

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**



**T E S I S**

**Evaluación geomecánica para determinar el método de minado de la  
Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

**Bach. Luis Antonio SANTACRUZ BAILON**

**Asesor:**

**Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA**

**Cerro de Pasco – Perú - 2025**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**



**T E S I S**

**Evaluación geomecánica para determinar el método de minado de la  
Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Mg. Joel Enrique OSCUVILCA TAPIA**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Vicente César DAVILA CORDOVA**  
**MIEMBRO**

---

**Ing. Julio César SANTIAGO RIVERA**  
**MIEMBRO**



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas



Firmado digitalmente por CONDOR SURICHACUJI Santa Silvia FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 18.12.2024 15:12:04 -05:00



## INFORME DE ORIGINALIDAD N° 073-2024

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

Presentado por:

**Bach. Luis Antonio SANTACRUZ BAILON**

Escuela de Formación Profesional  
**Ingeniería de Minas**

Tipo de trabajo:  
**Tesis**

Título del trabajo  
**"Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A."**

Asesor:

**Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA**

Índice de Similitud: **11%**

Calificativo  
**APROBADO**

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

Cerro de Pasco, 17 de diciembre de 2024.

Sello y Firma del responsable  
de la Unidad de Investigación

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo le dedico con mucho cariño y  
Aprecio a mis padres, quienes me impulsaron siempre  
Para el cumplimiento de mis objetivos y los logros de  
mis proyectos y metas

## **RECONOCIMIENTO**

Un reconocimiento especial a mi familia, en especial a mis padres, quienes fueron los forjadores para mis cumplimientos de los logros obtenidos.

También un reconocimiento especial a los señores docentes quienes, con su enseñanza en las aulas universitarias, me han dejado una gran cantidad de conocimientos y permitido que en las aulas deje mis inquietudes y aprenda lo que ahora puedo desenvolverme en mi inicio de la vida profesional.

## RESUMEN

En la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., propietaria de la Mina Tambomayo, se realizó la “Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo” con el objetivo de identificar las mejores opciones para la minería subterránea y dimensionar los componentes estructurales necesarios.

Para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo trabajos tanto de campo como de gabinete. En la primera etapa, el estudio se centró en la realización de investigaciones básicas, cuya finalidad fue recopilar la información necesaria para evaluar los principales factores que afectan la estabilidad y estimar los parámetros geomecánicos fundamentales. En la segunda fase, se fusionó todos los datos recogidos durante los estudios, lo que facilitó la evaluación de las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para posteriormente ofrecer sugerencias sobre las opciones de minado más apropiadas.

En las primeras investigaciones, se establecieron las condiciones naturales del yacimiento, se describieron y categorizaron la masa de roca a través del mapa geomecánico de las zonas subterráneas en análisis, además del estudio geotécnico de los testigos recolectados en sondeos diamantinos llevados a cabo durante la exploración del yacimiento. Los resultados de esta caracterización condujeron a la zonificación geomecánica y a la determinación de las propiedades físicas y parámetros de resistencia de la roca intacta, las discontinuidades y la masa rocosa en su conjunto. Asimismo, se evaluaron factores adicionales que podrían afectar la estabilidad de las excavaciones mineras subterráneas, tales como la presencia de agua, los esfuerzos in- situ y los sismos.

**Palabras Clave:** Geomecánica, método de minado, parámetros geotécnicos.

## **ABSTRACT**

At Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., owner of the Tambomayo Mine, the "Geomechanical Evaluation to Determine the Mining Method of the Tambomayo Mine" was carried out with the aim of identifying the best options for underground mining and sizing the necessary structural components.

To achieve this objective, both field and cabinet work was carried out. In the first phase, the study focused on conducting basic research, the purpose of which was to collect the necessary information to assess the main factors affecting stability and to estimate the fundamental geomechanical parameters. In the second stage, all the information obtained during the investigations was integrated, which made it possible to evaluate the stability conditions of the underground excavations, and then provide recommendations on the most appropriate mining alternatives.

As part of the initial investigations, the natural conditions of the deposit were defined, the rock mass was characterized and classified through geomechanical mapping of the underground areas under study, as well as through the geotechnical analysis of the cores obtained in diamond drillings carried out in the exploration of the deposit. The results of this characterization led to geomechanical zoning and the determination of the physical properties and strength parameters of the intact rock, discontinuities, and rock mass as a whole. Additional factors that could affect the stability of underground mining excavations were also evaluated, such as the presence of water, in-situ stresses and earthquakes.

**Keywords:** Geomechanics, mining method, geotechnical parameters.

## INTRODUCCIÓN

La Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. encargó la realización de una Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo, la cual abarca dos fases:

- 1ra fase: Evaluación Geomecánica del Minado entre el Nivel 4540 y el Nivel 4840, que incluye las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte entre los Niveles 4540 y 4640, y únicamente la Veta Paola Norte entre los Niveles 4640 y 4840.
- 2da fase: Evaluación Geomecánica del Minado por encima del Nivel 4840.

Durante la primera fase, los esfuerzos se centraron en llevar a cabo estudios fundamentales para recolectar la información requerida que facilitara la evaluación de los factores clave de control de estabilidad y, así, calcular los parámetros geomecánicos fundamentales. Luego, en una segunda fase, se incorporaron los datos recogidos en las investigaciones preliminares para analizar las condiciones de estabilidad de las excavaciones relacionadas con el minado. Basándose en los resultados obtenidos en ambas etapas, se definió el método de minado en conjunto con Buenaventura y se dimensionaron los componentes estructurales necesarios, lo que permitió proponer las estrategias de minado finales.



## ÍNDICE

### Página.

DEDICATORIA

RECONOCIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

## CAPITULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	2
1.3.	Formulación del problema .....	9
1.3.1.	Problema general .....	9
1.3.2.	Problemas específicos .....	9
1.4.	Formulación de objetivos.....	9
1.4.1.	Objetivo general.....	9
1.4.2.	Objetivos específicos.....	9
1.5.	Justificación de la investigación .....	10
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	10

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	11
2.2.	Bases teóricas - científicas .....	14
2.3.	Definición de términos básicos .....	18
2.4.	Formulación de hipótesis .....	21
2.4.1.	Hipótesis general .....	21
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	21
2.5.	Identificación de las variables.....	22
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	22

## CAPITULO III

### METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1.	Tipo de investigación .....	24
3.2.	Nivel de investigación .....	24
3.3.	Métodos de la investigación .....	24
3.4.	Diseño de la investigación.....	25
3.5.	Población y muestra.....	25
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	26
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	27
3.8.	Tratamiento estadístico.....	27
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica .....	27

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

4.1.	Descripción del trabajo de campo.....	28
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados .....	60
4.3.	Prueba de hipótesis .....	81
4.4.	Discusión de resultados .....	81

