



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de
Ingeniería de Minas

**Evaluación geomecánica para la elección del
tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha
del NV. 720, Sociedad Minera Corona S.A.**

Kenlly Anthony Quispe Matos

Huancayo, 2018

Tesis para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

A mi madre, Enma Matos y mi
hermana Pollet, quienes depositaron
su confianza en mí y día a día me
brindaron su apoyo incondicional.

ASESOR

Ing. Oscar Canchucaya Gutarra

SUMARIO

El presente trabajo de investigación aborda el desarrollo de la evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018 en función del factor de seguridad y los costos unitarios de sostenimiento.

La investigación tiene como objetivo general, determinar la influencia de la evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018, por lo tanto, se tiene como objetivos específicos: evaluar cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018 y determinar la factibilidad de los costos unitarios de sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018.

Esto nos da como resultado la hipótesis general: la evaluación geomecánica influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento en el Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018 y entre las hipótesis específicas tenemos: el factor de seguridad influye significativamente en el sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018, además de la determinación de costos unitarios de sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018 es factible y viable.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso, está constituida por las clasificaciones geomecánicas, que surgieron ante la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada con el fin de evaluar el tipo de sostenimiento en la construcción de túneles. Asimismo, la caracterización geomecánica es un método de la Ingeniería Geológica que nos permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos para evaluar los parámetros geológicos de diseño y tipo de sostenimiento de un túnel.

ABSTRACT

The present work of investigation approaches the development of the geomechanical evaluation for the election of the type of support in the Tunnel Yauricocha of the Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. in function of the factor of security and the unit costs of sustenance.

The general objective of the research is to determine the influence of the geomechanical evaluation for the choice of the type of support in the Yauricocha tunnel of Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A.; therefore, we have as specific objectives: to evaluate how the safety factor influences the choice of the type of support in the Yauricocha tunnel of Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. and to determine the feasibility of the unit costs of support in the Yauricocha tunnel of the Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A.

This results in the general hypothesis described as: the geomechanical evaluation significantly influences the choice of the type of support in the Yauricocha tunnel of Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. and among the specific hypotheses we have: the safety factor significantly influences the choice of the type of support in the Yauricocha tunnel of Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A.; In addition to the determination of unit costs of support in the Yauricocha tunnel of Nv. 720, Corona S.A. Sociedad Minera is feasible and viable.

The geomechanical characterization of the rock mass is constituted by the geomechanical classifications, which arose from the need to parameterize observations and empirical data, in an integrated way, to evaluate the type of support in the construction of tunnels. Likewise, it has to be recognized that it is a Geological Engineering method that allows evaluating the geomechanical behavior of the rock massifs to evaluate the geological and geotechnical parameters of the design and type of support of a tunnel.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por ser fortaleza e inspiración en los momentos difíciles y por guiar mis pasos durante mi carrera universitaria haciendo realidad esta meta muy anhelada.

A mi alma mater, la Universidad Continental, por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios superiores y formarme como futuro profesional, a mis docentes de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Minas por impartir sus conocimientos y experiencias en todos estos años de estudio.

Asimismo, a mi asesor el Ing. Oscar Canchucaya Gutarra por su constante guía y aliento para realizar la presente investigación. A mis compañeros de estudio por confiar en mí y haber hecho de mi etapa universitaria una experiencia que jamás olvidaré, finalmente el agradecimiento más profundo para mis padres, ya que sin su apoyo y colaboración constante hubiera sido imposible realizar este logro.

ÍNDICE

ASESOR.....	iii
SUMARIO.....	iv
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I	17
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	17
1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.2.1. Problema general	18
1.2.2. Problemas específicos.....	18
1.3. Objetivos de la investigación	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. Justificación e importancia	19
1.5. Hipótesis	19
1.5.1. Hipótesis general	19
1.5.2. Hipótesis específicas	19
1.6. Identificación de variables.....	19
1.6.1. Variable independiente	19
1.6.2. Variable dependiente	20
1.7. Operacionalización de la variable.....	20
1.7.1. Definición conceptual.....	20
1.7.2. Dimensión.....	20
1.7.3. Indicadores.....	20
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO.....	21

2.1. Antecedentes del problema.....	21
2.2. Bases teóricas.....	23
2.2.1. Sostenimiento en minería.....	23
2.2.2. La evaluación geomecánica	24
2.2.5. Índice de designación de la calidad de la roca según Deere.....	25
2.2.6. Índice de designación de la calidad de la roca según Palmstrom.....	25
2.2.7. Parámetros del RMR	26
2.3 Definición de términos básicos	26
2.4. Generalidades de la mina Yauricocha	28
2.4.1. Ubicación	28
2.4.2. Accesibilidad	29
2.4.3. Clima y vegetación	30
2.4.4. Relieve	30
2.5. Geología	31
2.5.1. Geología regional	31
2.5.3. Geología estructural.....	36
2.5.4. Mineralización	39
2.6. Caracterización del macizo rocoso de la mina Yauricocha.....	41
2.6.1. Levantamiento geomecánico: línea de detalle	41
2.6.2. Distribución de discontinuidades	42
2.6.3. Clasificación geomecánica.....	43
2.6.4. Zonificación geomecánica de la masa rocosa.....	44
2.6.5. Cálculo de tensiones.....	45
2.6.6. Estimación de los esfuerzos máximos en la periferia de la excavación	47
2.6.7. Condiciones de agua subterránea	47
2.6.8. Diseño de labores.....	48
2.6.9. Diseño del sostenimiento	48
2.6.10. Método de explotación <i>sublevel caving</i>	49
2.7. Pasos para el cálculo del RMR (<i>Rock Mass Rating</i>).....	50

2.7.1	Primer parámetro: resistencia a la compresión Uniaxial (Mpa).....	50
2.7.2	Segundo parámetro: cálculo del RQD.....	51
2.7.3.	Tercer parámetro: cálculo del espaciamiento entre discontinuidades	52
2.7.4.	Cuarto parámetro: cálculo de la condición de las juntas.....	52
2.7.5.	Quinto parámetro para calcular el RMR según la presencia del agua.....	54
2.7.6.	Sexto parámetro: cálculo del RMR según la orientación de las discontinuidades	55
2.8.	Clasificación geomecánica de Hoek Brown (GSI).....	57
2.9.	Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989).....	60
2.10	Tipos de sostenimiento activo	62
2.10.1	Sostenimiento con Pernos Helicoidales	62
2.10.2.	Sostenimiento con <i>Split Set</i>	62
2.10.3	Sostenimiento con pernos de anclaje de fricción <i>Hydrabolt</i>	63
2.11.	Tipos de sostenimientos pasivos.....	64
2.11.1.	Sostenimiento con madera	64
2.11.2.	Sostenimiento con cimbras metálicas	64
2.11.3.	Sostenimiento con concreto lanzado o shotcrete	65
2.12.	Descripción del túnel Yauricocha.....	68
2.12.1.	Características del túnel Yauricocha.....	68
2.12.2.	Condición del agua subterránea	68
2.12.3.	Mapeo geomecánico del túnel Yauricocha.....	69
2.12.4.	Cálculo de la orientación de las discontinuidades	71
2.12.5.	Cálculo del RQD por estaciones de medición.....	75
2.13.	Cálculo del RMR (<i>Rock Mass Rating</i>) según la Clasificación Geomecánica de Bieniaswski (1989).....	77
2.14.	Determinación del tipo de Sostenimiento según la Cartilla Geomecánica GSI... 81	
2.16.	Determinación del tipo de Sostenimiento según la Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989)	85
2.17.	Cálculo de esfuerzos presentes en el macizo rocoso	86
	86	
2.18.	Cálculo del Factor de Seguridad.....	87

2.19. Determinación de Cargas Según Terzagui (1946) y Protodiakonov	95
2.20. Cálculo de Costos Unitarios de Sostenimiento	96
2.18.1 Cálculo de Costos de Sostenimiento por Estaciones	97
CAPÍTULO III	101
METODOLOGÍA	101
3.1 Método y alcance de la investigación	101
3.1.1 Método de la investigación	101
3.1.2 Tipo de la investigación	101
3.1.3 Nivel de la investigación	102
3.2 Diseño de la investigación	102
3.3 Población y muestra	102
3.3.1. Población	102
3.3.2. Muestra	102
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	102
CAPÍTULO IV	103
RESULTADOS y DISCUSIÓN	103
4.1. Resultados y análisis de la información	103
4.2 Prueba de Hipótesis	104
4.2.1. Validación de la Hipótesis N° 1	104
4.2.2 Validación de la Hipótesis N° 2	105
4.2.3 Validación de hipótesis N° 3	106
4.3 Discusión de resultados	107
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
ANEXOS	112
MATRIZ DE CONSISTENCIA	113
OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	114

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Plano de ubicación de la mina Yauricocha.....	29
Figura N° 2: Plano geológico regional.....	34
Figura N° 3: Distribución de discontinuidades.....	42
Figura N° 4: Variación de K respecto a la profundidad	46
Figura N° 5: Operación del método <i>sublevel caving</i>	50
Figura N° 6: Dirección de labor perpendicular a los estratos.....	55
Figura N° 7: Dirección de labor paralela a los estratos	56
Figura N° 8: Cartilla geomecánica GSI	58
Figura N° 9: Cartilla geomecánica GSI	59
Figura N° 10: Split_Set.....	63
Figura N° 11: Sostenimiento con cimbras.....	65
Figura N° 12: Shocrete via seca	66
Figura N° 13: Shocrete via húmeda.	67
Figura N° 14: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 1.....	71
Figura N° 15: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 2.....	72
Figura N° 16: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 3.....	73
Figura N° 17: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 4.....	74
Figura N° 18: Distribución de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 1.....	88
Figura N° 19: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento.....	88
Figura N° 20: Formación de cuña en el techo con sostenimiento.....	89
Figura N° 21: Distribución de las discontinuidades en la Estación de medición N° 2..	90
Figura N° 22: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento.....	90
Figura N° 23: Formación de cuña en el techo con sostenimiento.....	91
Figura N° 24: Distribución de las discontinuidades en la Estación de medición N° 3..	92
Figura N° 25: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento.....	92
Figura N° 26: Formación de cuña en el techo con sostenimiento.....	93

Figura N° 27: Distribución de las discontinuidades en la Estación de medición N° 4..	94
Figura N° 28: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento.....	94
Figura N° 29: Formación de cuña en el techo con sostenimiento.....	95
Figura N° 30: Comparación del análisis del factor de seguridad con y sin sostenimiento.....	106
Figura N° 31: Diseño del túnel Yauricocha.....	115
Figura N° 32: Zonificación geomecánica del túnel Yauricocha.....	116
Figura N° 33: Evaluación geomecánica por estaciones.....	117
Figura N° 34: Estación de Medición N° 1	118
Figura N° 35: Estación de Medición N° 2	118
Figura N° 36: Estación de Medición N° 3	119
Figura N° 37: Estación de Medición N° 4	119
Figura N° 38: Túnel Yauricocha del Nivel 720.....	120

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: Rutas de accesibilidad a la mina Yauricocha.....	30
Tabla N° 2: Tipos de rocas promedio para los diferentes tipos de abertura.....	41
Tabla N° 3: Buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades.....	42
Tabla N° 4: Criterio geomecánico según el tipo de roca.....	44
Tabla N° 5: Zonificación geomecánica de los cuerpos masivos.....	44
Tabla N° 6: Esfuerzo vertical para diferentes profundidades..	45
Tabla N° 7: Esfuerzo horizontal y K para diferentes profundidades.....	46
Tabla N° 8: Sostenimiento estandarizado en la mina Yauricocha.	48
Tabla N° 9: Resistencia a la compresión uniaxial.....	51
Tabla N° 10: Índice de calidad de la roca desarrollado por Palmstrom.....	51
Tabla N° 11: Índice de calidad de la roca.	52
Tabla N° 12: Espaciamiento entre discontinuidades.....	52
Tabla N° 13: Clasificación de la persistencia de las discontinuidades.....	53
Tabla N° 14: Clasificación de las aberturas de las discontinuidades.	53
Tabla N° 15: Clasificación de la rugosidad de las discontinuidades.....	53
Tabla N° 16: Clasificación del relleno de las discontinuidades.	54
Tabla N° 17: Clasificación de la intemperización de las discontinuidades.....	54
Tabla N° 18: Clasificación de la presencia de agua de las discontinuidades.....	55
Tabla N° 19: Clase de roca según la clasificación geomecánica de Bieniawski.....	60
Tabla N° 20: Sostenimiento en túneles..	61
Tabla N° 21: Mapeo geomecánico en la Estación de Medición N° 1.....	69
Tabla N° 22: Mapeo geomecánico en la Estación de Medición N° 2.....	69
Tabla N° 23: Mapeo geomecánico en la Estación de Medición N° 3.....	70
Tabla N° 24: Mapeo geomecánico en la Estación de Medición N° 4.....	70
Tabla N° 25: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de Medición N° 1.....	71
Tabla N° 26: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de Medición N° 2.....	72
Tabla N° 27: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de Medición N° 3.....	73

Tabla N° 28: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de Medición N° 4.....	74
Tabla N° 29: Cálculo del RMR para la Estación de Medición N° 1.....	77
Tabla N° 30: Cálculo del RMR para la Estación de Medición N° 2.....	78
Tabla N° 31: Cálculo del RMR para la Estación de Medición N° 3.....	79
Tabla N° 32: Cálculo del RMR para la Estación de Medición N°4.....	80
Tabla N° 33: Determinación de las cargas según Terzagui.....	95
Tabla N° 34: Determinación de las cargas según Topodiakonov.....	96
Tabla N° 35: Cálculo del factor de seguridad.....	96
Tabla N° 36: Resumen de los costos unitarios de sostenimiento.....	96
Tabla N° 37: Costo de sostenimiento con pernos helicoidales.....	97
Tabla N° 38: Costo de sostenimiento con pernos helicoidales + malla electrosoldada.....	98
Tabla N° 39: Costo de sostenimiento con pernos helicoidales + shotcrete.....	99
Tabla N° 40: Costo de sostenimiento con cimbras metálicas.....	100
Tabla N° 41: Resumen del cálculo del RMR por estaciones de medición.....	103
Tabla N° 42: Resumen de costos unitarios de sostenimiento.....	106

INTRODUCCIÓN

La presente tesis, denominada “Evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018”, tiene su fundamento en la constante inestabilidad de la masa rocosa, que genera el incremento de costos por falta de control, frente a la caída permanente de las rocas, presenta condiciones desfavorables de trabajo.

Esta investigación pretende determinar los lineamientos para obtener un sistema de información geomecánica útil y que permita su procesamiento y consiguiente análisis, con el objetivo de establecer parámetros geomecánicos que permitan tener condiciones de trabajo seguro, garantizando la estabilidad del macizo rocoso mediante la elección del tipo de sostenimiento adecuado, todo esto de acuerdo a la calidad del mismo, disminuyendo los riesgos de accidentes e incidentes por caída de rocas.

Es así que en el capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, tanto general como específico, determinando también los objetivos de la investigación; demostrando la justificación e importancia de la investigación, detallando la hipótesis general y específica; asimismo, encontraremos a las variables que se desarrollaron en el transcurso de la investigación.

En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico, detallando los antecedentes previos a la investigación, describiendo las generalidades de la mina, (accesibilidad, ubicación, topografía, clima, relieve, entre otros). Detallando la geología local y regional, la geomecánica de la mina, desarrollando las bases teóricas y finalmente definiendo los términos que son de mucha utilidad para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo III, se desarrolla la metodología de la investigación, detallando el tipo y nivel de investigación, especificando el diseño de la investigación, delimitando la investigación con la población y muestra y; finalmente, determinando los instrumentos de recolección de datos.

En el capítulo IV se desarrolla el análisis e interpretación del resultado de la evaluación geomecánica del túnel Yauricocha, analizando el tipo de roca y la calidad del macizo rocoso según la clasificación geomecánica de Bieniawski; finalmente, determinando el tipo de sostenimiento a emplear en base al factor de seguridad y costos unitarios de sostenimiento.

Por último, se describen las conclusiones y recomendaciones de la investigación, en los anexos se adjuntan planos del túnel Yauricocha, y las evidencias de la evaluación geomecánica y los costos unitarios de sostenimiento.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad la minería necesita llevar un control geomecánico de estabilidad de la masa rocosa en sus labores de explotación y extracción. La mina Yauricocha actualmente viene utilizando el método de minado “Hundimiento por subniveles” (*Sublevel Caving*) y como consecuencia de este método se tienen problemas de inestabilidad de la masa rocosa en las labores subterráneas debido a la constante caída de rocas.

Actualmente, la ocurrencia de accidentes e incidentes en la mina, se debe al desprendimiento de rocas, sin duda la minería es una actividad de alto riesgo que el hombre realiza. Según las estadísticas de la mina Yauricocha, aproximadamente el 60% de accidentes ocurren por desprendimiento de rocas, el 40% de accidentes son originados por derrumbes, deslizamientos o soplo.

Hoy en día el estudio geomecánico permite el control de estabilidad de la masa rocosa debido a las aberturas que existen en la mina como consecuencia de la perforación y voladura de rocas. La geomecánica permite establecer dimensiones adecuadas de las labores mineras, establecer la dirección de avance de minado a través del cuerpo mineralizado y finalmente determinar el tipo de sostenimiento adecuado en base a la calidad del macizo rocoso.

1.2. Formulación del problema

El problema principal y los problemas específicos son:

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la influencia de la evaluación geomecánica en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018?
- ¿Será factible determinar los costos unitarios de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la influencia de la evaluación geomecánica en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018?

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. – 2018.
- Determinar la factibilidad de los costos unitarios de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. – 2018.

1.4. Justificación e importancia

Es muy importante que cualquier proyecto de túnel comience con una investigación del tipo de roca y la calidad del macizo rocoso para tener en conocimiento en qué tipo de terreno se hará las operaciones de perforación y voladura. Los resultados de la investigación nos permitirán establecer cuáles son los equipos adecuados a emplear en la operación minera, los métodos de excavación y tipo de sostenimiento a emplear. En algunos casos, los estudios convencionales de construcción de túneles no nos proporcionan suficiente información, por ejemplo, cuando existen discontinuidades como fallas geológicas o estratos de terreno más blando como arcillas o limos.

En el caso de la construcción de túneles es recomendable su estudio mediante las llamadas clasificaciones geomecánicas, entre las que destaca la clasificación geomecánica RMR (*Rock Mass Rating*) y RQD (*Rock Quality Deere*).

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

- La evaluación geomecánica influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018.

1.5.2. Hipótesis específicas

- El factor de seguridad influye significativamente en el sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018.
- La determinación de los costos unitarios de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. - 2018 es factible y viable.

1.6. Identificación de variables

1.6.1. Variable independiente

- Evaluación geomecánica

1.6.2. Variable dependiente

- Tipos de sostenimiento

1.7. Operacionalización de la variable

1.7.1. Definición conceptual

Según (Mendieta Britto, 2014), “La evaluación geomecánica es aquella que evalúa las propiedades físicas y mecánicas de la roca, tratando directamente con la respuesta de la roca y del macizo rocoso al campo de fuerzas de su entorno físico cuyos resultados permiten obtener una visión realista del estado actual del macizo rocoso”.

1.7.2. Dimensión

Según (Córdova Rojas, 2015), “El sostenimiento es un sistema de soporte que resuelve el problema de inestabilidad de la masa rocosa y de los esfuerzos, controlando el movimiento y reduciendo la posibilidad de falla en los bordes de la excavación”.

1.7.3. Indicadores

- Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)
- Índice Geológico de Resistencia (GSI)
- Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989)
- Costos directos e indirectos de sostenimiento

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

Como antecedentes de este problema se tienen los siguientes estudios:

- a) Según (Michel Cáceres, 2017), en su investigación titulada “*Evaluación geomecánica del macizo rocoso para sostenimiento de las labores de explotación en mina San Cristóbal – Compañía Minera Volcan S.A.A*”. Investigación de pregrado de la Universidad San Luis Gonzaga de Ica, Facultad de Minas y Metalurgia, quien llega a la conclusión que *la aplicación de la evaluación geomecánica, determina los problemas de inestabilidad de la mina San Cristóbal y por lo mismo se han planteado alternativas de sostenimiento para garantizar la estabilidad de las labores*. Se tiene mayor ocurrencia en forma de cuñas a lo largo de los subniveles, donde las excavaciones van paralelas al sistema principal de discontinuidad, todo esto de acuerdo al análisis de estabilidad estructuralmente controlado; recordando que, en la mayoría de casos, la sesión de excavación se configura de acuerdo al arreglo estructural. El sostenimiento ya se logró con pernos helicoidales de 10 ft x 1 pulg y shotcrete de 2” para la primera etapa, en la segunda etapa el sostenimiento fue pesado con el uso de shotcrete, pernos helicoidales, malla electrosoldada y cimbras porque así lo requiere el terreno.

- b) Según (Blas Plácido, 2016), en su investigación titulada *“La Geomecánica en el Sostenimiento en la Mina Ricotona”*. Estudio de pregrado de la Universidad Nacional Micaela Bastidas, Facultad de Ingeniería; quien llega a la conclusión que, mediante *“La evaluación geomecánica se determinó el sistema de sostenimiento adecuado en la mina Ricotona de Lambrama”*, haciendo los análisis necesarios de los parámetros geomecánicos de RMR y RQD los cuales determinaron que el sostenimiento recomendado es el realizado con cuadros de madera. *Las caracterizaciones del macizo rocoso son las que determinaron el sostenimiento con cuadros de madera*, además este tipo de sostenimiento se realizarán en los puntos críticos de la labor minera donde la labor es más inestable. Los elementos de sostenimiento garantizarán la estabilidad de la mina Ricotona por un periodo de tiempo necesario para la extracción del mineral.
- c) Según (Pantaleón Junco, 2015), en su investigación titulada *“Evaluación geomecánica para el dimensionamiento, secuencia de minado y relleno de tajeos de una mina subterránea”*. Estudio de pregrado de la Universidad Católica del Perú, facultad de Ingeniería, quien llega a la conclusión que la clasificación geomecánica del macizo rocoso está clasificado como roca regular y en algunos sectores localizados como roca mala, demostrándose los valores de clasificación para los dominios litológicos establecidos. Se recomienda implementar el logueo geotécnico de todos los testigos de exploración de manera continua para complementar el modelo geotécnico del macizo rocoso; y continuando con el mapeo geomecánico de las labores subterráneas de preparación, que permitan complementar al plano de los valores de RMR en cada nivel, con la finalidad de determinar zonas de baja resistencia que podrían requerir un tratamiento específico.
- d) Según (Córdova Rojas, 2015), en su investigación titulada *“Geomecánica en el minado subterráneo, caso mina Condestable”*. Estudio de Pregrado de la Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de Ingeniería, quien llega a la conclusión que el estudio geomecánico puede ser aplicado a cualquier variable aleatoria de datos geomecánicos de campo a fin de estudiar su confiabilidad. Pudiendo utilizarse durante el proceso de la toma de datos de campo. Y estudiando la confiabilidad, durante este proceso, se puede mejorar el muestreo de datos. Por ejemplo, en los casos del pórfido dacítico andesítico y de los tufos podría haberse mejorado la confiabilidad de los datos de campo aumentando las estaciones de mapeo geomecánico. También puede ser

utilizado como criterio para establecer los factores de seguridad durante los análisis de diseño. Un programa geomecánico efectivo debe estar orientado al establecimiento de planes de minado coherentes y también a establecer los estándares de los diferentes parámetros geomecánicos relacionados con el minado. Los componentes de un programa geomecánico involucran: la caracterización del sitio, la formulación del modelo mina, los análisis de diseño, el monitoreo del rendimiento de la roca y los análisis retrospectivos. Dentro de este esquema adquiere mucha importancia la preparación de la información geomecánica básica para los análisis de diseño.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Sostenimiento en minería

- a) Según (Mendieta Britto, 2014), nos dice que *“En toda explotación minera, el sostenimiento de las labores es un trabajo adicional de alto costo que reduce la velocidad de avance y/o producción, pero que a la vez es un proceso esencial para proteger de accidentes al personal y al equipo”*.
- b) Para (López Félix, 2009), *“Existen varios métodos de refuerzo de la roca, siendo el de mayor efectividad el perno, pues es rápido de instalar y de bajo costo. Se conocen varios sistemas de pernos de anclaje desarrollados a través de los años por grupos de investigación y empresas fabricantes para su aplicación en la estabilización de excavaciones subterráneas y superficiales. Estos van desde el bulón de madera hasta el tubo de fierro o acero y varilla de acero corrugado que pueden anclarse de dos formas diferentes: puntual y longitudinal. Para los fines de este estudio, nos interesa el anclaje longitudinal, que también puede ser muy variado, pero mencionaremos solo a la lechada de cemento y a la resina epóxica, esta última muy eficiente en sostenimiento inmediato y donde existen aguas corrosivas y otras restricciones”*.
- c) Para (Mendieta Britto, 2014), *“El sostenimiento en minería subterránea es muy importante, ya que toda operación que se realiza en interior mina se realiza en macizos rocosos inestables, producto de la voladura de rocas y para lograr que se mantenga nuevamente estable la zona y en condiciones de trabajarla, la zona debe de redistribuir sus fuerzas, para ello es necesario la elección de un sostenimiento adecuado en base a*

una evaluación geomecánica previa, considerando el tipo de roca, presencia de fallas con relleno, condición de juntas y presencia de agua subterránea”.

