ Labor subterránea
  - Pueblos
  - ⚒ Mina Paredones
  - ~ Drenaje
  - Cerro
  - ~ Curvas de nivel mayores
  - ~ Curvas de nivel menores
  - ~ Túnel - Nivel 4
  - ~ Carretera asfaltada
  - ~ Carretera afirmada



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		02
FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA		PLANO:
MAPA:	UBICACIÓN - MDT - MDE	
TESISTA:	PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ	
ASESOR:	DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO	
ESCALA:	1:6,000	DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S
		FECHA: DICIEMBRE, 2023



Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qh-an	Depósito antrópico
			Qh-al	Depósito aluvial
	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

- Simbología**
- Nivel 4
  - Labor subterránea
  - Pueblos
  - Mina Paredones
  - Drenaje
  - Cerro
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera asfaltada
  - Carretera afirmada

- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO – CAJAMARCA      PLANO:

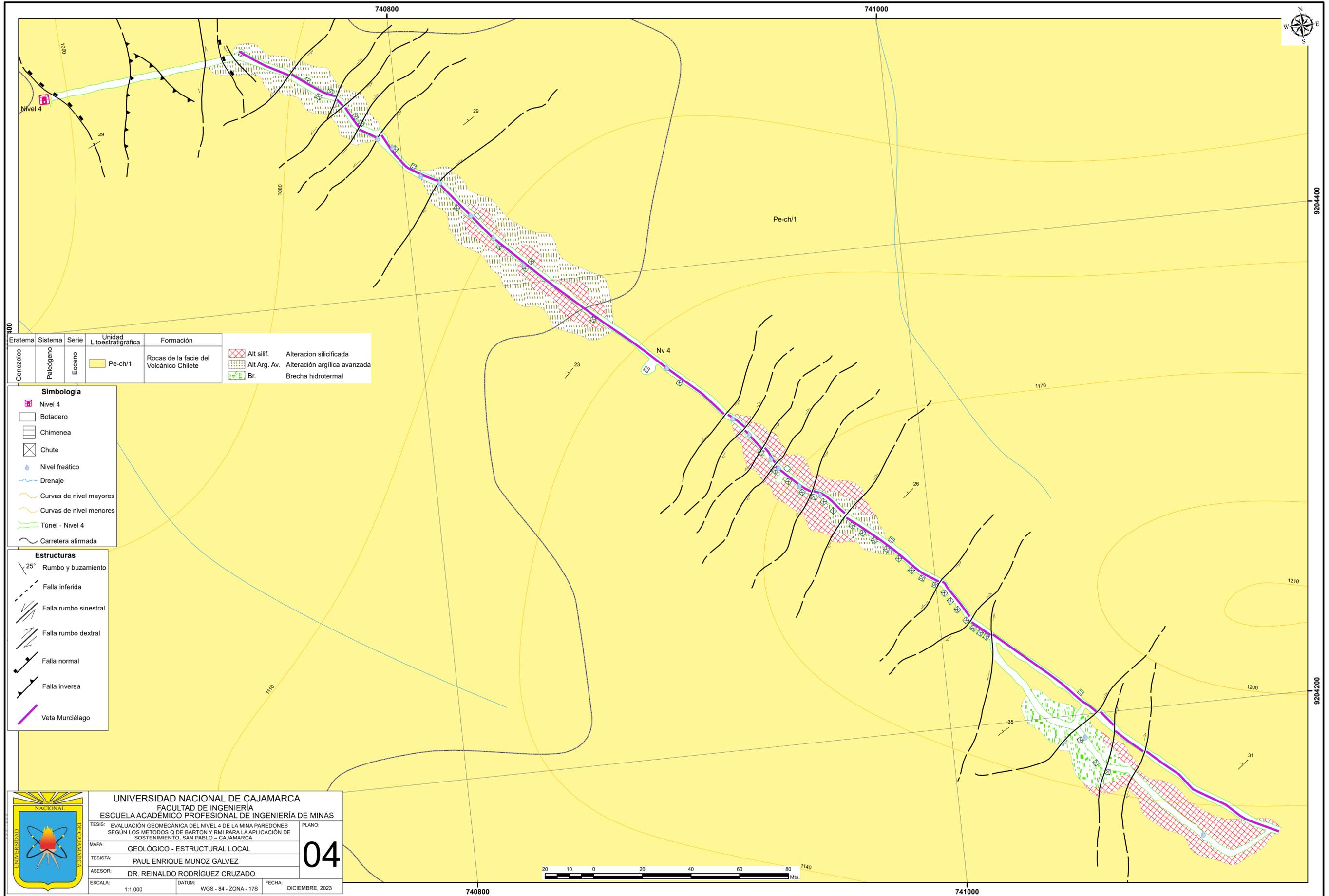
MAPA: **GEOLOGICO - ESTRUCTURAL REGIONAL**      **03**

TESISTA: **PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

ESCALA: 1:6,000      DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S      FECHA: DICIEMBRE, 2023





Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

	Alt silif.	Alteración silicificada
	Alt Arg. Av.	Alteración argílica avanzada
	Br.	Brecha hidrotermal

- Simbología**
- Nivel 4
  - Botadero
  - Chimenea
  - Chute
  - Nivel freático
  - Drenaje
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada

- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal
  - Falla inversa
  - Veta Murciélago



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA PLANO:

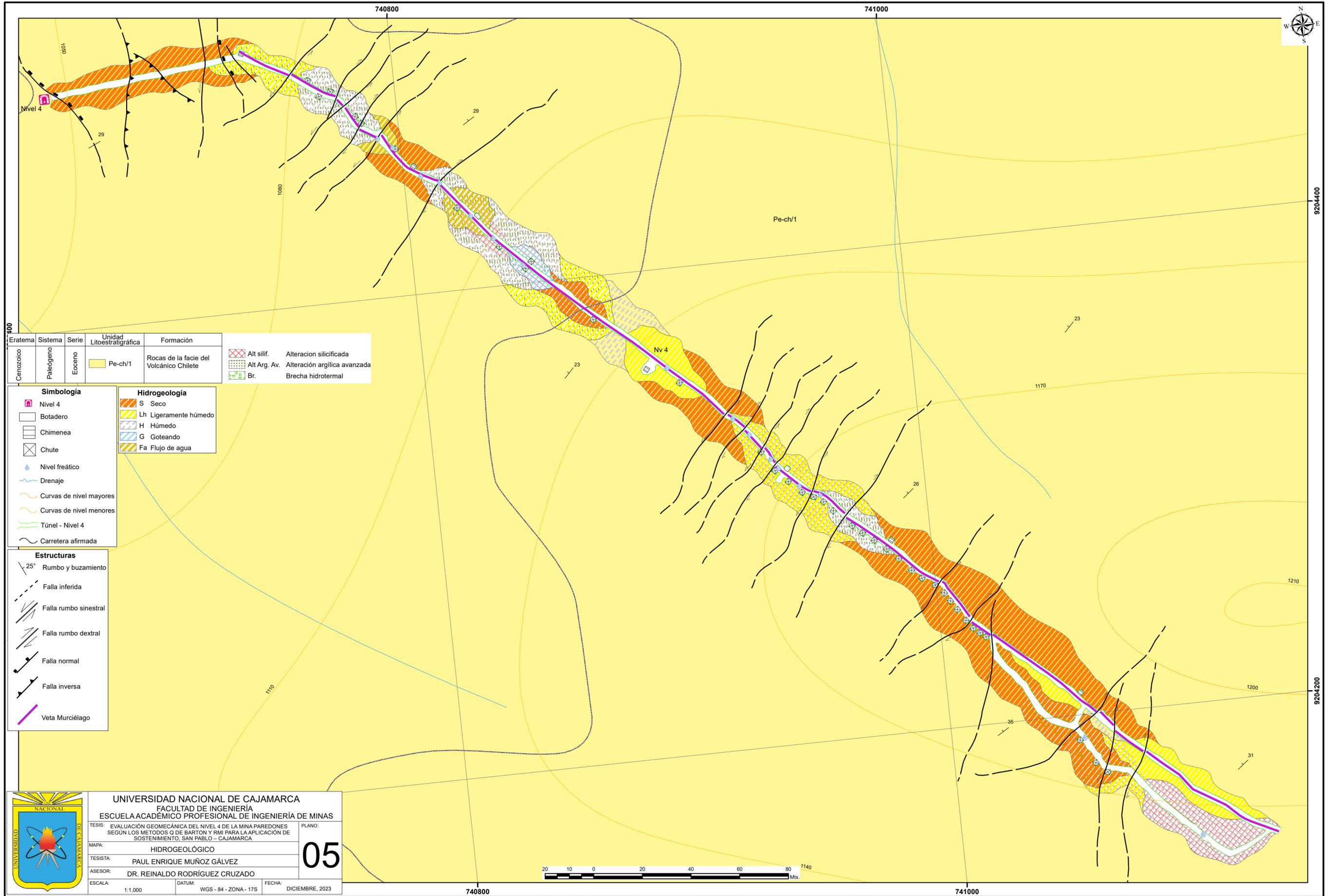
MAPA: **04**  
**GEOLOGICO - ESTRUCTURAL LOCAL**

TESISTA: **PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

ESCALA: 1:1,000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: DICIEMBRE, 2023





Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

Simbología	
	Nivel 4
	Botadero
	Chimenea
	Chute
	Nivel freático
	Drenaje
	Curvas de nivel mayores
	Curvas de nivel menores
	Túnel - Nivel 4
	Carretera afirmada

Hidrogeología	
	S Seco
	Lh Ligeramente húmedo
	H Húmedo
	G Goteando
	Fa Flujo de agua

Estructuras	
	25° Rumbo y buzamiento
	Falla inferida
	Falla rumbo sinistral
	Falla rumbo dextral
	Falla normal
	Falla inversa
	Veta Murciélago

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA PLANO:

MAPA: **HIDROGEOLÓGICO**

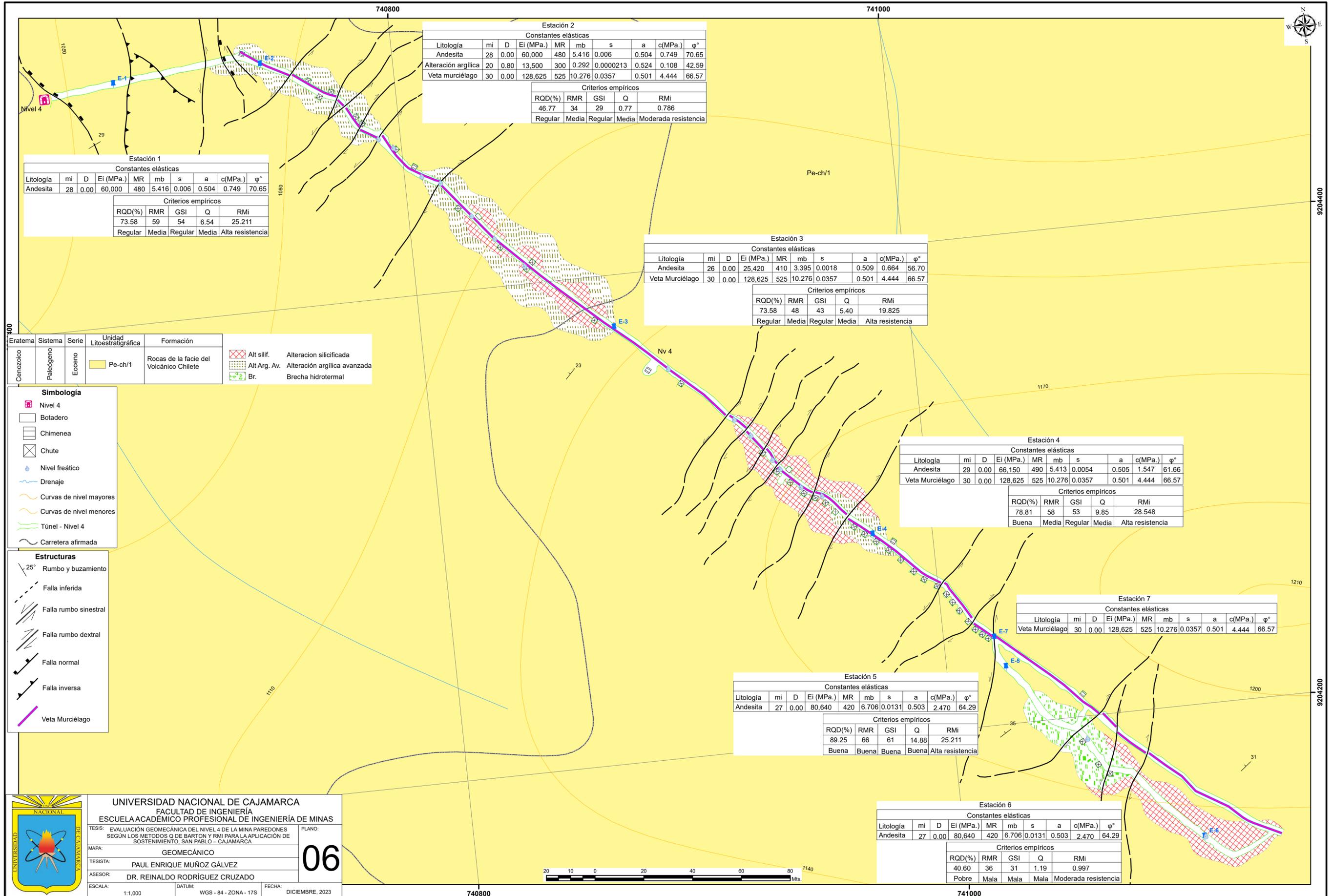
TESISTA: **PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

ESCALA: 1:1.000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: DICIEMBRE, 2023

05





**Estación 2**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	28	0.00	60,000	480	5.416	0.006	0.504	0.749	70.65
Alteración argílica	20	0.80	13,500	300	0.292	0.0000213	0.524	0.108	42.59
Veta murciélago	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
46.77	34	29	0.77	0.786
Regular	Media	Regular	Media	Moderada resistencia

**Estación 1**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	28	0.00	60,000	480	5.416	0.006	0.504	0.749	70.65

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
73.58	59	54	6.54	25.211
Regular	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 3**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	26	0.00	25,420	410	3.395	0.0018	0.509	0.664	56.70
Veta Murciélago	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
73.58	48	43	5.40	19.825
Regular	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 4**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	29	0.00	66,150	490	5.413	0.0054	0.505	1.547	61.66
Veta Murciélago	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
78.81	58	53	9.85	28.548
Buena	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 5**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	27	0.00	80,640	420	6.706	0.0131	0.503	2.470	64.29

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
89.25	66	61	14.88	25.211
Buena	Buena	Buena	Buena	Alta resistencia