### CONCLUSIONES

### RECOMENDACIONES

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

### ANEXOS

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	<b>Página.</b>
Ilustración 1. Plano de ubicación de mina Tambomayo.....	3
Ilustración 2. Ubicación de las secciones transversales, vista en planta .....	29
Ilustración 3. Diagrama estereográfico de contornos (compósito veta Mirtha) .....	33
Ilustración 4. Diagrama estereográfico de planos principales (compósito veta Mirtha).....	33
Ilustración 5. Diagrama de roseta (compósito veta Mirtha) .....	34
Ilustración 6. Ejemplo de Zonificación Geomecánica – Sección 040.....	45
Ilustración 7. Ubicación de los datos obtenidos del WSM.....	59
Ilustración 8. Orientación de los Esfuerzos Principales de los datos obtenidos del WSM.....	60
Ilustración 9. Guía para el sostenimiento de excavaciones permanentes (Grimstad y Barton, 1993).....	64
Ilustración 10. Diagrama de Estabilidad para excavaciones del tipo ingreso del personal (Según Lang et.al., 1991).....	67
Ilustración 11. Gráfico de estabilidad. Según Potvin (1988), modificado por Nickson (1992) .....	70
Ilustración 12. Estimación de potencias del mineral en veta Paola Norte, por secciones y niveles. Vista mirando al oeste.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página.</b>
Tabla 1. Operacionalización de Variables.....	22
Tabla 2. Operacionalización de la variable dependiente. ....	23
Tabla 3. Ubicación y secciones transversales típicas por zonas.....	29
Tabla 4. Sistemas de Discontinuidades Estructurales - (Rumbo/buzamiento – Dir. buzamiento/buzamiento) .....	32
Tabla 5. Metodología para la Categorización de la Masa de Roca .....	39
Tabla 6. Tipo de Roca y Calidad de la Masa Rocosa .....	39
Tabla 7. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Mirtha.....	42
Tabla 8. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola.....	43
Tabla 9. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola Norte.....	44
Tabla 10. Resultados de los rangos de UCS según el martillo de Schmidt.....	47
Tabla 11. Resultados de ensayos de carga puntual (A) – Ref.: 15 .....	48
Tabla 12. Resumen de los ensayos de carga puntual (B) – Ref.: 15 .....	49
Tabla 13. Resultados de ensayos de compresión uniaxial – Ref.: 15.....	50
Tabla 14. Resultados de ensayos de compresión triaxial – Ref.: 15 .....	51
Tabla 15. Resultados de ensayos de tracción indirecta – Ref.: 15 .....	52
Tabla 16. Resultados de las propiedades físicas de la roca intacta – Ref.: 15.....	53
Tabla 17. Valores de la cohesión y ángulo de fricción de las discontinuidades – Ref.: 15 .....	54
Tabla 18. Factores de Resistencia de la Masa Rocosa .....	55
Tabla 19. Magnitud de los Esfuerzos in-situ. ....	58
Tabla 20. Maximización de las Aberturas de las Excavaciones Permanentes .....	63
Tabla 21. Sostenimiento para labores de avance permanentes.....	65
Tabla 22. Mantenimiento para trabajos de progreso temporal.....	66
Tabla 23. Aberturas máximas y tiempos de autosostenimiento para Tajeos.....	69
Tabla 24. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Mirtha .....	73
Tabla 25. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola .....	74
Tabla 26. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola Norte ....	75
Tabla 27. Métodos de Exploración Subterránea ordenados por costos.....	84

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

En toda empresa minera se considera como proceso fundamental la Evaluación Geomecánica, como principal instrumento para lograr un control de las excavaciones y realizar el minado correspondiente cumpliendo con los estándares de la minería.

El procedimiento de minado debe ajustarse a todas estas circunstancias naturales del depósito, de manera que el minado sea técnicamente viable para garantizar una óptima factibilidad técnica y económica.

En este contexto, es necesario determinar cada una de las condiciones naturales del yacimiento, donde los elementos geomecánicos tendrán un papel crucial desde una perspectiva técnica.

Como resultado de las labores llevadas a cabo en el funcionamiento de la mina, Tambomayo nos brindó datos fundamentales sobre la geología, la forma de la mineralización, las reservas y la distribución de leyes, así como sobre las

condiciones hidrogeológicas del yacimiento. Esta información fundamental se empleó para la evaluación llevada a cabo.

Por otro lado, en la fase inicial de la evaluación geomecánica del yacimiento, se dirigieron las labores hacia la realización de estudios básicos, con el objetivo de recolectar la información requerida para valorar los factores fundamentales de regulación de la estabilidad y calcular de esta manera los parámetros geomecánicos básicos.

En una segunda fase, se incorporaron los datos recogidos durante los estudios básicos, con el objetivo de valorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones vinculadas al minado.

Este proceso debe de ser realizado durante todo el proceso de explotación, para asegurar y garantizar la estabilidad de las labores subterráneas, objetivo principal del presente proyecto de investigación.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **Ubicación**

El área del Proyecto Tambomayo, está ubicado en el anexo Puna Chica del distrito de Tapay, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, a una altitud de 4700 a 4900 msnm y en las siguientes coordenadas UTM: 187,300 E y 8'287,600 N.