2.2.2. La evaluación geomecánica

- a) Según (Blas Plácido, 2016), “La evaluación geomecánica es aquella que contiene información geológica de parámetros que afectan al macizo rocoso y que pueden o no generar inestabilidad en las labores mineras”.

- b) La evaluación geomecánica contiene la caracterización geológica de la roca de acuerdo a la clasificación geomecánica correspondiente, además debe contener información del tipo de roca, grado de fracturamiento condición de las discontinuidades y presencia de agua subterránea. *El resultado de la evaluación geomecánica nos determinará el tipo de sostenimiento a emplear en la labor subterránea*, con el objetivo de garantizar la estabilidad de la maza rocosa. Finalmente, sirve también para recomendar el tipo de excavación y el diseño del método de minado a emplear.

- c) Según (Michel Cáceres, 2017) *“La evaluación geomecánica del macizo rocoso influye significativamente en la elección del sostenimiento de las labores de explotación en la mina San Cristóbal – Compañía Minera Volcan S.A.A.; Asimismo, la aplicación de la evaluación geomecánica, determina los problemas de inestabilidad de la masa rocosa en la mina San Cristóbal y por lo mismo se han planteado alternativas de sostenimiento para garantizar la estabilidad de las labores. Se tiene mayor ocurrencia en forma de cuñas a lo largo de los subniveles, donde las excavaciones van paralelas al sistema principal de discontinuidad, todo esto de acuerdo al análisis de estabilidad estructuralmente controlado. El sostenimiento recomendado es con pernos helicoidales de 10 pies y shotcrete de 2 pulgadas para la primera etapa, en la segunda etapa el sostenimiento fue pesado con el uso de shotcrete, pernos helicoidales, malla electrosoldada y cimbras porque así lo requiere el terreno”*.

- d) Según (Abad Alvarado, 2011), *“Los resultados de la evaluación geomecánica influyen significativamente en la elección del tipo de sostenimiento a emplear en el túnel Huascacocha – Rímac, (7) dichos resultados se determinaron con la información geomecánica obtenida de las estaciones de medición ubicados en los afloramientos*

rocosos, establecidos por la empresa que realizó los estudios, a lo largo del eje del túnel. Los tipos de sostenimiento que se establecieron fueron bajo los resultados ya antes mencionados. El Túnel N° 1 tiene su portal de entrada en la cota 4469.6, ubicada en el km 7+625, los resultados de evaluación geomecánica indican una roca de calidad media Tipo III, con RMR= 61 e índice Q=5.4 hasta el km 7+630, soportando una cobertura de roca en un espesor de 0.98m y una presión sobre el techo del túnel correspondiente a 2.24 Tn/m²".

2.2.5. Índice de designación de la calidad de la roca según Deere

Según (Mendieta Britto, 2014), "El índice de designación de la calidad de la roca (RQD) desarrollado por Deere, provee un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de la perforación diamantina". El RQD es definido como el porcentaje de piezas de testigos intactos mayores de 100 mm (10 cm) en la longitud total del testigo. El testigo deberá tener por lo menos un tamaño (54.7 mm o 2.15 pulgadas de diámetro) y deberá ser perforado con un cilindro de doble tubo de perforación".

2.2.6. Índice de designación de la calidad de la roca según Palmstrom

Según (Palmstrom, 1982), "El RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen, visibles en afloramientos rocosos o socavones". Nos dice también que la relación sugerida para masas rocosas libres de arcillas es:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de discontinuidades por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

Donde el RQD es un parámetro direccionalmente dependiente y su valor puede cambiar significativamente, dependiendo sobre todo de la orientación del taladro. El uso del conteo volumétrico de discontinuidades puede ser muy útil en la reducción de esta dependencia direccional.

2.2.7. Parámetros del RMR

Según (Mendieta Britto, 2014), “El RMR permite hacer una clasificación del macizo rocoso y estimar el tiempo de mantenimiento y longitud de un vano. Tiene seis parámetros que permiten clasificar al macizo rocoso de manera más detallada”.

- Resistencia compresiva del material rocoso (Mpa)
- Designación de la calidad de la roca (RQD)
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condiciones del agua subterránea
- Orientación de las discontinuidades

En la aplicación de este sistema de clasificación, la masa rocosa es dividida en un número de regiones estructurales y cada región es clasificada en forma separada.

2.3 Definición de términos básicos

- a) **Sostenimiento:** es la operación que resuelve el problema de la estructura de la masa rocosa y de los esfuerzos, controlando el movimiento y reduciendo la posibilidad de falla en los bordes de la excavación con el objetivo de crear ambientes de condiciones seguras para el personal de diferentes áreas.
- b) **RMR:** es la clasificación geomecánica de Bieniawski, *Rock Mass Rating*, es un sistema de clasificación geomecánica presentado por el ingeniero Bieniawski y en todas sus modificaciones para estimar el tiempo de soporte de una labor.
- c) **GSI:** planteado por (Hoek 2002), es el índice de resistencia geológica, como complemento a su criterio generalizado de falla en roca, también el GSI estima la reducción de la resistencia del macizo para diferentes condiciones geológicas.
- d) **Macizo rocoso:** es el conjunto de la matriz rocosa y sus discontinuidades, presenta un carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisotrópico, como consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico.

- e) **Índice de designación de la calidad de la roca (RQD):** Según (Deere, 1984) “El índice de designación de la calidad de la roca (RQD, provee un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de la perforación diamantina”.
- f) **Mapeo geomecánico:** Según (Mendieta Britto, 2014), “El mapeo geomecánico consiste en la recolección de la data del macizo rocoso in situ, la descripción gráfica de las condiciones in situ del macizo rocoso consideran las diaclasas, las condiciones del ambiente y la clasificación del tipo de macizo rocoso, haciendo uso de las herramientas geomecánicas: picota de geólogo, martillo Schmidt, brújula y juego de colores”.
- g) **Pernos de roca:** Según (Mendieta Britto, 2014), “ Los sistemas de reforzamiento con pernos de roca minimizan las deformaciones inducidas por el peso muerto de la roca aflojada, así como también aquellas inducidas por la redistribución de los esfuerzos en la roca circundante a la excavación”.
- h) **Perno helicoidal:** es una barra de acero helicoidal cuya sección transversal es ovalada, con resaltes en forma de un hilo helicoidal izquierdo, que actúa en colaboración con un sistema de fijación formada por una placa de acero perforada y una tuerca de fundición nodular, las cuales actúan de forma complementaria para reforzar y preservar la resistencia natural del macizo rocoso. Es un perno que actúa o transfiere su carga por adherencia.
- i) **Split sets:** consiste en un tubo ranurado a lo largo de su longitud, uno de los extremos es ahusado y el otro lleva un anillo soldado para mantener la platina.
- j) **Swellex:** Según (Mendieta Britto, 2014), “Es un perno de anclaje por fricción, pero en este caso la resistencia friccional al deslizamiento se combina con el ajuste, es decir, el mecanismo de anclaje es por fricción y por ajuste mecánico, el cual funciona como un anclaje repartido. El perno *swellex* está formado por un tubo de diámetro original de 41 mm y puede tener de 0.6 a 12 m de longitud o más (en piezas conectables), el cual es plegado durante su fabricación para crear una unidad de 25 a 28 mm de diámetro”.

k) **Concreto lanzado (*Shotcrete*):** Según (Mendieta Britto, 2014), “El shotcrete es el nombre genérico del concreto cuyos materiales componentes son: cemento, agregado, agua, aditivos y elementos de refuerzo, los cuales son aplicados neumáticamente y compactados dinámicamente a alta velocidad sobre una superficie”.

2.4. Generalidades de la mina Yauricocha

2.4.1. Ubicación

La mina Yauricocha está ubicada en el distrito de Alis, provincia de Yauyos, departamento de Lima, aproximadamente a 12 km al Oeste de la divisoria continental, localizada geográficamente en la zona alta de la cordillera Occidental andina, muy cerca de la línea divisoria continental, en las nacientes de uno de los afluentes del río Cañete, el que desemboca al Océano Pacífico.

El área de la mina se encuentra a una altitud promedio de 4 600 m s.n.m, políticamente pertenece a los distritos de Alis y Laraos, provincia de Yauyos, departamento de Lima.



Figura N° 1: Plano de ubicación de la mina Yauricocha
Fuente: Departamento de Planeamiento de la mina Yauricocha

2.4.2. Accesibilidad

Las principales vías de acceso a la mina Yauricocha, son por la carretera central Lima - Huancayo - Yauricocha, con 420 km de distancia, la vía es asfaltada de Lima a

Huancayo - Chupaca, de Chupaca hasta la Mina Yauricocha es carretera afirmada. Otra vía importante es por la Panamericana Sur Lima - Cañete - Yauricocha, por el valle del río Cañete con una distancia de 370 km.

Tabla N° 1: Rutas de accesibilidad a la mina Yauricocha

Ruta 1	Distancia	Ruta 2	Distancia	Ruta 3	Distancia
Lima-Cañete	150 km	Lima-La Oroya	174 km	Lima-Jauja (Avión)	180 km
Cañete-Yauricocha	225 km	La Oroya - Huancayo	124 km	Jauja-Huancayo	48 km
		Huancayo-Yauricocha	103 km	Huancayo-Yauricocha	103 km
Tiempo promedio	6 horas	Tiempo promedio	7 horas	Tiempo promedio	4 horas

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.4.3. Clima y vegetación

El clima de la región es frígido, con dos estaciones bien marcadas: la húmeda, del mes de noviembre a abril, con precipitaciones principalmente sólidas (nevada y granizo); y la seca, durante el resto del año. Durante la estación húmeda, las precipitaciones sólidas alimentan los glaciares, para luego formar riachuelos que descienden por laderas y alimentan las lagunas.

2.4.4. Relieve

El relieve del distrito minero de Yauricocha es abrupta, tipo alpina y la erosión Pliocénica de la superficie es claramente reconocible en el ondulado campo abierto al NE de la divisoria continental, mientras que, al SO, el terreno se encuentra dividido por profundos valles y cañones y aun así las reliquias de la erosión superficial se encuentran marcadas por picos con un promedio de 5000 m de altura. Al SO de la divisoria continental, los valles altos corresponden al levantamiento “Chacra”, están bien marcados. Debajo de los 3400 m, el cañón o último gran periodo de levantamiento está claramente demostrado por gargantas profundas que en algunos casos están a miles de metros de profundidad.

2.5. Geología

2.5.1. Geología regional

La geología en el área de estudio está claramente definida como se detalla a continuación:

a) Formación Goyllarisquizga

Las rocas más antiguas expuestas en el área son las areniscas de la formación Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior. Este grupo de aproximadamente 300 m de espesor está constituido por areniscas gruesas blancas a grises, localmente bandeadas con lutitas carbonáceas, así como pequeños mantos de carbón de mala calidad y arcilla. En las cercanías de Chaucha, estas areniscas presentan intercalaciones de lutitas rojas en la base, las areniscas afloran en los núcleos de los anticlinales al SW de Yauricocha y como capas dispersas a lo largo de la "zona revuelta de Chacras" así como en afloramientos aislados en la zona de Éxito.

b) Formación Jumasha

La formación Jumasha del Cretáceo Medio, con espesor promedio de 700 m consistente de caliza masiva de color gris claro. En la base, cerca al contacto con las areniscas, incluye intercalaciones de lutitas carbonosas.

Estos estratos están sucedidos por lentes discontinuos de calizas marrones y grises, ocasionalmente con horizontes lutáceos y silíceos de unos 6,00 m de espesor. También están presentes pseudobrechas de probable origen sedimentario y un sill de basalto. En las cercanías de los cuerpos mineralizados las calizas se encuentran formando aureolas marmolizadas y recristalizadas. Las rocas huésped más favorables para la mineralización en el área de Yauricocha, son estas calizas.

c) Formación Celendín

Está formada por lutitas solidificadas finamente estratificadas con intercalaciones de caliza recristalizada, calizas arcillosas, de edad Santoniana (cretácico superior). Su espesor promedio, en el área de Yauricocha, es de 400 m.

A esta unidad que anteriormente se le consideraba como estratos inferiores de las Capas Rojas Casapalca, localmente se le ha denominado France Chert.

d) Capas Rojas Casapalca

Esta formación sobreyace concordantemente a la formación Celendín siendo su contacto gradacional. Se le ha asignado una edad entre el Cretáceo Superior y el Terciario Inferior, ya que la ausencia de fósiles no permite datarla con exactitud. Está constituida principalmente por lutitas rojas calcáreas, calizas puras y calizas arenosas rojizas, ocasionalmente se ha reportado la presencia de flujos de lava y capas tufáceas. En el camino a Chumpe, es posible observar las capas rojas, la que presenta un rumbo N25°W y buzamientos de 75° al SW.

e) Cobertura volcánica Cenozoica

Se ha reconocido rocas volcánicas a lo largo de la falla Yauricocha, en las partes altas de Ipillo, estas unidades volcánicas se encuentran yaciendo en discordancia angular a las formaciones Celendín, Capas Rojas y como "Roof Pendant" sobre los intrusivos. La mayor parte de esta cobertura volcánica es de composición andesítica muy silicificadas, de color gris oscuro, grano fino, con presencia de pirita diseminada.

f) Intrusivos

Las rocas intrusivas están representadas por dos conspicuos stocks de granodioritas, hipabisales.

- Stock Yauricocha

El stock granodiorítico de Yauricocha, es de forma irregular, su superficie cubre aproximadamente 6 km², parte del contacto está controlado por la litología, siguiendo los planos de estratificación. A lo largo de su contacto, al cortar a unidades de la formación Celendín, se encuentran afectadas por el metamorfismo a *hornfels* (*France Chert*), las capas rojas están afectadas a cuarcitas y *hornfels*, las calizas Jumasha, solo sufren un moderado blanqueamiento y marmolización.

La granodiorita es de color gris (zona de alteración) a gris rosáceo (zona inalterada), más o menos equigranular y de grano medio. El color en superficie de intemperismo se ve grisáceo con patinas y/o impregnaciones de óxidos de hierro. Macroscópicamente, se observa fenocristales de plagioclasas, anfíboles, biotitas y trazas de magnetita.

Al Sur Oeste de la falla Yauricocha entre las localidades de El Paso, Éxito, Ipillo y San Valentín, aflora otro cuerpo intrusivo de composición granodiorítica, grano fino a medio, equigranular, de color gris a gris rosáceo, macroscópicamente se observan fenocristales de plagioclasas, hornblendas, biotitas, magnetita en trazas, *dots* y vetillas de epidota. En superficies de intemperismo adquiere un color grisáceo.

g) Metamorfismo

Las masas intrusivas han producido aureolas de metamorfismo en las rocas enajenantes; la extensión, tipo y grado de metamorfismo varía grandemente con los diferentes tipos de roca. Las rocas se convierten en cuarcitas, lutitas y calizas. Las aureolas metamórficas que rodean las intrusiones son de diferente extensión. El blanqueamiento de las lutitas se extiende más allá de la zona de los silicatos cálcicos: mientras que las calizas Jumasha son recristalizadas por distancias bien cortas. Localmente las emanaciones que escapan del intrusivo han producido en ciertos casos zonas angostas de: 1,00 m - 3,00 m de *skarn* y otros de 30,00 m a 50,00 m las que realmente son parte integral de la intrusión.

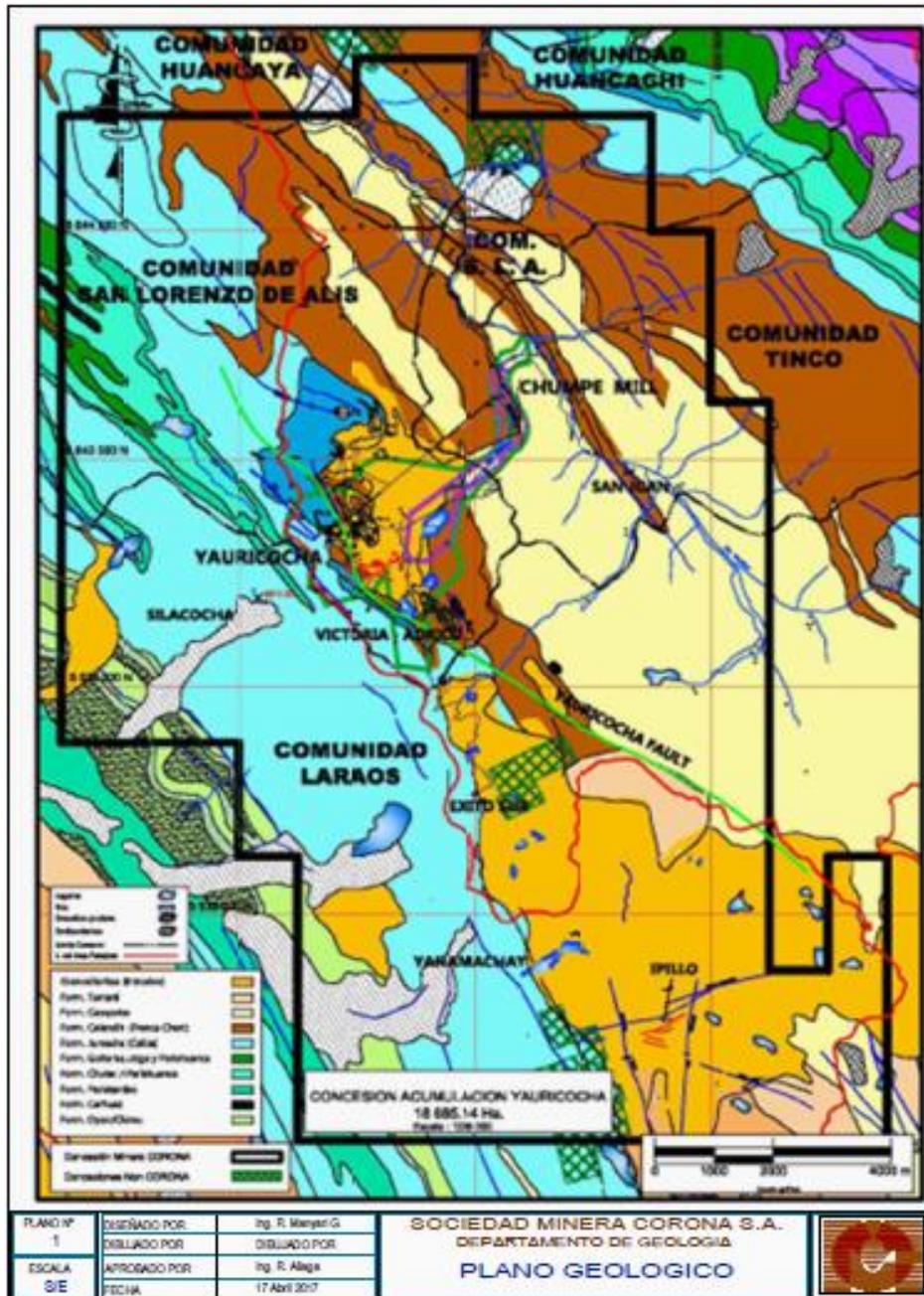


Figura N° 2: Plano Geológico Regional
Fuente: Departamento de Geología de la Mina Yauricocha

2.5.2. Geología local

A continuación, se describen las vetas y cuerpos mineralizados que ocurren en el área de la mina Yauricocha, manteniendo consideraciones anteriores e incluyendo nuevos datos de las últimas exploraciones e interpretaciones.

Los cuerpos son de configuración irregular que, vistos en un plano, presentan la forma aproximada de lentes, cuyos ejes mayores son paralelos al rumbo general de los estratos (NW-SE) y buzanan a gran ángulo al NE o son aproximadamente verticales. Sus dimensiones verticales son casi siempre mayores que las horizontales, existiendo casos donde estos cuerpos se extienden por más de 650 m debajo de la superficie; sus anchos son variables de 10 m a 40 m, tendiendo a ser fusiformes en profundidad.

Los cuerpos están emplazados en la caliza Jumasha y se encuentran agrupados tanto dentro de la caliza como a lo largo del contacto con las lutitas Celendín (*France Chert*) y en contacto con las masas intrusivas.

La disposición de los cuerpos es bastante irregular, unos aparecen interconectados entre sí formando amplias zonas mineralizadas, como en el caso de los cuerpos Catas-Contacto Oriental-Antacaca; otros aparecen parcialmente interconectados formando áreas relativamente grandes, como los cuerpos *Butz* Pozo Rico-Violeta-Erika y por último aquellos que aparecen como unidades individuales, aislados de los demás cuerpos, conformando áreas relativamente pequeñas, es el caso de los cuerpos Cuye, Mascota, Sasacaca, Sur Medio, Contacto Occidental, Amoeba, Maritza, Carmencita, Cuye Norte y las vetas y cuerpos de mina: Éxito, Cachi Cachi, Ipillo, etc.

La mineralización presente en los cuerpos está formada principalmente por la pirita, cuarzo, enargita, calcopirita, bornita, covelita, en la parte central y alrededor de estos núcleos se encuentran masas sueltas de pirita friable, galena, esfalerita, Tetrahedrita y geocronita con algo de calcopirita.

Trabajos en la mina Cachi Cachi, Victoria, Central, Éxito e Ipillo y actuales operaciones mineras en superficie y en subsuelo, las vetas pueden agruparse en tres sistemas principales: el primer sistema de rumbo N 70o-80o W con buzamiento 60o-80o SW o NE; el segundo sistema de rumbo N 70o-80o E con buzamiento 65o-80o NW y el tercer sistema de rumbo ligeramente E-W con buzamiento N y S.

Sus dimensiones horizontales y verticales son relativamente cortas, siendo su potencia variable de 0,50 m a 2,50 m.

La mineralización presente en las vetas, dentro de la caliza, consiste mayormente de pirita, esfalerita, galena con algo de cuarzo y calcopirita; mientras en las vetas, dentro del intrusivo, consiste de pirita, cuarzo, enargita, galena, esfalerita, covelita, fluorita, hematita, hornblenda rubia.

Cuerpos y vetas parecen estar íntimamente relacionados, los que conformarían un ensamble estructural mineralógico muy importante en el depósito mineral de Yauricocha.

2.5.3. Geología estructural

Como consecuencia de los esfuerzos tectónicos, que dieron lugar al levantamiento de la Cordillera de los Andes, la estructura local de rumbo general NW-SE está conformada principalmente de:

a. Pliegues

Varios pliegues conforman las estructuras principales del área de Yauricocha: anticlinal Purísima Concepción y sinclinal *France Chert* en la mina Central, anticlinal Cachi Cachi y sinclinal Huamanripa al Norte y sinclinal Quimpara inmediatamente al Sur de la laguna Pumacocha, norte de la mina San Valentín.

El anticlinal Purísima Concepción, que se encuentra al SW de la mina de Yauricocha, es una estructura local apretada, bien marcada y definida por un sill de basalto de 17 metros de espesor. El "*trend*" de su eje es aproximadamente N 50° W con suave "*plunge*" de 20° al SE. En el eje de este anticlinal y hacia el Flanco E del Sill de Basalto existe ocurrencia de oro diseminado en brechas silicias y horizontes silicificados.