**Estación 7**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Veta Murciélago	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

**Estación 6**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	27	0.00	80,640	420	6.706	0.0131	0.503	2.470	64.29

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
40.60	36	31	1.19	0.997
Pobre	Mala	Mala	Mala	Moderada resistencia

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

Alt silif.	Alteración silicificada
Alt Arg. Av.	Alteración argílica avanzada
Br.	Brecha hidrotermal

- Simbología**
- Nivel 4
  - Botadero
  - Chimenea
  - Chute
  - Nivel freático
  - Drenaje
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada

- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal
  - Falla inversa
  - Veta Murciélago



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGUN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA

MAPA: GEOMECÁNICO

TESISTA: PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

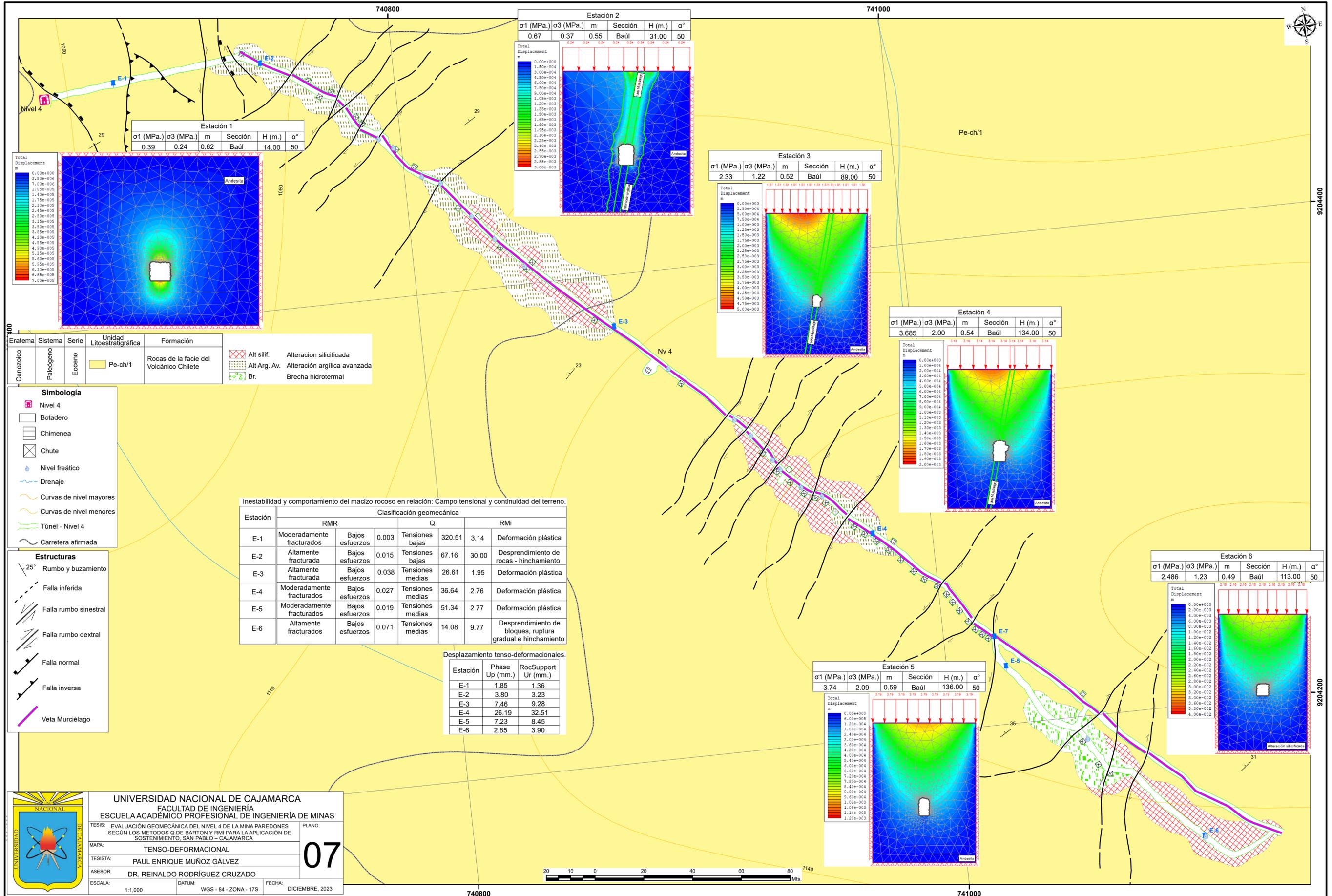
ESCALA: 1:1,000

DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S

FECHA: DICIEMBRE, 2023

06





**Estación 1**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
0.39	0.24	0.62	Baúl	14.00	50

**Estación 2**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
0.67	0.37	0.55	Baúl	31.00	50

**Estación 3**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
2.33	1.22	0.52	Baúl	89.00	50

**Estación 4**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
3.685	2.00	0.54	Baúl	134.00	50

**Estación 6**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
2.486	1.23	0.49	Baúl	113.00	50

**Estación 5**

$\sigma_1$ (MPa.)	$\sigma_3$ (MPa.)	m	Sección	H (m.)	$\alpha^\circ$
3.74	2.09	0.59	Baúl	136.00	50

Inestabilidad y comportamiento del macizo rocoso en relación: Campo tensional y continuidad del terreno.

