UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

T E S I S

Análisis geomecánico para determinar el factor de seguridad del puente del Tajo K-470 S, Veta 3, Nv. 4430 – Mina Berlín - Cía. Minera Santa Luisa Unidad Pallca

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Erick Giancarlo MENDOZA HUAMAN

Asesor:

Ing. Julio Cesar SANTIAGO RIVERA

Cerro de Pasco – Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

T E S I S

Análisis geomecánico para determinar el factor de seguridad del puente del Tajo K-470 S, Veta 3, Nv. 4430 – Mina Berlín - Cía. Minera Santa Luisa Unidad Pallca

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Joel Enrique OSCUVILCA TAPIA	**Mg. Teodoro Rodrigo SANTIAGO ALMERCO**
PRESIDENTE	**MIEMBRO**

Mg. Edgar ALCANTARA TRUJILLO
MIEMBRO

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 039-2026

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. MENDOZA HUAMAN, Erick Giancarlo

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo:
"**Análisis geomecánico para determinar el factor de seguridad del puente del tajo K-470 S, veta 3, Nv. 4430 – Mina Berlín - Cía. Minera Santa Luisa Unidad Pallca"**

Asesor:
Ing. Julio César SANTIAGO RIVERA

Índice de Similitud: 19 **%**

Calificativo:

APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 07 de agosto de 2026

Firma Digital UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN [AVANZADA]

Firmado digitalmente por FERNANDEZ MALLQUI Raul FAU 20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 07.08.2026 17:10:54 -05:00

DEDICATORIA

Dedicado esta investigación a mis padres Victoria y Fidel, por cuidarme y darme la fortaleza para seguir adelante, el apoyo moral e incondicional para poder llegar a la meta y cumplir mis sueños en la carrera profesional, la profundidad de la mina refleja la profundidad de nuestro esfuerzo, y la riqueza que extraemos es la recompensa de nuestro trabajo duro.

AGRADECIMIENTO

A mi alma mater, la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, y en especial a la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de Minas, por haberme brindado una sólida formación académica y profesional, que ha sido fundamental en mi proceso de formación como ingeniero.

A mi asesor de tesis, por su valiosa guía, constante orientación y compromiso durante la elaboración y desarrollo del presente trabajo de investigación, cuyo apoyo fue esencial para el logro de los objetivos propuestos.

A la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca, por las facilidades otorgadas, la apertura y colaboración brindada para acceder a la información técnica y operativa necesaria que permitió la realización de este estudio.

El Autor

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal efectuar la evaluación geomecánica para establecer la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca. Para ello, se realizó una caracterización detallada del macizo rocoso mediante mapeo geomecánico, logueo de perforaciones diamantinas, análisis estructural y ensayos físico-mecánicos en laboratorio.

Se aplicaron metodologías reconocidas como el sistema RMR, el índice de calidad Q de Barton y el criterio de Barton-Bandis, complementadas con el uso de software especializado como RocData y Phase2. Los parámetros de resistencia al corte (cohesión y fricción) fueron estimados a partir de datos de campo y laboratorio, permitiendo alimentar modelos numéricos que simularon distintos escenarios de esfuerzo.

Los resultados mostraron que el factor de seguridad del puente geomecánico osciló entre 1.10 y 1.45, con un valor promedio de 1.28, el cual fue sometido a prueba estadística. La hipótesis nula no fue rechazada, lo que indicó que la estructura evaluada presentaba condiciones aceptables de estabilidad para continuar con la explotación minera.

Se concluyó que la metodología empleada fue efectiva para diagnosticar y garantizar la seguridad estructural en labores subterráneas. Asimismo, se recomendaron acciones de monitoreo continuo, sostenimiento localizado y aplicación de esta metodología en otras áreas de la unidad minera.

Palabras clave: *Geomecánica, Factor de Seguridad, Macizo Rocoso, RMR, Q de Barton, Simulación Numérica.*

ABSTRACT

The main objective of this research was to conduct a geomechanical evaluation to establish the safety of the geomechanical bridge in Pit K-470 S, Vein 3, level 4430 of the Berlin Mine, part of the Santa Luisa Mining Company – Pallca Unit. To this end, a detailed characterization of the rock mass was performed using geomechanical mapping, diamond drilling logging, structural analysis, and laboratory physical-mechanical testing.

Recognized methodologies such as the RMR system, the Barton Q quality index, and the Barton-Bandis criterion were applied, complemented by specialized software such as RocData and Phase2. Shear strength parameters (cohesion and friction) were estimated from field and laboratory data, allowing numerical models to be fed into simulations of different stress scenarios. The results showed that the safety factor of the geomechanical bridge ranged between 1.10 and 1.45, with an average value of 1.28, which was subjected to statistical testing. The null hypothesis was not rejected, indicating that the evaluated structure presented acceptable stability conditions for continued mining operations.

It was concluded that the methodology used was effective in diagnosing and ensuring structural safety in underground operations. Furthermore, continuous monitoring, localized support, and application of this methodology to other areas of the mining unit were recommended.

Keywords: *Geomechanics, Safety Factor, Rock Mass, RMR, Barton's Q, Numerical Simulation.*

INTRODUCCIÓN

En la minería subterránea, la seguridad estructural de las labores constituye un aspecto fundamental para garantizar la continuidad de las operaciones, la protección del personal y la eficiencia del proceso extractivo. Una adecuada evaluación geomecánica permite conocer el comportamiento del macizo rocoso, identificar zonas críticas y diseñar soluciones de sostenimiento acordes a las condiciones del terreno. En este contexto, el presente estudio se desarrolló en la Mina Berlín, específicamente en el puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca.

La investigación tuvo como finalidad analizar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso en el entorno del puente geomecánico, a través de la recopilación de datos en campo, el procesamiento de información estructural y la modelación numérica para determinar el factor de seguridad. Se aplicaron sistemas de clasificación como RMR y Q de Barton, junto con herramientas computacionales como RocData y Phase2, que permitieron simular las condiciones reales de esfuerzo y evaluar la estabilidad del macizo.

La importancia del estudio radicó en que el puente evaluado representa una estructura clave para la conectividad de labores y el acceso a zonas de producción. Su inestabilidad comprometería no solo la operación, sino también la seguridad del personal. Por tanto, el diagnóstico técnico y el análisis cuantitativo fueron esenciales para sustentar decisiones operativas y de sostenimiento.

El trabajo consta de la siguiente estructura:

Capítulo I Se considera el planteamiento del problema, formulación de problema, objetivos y asimismo y la justificación.

Capítulo II Se presenta el Marco Teórico: formado por los antecedentes de estudio, bases teóricas-científicas, definición de términos básicos, identificación de variables y la definición operacional de variables e indicadores.

Capítulo III Está constituida por la Metodología, donde se considera el tipo y diseño de investigación, población y muestra, el método, descripción de las técnicas e instrumentos de recolección de datos, sistema de hipótesis y operativización de variables.

Capítulo IV Está formada por la presentación de resultados a través de tablas y gráficos estadísticos con sus respectivos análisis y discusión de resultados.

El autor

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

INDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema 1

1.2. Delimitación de la Investigación 2

1.3. Formulación del Problema.....4

1.3.1. Problema general 4

1.3.2. Problemas Específicos 4

1.4. Formulación de objetivos.....5

1.4.1. Objetivo general.....5

1.4.2. Objetivos específicos 5

1.5. Justificación de la investigación 5

1.6. Limitaciones de la investigación.....6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio.....8

2.1.1. Antecedentes internacionales 8
2.1.2. Antecedentes nacionales 9
2.1.3. Antecedente local 12
2.2. Bases teóricas – científicas 13
2.2.1. Datos de la Unidad Minera 13
2.2.2. Marco geológico 15
2.2.3. Geomecánica 22
2.2.4. Método de explotación 49
2.2.5. Diseño de explotación 55
2.2.6. Secuencia de minado 56
2.2.7. Plan de producción 62
2.2.8. Clasificación geomecánica del macizo rocoso 63
2.2.9. Q de Barton 69
2.2.10. Unwedge 3.0 71
2.2.11. Phase 2 72
2.2.12. Factor de seguridad 73
2.2.13. Análisis Geomecánico (Variable Dependiente) 74
2.2.14. Factor de Seguridad del Puente Geomecánico (Variable Independiente) 83
2.3. Definición de términos básicos 84
2.4. Formulación de Hipótesis 86
2.4.1. Hipótesis general 86
2.4.2. Hipótesis específicas 86
2.5. Identificación de Variables 86
2.5.1. Variable Independiente 86
2.5.2. Variable Dependiente 86

2.6. Definición Operacional de Variables e Indicadores 87

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación 88
3.2. Nivel de investigación 89
3.3. Método de investigación 90
3.4. Diseño de investigación 91
3.5. Población y muestra 92
3.5.1. Población 92
3.5.2. Muestra 92
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 92
3.6.1. Técnicas de Recolección de Datos 92
3.6.2. Instrumentos de Recolección de Datos 93
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación 93
3.7.1. Selección de Instrumentos: 94
3.7.2. Validación de Instrumentos 94
3.7.3. Confiabilidad de Instrumentos 95
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos 95
3.9. Tratamiento estadístico 96
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica 97

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo 99
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados 100
4.2.1. Designación de Calidad de la Roca 100

4.2.2. Cohesión del Macizo por Litología.....101
4.2.3. Ángulo de Fricción por Litología 102
4.2.4. Clasificación RMR por Sector.....103
4.2.5. Factor de Seguridad por Simulación.....104
4.3. Prueba de hipótesis 105
4.4. Discusión de resultados.....106
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1..Accesibilidad a la mina Berlín de la Unidad Pallca.....13

Tabla 2. Mapeo geomecánica por celdas 23

Tabla 3. Conjunto de discontinuidades estructuras mayores, fallas 25

Tabla 4. Conjunto de discontinuidades estructuras inferiores 25

Tabla 5. Clasificación RMR y colores en CMS.....35

Tabla 6. Resumen de RMR de la roca- Pallca 36

Tabla 7. Propiedades de la masa rocosa.....47

Tabla 8. Desarrollos y preparaciones en la mina 52

Tabla 9. Plan de producción veta Berlín.....63

Tabla 10. Corrección por condición de discontinuidades.....68

Tabla 11. Corrección por orientación de discontinuidades.....69

Tabla 12. Características geotécnicas 69

Tabla 13. GSI Modificada.....71

Tabla 14. Operacionalización de Variables 87

Tabla 15. Índice RQD por Estación.....100

Tabla 16. Cohesión del Macizo por Litología 101

Tabla 17. Ángulo de Fricción por Litología 102

Tabla 18. Clasificación RMR por Sector.....103

Tabla 19. Factor de Seguridad por Simulación.....104

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Plano de Ubicación y Accesos a la Unidad Berlín 3

Figura 2. Plano de Ubicación y Accesos a la Mina 14

Figura 3. Columna estratigráfica de la unidad Pallca 18

Figura 4. Sección geológica de la mina Pallca 20

Figura 5. Sección geológica de la mina Pallca en planta 21

Figura 6. Ploteo de dispersión de polos del compósito de fallas 26

Figura 7.Contorneo estadístico de la concentración de polos del compósito de fallas 26

Figura 8. Planos principales del compósito de fallas 27

Figura 9.Rosetas del compósito de fallas 27

Figura 10.Ploteo de dispersión de polos de compósito de discontinuidades inferiores. 28

Figura 11. Concentración de los polos del compósito de discontinuidades inferiores 28

Figura 12. Compósito de discontinuidades menores 29

Figura 13.Rosetas de compósito de discontinuidades menores 29

Figura 14. Dominios estructurales 38

Figura 15. Caliza Alterada: RMR aproximado 42 (32-58) 39

Figura 16. Skarn: RMR aproximado 57 (46-71) 40

Figura 17.Skarn Alterado: RMR aproximado 31 (20-44) 41

Figura 18. Skarn-Mineral: RMR aproximado 61 (52-73) 42

Figura 19. Lutita: RMR aproximado 44 (40-53) 43

Figura 20. QP: RMR aproximado 52 (39-58) 44

Figura 21. Brecha: RMR aproximado 23 (16-29) 45

Figura 22. Presencia de agua en labores, mina Pallca 48

Figura 23. Ciclo de minado del método cut & fill (corte y relleno) 49

Figura 24. Plano de desarrollo de Pallca.....53
Figura 25. Plano de preparación para el ingreso a un block de mineral 54
Figura 26 Plano de infraestructura de servicios.....55
Figura 27. Riego y desate de rocas 56
Figura 28. Limpieza y acarreo 57
Figura 29. Limpieza y acarreo 58
Figura 30. Perforación 58
Figura 31. Carguío de explosivos 59
Figura 32. Malla de perforación.....60
Figura 33. Distribución de los taladros y carguío.....61
Figura 34. Accesorios y explosivos que se utilizan 62
Figura 35. UNWEDGE 3. O.....72
Figura 36. Phase 2.....73
Figura 37. Concepto de macizo rocosos y estructura 80
Figura 38. Tonelaje recuperado por frente.....101
Figura 39. Cohesión del Macizo por Litología 101
Figura 40. Ángulo de Fricción por Litología.....103
Figura 41. Clasificación RMR por Sector.....104
Figura 42. Factor de Seguridad por Simulación 105

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

El presente estudio se centró en el análisis geomecánico del macizo rocoso del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, con el objetivo de determinar el factor de seguridad del puente geomecánico existente, en el contexto de la explotación minera subterránea. En esta zona específica, la presencia de estructuras geológicas complejas y la superposición de labores mineras antiguas incrementaron significativamente los riesgos asociados a la estabilidad del macizo rocoso. La explotación de cuerpos mineralizados en condiciones geotécnicas desfavorables exigió una evaluación rigurosa de los parámetros mecánicos y estructurales del terreno para garantizar la continuidad operativa y la seguridad del personal.

Durante la planificación de las labores mineras, se identificó que el puente geomecánico constituía un elemento crítico dentro de la secuencia de minado, ya que cualquier fallo en su estabilidad podía comprometer la integridad estructural del tajo y afectar la seguridad global del sistema de explotación. Ante esta situación, se hizo necesario llevar a cabo una caracterización detallada del macizo rocoso, considerando

tanto su resistencia intacta como su comportamiento ante esfuerzos inducidos por la minería.

Para ello, se realizó una recopilación y análisis de información geológica y geotécnica existente, complementada con trabajos de campo y ensayos de laboratorio. La información recolectada permitió modelar el comportamiento del macizo mediante herramientas computacionales especializadas como Dips (análisis estructural), RocData (propiedades geomecánicas), RocSupport (estabilidad de túneles) y Phase2 (análisis de esfuerzos y deformaciones en 2D).

La evaluación de diversas alternativas de secuencia de minado, considerando diferentes escenarios de explotación múltiple de estructuras paralelas en sentido horizontal y vertical, permitió identificar la configuración que generaba la menor concentración de esfuerzos y garantizaba la estabilidad del puente geomecánico. De este modo, se buscó asegurar una explotación técnica, eficiente y segura, minimizando riesgos operacionales y económicos.

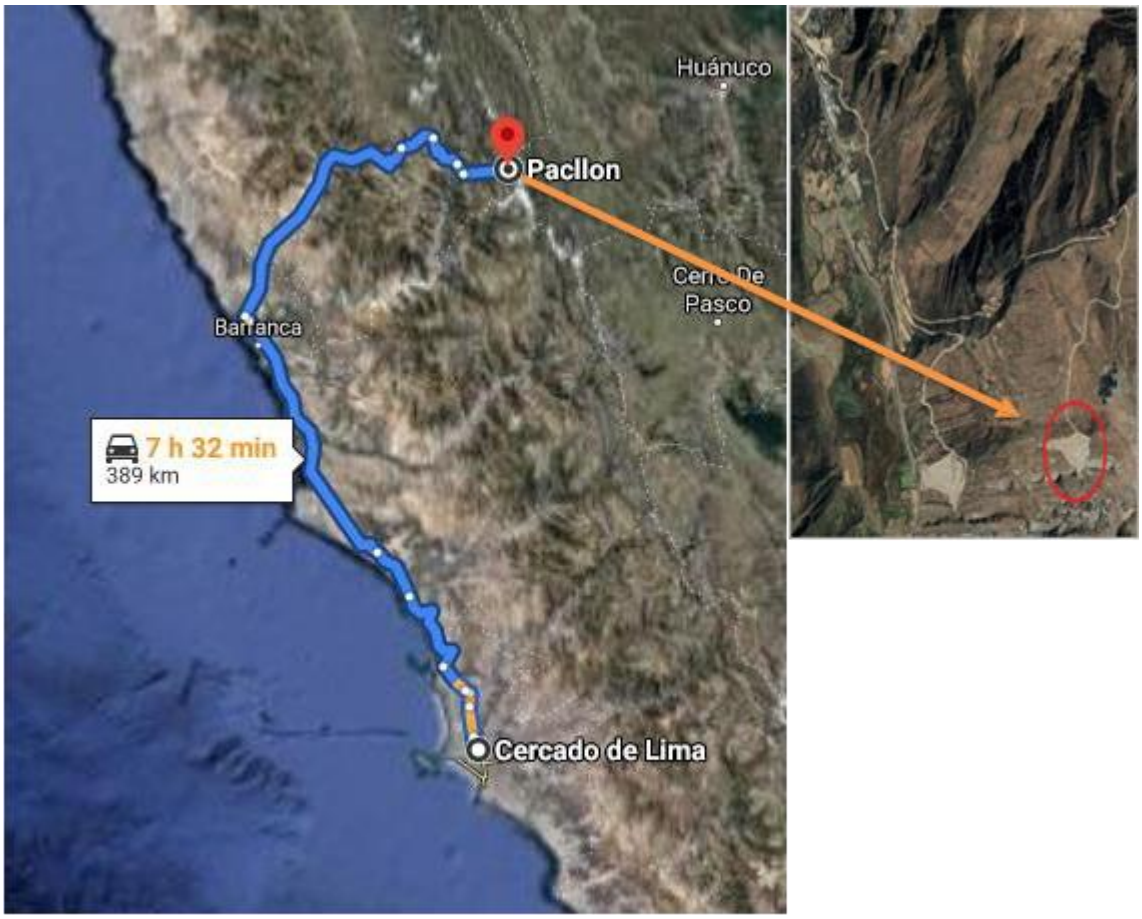
En resumen, el problema de investigación surgió ante la necesidad de validar geomecánicamente la estabilidad del puente geomecánico del tajo en estudio, en función de sus condiciones estructurales y del diseño minero proyectado, lo que motivó la realización de este análisis técnico-científico.

1.2. Delimitación de la Investigación

La presente investigación se llevó a cabo en la Unidad Berlín de la Compañía Minera Santa Luisa está ubicada en el distrito de Pacllón, provincia de Bolognesi, región de Áncash, Perú — forma parte del proyecto Pallca, que incluye los cuerpos minerales denominados Berlín y Culebra, se halla en las cabeceras del río Llámac, al sureste de Ancash y al noreste de la Cordillera Huayhuash, a unos ~210 km al norte de Lima La zona de Pallca, que abarca Berlín, está entre 3 800 y 5 200 msnm. Estudios

geológicos detallan que la mineralización principal de Berlín ocurre alrededor de 4 000–4 100 msnm.

Figura 1 *Plano de Ubicación y Accesos a la Unidad Berlín*



Fuente: *Mapa de ubicación de la Mina Berlín - Cía. Minera Santa Luisa Unidad Pallca*

La presente investigación se delimitó geográfica, temporal y temáticamente en función de los objetivos planteados. El estudio se llevó a cabo en la Mina Berlín, específicamente en el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca, ubicada en el departamento de Áncash, Perú.

Temporalmente, la investigación se desarrolló durante el año 2024, periodo en el cual se recopiló la información técnica, se procesaron los datos geomecánicos y se realizaron los análisis mediante software especializado.

Temáticamente, el estudio se enfocó en el análisis geomecánico del macizo rocoso con el objetivo de determinar el factor de seguridad del puente geomecánico dentro del contexto de la explotación minera subterránea. Se evaluaron los parámetros estructurales y geotécnicos del macizo, considerando distintos escenarios de explotación y su influencia en la estabilidad del sistema.

El estudio se circunscribió únicamente al puente geomecánico del Tajo K-470 S, sin considerar otras zonas de la mina ni otros niveles o vetas, ya que el objetivo fue proporcionar un análisis detallado y específico para esta estructura crítica.

1.3. Formulación del Problema

Durante la planificación y desarrollo de las actividades mineras en el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, surgió la necesidad de evaluar la estabilidad del puente geomecánico con el fin de garantizar la seguridad estructural del macizo rocoso y la continuidad de las labores subterráneas. Ante esta situación, se planteó la siguiente interrogante:

1.3.1. Problema general

¿Fue factible efectuar la evaluación geomecánica para establecer la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, ¿nivel 4430 – Mina Berlín?

1.3.2. Problemas Específicos

a. ¿Se pudo realizar la caracterización geomecánica para determinar los parámetros del puente en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín?

b. ¿Fue posible efectuar el control de seguridad de la Veta 3 en el nivel 4430 de la Mina Berlín?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Efectuar la evaluación geomecánica para establecer la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 – Mina Berlín.

1.4.2. Objetivos específicos

a. Realizar la caracterización geomecánica para determinar los parámetros del puente en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín**.**

b. Efectuar el control de seguridad de la Veta 3 en el nivel 4430 de la Mina Berlín.

1.5. Justificación de la investigación

La presente investigación se justificó por la necesidad de garantizar la seguridad estructural del puente geomecánico ubicado en el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca. La complejidad geológica del yacimiento, sumada a la presencia de estructuras paralelas y labores subterráneas en diferentes niveles, demandó una evaluación rigurosa del macizo rocoso para asegurar la estabilidad durante la explotación.

El propósito fundamental del diseño de una excavación subterránea consistió en aprovechar las propiedades del macizo rocoso como principal elemento estructural, minimizando su disturbio durante la excavación y reduciendo al máximo la necesidad de sistemas de soporte. Para lograr dicho propósito, fue indispensable determinar con precisión las condiciones geológicas y geomecánicas existentes en el área de excavación, así como realizar una adecuada simulación de estas condiciones, a fin de garantizar la estabilidad y seguridad de las labores subterráneas.

La combinación de sistemas de clasificación geomecánica del macizo rocoso y el empleo de métodos de análisis numérico resultó esencial para obtener una evaluación

precisa del comportamiento del terreno. Estas herramientas permitieron identificar zonas críticas, definir estrategias de soporte adecuadas y prever el comportamiento del macizo frente a las cargas inducidas por las actividades mineras. De esta manera, se logró optimizar el diseño de excavaciones, garantizando condiciones seguras, eficientes y sostenibles durante su ejecución y operación.

En el caso específico del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, se justificó plenamente la necesidad de llevar a cabo un análisis geomecánico detallado, dado que se trataba de una estructura clave dentro del desarrollo de la explotación. Su inestabilidad habría comprometido la integridad de los tajeos, la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones.

En consecuencia, esta investigación fue relevante desde el punto de vista técnico y operativo, ya que proporcionó criterios sólidos para la toma de decisiones en el diseño y desarrollo de las labores subterráneas. Además, representó un aporte significativo al conocimiento aplicado de la ingeniería de minas, al integrar herramientas teóricas y computacionales en la evaluación de la estabilidad de estructuras geomecánicas en minería subterránea.

1.6. Limitaciones de la investigación

Una de las principales limitaciones identificadas en esta investigación estuvo relacionada con la evaluación del macizo rocoso, un aspecto crítico en toda operación minera subterránea. Esta evaluación se volvió particularmente compleja debido a los constantes cambios en las características geológicas que se presentaron durante el avance de las labores de desarrollo y producción. Dichas variaciones influyeron en la precisión de los datos recolectados y, en consecuencia, en la interpretación geomecánica.

Las labores subterráneas, tanto de desarrollo como de explotación, se ejecutaron directamente en el macizo rocoso que rodea al yacimiento, incluyendo zonas de la caja y el piso. En estas áreas, la heterogeneidad litológica, la presencia de zonas de falla o fracturamiento y los cambios de resistencia del material dificultaron la generalización de parámetros geomecánicos, lo que exigió un enfoque analítico caso por caso.

Además, en algunos sectores no se contó con acceso completo o actualizado a información geotécnica histórica, lo que limitó la posibilidad de comparar condiciones pasadas con las actuales. A pesar de estas limitaciones, se emplearon herramientas de modelamiento numérico y métodos de caracterización confiables que permitieron obtener resultados representativos y útiles para los fines del estudio.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Rincon, B. (2021), de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sustenta su tesis "**Caracterización Geomecánica del Macizo Rocoso del Área del Contrato 01-068-96 "Cooperativa Cooprocarbon Sugamuxi" Municipio de Gámeza Boyacá."**. Determina que: En la zona de estudio se encontraron Arcillas de la formación Guaduas, areniscas de la formación Guaduas y principalmente carbones de la formación Guaduas, los cuales actualmente son explotados, pero su estabilidad se ve afectada por la alta sismicidad debido a la presencia de fallas. Además de esto la zona se ve afectada por la actividad minera subterránea que allí se realiza.

La cooperativa Cooprocarbón Sugamuxi posee tres bloques carboníferos delimitados por fallas regionales los cuales se denominan bloque Guanto Norte, Bloque Guanto Sur y Bloque Motua.

El presente estudio se realizó con la clasificación propuesta por Bieniawski, la cual se concluyó clasificando el macizo rocoso como clase III calidad media con una

valoración correspondiente al rango 60-41 (RMR) con una cohesión aproximada de 2-3 kg/cm2, y un ángulo de rozamiento de 25°-35°. Indicando que es medianamente estable, pero al variar alguna de las condiciones estudiadas este podría tender a fallar.