El sinclinal *France Chert*, ubicado al NE de la mina, es un pliegue igualmente apretado con el "*trend*" de su eje que cambia de N 35° W (en el S) a N 65° W (en el N) y suave "*plunge*" de 40° al SE. En el flanco occidental de este pliegue y en calizas bandeadas sin plegamiento subsidiario, se encuentra el depósito mineral de Yauricocha. En el área de la mina central, el rumbo NW de los sedimentos plegados, fue rotado por esfuerzos horizontales, un ángulo de 30° en el sentido al movimiento de agujas del reloj. Esta

distorsión del plegamiento puede haberse producido por una falla de desgarramiento del basamento de rumbo NE-SW.

El sinclinal Quimpara inmediatamente 1 km al Sur del desagüe de la laguna Pumacocha tiene un eje con rumbo N 45° W, su flanco Este descansando sobre el intrusivo con ángulo de 70° a 75° al W y el flanco Oeste con aproximadamente 80° E conformada por paquetes calcáreos gris-oscuros, recristalizados en la proximidad al contacto y ocurrencia de un afloramiento de granates, magnetita y óxidos de cobre en el mismo contacto.

b. Fracturas

Los esfuerzos ocurridos en varias épocas, dieron como resultado el desarrollo de diversos sistemas de fracturas.

Durante el plegamiento, evento pre y/o contemporáneo al intrusivo, tuvo lugar la primera fracturación desarrollándose fallas longitudinales paralelas al rumbo regional de la estratificación.

De todas estas fallas, resalta la falla Yauricocha que aparece a lo largo del contacto caliza Jumasha - lutita Celendín la cual se extiende a gran distancia al SE de la mina Ipillo y continua al N, detrás del cerro Huamanripa, paralelo y lo largo de la laguna Silacocha.

Después que los intrusivos se emplazaron, el rumbo de los sedimentos plegados, al NW de la mina, fue girado por esfuerzos horizontales unos 30°. Como resultado de este giro, se desarrollaron cizallas y juntas de rumbo NW-SE, NE-SW y E-W, con buzamiento 50°-80° NE o SW, las primeras; 60°-85° SE o NW, las segundas y 80° N o S a casi verticales, las terceras. Este conjunto de fracturas que forman bloques fallados, a través de los dominios litológicos del área, juntamente con la falla Yauricocha representan la fracturación más importante del distrito minero de Yauricocha y ejercieron un fuerte control en la posición de vetas, cuerpos mineralizados.

c. Contactos

Los contactos calizos Jumasha - lutitas Celendín (*France Chert*), calizas Jumashaintrusivo y lutitas Celendín-intrusivo, tienen importancia estructural durante el plegamiento, fracturación y ascenso de las soluciones mineralizantes.

d. Brechas

Las brechas que ocurren en el área de Yauricocha, siguen principalmente la alineación estructural y se presentan mayormente en las calizas asociadas a los contactos e intercepciones de fracturas; sus formas son tabulares y/o tubulares.

e. Geo estructuras principales

La secuencia sedimentaria en el distrito está plegada, teniendo su eje un rumbo general N20°W, lo que hace que sea aproximadamente paralela al lineamiento general de los Andes. La estructura de mayor importancia es el Anticlinorio Casapalca, que presenta pliegues (sinclinales y anticlinales) asimétricos. En el área se encuentran cuatro grandes fallas inversas: Infiernillo, de rumbo N38°W y buzamiento 70°SW; Rosaura, de rumbo N55°W y buzamiento 80°SW; Americana, de rumbo N38°W y buzamiento 70°NE; y Río Blanco, en la parte SW del distrito, con un rumbo N35°E y paralelo al sistema de vetas Casapalca.

Localmente, la estructura principal la constituye el Anticlinal Rosaura, cuyo eje tiene rumbo N30°W.

La mina Rosaura se halla emplazada en su flanco W. En esta área hay tres sistemas principales de fracturamiento - falla: el sistema principal tiene rumbo N40°-60°W y buzamiento 60°-80°SW, el segundo sistema tiene rumbo N70°-80°W y buzamiento 60°-80°NE, y finalmente el tercer sistema tiene rumbo N20°-30°E y buzamiento 50°-70° al NW. Ver Planos del 13 al 20 — Planos estructurales por niveles).

2.5.4. Mineralización

La mineralización en la mina Yauricocha está conformada principalmente por pirita, cuarzo, enargita, calcopirita, bornita, covelita en el núcleo y parte central de los cuerpos; y masas sueltas de pirita friable, galena, esfalerita junto con algo de calcopirita en una ganga de calizas, arcilla y cuarzo en la periferia. Asimismo, la presencia de **Au** nativo se halla asociado a dichos sulfuros.

a. Principales sulfuros

- **Pirita:** mineral de textura friable a porosa y masiva distinguiéndose hasta 5 tipos que representan 5 estados diferentes de formación.
- **Marcasita:** se han distinguido hasta tres tipos de marcasita y se encuentran asociadas a calcopirita, galena y esfalerita.
- **Enargita:** es el mineral de cobre más abundante de la mina Yauricocha, se encuentra en fragmentos irregulares y en masas grandes junto con cuarzo y pirita.
- **Calcopirita:** es el mineral de cobre más abundante después de la enargita. Se encuentra reemplazando fragmentos de caliza brechada, junto al cuarzo friable y pirita, o rellenando pequeñas cavidades, está asociada a oro nativo.
- **Bornita:** se encuentra invariablemente asociado con la calcopirita y en menor grado con la enargita.
- **Covelita:** se ha observado estos dos minerales dentro de la bornita, formando solución sólida o en intercrecimiento laminar pequeño.
- **Tetrahedrita y tenantita:** cristales pequeños de estos minerales son abundantes en la periferia de los cuerpos de enargita, como en los cuerpos mineralizados aledaños al stock intrusivo Central y Sur Medio.

- **Galena:** se encuentra diseminada en piritita y en caliza eskarnizada; siempre está asociada con la chalcopiritita y esfalerita.
- **Esfalerita:** es el mineral más abundante, se encuentra asociada con arcilla, piritita y galena mayormente en la periferia de los cuerpos mineralizados.
- **Geocronita:** se presenta en los niveles superiores de la mina asociada a la galena, esfalerita, tetrahedrita y cuarzo; rellenando fracturas y clivajes de la esfalerita.

b. Minerales de Ganga

- **Cuarzo:** mineral de mayor abundancia en los cuerpos mineralizados.
- **Especularita y siderita:** se encuentran asociadas con la caliza y vetas en intrusivo en mina Éxito e Ipollo.
- **Calcita:** se encuentra en vetillas asociada con cuarzo y esfalerita.
- **Fluorita:** mineral asociado con la galena y esfalerita dentro de los cuerpos de Pb-Zn.
- **Baritina:** se le encuentra en la periferia de los cuerpos de Pb-Zn emplazadas en la zona de menor temperatura.
- **Magnetita:** se encuentra principalmente en los cuerpos Cuye, Catas y muy escasamente en Antacaca, y en los niveles profundos (Nv. 770 hasta el 1020), reconocido con perforaciones diamantinas, la magnetita se encuentra asociada con piritita y calcopiritita.

2.6. Caracterización del macizo rocoso de la mina Yauricocha

La cuantificación de las características estructurales y geomecánicas de las rocas circundantes a las estructuras mineralizadas, tienen una justificación técnica y económica para una explotación racional, segura y rentable; su utilización está orientada al planeamiento y diseño, selección de equipos, diseño de la perforación, voladura y sostenimiento de labores mineras superficiales y subterráneas.

Tabla N° 2: Tipo de roca promedio para los diferentes tipos de aberturas realizadas para los procesos de minado

Unidad minera: Yauricocha				
DISTRIBUCIÓN DE CALIDAD GEOMECAÁNICA POR TIPOS DE ROCAS				
Tipos de rocas	RMR	% distribución	Secciones	Zonas
II B	61-80	0%	3x3, 3.5x3, 3.5x3.5	II, III, V, profundización
III A	51-60	10%	3x3, 3.5x3, 3.5x3.5	II, III, V, profundización
III B	41-50	50%	3x3, 3.5x3, 3.5x3.5	II, III, V, profundización
IV A	31-40	15%	3x3, 3.5x3, 3.5x3.5	II, III, V, profundización
IV B	21-30	20%	3x3, 3.5x3, 3.5x3.5	II, III, V, profundización
V A	0-20	5%	3x3, 3.5x3,5	II, III, V, profundización
		100%		

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.6.1. Levantamiento geomecánico: línea de detalle

Se registraron datos a partir del mapeo geomecánico de campo, que se llevó a cabo utilizando el "método directo por celdas de detalle" (línea de detalle). Mapeo por tipo de roca usando el RMR o el GSI, mediante este método se realizaron mediciones sistemáticas de las discontinuidades presentes en una estación de medición (Pm), representadas por un tramo de extensión variable de la roca expuesta en las excavaciones en interior mina.

2.6.2. Distribución de discontinuidades

Para establecer las características de la distribución de discontinuidades, el procesamiento de los datos se realiza mediante técnicas de proyección estereográfica, utilizando el programa de cómputo DIPS, en la figura adjunta se presenta el diagrama estereográfico del compósito general de la mina perteneciente al Nv. 720.

Los diagramas muestran la presencia de tres a cuatro sistemas de discontinuidades por lo general en toda el área de estudio, formados principalmente por diaclasas y fallas.

- a) Del análisis de los resultados obtenidos se señala lo siguiente: en los alrededores del Proyecto de la Cámara de Estación del Nv. 720 Pique Mascota, se tienen claramente definidos tres sistemas estructurales principales y uno secundario que afectan a la zona, la primera con orientación NE-SW teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECCIÓN) de 89/162. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 69/117. Sistema principal, la tercera con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 69/2. Sistema principal, la cuarta con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 42/287. Sistema secundario.
- b) La distribución de las discontinuidades revela que en toda la zona de evaluación se presenta cuatro arreglos estructurales, donde se dan cuatro sistemas típicos de discontinuidades:

Tabla N° 3: Buzamiento y dirección de Buzamiento de las discontinuidades

SET	DIP	DIP DIR
S1	89	162
S2	69	117
S3	69	2
S4	42	287

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

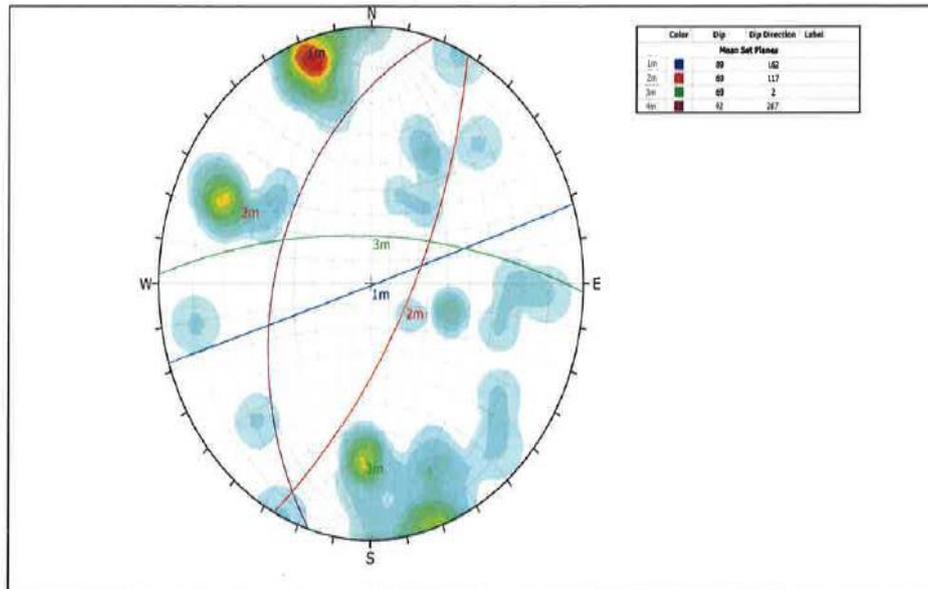


Figura N° 3: se muestran los sets de las principales familias de discontinuidades
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

En la actualidad, la Sociedad Minera Corona S.A., viene minando con estructuras de discontinuidades de 2 a 4 familias, asimismo las ventanas por lo general están orientadas al NE perpendiculares a la dirección de la falla Yauricocha.

2.6.3. Clasificación geomecánica

Para clasificar geomecánicamente el macizo rocoso se usó la información desarrollada precedentemente, aplicando los criterios de clasificación geomecánica de Bieniaswsky (RMR -Valoración del Macizo Rocosó – 1989), Barton y colaboradores (Sistema Q – 1974) y Marinos y Hoek (GSI – Geological Strenght Index – 2002).

Los valores de resistencia compresiva de la roca intacta fueron conforme a los procedimientos que se señalarán más adelante. Los valores del índice de calidad de la roca (RQD) fueron determinados mediante el registro lineal de discontinuidades, utilizando la relación propuesta por Priest y Hudson (1986), teniendo como parámetro de entrada principal la frecuencia de fracturamiento por metro lineal.

A continuación, se detallan las calidades de roca encontradas en la caracterización geomecánica realizada con metodología RMR en lo que corresponde a las rocas presentes en

la mina Yauricocha. Así mismo los resultados obtenidos en el mapeo de los cuerpos masivos. (Mascota, Antacaca, Catas y Cuye).

Tabla N° 4: Criterio geomecánico según el tipo de roca

Unidad Estratigráfica	Unidad Litológica	Valoración Según el RMR	Tipo de roca
Stock intrusivo	Monzonita	65	Buena
Formación Jumasha	Calizas	55	Regular
Formación Celendín	Lutitas silificadas	28	Mala
Cuerpo mineralizado	Sulfuros y óxidos	8-12	Muy mala

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

Debido a la condición de gran dinámica de la subsidencia producida por el método de explotación, se optó por evaluar la roca encajonante en zonas donde aún hay la influencia de este fenómeno y posteriormente determinar el tipo de roca.

2.6.4. Zonificación geomecánica de la masa rocosa

Para la ampliación del cálculo de la mecánica de rocas es necesario que la masa rocosa este dividida en áreas de características estructurales y mecánicas similares, debido a que el análisis de los resultados y los criterios de diseño serán válidos solo dentro de masas rocosas que presenten propiedades físicas y mecánicas similares.

Dentro de estas propiedades el modelo estructural de la masa rocosa y la calidad de la misma son consideraciones importantes a tomarse en cuenta para la delimitación de los dominios estructurales. Para nuestro caso tiene que ser mayor la importancia de la calidad de la roca que el modelo estructural, dado que la masa rocosa circundante a la explotación generalmente es de calidad mala a muy mala.

Tabla N° 5: Zonificación geomecánica de los cuerpos masivos de la mina Yauricocha

Cuerpo mineralizado	Zona	Unidad litológica	RMR	Tipo de roca	GSI
Cuerpo Cuye	Caja piso	Caliza	61-81	Buena	F/R
	Contacto	Brecha	26	Mala	IF/R
	Sulfuros	Sulfuros	<20	Muy mala	F/MP
	Contacto	Brecha	22	Mala	F/MP
	Caja techo	Caliza	55	Regular	F-MF/R

Cuerpo Catas	Caja piso	Caliza	51	Regular	F-MF/R
	Contacto	Brecha	25	Mala	MF/P
	Sulfuros	Sulfuros	<20	Muy mala	F/MP
	Contacto	Brecha	<20	Muy mala	F/MP
	Caja techo	Lutitas	<20	Muy mala	F/MP
Cuerpo Antacaca	Caja piso	Caliza	51	Regular	MF/P
	Contacto	Brecha	22	Mala	MF/MP
	Sulfuros	Sulfuros	<20	Muy mala	F/MP
	Contacto	Brecha	<20	Muy mala	F/MP
	Caja techo	Lutitas	<20	Regular	F/MP
Cuerpo Mascota	Caja piso	Caliza	55	Regular	MF/P
	Contacto	Brecha	35	Mala	IF/P
	Sulfuros	Óxidos	<20	Muy mala	IF/MP
	Contacto	Brecha	40	Mala	MF/MP
	Caja techo	Caliza	48	Regular	MF/R

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.6.5. Cálculo de tensiones

Para el cálculo de tensiones presentes en la zona de estudio el túnel Yauricocha está ubicado a 4100 m s.n.m. en el Nv. 720. Para analizar la variación de K, se observa que para profundidades menores a 500m los valores de K son extremadamente variables situados entre 0.5 y 3.5. Dicha variación de los elevados valores de las tensiones horizontales es por existencia de las tensiones tectónicas en la superficie de la corteza.

Tabla N° 6: Esfuerzo vertical para diferentes profundidades

NIVEL	PROFUNDIDAD (z)	ESFUERZO VERTICAL (Mpa)
300	40	1.1
360	100	2.7
410	150	4.1
465	205	5.5
520	260	7
575	315	8.5
620	360	9.7
670	410	11.1
720	460	12.4
770	510	13.8
820	560	15.1
870	610	16.5
920	660	17.8

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

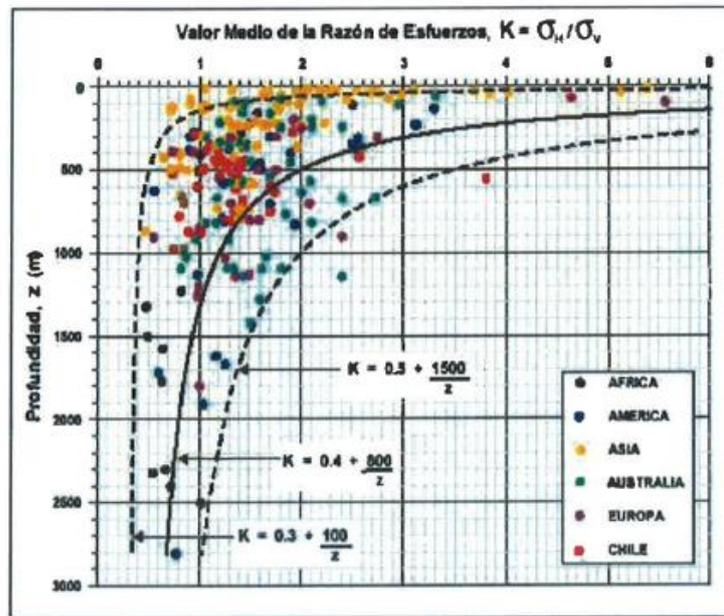


Figura N° 4: Variación de K respecto a la profundidad
Fuente: Departamento de geomecánica de la Mina Yauricocha

Para determinar K utilizaremos la siguiente expresión

$$K = 0.3 + 100/Z$$

A continuación, presentaremos la variación de K y el esfuerzo horizontal para profundidades entre 0 a 660 metros.

Tabla N° 7: Esfuerzo horizontal y K para diferentes profundidades

PROFUNDIDAD (Z)	VALOR MEDIO DE LA RAZÓN DE ESFUERZOS (K)	ESFUERZO HORIZONTAL (Mpa)
40	2.8	3.1
100	1.3	3.5
150	1	3.9
205	0.8	4.4
260	0.7	4.8
315	0.6	5.3
360	0.6	5.6
410	0.5	6
460	0.5	6.4
510	0.5	6.8
560	0.5	7.2
610	0.5	7.6
660	0.5	8.0

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.6.6. Estimación de los esfuerzos máximos en la periferia de la excavación

La distribución de tensiones en el entorno de una excavación en roca masiva elástica, puede obtenerse por medio de la teoría elástica, siempre que se haga algunas hipótesis simplificadas sobre las propiedades mecánicas de las rocas, la forma de la excavación y el campo tensional, es decir el estado tensional del macizo antes de la excavación. La estimación de los esfuerzos máximos en el techo como en los hastiales de la excavación subterránea.

2.6.7. Condiciones de agua subterránea

La presencia del agua subterránea es indudablemente dañina para las condiciones de estabilidad de las labores mineras. Lo que se observa en el campo es evidente.

Las áreas de la mina con mayor presencia de agua son más inestables que aquellas donde la presencia del agua es menor, por lo que el agua ejerce un efecto muy negativo en la estabilidad de las labores mineras de explotación.

Conforme el minado fue avanzando en descenso, el agua apareció en forma de flujo significativo en los cuerpos mineralizados (Cuerpos, Catas, Antacaca y Rosarusa). En los niveles inferiores del minado actual el agua está migrando hacia el SE por percolación a través de la masa rocosa. Como consecuencia de esto, en los niveles inferiores se está observando cada vez condiciones geomecánicas del mineral (polimetálico) más difíciles, con el peligro de posibles soplos de mineral y desmonte en los tajos.

Lo que queda claro es que se está implementando medidas efectivas de drenaje tanto en subterráneo como en superficie (área de subsidencia) a fin de minimizar los efectos negativos del agua.

La Sociedad Minera Corona S.A. actualmente está llevando a cabo diferentes obras de drenaje en subterráneo, así como también en superficie, puesto que se ha observado en el área de subsidencia signos importantes de escorrentías (cárcavas), que complican más el problema de las inestabilidades tanto en el subterráneo como en la superficie.

Dentro de los tramos calcáreos, la Sociedad Minera Corona S.A. tiene drenes detrás del intrusivo, se tienen niveles donde el pórfido drena el agua que proviene detrás de las áreas de ataque de minado, controla los niveles de agua en los niveles de minado y niveles ya minados.

2.6.8. Diseño de labores

El diseño de una labor subterránea debe estar en función del tipo de terreno, nivel de seguridad deseado, etc. para luego diseñar y calcular el sostenimiento necesario y estabilizar la labor. Es muy importante el seguimiento y la caracterización geomecánica continua del avance de la excavación, así como el monitoreo de los tramos ya excavados, dicha información permitirá determinar las deficiencias y accesos del sostenimiento instalado.

2.6.9. Diseño del sostenimiento

Para la realización de un sostenimiento adecuado se realiza mediante estándares ya determinados de acuerdo al tipo de terreno, dichos estándares de sostenimiento se muestran en la tabla de geomecánica que a continuación se presenta.

Tabla N° 8: Sostenimiento estandarizado en la mina Yauricocha

TIPO DE ROCA	RMR AJUSTADO	SOSTENIMIENTO
II	>60	Perno sistemático de 7'
III-A	51-60	Perno sistemático de 7' a 1.2 x 1.2m (P. Helicoidales o Split set)
III-B	41-50	Malla electrosoldada + Perno Split Set 7' a 1.2x1.2m
IV-A	31-40	Shotcrete 2''+ Perno 7' a 1.2x1.2m (P. Hydrabolt o P. Split set)
IV-B	21-30	Shotcrete 2''+ Perno 7' a 1.2x1.2m (P. Hydrabolt, P. Split set o Helicoidal)
V	<21	Shotcrete 2''+ malla c/perno 7' (Split Set, Hydrabolt o Helicoidal) + shotcrete 1''o cimbras metálicas o cuadros

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

La selección del tipo de perno a utilizar para el sostenimiento de las labores está en función de la resistencia de la roca intacta, de esa forma, en rocas cuya resistencia supere los 25 MPa, es factible utilizar Split Set, siempre y cuando dicha matriz rocosa no forme

parte de un terreno intensamente fracturado, en ese caso, el perno a utilizar será Hydrabolt, en el caso de *Pernos Helicoidales*, estos serán utilizados en labores permanentes (Rampas y By pass), principalmente, por su mayor capacidad de carga con respecto a los dos primeros pernos antes mencionados. Para la correcta instalación del sostenimiento a emplear, en el caso del shotcrete, se realizará mensualmente ensayos de comprensión simple del shotcrete.

Así mismo, para el control de los pernos, se realizan pruebas de tracción de pernos “Pull Test”.

2.6.10. Método de explotación *sublevel caving*

El *sublevel caving* es un método de explotación por hundimiento de subniveles donde el mineral por su naturaleza origina subsidencia en las áreas circundantes al cuerpo mineralizado explotado por este método. Consiste en desarrollar galerías o ventanas paralelas separadas generalmente por 8 metros de eje a eje en la horizontal, conocidas como galerías de producción, los subniveles se ubican a través de los cuerpos mineralizados en intervalos verticales que varían, en la mayoría de casos de 8 a 19 metros (en nuestro caso 16m). La explotación queda diseñada según su configuración geométrica simétrica. El acceso a los subniveles es mediante rampas. La operación consiste básicamente en la provocación del hundimiento mediante perforación de tiros en abanico desde los subniveles hacia arriba, atravesando el pilar superior, la posterior voladura de las perforaciones, el carguío y transporte del mineral disparado. La extracción desde un frente de galería de producción, llamado también punto de extracción continua hasta que ingrese estéril en una cantidad tal que la ley extraída ya no es económica, en ese momento se dispara la corrida de abanico contigua y se repite el proceso.