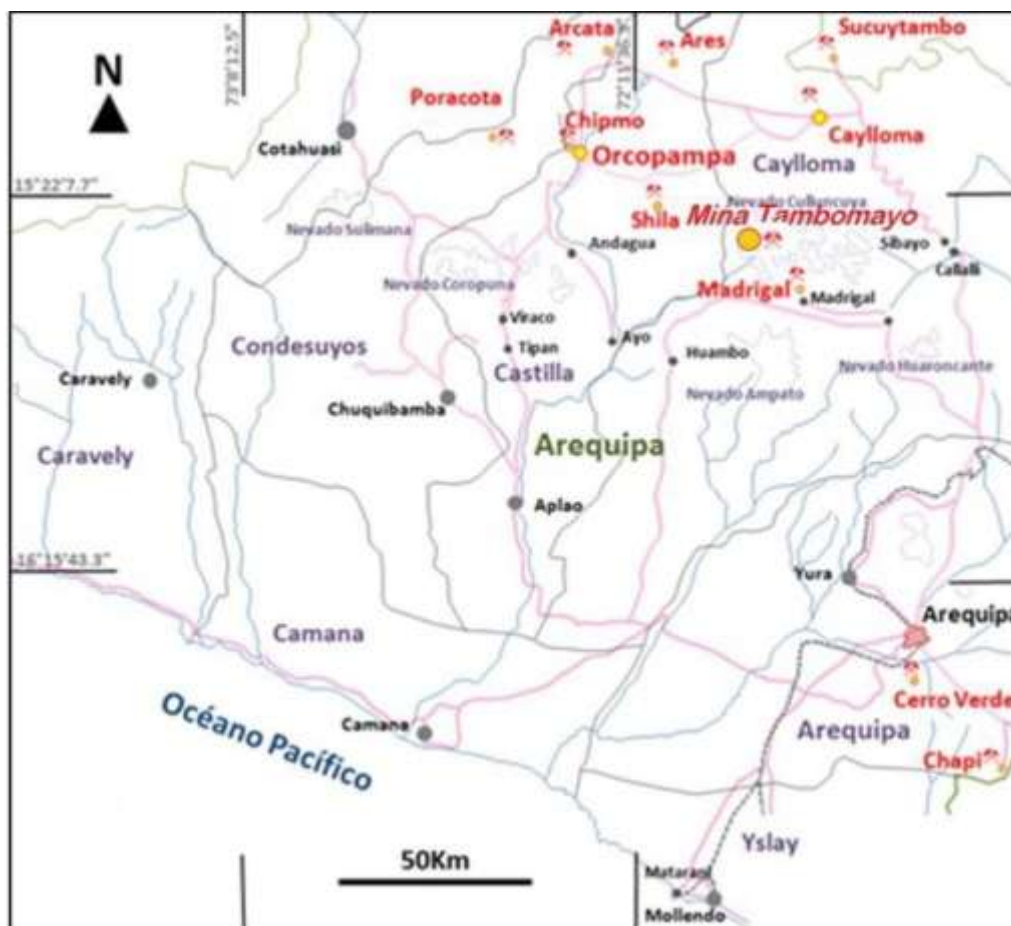
### **Accesibilidad.**

El acceso desde la ciudad de Lima se realiza a través de la ciudad de Arequipa, por vía aérea o por la Carretera Panamericana Sur, recorriendo 1025 km.

Desde Arequipa se toma la vía Yura – Cañahuas – Sibayo – Caylloma – desvío Talta Huarahuarco – Tambomayo, realizando un recorrido de 232 km. La

carretera está asfaltada hasta el desvío al poblado de Chivay y el resto es una carretera afirmada.

*Ilustración 1. Plano de ubicación de mina Tambomayo.*



Fuente: Elaboración propia

### **Geología Regional**

En la escala regional, la columna litoestratigráfica de la zona abarca rocas del Precámbrico, Mesozoico (Jurásico-Cretácico), Cenozoico (Terciario-Cuaternario), además de pulsaciones de domo, pequeños cuerpos intrusivos y, por último, depósitos Cuaternarios.

El substrato precámbrico está compuesto por rocas metamórficas, como ortogneis y gneis granítico, que afloran principalmente en el lecho del río Colca y presentan estructuras delgadas (Caldas, J, 1993).

El Mesozoico está compuesto por rocas del Jurásico y Cretácico, representadas por el Grupo Yura, que aflora principalmente en el norte y sur del Proyecto Tambomayo. Sobreyaciendo a estas unidades, se encuentran las Formaciones Murco y Arcurquina, respectivamente.

El Arco Volcánico Terciario-Cuaternario está constituido por los Volcánicos Santa Rosa (la formación más relevante por contener la mineralización de Tambomayo), Kenko, Alcaje, Fullchuina, Shila y Sahuarque. El Pliocuaternario se sitúa por encima de estas secuencias, denotado por los Depósitos Molloco, los Volcánicos Barroso y los Volcánicos Andagua.

La secuencia culmina con pulsaciones de domos de composición riódacítica y stocks subvolcánicos de composición andesítica a diorítica, localizados en los alrededores de la mina Tambomayo.

Hasta el momento, las estructuras reconocidas se encuentran en el borde de las calderas Limayoc y Surihuiri.

### **Formación Yura (Ki-yu)**

El Grupo Yura está representado por una serie sedimentaria, en general se puede establecer que los sedimentos corresponden a un mar de plataforma con corriente de alta movilidad poco profundo en la que se depositaron sedimentos terrígenos finos en la zona inferior.

El incremento de material detrítico grueso hacia la parte superior, supone un ambiente depositacional de menor profundidad y notables aportes. La presencia de calizas en la parte intermedia del grupo indica un ambiente depositacional de arrecifes en aguas someras.

### **Formación Murco (Ki-mu)**

Esta Formación está constituida en la zona inferior por calizas nodulares



gris oscuras, en la zona media se compone de grauvacas de color violáceo intercaladas con areniscas conglomerádicas de color gris verdoso, hacia la zona superior media se encuentran capas delgadas de areniscas de grano fino de color rojo ladrillo, finalmente en la zona superior areniscas grises de estratificación cruzada, que pasan a limolitas y lutitas rojas a violáceas.

### **Formación Arcurquina (Km-ar)**

En esta se pueden identificar dos partes, la inferior que se compone de calizas de superficie gris azulada en estratos finos con intercalaciones de areniscas calcáreas de color amarillo, el miembro superior que consiste de calizas azuladas brechoides, las cuales están asociadas con abundantes nódulos de chert, de coloración negro a marrón.

### **Volcánicos Santa Rosa (Mi-sr)**

Que representa al área del presente estudio, está conformado por brechas andesíticas, lavas, tobas y derrames volcánicos de composición dacítica.

### **Formación Ichocollo (Tm-ich)**

Está constituida por lavas y domos dacíticos en la base y en la zona superior lavas andesíticas a andesítico-basálticas con una coloración gris a gris oscura, con intercalaciones areniscosas y brechas andesíticas.

### **Formación Sencca (Tm-se)**

Está constituida por una serie tobas de naturaleza dacítica a riolítica de coloración crema a rosado de tipo efusivo y explosivo, intercaladas con clastos. Esta Formación yace, en discordancia angular a la Formación Orcopampa y subyace al Grupo Barroso.

### **Grupo Barroso (Qpl-ba-ev)**

En este grupo se han reconocido tres unidades: Volcánico Shila,

Volcánico Barroso y Volcánico Purupurini. En la primera, su litología consiste en derrames lávicos de naturaleza andesítica variando a dacítica. La segunda, se caracteriza por acumulaciones de formas dómicas compuestas por lavas andesíticas de textura afanítica de color gris azulada a rojizas. La tercera, consiste en derrames lávicos afaníticos, de composición similar a las anteriores unidades.

### **Depósito Molloco (Qpl-mo)**

El material que lo conforma consta de gravas, arenas y limos con matriz areno-limoso, en forma de capas groseramente estratificadas.

### **Grupo Andagua (Qr-an)**

Se describe a una unidad volcánica de reciente formación que se presenta a manera de pseudo-estratos y cono de escorias, también se han observado bombas que son los elementos que caracterizan a los aglomerados.

### **Geología estructural**

Se han identificado estructuras correspondientes al Ciclo Andino, diferenciando las Fases Peruana e Incaica. Estas incluyen un levantamiento y la formación de pliegues con orientación NW-SE, lo que indica una compresión en dirección NE-SW, acompañada de fallas de rumbo y fallas conjugadas.