Observando las características geomecánicas de la zona se encontró un movimiento de remoción en masa entre el bloque Guantó Norte y el bloque Motua, además allí se presenta el paso de la falla Tópaga, la Falla Coyata, y el anticlinal de Tierramiqui.

Pinilla, A, (2018), de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sustenta su tesis "**Evaluación geomecánica para el diseño de nuevas alternativas de explotación bajo tierra para la mina El Uvo Acerías Paz del Rio S.A."**. Desde la industria minera tiene como objetivos la optimización y seguridad de los procesos que se involucran en la realización de una operación, procesos ligados a aspectos económicos, rentables y competitivos. La empresa Acerías Paz del Río cumple papel fundamental en el mercado del acero colombiano y para esto cuenta con la operación que se encarga de la extracción del mineral de hierro en la mina el Uvo. Este trabajo abarca la evaluación geomecánica de la zona 73C y 71T del banco de mineral de hierro teniendo en cuenta la variabilidad de los materiales y los aspectos estructurales presentes en el área de estudio con relación a los túneles del Sexto y Séptimo Nivel Inferior con el fin de determinar las alternativas en cuanto a métodos de explotación para las zonas ya mencionadas cumpliendo los aspectos técnicos y operacionales requeridos por la empresa Acerías Paz del Río.

2.1.2. Antecedentes nacionales

RIOS, R. (2019); de la Universidad Nacional Federico Villareal, desarrolla la tesis "**Evaluación geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros "Los Ángeles"** El presente trabajo de

investigación aborda el desarrollo de evaluación geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles” en función del factor de seguridad y los costos unitarios de sostenimiento. La investigación fue desarrollada en el emplazamiento de los túneles carreteros proyectados, los cuales se ubican en los distritos de Lurigancho – Chosica y Ricardo Palma, en las provincias de Lima y Huarochirí, departamento de Lima, el proyecto de los túneles atraviesa el Batolito de la Costa Peruana, consta de 02 túneles (eje 01 y eje 02), los cuales son paralelos entre sí (gemelos) de 12 960m y 13 000m, respectivamente. Tiene como objetivos determinar la influencia de la evaluación geomecánica en la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles”, para lo cual se estableció 13 estaciones geomecánicas tomando datos a lo largo de los ejes, luego, se procedió a hacer uso de las clasificaciones geomecánicas obteniendo roca del tipo II y III, según Bieniawski; y roca media y buena, según Barton. Asimismo, se utilizaron las recomendaciones de sostenimientos según el tipo de roca propuestas por cada autor. Se determinaron las familias de diaclasas más representativas en cada estación geomecánica mediante el software Dips V.5.1. Se evaluó cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del macizo rocoso en los túneles, mediante el software Phase 2 V.8.0, para este caso se eligió el criterio de rotura de Hoek – Brown al tratarse de roca, los resultados mostraron que el más costoso y sobredimensionado estructuralmente fue el de Bieniawski, mientras que Barton fue el más acertado, cumpliendo con los factores de seguridad establecidos por la norma, siendo éste, el más económico y viable. Por lo tanto, para esta investigación las recomendaciones por Barton se ajustan mejor a la realidad peruana (técnico – económico) debido al gasto público que ejerce el estado en este tipo de obras. Finalmente, se llegó a la conclusión de que todas las hipótesis planteadas estaban en lo cierto.

CONDORI, N. (2017); de la Universidad Nacional del Altiplano, presentó la tesis "**Evaluación geomecánica y estabilidad de labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura**" El presente estudio de investigación es de suma importancia la mecánica de rocas o más ampliamente la geomecánica, tal como se le conoce en la actualidad, es una disciplina que en los últimos años ha tenido grandes progresos, convirtiéndose en una herramienta tecnológica más en la industria minera en particular y en otras ramas de la ingeniería en general. Para su aplicación efectiva en la evaluación geomecánica y estabilidad de labores subterráneas, a donde se dirige la presente tesis, las actividades geomecánicas que se realizan en una mina deben ser conducidas en un medio ambiente organizacional que permita la integración de conceptos, información y actividad analítica de parte de todo el personal involucrado con la explotación de la mina. La ejecución de esta investigación ha sido con el objetivo de evaluar las características geomecánicas y la estabilidad de las labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura, es decir, las condiciones geomecánicas del sitio y así determinar la estabilidad de las excavaciones de labores subterráneas. Respondiendo a la hipótesis planteada en la investigación, se tiene como resultados característicos de macizo rocoso desde regular a buena calidad, con esta información se procedió a determinar la estabilidad de las excavaciones a través de gráficos empíricos y finalmente se realizó un análisis numérico de esfuerzo deformación. Las excavaciones de sección 3.5 x 3.5 m como son las Cortadas de exploración en gran parte no requerirán sostenimiento, sin embargo, de presentarse un terreno de mala calidad será necesaria la evaluación de sostenimiento. Las excavaciones de sección 4.5 x 4.5 m como es el caso de la Rampa San Gabriel, requerirá un sostenimiento de tipo permanente que puede ser pernos helicoidales distribuidos de manera sistemática y finalmente las excavaciones de

sección 7.0 x 7.0 m destinadas a ser Cámaras de perforación diamantina requerirán un sostenimiento más robusto como es el caso del Shotcrete más empernado sistemático.

2.1.3. Antecedente local

PARIONA FLORES, Jose Carlos (2022) en su tesis: "**Estudio geomecánico y su influencia en diseño de mallas perforación y voladura en Marsa – 2021**" para la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, menciona:

La perforación y voladura son actividades cotidianas en la actividad minera. Para realizar labores seguras se requiere del uso adecuado de la cantidad de explosivos de acuerdo a las características de la masa rocosa, por lo que para el trabajo de investigación planteamos como problema ¿Cómo el estudio geomecánico influye el diseño de las mallas perforación y voladura en MARSA 2021? Por lo que como objetivo se planteó establecer cómo el estudio geomecánico influye el diseño de las mallas perforación y voladura en Minera Aurífera Retamas S.A. La investigación es del tipo aplicada, de nivel descriptivo y explicativo, se usó el método científico y el diseño fue el descriptivo comparativo. Como población se consideró a las labores horizontales del Nivel 3220 y como muestra al subnivel SN 3257-S y el crucero XC 9109-NE. Realizada la investigación se hizo el diseño de nuevas mallas de perforación y voladura en base al estudio geomecánico que indicó que las labores se encuentran en rocas de calidad IVA, mala. En el subnivel SN 3257-S, se ha reducido el número de taladros perforados en 10,3% y los taladros con carga explosiva se disminuyeron en 29%. Además, en la misma labor el factor de carga era 1,86 kg/m3 y se disminuyó a 1,58 kg/m3, es decir 18% menos. En el caso del crucero XC 9109-NE el factor de potencia era de 1,82kg/m3. Con el nuevo diseño se logra obtener un factor de carga promedio de 1,65kg/m3, que significa una reducción del 10,4%; es decir, existe menor consumo de explosivo que lo realizado

anteriormente. De modo que se reduce el costo de explosivos y se mejora la seguridad en las labores.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Datos de la Unidad Minera

Ubicación

La mina Berlín de la Unidad Pallca está ubicada en la localidad de Llamac, distrito de Pacllón, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash. Está comprendida entre una altura de los 3800 a 5000 m s. n. m.

Está situado a 210 km al norte de Lima y a 40 km al sur de la mina Huanzalá de la Cía. Minera Santa Luisa S.A. subsidiaria de Mitsui Mining Smelting.

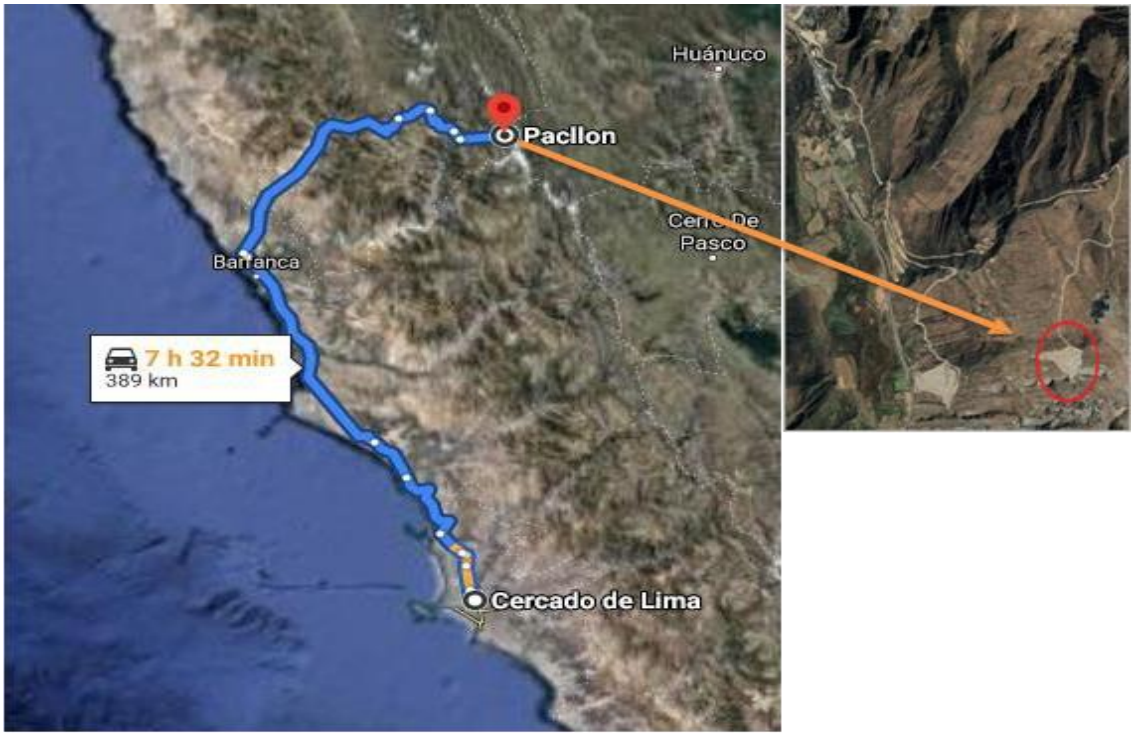
Tabla 1. *Accesibilidad a la mina Berlín de la Unidad Pallca*

COORDENADAS UTM		
NORTE	NORTE	NORTE
8’870,249.380N	285,497.220E	3,800 a 5,000 m s. n. m.

Fuente: *Geología mina Berlín de la Unidad Pallca*

Figura 2. *Plano de Ubicación y Accesos a la Mina*





Fuente: *Geología mina Berlín de la Unidad Pallca*

Accesibilidad

El acceso a la unidad minera Pallca se efectúa por vía terrestre, tal como se detalla en el siguiente cuadro, además se debe tener en cuenta la ruta trocha carrozable del campamento a la mina, que son en un total de 5 km.

Ruta origen	**Ruta**				**Kilómetros**
LIMA	Pativilca	Conococha	Huanzala	Pallca	496 km
	Pativilca	Pachacoto	Huanzala	Pallca	530 km
	Huánuco	La Unión	Huallanca	Pallca	590 km

2.2.2. Marco geológico

Geomorfología

La zona de estudio presenta un paisaje, con sus picos y nevados como el Yerupajá, Jirishinca, Rondoy, Rasac, entre otros.

El área lo constituyen principalmente cinco quebradas que conforman el drenaje principal de la zona, sus causes son un tanto estrechos debido a la actividad tectónica.

Geología regional

En el área de explotación del proyecto Pallca está situado en los depósitos del Cretáceo.

Estratigráficamente la región se halla dominado por la presencia de rocas sedimentarias que van desde el Jurasico Superior, formación Chicama hasta el Terciario Medio, volcánicos Tsacra.

a. Grupo Goyllarisquizga

- **Formación Chimú**

  Es la formación más antigua de la región, constituido por ortocuarcitas de color gris claro a blanco, de grano medio, compacta y masiva con intercalaciones de lutitas de color negro.

- **Formación Santa**

  Consiste en sedimentos marinos fosilíferos conformadas por calizas gris-azuladas, el espesor de sus estratos varía desde 0.1m a 1.0m; algunas veces pueden presentar concreciones de Chert.

- **Formación Carhuaz**

  Consiste principalmente de sedimentos alterados de lutitas arenáceas laminadas de color gris oscuro a marrón mientras que las areniscas presentan una coloración gris pálido a marrón de grano fino a medio.

- **Formación Farrat**

  Constituye la unidad más discreta cuyo grosor es mínimo, yace directamente sobre la formación Carhuaz conformadas por cuarcitas areniscas laminadas de color gris pálido a blanco de grano medio a grueso con algunas intercalaciones de lutitas arenáceas.

b. Grupo Machay

- **Formación Pariahuanca o Inca**

  Esta formación está constituida por calizas macizas compactas de grano medio a fino presenta una coloración gris-azulado en estratos de 1.0 a 2.0 m de espesor. Algunas veces presentan una ligera apariencia rugosa y cuando esto sucede puede asemejarse a las calizas del santa, también se pueden observar intercalaciones delgadas de areniscas, lutitas y cuarcitas.

- **Formación Pariatambo**

  Esta formación está conformada mayormente de sedimentos alterados lutitas negras y calizas bituminosas de color gris–oscuro a negro con contenidos de fósiles. Son frecuentes las intercalaciones de las calizas en estratos delgados.

- **Formación Jumasha**

  Está constituido de sedimentos marinos calizas dolomíticas masivas de colores que van desde marrón naranja a marrón amarillento y gris.

c. Rocas ígneas

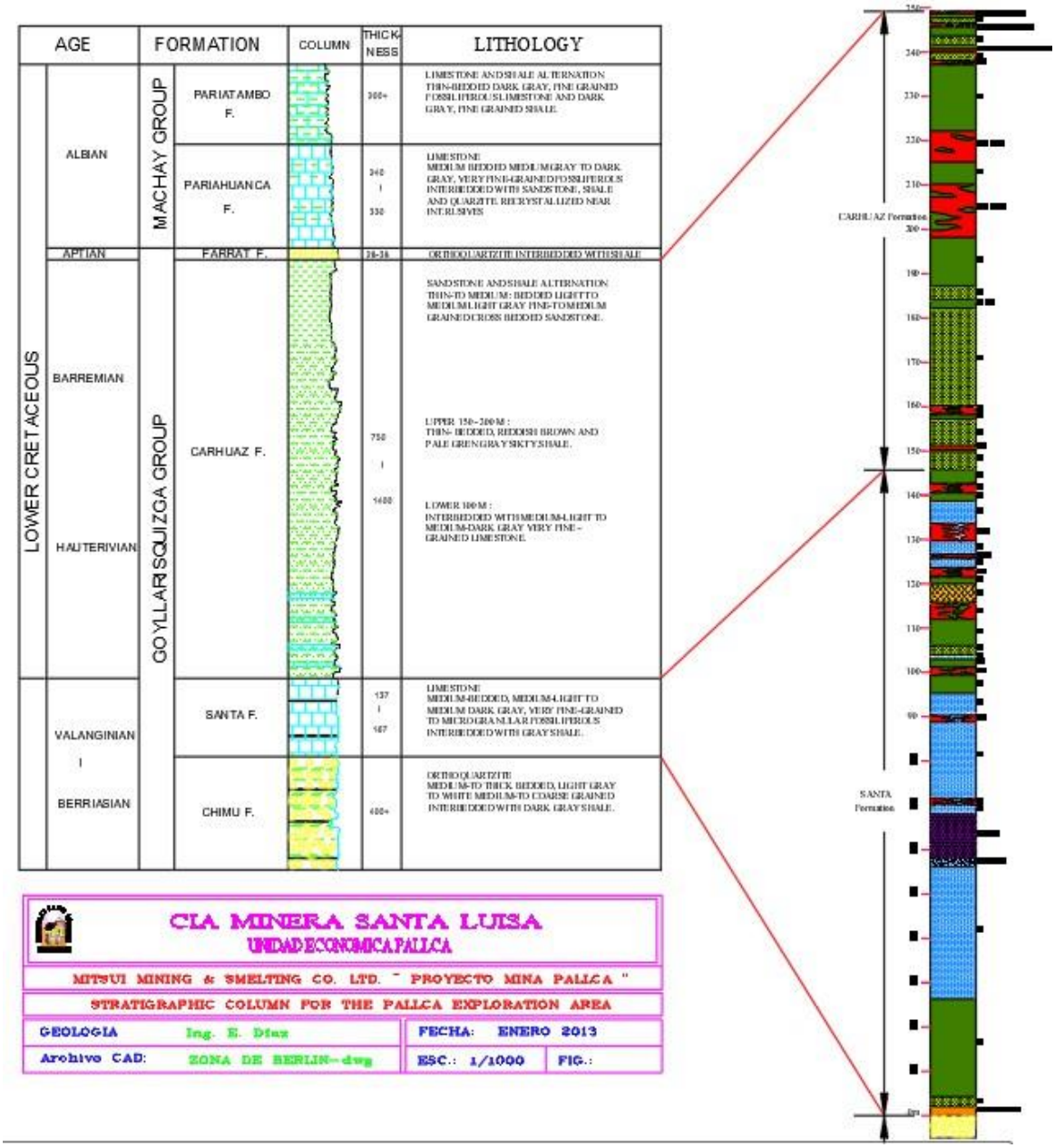
- **Rocas volcánicas extrusivas**

  Estas rocas volcánicas presentan una textura afanítica a porfirítica de color gris verdoso y se encuentran compuestos de derrames lávicos y brechas de andesitas, dacitas y tobas de coloración muy variable.

- **Rocas plutónicas intrusivas**

  En intrusivos en sus diferentes formas como: stock, diques, sill, etc. su composición varía desde granodiorita, tonalita pórfido granítico y pórfido cuarcífero. Estas rocas en su mayoría presentan una textura equi-granular muy definida.

Figura 3 *Columna estratigráfica de la unidad Pallca*



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Geología local

En el área de estudio, se han identificado cuatro diferentes tipos litológicos, se pueden nombrar en su orden de importancia en cuanto a su presencia a: la Caliza, principal tipo de roca (de la formación Santa en la zona de Berlín y de la formación Pariahuanca en la zona de Culebra mina); el skarn, producto del reemplazamiento meta

somático para el emplazamiento del mineral; las lutitas, presente como intercalaciones entre las calizas; y el Pórfido cuarcífero, correspondiente a las rocas intrusivas.

Las calizas de la formación Santa, suprayacendo a la formación Chimú, presentan pequeñas intercalaciones de lutitas negras, estas constituyen la principal zona de mineralización. La formación Santa se encuentra ampliamente expuesta sobre todo en la zona de Berlín.

Las areniscas y lutitas de la formación Carhuaz presentan una coloración gris – oscuro a marrón de grano fino a medio.

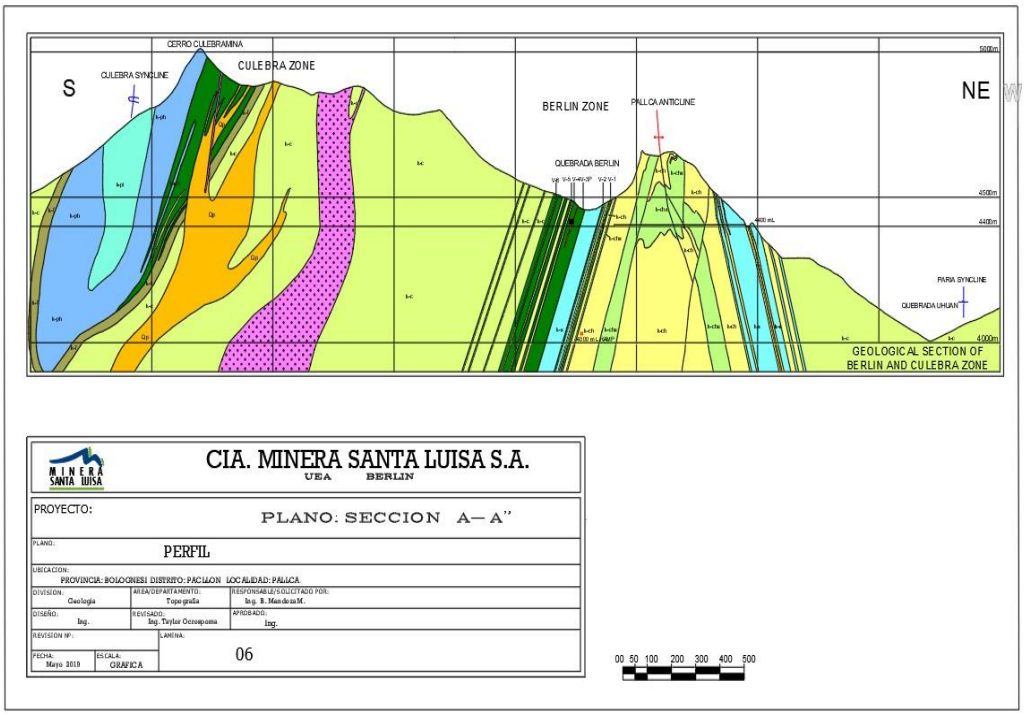
Ortocuarcitas de la formación chimú de color blanco de granulometría medio-grueso.

Cuarcitas de la formación Farrat representa al tope del grupo Goyllarizquisga, se encuentra encima de la formación Carhuaz, presenta color blanco de grano medio a grueso.

Calizas masivas de la formación Pariahuanca intercaladas con Lutitas y ocasionalmente con areniscas.

En el área de Pallca se han diferenciado cuatro stocks que constituyen el complejo Culebra, desde el más antiguo al más joven son: de cuarzo porfirítico, granodiorita, granito porfirítico y tonalita que se emplazan entre el anticlinal de Pallca y el sinclinal de Culebra.

Figura 4 *Sección geológica de la mina Pallca*



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

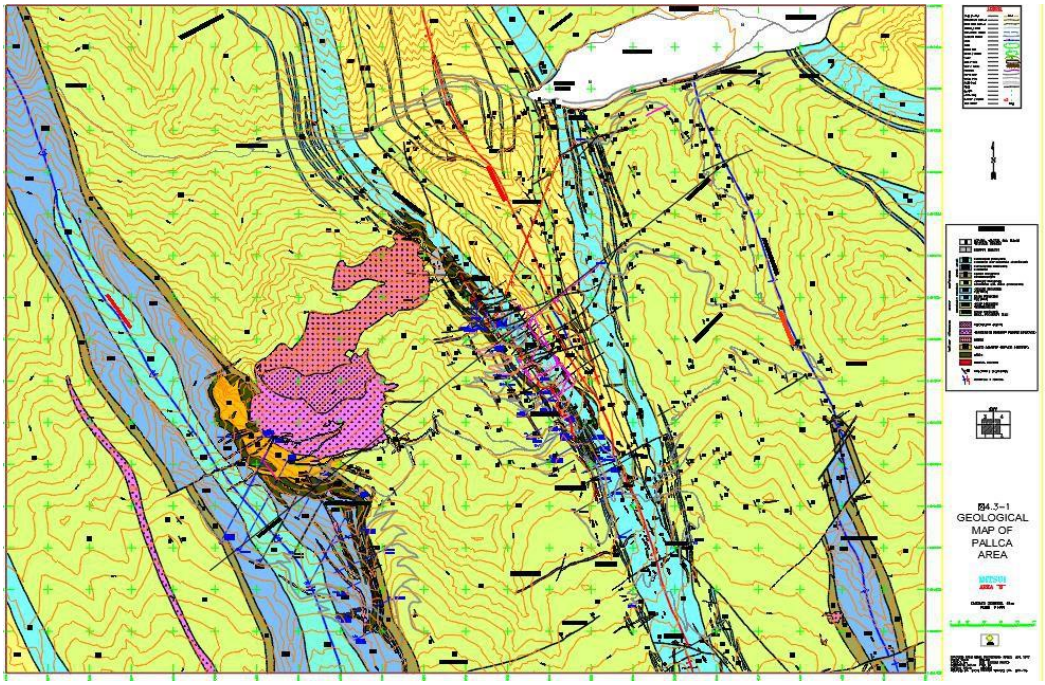
Geología estructural

La secuencia sedimentaria presente en el área de Pallca ha sufrido una fuerte deformación debido a la orogenia andina trayendo como resultado de estos la formación de: pliegues, fallas, fracturas, etc.

El área está constituida por la presencia de dos anticlinales y tres sinclinales. Los ejes de los sinclinales se ubican en la zona de Asia, Rasac y Culebra; y los ejes de los anticlinales se encuentran en Pallca y Paria.

Se pueden diferenciar dos sistemas de fallas inversas, en orden cronológico, se tiene: fallas transversales de rumbo, sistema NE – SW y buzamiento al NW entre 70 a 85º, fallas longitudinales de salto vertical paralelo al rumbo de los estratos con buzamientos entre 80º y 90º a lo largo de toda el área de estudio.

Figura 5 *Sección geológica de la mina Pallca en planta*



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Geología económica

Los cuerpos mineralizados de Pb, Zn. Cu, Ag son considerados de origen hidrotermal originados por reemplazamiento meta somático de contacto (exoskarn) en las calizas de las formaciones Santa, Carhuaz y Pariahuanca en las cuales se encuentran localizados importantes cuerpos mineralizados.