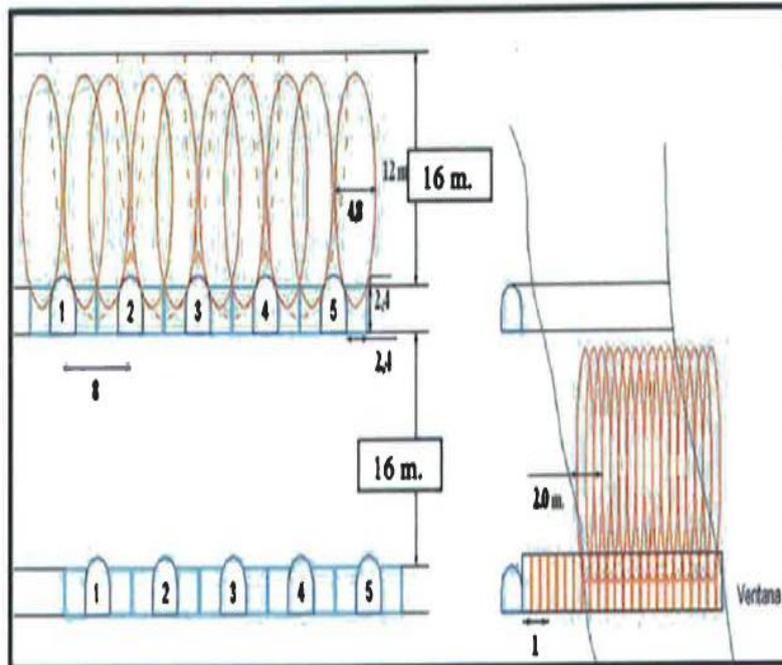


Figura N° 5: Espaciamiento de ventanas (8m de horizontal) y (subniveles 16m vertical)
Fuente: Departamento de Operaciones de la mina Yauricocha

2.7. Pasos para el cálculo del RMR (*Rock Mass Rating*)

Para obtener el índice RMR de Bieniawski se realiza lo siguiente:

- Al sumar las 5 variables o parámetros calculados, nos da como resultado un valor índice.
- El parámetro 6, que se refiere a la orientación de las discontinuidades, considera que es desfavorable, por lo tanto, cuando se obtiene el valor índice de la orientación de las discontinuidades, se le sustrae al valor obtenido de la suma total de los 5 primeros parámetros.

2.7.1 Primer parámetro: resistencia a la compresión Uniaxial (Mpa)

La resistencia de la matriz rocosa (roca intacta) se determina con ensayos de compresión simple en laboratorios y puede ser estimada en los afloramientos rocosos mediante índices de campo descritos.

Tabla N° 9: Resistencia a la compresión Uniaxial

Descripción	Resistencia de la compresión
Muy alta	>250
Alta	100-250
Media	50-100
Baja	25-50
Muy baja	>25

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.7.2 Segundo parámetro: cálculo del RQD

Según (Palmstrom, 1982), “El RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen, visibles en afloramientos rocosos o socavones”. Nos dice también que la relación sugerida para masas rocosas libres de arcillas es:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de discontinuidades por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

Tabla N° 10: Índice de calidad de la roca desarrollado por Palmstrom

RQD	Calidad de la roca
0-25 %	Muy mala
25-50 %	Mala
50-75%	Regular
75-90%	Buena
90-100%	Excelente

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.7.3. Tercer parámetro: cálculo del espaciamiento entre discontinuidades

El espaciamiento de las discontinuidades se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Esto influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques de matriz rocosa que forman las diferentes familias. Si los espaciamientos son pequeños, la resistencia del macizo rocoso disminuye en forma considerable. El espaciamiento de las discontinuidades está clasificado según la tabla que a continuación se presenta.

Tabla N° 11: Espaciamiento entre discontinuidades

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipos de macizo rocoso
Muy ancho	> 2m	Sólido
Ancho	0.6 - 2m	Masivo
Moderadamente cerrado	0.2 - 0.6 m.	En bloques
Cerrado	0.06 - 0.2 m	Fracturado
Muy cerrado	< 0.06 m	Machacado

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

2.7.4. Cuarto parámetro: cálculo de la condición de las juntas

Nos permite describir ciertas características de las discontinuidades, estas son:

- a) La **persistencia**, es el tamaño de una discontinuidad. Este parámetro se puede cuantificar observando la longitud de las superficies estudiadas en los afloramientos. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán estas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso.

Tabla N° 12: Clasificación según la Persistencia de las discontinuidades

Grado	Descripción	Separación de las caras	RMR
1	Muy pequeña	<1m	6
2	Pequeña	1-3m	4
3	Mediana	3-10m	2
4	Alta	10-20m	1
5	Muy alta	>20m	0

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

- b) La **apertura**, es la separación o abertura de las discontinuidades, se define como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad abierta, en la que el espacio intermedio tiene agua o aire.

Tabla N° 13: Clasificación según las aperturas de las discontinuidades

Grado	Descripción	Separación de las caras	RMR
1	Abierta	>5mm	0
2	Moderadamente abierta	1-5mm	2
3	Cerrada	0.1-1mm	4
4	Cerrada	<0.1mm	5
5	No tiene	0	6

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

- c) La **rugosidad**, es el factor determinante de la resistencia al cizallamiento (la rugosidad aumenta la resistencia al corte), su importancia disminuye al aumentar la abertura, el espesor del relleno o cualquier desplazamiento sufrido con anterioridad.

Tabla N° 14: Clasificación según la Rugosidad de las discontinuidades

Grado	Descripción	RMR
1	Muy rugosa	6
2	rugosa	4
3	Ligeramente rugosa	2
4	suave	1
5	Espejo de falla	0

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

- d) El **relleno**, se refiere al material que está entre los labios de una discontinuidad, existe una gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables.

Tabla N° 15: Clasificación según el relleno de las discontinuidades

Grado	Descripción	RMR
1	Relleno suave >5mm	0
2	Relleno suave <5mm	1
3	Relleno duro >5mm	2
4	Relleno duro <5mm	4
5	limpio	6

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

e) **La intemperización de una roca**, condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas, ahí radica su importancia. Según avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. La identificación del estado o grado de intemperización de la matriz rocosa se puede realizar de forma sistemática a partir de las descripciones de la tabla.

Tabla N° 16: Clasificación según la intemperización de las discontinuidades

Grado	Descripción	RMR
1	Descompuesta	0
2	Muy intemperizada	2
3	Moderadamente intemperizada	3
4	Ligeramente intemperizada	5
5	Sana	6

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

2.7.5. Quinto parámetro para calcular el RMR según la presencia del agua

En un macizo rocoso fracturado, el agua tiene gran influencia sobre su comportamiento. El agua en el interior procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes.

Tabla N° 17: Clasificación según la presencia de agua de las discontinuidades

Grado	Descripción	RMR
1	Seco	15
2	Húmedo	10
3	Mojado	7
4	Goteo	4
5	Flujo	0

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

2.7.6. Sexto parámetro: cálculo del RMR según la orientación de las discontinuidades

Cuando se tiene la calificación del rumbo y buzamiento de la roca con respecto al eje del túnel, se procede a calcular con ese calificativo el rango RMR, dependiendo del tipo de obra subterránea a ejecutar.

Tabla N° 18: RMR en base a la orientación y buzamiento de las discontinuidades

Calificativo	RMR
Muy favorable	0
Favorable	-2
Regular	-5
Desfavorable	-10
Muy desfavorable	-12

Fuente: (Michel Cáceres, 2017)

Para tener condiciones de estabilidad favorables de la masa rocosa en una excavación, es hacer que esta, avance en forma perpendicular, cruzando al sistema principal de discontinuidades o al rumbo de los estratos, fallas principales y zonas de corte, es decir, al rasgo estructural dominante de la masa rocosa.

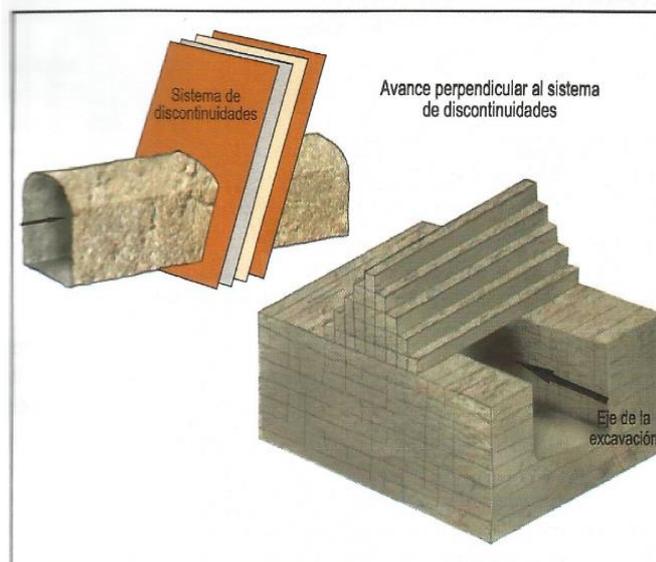


Figura N° 6: Cuando la dirección de la labor es perpendicular a los estratos
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

Si una excavación avanza en forma paralela a un sistema principal de discontinuidades o al rumbo de los estratos, fallas principales y zonas de corte, las condiciones de estabilidad de la masa rocosa serán muy desfavorables por el debilitamiento de la roca, principalmente cuando el buzamiento de estas estructuras es mayor a 45° .

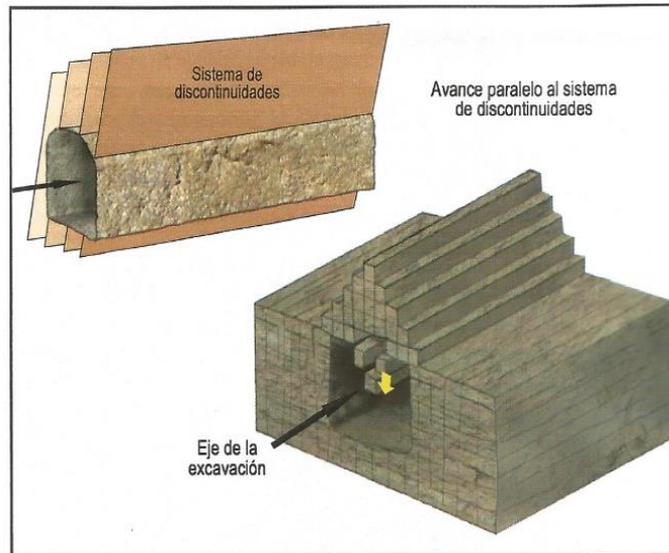


Figura N° 7: Cuando la dirección de la labor es paralela a los estratos
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

De acuerdo al arreglo estructural es recomendable que la excavación se acomode a los rasgos estructurales de la masa rocosa, aunque las labores no tendrían una estética adecuada sería más estable. Vale acotar que, al tener esfuerzos inducidos considerables, estas cuñas favorecen al mecanismo de rotura del macizo rocoso.

2.8. Clasificación geomecánica de Hoek Brown (GSI)

(Hoek, 1995), “ha propuesto un índice geológico de resistencia, GSI (*Geological Strength Index*), que evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades. (4) Según esto, se toman en cuenta las siguientes cinco categorías de fracturamiento”:

- a) Levemente fracturada (LF)
- b) Moderadamente fracturada (F)
- c) Muy fracturada (MF)
- d) Intensamente fracturada (IF)
- e) Triturada (T)

Asimismo, se deberá considerar la condición superficial de la masa rocosa, que involucra a la resistencia de la roca y a las propiedades de las discontinuidades: resistencia, apertura, rugosidad, relleno y la meteorización o alteración, según esto, las cinco categorías que se toman en cuenta se definen así:

- a) Masa rocosa buena (B)
- b) Masa rocosa regular (R)
- c) Masa rocosa pobre (P)
- d) Masa rocosa muy pobre (MP)

A continuación, se presentará la cartilla geomecánica GSI, utilizada en la mina Yauricocha para la estimación del tipo de sostenimiento en base a descripciones geológicas.

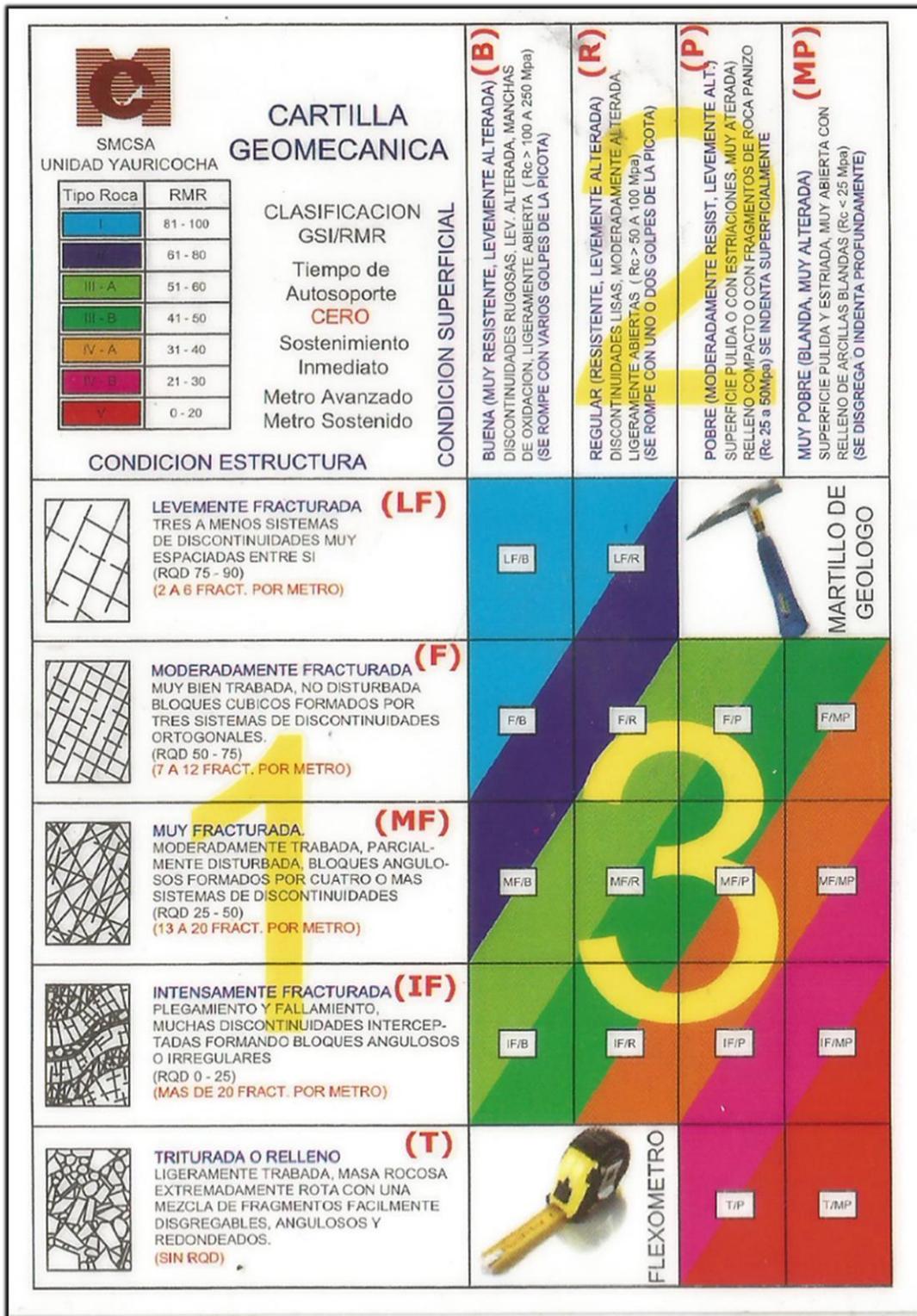


Figura N° 8: Estimación del GSI, en base a descripciones geológicas
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

Labor Permanente		Labor permanente > 3 años		Sección de la Labor (m)			
Tipo Roca		Clasificación GSI	Condición superficial	Menor a 1.50m	1.50m a 3.50m	3.50m a 4.50m	Mayor a 4.50m
I	MUY BUENA I	LF/B		Autosoporte	PO	PO	PO
II	BUENA II	F/B - LF/R		Autosoporte	PO	PO	P1
III - A	REGULAR III - A	F/R - MF/B		SO	P1	P1	P1
III - B	REGULAR III - B	F/P - MF/R IF/B		SO	P+M	P+M	P+M
IV - A	MALA IV - A	MF/P - IF/R F/M/P		CM	SH+P	SH+P	SH+P
IV - B	MALA IV - B	MF/MP - IF/P		CM	CB H4	CB H4	NR
V	MUY MALA V	IF/MP - T/MP T/P		CM	CB H6	NR	NR

Labor Temporal		Labor temporal <= 3 años		Sección de la Labor (m)			
Tipo Roca		Clasificación GSI	Condición Estructura	Menor a 1.50m	1.50m a 3.50m	3.50m a 4.50m	Mayor a 4.50m
I	MUY BUENA I	LF/B		Autosoporte	SO	SO	SO
II	BUENA II	F/B - LF/R		Autosoporte	SO	SO	S1
III - A	REGULAR III - A	F/R - MF/B		SO	S1	S1	S1
III - B	REGULAR III - B	F/P - MF/R IF/B		SO	S+M	S+M	S+M
IV - A	MALA IV - A	MF/P - IF/R F/M/P		CM	SH + S	SH + S	SH + S
IV - B	MALA IV - B	MF/MP - IF/P		CM	CB H6/CM	CB H6	NR
V	MUY MALA V	IF/MP - T/MP T/P		CM	CB H6/CM	CB H6	NR

Tipo de Sostenimiento		FACTORES INFLUYENTES
Cod.	Descripción del Sostenimiento	<p>FLUJO DE AGUA ESFUERZOS INDUCIDOS VOLADURA DEFICIENTE PRESENCIA DE FALLAS</p> <p>SIN FACTORES INFLUYENTES</p> <p>CON FACTORES INFLUYENTES</p>
PO	Perno helicoidal ocasional	
P1	Perno helic. sistematico 1.2x1.2 - 1.5x1.5 - 2.0x2.0	
P+M	Perno helic. sist. + malla 1.0 x 1.0 m o 1.2x1.2 m .	
SO	Split set ocasional	
S1	Split set o Swellex sist. 1.2x1.2 m a 1.5x1.5 m.	
S+M	Split set o Swellex sist. + malla 1.0x1.0 m a 1.2x1.2 m	
SH + P	Shotcrete con fibra 2" a 3" + perno helic. sist. 1.0x1.0 - 1.2x1.2	
SH + S	Shotcrete con fibra 2" a 3" + Split /swellex. sist. 1.0 - 1.2m o CM	
CB H4	Cimbras metálicas H4 espaciados 1.00m a 1.20m.	
CB H6	Cimbra metálica H6 espaciado de 0.50 m a 1.0 m.	
CM	Cuadros de madera 1.00m a 1.20m.	
NR	Excavación No Recomendado	

Pernos helicoidales	Perno Permanente	La longitud de los pernos esta en función a la sección de la excavación.
Split Set	Perno temporal	

IMPORTANTE: cualquier modificación o combinación del sostenimiento se realizara bajo evaluación y recomendación del Área de Geomecánica.

Figura N° 9: Estimación del GSI, en base a descripciones geológicas
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.9. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989)

La clasificación geomecánica de (Bieniawski, 1989), ha dividido el índice RMR dentro de 5 clases (I, II, III, IV y V) con las denominaciones desde Muy buena, Buena, Media, Mala, Muy mala, cada clase cubre un intervalo de 20 puntos.

Tabla N° 19: Clases de roca según la Clasificación geomecánica de Bieniawski 1989

RMR	CLASE DE ROCA
(81 - 100)	I - Muy buena
(61 - 80)	II - Buena
(41 - 60)	III - Media
(21 - 40)	IV - Mala
(1 - 20)	V - Muy Mala

Fuente: (Abad Alvarado, 2011)

“La clasificación geomecánica más usada es la de (Bieniawski, 1989), que proporciona unas recomendaciones de sostenimiento en función al índice RMR (*Rock Mass Rating*)”. Se establecen las recomendaciones para la excavación y sostenimiento que incluyen los siguientes puntos:

a) Excavación

Se estimará el tipo de sostenimiento en función del RMR y sección de la excavación.

b) Bulones

Son barras de acero que se utiliza como anclaje en el sostenimiento de túneles.

c) Hormigón proyectado

Es un proceso por el cual se proyecta hormigón a alta velocidad sobre una superficie.

d) Cerchas metálicas

Es una estructura metálica que sirve como soporte en túneles.

Tabla N° 20: Recomendación para el sostenimiento en Túneles según Bieniawski (1989)

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulnar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

Fuente: (Abad Alvarado, 2011)

2.10 Tipos de sostenimiento activo

2.10.1 Sostenimiento con Pernos Helicoidales

Son pernos de anclaje consistentes en barras de acero helicoidales, que presentan un diámetro nominal de 19 mm y una masa de 2.275 kg/m.

Los pernos helicoidales se utilizan para el sostenimiento en labores permanentes debido a su mayor capacidad de soporte. A continuación, se presentarán las especificaciones técnicas de los pernos helicoidales.

- Tipo de perno: barra helicoidal
- Longitud de los pernos: 2', 4', 6' y 8' pies
- Diámetro del perno: 19 mm
- Capacidad de anclaje del perno: 2.5 - 3 Ton/pie

2.10.2. Sostenimiento con *Split Set*

Según (Sanchez Zeballos, 2013), “El Split Set es un tubo de acero especial, con tratamiento anticorrosivo ranurado longitudinalmente y que al ser introducido en el taladro de menor diámetro por expansión genera fuerzas friccionantes. Por su instalación sencilla nos ofrece sostenimiento inmediatamente. El perno *split set* es un tipo de sostenimiento metálico considerado temporal que trabaja por fricción (resistencia al deslizamiento). El *split set*, consiste en un tubo ranurado a lo largo de su longitud, en uno de los extremos es ahusado y el otro lleva un anillo soldado para mantener la platina. Al ser introducido el perno a presión dentro de un taladro de menor diámetro, se genera una presión radial a lo largo de toda su longitud contra las paredes del taladro, cerrando parcialmente la ranura durante este proceso. La fricción en el contacto con la superficie del taladro y la superficie externa del tubo ranurado constituye el anclaje, el cual se opondrá al movimiento o separación de la roca circundante al perno, logrando así indirectamente una tensión de carga. Los *split set* son utilizados mayormente para reforzamiento temporal, usualmente conformando sistemas combinados de refuerzo en terrenos de calidad regular a mala. En roca intensamente fracturada y débil no es recomendable su uso”.

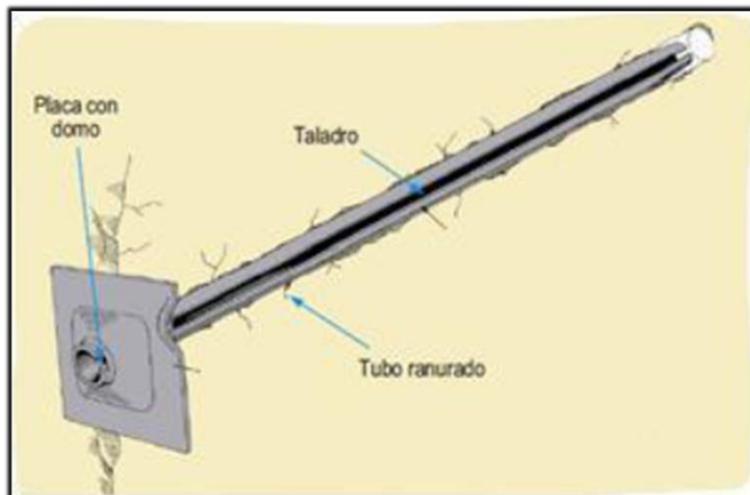


Figura N° 10: Split set
Fuente: Mendieta Britto, 2014

El diámetro de los tubos ranurados varía de 35 a 46 mm, con longitudes de 4 a 12 pies.