La Fase Incaica provocó que algunos ejes de los pliegues rotaran hacia una posición E-W.

La Fase Quechua impactó los volcanes del grupo Tacaza, y se divide en dos etapas: la primera se caracteriza por plegamientos con rumbo NW-SE, mientras que la segunda presenta fracturamiento y fallamiento con orientaciones NW- SE y NE-SW. Por su parte, la Fase Pliocénica afectó a los volcanes de la Formación Sencca, donde se identificaron los centros volcánicos.

En la zona sur del Perú, la tectónica del Plioceno es de naturaleza

compresiva. La subsidencia que originó la Caldera Caylloma fue resultado de procesos tectónicos y volcánicos.

El área de estudio está bajo un control estructural regional con rumbo andino NW-SE, lo que ha generado fallas tensionales en dirección E-W. Esta última es particularmente relevante debido a la presencia de mineralización.

### **Geología local**

El área de estudio se compone localmente de brotes de tufos, brechas, lavas y lahares que oscilan entre traquiandesitas y dacitas.; Las zonas de elevación presentan lahares de composición andesítica, así como en las áreas de quebradas y depresiones llenas de material cuaternario originado por la erosión.

La zona de la mina Tambomayo se compone de una extensa y complicada secuencia de erupciones volcánicas entre rocas efusivas, fragmentales, volcanoclásticas y depósitos de lahares, que en conjunto forman un potencial estrato volcánico de varios kilómetros de diámetro.

En la Ilustración 3 se muestra la litología presente en la mina Tambomayo, teniendo lavas andesíticas, tobas andesíticas y toba brecha andesíticas, que son las principales rocas encajonante del yacimiento.

Se distinguen tres categorías principales de alteración.

- La modificación cuarzo - adularia, sucede dentro de la estructura mineral y siempre se relaciona con valores económicos. La silicificación ocurre tanto en la estructura principal como en la caja de piso, generando un halo muy limitado.
- La segunda forma de modificación es la argilización, que sucede al formar estrechos espacios en ambas cajas de la estructura mineral, con una preponderancia mayor en la caja techo de la veta, tal como ocurre en la misma

estructura mineral. En esta clase de modificación, mediante la difracción de radiografías, se estableció la existencia de illita y caolinita.

- Al distanciarse de la estructura mineral, la modificación propilítica es más desarrollada. Este tipo comprende una piritización mínima y la aparición de venillas de calcita

La Tectónica Pliocénica en la zona Sur del Perú es de naturaleza compresiva. La subsidencia ocurrida que dio origen a la Caldera Caylloma es consecuencia de los fenómenos tectónicos y volcánicos.

El campo de estudio cuenta con un control estructural regional de dirección Andina NW-SE que ha producido fallos tensionales en dirección E-W, este último es de mayor relevancia debido a la presencia de mineralización.

### **Geología Económica**

El yacimiento de mina Tambomayo consiste de vetas de origen epitermal de baja sulfuración a intermedia con cuarzo, trazas de adularia, sericita y pirita. La mineralización esta probablemente asociada a los domos de composición riodacita y cuerpos intrusivos pequeños a manera de stocks de composición diorita a andesita emplazado dentro y fuera de la Caldera Limayoc, Surihuiri y Caylloma.

Con los trabajos iniciales de exploración, reconocieron dos estructuras mineralizadas de Au-Ag, vetas sub paralelas de rumbo N75°W, con buzamientos variables entre los 65°- 80°N, estas son las vetas Mirtha y Olivia, siendo la primera la más importante. Una tercera veta denominada Paola ha sido reconocida en las labores subterráneas con rumbo N60°E y buzamiento promedio de 70°NW, pero ésta no aflora en superficie. Con los trabajos posteriores de laboreo minero y sondajes diamantinos, reconocieron las demás vetas que actualmente se

conocen y que están en etapa de preparación y/o explotación.

A través de las labores subterráneas desarrolladas se han estimado recursos medidos e indicados de 1,934,980 tcs, con rangos de leyes de 8.78 g/t Ag, 12.79 g/t Au, 1.32 % Pb y 2.14 % Zn. Los recursos inferidos suman 315,432 tcs, con rangos de leyes de 5.46 g/t Ag, 8.67 g/t Au, 1.53 % Pb y 2.39 % Zn.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Es posible efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cómo influye la aplicación de la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo?
- b) ¿Cómo obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Aplicar la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo.
- b) Obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.

### **1.5. Justificación de la investigación**

Para alcanzar el objetivo establecido, se requirieron tareas de campo y de gabinete. En una fase inicial, el estudio se enfocó en llevar a cabo investigaciones fundamentales, con el objetivo de recolectar la información requerida, que facilitó la evaluación de los elementos clave del control de la estabilidad y la estimación de los parámetros geomecánicos elementales. En una segunda fase, se incorporaron los datos recolectados durante los estudios básicos, con el objetivo de valorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para luego proporcionar las sugerencias sobre las opciones de minado.

### **1.6. Limitaciones de la investigación**

En todo procedimiento existen restricciones como la escasez de información, los gastos, el tiempo, que se van solventando durante el periodo de realización de la investigación, solicitando el respaldo de la compañía y del personal que participa de alguna forma en la investigación. Es importante destacar el respaldo incondicional del equipo y la significativa contribución de la empresa en todo lo necesario para concluir exitosamente este proyecto de investigación.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **Antecedentes Nacionales.**

- **(Condori N., 2017)**, de la Universidad Nacional del Altiplano, presentó la tesis “Evaluación geomecánica y estabilidad de labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura” Este estudio de investigación es de gran relevancia. La mecánica de rocas, o más bien la geomecánica, como se le conoce actualmente, es una disciplina que ha experimentado significativos avances en los años recientes, transformándose en un recurso tecnológico más en la industria minera específicamente y en otras áreas de la ingeniería en general. Para su uso eficaz en la evaluación geomecánica y estabilidad de trabajos subterráneos, el objetivo de esta tesis, las actividades geomecánicas llevadas a cabo en una mina deben llevarse a cabo en un entorno organizacional que facilite la incorporación de conceptos, datos y actividad analítica de todos los trabajadores implicados en la explotación minera. El propósito de llevar

a cabo este estudio ha sido evaluar las propiedades geomecánicas y la estabilidad de las labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura, o sea, las condiciones geomecánicas del lugar para establecer la estabilidad de las excavaciones de trabajos subterráneos. En respuesta a la hipótesis propuesta en el estudio, se obtuvieron resultados característicos de macizo rocoso, desde regular hasta de alta calidad. Con estos datos, se llevó a cabo la determinación de la estabilidad de las excavaciones mediante gráficos empíricos y, finalmente, se llevó a cabo un análisis numérico de esfuerzo de deformación. Las excavaciones de 3.5 x 3.5 m, como las Cortadas de Exploración, suelen no necesitar sostenimiento. No obstante, si surge un terreno de baja calidad, será imprescindible realizar una evaluación de sostenimiento. Las excavaciones de dimensiones 4.5 x 4.5 m, tal como sucede en la Rampa San Gabriel, necesitarán un sostenimiento permanente que puede ser pernos helicoidales distribuidos de forma sistemática. Finalmente, las excavaciones de dimensiones 7.0 x 7.0 m, diseñadas para ser Cámaras de perforación diamantina, necesitarán un sostenimiento más sólido, tal como el Shotcrete con un empernado sistemático.