Las estructuras mineralizadas del yacimiento de Pallca se presentan en forma estratiforme lenticular masiva diseminada. Los cuerpos mineralizados de Pb, Zn, Cu, Ag presentan una orientación y buzamiento paralelos al de los estratos y en promedio es de N 30° W y buzamiento de 60° a 80° al W. Los promedios de las potencias de las zonas de mayor importancia oscilan entre 2 y 12 metros, las extensiones del rumbo y buzamiento entre 50 y 150 m y entre 50 y 500 m respectivamente. Los mantos se formaron cerca al contacto skarn- caliza, lejanos del cuarzo porfirítico, con un rango muy variable en espesor y con un promedio de 10% de Zn.

Los principales minerales de mena son: esfalerita, galena, calcopirita, argentita y molibdeno. Como minerales de ganga se tiene: pirrotita, pirita, magnetita, grosularia, clorita, epidota, augita, diópsido, calcita, limonita y hematita.

2.2.3. Geomecánica

Caracterización de la masa rocosa

- **Registro de datos**

  La lista de la información del macizo rocoso se generó a partir del mapeo de la masa rocosa en las labores subterráneas. Se logro a cabo utilizando el "método directo por celdas de detalle". Mediante este método se vienen realizando los cálculos sistemáticos de las labores.

  Los parámetros de observación y medición fueron obtenidos en formatos de registro diseñado para este propósito, adecuándolos a las normas sugeridas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM). Estos parámetros fueron: tipo de roca, tipo de sistema de discontinuidad, orientación, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, intemperización y presencia de agua.

Tabla 2. *Mapeo geomecánica por celdas*

AyS GEOTECNIA construcción e ingeniería

TABLAS DE MAPEO GEOMECÁNICO POR CELDAS

U. MINERA:	BER
CÓDIGO:	RG
VERSIÓN:	0
F. APROBACIÓN:	07/11/2018
SECCIÓN:	GEOMECÁNICA

MINERA SANTA LUISA U.E.A. BERLIN

Resistencia de la roca intacta		
R6	Solo se rompe esquirlas c/ la picota.	>250 MPa
R5	Se requiere varios golpes de la picota para romper la muestra.	100 - 250
R4	La muestra se rompe con más de un golpe de la picota.	50 - 100
R3	No se raya ni desconcha c/ cuchillo. Se rompe con golpe firme de picota.	25 - 50 (MPa)
R2	Se desconcha con dificul. c/ cuchilla. Marcas no profundas con la picota.	5 - 25 (MPa)
R1	Deleznable con golpes firmes, se desconcha con una cuchilla	1 -

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR, BENIAWSKI)							
R. COMPRESIVA		>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1)	
R Q D (%)		90-100 (20)	75-90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	
ESPACIAMIENTO		>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	< 0.06 (5)	
COND DE JUNTAS	Persisten	<1m long. (6)	1-3 m Lon. (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	
	Apertura	Cerrada (6)	<1mm aper. (5)	0.1-1.mm (4)	1 - 5 mm (1)	> 5 mm (0)	
	Rugosida	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo falla (0)	
	Relleno	Limpia (6)	Duro<5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave < 5 m (1)	Suave>5 mm (0)	
	Alteració	Sana (6)	Lig. Altera (5)	Mod. Alterada(3)	Muy Alterada (2)	Descompuesta (0)	
AGUA SUBTERRANEA		Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	
CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		PERPENDICULAR AL EJE DE LA EXCAVACIÓN			PARALELO AL EJE DE LA EXCAVACIÓN		CUALQUIER DIRECCIÓN
		A FAVOR		EN CONTRA			
		45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° - 45°	45° - 90°	20° -	0° -
		-12	-2	-5	-10	-12	-5	-10
RMR		100-81	80 - 61	60 - 51	50 - 41	40 - 31	30 - 21	20 - 0
DESCRIPCION		Muy Buena	II Buena	IIIA Regular A	IIIB Regula	IVA Mala A	IVB Mala B	V Muy Mala

Fuente: *Departamento de geomecánica Santa Luisa S.A. – AyS GEOTECNIA.*

- **Aspectos litológicos**

  La zona delimitada, geomecánicamente, posee rasgos litológicos que diferencian los dominios estructurales: la zona de Roca Caliza, la cual es la más predominante, en algunos tramos. Esta caliza se presenta brechada y/o alterada (principalmente oxidación) disminuyendo su calidad. Existen también horizontes de lutitas de menor calidad geomecánica. La mineralización se ha dado en skarn con características geomecánicas de roca favorables para el minado. El pórfido y las cuarcitas del Chimú que pese a su elevada resistencia presentan notable fracturamiento.

- **Distribución de las discontinuidades**

  Para establecer las características de la distribución de discontinuidades, se procesaron los datos orientacionales mediante técnicas estereográficas, utilizando la versión 5.103 de Rocscience Inc. (2004), del programa de cómputo Dips, elaborado por M.S. Diederichs y E. Hoek del Grupo de Ingeniería de Rocas del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto (Canadá).

  Un resumen de estos resultados se presenta en las tablas 2 y 3, el primero relacionado a las estructuras mayores (sistema de fallas) y el segundo relacionado a las estructuras menores (discontinuidades como diaclasas principalmente).

  (Dirección del Buzamiento/Buzamiento-Rumbo/Buzamiento

Tabla 3 *Conjunto de discontinuidades estructuras mayores, fallas*

Litología	Sistema 1	Sistema 2
Caliza	244º/69º S26ºE/69ºSW	343º/70º N73ºE/70ºNW
Skarn – Mineral	248º/72º S22ºE/72ºSW	345º/77º N75ºE/77ºNW
Pórfido Cuarcífero (QP)	236º/73º S34ºE/73ºSW	344º/74º N74ºE/74ºNW
Compósito	245º/71º S25ºE/71ºSW	349º/76º N76ºE/76ºNW

Fuente: *Departamento de geomecánica Santa Luisa S.A. – DIP's*

(Dirección del Buzamiento/Buzamiento-Rumbo/Buzamiento

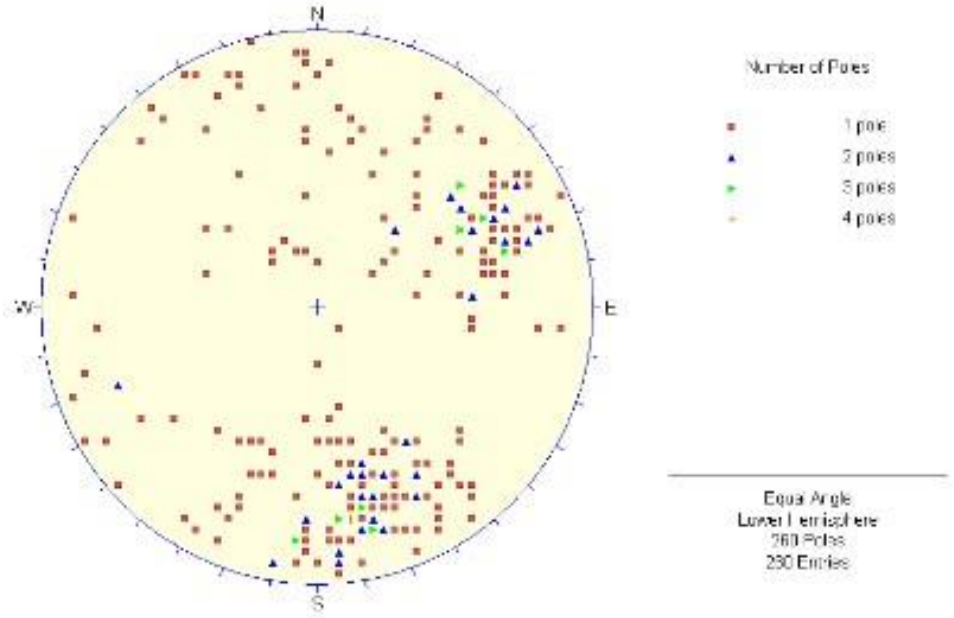
Tabla 4. *Conjunto de discontinuidades estructuras inferiores*

Litología	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Caliza	243º/66º S27ºE/66ºSW	141º/26º N51ºE/26ºSE	337º/78º N67ºE/78ºNW	
Skarn – Mineral	243º/69º S22ºE/72ºSW	345º/74º S22ºE/72ºSW	130º/26º S22ºE/72ºSW	
Pórfido Cuarcífero (QP)	351º/63º N81ºE/63ºNW	139º/26º N49ºE/26ºSE	247º/70º S23ºE/70ºSW	161º/82º N71ºE/82ºSE
Lutita	243º/70º S27ºE/70ºSW			
Compósito	243º/68º S27ºE/68ºSW	345º/73º N75ºE/73ºNW	145º/24º N55ºE/25ºSE	

Fuente: *Departamento de geomecánica Santa Luisa S.A. – DIP's*

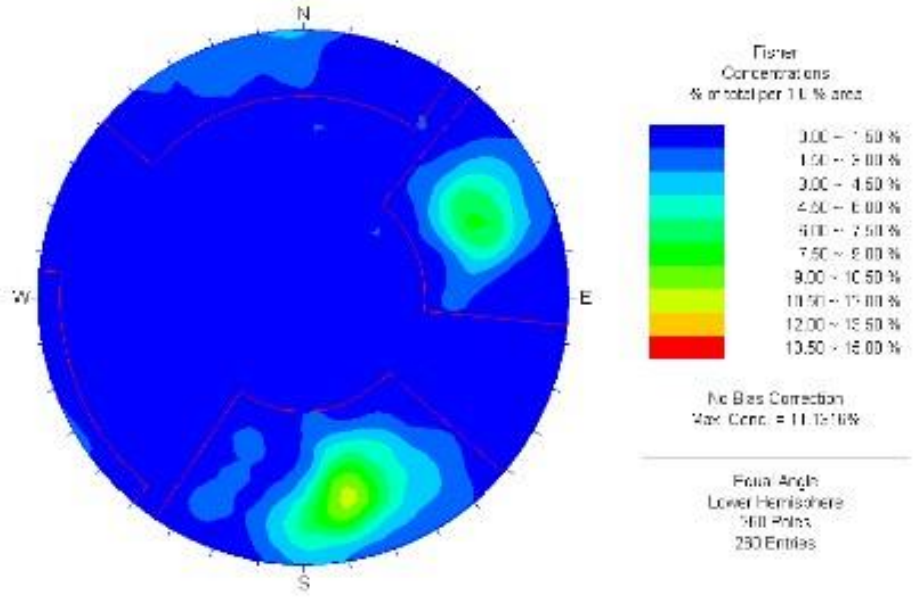
Los valores expuestos en la tabla N° 3, se analizaron con técnicas estereográficas (Ver ilustración Nº 5 a Nº 6). Para el estudio de manera estadística de polos se utilizó Fisher, considerando familias de discontinuidades con una concentración mayor al 12 % del total.

Figura 6 *Ploteo de dispersión de polos del compósito de fallas*



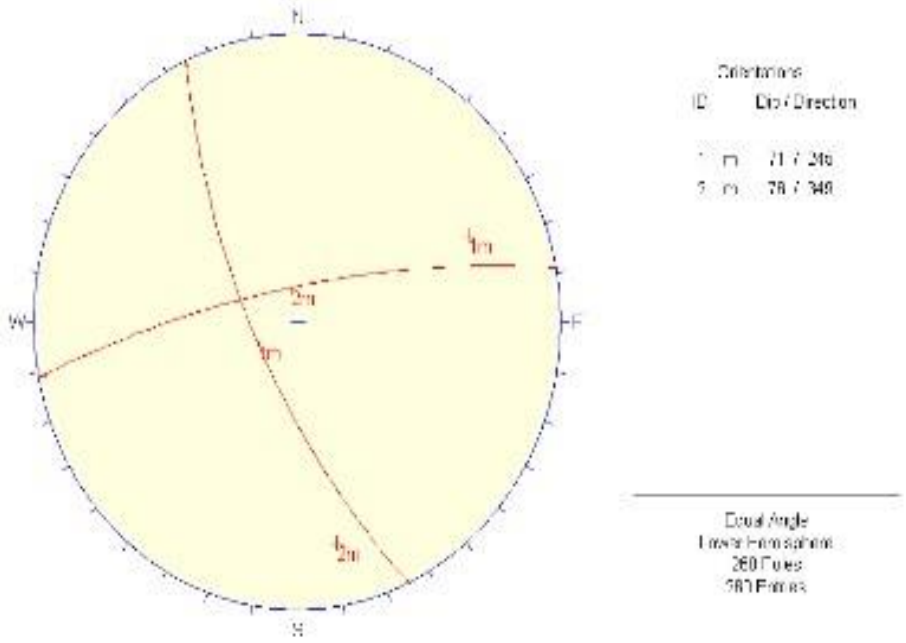
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 7 *Contorneo estadístico de la concentración de polos del compósito de fallas*



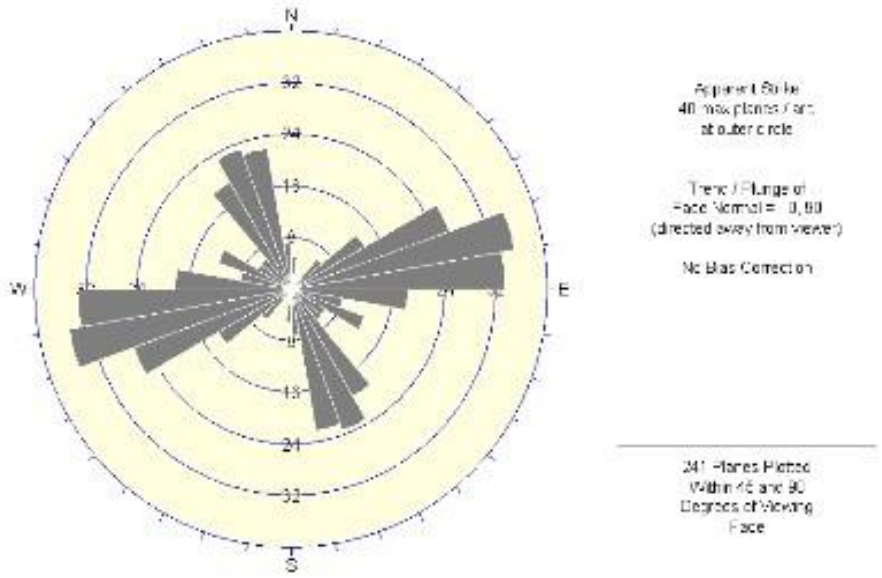
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 8 *Planos principales del compósito de fallas*



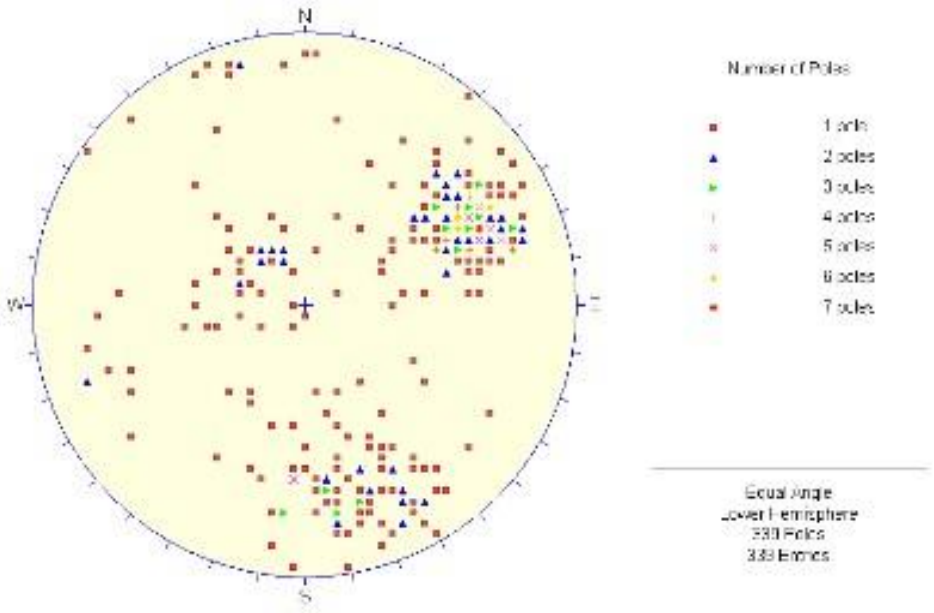
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 9 *Rosetas del compósito de fallas*



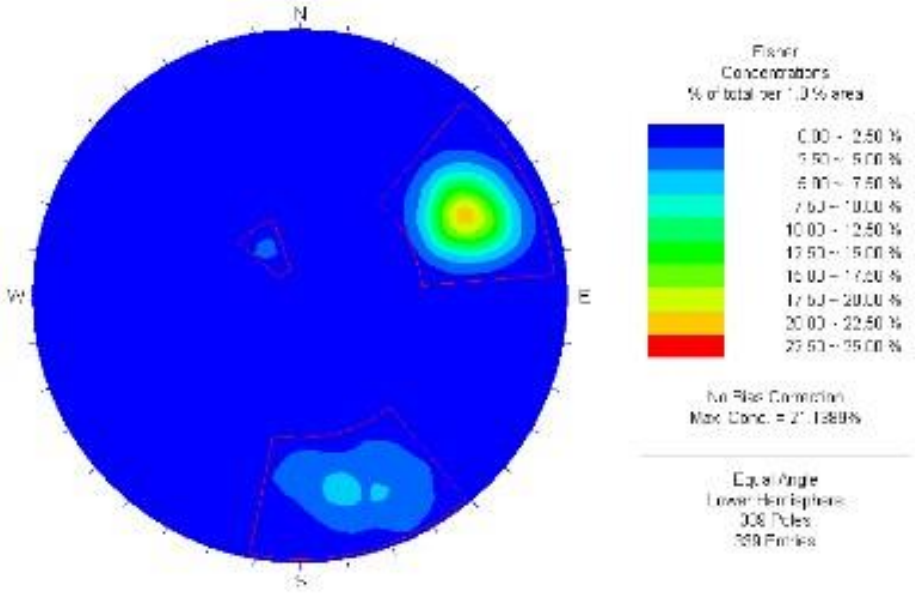
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 10 *Ploteo de dispersión de polos de compósito de discontinuidades inferiores.*



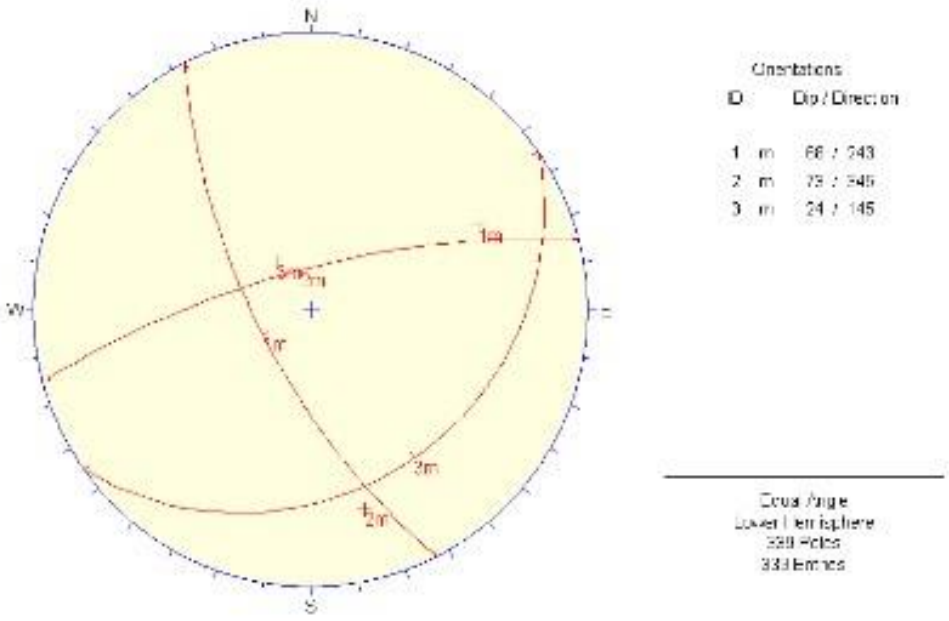
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 11. *Concentración de los polos del compósito de discontinuidades inferiores*



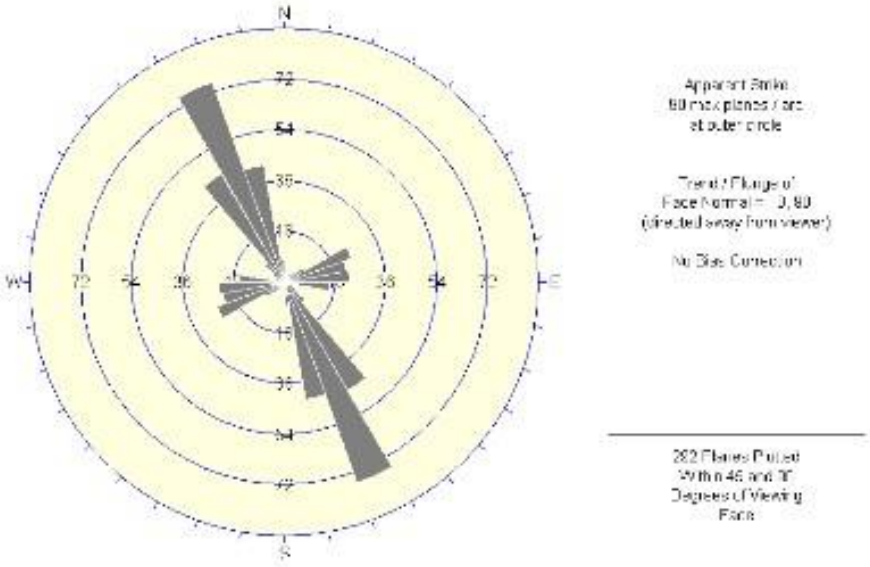
Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 12 *Compósito de discontinuidades menores*



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 13 *Rosetas de compósito de discontinuidades menores*



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Se ha considerado como las discontinuidades mayores a las fallas debido a su alta persistencia y condiciones no favorables de sus propiedades. Asimismo, como discontinuidades menores, tenemos: los

planos de estratificación (propio de las rocas sedimentarias) y las diaclasas o juntas.

El estudio que se realizó en base a la diferente información recaudada ha indicado que el manejo estructural en la masa asociada a Berlín tiene las siguientes características:

- **Razón a las estructuras grandes**
  - Se presentan dos sistemas de fallas geológicas. Uno de ellos tiene el rumbo en paralela al estructuramiento mineralizado (NW-SE) con buzamiento alto, superiores a 60º al SW. El segundo conjunto de fallas, de rumbo NE – SW, perpendiculares al rumbo de las estructuras mineralizadas, con inclinación superior a 70º al NW.
  - Los sistemas de fallas vistas en lo anterior, continúan en todos los distintos tipos de rocas: calizas, skarn, mineral e intrusivo.
- **Razón a estas estructuras pequeñas**
  - Se evidencia 4 sistemas de estas discontinuidades, tres de ellos familias de diaclasas y el más predominante correspondiente a los planos de estratificación del primer sistema. Tenemos las diaclasas de origen tectónico asociado principalmente al plegamiento y fallamiento de la zona, este diaclasamiento asociado al sistema de fallas se presentan paralelos con la superficie de dicha falla, evidenciando una frecuencia que baja al subir la distancia de las mismas. El diaclasamiento es evidente en caliza, Skarn y QP con rumbos NW – SE, NE – SW, con buzamientos superiores a 60º y 70º al SW respectivamente.

- En lutitas, calizas y Skarn el sistema predominante viene a ser el de los planos de estratificación con rumbo NW – SE buzamientos superiores a 60º al SW.
- Se tiene además un sistema de rumbo NE – SW con buzamientos entre 15º y 25º al SE; en QP, es evidente la presencia de un cuarto y último sistema de diaclasamiento con rumbo NE – SW y con buzamientos superior a 80º al SE, se asume, que estos dos últimos sistemas de discontinuidades han sido formados.

Características estructurales

Las características estructurales de las discontinuidades se establecieron mediante tratamiento estadístico de la información registrada en los mapeos geomecánicos, lo que se trató de compatibilizar con las observaciones in situ. Según esto, las siguientes son las principales características estructurales de las discontinuidades tanto mayores como menores:

- **Fallas**

  Lo afloramientos evidenciados en las excavaciones se han podido identificar dos sistemas predominantes de fallas geológicas, las cuales, presentan rellenos blandos: óxidos, panizo, con espesores que van de 0.5 cm a 20 centímetros. Con aberturas son mayores a 5.0mm. Las superficies de los hastiales de la discontinuidad son muy lisas a ligeramente rugosas. Son superficies de drenaje de agua (favorecen las filtraciones). Cabe resaltar que la falla más importante del área viene a ser falla “Gomi” de rumbo paralelo a los estratos.

- **Planos de estratificación**

  - ✓ **Zona de Mineral (skarn-mineral)**

    La mineralización (mineral en skarn) cuenta con las siguientes características de las estructuras: espaciado entre 20 y 60 centímetros, persistencia mayor a 20.0m (por ser planos de estratificación), apertura variable < 0.1mm, las paredes de las discontinuidades son ligeramente rugosas, no es evidente ningún tipo de relleno, las paredes de la discontinuidad no presentan alteración. La zona de skarn tiene el mismo comportamiento.

  - ✓ **Caliza**

    Los estratos en las calizas de la Zona de Berlín tienen las siguientes características de las estructuras: el espaciamiento de 20 centímetros hasta 60 centímetros, con persistencia mayor a 20m, apertura que varía entre 0.1 – 1.0mm, la rugosidad en los hastiales de las discontinuidades es lisa a ligeramente rugosas, el relleno es duro (calcita) menor a 5mm.