Pueden alcanzar valores de anclaje de 1 a 1.5 toneladas por pie de longitud del perno, dependiendo principalmente del diámetro de la perforación efectuada, la longitud de la zona del anclaje y el tipo de la roca. Las siguientes consideraciones son importantes para su utilización. El diámetro del taladro es crucial para su eficacia, el diámetro recomendado para los *split set* es de 35 a 38 mm, con diámetros más grandes se corre el riesgo de un anclaje deficiente y con diámetros más pequeños es muy difícil introducirlos. Son susceptibles a la corrosión en presencia de agua, a menos que sean galvanizados.

Las especificaciones técnicas de los *Split Set* son:

- Tipo de perno: tubo de acero
- Longitud de los pernos: de 4' a 12 pies
- Diámetro del tubo: varía entre 35 - 46mm
- Capacidad de anclaje del *Split Set*: 1 – 1.5 Ton/pie

2.10.3 Sostenimiento con pernos de anclaje de fricción *Hydrabolt*

Es un perno de fricción, de inmediata instalación, al que se inyecta agua a altas presiones (250-300 Bares). Se expande de los 29 mm (diámetro inicial), hasta los 41 mm y debido a su válvula de no retorno, el agua que se mantiene en el interior ejerce presión constante en todo momento, en forma radial a lo largo de la longitud del taladro.

Alcances:

- Con solo 1 pie inflado correctamente = 10 ton/perno. mínimo de soporte.
- Sostenimiento inmediato.
- No necesita ningún tipo de aditivo, cemento, resina; se inyecta solamente agua.

2.11. Tipos de sostenimientos pasivos**2.11.1. Sostenimiento con madera**

Según la revista (Sostenimiento en Minería subterránea, 2013), “El sostenimiento con madera tiene por objetivo mantener abiertas las labores mineras durante la explotación, compensando el equilibrio inestable de las masas de roca que soporta, la estructura debe ser colocada lo más cerca posible al frente para permitir solo el mínimo reajuste de terreno antes de dicha colocación. Ella debe ser rígida para que el reajuste que se produce después de la colocación sea reducido al mínimo. La estructura debe estar constituida por pieza fácil de construcción, manipuleo e instalación. Las partes de la estructura que han de recibir las presiones o choques más fuertes deben tener tales características y ubicación que trabajen con el menor efecto sobre la estructura principal misma”.

“Ellas deben interferir lo menos posible a la ventilación y no estar sujetos a riesgos de incendio. Su costo debe de ser tan bajo como lo permita su buen rendimiento. La duración de la madera en la mina es muy variable, pues depende de las condiciones en que trabaje, por ejemplo: la madera seca dura más. La madera descortezada dura más que aquella que conserve la corteza”.

2.11.2. Sostenimiento con cimbras metálicas

Según la revista (Sostenimiento y revestimiento en túneles, 2014), “Este típico sostenimiento pasivo es utilizado generalmente para el sostenimiento permanente de labores de avance, en condiciones de masa rocosa intensamente fracturada y/o muy débil, que le confieren calidad mala a muy mala, sometida a condiciones de altos esfuerzos. Para lograr un control efectivo de la estabilidad en tales condiciones de terreno, las

cimbras son utilizadas debido a su excelente resistencia mecánica y sus propiedades de deformación, lo cual contrarresta el cierre de la excavación y evita su ruptura prematura. La ventaja es que este sistema continúa proporcionando soporte después que hayan ocurrido deformaciones importantes. Las cimbras son construidas con perfiles de acero, según los requerimientos de la forma de la sección de la excavación, es decir, en forma de baúl, herradura o incluso circulares, siendo recomendable que estos sean de alma llena. Hay dos tipos de cimbras, las denominadas “rígidas” y las “deslizantes o fluyentes”. Las primeras usan comúnmente perfiles como la W, H, e I, conformadas por dos o tres segmentos que son unidos por platinas y pernos con tuerca. Las segundas usan perfiles como las V y U, conformadas usualmente por dos o tres segmentos que se deslizan entre sí, sujetados y ajustados con uniones de tornillo”.



*Figura N° 11: Sostenimiento con cimbras metálicas
Fuente: elaboración propia*

2.11.3. Sostenimiento con concreto lanzado o shotcrete

Según (Guzmán Zúñiga, 2008), “El concreto lanzado o shotcrete es un mortero o concreto transportado por algún medio ya sea vía húmeda o vía seca a través de una manguera y lanzado neumáticamente con una presión aproximada de 8 bares contra una superficie, la forma particular de aplicación del concreto permite que este se adhiera a la superficie compactándose al mismo tiempo por la fuerza del impacto; otro de las

particularidades del concreto lanzado es que el tamaño máximo del agregado es de 3/8 de pulgada”.

“Al momento del impacto una parte de este material rebota, a esto se le denomina “rebote” que no debe exceder de un 15%; este es un parámetro que corresponde a un promedio de aplicación sobre cualquier tipo de superficie horizontal o inclinada”.

a) **Shotcrete vía seca:** Según (Guzmán Zúñiga, 2008), “El concreto lanzado o *shotcrete* por el denominado vía seca data de fines de los años 50 en nuestro país, teniendo sus antecedentes en los túneles de los primeros proyectos hidroeléctricos que se ejecutaron expandiéndose luego en las actividades mineras como elemento de sostenimiento en los socavones”.

La manera como se hace shotcrete vía seca en nuestro país y a nivel mundial en la actualidad no ha variado mucho en los últimos 20 o 30 años; sin embargo, si han cambiado las exigencias de los procesos en las minas en cuanto a rapidez, nivel de resistencia estructural, mayores rendimientos para mantener la rentabilidad de la operación, protección ecológica del medio ambiente y seguridad para la persona.

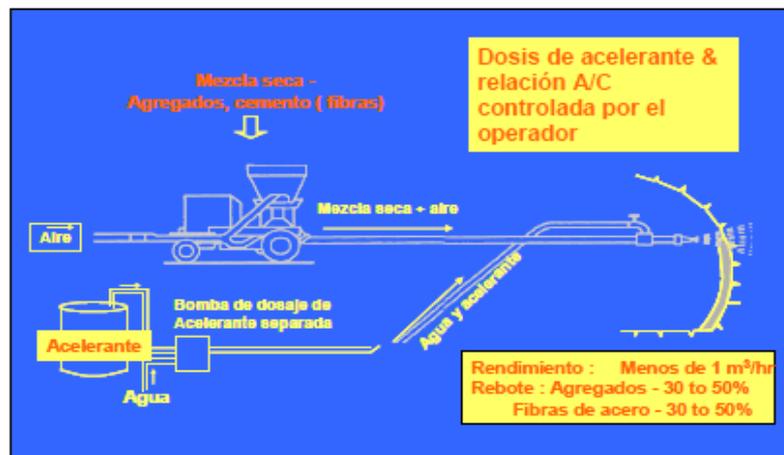


Figura N° 12: Esquema shotcrete vía seca
Fuente: (Guzmán Zúñiga, 2008)

b) Shotcrete vía húmeda: Según (Guzmán Zúñiga, 2008), “Se define al Shotcrete como un concreto lanzado y transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie. A diferencia del concreto convencional, que se coloca y luego se compacta (vibrado) en una segunda operación, el concreto lanzado se coloca y se compacta al mismo tiempo, debido a la fuerza con que se proyecta desde la boquilla”. La aplicación del shotcrete vía húmeda presenta ventajas tales como:

- El agua de mezclado se controla en la etapa inicial (de mezclado)
- Permite reducir el agua de mezclado mediante el adecuado empleo de aditivos plastificantes y súperplastificantes.
- La aplicación de aditivos de inhibición de hidratación permite regular el fraguado inicial extendiéndolo por la cantidad de horas que sea necesaria, manteniendo la mezcla fresca y con la trabajabilidad requerida.
- Permite la adición de otros componentes que ayudarán a su resistencia a la tracción como las fibras.

Normalmente produce un rebote controlado, llegando a alcanzar un 5% sin afectar la resistencia final.

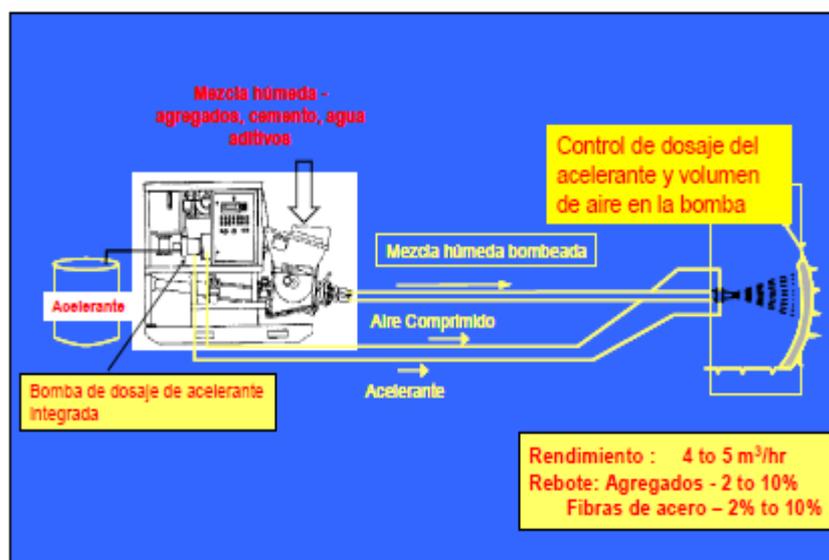


Figura N° 13: Esquema shotcrete vía húmeda
Fuente: (Guzmán Zúñiga, 2008)

2.12. Descripción del túnel Yauricocha

El túnel Yauricocha se construyó con el objetivo de ser la vía principal de extracción del mineral proveniente de la mina Central y mina Cachi Cachi.

Actualmente la extracción del mineral se realiza con locomotoras diésel por el túnel Klepekto, el cual en la actualidad viene colapsando debido a la inestabilidad de la masa rocosa.

2.12.1. Características del túnel Yauricocha

- Sección del túnel: 3.5 x 3.5 m
- Longitud del túnel: 2.7 km
- Número de cámaras de carguío y acumulación = 18 cámaras
- Número de refugios: 54 refugios

2.12.2. Condición del agua subterránea

La presencia del agua en la masa rocosa del túnel Yauricocha tiene un efecto adverso en las condiciones de estabilidad de las mismas. El principal efecto de la presencia del agua en la masa rocosa es la presión que ejerce en las discontinuidades estructurales disminuyendo la resistencia al corte y favoreciendo la inestabilidad de las labores subterráneas.

Se ha observado en los mapeos geomecánicos, que la presencia del agua corresponde a condiciones "húmedas-mojadas", lo cual se debe a que el área de evaluación se ubica cercana a estructuras principales.

Las características de presencia del agua en la presente evaluación geomecánica han sido consideradas en la valoración de la calidad de la masa rocosa.

2.12.3. Mapeo geomecánico del túnel Yauricocha

Para la caracterización de la masa rocosa, se registraron datos a partir del mapeo geotécnico de campo, que se llevó a cabo utilizando el "método directo por celdas de detalle" (línea de detalle). Mapeo por tipo de roca usando el RMR, mediante este método se realizaron mediciones sistemáticas de las discontinuidades presentes en las estaciones de medición, representada por un tramo de extensión variable de la roca expuesta en las excavaciones en interior mina. Los datos que se tomaron en campo fueron los siguientes:

Tabla N° 21: Mapeo geomecánico en la Estación de medición N° 1

Estación de medición N° 1	
Labor	Túnel de 3.5 x 3.5 m
Tipo de labor	Permanente
Fracturamiento	12 fracturas/metro
Resistencia	Se rompe con dos golpes de la picota
Espaciamiento	0.08 m
Persistencia	4 m
Condición de las juntas	Cerrada
Apertura	
Rugosidad	ligeramente rugosa
Relleno	Duro < 5mm
Intemperización	Ligeramente intemperizada
Agua subterránea	Húmedo
Ajuste por orientación	Regular -5

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 22: Mapeo geomecánico en la Estación de medición N° 2

Estación de medición N° 2	
Labor	Túnel de 3.5 x 3.5 m
Tipo de labor	Permanente
Fracturamiento	15 fracturas/metro
Resistencia	Se rompe con dos golpes de la picota
Espaciamiento	0.09 m
Persistencia	5 m
Condición de las juntas	0.8 mm
Apertura	
Rugosidad	ligeramente rugosa
Relleno	Duro < 5mm
Intemperización	Ligeramente intemperizada
Agua subterránea	Húmedo
Ajuste por orientación	Regular -5

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 23: Mapeo geomecánico en la Estación de medición N° 3

Estación de medición N° 3	
Labor	Túnel de 3.5 x 3.5 m
Tipo de labor	Permanente
Fracturamiento	20 fracturas/metro
Resistencia	Se indenta superficialmente
Espaciamiento	0.1 metros
Persistencia	6 m
Condición de las juntas	Apertura 1 mm
	Rugosidad ligeramente rugosa
	Relleno Suave < 5mm
	Intemperización Muy intemperizada
	Agua subterránea Húmedo
	Ajuste por orientación Regular -5

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 24: Mapeo geomecánico en la Estación de medición N° 4

Estación de medición N° 4	
Labor	Túnel de 3.5 x 3.5 m
Tipo de labor	Permanente
Fracturamiento	23 fracturas/metro
Resistencia	Se indenta superficialmente
Espaciamiento	0.2 metros
Persistencia	8 m
Condición de las juntas	Apertura 5 mm
	Rugosidad lisa
	Relleno Suave < 5mm
	Intemperización Muy intemperizada
	Agua subterránea Mojado
	Ajuste por orientación Regular -5

Fuente: elaboración propia

2.12.4. Cálculo de la orientación de las discontinuidades

Los diagramas muestran la presencia de cuatro principales sistemas de discontinuidades por lo general en toda el área de estudio, formados principalmente por diaclasas y fallas.

En la Estación de medición N° 1 se tienen claramente definidos tres sistemas estructurales principales y uno secundario que afectan a la zona, la primera con orientación NE-SW teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECCIÓN) de 89/162. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 69/117. Sistema principal, la tercera con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 69/2. Sistema principal, la cuarta con orientación NE- SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 42/287. Sistema secundario.

Tabla N° 25: Orientación de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 1

SET	Buzamiento	Dirección de Buzamiento
S1	89	162
S2	69	117
S3	69	2
S4	42	287

Fuente: elaboración propia

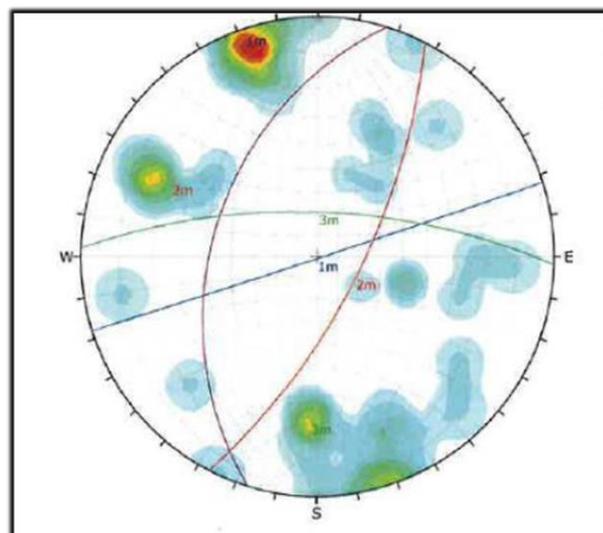


Figura N° 14: Se muestra los sets de las principales familias de discontinuidades

Fuente: elaboración propia

En la Estación de medición N° 2 se tienen claramente definidos dos sistemas estructurales principales y tres secundarios que afectan a la zona, la primera con orientación NW-SE teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECCIÓN) de 69/220. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 72/184. Sistema principal, la tercera con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 76/279. Sistema secundario, la cuarta con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 75/55. Sistema secundario, la quinta con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN DE 70/34. Sistema secundario.

Tabla N° 26: Buzamiento y dirección de Buzamiento de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 2

SET	Buzamiento	Dirección de Buzamiento
S1	69	220
S2	72	184
S3	76	279
S4	73	55
S5	70	34

Fuente: elaboración propia

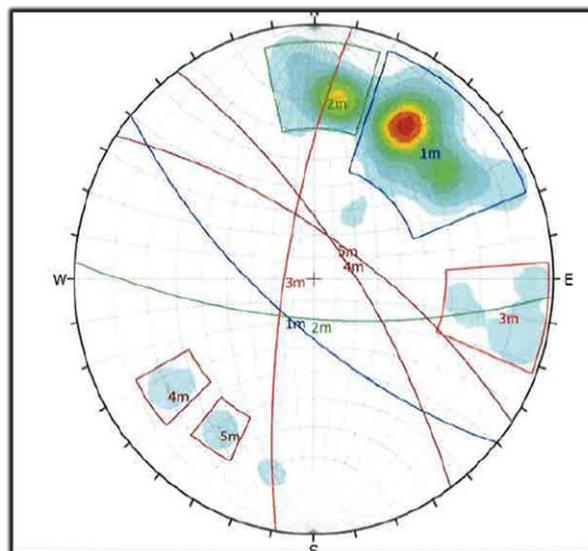


Figura N° 15: Se muestran los sets de las principales familias de discontinuidades
Fuente: elaboración propia

En la Estación de medición N° 3 se tienen claramente definidos dos sistemas estructurales principales y dos secundarios que afectan a la zona, la primera con orientación NW-SE teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECCIÓN) de 76/186. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 77/20. Sistema principal, la tercera con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 60/8. Sistema secundario, la cuarta con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 60/163

Tabla N° 27: Buzamiento y dirección de Buzamiento de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 3

SET	Buzamiento	Dirección de Buzamiento
S1	76	186
S2	77	20
S3	60	8
S4	60	163

Fuente: elaboración propia

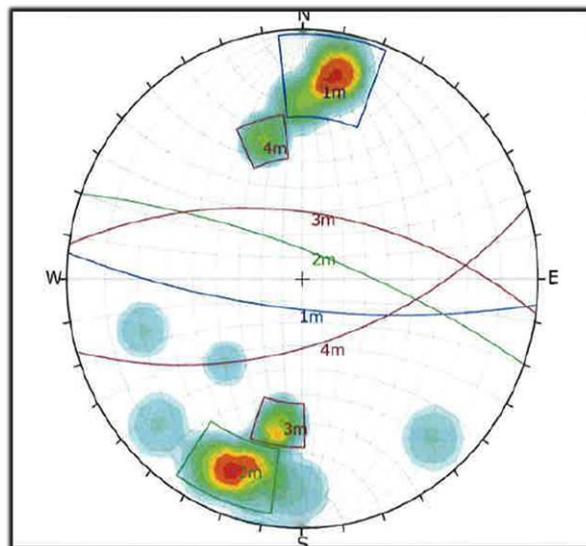


Figura N° 16: Se muestran los sets de las principales familias de discontinuidades
Fuente: elaboración propia

En la Estación de medición N° 4 se tienen claramente definidos dos sistemas estructurales principales y tres secundarios que afectan a la zona, la primera con orientación NW-SE teniendo como buzamiento y dirección de buzamiento (DIP/DIP DIRECCIÓN) de 68/234. Este es un sistema principal, la segunda con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 71/45. Sistema principal, la tercera con orientación NW-SE con DIP/DIP DIRECCIÓN de 68/121. Sistema secundario, la cuarta con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 80/279, la quinta con orientación NE-SW con DIP/DIP DIRECCIÓN de 72/151.

Tabla N° 28: Buzamiento y dirección de Buzamiento de las discontinuidades presentes en la Estación de medición N° 4

SET	Buzamiento	Dirección de Buzamiento
S1	68	234
S2	71	45
S3	68	121
S4	80	279
S5	72	151

Fuente: elaboración propia

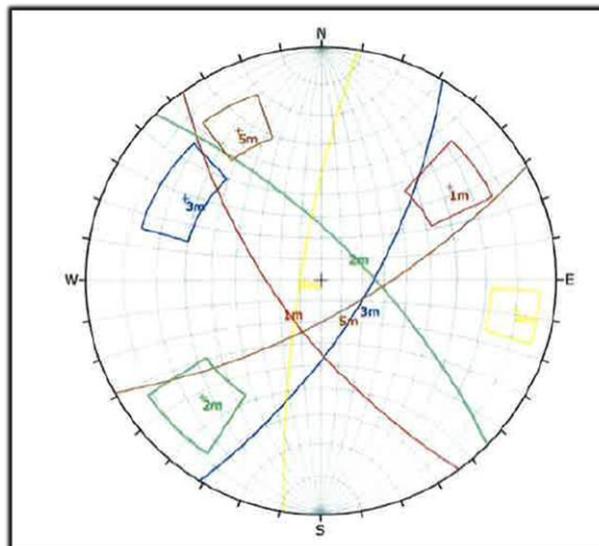


Figura N° 17: Se muestra los sets de las principales familias de discontinuidades
Fuente: elaboración propia

2.12.5. Cálculo del RQD por estaciones de medición

a) Estación de medición N° 1

En la estación de medición N° 1 tenemos 12 fracturas por metro, por lo que basándonos en la teoría de Palmstrom, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de longitud. (9)

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de fracturas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 (12)$$

$$\text{RQD} = 115 - 39.6$$

$$\text{RQD} = 75 \%$$

b) Estación de medición N° 2

En la Estación de medición N° 2 tenemos 15 fracturas por metro, por lo que basándonos en la teoría de Palmstrom, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de longitud. (9)

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de fracturas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 (15)$$

$$\text{RQD} = 115 - 49.5$$

$$\text{RQD} = 65\%$$

c) Estación de medición N° 3

En la Estación de medición N° 3 tenemos 20 fracturas por metro, por lo que basándonos en la teoría de Palmstrom, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de longitud. (9)

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de fracturas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 (20)$$

$$\text{RQD} = 115 - 66$$

$$\text{RQD} = 49 \%$$

d) Estación de medición N° 4

En la Estación de medición N° 4 tenemos 23 fracturas por metro, por lo que basándonos en la teoría de Palmstrom, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de longitud. (9)

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de discontinuidades por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, conocido como el conteo volumétrico de discontinuidades.