- **(Rio R., 2019)**, de la Universidad Nacional Federico Villareal, desarrolla la tesis “Evaluación geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros “Los Ángeles” Este estudio se centra en el desarrollo de una evaluación geomecánica para establecer el tipo de conservación del macizo rocoso en los túneles carreteros "Los Ángeles", basándose en el factor de seguridad y los costos por unidad de conservación. El estudio se llevó a cabo en el lugar de construcción de los túneles de cemento proyectados, situados en los distritos de Lurigancho –



Chosica y Ricardo Palma, en las provincias de Lima y Huarochirí, departamento de Lima. El proyecto de los túneles atraviesa el Batolito de la Costa Peruana, compuesto por 02 túneles (eje 01 y eje 02), que son paralelos entre sí (gemelos) de 12 960m y 13 000m respectivamente. El propósito es establecer el impacto de la evaluación geomecánica en la determinación del tipo de sostenimiento del macizo rocoso en los túneles carreteros "Los Ángeles". Para ello, se establecieron 13 estaciones geomecánicas recolectando información a lo largo de los ejes. Después, se procedió a aplicar las clasificaciones geomecánicas, obteniendo roca de tipo II y III, de acuerdo con Bieniawski; y roca de tipo medio y buena, de acuerdo con Barton. Igualmente, se emplearon las sugerencias de sostenimientos acorde al tipo de roca sugerido por cada autor. Las familias de diaclasas más destacadas en cada estación geomecánica fueron identificadas a través del software Dips V.5.1. Se realizó una evaluación de la influencia del factor de seguridad en el mantenimiento del macizo rocoso en los túneles, utilizando el software Phase 2 V.8.0. En este escenario, se optó por el criterio de rotura de Hoek - Brown al ser roca. Los hallazgos revelaron que el de Bieniawski fue el más costoso y sobredimensionado estructuralmente, mientras que Barton resultó ser el más adecuado, cumpliendo con los factores de seguridad definidos por la normativa, resultando así, el más económico y viable. Así pues, para este estudio, las sugerencias propuestas por Barton se adecuan mejor a la situación técnica y económica de Perú, debido al desembolso público que realiza el gobierno en este tipo de construcciones. Finalmente, se concluyó que todas las hipótesis propuestas estaban correctas.

### **Antecedentes Internacionales**

- **(Arancibia , 2011)**, Arancibia (1998), en su tesis titulada Evaluación de la estabilidad geomecánica en grandes minas subterráneas en Chile, exploró las metodologías de clasificación geomecánica implementadas en el país a partir de la década de 1970. La investigación destacó la adopción de sistemas como el Índice de Calidad de Roca (RMR) de Bieniawski y el Sistema Q, que fueron utilizados en operaciones mineras de gran escala, como El Teniente y Chuquicamata, para evaluar la estabilidad de los macizos rocosos. La investigación de Arancibia enfatizó la necesidad de adaptar estas metodologías a las condiciones específicas de las minas subterráneas chilenas, considerando factores como la profundidad y las tensiones inducidas.
- **(Martínez, 2017)**, en su tesis titulada Evaluación geomecánica de macizos rocosos en proyectos mineros de Argentina, investigó el uso de sistemas de clasificación geomecánica como el RMR y el Sistema Q en minas argentinas. Su estudio destacó la relevancia de adaptar estos sistemas a las características geológicas locales, especialmente en minas ubicadas en regiones montañosas. Martínez también exploró el uso de tecnologías de modelado numérico tridimensional para predecir el comportamiento del macizo rocoso bajo diversas condiciones operativas, ofreciendo valiosos aportes para mejorar la seguridad y eficiencia en la minería subterránea de la región.

## **2.2. Bases teóricas - científicas**

### **Enfoque de la evaluación**

Para valorar un método de minado, resulta crucial determinar de manera precisa las condiciones naturales del depósito, o sea:

- La geología del sitio de depósito

- La conformación de la mineralización
- Las reservas y distribución de leyes
- El estado geomecánico de las rocas presentes en el yacimiento
- Las circunstancias hidrogeológicas del mismo.

El procedimiento (o procedimientos) de minado debe(n) ajustarse a todas estas circunstancias naturales del depósito, de forma que el minado sea técnicamente viable. Volcán necesita complementar la factibilidad técnica con una evaluación económica del método (o métodos) de minado, para garantizar una factibilidad técnica y económica ideal.

En este contexto, es necesario determinar cada una de las condiciones naturales del yacimiento, donde los elementos geomecánicos tendrán un papel crucial desde una perspectiva técnica. Como resultado de las labores llevadas a cabo en el funcionamiento de la mina, Volcán proporcionó la información fundamental relacionada con la geología, la forma de la mineralización, las reservas y la distribución de leyes, así como con las condiciones hidrogeológicas del depósito minero. Esta información fundamental se empleó para la evaluación llevada a cabo.

Por otro lado, en la fase inicial de la evaluación geomecánica del yacimiento, se dirigieron las labores hacia la realización de estudios básicos, con el objetivo de recolectar la información requerida para valorar los factores fundamentales de regulación de la estabilidad y calcular de esta manera los parámetros geomecánicos fundamentales.

En una segunda fase, se incorporaron los datos recogidos durante los estudios básicos, con el objetivo de valorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones vinculadas al minado.

De acuerdo con los hallazgos obtenidos en las dos fases anteriores, se analizaron los procedimientos de minado y se dimensionaron los distintos elementos estructurales vinculados al minado, proponiéndose finalmente las estrategias de minado.

### **Aspectos técnicos**

Los aspectos técnicos materia de la presente evaluación fueron los siguientes: Investigaciones básicas:

- Se establecieron las condiciones naturales del yacimiento, basándose en los datos elaborados y suministrados por Volcán.
- Se definió la masa de roca del yacimiento, basándose en la revisión y estudio de los datos disponibles y en el mapa geomecánico de la masa de roca de las actividades subterráneas de Mina Carahuacra. Para ello, se han aplicado las directrices propuestas por la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Roca).
- Se examinaron las características físico-mecánicas de la roca sin alteraciones, de las discontinuidades y de la masa de roca, empleando métodos alternativos, conforme a las regulaciones del ISRM.
- Las opciones para establecer las características mecánicas físicas de la roca incluyeron: realizar pruebas con el martillo geológico, realizar pruebas de impacto con el martillo Schmidt, realizar pruebas de laboratorio, y, aplicar el criterio de Hoek & Brown (1990, 2006) para calcular los parámetros de resistencia de la roca sin alteraciones y de la masa de roca.
- Se estableció la calidad de la masa de roca que formaba parte del área de evaluación,
- Utilizando criterios de clasificación geomecánica, tales como los

establecidos por Bieniawski (1989), Barton (1974) y Hoek & Marinos (2000).