  - ✓ **Lutita**

    Cuyas características de las estructuras son: el espaciamiento de 6 centímetros hasta 20 centímetros, por ser es estratos de lutitas tienen persistencia de más de 20.0m, apertura que va de 1.0mm a 5.0mm, con relleno blando, las paredes de la discontinuidad son lisas y ligeramente alteradas.

- **Diaclasas**

  - ✓ **Zona de mineral (skarn-mineral)**

    Se tiene un sistema de diaclasamiento bien definido en la zona de mineral, de rumbo perpendicular al rumbo de la mineralización (o estratificación). Las características de las estructuras son las siguientes: espaciamiento es de 20 hasta 60 cm, la apertura no es muy perceptible <.1mm, no poseen ningún tipo

de relleno, no soy muy persistentes, ya que se cortan en los planos de estratificación. Se han detectado zonas en la que estos sistemas de diaclasamiento presentan relleno de oxido y poseen una persistencia mayor a 3.0 m.

- ✓ **Caliza**

Es evidente dos sistemas de diaclasamiento que en algunos tramos es más marcado que en otros, no son muy persistentes (1.0 a 3.0m). El primero, perpendicular al rumbo de los estratos, presenta relleno de óxidos cuanto está en tramos alterados, con aberturas que van de 0.1 a 1.0m y de paredes lisas, espaciamientos que varían de 0.2 a 0.6 cm. Así mismo, este sistema presenta relleno de calcita en algunas zonas, con condiciones más favorables que cuando presentan rellenos de óxidos. También se tiene un sistema cuasi-paralelo en orientación al rumbo y buzamiento con la dirección opuesta al de los estratos con inclinación promedio de 25º, este sistema, de persistencia d 1.0 a 3.0m, presenta paredes lisas y espaciamientos que varían de 0.20 a 0.60cm, son cerradas y no poseen relleno, los efectos de voladura, hacen que la apertura de dichas fracturas aumente. Cuando se presenta óxidos como relleno, los hastiales de las discontinuidades se presentan alteradas, de lo contrario son sanas.

- ✓ **Pórfido cuarcífero**

Son evidentes, según el análisis estereográfico, cuatro sistemas de discontinuidades, los cuales presentan aberturas de 0.1 a 1.0mm con relleno suaves (óxidos); así mismo, las paredes de la discontinuidad son lisas, la matriz rocosa presenta ligera alteración argílica. Los óxidos no permiten una buena cohesión entre los bloques que se forman, lo que hace que este macizo rocoso

sea muy débil, en muchos casos existe sistemas diaclasamiento aleatorios los cuales se conjugan con los dos anteriormente nombrados, forman bloques y tienden a irrumpir en la excavación. El espaciamiento varía de 0.20 a 0.60 cm.

- ✓ **Brechas**

  Se presentan mayormente en caliza y usualmente vienen acompañadas de oxidación, presentan fragmentos angulares de roca caliza en una matriz de material arcilloso y óxidos. Existe una zona bien marcada en mina Pallca a la que se ha denominado "Brecha Fuji", donde la alteración ha llegado el extremo de descomponer el material rocoso.

  Se muestran en zonas de alteración, principalmente argílica, de manera horizontes a lo largo de los estratos en SKARN, pero son muy puntuales.

Clasificación geomecánica de la masa rocosa

Para clasificar geomecánicamente a la masa rocosa se utilizó el criterio de clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR – Valoración del Macizo Rocoso – 1989). Los valores del índice de calidad de la roca (RQD) fueron determinados mediante el registro lineal de discontinuidades, utilizando la relación propuesta por Priest & Hudson (1986) y la relación de Palmstron, teniendo como parámetro de entrada principal la frecuencia de fracturamiento por metro lineal.

El criterio para clasificar la masa rocosa se presenta en la tabla Nº5.

Tabla 5 *Clasificación RMR y colores en CMS*

TIPO DE ROCA TIPO	COLOR	RMR Bieniawski	DESCRIPCION DE ROCA
II	II	61 - 80	BUENA
III	III A	51 - 60	REGULAR/BUENA
	III B	41 - 50	REGULAR/MALA
IV	IV A	31 - 40	MALA/REGULAR
	IV B	21 - 30	MALA/MUY MALA
V	V	0 - 20	MUY MALA

Fuente: *Departamento de geomecánica Santa Luisa S.A. – DIP's*

Los rangos de la clasificación se evidencian en el cuadro Nº5, en donde, se dan los valores de calidad de la masa rocosa expresado en la clasificación RMR por los distintos tipos de rocas que se presentan. Los rangos de los valores de RMR referencian a los datos que se registró en el mapeo geomecánico.

Tabla 6 *Resumen de RMR de la roca- Pallca*

Litología	Rango RMR	Valor Promedio	Calidad
Caliza	41 - 69	54	REGULAR-BUENA TIPO IIIA
Caliza Alterada	32 - 58	42	REGULAR-MALA TIPO IIIB
Skarn	46 – 71	57	REGULAR-BUENA TIPO IIIA
Skarn alterado	20 - 44	31	MALA-REGULAR TIPO IVA
Skarn - Mineral	52 - 73	61	BUENA-REGULAR TIPO II REGULAR-
Lutita	40 - 53	44	MALA TIPO IIIB REGULAR-BUENA
QP	39 - 58	52	TIPO IIIA MALA-MUY MALA
Brecha	16 - 29	23	TIPO IVB

Fuente: *Departamento de geomecánica Santa Luisa S.A. – DIP's*

Según la tabla Nº5, y verificando los valores de la masa rocosa, la caliza tiene calidad Regular a Buena, reduciendo su calidad a Regular-Mala cuando esta alterada. El comportamiento del skarn es muy variable de Regular a Buena. El QP (pórfido cuarcífero), presenta calidad Regular-Buena, condicionándose en tramos alterados. La lutita de calidad Regular-Mala, su presencia en el yacimiento es a manera de horizontes con potencia de 1.0 m a 2.0 m. Los horizontes de brecha son de calidad mala a muy mala, muchos casos el terreno ha sido descompuesto. Finalmente, la zona mineralizada de calidad buena.

El RQD de Pallca, evidenciado en los testigos de las perforaciones diamantinas; son de, 82 % en caliza y skarn, 35 % en lutita, <25 % en brechas y zonas alteradas.

El dominio litológico de mayor frecuencia es el de caliza y Skarn, los horizontes de lutitas, brechas, skarn alterado y caliza alterada son muy puntuales. Dado ello las

condiciones de calidad de roca en la mina son de Regular a Buena. La estabilidad está condicionada principalmente por los diferentes rasgos estructurales.

Debe quedar claro que los valores de RMR no consideran el valor de ajuste de discontinuidades, lo cual es considerado en la selección del sostenimiento adecuado.

Zonificación geomecánica de la masa rocosa

Para la aplicación racional de los diferentes métodos de cálculo de la mecánica de rocas, es necesario que la masa rocosa bajo estudio esté dividida en áreas de características estructurales y mecánicas similares, debido a que los criterios de diseño y el análisis de los resultados serán válidos solo dentro de masas rocosas que presenten propiedades físicas y mecánicas similares. Por ello, es práctica común en el diseño de excavaciones subterráneas delimitar el área de estudio en zonas geomecánicas o dominios estructurales.

La zonificación geomecánica, considerando los aspectos litológicos y de calidad de la masa rocosa ha sido definida en el acápite anterior. Es decir, la calidad de la roca está muy relacionada al tipo litológico determinado.

Con las consideraciones dadas, se presentan los resultados de la zonificación geomecánica de labores; asimismo, se han diferenciado los diferentes dominios estructurales de acuerdo a un color determinado consignado en la tabla N°5.

A continuación, se muestran fotografías que ejemplifican a los diferentes dominios estructurales (zonas de características geomecánicas similares), para los ocho tipos de litología determinados:

Figura 14 *Dominios estructurales*



Caliza: RMR aproximado 62 (41-69)



Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 15 *Caliza Alterada: RMR aproximado 42 (32-58)*



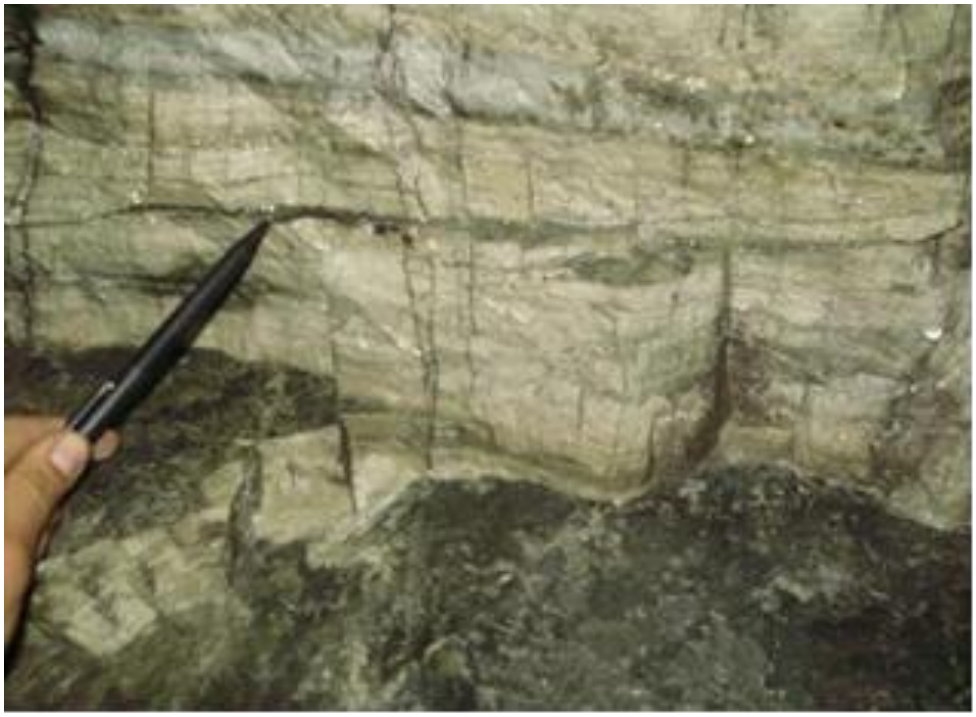




Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 16 *Skarn: RMR aproximado 57 (46-71)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 17 *Skarn Alterado: RMR aproximado 31 (20-44)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 18 *Skarn-Mineral: RMR aproximado 61 (52-73)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 19 *Lutita: RMR aproximado 44 (40-53)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 20 *QP: RMR aproximado 52 (39-58)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Figura 21 *Brecha: RMR aproximado 23 (16-29)*





Fuente: *Departamento de Geología de la unidad minera Santa Luisa S. A.*

Resistencia de la masa rocosa

Para estimar los parámetros de resistencia de la masa rocosa se utilizó el criterio de falla generalizado de Hoek & Brown (2002, 2006), con el programa ROCLAB de Rocscience Inc. (2007). Para ello, se tomaron los valores más representativos de calidad de la masa rocosa reflejados en el valor del índice GSI; asimismo, de resistencia compresiva uniaxial y la constante "mi" de la roca intacta, desarrollados en este estudio.

Además, el minado involucra usar el relleno detrítico con sus propiedades que son densidad 2.0 g/cm3, módulo de deformación igual 150 MPa, el valor de las cohesiones cero con el ángulo de fricción es de 32º. Estos datos de acuerdo a la experiencia de los autores en trabajos con relleno detrítico en otras minas.

Tabla 7 *Propiedades de la masa rocosa*

ROCA	GSI	σ_{cmr} MPa	Peso Específico t/m^3	m_i	m_{mr}	s_{mr}	E_{mr} MPa	μ
Caliza	56	18.351	2.7	10	1.23	0.0028	10594.03	0.37
Skarn	59	27.102	2.9	12	1.703	0.0042	12591.03	0.39
Skarn - Mineral	62	29.471	3.4	12	1.965	0.0063	14964.47	0.42
Lutita	45	5.183	2.7	6	0.437	0.0007	4359.03	0.28
QP	53	26.898	2.7	20	2.133	0.0019	8913.77	0.35
Brecha	25	0.511	2.7	4	0.112	4.54E-05	665.47	0.21

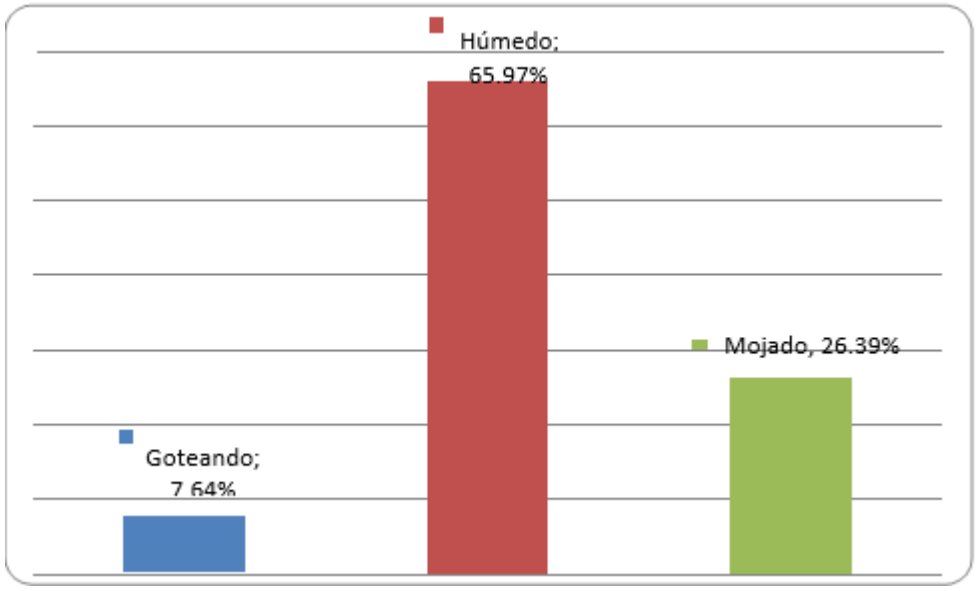
Fuente: Departamento de Geomecánica Santa Luisa S.A.

Condiciones de agua subterránea

La presencia del agua dentro de la masa rocosa influye adversamente en las condiciones de estabilidad de las labores subterráneas. Su principal efecto es la presión que ejerce en las discontinuidades, disminuyendo la resistencia al corte y por tanto disminuyendo el factor de seguridad o grado de estabilidad, por ello es importante tomarla en cuenta.

Según se puede observar en los formatos de mapeo geomecánico de las labores subterráneas, las condiciones de presencia de agua corresponden desde húmedo, mojado y goteando.

Figura 22. *Presencia de agua en labores, mina Pallca*



Fuente: Departamento de Geomecánica Santa Luisa S.A.

De la figura Nro. 22, es evidente que existe un 65.97 % de las labores caracterizadas con humedad y 26.39 % de superficies mojadas, esporádicamente se evidencian goteos, lo que se evidencia con un 7.64 % del total de labores caracterizadas.

Como uno de los principales problemas de Pallca es la presencia de agua, en macizos rocosos presentando tres sistemas de discontinuidades que presentan relleno blando (óxidos o arcillas) complican a la estabilidad de la explotación asociadas al minado, debido principalmente, a la presión que ejerce el agua sobre las discontinuidades y su efecto lubricante, lavando el relleno débil de las fracturas.

Durante los trabajos de campo se han observado en algunas labores acumulación significativa de agua en el piso, que no es drenada oportunamente. Esta agua se está filtrando constantemente dentro de la masa rocosa mineral y cajas, causando perturbación de la masa rocosa y complicando las condiciones del minado en los tajos inferiores. Es recomendable por tanto implementar adecuados sistemas de drenaje en estas labores.

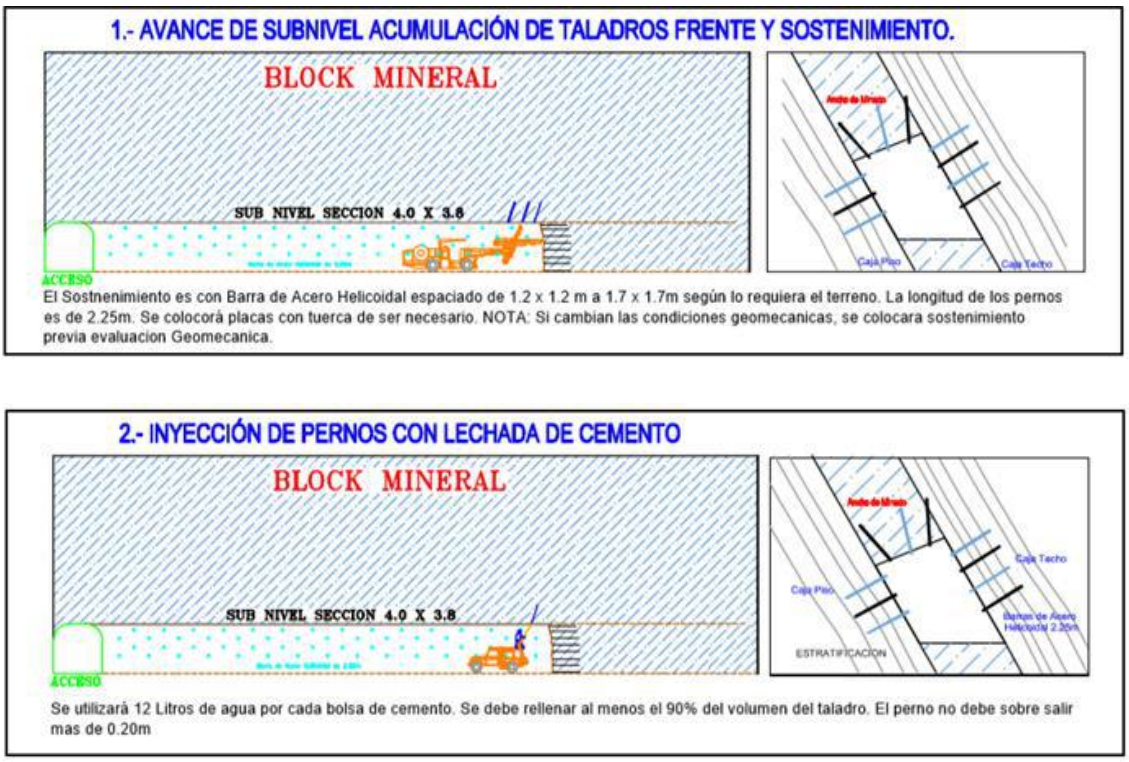
2.2.4. Método de explotación

En Pallca, el método de explotación es corte y relleno ascendente y mecanizado con perforación horizontal, el relleno detrítico que son producto de las labores de preparación como rampas, galerías y otros, asimismo de las canchas de desmonte.

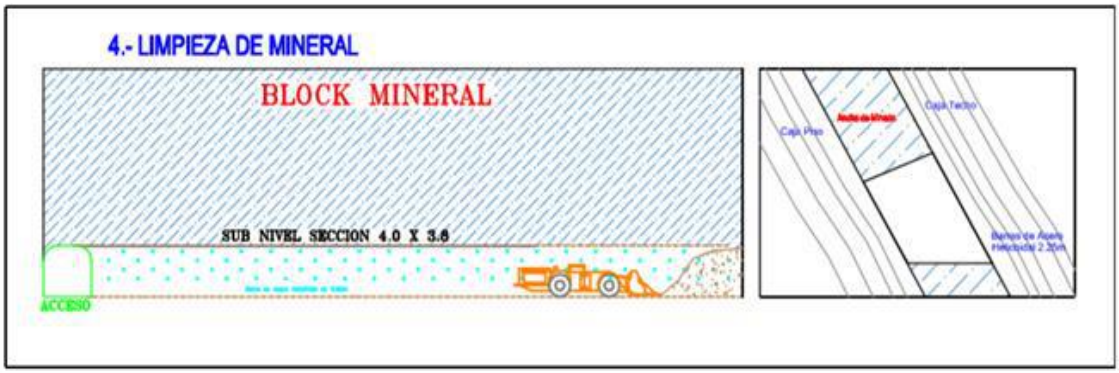
Esta se basa en separar el mineral de los frentes con dimensión de 3.8 m de altura y 4 m de ancho dependiendo del ancho del mineral, después de separar todo el mineral del tajo.

Principalmente, se hace uso de los equipos mecanizados como jumbos electro hidráulico, máquina de lanzado de shotcrete, equipo de sostenimiento y anfotruck que es un equipo de carguío de explosivos.

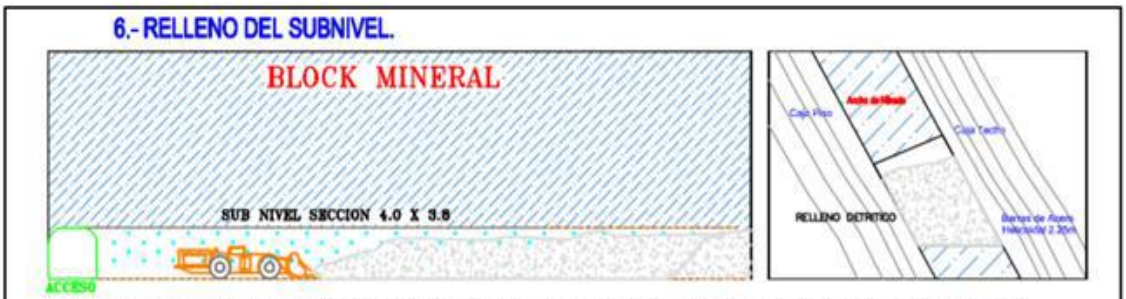
Figura 23. *Ciclo de minado del método cut & fill (corte y relleno)*







5.- SE REPITEN LOS PASOS DEL 1 AL 4 HASTA DELIMITAR LA ESTRUCTURA DE MINERAL.



Se debe rellenar procurando un adecuado topeado de las cajas, evitando dejar vacíos. Se debe dejar una luz de 0.50m entre la corona y el relleno.



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Minado

a. Descripción general de la mina.

La unidad Pallca perteneciente a la empresa minera Santa Luisa del grupo Mitsui Mining & Smelting comienza en el año 2000 la construcción de sus galerías de exploración y galerías en dirección a los bloques de mineral que está conformada por 16 vetas: V1, V2, V2T, V3P, V3, V3T, V3TA, V3TB, V4, V5P, V5, V6P, V6T, V7, V8 Y V9.

Se tiene cuatro bocaminas de ingreso y salida que se encuentran en el Nv 4000, Nv 4400, Nv 4410 y Nv 4640. También se tiene 4 chimeneas que sirven para la extracción de mineral y 12 chimeneas que comunican con la superficie que sirven para la ventilación de la mina.

Los bloques de mineral están constituidos principalmente por Pb, Cu, Zn y Ag con buzamiento de 70° a 85° en donde las cajas piso y techo están constituidas por calizas, skarn y cuarzos cupríferos.

Diseño de la mina

Para realizar el diseño se tuvo que considerar las vetas de mineral y las futuras exploraciones, en donde se realizó 6 rampas cada una con una dimensión de 4.0 x 4.5 m para que pueda permitir el ingreso de los volquetes, de esta manera optimizando los costos de transporte de mineral, también se cuenta con cámaras de acumulación de mineral para optimizar la limpieza de los tajos y con las pozas de bombeo que son muy importantes ya que existe demasiada presencia de agua en los tajos.

Se tiene 4 chimeneas de extracción de mineral que están ubicados en el Nv 4000 la cual es trasladada hacia la cancha de acumulación de mineral que se encuentra en la superficie afueras del Nv 4000.

Infraestructura de la mina

Para obtener una mejor productividad y operatividad de la mano de la seguridad se desarrolló las rampas y accesos hacia las vetas identificadas de Berlín a través de las bocaminas Nv. 4000, Nv. 4400 y Nv. 4640.

En la actualidad, se comunica dos rampas una positiva y la otra negativa ya que sirve para ingresar a las vetas V3, V3T, V3P y V4 a través de un acceso que llega al tajo L-721, L-591, M-579 y L-480.

Tabla 8. *Desarrollos y preparaciones en la mina*

Desarrollos	Se tiene un total de 04 bocaminas: NV 44400, NV 4000, NV4640, NV4410. Se desarrolló 6 rampas para acceder a las diferentes vetas que son: Rampa 4640, Rampa P-554, Rampa Kitagawa, Rampa K-1150, Rampa I-550, Rampa Auxiliar.
Primarios	Se tiene 5 pozas de sedimentación: NV 4000, VR800, POZAS GEMELAS Se tiene 9 Chimeneas para la ventilación: VR 800, VR 600, VR1000, VR1300, VR1060, VR1150, VR1400, VRL1200, VRL1220.
Preparaciones	Se tiene 2 By Pass que son: 4375 y 4735 Se cuenta con 3 cruceros que son: 4000, 4400 y Berlín. Se cuenta con 7 Sub niveles que son: Sub nivel C1177, E1340, I4552, M935, M820, O665 y P554

Fuente: Departamento de Geomecánica Santa Luisa S.A.