Estación	Clasificación geomecánica					
	RMR	Q	RMI	Tensiones	esfuerzos	Comportamiento
E-1	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.003	Tensiones bajas	320.51 3.14	Deformación plástica
E-2	Altamente fracturada	Bajos esfuerzos	0.015	Tensiones bajas	67.16 30.00	Desprendimiento de rocas - hinchamiento
E-3	Altamente fracturada	Bajos esfuerzos	0.038	Tensiones medias	26.61 1.95	Deformación plástica
E-4	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.027	Tensiones medias	36.64 2.76	Deformación plástica
E-5	Moderadamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.019	Tensiones medias	51.34 2.77	Deformación plástica
E-6	Altamente fracturados	Bajos esfuerzos	0.071	Tensiones medias	14.08 9.77	Desprendimiento de bloques, ruptura gradual e hinchamiento

Desplazamiento tenso-deformacionales.

Estación	Phase Up (mm.)	RocSupport Ur (mm.)
E-1	1.85	1.36
E-2	3.80	3.23
E-3	7.46	9.28
E-4	26.19	32.51
E-5	7.23	8.45
E-6	2.85	3.90

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

- Simbología**
- Nivel 4
  - Botadero
  - Chimenea
  - Chute
  - Nivel freático
  - Drenaje
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada

- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal
  - Falla inversa
  - Veta Murciélago

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS MÉTODOS Q DE BARTÓN Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA PLANO: 07