- Se realizó una zonificación geomecánica del yacimiento, con el objetivo de establecer los dominios estructurales basándose en los datos recabados en los puntos anteriores.
- Se utilizó todo el conocimiento posible de las fuentes previamente mencionadas.
- Se analizaron los elementos extra, inherentes al yacimiento, que podrían afectar las condiciones de estabilidad de las actividades mineras subterráneas (agua y esfuerzos).

#### **Análisis de las condiciones de estabilidad de las excavaciones:**

- Se examinaron las condiciones de estabilidad de la masa de roca de las excavaciones: ruta preferente para el progreso de las excavaciones, aperturas máximas, periodos de autosostenimiento, y el impacto de las discontinuidades estructurales y de los esfuerzos en las condiciones de estabilidad.
- Se recurrió a modelos numéricos basados en los mecanismos de falla potencial del suelo para evaluar la estabilidad de las excavaciones y cualquier otro elemento vinculado al minado.
- Todos los parámetros definidos y las conclusiones alcanzadas poseen el correspondiente respaldo técnico, los cuales se expondrán en este trabajo de investigación.

#### **Estimación de los métodos de minado**

- Basándose en datos previamente elaborados y colaborando con el equipo de Planeamiento y Diseño de Volcanes, se realizaron evaluaciones de los métodos de minado.

### **Dimensionamiento y tácticas de minado:**

- Según el método o alternativas de minado evaluadas, se dimensionaron los distintos componentes estructurales vinculados a cada uno de ellos.
- Se estableció el emplazamiento de las excavaciones de acceso y servicios permanentes más importantes.
- Se establecieron los patrones y secuencias de progreso del minado, con el objetivo de optimizar la recuperación de las reservas y alcanzar condiciones apropiadas de estabilidad a nivel local y mundial.
- Se analizaron las necesidades de sustentabilidad de las actividades mineras y se determinaron los componentes de sustentabilidad más apropiados para las condiciones geomecánicas halladas.
- Se analizaron las necesidades de relleno para el minado del depósito minero.
- Por lo general, se ofrecen sugerencias acerca de los métodos de control de la estabilidad de las excavaciones vinculadas al minado para garantizar un proceso seguro y eficaz.

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

- **Apertura:** Se refiere a la diferencia entre las paredes de roca de una discontinuidad o al nivel de abierto que esta exhibe. A apertura más baja, las condiciones de la masa de roca serán más favorables, mientras que a mayor apertura, las condiciones serán más adversas.
- **Contactos litológicos:** Normalmente constituyen, por ejemplo, la caja techo y la caja piso de una veta.
- **Diaclasas:** También conocidas como juntas, son fisuras que no han sufrido un desplazamiento y que suelen aparecer en la masa de rocas.
- **Discontinuidad:** Se trata de una zona de separación que se puede detectar

metrológicamente en los cuerpos rocosos próximos a la superficie o en zonas más profundas de la corteza terrestre y el manto.

- **Discordancia:** Una región geológica que distingue las rocas más antiguas de las más contemporáneas.
- **Espaciado:** Se refiere a la separación perpendicular entre discontinuidades próximas. Este establece la dimensión de los bloques de roca sin alteraciones. A mayor espaciado, los bloques serán más reducidos y a menor espaciado, los bloques serán más grandes.
- **Estratificación:** Es una característica de las rocas sedimentarias que distingue capas de litología similar o distinta. Estas rocas también pueden aparecer en rocas que se hayan generado a partir de la transformación de rocas sedimentarias.
- **Fallas:** Son fisuras que han experimentado un movimiento. Estas son fisuras menores que simbolizan en zonas específicas de la mina o estructuras de gran relevancia que pueden penetrar por completo la mina.
- **Investigaciones Geotécnicas.** - Es un programa de estudios geotécnicos realizados a través de perforaciones de diamantes, con el objetivo de adquirir parámetros y propiedades hidrogeológicas de los materiales existentes en el área de investigación.
- **Matriz rocosa.** - Material de roca sin alteraciones o bloques de roca sin alteraciones entre discontinuidades (muestra de mano o superior). Aunque se le considera continua, es variada y anisótropa, vinculada a la fábrica, textura y estructura, y es un mineral.
- **Orientación:** Se refiere a la ubicación de la discontinuidad en el espacio, caracterizada por su dirección y desplazamiento. Cuando se observa un

conjunto de discontinuidades que tienen una orientación parecida y son aproximadamente paralelas, se consideran como un "sistema" o una "familia" de discontinuidades.

- **Persistencia:** Se refiere a la ampliación en área o magnitud de una discontinuidad.

A mayor persistencia, la masa de roca será más estable, mientras que a mayor persistencia, será menos estable.

- **Perfil geotectónico:** Se refiere al conjunto de tareas que incluye la investigación del subsuelo, incluyendo los análisis y sugerencias para el diseño y edificación en el subsuelo.
- **Perfil litológico:** Es el campo de la geología que analiza la estructura y composición de las rocas, tales como su tamaño de grano, propiedades físicas y químicas, estructuras metamórficas, entre otros. También incluye su estructura, su textura, modalidad de transporte, además de su composición mineralógica, ubicación espacial y material de cimentación.
- **Perforación:** Es la acción inicial en la elaboración de una voladura. Su objetivo es crear cavidades cilíndricas en la roca conocidas como taladros, las cuales están diseñadas para albergar al explosivo y sus componentes iniciadores.
- **Pliegues:** Son estructuras donde los estratos se muestran curvados, siendo intrusiones de roca ígnea de forma tabular, usualmente empinadas o verticales.
- **Productividad.** - Es la correlación entre el volumen de productos y servicios generados y el volumen de recursos empleados.
- **Rugosidad:** Se refiere a la aspereza o anomalía en la superficie de la



discontinuidad.

Cuanto más baja sea la rugosidad en la discontinuidad, la masa de roca será menos resistente y cuanto más alta sea, la masa de roca será más resistente.

- **Relleno:** Se refiere a los materiales que están incluidos en la discontinuidad.

Cuando los materiales son delicados, la masa de roca es menos eficaz y cuando son más resistentes, ésta es más eficaz.

- **Sostenimiento:** En cualquier minería, mantener las labores es un trabajo extra de alto costo que disminuye la velocidad de progreso y/o producción, pero a la vez es un procedimiento crucial para salvaguardar a los trabajadores y al equipo de accidentes.
- **Zonas de corte:** Son bandas de material que pueden tener un espesor de varios metros, donde ha sucedido el derrumbe de la roca.
- **Zonificación geomecánica.** - Proceso de asignación de áreas donde la masa de roca presenta condiciones geomecánicas parecidas y, por ende, también muestra comportamientos parecidos.