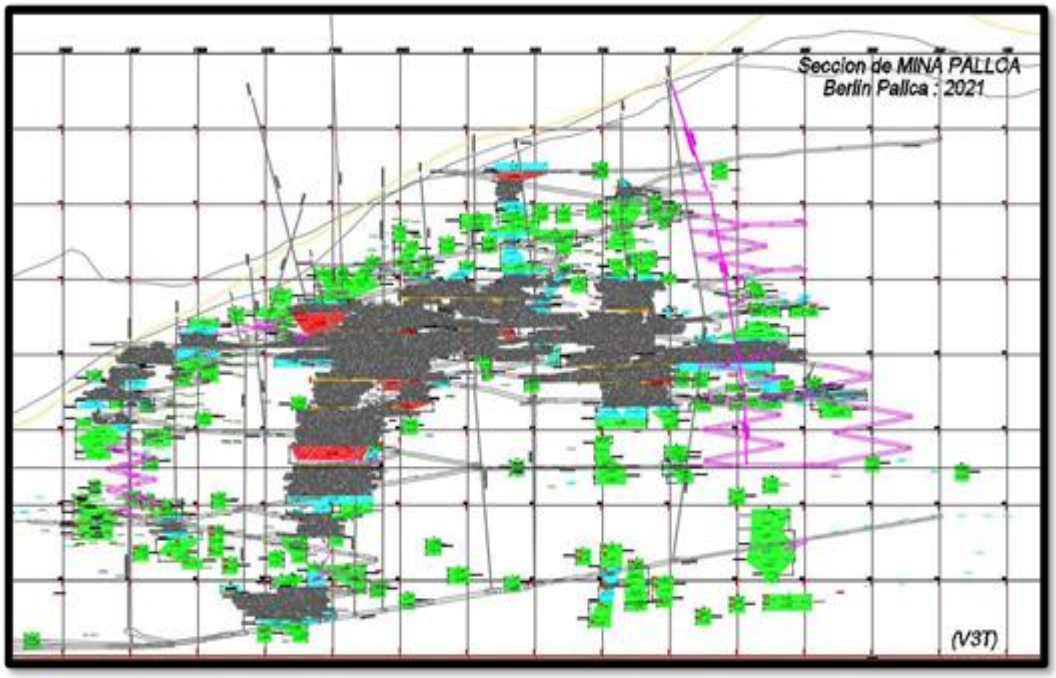
Desarrollos

a. **Rampa Kitagawa**, esta rampa es considerada como una principal para el ingreso del nivel 4000 al nivel 4400 con una sección de 4.5 x 5.0 metros, de forma espiral con una pendiente de 15%, también sirve como acceso a las vetas 1,2,3.

b. **Rampa 4640**, esta rampa sirve como acceso del nivel 4400 al nivel 4640 con una sección de 4.5 x 5.0 metros, de forma espiral con una pendiente de 15%, también sirve como acceso para las vetas 6,7,8.

c. **Rampa auxiliar**, esta rampa es considerada auxiliar ya que comunica con la rampa Kitagawa y la rampa 4640 con una sección de 4.5 x 5.0 metros, de forma espiral con una pendiente de 15%, también sirve como acceso a las vetas 3T, 4, 5.

Figura 24. *Plano de desarrollo de Pallca*



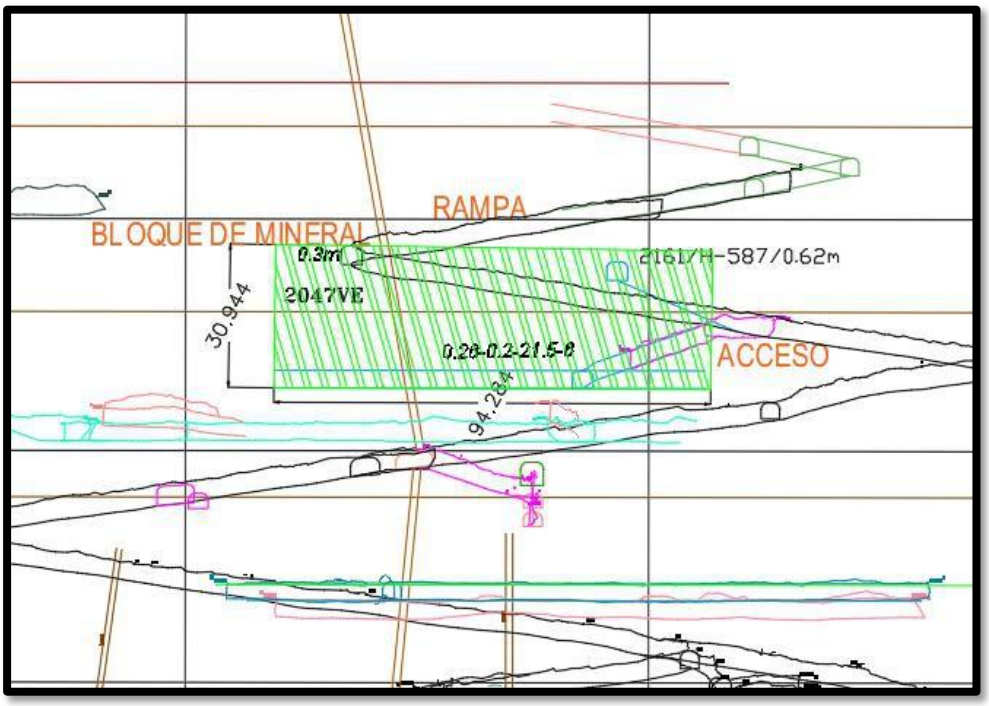
Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Preparaciones

a. **By pass**, estas labores tienen una sección de 3.8 x 4.0 metros con una pendiente de 2 % se inicia en las rampas con acceso hacia las vetas de mineral.

b. **Sub niveles**, principalmente los subniveles son de una sección de 3.8 x 4.0 metros, estos mayormente son encontrados en el primer corte de explotación.

Figura 25. *Plano de preparación para el ingreso a un block de mineral*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

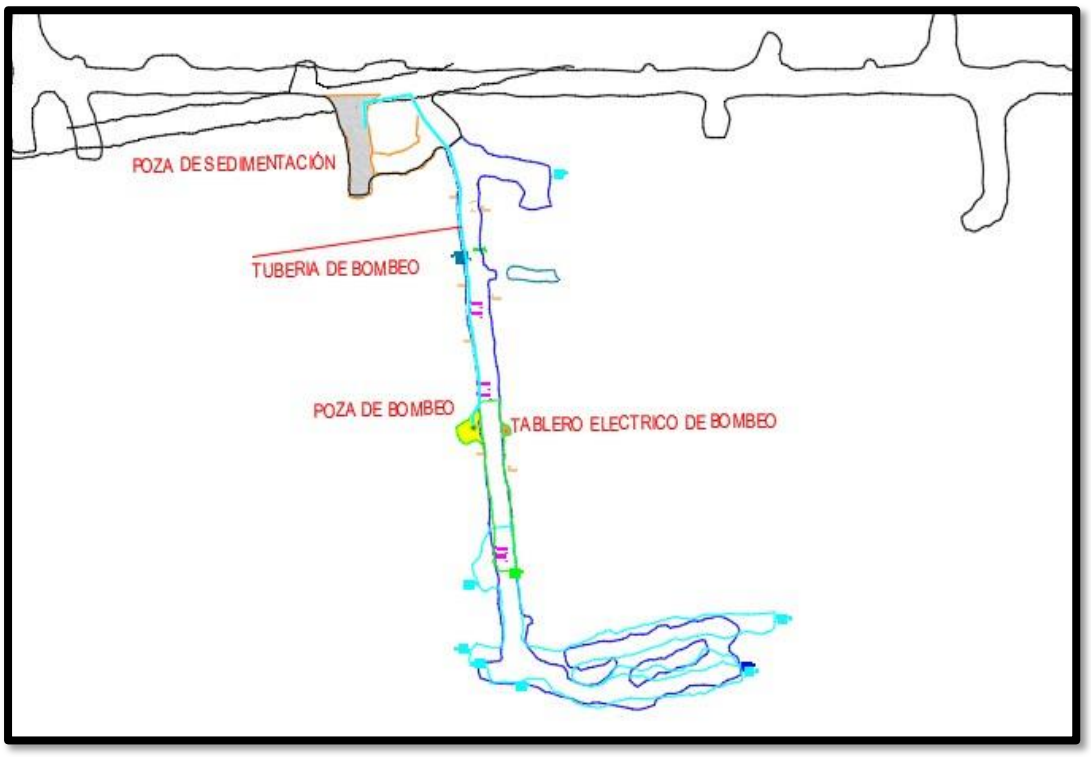
Infraestructura de servicios

a. **Cámara de bombeo**, principalmente son de 2.0 x 3.5 con una pendiente de 15% ya que existe presencia excesiva de agua en los tajos del nivel 4000 con un caudal de 8 litros por minuto donde se utiliza una bomba grindex de 30 HP de manera automática para un mejor control del bombeo de agua.

b. **Pozas de Sedimentación**, tienen una sección de 4.0 x 3.8 metros con una profundidad de 6 metros con pendiente de 15%, que sirven para que se pueda depositar los sedimentos.

c. **Chimeneas de ventilación**, principalmente están conectados con las rampas con la finalidad de ingresar el aire fresco y evacuar el aire viciado, mejorando así el circuito de ventilación para brindarles las mejores condiciones a los colaboradores.

Figura 26 *Plano de infraestructura de servicios*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

2.2.5. Diseño de explotación

Consideraciones geomecánicas

Para elegir y realizar el diseño de explotación se realiza un mapeo y evaluación geomecánica determinando el método de explotación adecuado y factible, considerando las características del yacimiento es el cut & fill o también conocido como corte y relleno ascendente.

Secuencia de método de minado

Para ingresar a un bloque de mineral ingresamos a través de un acceso o rampa, al llegar al bloque se empezará a explotar de manera ascendente desde un sub nivel y los siguientes cortes será en breasting con una cara libre de 0.50 cm.

a. Construcción de un sub nivel o una rampa hacia los bloques de mineral.
b. Construcción de un acceso hacia el bloque de mineral con una pendiente de 15% negativa que servirá como basculante para poder explotar los siguientes cortes.

c. Construcción del primer tajo en sub nivel con una sección de 4.0 x 3.8 metros, al terminar se realizará el relleno detrítico de 3.3 metros de altura dejando 0.50 cm como cara libre para el siguiente corte la cual se correrá en breasting.

2.2.6. Secuencia de minado

Las fases del ciclo de minado son: riego y desate, limpieza, sostenimiento, perforación, voladura, ventilación. En cada proceso del ciclo de minado se tiene consideraciones para tener un mejor control de la dilución y también la estabilidad de la roca.

Riego y desatado

Al ingresar a la labor se evalúa el área de trabajo para luego poder realizar el regado de la carga evitando el polvo cuando se realice la limpieza e identificando las rocas fracturadas en la labor, luego se procede a realizar el desatado de rocas según los PETS entre dos personas en posición de cazador con una posición de 45° la barretilla.

Figura 27. *Riego y desate de rocas*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Limpieza y acarreo

En la limpieza de mineral se usa un scooptram Cat de capacidad 6 yd^3 de forma manual, la limpieza se realizará a una cámara cercana, para iniciar los trabajos se procede a encender el ventilador para mejorar la ventilación ya que existe la presencia de polvo y humo del equipo que dificultan a realizar el trabajo pudiendo ocasionar incidentes y accidentes.

Figura 28. *Limpieza y acarreo*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Sostenimiento

Para realizar el sostenimiento se realiza con un camión empernador acondicionado una bomba putzmeister que es un mezclador de cemento, al ingresar a la labor se inyecta la lechada de cemento para luego introducir el perno helicoidal manualmente al taladro de 2.10 m.

Figura 29. *Limpieza y acarreo*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Perforación

Para la perforación se utiliza los equipos electrohidráulicos Jumbo S1D de un brazo, con una longitud máxima a perforar de 3.8 m para una sección de 4.0 x 3.8.

Figura 30. *Perforación*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Voladura

El carguío de explosivos se realiza mediante un anfotruck, el cual es un equipo acondicionado que lleva una comprensora y una aliva para el depósito de anfo, los explosivos que se emplea son emulnor 3000, pentacord 3p y superfam dos; en cuanto a accesorios se usa de periodo largo y corto de los números 1 al 15, como iniciador a la guía seca y fulminante número 8.

Figura 31. *Carguío de explosivos*



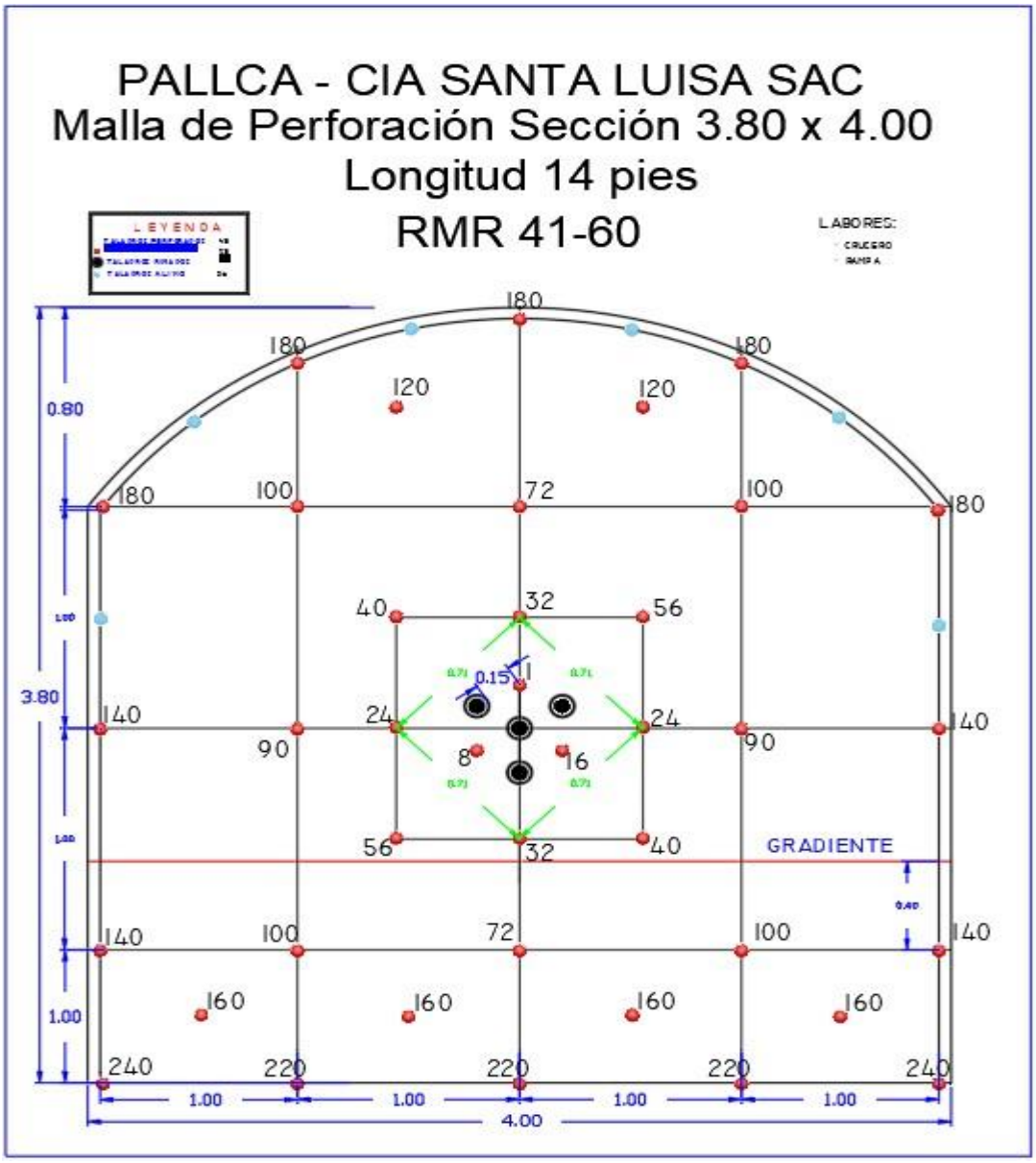
Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

a. Malla de perforación

La distribución de taladros en la malla de perforación, es importante en el proceso de la perforación y la voladura ya que tiene como resultado una buena granulometría de mineral y el buen control de la labor.

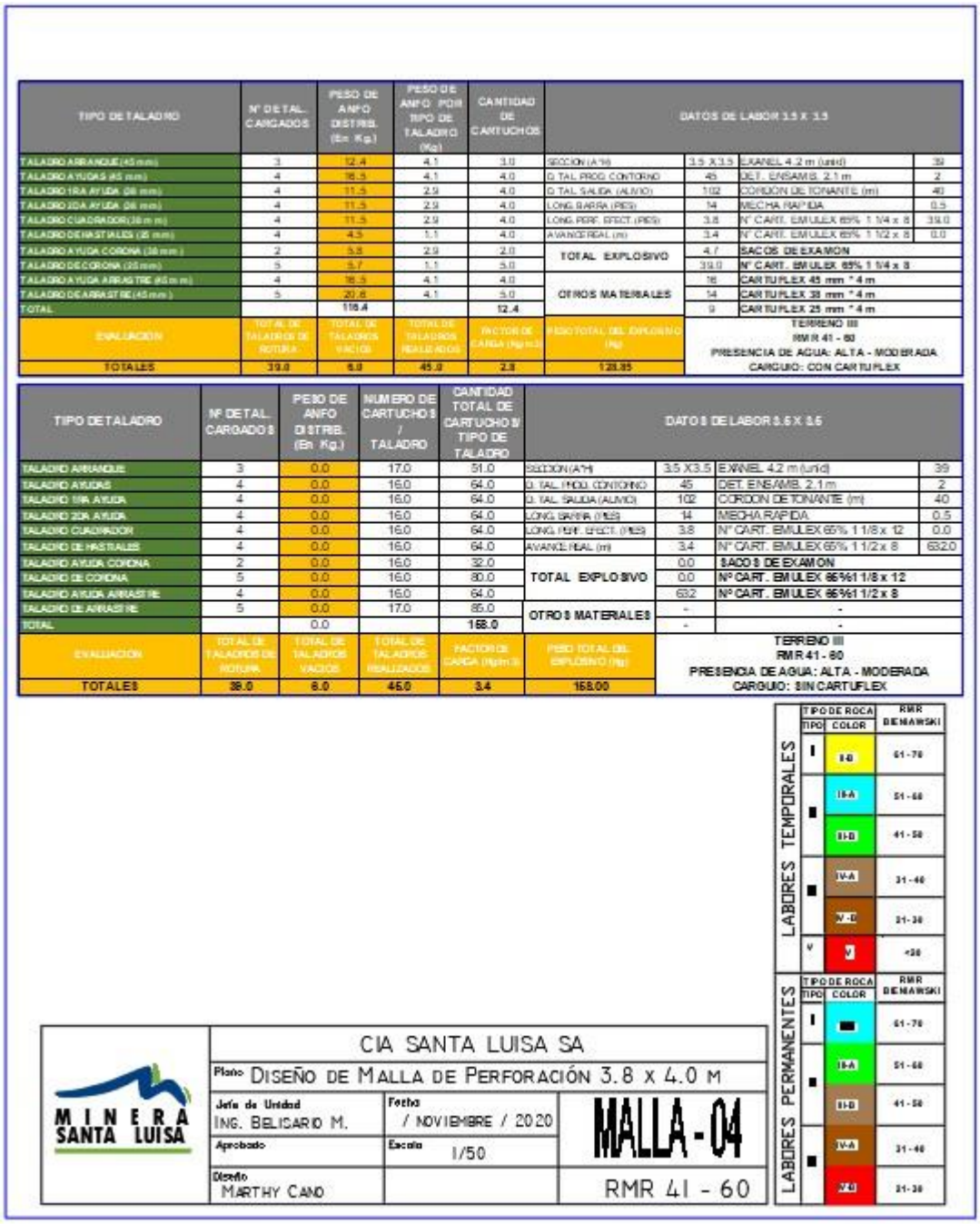
Tomándose en cuenta la dureza de roca, el diámetro de la broca, la longitud del taladro y el tipo de explosivo a usar.

Figura 32. *Malla de perforación*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Figura 33. *Distribución de los taladros y carguío*



Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

b. Accesorios y explosivos

Es una variedad de suministros que se usan para realizar la voladura en las operaciones mineras, actualmente Santa Luisa viene trabajando con la empresa Famesa, quien es el encargado de suministrar los accesorios y explosivos.

Figura 34. *Accesorios y explosivos que se utilizan*

EMULNOR 3000	SUPERFAM DOS	FANEL MS	FULMINANTES
			

FANEL LP	PENTACORD 3P	GUIAS SECAS
		

Fuente: Departamento de Planeamiento Santa Luisa S. A.

Transporte de mineral

El transporte del mineral extraído se realiza con un scooptram de 6 yd a los volquetes de capacidad de 15 m^3 la cual estas son conducidas a la planta concentradora ubicada en Huanzalá.

2.2.7. Plan de producción

Para la estructura Berlín se tiene proyectado la explotación de 144000 toneladas métricas para el año 2021. Con leyes de plata de 1.16 onz/tn, 0.18 % Cu, 1.30 % Pb, 7.38 % Zn.

Tabla 9. *Plan de producción veta Berlín*

Estructura	Valores	2-Ene	1-Feb	1-Mar	21-Abr	1-May	1-Jun	21-Jul	1-Ago	22-Set	22-Oct	1-Nov	22-Dic
BERLIN	TMS	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000	12000
	% Cu	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	% Pb	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	% Zn	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38

Fuente: Departamento de Geomecánica Santa Luisa S.A.

2.2.8. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Las clasificaciones geomecánicas tienen por objeto caracterizar ingenierilmente un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les designa un cierto valor. Clasificar geomecánicamente un macizo rocoso consiste en otorgarle una puntuación según una metodología o criterio establecido. Una vez puntuado el macizo, se clasifica en una categoría de entre varias existentes en función del rango de puntos. Las clasificaciones geomecánicas actualmente se utilizan sobre todo en estudios geotécnicos, en lo que se refiere a los taludes, la principal ventaja de las clasificaciones geomecánicas consiste en que permiten obtener, mediante unas correlaciones establecidas, los principales parámetros mecánicos del macizo rocoso. Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos tienen por objeto evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa su calidad. (Choque, 2019).

RMR

(Bieniawski, 1989), publicó los detalles de una clasificación de la masa rocosa denominada sistema de clasificación Geomecánica o valoración de la masa rocosa RMR (Rock Mass Rating), que evalúa la calidad del macizo rocoso en función a seis parámetros:

a. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)

El índice RQD (Rock Quality Designation) desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

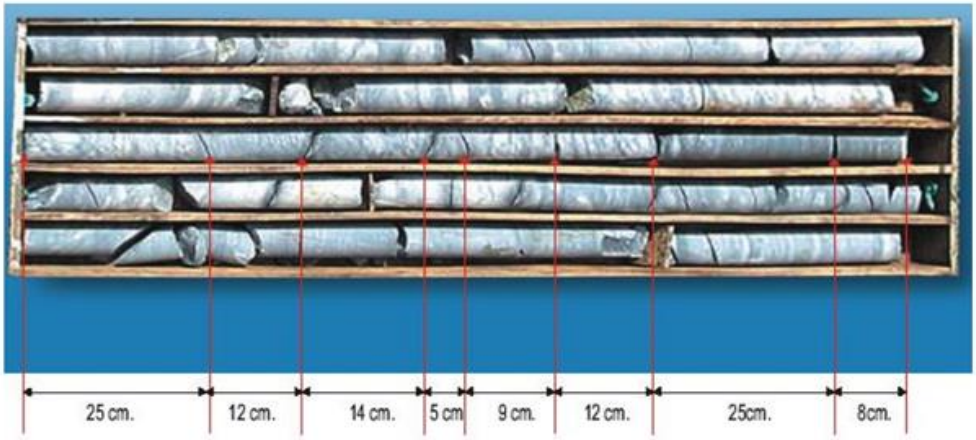
El RQD se puede estimar a partir de:

- **Primer procedimiento:**

Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayores que 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m.

$$RQD = \frac{L_{TROZOS} - 10\ cm}{150\ \text{cm}}$$

Ejemplo 01: Se tiene la siguiente grafica determinar el valor del RQD



RQD = $\frac{25 + 12 + 14 + 12 + 25}{110}$

RQD=0.8 x 100% = 80%

RQD	CALIDAD DE ROCA	TIPO
100-90	Excelente	I
90-75	Muy Buena	II
75-50	Buena	III
50-25	Regular	IV
<25	Mala	V

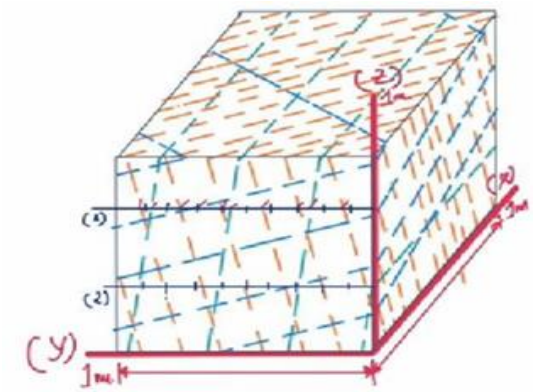
- **Segundo procedimiento:**

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera, basado en la siguiente ecuación de Priest & Hudson (1976):

RQD=1 00*e(-o.1·>-J *(0.1 *A+1)

A=1/(SPAM)

SPAM = el promedio de los espaciamientos por 1 metro



Ejemplo:

DATOS	ESPACIAMIENTO (M)
1	0.12
2	0.13
3	0.05
4	0.13
5	0.15
6	0.02
7	0.1
8	0.05
9	0.08
10	0.03
Promedio	0.086

Datos:

A= 1/0.086 = 11.63

e= 2.782

RQD = 100 e (-0.1A *(0.1A+1))

RQD = 100*2_7182(-01·1163*(01·1153+1n

RQD = 70.54%

- **Tercer procedimiento:**

Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras, por metro cúbico, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (Detail line) en el área y/o zona predeterminada de la operación minera.