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 (23)$$

$$\text{RQD} = 115 - 75.9$$

$$\text{RQD} = 39\%$$

2.13. Cálculo del RMR (*Rock Mass Rating*) según la Clasificación Geomecánica de Bieniaswski (1989)

Tabla N° 29: Cálculo del RMR para la Estación de medición N° 1

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
CLASIFICACION DE BIENIASWSKI (1989)									
PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						VALORACIÓN	
		VALOR ESTIMADO							
R. COMPRE. UNIAXIAL (Mpa)		>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	10		
RQD %		90-100 (20)	75-90 (15)	50-75 (11)	25-50 (8)	<25 (3)	11		
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (6)	< 0.06 (5)	6		
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	2		
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (2)	> 5 mm (0)	6		
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	3		
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4		
	INTEMPERIZACIÓN.	Sana (6)	Lig. Intempe. (5)	Mod. Intempe. (3)	Muy Intempe. (2)	Descompuesta (0)	5		
AGUA SUBTERRÁNEA		Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	10		
AJUSTE POR ORIENTACIÓN		Muy Favorable (0)	Favorable (-2)	Regular (-5)	Desfavorable (-10)	Muy Desfavorable (-12)	-5		
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 6) =							52		
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	III - A			
DESCRIPCIÓN	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA				

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 30: Cálculo del RMR para la estación de Medición N° 2

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)							
CLASIFICACIÓN DE BIENIASWSKI (1989)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES						VALORACIÓN
	VALOR ESTIMADO						
R. COMPRES. UNIAxIAL (Mpa)	>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)		9
RQD %	90-100 (20)	75-90 (15)	50-75 (11)	25-50 (8)	<25 (3)		11
ESPACIAMIENTO (m)	>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (6)	< 0.06 (5)		6
CONDICIÓN DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	2
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (2)	> 5 mm (0)	4
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	3
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro > 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	INTEMPERIZACIÓN.	Sana (6)	Lig. Intempe. (5)	Mod. Intempe. (3)	Muy Intempe. (2)	Descompuesta (0)	5
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)		10
AJUSTE POR ORIENTACION	Muy Favorb. (0)	Favorable (-2)	Regular (-5)	Desfavorable (-10)	Muy Desfav (-12)		-5
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 6) =							49
CLASE DE MACIZO ROCOSO							III - B
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0		
DESCRIPCIÓN	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA		

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 31: Cálculo del RMR para la estación de Medición N° 3

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
CLASIFICACIÓN DE BIENIASWSKI (1989)									
PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						VALORACION	
		VALOR ESTIMADO							
R. COMPRE. UNIAXIAL (Mpa)		>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	7		
RQD %		90-100 (20)	75-90 (15)	50-75 (11)	25-50 (8)	<25 (3)	8		
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0.2-0.6 (10)	0.06-0.2 (6)	< 0.06 (5)	8		
CONDICION DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	2		
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (2)	> 5 mm (0)	4		
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	3		
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro> 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	1		
	INTEMPERIZACIÓN	Sana (6)	Lig. Intempe. (5)	Mod.Intempe. (3)	Muy Intempe. (2)	Descompuesta (0)	2		
AGUA SUBTERRÁNEA		Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	10		
AJUSTE POR ORIENTACIÓN		Muy Favorb. (0)	Favorable (-2)	Regular (-5)	Desfavorable (-10)	Muy Desfav (-12)	-5		
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración 1 a 6)							40		
=									
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	IV-A			
DESCRIPCIÓN	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA				

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 32: Cálculo del RMR para la estación de Medición N° 4

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)									
CLASIFICACION DE BIENIASWSKI (1989)									
PARAMETRO		RANGO DE VALORES						VALORACION	
		VALOR ESTIMADO							
R. COMPRESION UNIAxIAL (Mpa)		>250 (15)	100-250 (12)	50-100 (7)	25-50 (4)	<25(2) <5(1) <1(0)	6		
RQD %		90-100 (20)	75-90 (15)	50-75 (11)	25-50 (8)	<25 (3)	3		
ESPACIAMIENTO (m)		>2 (20)	0,6-2 (15)	0,2-0,6 (10)	0,06-0,2 (6)	< 0,06 (5)	6		
CONDICION DE JUNTAS	PERSISTENCIA	<1m long. (6)	1-3 m Long. (4)	3-10m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)	2		
	APERTURA	Cerrada (6)	<0.1mm apert. (5)	0.1-1.0mm (4)	1 - 5 mm (2)	> 5 mm (0)	2		
	RUGOSIDAD	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig.rugosa (3)	Lisa (1)	Espejo de falla (0)	1		
	RELLENO	Limpia (6)	Duro < 5mm (4)	Duro > 5mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	1		
	INTEMPERIZACION	Sana (6)	Lig. Intempe. (5)	Mod.Intempe. (3)	Muy Intempe. (2)	Descompuesta (0)	2		
AGUA SUBTERRANEA		Seco (15)	Humado (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	7		
AJUSTE POR ORIENTACION		Muy Favorb. (0)	Favorable (-2)	Regular (-5)	Desfavorable (-10)	Muy Desfav (-12)	-5		
VALOR TOTAL RMR (Suma de valoración I a 6)							25		
CLASE DE MACIZO ROCOSO									
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0				
DESCRIPCION	I MUY BUENA	II BUENA	III REGULAR	IV MALA	V MUY MALA	IV-B			

Fuente: elaboración propia

2.14. Determinación del tipo de Sostenimiento según la Cartilla Geomecánica GSI

a) Estación de medición N° 1

➤ Datos:

- **Tipo de labor:** túnel de 3.5 x3.5 m
- **Fracturamiento:** 12 fracturas por metro
- **Resistencia:** se rompe con dos golpes de la picota
- **Factores influyentes:** agua subterránea

➤ Cartilla geomecánica a usar: GSI

- **Paso 1:** moderadamente fracturada (F)
- **Paso 2:** regular (R)
- **Paso 3:** moderadamente fracturada / Regular (F/R)
- **Paso 4:** pernos helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2 m

➤ Índice Geológico de Resistencia (GSI): moderadamente fracturada / regular (F/R)

➤ Tipo de sostenimiento recomendado: pernos helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2m

El túnel Yauricocha del Nv. 720 tiene una sección de 3.5 x 3.5 m siendo una labor permanente ya que será una vía principal de extracción de mineral proveniente de la mina Central y mina Cachi Cachi.

Según la Tabla N° 21, en la Estación de medición N° 1 se tiene 12 fracturas por metro, por lo que la condición de su estructura según la cartilla geomecánica GSI es **Moderadamente Fracturada (F)**, La roca está moderadamente alterada, tiene presencia de discontinuidades lisas, haciendo la prueba de resistencia, la roca se rompe con dos golpes de la picota, por lo que la condición superficial del macizo rocoso es **Regular (R)**. Existe la presencia de agua como factor influyente y según la cartilla geomecánica GSI el tipo de Roca es III-A con un RMR de 52. Por lo tanto, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) para la Estación de medición N° 1 es **Moderadamente Fracturada /Regular (F/R)**. Finalmente, el tipo de sostenimiento recomendado según la cartilla geomecánica GSI es Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x1.2 m.

b) Estación de medición N° 2

➤ Datos:

- **Tipo de labor:** túnel de 3.5 x3.5 m
- **Fracturamiento:** 15 fracturas por metro
- **Resistencia:** se rompe con dos golpes de la picota
- **Factores influyentes:** agua subterránea

➤ Cartilla geomecánica a usar: GSI

- **Paso 1:** muy fracturada (MF)
- **Paso 2:** regular (R)
- **Paso 3:** muy fracturada / regular (MF/R)
- **Paso 4:** pernos helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2 m + malla electrosoldada

➤ Índice Geológico de Resistencia (GSI): muy fracturada /regular (MF/R)

➤ Tipo de sostenimiento recomendado: Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2m + Malla electrosoldada

El túnel Yauricocha del Nv. 720 tiene una sección de 3.5 x 3.5 m siendo una labor permanente ya que será una vía principal de extracción de mineral proveniente de la mina Central y mina Cachi Cachi.

Según la Tabla N° 22, en la Estación de medición N° 2 se tiene 15 fracturas por metro, por lo que la condición de su estructura según la cartilla geomecánica GSI es **Muy Fracturada (MF)**, la roca está moderadamente alterada, tiene presencia de discontinuidades ligeramente abiertas, haciendo la prueba de resistencia la roca se rompe con dos golpes de la picota, por lo que la condición superficial del macizo rocoso es **Regular (R)**.

Existe la presencia de agua como factor influyente y según la cartilla geomecánica GSI el tipo de Roca es III-B con un RMR de 49. Por lo tanto, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) para la Estación de medición N° 2 es **Muy Fracturada /Regular (MF/R)**. Finalmente, el tipo de sostenimiento recomendado según la cartilla geomecánica GSI es Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x1.2 m + Malla electrosoldada.

c) Estación de medición N° 3

➤ Datos:

- **Tipo de labor:** túnel de 3.5 x3.5 m
- **Fracturamiento:** 20 fracturas por metro
- **Resistencia:** se indenta superficialmente
- **Factores influyentes:** agua subterránea

➤ Cartilla geomecánica a usar: GSI

- **Paso 1:** muy fracturada (MF)
- **Paso 2:** pobre (P)
- **Paso 3:** muy fracturada / Pobre (MF/P)
- **Paso 4:** pernos helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2 m + shotcrete de 2" pulgadas

➤ Índice Geológico de Resistencia (GSI): muy fracturada / pobre (MF/P)

➤ Tipo de sostenimiento recomendado: pernos helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2m + shotcrete de 2" pulgadas

El túnel Yauricocha del Nv. 720 tiene una sección de 3.5 x 3.5 m siendo una labor permanente ya que será una vía principal de extracción de mineral proveniente de la mina Central y mina Cachi Cachi.

Según la Tabla N° 23, en la Estación de medición N° 3 se tiene 20 fracturas por metro, por lo que la condición de su estructura según la cartilla geomecánica GSI es **Muy Fracturada (MF)**, la roca está muy alterada, tiene presencia de discontinuidades ligeramente abiertas con fragmentos de roca panizo, haciendo la prueba de resistencia la roca se indenta superficialmente, por lo que la condición superficial del macizo rocoso es **Pobre (P)**.

Existe la presencia de agua como factor influyente y según la cartilla geomecánica GSI el tipo de Roca es IV-A con un RMR de 40. Por lo tanto, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) para la Estación de medición N° 3 es **Muy Fracturada /Pobre (MF/P)**. Finalmente, el tipo de sostenimiento recomendado según la cartilla geomecánica GSI es Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x1.2 m + Shotcrete de 2" pulgadas.

d) Estación de medición N° 4

➤ Datos:

- **Tipo de labor:** túnel de 3.5 x3.5 m
- **Fracturamiento:** 23 fracturas por metro
- **Resistencia:** se indenta superficialmente
- **Factores influyentes:** agua subterránea

➤ Cartilla geomecánica a usar: GSI

- **Paso 1:** intensamente fracturada (IF)
- **Paso 2:** pobre (P)
- **Paso 3:** intensamente fracturada / pobre (IF/P)
- **Paso 4:** cimbras metálicas tipo H6

➤ Índice Geológico de Resistencia (GSI): intensamente fracturada / pobre (IF/P)

➤ Tipo de sostenimiento recomendado: cimbras metálicas tipo H6

El túnel Yauricocha del Nv. 720 tiene una sección de 3.5 x 3.5 m siendo una labor permanente ya que será una vía principal de extracción de mineral proveniente de la mina Central y mina Cachi Cachi.

Según la Tabla N° 24, en la Estación de medición N°4 se tiene 23 fracturas por metro, por lo que la condición de su estructura según la cartilla geomecánica GSI es **Intensamente Fracturada (IF)**, la roca está muy alterada con presencia de fragmentos de roca panizo, haciendo la prueba de resistencia la roca se indenta superficialmente, por lo que la condición superficial del macizo rocoso es **Pobre (P)**.

Existe la presencia de agua como factor influyente y según la cartilla geomecánica GSI el tipo de Roca es IV-B con un RMR de 25. Por lo tanto, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) para la Estación de medición N° 4 es **Intensamente Fracturada /Pobre (IF/P)**. Finalmente, el tipo de sostenimiento recomendado según la cartilla geomecánica GSI es Cimbras Metálicas tipo H6.

2.16. Determinación del tipo de Sostenimiento según la Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989)

La clasificación geomecánica más usada es la de Bieniawski (1989), que proporciona unas recomendaciones de sostenimiento en función al índice RMR (*Rock Mass Rating*).

a) Estación de medición N° 1

En la Estación de medición N° 1 se tiene un RMR de 52 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **III - Media** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un Espesor de 3 cm.

b) Estación de medición N° 2

En la Estación de medición N° 2 se tiene un RMR de 49 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **III - Media** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 3 cm.

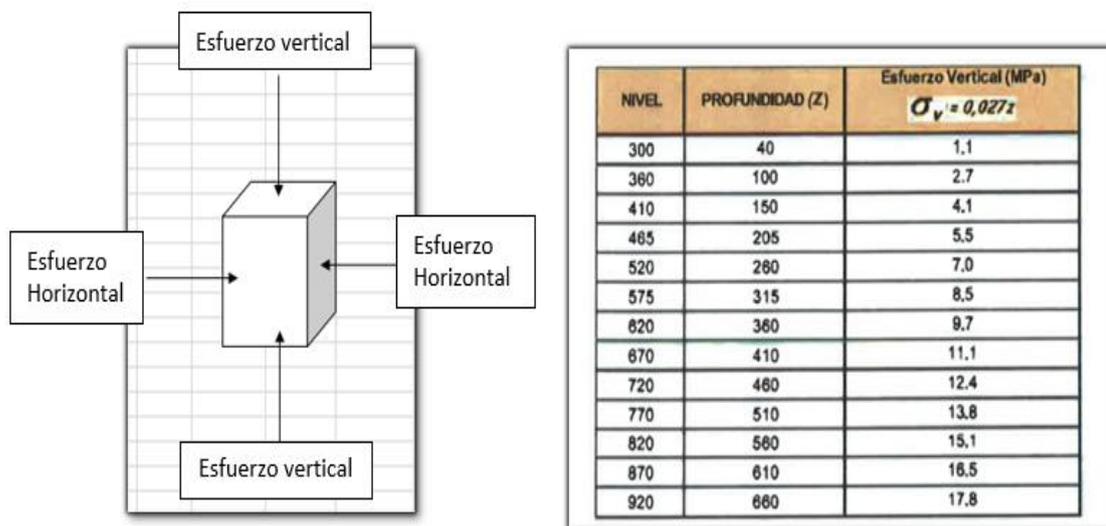
c) Estación de medición N° 3

En la Estación de medición N° 3 se tiene un RMR de 40 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **IV - Mala** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciamiento de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m.

d) Estación de medición N° 4

En la Estación de medición N° 4 se tiene un RMR de 25 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **IV-Mala** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciamiento de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m.

2.17. Cálculo de esfuerzos presentes en el macizo rocoso



El túnel Yauricocha está ubicado en el Nivel 720, tiene una profundidad de 460 metros. El esfuerzo vertical presente en el macizo rocoso es de 12.4 Mpa.

PROFUNDIDAD (Z)	VALOR MEDIO DE LA RAZÓN DE ESFUERZOS (K)	ESFUERZO HORIZONTAL (MPa) σ_h
40	2,8	3,1
100	1,3	3,5
150	1,0	3,9
205	0,8	4,4
260	0,7	4,8
315	0,6	5,3
360	0,6	5,6
410	0,5	6,0
460	0,5	6,4
510	0,5	6,8
560	0,5	7,2
610	0,5	7,8
660	0,5	8,0

Hallando la razón entre esfuerzos (k):

$$K = 0.3 + 100/z$$

$$K = 0.3 + 100/460$$

$$K = 0.5$$

Por lo tanto, el esfuerzo horizontal presente en el macizo rocoso es de 6.4 Mpa.

2.18. Cálculo del Factor de Seguridad

Con el fin de corroborar el soporte de diseño según el tipo III-A y III-B y el tipo IV-A y IV-B, así asegurar la estabilidad de la labor del túnel Yauricocha se realizó el siguiente análisis estructural de cuñas con el software Unwedge:

a) Estación de medición N° 1

Los parámetros utilizados para calcular el factor de seguridad fueron:

- Volumen de la cuña: 493.852 m³
- Peso de la cuña: 1091.037 ton
- Longitud del túnel 2780 m
- Orientación de las discontinuidades
 - Buzamiento
 - Dirección de Buzamiento
- Capacidad de sostenimiento
- Factores influyentes: agua subterránea
- Peso específico de la roca: 2.7 ton/m³
- Peso específico del agua: 0.981 ton/m³

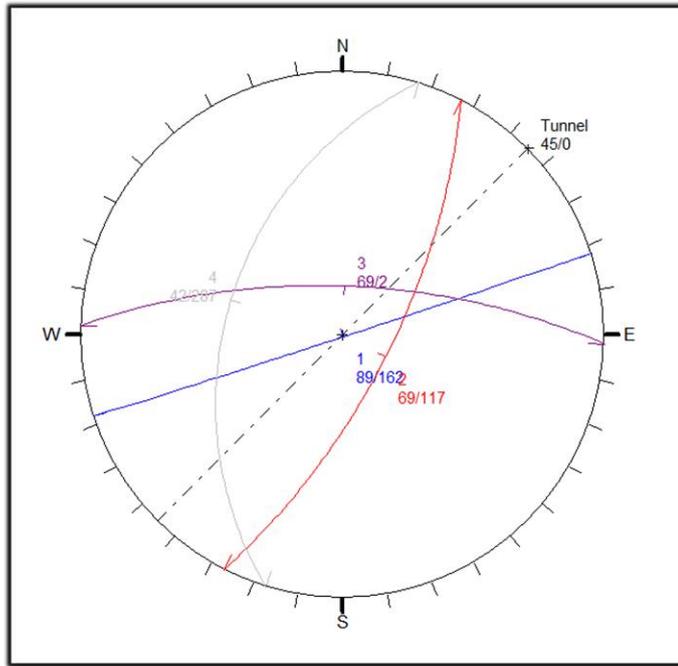


Figura N° 18: Distribución de discontinuidades en la Estación de medición N° 1
Fuente: elaboración propia

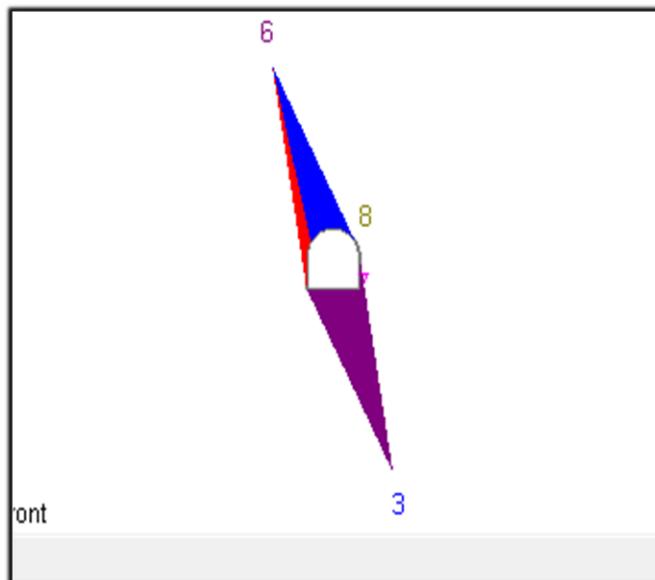


Figura N° 19: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento con factor de seguridad de 0.00
Fuente: elaboración propia

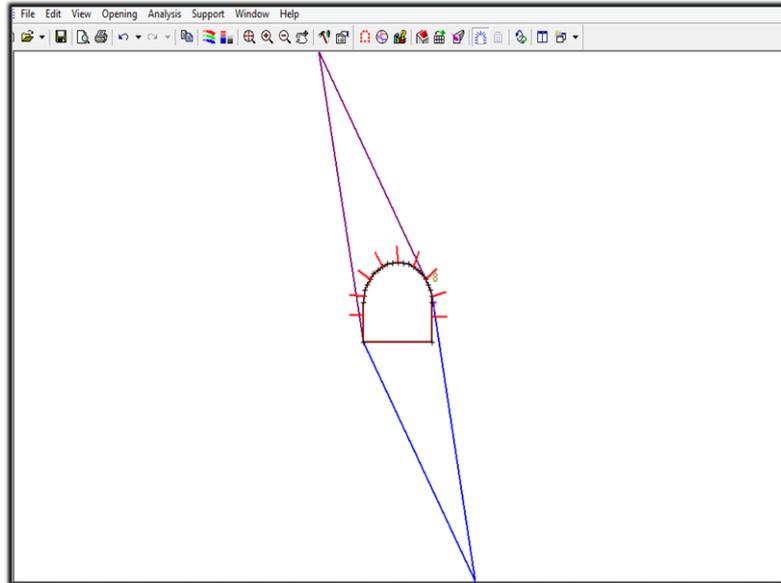


Figura N° 20: Formación de cuña en el techo con sostenimiento de Pernos Helicoidales de 7 pies con factor de seguridad de 7.75
Fuente: elaboración propia

b) Estación de medición N° 2

Los parámetros utilizados para calcular el factor de seguridad fueron:

- Volumen de la cuña: 1007.01 m³
- Peso de la cuña: 2718.93 ton
- Longitud del túnel: 2780 m
- Orientación de las discontinuidades
 - Buzamiento
 - Dirección de Buzamiento
- Capacidad de sostenimiento
- Factores influyentes: agua subterránea
- Peso específico de la roca: 2.7 ton/m³
- Peso específico del agua: 0.981 ton/m³

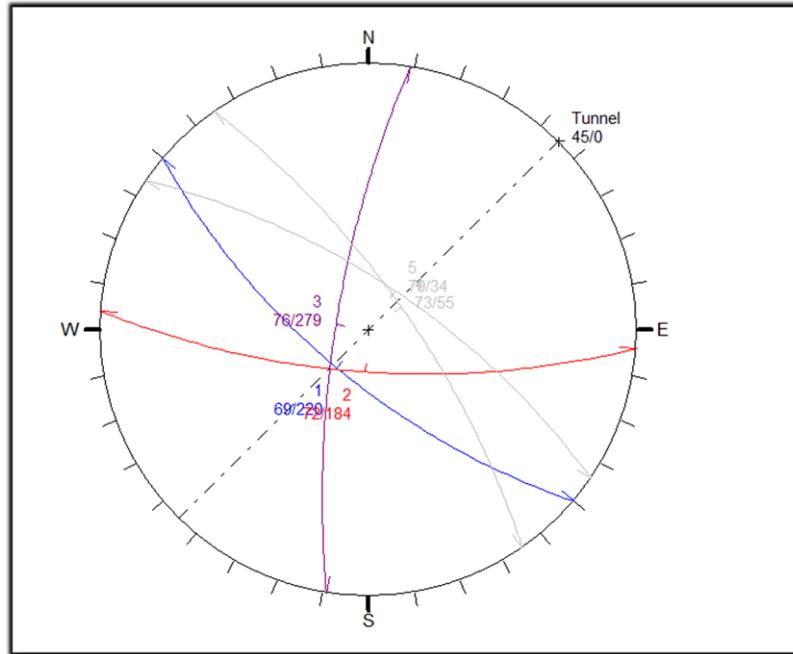


Figura N° 21: Distribución de discontinuidades en la Estación de medición N° 2
Fuente: elaboración propia

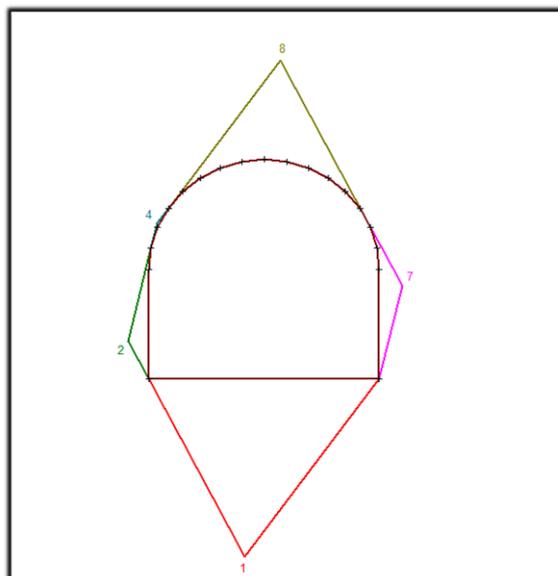


Figura N° 22: Formación de cuña en el techo sin sostenimiento con factor de seguridad de 0.00
Fuente: elaboración propia

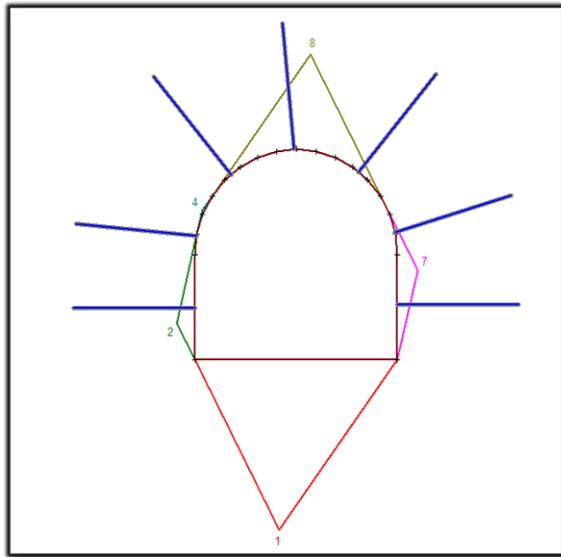


Figura N° 23: Formación de cuña en el techo con sostenimiento de Pernos Helicoidales de 7 pies con factor de seguridad de 4.019
Fuente: elaboración propia

c) Estación de medición N° 3

Los parámetros utilizados para calcular el factor de seguridad fueron:

- Volumen de la cuña: 17.4996 m³
- Peso de la cuña: 47.249 ton
- Longitud del túnel: 2780 m
- Orientación de las discontinuidades
 - Buzamiento
 - Dirección de Buzamiento
- Capacidad de sostenimiento
- Factores influyentes: agua subterránea
- Peso específico de la roca: 2.7 ton/m³
- Peso específico del agua: 0.981 ton/m³