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Con la Evaluación Geomecánica se determinará el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) Con la aplicación de la evaluación geomecánica se realizará la explotación de la Mina Tambomayo.

- b) Con los Parámetros Geotécnicos, realizaremos un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.

## 2.5. Identificación de las variables

### Variable Independiente:

X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

### Variable Dependiente:

Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

*Tabla 1. Operacionalización de Variables*

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE	X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	En una fase inicial de la evaluación geomecánica del yacimiento, se dirigieron las labores hacia la realización de estudios básicos, con el objetivo de recolectar la información requerida para valorar los factores clave de control de la estabilidad y calcular de esta manera los parámetros geomecánicos fundamentales. En una segunda fase, se incorporaron los datos recogidos durante los estudios básicos, con el objetivo de valorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones vinculadas al minado. Este proceso debe de ser realizado durante todo el proceso de explotación, para asegurar y garantizar la estabilidad de las labores subterráneas, objetivo principal del presente proyecto de investigación.	Evaluación	Mina Tambomayo
				Compañía de Minas Buenaventura.
			Identificación	Método de Minado
				Sostenimiento.
				Ciclo de Minado
			Operaciones	Zonificación de la mina.
				Parámetros Geotécnicos.

**Tabla 2. Operacionalización de la variable dependiente.**

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
VARIABLE DEPENDIENTE	Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Para alcanzar el objetivo establecido, se requirieron tareas de campo y de gabinete. En una fase inicial, el estudio se enfocó en llevar a cabo investigaciones fundamentales, con el objetivo de recolectar la información requerida, que facilitó la evaluación de los elementos clave del control de la estabilidad y la estimación de los parámetros geomecánicos elementales.  En una segunda fase, se incorporaron los datos recolectados durante los estudios básicos, con el objetivo de valorar las condiciones de estabilidad de las excavaciones subterráneas, para luego proporcionar las sugerencias sobre las opciones de minado.	Mapeo	Mapeo Geológico.
				Mapeo Geomecánico.
				Mapeo Estructural.
			Diseño	Mallas por tipo de roca.
				Tabla Geomecánica.
				Paneles de zonificación.
			Control	Labores de riesgo.
				Tajeos.
				Relleno.
			Sostenimiento	Tipo de roca
				Tiempo de auto sostenimiento
				Equipos de sostenimiento.

**Fuente: Elaboración Propia**

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION**

#### **3.1. Tipo de investigación**

Se aplica los tipos de investigación cuantitativa:

- 1. Investigación descriptiva
- 2. Investigación analítica
- 3. Investigación experimental
- 4. Investigación cuasi experimental
- De acuerdo a los objetivos es de carácter experimental-aplicativo obtenidos en los trabajos de campo y los análisis realizados para su realización.

#### **3.2. Nivel de investigación**

Descriptivo, se empleará este nivel porque explicaremos las investigaciones geomecánicas, y posteriormente hacer la cuantificación del procedimiento de explotación.

#### **3.3. Métodos de la investigación**

El método de investigación se da de acuerdo a la investigación realizada y

que ayudan a determinar el proceso.

- Experimento.
- Observación.
- Entrevistas personales.
- Información proporcionada por Mina Tambomayo
- Encuestas al personal involucrada en la investigación.

### **3.4. Diseño de la investigación**

La estructura del estudio se ajusta a la investigación cuantitativa, descriptiva y experimental, donde se especifica la Evaluación Geomecánica realizada en la Mina Tambomayo y los hallazgos logrados en el estudio.

1. Descripción del proceso
2. Elaboración del proyecto de investigación.
3. Técnicas y métodos aplicadas en el estudio.
4. Realización del trabajo de campo.
5. Procesos de clasificación, categorización y mejoramiento.

### **3.5. Población y muestra**

#### **Población**

La población está conformada por el estudio geológico, minero y estadístico de la mina, durante el tiempo de realizado el proceso de excavación, lo cual nos permitió tener de cerca la información de lo desarrollado en la mina y todas las operaciones que se están realizando.

#### **Muestra**

La muestra está conformada por los estudios realizados en las vetas Mirtha, Paola y Paola norte desde los niveles 4540 hasta 4890.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **Técnicas**

##### **Descripción de las técnicas empleadas**

##### **- Recopilación y análisis de data**

Investigación de la data de la Mina Tambomayo. Contribuciones del personal de la mina.

Trabajo de campo.

Informes encontrados con respecto a la Investigación.

##### **Observación directa y toma de datos**

Se llevó a cabo un recorrido por todas las actividades de la mina Tambomayo, lo que nos brindó una visión visual de toda la mina, lo que resultó muy útil en nuestra evaluación.

##### **Búsqueda de Referencia Bibliográfica**

La mayor contribución bibliográfica la adquirimos de la información de la empresa, datos extraídos de internet y libros de contribuciones para nuestra evolución geomecánica.

##### **Instrumentos de recolección de datos**

##### **Materiales**

- Mapeadores.
- Brújula.
- Estación Total.
- Planos Topográficos.
- Simuladores
- Equipo de seguridad
- Computadora personal y Impresoras

- Cámara Fotográfica

### **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

- Compilación de datos

En todas las labores subterráneas de la mina.

- Observación directa del proceso

Observaciones directas en todas las actividades subterráneas mineras y recolección de datos en terreno.

- Indagación de información bibliográfica.

Datos proporcionada por la gerencia de la Mina Tambomayo.

### **3.8. Tratamiento estadístico**

El procedimiento estadístico completo se llevó a cabo en Microsoft Excel y el SPSS. (programas estadísticos).

### **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

La investigación se llevó a cabo considerando los fundamentos de la ética personal y profesional, lo que nos permite detallar toda la información recolectada en todo el análisis efectuado en el presente estudio.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