Fórmula matemática:

RQD = 115 - 3,3 (Jv)

Siendo:

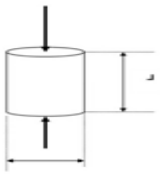
Jv = Número de fisuras por metro cúbico.

b. RCU o resistencia compresiva uniaxial del material rocoso

(**Schlumberger, 0.2018**). Es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse. Se conoce también como la resistencia a la compresión no confinada de un material porque el esfuerzo de confinamiento se fija en cero.

La fórmula matemática para determinar la resistencia a la compresión es:

$$\sigma_c = \frac{F}{D}$$



Donde:

σc = Esfuerzo de Compresión en (Kg/cm2) o MPa

F = Carga ultima aplicada Kilos

D = Diámetro en cm2

c. Espaciamiento de las discontinuidades

(**Duque, G. 2017**). Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia. Debe advertirse que el espaciamiento aparente es el que muestra en superficie de la roca, por regla general es mayor que el real. Se utiliza el promedio.

d. Condición de las discontinuidades

Para describir el estado de las discontinuidades se utilizan los siguientes parámetros:

Persistencia.

Abertura.

Rugosidad.

Relleno.

Alteración o meteorización

e. Condiciones del agua subterránea

En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo de agua a razón de litros/min cada 10 metros de la excavación.

f. Orientación de las discontinuidades

Es la orientación de las discontinuidades principales (rumbo y buzamiento) respecto a la dirección del eje longitudinal de desarrollo de la excavación.

A	PARAMETROS DE CLASIFICACIÓN							
1	Resistencia de la Roca Intacta (Mpa)							
	Comprensión Simple	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Rango para Ensayo		
	Ensayo de Descarga Puntual	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25		
	Puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación de Diaclasas	> 2 m.	0.6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0.06 - 0.2 m.	< 0.06 m.		
	Puntuación	20	15	10	8	5		
4	Estado de Discontinuidades:							
	Longitud	< 1 m	1 - 3 m.	3 - 10 m.	10 - 20 m.	> 20 m.		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1 mm.	0.1 - 1.0 mm.	1 - 5 mm.	> 5 mm.		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Lig. Rug.	Lisa o Plana	Pulida		
	Puntuación	6	5	6	1	0		
	Relleno	Inalterada	Lig. Alter	Moder. Alter	Muy Alter	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Alteración	Inalterada	Lig. Alter	Moder. Alter	Muy Alter	Descompuesta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua Subterránea							
	Flujo por C/10 m. de Labor	Nulo	< 10 Lts/min.	10-25 Lts/min	25-125 Lts/min.	> 125 Lts/min.		
	Presión de Agua / Tensión Principal	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	Estado General	Seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Fluyendo		
	Puntuación	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1989), Clasificación Geomecánica RMR

Tabla 10. *Corrección por condición de discontinuidades*

C	CLASIFICACIÓN				
	Clase	I	II	III	IV	V
	Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
	Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Fuente: Bieniawski (1989), Clasificación Geomecánica RMR.

Tabla 11. *Corrección por orientación de discontinuidades*

	CORRECCIÓN POR LA ORIENTACIÓN DE DESCONTINUIDADES					
B	Dirección y Buzamiento	Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable
	Túneles y Minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-2	-25	-25	-60

Fuente: Bieniawski (1989), Clasificación Geomecánica RMR.

Tabla 12. *Características geotécnicas*

	CARACTERISTICAS GEOTECNICAS					
D	Clase	I	II	III	IV	V
	Tiempo de Mantenimiento	10 años	6 meses	1 semana	10 horas	30 minutos
	Longitud	15 m.	8 m.	5 m.	2.5 m.	1 m.
	Cohesión	> 4 kp/cm2	3 - 4 kp/cm2	2 - 3 kp/cm2	1 - 2 kp/m2	< 1 kp/cm2
	Angulo de Rozamiento	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Fuente: Bieniawski (1989), Clasificación Geomecánica RMR.

2.2.9. Q de Barton

(**Maguiña, 2014**) Q de Barton se emplea mayoritariamente en la evaluación del sostenimiento de túneles mediante bulones, cerchas, hormigón proyectado, etc. La clasificación Q fue desarrollada en 1974 por Barton, Lunde y Lien a partir de la información de numerosos túneles.

Ecuación de Q de Barton:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

R.Q.D: Índice de calidad de la roca.

Jn: Índice de diaclasado que indica el grado de fracturación.

Jr: Índice que contempla la rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.

Ja: Índice de alteración de las discontinuidades.

Jw: Coeficiente reductor por la presencia de Agua.

SRF: (Stress reduction factor) Coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional sobre el macizo rocoso.

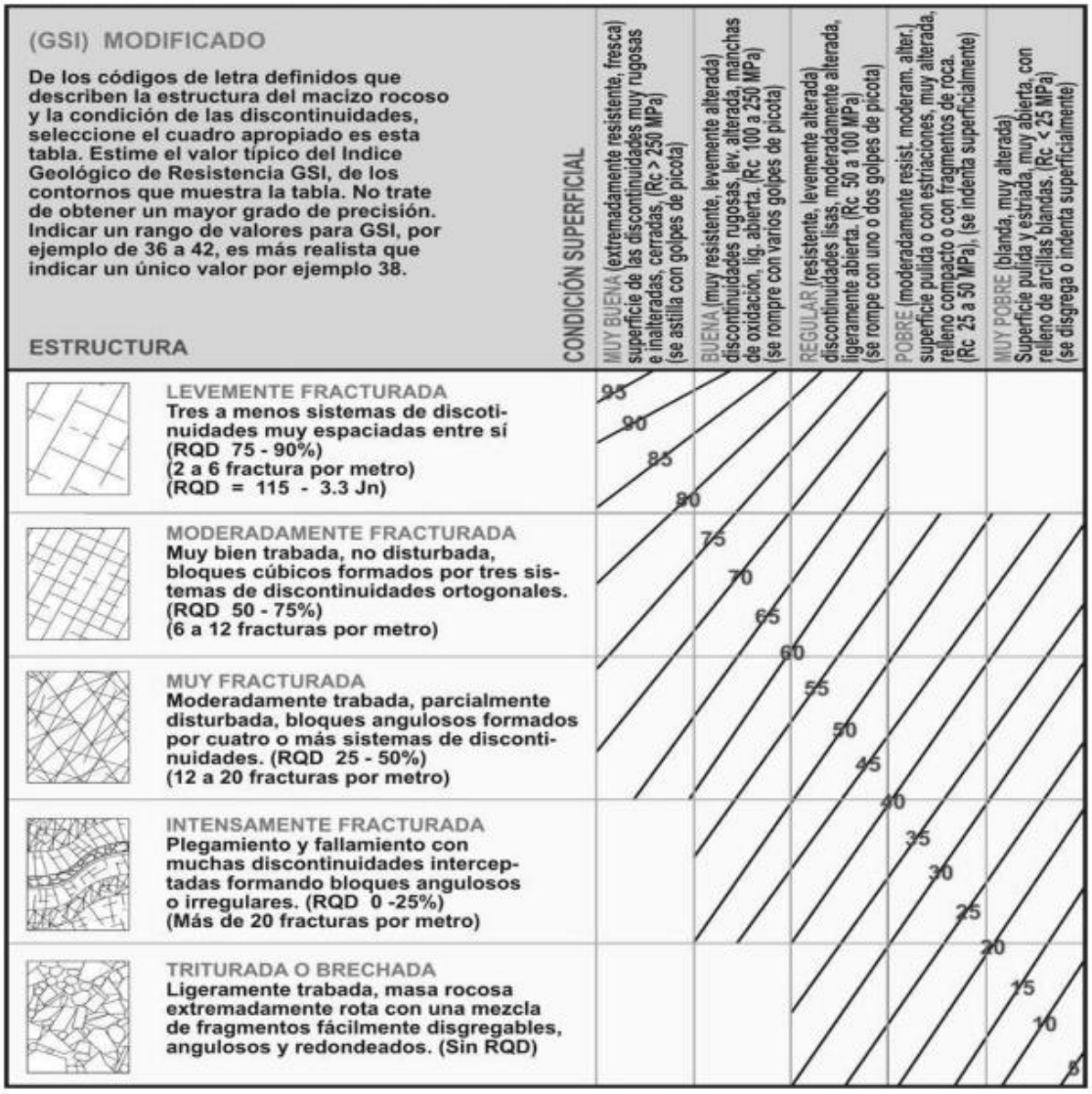
TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente Malo	10^{-3} - 10^{-2}
Extremadamente Malo	10^{-2} - 10^{-1}
Muy Malo	10^{-1} - 1
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy Bueno	40 - 100
Extremadamente Bueno	100 - 400
Excepcionalmente Bueno	400 - 1000

Fuente: Q de Barton, Departamento de Geología

Geological Strength Index (GSI)

El GSI es principalmente útil para macizos rocosos más blandos con RMR menor a 20. El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

Tabla 13. *GSI Modificada*



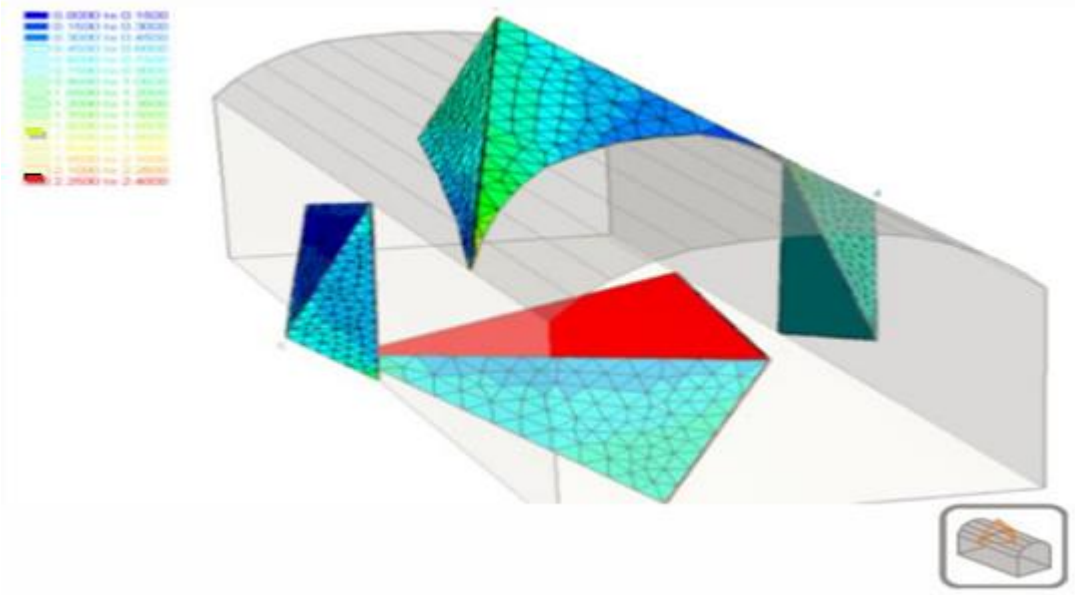
Fuente: GSI Departamento de Geología

2.2.10. Unwedge 3.0

UNWEDGE es un programa de visualización y análisis de estabilidad 3D para excavaciones subterráneas en rocas que contienen discontinuidades estructurales que se cruzan. Los factores de seguridad se calculan para cuñas potencialmente inestables y los requisitos de soporte se pueden modelar utilizando varios tipos de patrón y pernos puntuales y hormigón proyectado. Utilice UNWEDGE para crear rápidamente un modelo, realizar un análisis del factor de seguridad, colocar el refuerzo e interpretar los

resultados. El intérprete de datos gráficos proporciona un amplio conjunto de herramientas, incluida la animación 3D, para la visualización conveniente de las cuñas que rodean la excavación.

Figura 35. *UNWEDGE 3. O*



Fuente: Software UNWEDGE.

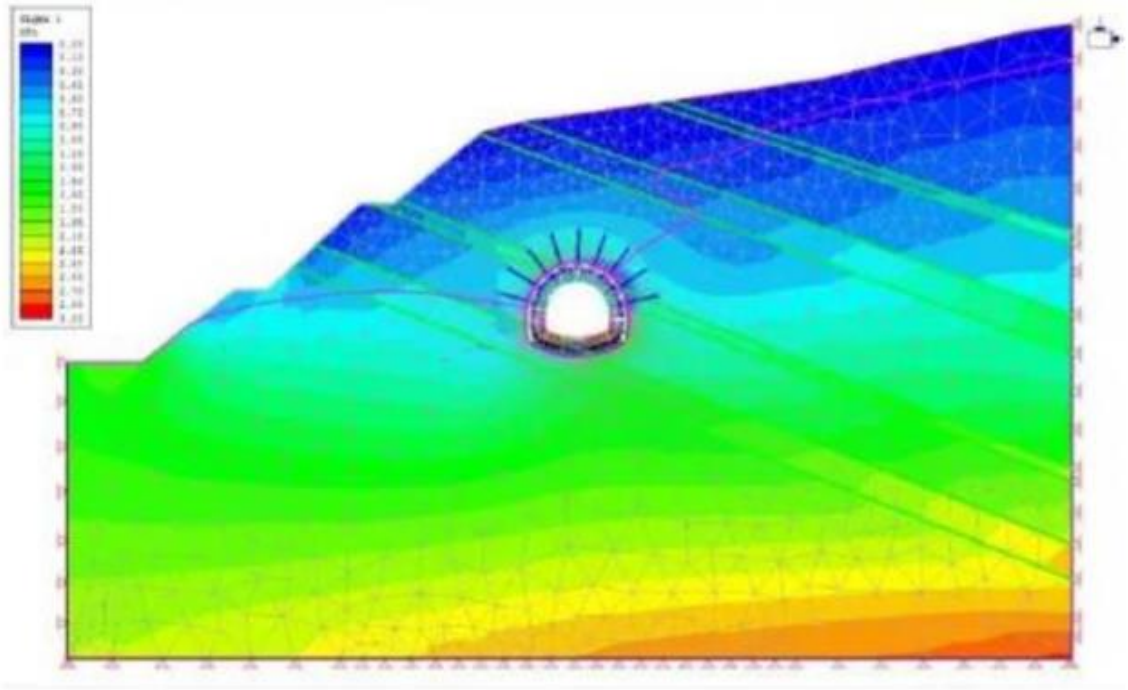
2.2.11. Phase 2

Phase 2 es un potente programa 2D para el análisis de elementos finitos y de tensiones para excavaciones subterráneas o superficiales en roca o suelo. El software puede utilizarse para una amplia gama de proyectos de ingeniería y diseño, e incluye soporte para la estabilidad de taludes, la infiltración de aguas subterráneas y el análisis probabilístico. Phase 2 puede utilizarse para modelar la excavación de una mina a cielo abierto. El modelo puede excavarse por etapas y puede incluir fallas subverticales que interceptan el terreno. Pueden crearse fácilmente y analizarse rápidamente modelos de excavación complejos o múltiples: túneles en roca débil o articulada, cavernas de metro, minas a cielo abierto y taludes, vertederos, estructuras de tierra estabilizada (SSES) y mucho más. Es posible abordar el fallo progresivo, la interacción de los apoyos y una gran variedad de otros problemas. Phase 2 ofrece una amplia gama

de opciones de modelado de apoyos. En la modelización proyectada pueden aplicarse elementos de revestimiento: hormigón, sistemas de armazón de acero, muros de contención, pilotes, revestimientos compuestos multicapa, geotextiles y mucho más.

Una de las principales características de Phase 2 es el análisis de elementos finitos y de estabilidad de taludes mediante el método de reducción de la fuerza de corte. Esta opción está totalmente automatizada y puede utilizarse con cualquier parámetro de fuerza de Mohr Coulom.

Figura 36. *Phase 2*



Fuente: Software Phase 2

2.2.12. Factor de seguridad

El factor de seguridad es la relación de esfuerzos del peso de material y el esfuerzo de la presión hidrostática.

$$f_s = \frac{Sp}{\sigma_p}$$

Factor de Seguridad de diseño:

Donde:

fs = Factor de Seguridad

Sp = Resistencia que soporta el pilar

<Jp = Esfuerzo que afecta a la columna de la excavación

Si:

FS < 1 entonces es condición de inestabilidad.

FS = 1 entonces es condición de equilibrio.

FS > 1 entonces es condición de estabilidad.

2.2.13. Análisis Geomecánico (Variable Dependiente)

El análisis geomecánico se refiere a la evaluación del comportamiento mecánico del macizo rocoso mediante la caracterización de sus propiedades físicas, estructurales y de resistencia, con el fin de predecir su respuesta ante las actividades mineras. Este análisis incluye tanto métodos empíricos como numéricos para establecer criterios de estabilidad y diseñar sistemas de soporte adecuados.

Según **Bieniawski (1989)**, "el análisis geomecánico es fundamental en el diseño de excavaciones subterráneas, ya que permite clasificar el macizo rocoso y determinar la necesidad de refuerzo con base en parámetros como la resistencia, el estado de fracturamiento, la calidad del macizo y las condiciones de humedad".

Por su parte, **Hoek y Brown (1997)** desarrollaron un criterio de resistencia ampliamente utilizado en minería, el cual permite estimar la resistencia a la compresión y al corte del macizo rocoso en función de su estructura y cohesión. Su modelo se aplica para el análisis de estabilidad de taludes, túneles y cámaras subterráneas.

De acuerdo con **Brady y Brown (2004**), "el análisis geomecánico no solo sirve para evaluar la seguridad, sino también para optimizar el diseño de excavaciones subterráneas, reduciendo costos y aumentando la eficiencia operativa".

El uso de software especializado como **RocData, Dips, Phase2**, entre otros, permite simular escenarios geotécnicos y determinar zonas de concentración de esfuerzos, potenciales fallas y zonas críticas dentro del macizo.

Evaluación geomecánica

Los métodos utilizados para la extracción de mineral se basan en consideraciones geomecánicas. Este proceso implica un análisis de la situación actual en el lugar, que abarca los procedimientos de extracción, la revisión de indicadores y la identificación de las limitaciones que afectan la productividad y rentabilidad de los métodos aplicados en la actualidad. Luego, se lleva a cabo un estudio de las condiciones geológicas y geomecánicas presentes en las estructuras minerales, como galerías, chimeneas, piques y chutes en distintos niveles y subniveles, dentro del contexto físico de las vetas. A partir de este análisis, se realiza una selección conceptual de los métodos basada en criterios geomecánicos, con el objetivo de mejorar las operaciones mineras.

Criterios geomecánicos

Los responsables, propietarios y la alta dirección de una mina subterránea esperan que el sistema de explotación que se utilice satisfaga las necesidades esenciales de estabilidad, recuperación de mineral, retorno de inversión, protección ambiental y compromiso social. Por lo tanto, es crucial que los criterios geomecánicos que guíen el desarrollo de la explotación subterránea se integren plenamente en la política corporativa. Esto implica que, antes de diseñar el plan de explotación, se deben alinear las necesidades específicas de diseño, operación y cierre del proyecto con los criterios geomecánicos y geotécnicos correspondientes.

Los criterios geomecánicos que deben considerarse en el desarrollo de un plan minero o en la planificación minera son los siguientes.

- Criterios geomecánicos para el diseño y utilización de la excavación minera:
    - Consideraciones sobre el uso previsto de la excavación.
    - Evaluación del factor de seguridad y/o probabilidad de fallo.
    - Determinación del área de influencia.
    - Adherencia a las normas técnicas aplicables.
- Criterios geomecánicos durante la construcción y operación:
    - Establecimiento de estándares constructivos.
    - Definición de especificaciones técnicas.
    - Implementación de técnicas de construcción y operación.
    - Realización de mapeo, instrumentación y monitoreo.
- Criterios geomecánicos para el cierre de minas:
    - Consideración de la durabilidad.
    - Implementación de sistemas de monitoreo y mantenimiento adecuados.

Clasificaciones geomecánicas

Según **González de Vallejo (2002),** la clasificación de los macizos rocosos tiene como objetivo principal proporcionar parámetros geomecánicos que se utilicen en el diseño y planificación de obras de ingeniería, especialmente en el ámbito minero. Estas clasificaciones se basan en la observación directa de las características de los macizos rocosos y en la realización de ensayos que proporcionan índices de calidad relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo rocoso, así como sus características frente a las estructuras de soporte como túneles, taludes y chimeneas.

Las características de los macizos rocosos que se consideran en las diferentes clasificaciones geomecánicas incluyen:

- Resistencia del material rocoso
- Índice de calidad RQD

- Espaciado de las discontinuidades
- Orientación de las discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades
- Estructura geológica y fallas
- Filtraciones y presencia de agua
- Estado tensional

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en la actualidad son la RMR de Bieniawski y la Q de Barton. La primera se emplea tanto para caracterizar los macizos rocosos y sus propiedades como para su aplicación en túneles. Por otro lado, la clasificación Q se utiliza principalmente en túneles y chimeneas, al igual que la clasificación SRC. Estas clasificaciones geomecánicas permiten determinar el tipo de sostenimiento adecuado para las labores subterráneas (5).

- **Índice de calidad de roca (RQD, 1964)**

  El índice RQD (Rock Quality Designation) es una medida geomecánica que evalúa el grado de fracturamiento de un macizo rocoso y lo clasifica en distintos niveles de calidad, reflejando la frecuencia lineal de las discontinuidades presentes. Este índice se emplea como un parámetro

- **Importante en las clasificaciones geomecánicas,** como la RMR de Bieniawski y la Q de Barton. El cálculo del RQD se realiza mediante la siguiente expresión:

$$RQD = 115 - 3.3 * j_v$$

$$Para\ j_v < 4{,}5 \quad RQD = 100$$

Donde:

- J_V está definido como cantidad de diaclasas por m^3. O tambien se puede aplicar la siguiente expresión:

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

$$\lambda = \frac{Número\ de\ discontinuidades}{longitud\ (metros)}$$

Tabla 2. ***Calidad del macizo rocoso según el índice RQD de Deere (1968). (6)***

RQD (%)	Calidad
<25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

En este estudio, se emplearán las clasificaciones geomecánicas RMR y GSI, que habitualmente se utilizan en túneles, pero en esta ocasión las aplicaremos en chimeneas. Estos dos sistemas de clasificación geomecánica nos ayudarán a determinar el tipo de sostenimiento que se debe utilizar en la excavación subterránea.

- **Calidad del macizo rocoso (RMR, 1989)**

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, esta clasificación permite establecer una relación entre los índices de calidad y los parámetros geotécnicos del macizo rocoso, así como el tipo de sostenimiento adecuado para túneles.

Este método se utiliza mediante la valoración correspondiente de cada uno de sus seis parámetros. El factor varía según la orientación de las discontinuidades y toma valores diferentes según se aplique a túneles, chimeneas, cimentaciones o

taludes. El resultado final del índice RMR, obtenido al sumar los seis parámetros, varía de 0 a 100 y se divide en cinco clases de roca. Un valor de 100 indica una roca de muy buena calidad, mientras que un valor de 0 indica una roca de muy baja calidad.

Los parámetros utilizados para el cálculo del RMR son:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- Grado de fracturación expresado mediante el RQD
- Espaciado entre discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades, que incluyen longitud, apertura, rugosidad, relleno y alteración
- Condiciones hidrogeológicas
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación

Según lo expuesto por González de Vallejo (2004), para realizar la clasificación RMR, el macizo rocoso se divide en tramos con características geológicas uniformes, basándose en observaciones de campo. Se recopilan datos de los seis parámetros mencionados anteriormente para cada tramo, lo que permite estimar el valor del RMR para cada uno de ellos.

Estructura del macizo rocoso

La composición del macizo rocoso se refiere al conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y otras características geológicas propias de una determinada área.

En ingeniería de rocas, se considera que la composición del macizo rocoso incluye también los tipos de roca presentes en él.

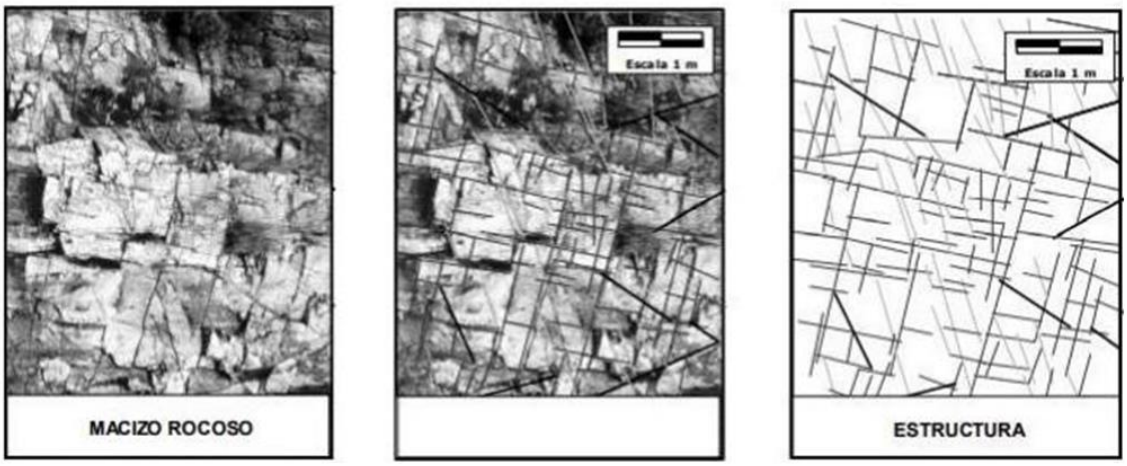
La combinación de diferentes tipos de roca puede dar lugar a consecuencias difíciles de predecir desde una perspectiva geotécnica; por ejemplo, en una secuencia sedimentaria, ciertos tipos de roca pueden ser más susceptibles a la meteorización que

otros, lo que podría aumentar la susceptibilidad a la meteorización de los demás tipos de roca presentes en el macizo.