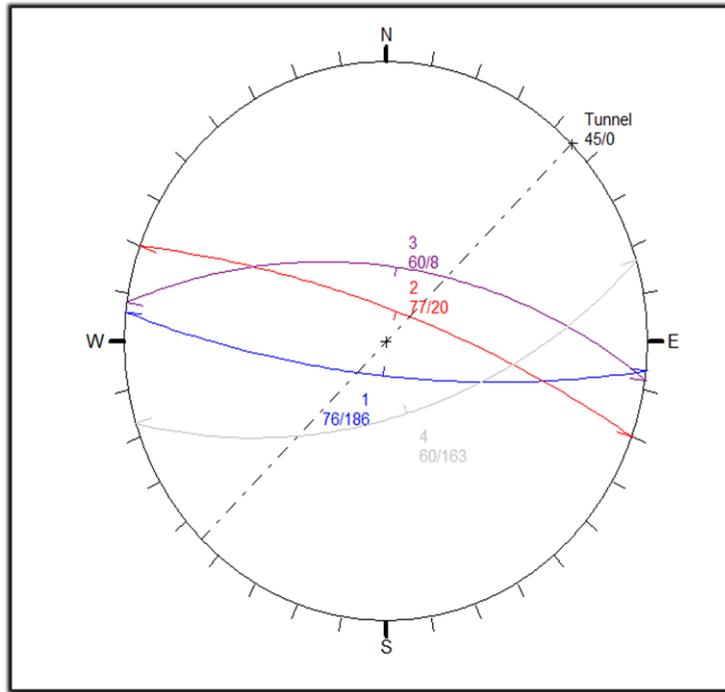


Figura N° 24: Distribución de discontinuidades en la Estación de medición N° 3
Fuente: elaboración propia

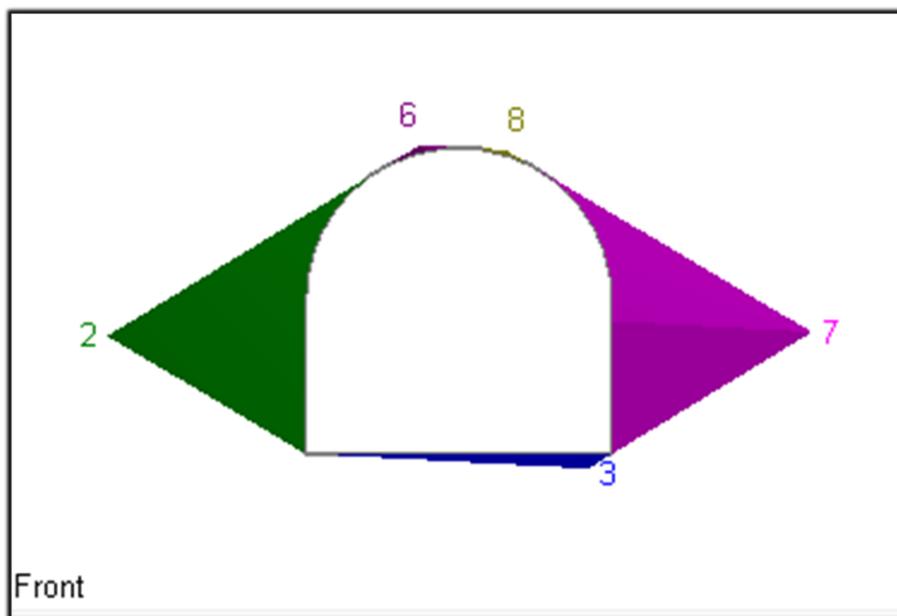


Figura N° 25: Formación de cuña en el techo y hastiales sin sostenimiento con factor de seguridad de 0.00
Fuente: elaboración propia

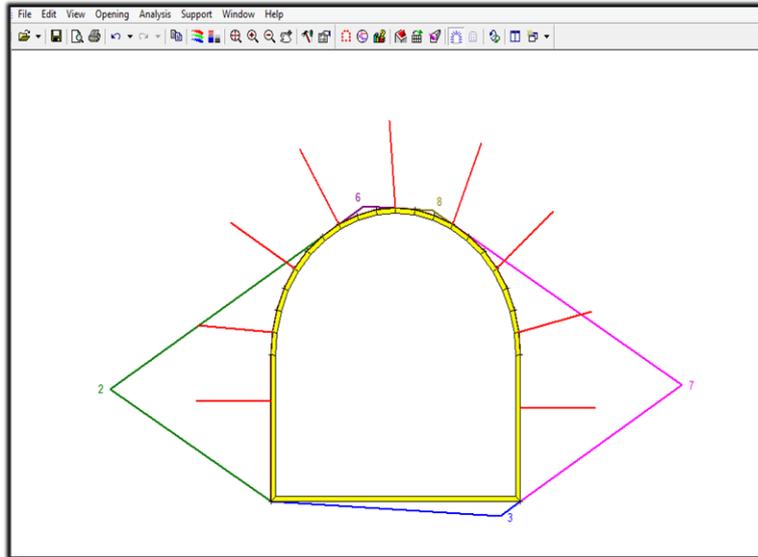


Figura N° 26: Formación de cuña en el techo y hastiales con sostenimiento de Pernos Helicoidales de 7 pies y Shotcrete con factor de seguridad de 2.799
Fuente: elaboración propia

d) Estación de medición N° 4

Los parámetros utilizados para calcular el factor de seguridad fueron:

- Volumen de la cuña: 36.185 m³
- Peso de la cuña: 97.6995 ton
- Longitud del túnel: 2780 m
- Orientación de las discontinuidades
 - Buzamiento
 - Dirección de Buzamiento
- Capacidad de sostenimiento
- Factores influyentes: agua subterránea
- Peso específico de la roca: 2.7 ton/m³
- Peso específico del agua: 0.981 ton/m³

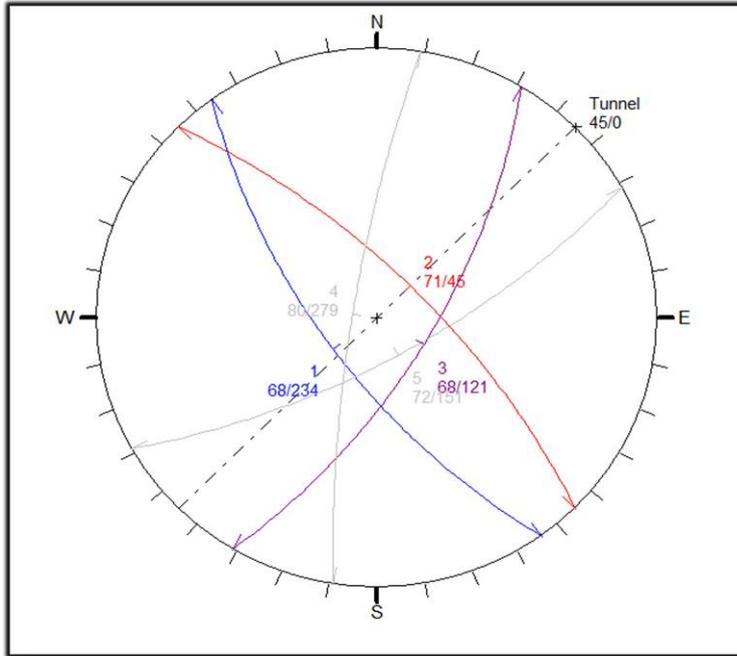


Figura N° 27: Distribución de discontinuidades en la Estación de medición N° 4
Fuente: elaboración propia

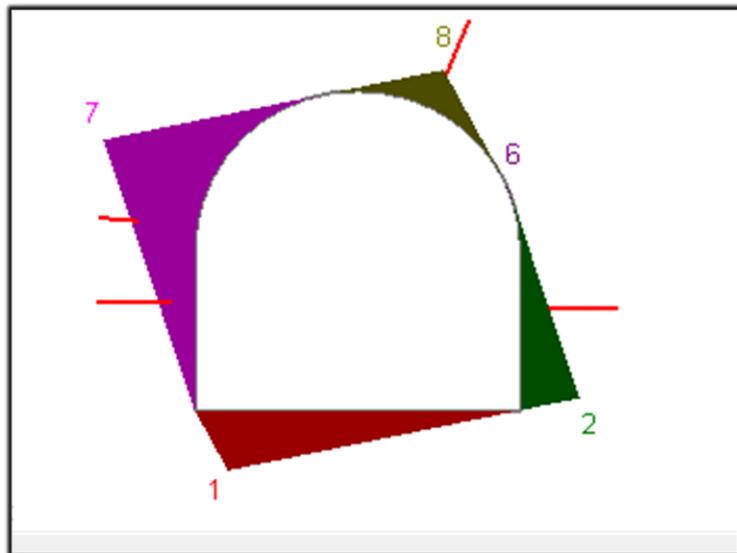


Figura N° 28: Formación de cuña en el techo y hastiales sin sostenimiento con factor de seguridad de 0.00
Fuente: elaboración propia

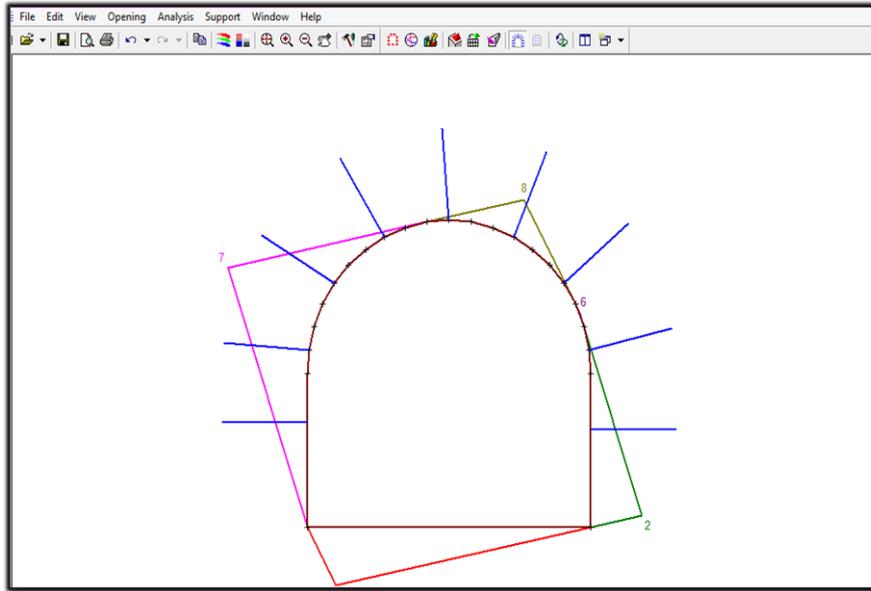


Figura N° 29: Formación de cuña en el techo y hastiales con sostenimiento de cimbras con factor de seguridad de 7.9
Fuente: elaboración propia

El objetivo de este análisis es verificar que el soporte que ofrece el sostenimiento recomendado según la Tabla geomecánica GSI cumpla con estabilizar la labor, para cumplir con este objetivo el Factor de Seguridad debe ser mayor de 1.5 que es el Factor de Seguridad mínimo que se requiere para brindar condiciones de trabajo seguro.

2.19. Determinación de Cargas Según Terzagui (1946) y Protodiakonov

La metodología utilizada para el cálculo y soporte con cimbras, cálculo de la presión vertical del terreno fue el de (Terzaghi, 1946), y para el cálculo de las presiones laterales fue de (Protodiakonov, 1943), las cuales nos dieron los siguientes resultados:

Tabla N° 33: Determinación de las cargas según Terzaghi

ESTACIÓN	RMR	ANCHO (m)	ALTURA (m)	PRESIÓN VERTICAL (Ton)	PRESIÓN HORIZONTAL (Ton)	PRESIÓN TOTAL (Ton)
	<20	4	4	23.14	6.94	30.09
1	21-30	4	4	23.14	6.94	30.09
	31-40	4	4	7.39	2.22	9.61

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

Tabla N° 34: Determinación de las cargas según Protodiakonov

ESTACIÓN	RMR	R.C.U (Mpa)	ANCHO (m)	ALTURA (m)	ESPACIAMIENTO CIMBRA (m)	PRESIÓN VERTICAL (Ton)
1	<20	15	4	4	1.00	37.40
	21-30	25	4	4	1.00	22.44
	31-40	50	4	4	1.20	13.52

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

Tabla N° 35: Cálculo del factor de seguridad

Elemento	Resistencia	Tipo Cimbra H6 - 25 Lb/pie
CIMBRA	Carga máxima que soporta la cimbra	57.57 Ton

ESTACIÓN	RMR	Carga Total según		FACTOR DE SEGURIDAD (F.S)	
		PROTODIAKONOV (Ton)	TERZAGHI (Ton)	PROTODIAKONOV (Ton)	TERZAGHI (Ton)
1	<20	37.4	30.90	1.5	1.9
	21-30	22.4	30.09	2.6	1.9
	31-40	13.52	9.61	4.3	6.0

Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

2.20. Cálculo de Costos Unitarios de Sostenimiento

Tabla N° 36: Resumen de Costos Unitarios de Sostenimiento

COSTOS UNITARIOS DE SOSTENIMIENTO		
TIPO DE SOSTENIMIENTO	COSTO TOTAL (\$)	UNIDAD
Instalación de Perno Split Set 7'	18.43	Perno
Instalación de Perno Helicoidal 7'	18.62	Perno
Lanzado de Shotcrete 2"	31.14	m ²
Instalación de Malla electrosoldada	13.97	m ²
Instalación de Cimbras Metálicas	360.88	unidad

Fuente: Departamento de Costos de la mina Yauricocha

2.18.1 Cálculo de Costos de Sostenimiento por Estaciones

- a) Según la Cartilla Geomecánica GSI (Índice Geológico de Resistencia), Hoek y Brown, (1995), recomiendan usar en la Estación de Medición N° 1 el *sostenimiento con Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x1.2 m* en función al tipo de labor, tipo de roca, sección de labor y factores influyentes.

Tabla N° 37: Costo de sostenimiento con Pernos Helicoidales de 7' pies

Estación de Medición	Datos	unidad
N° 1	Pernos Helicoidal de 7'	
	Sostenimiento Recomendado	pies
	Espaciamiento	1.2 x 1.2 metros
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5 metros
	Longitud de Arco	7.642 metros
	Distancia a sostener	200 metros
	Precio unitario por Perno helicoidal	18.62 Dólares (\$)
Estación de Medición	Cálculo de sostenimiento con Perno Helicoidal de 7'	
N° 1	N° de pernos por fila	7.642/1.20 6
	Total de filas en la Progresiva 1150 - 1350	167
	N° de pernos en 200 m	200/1.20 167*6 1002
		18,657
	Costo total de Sostenimiento	1002*18.62 Dólares

Fuente: elaboración propia

- b) Según la Cartilla Geomecánica GSI (Índice Geológico de Resistencia), Hoek y Brown, (1995), recomiendan usar en la Estación de Medición N° 2 el *sostenimiento con Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2 m + malla electrosoldada* en función al tipo de labor, tipo de roca, sección de labor y factores influyentes.

Tabla N° 38: Costo de sostenimiento de Pernos Helicoidales + Malla electrosoldada

Estación de Medición	Datos		Unidad
N° 2	Sostenimiento Recomendado	Malla electrosoldada	m2
	Ancho de malla	1.20	metros
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5	metros
	Longitud de Arco	6.64	metros
	Distancia a sostener	150	metros
	Precio unitario de malla electrosoldada	13.97	Dólares (\$)

Estación de Medición	Cálculo de sostenimiento de Malla electrosoldada		
N° 2	Área de malla a sostener	6.64*1.20	7.968 m ²
	Área bruta a sostener	150*6.64	996 m ²
	N° de mallas a emplear	996/7.968	125 mallas
	N° de traslapes	125-1	124 traslapes
	Área de traslape	0.20 * 6.64	1.328 m ²
	Área total de traslape	1.328*124	165 m ²
	Área neta a sostener	996-165	831 m ²
			11,609
	Costo total de Sostenimiento	831 * 13.97	Dólares

Estación de Medición	Datos		Unidad
N° 2	Sostenimiento Recomendado	Perno Helicoidal de 7'	m ² / pies
	Espaciamiento	1.2 x 1.2	metros
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5	metros
	Longitud de arco	7.642	metros
	Distancia a sostener	150	metros
	Precio unitario de perno helicoidal	18.62	Dólares (\$)

Estación de Medición	Cálculo de Sostenimiento con Perno Helicoidal de 7'		
N° 2	N° de pernos por fila	7.642/1.20	6
	Total de filas en la progresiva 1150 - 1350	150/1.20	125
	N° de pernos en 150 m	125*6	750
			13,965
	Costo total de Sostenimiento	750*18.62	Dólares

Costo total de Sostenimiento de Perno Helicoidal de 7' pies + Malla Electrosoldada	25,574 Dólares
--	---------------------------------

Fuente: elaboración propia

- c) Según la Cartilla Geomecánica GSI (Índice Geológico de Resistencia), Hoek y Brown, (1995), recomiendan usar en la Estación de Medición N° 3 el *sostenimiento con Pernos Helicoidales de 7' pies espaciados de 1.2 x 1.2 m + Shotcrete de 2"* en función al tipo de labor, tipo de roca, sección de labor y factores influyentes.

Tabla N° 39: Costo de sostenimiento de Pernos Helicoidales + Shotcrete

Estación de Medición	Datos	Unidad	
N° 3	Sostenimiento Recomendado	Pernos Helicoidal de 7'	pies
	Espaciamiento	1.2 x 1.2	metros
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5 m	metros
	Longitud de arco	7.642	metros
	Distancia a sostener	200	metros
	Precio unitario de perno helicoidal	18.62	Dólares (\$)

Estación de Medición	Cálculo de sostenimiento con Perno Helicoidal de 7'		
N° 3	N° de pernos por fila	7.642/1.20	6
	Total de filas en la progresiva 1150 - 1350	200/1.20	167
	N° de pernos en 200 m	167*6	1002
	Costo total de Sostenimiento	1002*18.62	18,657 Dólares

Estación de Medición	Datos	Unidad	
N° 3	Sostenimiento Recomendado	Shotcrete de 2"	pulgadas
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5m	metros
	Longitud de la corona	8.24	metros
	Distancia a sostener	200	metros
	Precio unitario de Shotcrete	31.14	Dólares (\$)

Estación de Medición	Calculo de Sostenimiento con Shotcrete de 2"		
N° 3	m ² a sostener	200*8.24	1,648
	Costo total de Sostenimiento	1648 * 31.14	51,319 Dólares

Costo total de Sostenimiento de Perno Helicoidal + Shotcrete	69,976 Dólares
--	-----------------------

Fuente: elaboración propia

d) Según la Cartilla Geomecánica GSI (Índice Geológico de Resistencia), Hoek y Brown, (1995), recomiendan usar en la Estación de Medición N° 4 el *sostenimiento con Cimbras Metálicas tipo H6* en función al tipo de labor, tipo de roca, sección de labor y factores influyentes.

Tabla N° 40: Costo de Sostenimiento con Cimbras

Estación de Medición	Datos	Unidad	
N° 4	Sostenimiento Recomendado	Cimbra	pies
	Tipo de Cimbra	H6	metros
	Sección del Túnel	3.5 x 3.5	metros
	Espaciamiento	1.2 x 1.2	metros
	Distancia a sostener	100	metros
	Precio unitario de Cimbra Metálica.	360.88	Dólares (\$)
Estación de Medición	Cálculo de Sostenimiento con Cimbras		
N° 4	N° de Cimbras	100/1.20	83 cimbras
	Costo de Sostenimiento	83*360.88	29,953 Dólares

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método de la investigación

La investigación que se desarrolla en esta tesis utiliza el método deductivo.

3.1.2 Tipo de la investigación

Es muy importante detallar que, dentro del diseño de investigación no experimental transaccional, este se divide en descriptivo y correlacional, los mismos que utilizaremos para realizar nuestra investigación.

- Descriptivo, buscamos especificar y describir las propiedades y características geomecánicas de la masa rocosa para obtener la calidad de la misma, y analizarlo de acuerdo a los diferentes parámetros establecidos por la geomecánica.
- Correlacional, se pretende medir y describir la relación entre la calidad del macizo rocoso y la estabilidad de las excavaciones, lo cual conllevará a plantear alternativas de control ante los diferentes problemas de estabilidad que se pueden producir en las labores.

3.1.3 Nivel de la investigación

El nivel de la presente investigación es “no experimental descriptivo y explicativo” por lo que nos basaremos en categorías, conceptos, variables, sucesos ya ocurridos en este caso del túnel Yauricocha, en el aspecto explicativo se basó principalmente en establecer el por qué y para qué de cada fenómeno que se presente en los diferentes contextos de la investigación.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es analítico, descriptivo y explicativo ya que el enfoque de nuestra investigación es cualitativo, el análisis de nuestro estudio será de una manera natural, describiendo las variables de investigaciones ya establecidas.

3.3 Población y muestra

3.3.1. Población

La población estará constituida por las labores de la mina Yauricocha.

3.3.2. Muestra

La muestra es el túnel Yauricocha del Nv. 720, es ahí donde se realizó toda la investigación y se extrajo todos los datos necesarios para la presente investigación.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizó la información recopilada de los estudios geomecánicos en la mina Yauricocha para contrastar la hipótesis propuesta, se realizó una investigación aplicada con el fin de evaluar las diferentes alternativas de sostenimiento para el túnel Yauricocha del Nv. 720, asimismo se revisaron las fuentes bibliográficas (libros, informes de tesis, revistas, etc.). Finalmente, se hicieron observaciones y conclusiones con fundamentos teóricos concernientes al tema de investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1. Resultados y análisis de la información

Los índices geomecánicos del túnel Yauricocha, varían según la clasificación geomecánica de Bieniawski, asimismo podemos señalar que la calidad de la masa rocosa es: Regular III-A, Regular III-B, Mala IV-A y Mala IV-B con un RMR de 52, 49, 40 y 25 respectivamente.

Para la presente Evaluación Geomecánica del túnel Yauricocha, se hizo uso del sistema de clasificación de Macizo Rocoso RMR de Bieniawski y dio como resultado el siguiente cuadro.

Tabla N° 41: Resumen del Cálculo de RMR por estaciones de medición.

PARÁMETROS		Em1	Em2	Em3	Em4	
1	Resistencia a la Compresión Uniaxial de roca intacta	10	9	7	6	
2	RQD	11	11	8	3	
3	Espaciamiento de las Discontinuidades	6	6	8	6	
4	Condición de Discontinuidades	▪ Persistencia	2	2	2	2
		▪ Apertura	6	4	4	2
		▪ Rugosidad	3	3	3	1
		▪ Relleno	4	4	1	1
		▪ Intemperismo	5	5	2	2
5	Agua Subterránea	10	10	10	7	
6	Ajuste por Orientación de Estructuras	-5	-5	-5	-5	
RMR:		52	49	40	25	
Roca Tipo:		IIIA	IIIB	IVA	IVB	

Fuente: elaboración propia

4.2 Prueba de Hipótesis

4.2.1. Validación de la Hipótesis N° 1

▪ Estación de medición N° 1

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de medición N° 1, ubicada en la Progresiva 1+150 – 1+350 del túnel Yauricocha y según la cartilla geomecánica GSI de la mina Yauricocha, el tipo de sostenimiento recomendado es Pernos Helicoidales de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la estación de Medición N° 1 se tiene un RMR de 52 y según la Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989), el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciado de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 3 cm.

▪ Estación de medición N° 2

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de medición N° 2, ubicada en la Progresiva 1+350 – 1+500 del Túnel Yauricocha y según la cartilla geomecánica GSI de la mina Yauricocha, el tipo de sostenimiento recomendado es Malla electrosoldada + Perno Helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la estación de Medición N° 2 se tiene un RMR de 49 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciado de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 3 cm.

▪ Estación de medición N° 3

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de medición N° 3, ubicada en la Progresiva 1+600 – 1+800 del Túnel Yauricocha y según la cartilla geomecánica GSI de la mina Yauricocha, el tipo de sostenimiento recomendado es Shotcrete de 2" pulgadas + Perno Helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la estación de Medición N° 3 se tiene un RMR de 40 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciamiento de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m.

▪ Estación de medición N° 4

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de medición N° 4, ubicada en la Progresiva 1+900 – 2+000 del túnel Yauricocha y según la cartilla geomecánica GSI de la mina Yauricocha el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de cimbras metálicas tipo H6.

En la estación de Medición N° 4 se tiene un RMR de 25 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciamiento de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciamiento de 1.5 x 1.5 m.