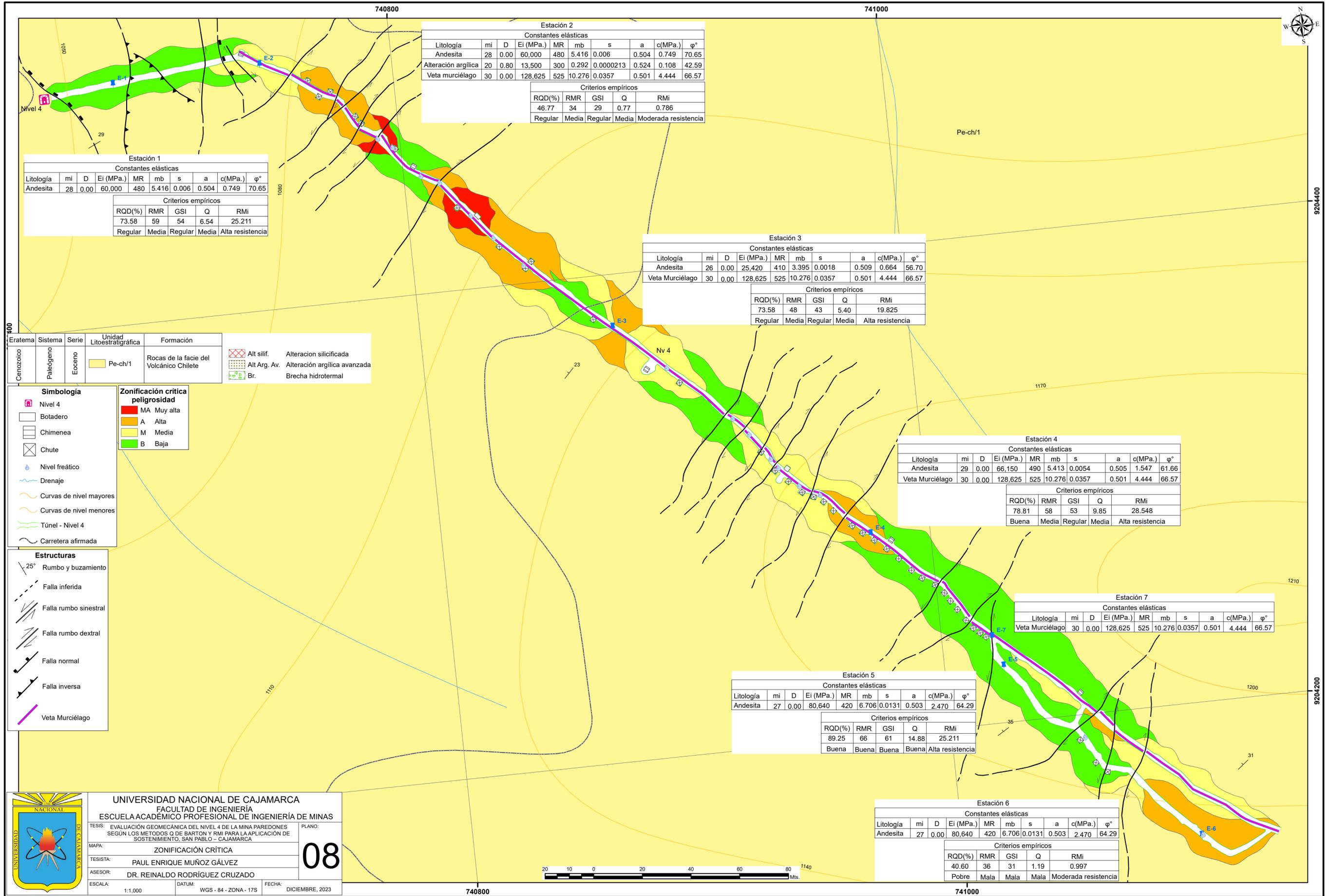
MAPA: TENSO-DEFORMACIONAL

TESISTA: PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

ESCALA: 1:1,000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: DICIEMBRE, 2023





**Estación 1**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	28	0.00	60,000	480	5.416	0.006	0.504	0.749	70.65

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
73.58	59	54	6.54	25.211
Regular	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 2**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	28	0.00	60,000	480	5.416	0.006	0.504	0.749	70.65
Alteración argílica	20	0.80	13,500	300	0.292	0.0000213	0.524	0.108	42.59
Veta murciélagos	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
46.77	34	29	0.77	0.786
Regular	Media	Regular	Media	Moderada resistencia

**Estación 3**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	26	0.00	25,420	410	3.395	0.0018	0.509	0.664	56.70
Veta Murciélagos	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
73.58	48	43	5.40	19.825
Regular	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 4**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	29	0.00	66,150	490	5.413	0.0054	0.505	1.547	61.66
Veta Murciélagos	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
78.81	58	53	9.85	28.548
Buena	Media	Regular	Media	Alta resistencia

**Estación 5**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	27	0.00	80,640	420	6.706	0.0131	0.503	2.470	64.29

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
89.25	66	61	14.88	25.211
Buena	Buena	Buena	Buena	Alta resistencia

**Estación 7**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Veta Murciélagos	30	0.00	128,625	525	10.276	0.0357	0.501	4.444	66.57

**Estación 6**

Constantes elásticas									
Litología	mi	D	Ei (MPa.)	MR	mb	s	a	c(MPa.)	$\varphi^\circ$
Andesita	27	0.00	80,640	420	6.706	0.0131	0.503	2.470	64.29

Criterios empíricos				
RQD(%)	RMR	GSI	Q	RMi
40.60	36	31	1.19	0.997
Pobre	Mala	Mala	Mala	Moderada resistencia

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Formación
Cenozoico	Paleógeno	Eoceno	Pe-ch/1	Rocas de la facie del Volcánico Chilete

	Alteración silicificada
	Alteración argílica avanzada
	Brecha hidrotermal

- Simbología**
- Nivel 4
  - Botadero
  - Chimenea
  - Chute
  - Nivel freático
  - Drenaje
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada

**Zonificación crítica peligrosidad**

	MA	Muy alta
	A	Alta
	M	Media
	B	Baja

- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal
  - Falla inversa
  - Veta Murciélagos

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA PLANO:

MAPA: **ZONIFICACIÓN CRÍTICA**

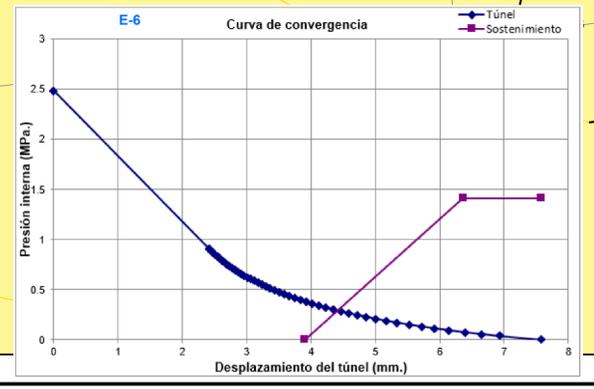
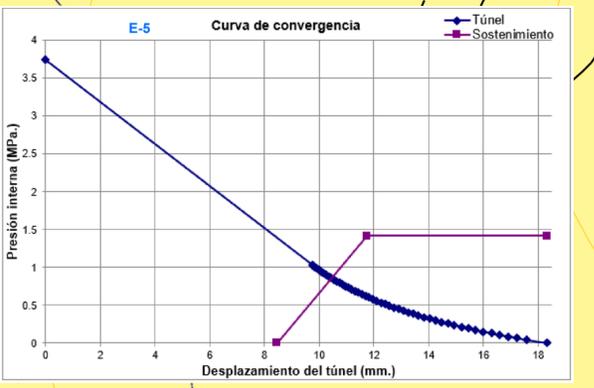
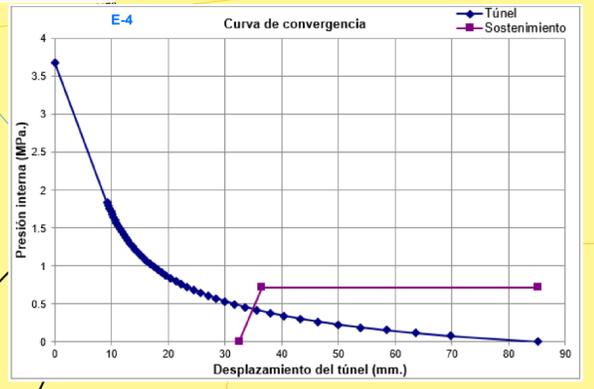
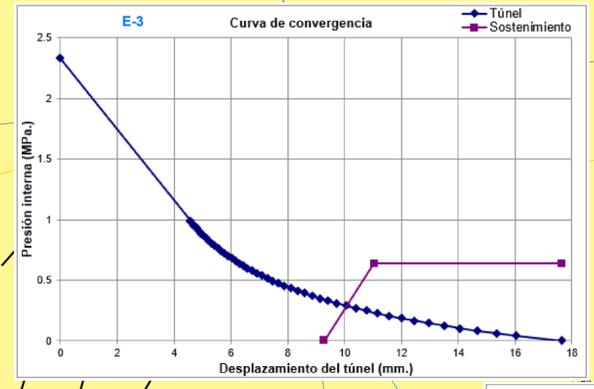
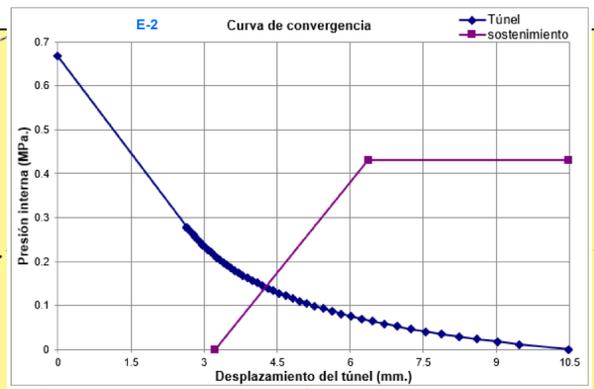
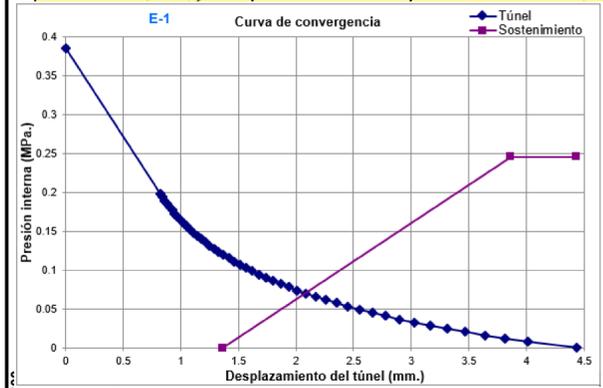
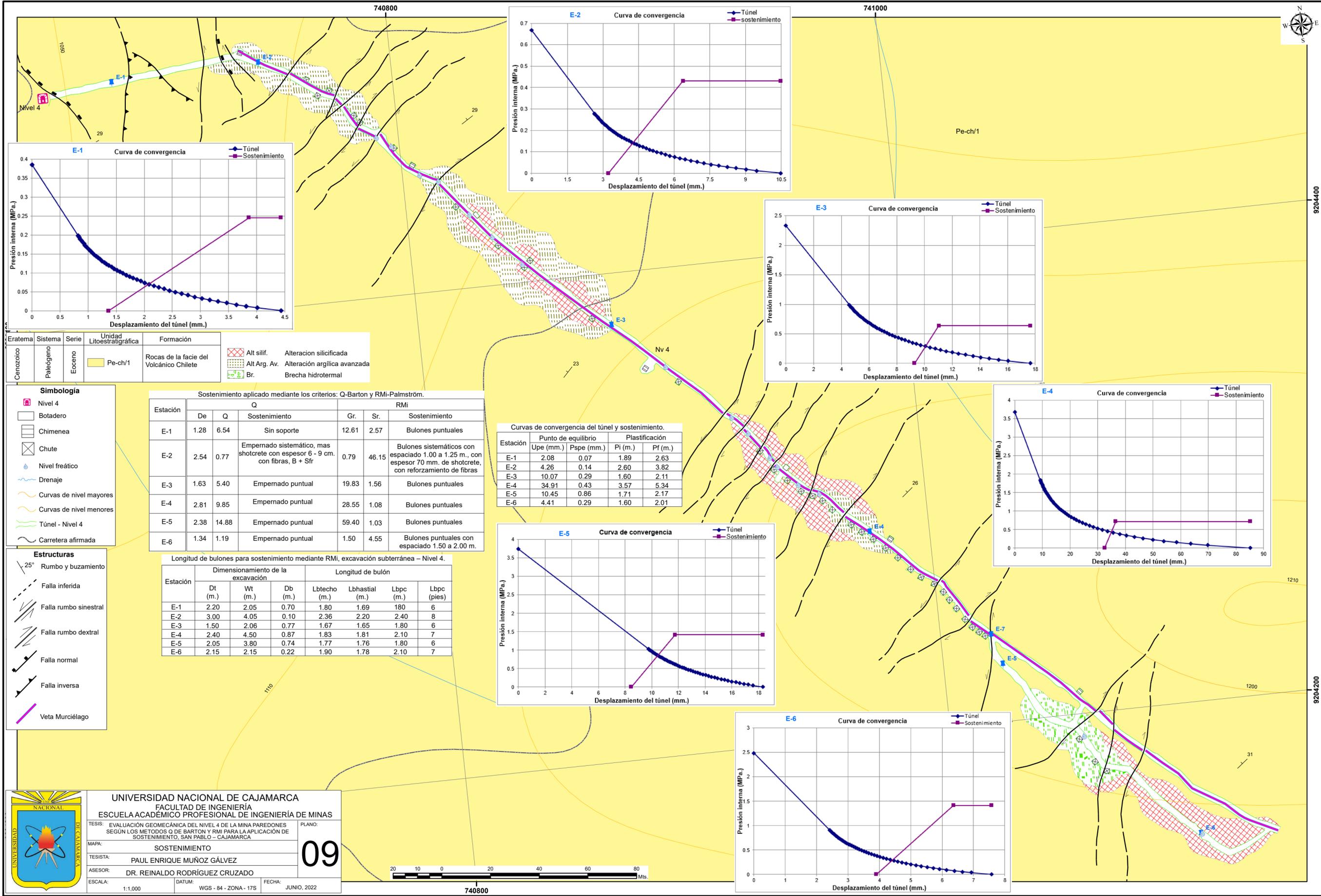
TESISTA: **PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ**