Un dominio estructural se define como la porción del macizo rocoso, generalmente delimitada por discontinuidades geológicas, donde la composición es relativamente homogénea.

Por ejemplo, en las discordancias o en zonas de pliegues se pueden identificar diferentes dominios estructurales.

Figura 37. *Concepto de macizo rocosos y estructura*



Fuente: Departamento de geología

A continuación, se describen los diferentes tipos de discontinuidades:

- **Estratificación**

  Se refiere a la disposición de capas de roca con una litología uniforme o con gradaciones, depositadas de manera paralela a la inclinación de la formación. Por lo general, están separadas de las capas adyacentes por zonas de erosión. Cuando el macizo rocoso está compuesto por un solo tipo litológico, puede ser difícil distinguir las estratificaciones.

- **Laminación**

  Se refiere a una zona de discontinuidad que confiere a las rocas un aspecto laminar con capas bastante delgadas. Esta laminación puede ser el resultado de presiones orogénicas o de procesos sedimentarios.

- **Esquistosidad**

  Se manifiesta en un macizo rocoso cuando presenta una composición, ya sea de origen tectónico o metamórfico, con láminas u hojas paralelas.

- **Esquistosidad de fractura.**

  Esta se produce debido a una gran cantidad de micro fallas o micropliegues-falla muy cercanos, con espaciados del orden de unos pocos milímetros, que se superponen a una deformación continua apreciable y separan láminas sin generar orientación de los minerales.

- **Esquistosidad de flujo.**

  Este fenómeno ocurre debido a un aplastamiento que resulta en un reajuste de la textura de la roca, lo que provoca una orientación paralela de todos los minerales, recristalizaciones y disoluciones orientadas.

  Como resultado, se produce una anisotropía general sin que haya discontinuidades. Este proceso de cristalización no elimina todas las trazas de la estratificación.

- **Foliación**

  La foliación representa una etapa avanzada de la esquistosidad de flujo, que surge cuando las condiciones de presión y temperatura aumentan, lo que lleva a la aparición de minerales metamórficos orientados de mayor tamaño. Esto transforma la roca en una secuencia de hojas con diferentes minerales entre cada dos planos de anisotropía.

- **Pizarrosidad**

  Se refiere a la propiedad de las rocas de aspecto laminar de poder separarse en hojas delgadas. Este fenómeno implica cierto grado de metamorfismo.

- **Fallas y juntas**

  Estos son planos de discontinuidad que se forman cuando el macizo rocoso ha sido sometido a esfuerzos tectónicos que superan su límite de rotura.

  Cuando las secciones separadas por la fractura han experimentado desplazamientos relativos debido a tensiones cortantes, se denomina falla.

  Por otro lado, si no hay movimiento relativo entre las secciones separadas, se llama junta. Estas discontinuidades también pueden formarse como resultado de la reducción de la compresión vertical debido a la erosión o a los cambios de volumen diferenciales en ciertos macizos rocosos.

Propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso

El comportamiento del macizo rocoso, que consiste en los bloques de roca matriz junto con las discontinuidades, está determinado por las propiedades de la matriz rocosa que lo conforma.

Estas propiedades incluyen su resistencia y características como la alteración o la meteorización, las cuales pueden afectar a las rocas menos resistentes, especialmente con el paso del tiempo y la exposición a factores ambientales.

Además de esto, la frecuencia y el tipo de discontinuidades presentes en el macizo rocoso son factores determinantes en su comportamiento general. Sin embargo, otros factores como las estructuras tectónicas (pliegues, tensiones naturales),

condiciones hidrogeológicas y factores geo ambientales también influyen de manera conjunta en el comportamiento mecánico del macizo rocoso.

Los esfuerzos aplicados sobre la roca determinan los patrones de deformación y el comportamiento mecánico del conjunto del macizo rocoso.

Las clasificaciones geotécnicas o geomecánicas generales para los diferentes tipos de macizo rocoso han sido difíciles de establecer debido a la variabilidad de los factores mencionados anteriormente, así como el carácter discontinuo e isotrópico de los macizos (5).

En el campo de la mecánica de rocas, las clasificaciones más útiles son conocidas como clasificaciones geomecánicas, entre las cuales destacan el RMR de Bieniawski y la Q de Barton como las más utilizadas (**Gonzales de Vallejo, 2002**).

Estas clasificaciones categorizan el macizo rocoso en diferentes niveles de calidad en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, lo que proporciona estimaciones de sus propiedades resistentes globales.

Además, existen otras clasificaciones basadas en diversos parámetros de las propiedades del macizo rocoso, como **Therzagui 1946, Romana 1985** y el índice de resistencia geológica (GSI), entre otras.

Estas clasificaciones establecen distintos niveles de calidad del macizo rocoso según los parámetros evaluativos de las propiedades de la matriz rocosa y las discontinuidades, lo que permite estimar la resistencia global del macizo rocoso.

2.2.14. Factor de Seguridad del Puente Geomecánico (Variable Independiente)

El factor de seguridad (FS) es un parámetro que cuantifica la estabilidad de una estructura geotécnica o componente del macizo rocoso. Se define como la relación entre la resistencia disponible del sistema (macizo y soporte) y las solicitaciones a las que está sometido.

Hoek y Bray (1981) señalaron que “el factor de seguridad representa una medida de confiabilidad estructural; valores menores a 1.0 indican falla inminente, mientras que valores entre 1.2 y 2.0 se consideran adecuados dependiendo del nivel de riesgo aceptable”.

En minería subterránea, los puentes geomecánicos representan zonas donde el macizo rocoso debe soportar cargas internas sin colapsar, por lo que su estabilidad depende directamente de las condiciones geomecánicas. El cálculo del FS permite definir si dichas zonas son seguras o si requieren soporte adicional.

Según el Manual de Diseño de Excavaciones Subterráneas de **Rocscience (2019)**, el factor de seguridad puede ser determinado mediante análisis de equilibrio límite, métodos numéricos (como el método de elementos finitos o diferencias finitas) y correlaciones empíricas basadas en la clasificación del macizo rocoso.

El control del FS fue indispensable en esta investigación para evitar el colapso del puente geomecánico del Tajo K-470 S, garantizando así la seguridad de las operaciones y la integridad de la infraestructura minera.

2.3. Definición de términos básicos

a. Análisis Geomecánico:

Es el estudio del comportamiento del macizo rocoso ante condiciones de carga y esfuerzos inducidos, mediante la caracterización de sus propiedades físicas, estructurales y de resistencia. Involucra el uso de clasificaciones geomecánicas y métodos de modelamiento numérico para predecir su estabilidad y comportamiento frente a excavaciones subterráneas (Bieniawski, 1989).

b. Macizo Rocoso:

Conjunto de rocas que forma una masa continua en el subsuelo, caracterizada por su grado de fracturamiento, resistencia y propiedades mecánicas. Su estabilidad

es fundamental en obras subterráneas, como túneles y galerías (Hoek & Brown, 1997).

c. Puente Geomecánico:

Zona de roca que permanece entre dos excavaciones mineras (tajeos, cámaras o galerías) y que debe soportar las cargas inducidas por la explotación sin colapsar. Su evaluación permite determinar su factor de seguridad y decidir si requiere soporte o refuerzo adicional.

d. Factor de Seguridad (FS):

Relación entre la resistencia del macizo rocoso o estructura y los esfuerzos a los que está sometido. Un FS mayor a 1 indica estabilidad, mientras que un valor menor a 1 señala riesgo de falla (Hoek & Bray, 1981).

e. Clasificación Geomecánica:

Método empírico que permite evaluar la calidad del macizo rocoso a través de sistemas como RMR (Rock Mass Rating), Q de Barton o GSI (Geological Strength Index), con el fin de orientar el diseño de soporte y prever el comportamiento del macizo (Brady & Brown, 2004).

f. Modelamiento Numérico:

Herramienta computacional utilizada para simular el comportamiento del macizo rocoso y sus respuestas ante distintas condiciones de carga, geometría y excavación. Programas como Phase2, Dips o RocData son ampliamente utilizados en geotecnia minera.

g. Estabilidad Geomecánica:

Condición en la que el macizo rocoso mantiene su integridad estructural ante esfuerzos naturales o inducidos, sin sufrir deformaciones críticas o colapsos. Su análisis es esencial para garantizar la seguridad en excavaciones subterráneas.

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La evaluación geomecánica efectuada permitió establecer adecuadamente la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín.

2.4.2. Hipótesis específicas

a. La caracterización geomecánica realizada permitió determinar de manera precisa los parámetros del puente geomecánico en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín.

b. El control de seguridad efectuado en la Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, permitió verificar la estabilidad estructural del macizo rocoso en la zona de influencia del puente geomecánico.

2.5. Identificación de Variables

2.5.1. Variable Independiente

Análisis Geomecánico

2.5.2. Variable Dependiente

Factor de Seguridad del Puente Geomecánico

2.6. Definición Operacional de Variables e Indicadores

Tabla 14. *Operacionalización de Variables*

Variable Independiente: Análisis Geomecánico

Dimensión	Indicador	Técnica / Instrumento	Escala de Medición
Caracterización del macizo rocoso	- Tipo de roca predominante- Clasificación RMR, Q, GSI	Análisis de campo, software RocData y Dips	Cuantitativa / Ordinal
Propiedades mecánicas	- Resistencia a compresión simple- Cohesión- Ángulo de fricción	Ensayos de laboratorio, análisis geotécnico	Cuantitativa
Modelamiento numérico	- Concentración de esfuerzos- Deformaciones esperadas- Zonas críticas	Software Phase2, modelamiento FEM	Cuantitativa
Estabilidad estructural	- Grado de estabilidad del macizo- Necesidad de soporte	Informe técnico y validación con criterios de estabilidad	Cualitativa / Ordinal

Fuente: Elaboración propia

Variable Dependiente: Factor de Seguridad del Puente Geomecánico

Dimensión	Indicador	Técnica / Instrumento	Escala de Medición
Evaluación del factor de seguridad	- Valor del Factor de Seguridad (FS)	Software Phase2 / RocSupport	Cuantitativa
Estabilidad del puente geomecánico	- Presencia de fallas- Necesidad de soporte adicional	Observación técnica, inspección geomecánica	Cualitativa / Ordinal
Control geotécnico	- Cumplimiento de estándares de estabilidad- Diagnóstico estructural	Fichas de control, informes técnicos, simulación	Cualitativa

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo aplicada, ya que se enfocó en la solución de un problema técnico real relacionado con la estabilidad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín. Su finalidad fue generar conocimientos prácticos mediante la caracterización geomecánica del macizo rocoso y la aplicación de estos resultados en el diseño y control de la explotación minera.

Asimismo, se clasificó como una investigación de tipo experimental, debido a que se realizó un análisis técnico basado en datos recolectados mediante ensayos de laboratorio, observaciones directas en campo y simulaciones numéricas. Estos procedimientos permitieron evaluar la respuesta del macizo rocoso ante distintas condiciones de carga, y calcular el factor de seguridad del puente geomecánico.

También se consideró una investigación documental, ya que se recurrió a informes técnicos previos, registros geotécnicos, planos de minado y documentación generada por la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca, como parte del análisis retrospectivo y de contexto del área en estudio.

Por otro lado, fue una investigación de campo y de laboratorio, en la medida que se realizó la recolección directa de datos geológicos, estructurales y mecánicos en el área del Tajo K-470 S, complementados con ensayos físico-mecánicos en laboratorio para obtener parámetros clave del macizo rocoso.

En síntesis, esta investigación combinó métodos cuantitativos y técnicos para desarrollar una evaluación integral del puente geomecánico, integrando conocimiento teórico y aplicado en beneficio de la seguridad minera subterránea.

3.2. Nivel de investigación

La investigación se desarrolló en el nivel descriptivo-explicativo.

Fue descriptiva porque permitió identificar y detallar las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso en el área del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín. A través de la recopilación y análisis de datos de campo, de laboratorio y de información documental, se describieron las condiciones litológicas, estructurales y los parámetros de resistencia del terreno.

Asimismo, tuvo un enfoque explicativo, ya que buscó establecer relaciones causales entre las condiciones del macizo rocoso y la estabilidad del puente geomecánico. A través del modelamiento numérico y el análisis de esfuerzos, se explicó el comportamiento del macizo ante la influencia de las actividades de explotación minera, lo que permitió determinar el valor del factor de seguridad y justificar las condiciones de estabilidad o inestabilidad presentes.

Este nivel de investigación fue esencial para proponer medidas de control técnico y operativo, sustentadas en evidencia cuantitativa y simulaciones geomecánicas precisas.

3.3. Método de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la recolección, análisis y procesamiento de datos numéricos, con el fin de interpretar objetivamente el comportamiento geomecánico del macizo rocoso en el área del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430.

El estudio se enmarcó dentro del paradigma positivista, al utilizar métodos empíricos y objetivos para explicar la realidad geotécnica mediante observación directa, experimentación, modelamiento numérico y validación técnica de resultados. Asimismo, siguió el método hipotético-deductivo, partiendo de una hipótesis general y específicas que fueron contrastadas con la información obtenida en campo, laboratorio y software especializado.

El **alcance** de la investigación fue de **naturaleza descriptiva y explicativa**, ya que describió con detalle las condiciones geomecánicas del macizo rocoso y explicó, mediante análisis técnico, el nivel de seguridad del puente geomecánico.

Para la recolección de información se aplicaron los siguientes métodos:

Mapeo geomecánico: Se determinó la ubicación de cada estación geotécnica y estructural a través de la observación directa en campo. Se seleccionaron áreas representativas con base en criterios técnicos, como presencia de fracturas, zonas de falla, disturbios provocados por las operaciones, litologías predominantes, grietas de tracción y presencia de agua.

Logueo geotécnico: Se realizó el registro detallado de las perforaciones diamantinas ejecutadas en el yacimiento, considerando parámetros como recuperación de testigos, índice RQD, tipo y orientación de fracturas, alteraciones, y contacto litológico, entre otros.

Muestreo: Se recolectaron muestras representativas de las perforaciones diamantinas y de algunos frentes de explotación o taludes. Las muestras correspondieron a diferentes unidades litológicas y fueron destinadas a ensayos físico-mecánicos en laboratorio para determinar parámetros como resistencia a compresión simple, cohesión y ángulo de fricción.

Estos métodos permitieron obtener información fiable y suficiente para realizar el análisis geomecánico y calcular el factor de seguridad del puente geomecánico en estudio.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación correspondió a un diseño cuantitativo, descriptivo y correlacional. Este diseño permitió recopilar datos objetivos y medibles del macizo rocoso, con el fin de describir sus características geomecánicas y analizar su relación con la estabilidad del puente geomecánico ubicado en el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín.

El enfoque descriptivo permitió detallar las propiedades físicas, estructurales y mecánicas del macizo rocoso, mediante observaciones directas en campo, registros técnicos y ensayos de laboratorio.

Por su parte, el enfoque correlacional facilitó el análisis de la relación entre los parámetros geomecánicos obtenidos y el valor del factor de seguridad, permitiendo establecer cómo determinadas condiciones del terreno influían en el nivel de estabilidad del puente geomecánico.

Este diseño fue el más adecuado para alcanzar los objetivos de la investigación, al integrar métodos técnicos, empíricos y computacionales, asegurando un análisis riguroso y fiable que contribuyó a la toma de decisiones en el proceso de explotación de la Mina Berlín.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población de la presente investigación estuvo constituida por los diferentes tajos que conformaban la Mina Berlín, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca. Estos tajos representaban el conjunto de sectores activos o planificados dentro del proceso de explotación minera, en los cuales se requería mantener un adecuado control geomecánico para asegurar la estabilidad del macizo rocoso, especialmente en la zona de la Veta 3.

3.5.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín. Este tajo fue seleccionado debido a su relevancia operativa dentro del plan de explotación y por representar una estructura crítica en términos de estabilidad geomecánica. En este sector se realizó la recolección y análisis de datos geológicos, estructurales y geotécnicos que permitieron desarrollar el estudio y cálculo del factor de seguridad del puente geomecánico.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de Recolección de Datos

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon diversas técnicas de recolección de datos, tanto de campo como documentales, que permitieron obtener información precisa y relevante sobre las condiciones geomecánicas del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín:

- **Selección y Análisis de Datos Previos:**

  Se recopiló y analizó información proveniente de evaluaciones geomecánicas anteriores realizadas en la unidad minera. Estos datos históricos permitieron establecer una base comparativa para validar los resultados actuales.

- **Observación Directa y Toma de Datos en Campo:**

  Se realizaron mapeos geomecánicos in situ a lo largo del puente geomecánico, permitiendo identificar características estructurales como fracturas, fallas, planos de debilidad, litologías predominantes, entre otros. Esta técnica fue esencial para registrar con precisión las condiciones reales del macizo rocoso.

- **Búsqueda y Revisión Bibliográfica:**

  Se consultaron estudios, informes y publicaciones técnicas sobre geomecánica aplicada en minería subterránea. Además, se revisaron experiencias documentadas de otras operaciones mineras similares, con el fin de contrastar metodologías y validar enfoques de análisis.

3.6.2. Instrumentos de Recolección de Datos

Los principales instrumentos utilizados en la recolección de datos fueron los siguientes:

- Planos topográficos del área de estudio.
- Mapeos geomecánicos detallados del Tajo K-470 S.
- Informes geotécnicos y geomecánicos previos de la unidad minera.
- Reportes técnicos de procesos mineros realizados en la zona.
- Informes operativos de la mina relacionados con el nivel 4430.
- Libreta de campo utilizada para el registro directo de observaciones.

Estos instrumentos permitieron recolectar, organizar y validar la información utilizada para el análisis técnico del macizo rocoso y la determinación del factor de seguridad del puente geomecánico evaluado.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

La selección de los instrumentos de investigación se realizó de acuerdo con la naturaleza técnica de la presente investigación, centrada en el análisis geomecánico del

macizo rocoso en el Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín. Se priorizaron instrumentos que permitieran la recolección precisa de datos estructurales, mecánicos y geológicos, tanto de campo como documentales.

3.7.1. Selección de Instrumentos:

Se eligieron los siguientes instrumentos por su utilidad práctica y validez técnica en estudios geotécnicos:

- Mapeos geomecánicos estructurales (in situ).
- Planos topográficos y geológicos actualizados.
- Informes técnicos de la mina.
- Libreta de campo para anotación directa de observaciones.
- Registros de logueo geotécnico de perforaciones diamantinas.
- Reportes de ensayos físico-mecánicos de laboratorio.
- Software especializado: Dips, RocData, RocSupport y Phase2.

3.7.2. Validación de Instrumentos

La validación de los instrumentos se llevó a cabo mediante la revisión cruzada de la información obtenida en campo con datos históricos y registros previos de la unidad minera. Además, se contrastaron los resultados de campo con los obtenidos mediante simulaciones numéricas y análisis técnico en software, lo que permitió verificar la coherencia y precisión de los datos empleados en la investigación.

Asimismo, se aplicaron criterios geomecánicos estandarizados internacionalmente, como los sistemas de clasificación RMR (Rock Mass Rating), Q de Barton y el GSI (Geological Strength Index), lo cual fortaleció la validez científica de los procedimientos utilizados.

3.7.3. Confiabilidad de Instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos se garantizó mediante la aplicación sistemática y repetida de las técnicas de medición en diferentes sectores del tajo. La consistencia de los resultados obtenidos, así como su concordancia con los informes técnicos anteriores y con los resultados de modelamiento numérico, permitieron asegurar un alto grado de precisión y objetividad en la información recolectada.

Además, la participación de personal técnico capacitado en el proceso de recolección y análisis de datos contribuyó a minimizar errores de interpretación o registro, asegurando la fidelidad del proceso investigativo.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos se realizaron utilizando criterios geomecánicos reconocidos, combinando métodos empíricos y computacionales para asegurar la precisión de los resultados y la confiabilidad del análisis del macizo rocoso.

En esta investigación, el análisis de estabilidad del puente geomecánico se basó en la resistencia al corte del macizo, regida por los parámetros de fricción y cohesión, definidos por los criterios de falla Mohr-Coulomb y Barton-Bandis.

Para la estimación de estos parámetros, se recurrió a los siguientes procedimientos:

Ensayos geotécnicos realizados sobre muestras representativas de cada dominio litológico, con el fin de identificar propiedades como la cohesión y el ángulo de fricción.

Procesamiento de datos en el software RocData, desarrollado por Rocscience Inc. (2007), el cual permitió ajustar los parámetros de resistencia al corte a través del criterio empírico de Barton-Bandis, especialmente útil para la caracterización de discontinuidades en macizos rocosos fracturados.

Se utilizaron datos conservadores en el ingreso de parámetros al modelo, con el objetivo de asegurar un análisis precautorio y confiable respecto al comportamiento del macizo bajo condiciones de esfuerzo.

Los resultados obtenidos fueron registrados y organizados en cuadros estadísticos, como se muestra en el Cuadro 06, y posteriormente utilizados para alimentar modelos numéricos desarrollados en el software Phase2, mediante el método de elementos finitos. Este modelamiento permitió simular las condiciones reales de explotación y analizar el comportamiento estructural del puente geomecánico, determinando así su factor de seguridad.

La combinación de estas técnicas permitió integrar datos de campo, laboratorio y simulación, obteniendo un análisis completo y riguroso para la toma de decisiones técnicas en la estabilidad de la Mina Berlín.

3.9. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos en la investigación se fundamentó en la evaluación sistemática de las unidades experimentales derivadas de las caracterizaciones geomecánicas. Estas evaluaciones permitieron establecer una base de datos confiable que fue procesada estadísticamente para representar el comportamiento del macizo rocoso en los distintos dominios litológicos del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín.

Se aplicaron herramientas de estadística descriptiva para determinar medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar, rango), lo que permitió caracterizar de manera cuantitativa los parámetros geomecánicos como la resistencia a la compresión, el índice RQD, la cohesión, el ángulo de fricción y el índice de calidad del macizo (Q de Barton).

Además, se elaboró un modelo geomecánico de análisis numérico utilizando software especializado como RocData y Phase2, integrando los valores estadísticos obtenidos. Estos resultados permitieron evaluar la confiabilidad del factor de seguridad estimado para el puente geomecánico, a través del modelamiento de escenarios posibles bajo condiciones de carga inducida.

El enfoque estadístico aplicado aseguró una interpretación objetiva de los datos, respaldando las conclusiones del estudio con fundamentos numéricos sólidos y validación técnica.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación se desarrolló bajo una orientación ética, filosófica y epistémica que garantizó el rigor académico, la responsabilidad profesional y el respeto por los principios fundamentales de la investigación científica.

Desde el enfoque **ético**, se aseguró la integridad de los datos recolectados, respetando la confidencialidad de la información técnica proporcionada por la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca. Todos los procedimientos se realizaron con transparencia, evitando cualquier tipo de manipulación o alteración de resultados. Asimismo, se reconoció debidamente el trabajo previo de otros profesionales a través del uso responsable de las fuentes bibliográficas y técnicas.

Desde una perspectiva **filosófica**, el estudio se sustentó en el realismo científico, que considera que los fenómenos del mundo físico —en este caso, el comportamiento del macizo rocoso— pueden ser comprendidos mediante la observación, la medición y el análisis racional. Esta postura permitió interpretar la realidad geomecánica de forma objetiva, basándose en evidencia empírica y simulaciones computacionales.

En cuanto a su **orientación epistémica**, la investigación se enmarcó dentro del positivismo, dado que se priorizó la obtención de conocimientos verificables a través

de métodos cuantitativos, replicables y medibles. Este paradigma facilitó el uso de herramientas estadísticas, análisis técnico y modelamiento numérico, con el propósito de obtener conclusiones objetivas y técnicamente fundamentadas.

En conjunto, estas orientaciones garantizaron que el desarrollo del estudio respetara tanto los principios científicos como los valores éticos y profesionales del ejercicio de la ingeniería de minas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en el sector del **Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín**, perteneciente a la Compañía Minera Santa Luisa – Unidad Pallca. Las actividades desarrolladas tuvieron como objetivo principal recolectar información geológica, estructural y geomecánica necesaria para realizar la evaluación del puente geomecánico presente en dicha zona.

Las labores de campo incluyeron:

- **Mapeo geomecánico estructural**: Se identificaron zonas representativas del macizo rocoso, incluyendo fallas, fracturas, zonas de alteración, contactos litológicos y otros elementos que pudieran afectar la estabilidad del macizo. Se establecieron estaciones de observación considerando criterios técnicos como representatividad litológica, presencia de discontinuidades y condiciones operativas del tajo.
- **Logueo geotécnico**: Se registraron los datos geotécnicos de las perforaciones diamantinas, incluyendo parámetros como el índice RQD,

tipo de fracturas, espaciado de juntas, presencia de agua, y alteración. Esta información fue sistematizada para su posterior análisis en gabinete.

- **Muestreo:** Se recolectaron muestras representativas del macizo rocoso, tanto de testigos de perforación como de frentes expuestos en el tajo. Las muestras fueron enviadas a laboratorio para la realización de ensayos físico-mecánicos (resistencia a compresión simple, tracción indirecta, entre otros), fundamentales para la caracterización del comportamiento del macizo.
- **Registro fotográfico y toma de datos de campo**: Se elaboró un registro visual y técnico de cada punto evaluado, con apoyo de croquis, coordenadas y anotaciones de campo. Esta información fue organizada en fichas técnicas para alimentar el análisis posterior.