4.2.2 Validación de la Hipótesis N° 2

Se analizó el factor de seguridad con el objetivo de verificar que el sostenimiento que se determinó cumplan con estabilizar la labor, para cumplir con este objetivo el Factor de Seguridad debe ser mayor de 1.5 (**Fs > 1.5**) que es el factor mínimo de seguridad que se requiere en las labores permanentes como es el caso del túnel Yauricocha.

La primera figura representa la formación de una cuña en el techo sin sostenimiento con Factor de seguridad de 0.00, mientras que la segunda figura representa la formación de una cuña en el techo con sostenimiento de Pernos Helicoidales de 7 pies con factor de seguridad de 4.019.

Efectivamente el factor de seguridad influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha en el Nv. 720.

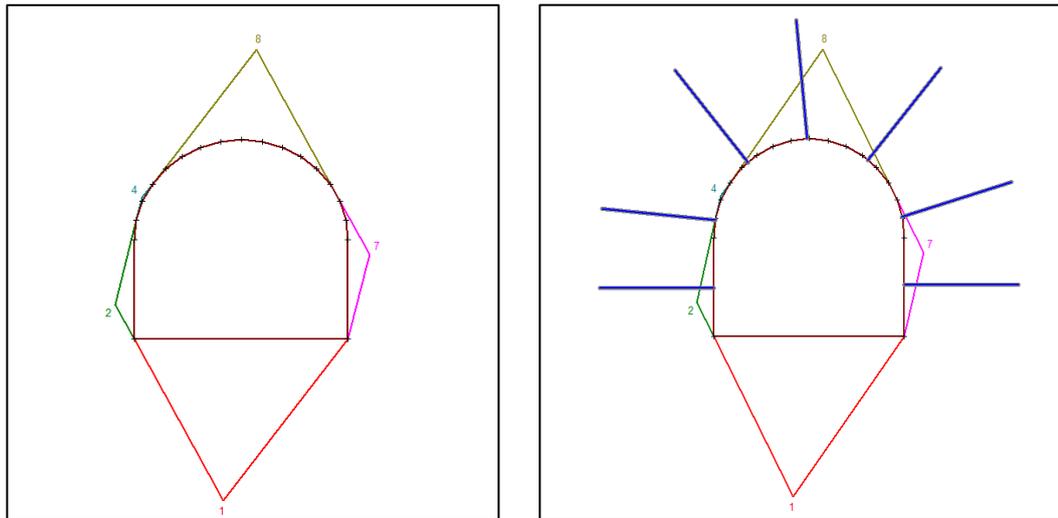


Figura N° 30: Comparación del análisis del factor de seguridad con y sin sostenimiento
Fuente: elaboración propia

4.2.3 Validación de hipótesis N° 3

La determinación de los costos unitarios de sostenimiento para el túnel Yauricocha es factible y viable, para lo cual se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla N° 42: Resumen de Costos de Sostenimiento

RESUMEN DE COSTOS DE SOSTENIMIENTO	
Estaciones de Medición	Costos de Sostenimiento
N° 1	18,657 dólares
N° 2	25,574 dólares
N° 3	69,976 dólares
N° 4	29,953 dólares

Fuente: elaboración propia

4.3 Discusión de resultados

A. Estación de Medición N° 1

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de Medición N° 1, ubicada en la Progresiva 1+150 – 1+350 del túnel Yauricocha, obteniendo como resultado un RMR de **52**, tipo de roca es **III A**, la calidad del macizo rocoso es **Regular**, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) es **Moderadamente Fracturada Regular (F/R)**. Según la cartilla geomecánica GSI el tipo de sostenimiento recomendado es Pernos Helicoidales de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la estación de Medición N° 1 se tiene un RMR de **52** y según la Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **III - Media** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciado de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 3 cm.

B. Estación de Medición N° 2

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de Medición N° 2, ubicada en la Progresiva 1+350 – 1+500 del túnel Yauricocha, obteniendo como resultado un RMR de **49**, tipo de roca es **III B** y la calidad del macizo rocoso es **Regular**, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) es **Muy fracturada Regular (MF/R)**. Según la cartilla geomecánica GSI el tipo de sostenimiento recomendado es Malla electrosoldada + Perno Helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la estación de Medición N° 2 se tiene un RMR de **49** y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **III – Media** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 metros de longitud con un espaciado de 1.5 x 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 3 cm.

C. Estación de Medición N° 3

Se hizo la evaluación geomecánica en la estación de Medición N° 3, ubicada en la Progresiva 1+600 – 1+800 del túnel Yauricocha, obteniendo como resultado un RMR de **40**, tipo de roca es **IV A** y la calidad del macizo rocoso es **Pobre**, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) es **Muy fracturada Pobre (MF/P)**, según la cartilla geomecánica GSI el tipo de sostenimiento recomendado es Shotcrete de 2” pulgadas + Perno Helicoidal de 7’ pies con un espaciado de 1.2 x 1.2m.

En la Estación de medición N° 3 se tiene un RMR de **40** y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **IV - Mala** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciado de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciado de 1.5 x 1.5 m.

D. Estación de Medición N° 4

Se hizo la evaluación geomecánica en la Estación de medición N° 4, ubicada en la Progresiva 1+900 – 2+000 del túnel Yauricocha, obteniendo como resultado un RMR de **25**, tipo de roca es **IV B** y la calidad del macizo rocoso es **Pobre**, el Índice Geológico de Resistencia (GSI) es **Intensamente Fracturada Pobre (IF/P)**, según la cartilla geomecánica GSI el tipo de sostenimiento recomendado es la instalación de cimbras metálicas de tipo H6.

En la Estación de medición N° 4 se tiene un RMR de 25 y según la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), la clase de roca es **IV-Mala** y el tipo de sostenimiento recomendado es el uso de Bulones de 4 a 5 metros de longitud con un espaciado de 1 – 1.5 m + Malla electrosoldada + Hormigón proyectado con un espesor de 10 cm, o el uso de cerchas metálicas con un espaciado de 1.5 x 1.5 m.

CONCLUSIONES

1. Se concluye que la Evaluación Geomecánica efectuada en el túnel Yauricocha del Nv. 720, de acuerdo a la Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989) y la Clasificación de Hoek y Brown (GSI) nos determinaron que el Tipo de Sostenimiento recomendado para cada estación, está en función de una evaluación geomecánica eficiente, por lo cual se determinó que en la estación de Medición N° 1 se deberá sostener con Perno Helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2 metros, en un tramo de 200 metros. En la Estación de medición N° 2 se debe sostener con Malla electrosoldada + Perno Helicoidal de 7' con un espaciado de 1.2x1.2 metros, en un tramo de 150 metros. En la Estación de medición N° 3 se debe sostener con Shotcrete de 2" pulgadas + Perno Helicoidal de 7' pies con un espaciado de 1.2 x 1.2 metros, en un tramo de 200 metros. En la Estación de medición N° 4 se deberá sostener con Cimbras metálicas tipo H6 en un tramo de 100 metros.
2. Se concluye que el factor de seguridad influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720. Asimismo, para que las labores permanezcan estables durante la vida útil del túnel Yauricocha el factor de seguridad debe ser mayor a 1.5 ($FS > 1.5$) garantizando así la estabilidad del macizo rocoso, con el objetivo de brindar condiciones de trabajo seguro.
3. Los costos unitarios de sostenimiento juegan un papel muy importante en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha, para lo cual se debe priorizar el sostenimiento recomendado por el área de geomecánica de la mina Yauricocha con el objetivo de minimizar accidentes por caída de rocas. Los costos que están inmersos en el sostenimiento son:

RESUMEN DE COSTOS DE SOSTENIMIENTO	
Estaciones de Medición	Costos de Sostenimiento
N° 1	18,657 dólares
N° 2	25,574 dólares
N° 3	69,976 dólares
N° 4	29,953 dólares

RECOMENDACIONES

Considerando que el túnel Yauricocha será una labor principal de extracción y labor permanente se recomienda lo siguiente.

1. Realizar las evaluaciones geomecánicas constantemente del macizo rocoso y sistema de sostenimiento instalado mediante pruebas de Pulsts test y cargas puntuales a los testigos de shotcrete para cumplir los estándares de la mina, implementar medidas efectivas de drenaje a fin de minimizar los efectos negativos del agua que podrían complicar más el problema de la inestabilidad de la masa rocosa. Asimismo, se recomienda utilizar el sostenimiento en función del RMR según la Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), ya que se adapta más para *labores permanentes* y va a estar en función de la vida útil de una labor, mientras que el Índice Geológico de Resistencia GSI de Hoek - Brown se utiliza más para *labores temporales* ya que toma datos geológicos en campo y estima un sostenimiento en base a descripciones geológicas.
2. Según el departamento de geomecánica de Sociedad Minera Corona S.A. es recomendable utilizar los tres tipos de sostenimiento (Shotcrete + Pernos Helicoidales + Malla electrosoldada) en un cruce de labores, ya que es ahí donde los esfuerzos tanto verticales como horizontales se incrementan generando mayor inestabilidad en la masa rocosa.
3. La mina Yauricocha es una de las minas con mayor índice de accidentabilidad del Perú, para lo cual se recomienda priorizar el sostenimiento recomendado por el Área de Geomecánica con el objetivo de minimizar todo tipo de accidentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) BLAS PLÁCIDO, C. “La geomecánica en el sostenimiento de la mina Ricotona, Apurímac”, 2016.
- 2) MENDIETA BRITTO. “Optimización de los costos operativos en la unidad Cerro Chico”, 2014.
- 3) CÓRDOVA ROJAS, David. “Geomecánica en el minado subterráneo caso mina Condestable, Ica, 2015”
- 4) CÁCERES, Michel y MALLCA, Edwin. “Evaluación geomecánica del macizo rocoso para el sostenimiento de las labores de explotación en la mina San Cristóbal – Compañía Minera Volcan, Nazca, Ica, Perú”. Evaluación Geomecánica, 2017.
- 5) JUNCO, Pantaleón y GERMÁN, Junior. “Evaluación geomecánica para el dimensionamiento, secuencia de minado y relleno de tajeos de una mina subterránea. Trujillo, 2015.”
- 6) LÓPEZ FÉLIX, G. “Sostenimiento con shotcrete vía húmeda en la mina. 2008”.
- 7) ABAD ALVARADO, Alan. “Sostenimiento en túneles - Proyecto Huascacocha. Lima, 2011.”
- 8) DEERE. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD) *Rock Quality Design*. 1984.
- 9) PALMSTROM. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD). 1982.
- 10) GUZMÁN ZÚÑIGA, César. “Sostenimiento con shotcrete vía húmeda en la mina. 2008”.
- 11) CARHUAMACA GUERRERO, J. “Evaluacion y Optimizaación del Sotenimiento con Cimbras. 2009 “
- 12) SANCHEZ ZEVALLOS, Vanesa. “Análisis de costos mediante el método del resultado operativo en la Unidad Poracota, Compañía de Minas Buenaventura”.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
<p>Problema General</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Cuál es la influencia de la evaluación geomecánica en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018? <p>Problemas Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018? ▪ ¿Será factible determinar los costos unitarios de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018? 	<p>Objetivos Generales</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar la influencia de la evaluación geomecánica en la elección del tipo de sostenimiento en el Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018. <p>Objetivos Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar cómo influye el factor de seguridad en el sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018. ▪ Determinar la factibilidad de los costos unitarios de sostenimiento del Túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018. 	<p>Hipótesis General</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ La evaluación geomecánica influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018. <p>Hipótesis Específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El factor de seguridad influye significativamente en la elección del tipo de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720, Sociedad Minera Corona S.A. 2018. ▪ La determinación de costos unitarios de sostenimiento del túnel Yauricocha del Nv. 720 Sociedad Minera Corona S.A. 2018, es factible y viable. 	<p>Variable Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluación geomecánica <p>Variables Dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de sostenimiento

OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	
		Dimensiones	Indicadores
VI: Evaluación geomecánica	Es aquella que evalúa las propiedades físicas y mecánicas de la roca, tratando directamente con la respuesta de la roca y del macizo rocoso al campo de fuerzas de su entorno físico, cuyos resultados permiten obtener una visión realista del estado actual del macizo rocoso.	Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clasificación geomecánica RQD. ▪ Clasificación geomecánica RMR. ▪ Cartilla geomecánica GSI
VD: Tipos de Sostenimiento	Son tipos de soportes que son diseñados para estabilizar la masa rocosa mediante el control del colapso progresivo o deformación de la misma con el objetivo de brindar una condición de trabajo seguro.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gastos operativos. ▪ Operaciones Unitarias. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costos Directos ▪ Costos Indirectos.

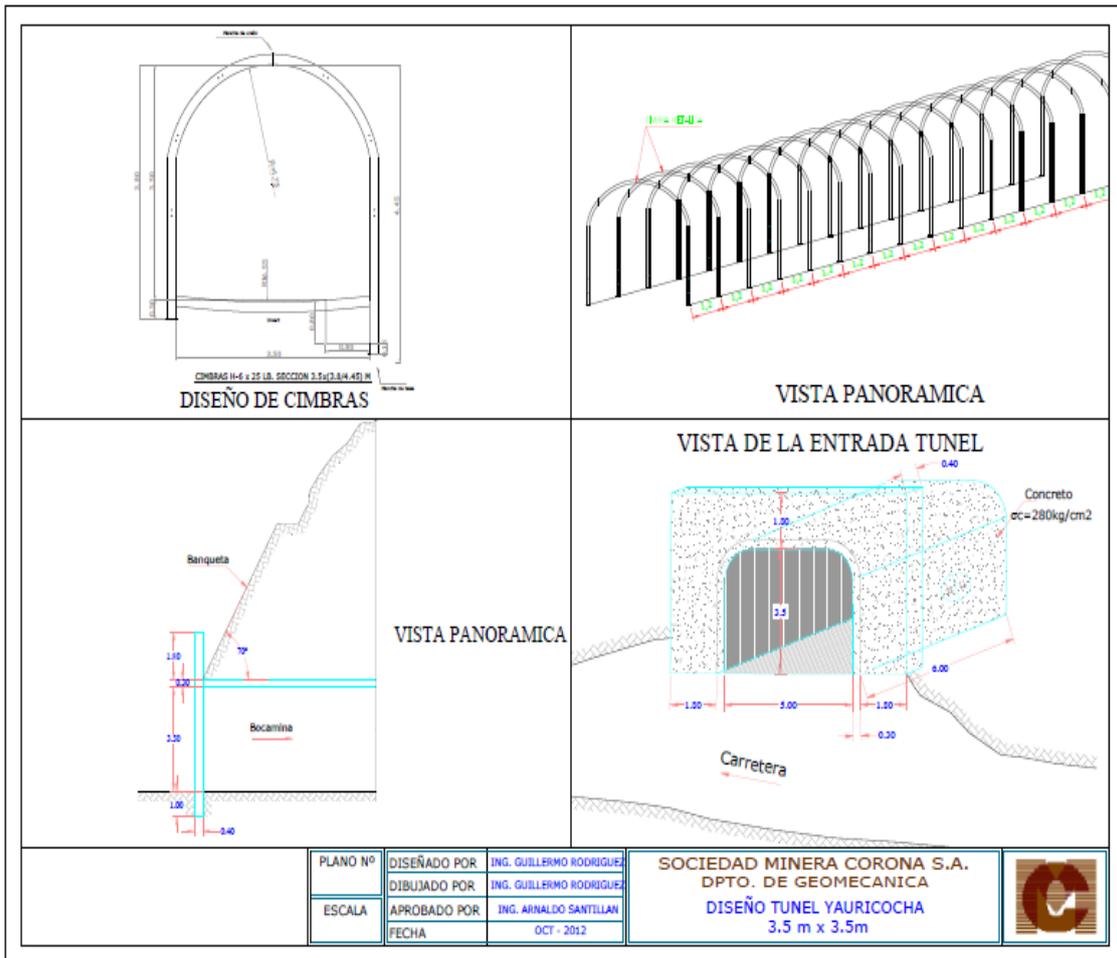


Figura N° 31: Diseño del túnel Yauricocha del Nv. 720
Fuente: Departamento de geomecánica de la mina Yauricocha

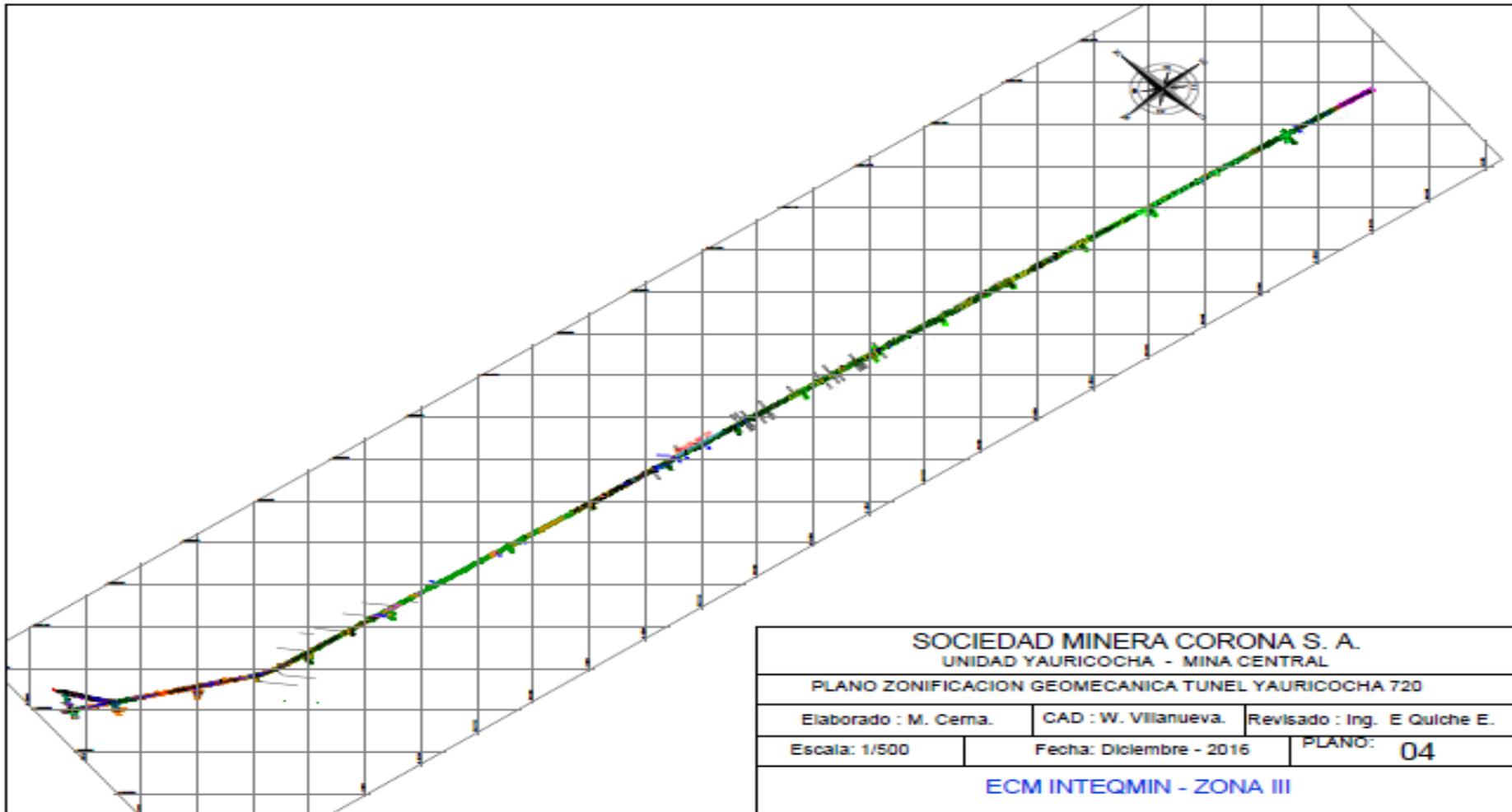


Figura N° 32: Zonificación geomecánica del túnel Yauricocha
Fuente: elaboración propia

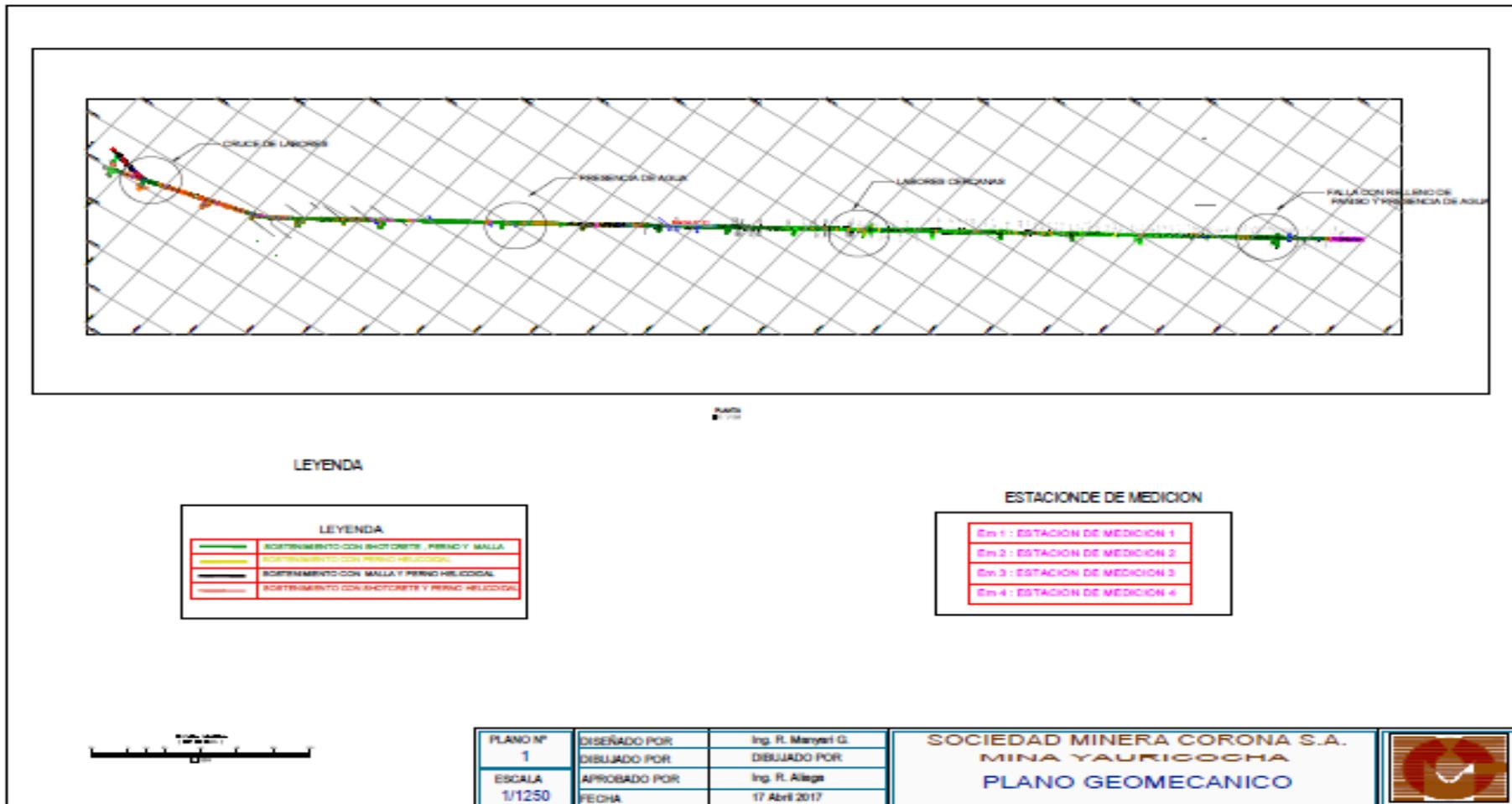


Figura N° 33: Evaluación Geomecánica por Estaciones de Medición
Fuente: elaboración propia



Figura N° 34: Estación de Medición N° 1
Fuente: elaboración propia



Figura N° 35: Estación de Medición N° 2
Fuente: elaboración propia



*Figura N° 36: Estación de Medición N° 3
Fuente: elaboración propia*



*Figura N° 37: Estación de Medición N° 4
Fuente: elaboración propia*



Figura N° 38: Túnel Yauricocha del Nv.720
Fuente: elaboración propia