ASESOR: **DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

ESCALA: 1:1,000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: DICIEMBRE, 2023

08





Sostenimiento aplicado mediante los criterios: Q-Barton y RMI-Palmström.

Estación	Q		Sostenimiento	RMI		Sostenimiento
	De	Q		Gr.	Sr.	
E-1	1.28	6.54	Sin soporte	12.61	2.57	Bulones puntuales
E-2	2.54	0.77	Empernado sistemático, mas shotcrete con espesor 6 - 9 cm. con fibras, B + Sfr	0.79	46.15	Bulones sistemáticos con espaciado 1.00 a 1.25 m., con espesor 70 mm. de shotcrete, con reforzamiento de fibras
E-3	1.63	5.40	Empernado puntual	19.83	1.56	Bulones puntuales
E-4	2.81	9.85	Empernado puntual	28.55	1.08	Bulones puntuales
E-5	2.38	14.88	Empernado puntual	59.40	1.03	Bulones puntuales
E-6	1.34	1.19	Empernado puntual	1.50	4.55	Bulones puntuales con espaciado 1.50 a 2.00 m.

Curvas de convergencia del túnel y sostenimiento.

Estación	Punto de equilibrio		Plastificación	
	Upe (mm.)	Pspe (mm.)	Pi (m.)	Pf (m.)
E-1	2.08	0.07	1.89	2.63
E-2	4.26	0.14	2.60	3.82
E-3	10.07	0.29	1.60	2.11
E-4	34.91	0.43	3.57	5.34
E-5	10.45	0.86	1.71	2.17
E-6	4.41	0.29	1.60	2.01

Longitud de bulones para sostenimiento mediante RMI, excavación subterránea - Nivel 4.

Estación	Dimensionamiento de la excavación			Longitud de bulón			
	Dt (m.)	Wt (m.)	Db (m.)	Lbtecho (m.)	Lbhistal (m.)	Lbpc (m.)	Lbpc (pies)
E-1	2.20	2.05	0.70	1.80	1.69	1.80	6
E-2	3.00	4.05	0.10	2.36	2.20	2.40	8
E-3	1.50	2.06	0.77	1.67	1.65	1.80	6
E-4	2.40	4.50	0.87	1.83	1.81	2.10	7
E-5	2.05	3.80	0.74	1.77	1.76	1.80	6
E-6	2.15	2.15	0.22	1.90	1.78	2.10	7

- Simbología**
- Nivel 4
  - Botadero
  - Chimenea
  - Chute
  - Nivel freático
  - Drenaje
  - Curvas de nivel mayores
  - Curvas de nivel menores
  - Túnel - Nivel 4
  - Carretera afirmada
- Estructuras**
- 25° Rumbo y buzamiento
  - Falla inferida
  - Falla rumbo sinistral
  - Falla rumbo dextral
  - Falla normal
  - Falla inversa
  - Veta Murciélago

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL NIVEL 4 DE LA MINA PAREDONES SEGÚN LOS METODOS Q DE BARTON Y RMI PARA LA APLICACIÓN DE SOSTENIMIENTO, SAN PABLO - CAJAMARCA

MAPA: SOSTENIMIENTO

TESISTA: PAUL ENRIQUE MUÑOZ GÁLVEZ

ASESOR: DR. REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

ESCALA: 1:1,000 DATUM: WGS - 84 - ZONA - 17S FECHA: JUNIO, 2022

**09**