Todas estas actividades fueron realizadas cumpliendo con los protocolos de seguridad establecidos por la operación minera y siguiendo criterios técnicos geomecánicos internacionalmente aceptados. La información recolectada en campo constituyó la base fundamental para el desarrollo del análisis geomecánico y la simulación del comportamiento estructural del puente en estudio.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

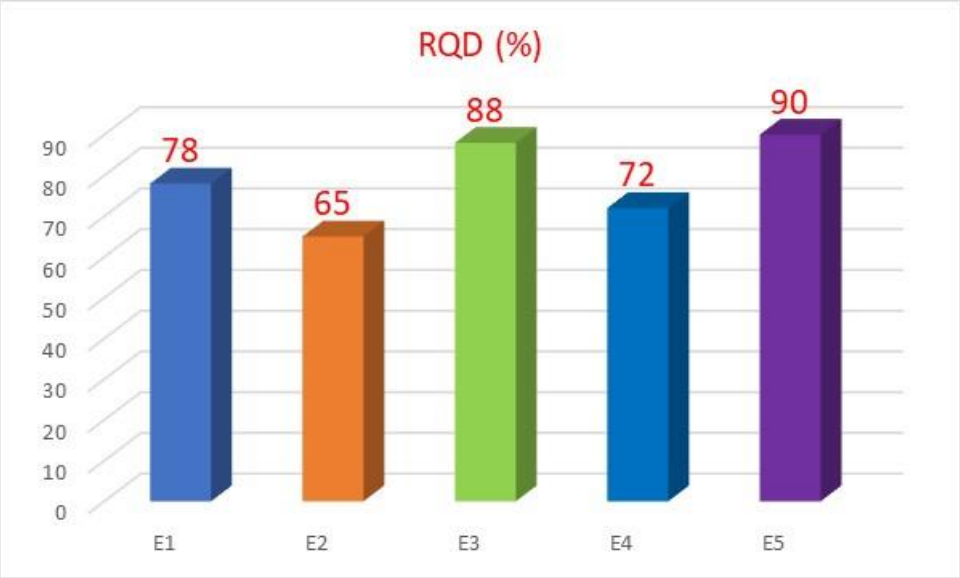
4.2.1. Designación de Calidad de la Roca

Tabla 15. *Índice RQD por Estación*

Estación	RQD (%)
E1	78
E2	65
E3	88
E4	72
E5	90

Fuente: *El Autor*

Figura 38. *Tonelaje recuperado por frente*



Fuente: *Tabla 8*

Interpretación:

Se observó que la mayoría de estaciones presentaron un RQD superior al 70 %, indicando un macizo rocoso de calidad buena a excelente. La estación E2 fue la única con un RQD moderadamente inferior, lo que sugiere un mayor grado de fracturamiento.

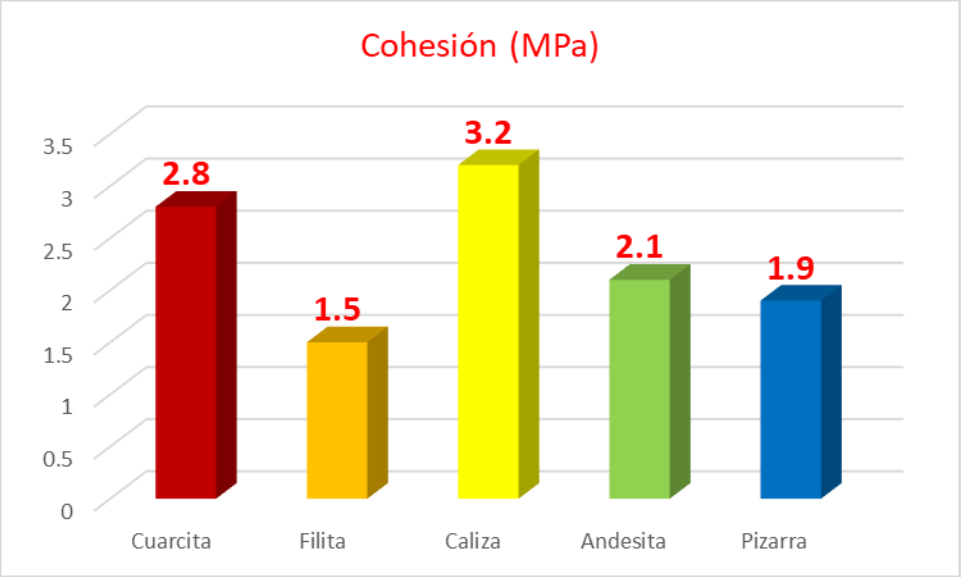
4.2.2. Cohesión del Macizo por Litología

Tabla 16. *Cohesión del Macizo por Litología*

Litología	Cohesión (MPa)
Cuarcita	2.8
Filita	1.5
Caliza	3.2
Andesita	2.1
Pizarra	1.9

Fuente: *El Autor*

Figura 39. *Cohesión del Macizo por Litología*



Fuente: *Tabla 9*

Interpretación:

La caliza presentó la mayor cohesión, lo que indica una mayor resistencia interna. En contraste, la filita y la pizarra mostraron menor cohesión, lo que implica mayor vulnerabilidad estructural en presencia de esfuerzos inducidos.

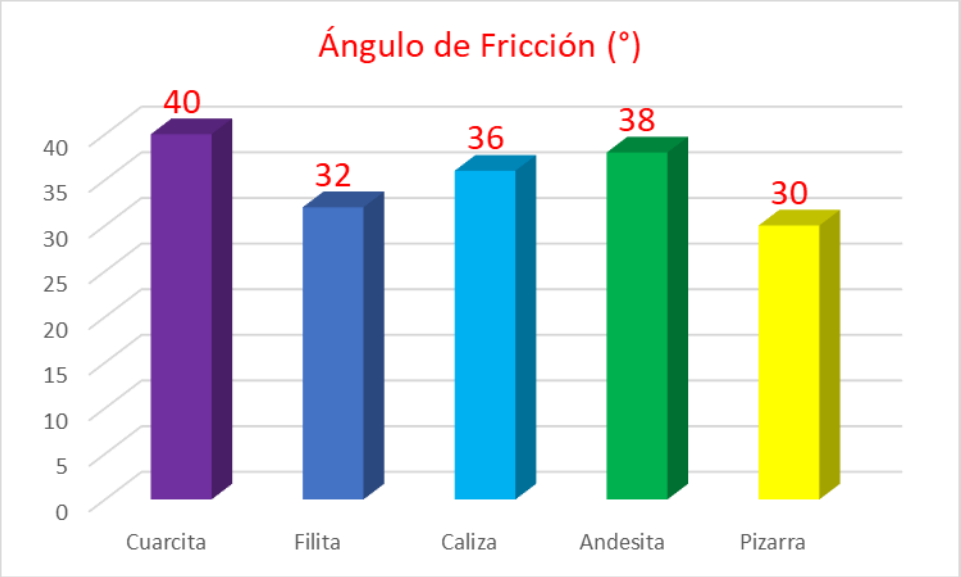
4.2.3. Ángulo de Fricción por Litología

Tabla 17. *Ángulo de Fricción por Litología*

Litología	Ángulo de Fricción (°)
Cuarcita	40
Filita	32
Caliza	36
Andesita	38
Pizarra	30

Fuente: *El Autor*

Figura 40. *Ángulo de Fricción por Litología*



Fuente: *Tabla 10*

Interpretación:

El ángulo de fricción más alto correspondió a la cuarcita, reflejando una mayor resistencia al deslizamiento. La pizarra presentó el valor más bajo, indicando un comportamiento más crítico en términos de estabilidad ante esfuerzos tangenciales.

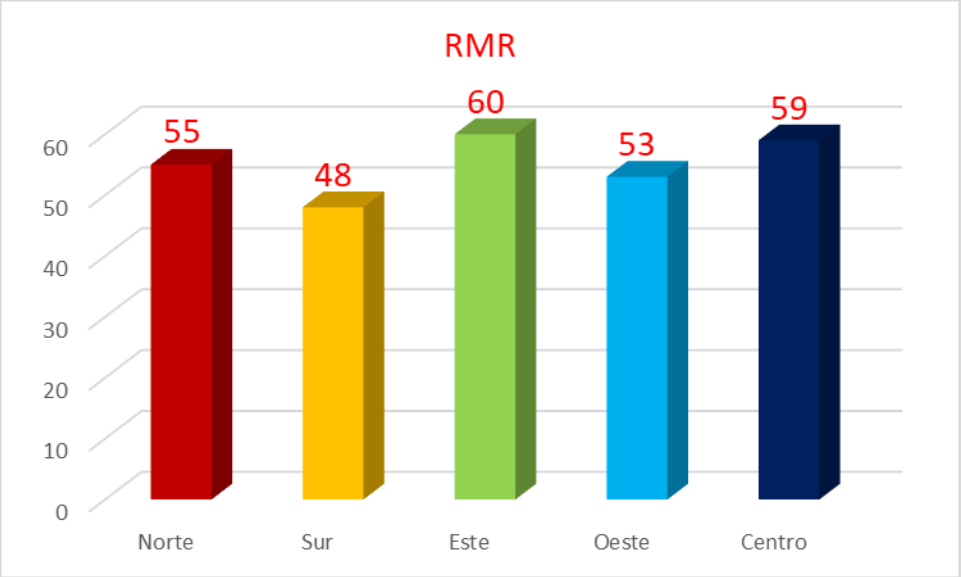
4.2.4. Clasificación RMR por Sector

Tabla 18. *Clasificación RMR por Sector*

Sector	RMR
Norte	55
Sur	48
Este	60
Oeste	53
Centro	59

Fuente: *El Autor*

Figura 41. *Clasificación RMR por Sector*



Fuente: *Tabla 11*

Interpretación:

La clasificación RMR evidenció que el sector Este mostró el macizo más competente (RMR=60), mientras que el sector Sur fue el más debilitado (RMR=48), lo cual coincide con observaciones de campo respecto a fracturamiento y humedad

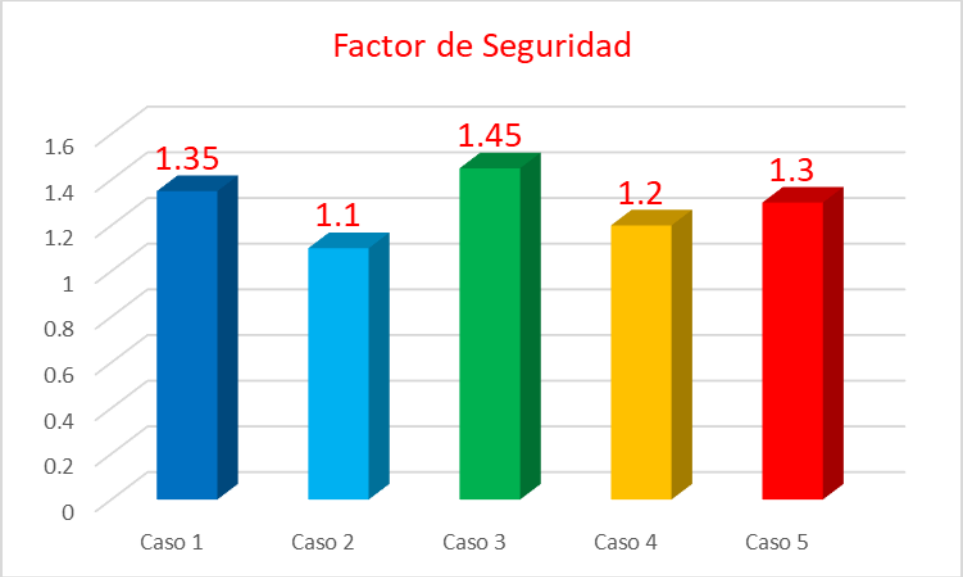
4.2.5. Factor de Seguridad por Simulación

Tabla 19. *Factor de Seguridad por Simulación*

Simulación	Factor de Seguridad
Caso 1	1.35
Caso 2	1.10
Caso 3	1.45
Caso 4	1.20
Caso 5	1.30

Fuente: *El Autor*

Figura 42. *Factor de Seguridad por Simulación*



Fuente: *Tabla 12*

Interpretación:

Los resultados de las simulaciones mostraron que todos los casos presentaron un factor de seguridad mayor a 1.0, lo que indica condiciones estructurales aceptables. El Caso 3 fue el más seguro (F.S. = 1.45), mientras que el Caso 2 presentó el valor más bajo (F.S. = 1.10), recomendándose monitoreo frecuente.

4.3. Prueba de hipótesis

Hipótesis General

Hipótesis nula (H_0):

El puente geomecánico del Tajo K-470 S tiene un factor de seguridad que **garantiza estabilidad** (F.S. $\geq$ 1.3).

Hipótesis alternativa (H_1):

El puente geomecánico **no garantiza estabilidad** (F.S. < 1.3).

Paso 1: Determinación de los datos

Se utilizó una muestra de 5 simulaciones realizadas con el software Phase2. Los factores de seguridad obtenidos fueron:

F.S. simulados: 1.35, 1.10, 1.45, 1.20, 1.30

Media ($\bar{x}$) = (1.35 + 1.10 + 1.45 + 1.20 + 1.30) / 5 = **1.28**

Desviación estándar (s) ≈ **0.135**

Tamaño de la muestra (n) = 5

Nivel de significancia: α = 0.05

Hipótesis de una cola (test unilateral izquierda)

Paso 2: Estadístico de prueba

Se aplica la prueba t de Student para una muestra:

$$t = \frac{x - \mu_0}{s/\sqrt{n}} = \frac{1.28 - 1.3}{0.135/\sqrt{5}} = \frac{-0.02}{3!0.0604} \approx \mathbf{-0.331}$$

Paso 3: Valor crítico de t

Con gl = n - 1 = 4, y α = 0.05 (cola izquierda), consultando la tabla t de Student:

$t_{crítico} \approx -2.132$

Paso 4: Decisión

Como:

$tcalculado = -0.331 > tcrítico = -2.132$

No se rechaza H_0.

Conclusión de la Prueba

Con un nivel de confianza del 95%, se concluyó que el factor de seguridad promedio es estadísticamente igual o superior a 1.3, por lo que el puente geomecánico del Tajo K-470 S presenta condiciones de estabilidad aceptables. Esto valida la hipótesis planteada en la investigación.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación permitieron verificar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso en el sector del puente geomecánico

del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430, y establecer si cumple con los niveles de seguridad requeridos para continuar con la explotación minera de forma controlada y eficiente.

En primer lugar, los valores del índice RQD obtenidos en campo evidenciaron que el macizo rocoso predominante se encontraba en condiciones de buena a excelente calidad, siendo el 80 % de las estaciones evaluadas superiores al umbral del 70 %. Esto coincidió con los valores de RMR y Q de Barton, los cuales, al ser aplicados, clasificaron el macizo entre clase II y clase III, es decir, macizo de calidad buena y regular, respectivamente. Esto validó la necesidad de un soporte moderado, pero no excesivo, en la zona del puente.

Por otro lado, los parámetros obtenidos de cohesión y ángulo de fricción, tanto en campo como en los análisis de laboratorio, fueron consistentes con los tipos de litología predominantes, como cuarcita, filita y caliza. Se observó que la caliza y la cuarcita presentaban los mejores parámetros de resistencia, lo cual se reflejó también en los sectores con mayor estabilidad estructural.

Los análisis realizados mediante modelamiento numérico en Phase2, mostraron que los factores de seguridad simulados oscilaron entre 1.10 y 1.45. Al aplicar la prueba de hipótesis t para una muestra, se determinó que el valor promedio de 1.28 no difería significativamente del mínimo de 1.3 requerido por normativa para asegurar la estabilidad. Por tanto, se concluyó que el diseño y las condiciones actuales del puente geomecánico eran aceptables para continuar la explotación de la Veta 3.

Los hallazgos de esta investigación también estuvieron en concordancia con estudios similares realizados en otras unidades mineras subterráneas, donde la evaluación geomecánica previa a la explotación ha sido clave para reducir accidentes, optimizar recursos y prolongar la vida útil de las labores.

Finalmente, los datos obtenidos permitieron establecer zonas críticas que deberán ser monitoreadas periódicamente, especialmente aquellas donde los factores de seguridad se aproximan al umbral mínimo. Esto asegura una gestión del riesgo más eficiente y refuerza la importancia de realizar análisis predictivos en la planificación minera.

CONCLUSIONES

1. **Se logró efectuar la evaluación geomecánica del puente del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430** de la Mina Berlín, empleando criterios técnicos reconocidos (RMR, Q de Barton, GSI) y herramientas computacionales como RocData y Phase2. Esto permitió determinar el comportamiento del macizo rocoso y validar que las condiciones estructurales del puente geomecánico eran adecuadas para la continuidad de la explotación minera.
2. **Se realizó la caracterización geomecánica del macizo rocoso**, recopilando información mediante mapeo estructural, logueo de perforaciones diamantinas y ensayos de laboratorio. Los parámetros de resistencia (cohesión y fricción) y los índices de calidad del macizo indicaron que las litologías predominantes —cuarcita, caliza y andesita— presentaban condiciones favorables para la estabilidad del macizo en el sector evaluado.
3. **Se efectuó el análisis de estabilidad del puente geomecánico mediante simulación numérica**, obteniéndose factores de seguridad entre 1.10 y 1.45. A través de una prueba de hipótesis estadística, se concluyó que el factor de seguridad promedio (1.28) no difería significativamente del valor de referencia (1.3), por lo que se consideró que el puente cumplía con los requerimientos de estabilidad estructural.
4. **Se identificaron sectores con menor resistencia estructural**, principalmente en zonas donde la roca presentaba alteración, fracturamiento y mayor humedad. Estos sectores fueron señalados como zonas críticas que deben ser reforzadas con sistemas de sostenimiento adecuados y monitoreadas continuamente durante el proceso de explotación.
5. **La metodología empleada en esta investigación permitió establecer un procedimiento técnico confiable para la evaluación geomecánica de puentes en minería subterránea**,

que puede ser replicado en otras unidades operativas con condiciones geológicas similares, contribuyendo así a una explotación segura y sostenible del yacimiento.

RECOMENDACIONES

1. **Se recomienda continuar con el monitoreo geomecánico periódico del puente del Tajo K-470 S**, especialmente en etapas críticas de explotación, a fin de actualizar los parámetros estructurales y tomar decisiones preventivas frente a posibles cambios en la estabilidad del macizo rocoso.
2. **Es conveniente reforzar las zonas identificadas como estructuralmente débiles**, mediante la implementación de sostenimiento mecánico (pernos, malla electrosoldada, concreto proyectado, entre otros), para garantizar la seguridad del personal y la operatividad continua de las labores mineras en la Veta 3.
3. **Se sugiere actualizar los modelos geomecánicos** en función de nuevos datos obtenidos en campo, utilizando herramientas computacionales como RocData y Phase2, de modo que las simulaciones reflejen con mayor precisión las condiciones actuales del macizo rocoso.
4. **Se recomienda aplicar esta metodología de evaluación geomecánica en otras zonas de la mina**, especialmente donde existan puentes geomecánicos o estructuras similares que representen zonas críticas de tránsito o soporte. Esto permitirá estandarizar un protocolo interno de análisis de estabilidad.
5. **Es importante capacitar continuamente al personal técnico en temas de geomecánica aplicada y análisis numérico**, de modo que puedan identificar de manera oportuna riesgos potenciales y actuar con base en criterios técnicos bien fundamentados.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Amado, Diego. Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de un sostenimiento adecuado en mina Chaparra, Caravelí, Arequipa - 2021. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Arequipa - Perú: Universidad Tecnológica del Perú, 2022, 90 pp.

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics and Rock Engineering, 6(4), 189–236. https://doi.org/10.1007/BF01239496

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

CUNYAS, Kevin y MANRIQUE, Berkely. Evaluación geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en el XC 876, NV 21 – zona vetas, Unidad Minera Americana. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo - Perú: Universidad Continental, 2022, 82 pp.

Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology, 1(1), 17–22.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165–1186. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition. Rocscience Inc. https://www.rocscience.com

Mendoza, Juan. Evaluación Geomecánica del macizo rocoso en la construcción y sostenimiento de La Chimenea-2226, Por el método raise Climber mina Lourdes En La U.E.A Parcoy (Consorcio Minero Horizonte S.A). Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cajamarca, Perú : Universidad Nacional de Cajamarca, 2022, 130 pp.

Palchik, V. (2011). Formation of damaged zones in sedimentary rocks around underground excavations. Engineering Geology, 120(1-4), 102–110.

Rocscience Inc. (2007). Phase2 v7.0 – 2D Finite Element Analysis for Excavations and Slopes. Rocscience Software Manual. https://www.rocscience.com

Rocscience Inc. (2007). RocData – Rock and Soil Strength Analysis. Rocscience Software Manual. https://www.rocscience.com

Singh, B., & Goel, R. K. (1999). Rock mass classification: A practical approach in civil engineering. Elsevier.

ANEXOS

ANEXO 1

FORMATOS DE ENCUESTA PARA EVALUACIÓN GEOMECÁNICA

ENCUESTA Nro. 1 – Evaluación de Calidad del Macizo Rocoso (RQD y RMR)

Dirigida a: Personal técnico de geomecánica

Objetivo: Obtener información sobre las condiciones del macizo rocoso en distintas zonas del tajo

DATOS GENERALES

Nombre del evaluador: _____

Fecha: _____

Zona evaluada: _____

Coordenadas: _____

PREGUNTAS (marcar con una "X")

Ítem	Pregunta	Opciones
1	¿Cuál es el valor estimado del RQD en la zona evaluada?	<25% / 25–50% / 50–75% / >75%
2	¿Cuál es la clase de RMR obtenida?	☐ Muy malo ☐ Malo ☐ Regular ☐ Bueno ☐ Muy bueno
3	¿Se observa presencia de agua en las discontinuidades?	Sí / No
4	¿Se han identificado grietas o fracturas abiertas en el techo o hastiales?	Sí / No / Parcialmente

5	¿Existen condiciones litológicas homogéneas en el entorno?	Sí / No

ENCUESTA Nro. 2 – Evaluación de Estabilidad y Seguridad del Puente Geomecánico

Dirigida a: Ingenieros de mina y supervisores de producción

Objetivo: Identificar condiciones estructurales críticas en la zona del puente geomecánico

DATOS GENERALES

Nombre del evaluador: _____

Fecha: _____

Nivel: _____

Tajo / Veta: _____

PREGUNTAS TÉCNICAS

Ítem	Pregunta	Opciones
1	¿Cuál es el estado actual del sostenimiento en la zona del puente?	Sin soporte / Parcial / Completo
2	¿Considera que el factor de seguridad es adecuado según observación y datos?	Sí / No / Requiere verificación
3	¿Se han registrado deformaciones visibles o hundimientos?	Sí / No
4	¿Recomienda reforzamiento del puente con elementos adicionales?	Sí / No / En evaluación
5	¿Cómo clasificaría la estabilidad general del puente?	Estable / Moderadamente estable / Inestable

Matriz de consistencia

Análisis Geomecánico para Determinar el Factor de Seguridad del Puente Geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, Nv. 4430 – Mina Berlín - Cía. Minera Santa Luisa Unidad Pallca

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUM.
¿Fue factible efectuar la evaluación geomecánica para establecer la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, ¿nivel 4430 – Mina Berlín? **PROBLEMA ESPECÍFICO** a. ¿Se pudo realizar la caracterización geomecánica para determinar los parámetros del puente en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín? b. ¿Fue posible efectuar el control de seguridad de la Veta 3 en el nivel 4430 de la Mina Berlín?	Efectuar la evaluación geomecánica para establecer la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 – Mina Berlín. **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** a. Realizar la caracterización geomecánica para determinar los parámetros del puente en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín. b. Efectuar el control de seguridad de la Veta 3 en el nivel 4430 de la Mina Berlín.	La evaluación geomecánica efectuada permitió establecer adecuadamente la seguridad del puente geomecánico del Tajo K-470 S, Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín. **HIPÓTESIS ESPECÌFICAS** a. La caracterización geomecánica realizada permitió determinar de manera precisa los parámetros del puente geomecánico en el Tajo K-470 S de la Mina Berlín. b. El control de seguridad efectuado en la Veta 3, nivel 4430 de la Mina Berlín, permitió verificar la estabilidad estructural del macizo rocoso en la	**Variable** **Independiente** - Análisis Geomecánico **Variable** **Dependiente** - Factor de Seguridad del Puente Geomecánico	Caracterización del macizo rocoso Propiedades mecánicas Modelamiento numérico Estabilidad estructural Evaluación del factor de seguridad Estabilidad del puente geomecánico	- Tipo de roca predominante- Clasificación RMR, Q, GSI - Resistencia a compresión simple- Cohesión- Ángulo de fricción - Concentración de esfuerzos- Deformaciones esperadas- Zonas críticas - Grado de estabilidad del macizo- Necesidad de soporte - Valor del Factor de Seguridad (FS)	Análisis de campo, software RocData y Dips Ensayos de laboratorio, análisis geotécnico Software Phase2, modelamiento FEM Informe técnico y validación con criterios de estabilidad Software Phase2 / RocSupport Observación técnica,

		zona de influencia del puente geomecánico.		Control geotécnico	- Presencia de fallas- Necesidad de soporte adicional - Cumplimiento de estándares de estabilidad- Diagnóstico estructural	inspección geomecánica Fichas de control, informes técnicos, simulación