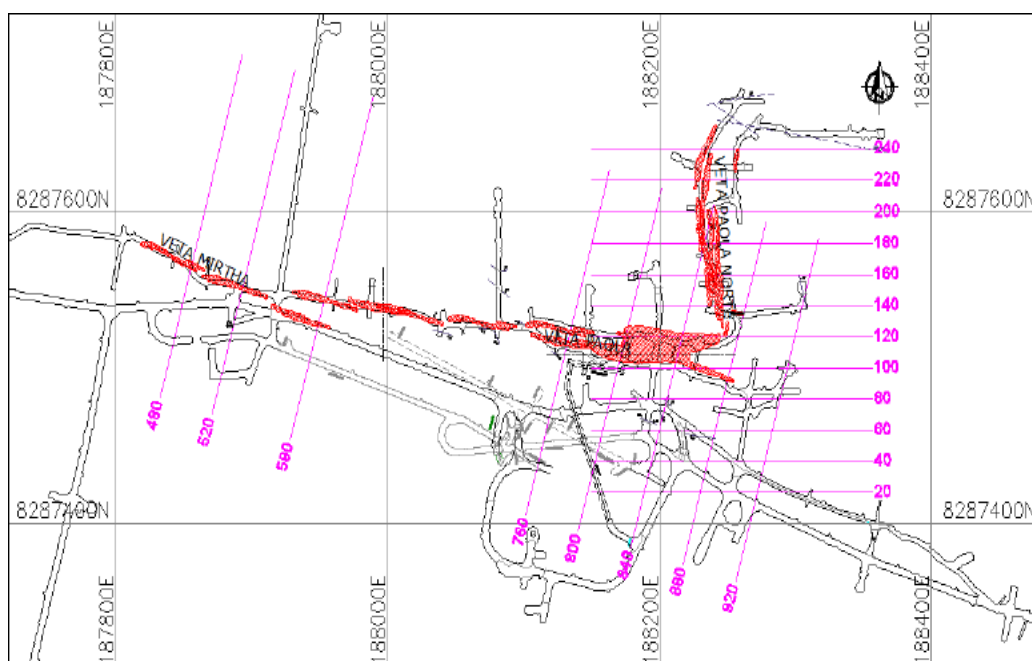
##### **Modelo Geomecánico**

La presente evaluación geomecánica está enfocada a 3 zonas de estudio: vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. Para el caso de la veta Mirtha el minado comprende los niveles Nv 4540 a Nv 4640 y también el minado entre los niveles Nv 4840 a Nv 4940. Para la veta Paola, el objetivo del estudio abarca entre los niveles Nv 4640 a Nv 4840. Finalmente, para el caso de la veta Paola Norte, la evaluación del minado se desarrollará entre los niveles Nv 4540 a Nv 4840.

En la imagen se muestran la ubicación en planta y las secciones transversales empleadas por cada una de las zonas en estudio (UTM Zona 19L WGS). En total, para mostrar los resultados obtenidos se han usado 20 secciones transversales típicas. Además, el cuadro contiene la orientación y el resumen de las secciones empleadas por cada zona, la cuarta columna muestra el rango de cota referencial objeto de estudio.



**Ilustración 2.** Ubicación de las secciones transversales, vista en planta



Fuente: C. M. Buenaventura

Enfocado en la realización de estudios fundamentales (mapeo litológico estructural y geomecánico de erupciones rocosas en la superficie e interior de la mina, a través de la utilización del método Celdas de Detalle). En esta etapa también se han llevado a cabo pruebas de campo y laboratorio para recolectar datos relevantes que faciliten la valoración con más elementos de juicio de los factores clave que regulan la estabilidad de la masa de roca en los dominios geomecánicos.

**Tabla 3.** Ubicación y secciones transversales típicas por zonas

Zona (Veta)	Azimut	Vista	Rango de Cota Referencial	Sección Transversal
Mirtha	016°	NW	4640 – 4890	480, 520, 580, 760, 800, 840, 880 y 920.
Paola	016°	NW	4540 - 4740	760, 800, 840, 880 y 920.
Paola Norte	090°	N	4540 - 4890	020, 040, 060, 080, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 y 240.

### Caracterización de la Masa Rocosa

La documentación de la información geomecánica se llevó a cabo

utilizando el mapa geomecánico de la masa de roca presente en las excavaciones mineras de los diferentes niveles y subniveles de la mina, tanto para las áreas de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte, así como para las áreas de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. La otra fuente de datos ha procedente del análisis geotécnico de los testigos rocosos de los distintos sondeos de diamantes realizados en el marco de las labores de exploración del depósito. Por otro lado, se aprovechó toda la información de interés desarrollada por el Departamento de Geología de la mina y también de información de evaluaciones geomecánicas anteriores.

Se realizó un mapa geotécnico de la masa de roca presentada en las tareas subterráneas empleando el "método directo por celdas de detalle". A través de este procedimiento se llevaron a cabo mediciones sistemáticas de las discontinuidades encontradas en 93 estaciones de medición ubicadas en los diferentes niveles de la mina, cada una representada por un área de tamaño fluctuante de la roca expuesta. La ubicación de las estaciones de medición se muestra en los planos de zonificación geomecánica de planta (ver Láminas 10 a 27).

Los parámetros de observación y evaluación del mapa geomecánico de emergencias se adquirieron en formatos de registro creados para este fin, ajustándolos a las directrices propuestas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), que se presentan en el Anexo 1. Estos factores incluyeron: clase de roca, clase de sistema de discontinuidad, dirección, distancia, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, grosor del relleno, intemperización y existencia de agua. Además, se consignaron datos acerca de la resistencia y el grado de fracturamiento (RQD) del mineral.

En los testigos rocosos de las perforaciones de diamantes, el registro

geotécnico se realizó mediante métodos tradicionales en formatos que cumplen con las normas ISRM (Anexo 2), utilizando parámetros de observación y medición parecidos a los mencionados en el párrafo anterior. En total se llevó a cabo el logueo de 26 sondajes diamantinos con una longitud total de 1,820 m, haciéndose en mucho de ellos solo el tramo de interés cercano a las vetas.

### **Aspectos Litológicos**

Las características litológicas simplificadas de la masa rocosa involucrada con las distintas vetas son las siguientes: para el caso de las vetas Mirtha, Paola y Paola Techo, el mineral se halla dentro de una brecha de cuarzo, Se encuentra el mineral de mayor ley en la brecha de cuarzo gris, la caja superior está compuesta por tobas andesíticas y tobas brechas andesíticas, mientras que hacia la caja inferior se nota la presencia de lavas andesíticas. En la caja inferior se nota la presencia de lavas andesíticas. Para la veta Paola Norte, la mineralización es parecida, usualmente la caja techo y piso tiene toba andesítica y toba brecha andesítica, dado que esta veta está situada al norte de la falla Norte y la veta Mirtha, y la falla Mirtha está situada al norte de la falla Norte.

### **Distribución de Discontinuidades**

Para determinar las propiedades de distribución de discontinuidades o arreglo estructural de la masa de roca, se utilizaron técnicas estereográficas para procesar los datos orientativos, empleando la versión sofisticada del software DIPS (1995), creado por M.S. Diederichs y E. Hoek del Grupo de Ingeniería de Rocas del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toronto (Canadá), así como la versión 5.103 de Rocscience Inc. (2004). La primera versión fue empleada debido a las comodidades gráficas que ofrece esta.

Se ha llevado a cabo una interpretación de la información estructurada,

por un lado, de la información estructural obtenida del mapeo geomecánico de las distintas estaciones y por otro lado, de las discontinuidades registradas de los planos geológicos de los distintos niveles que fueron realizados por el personal de geología de la mina.

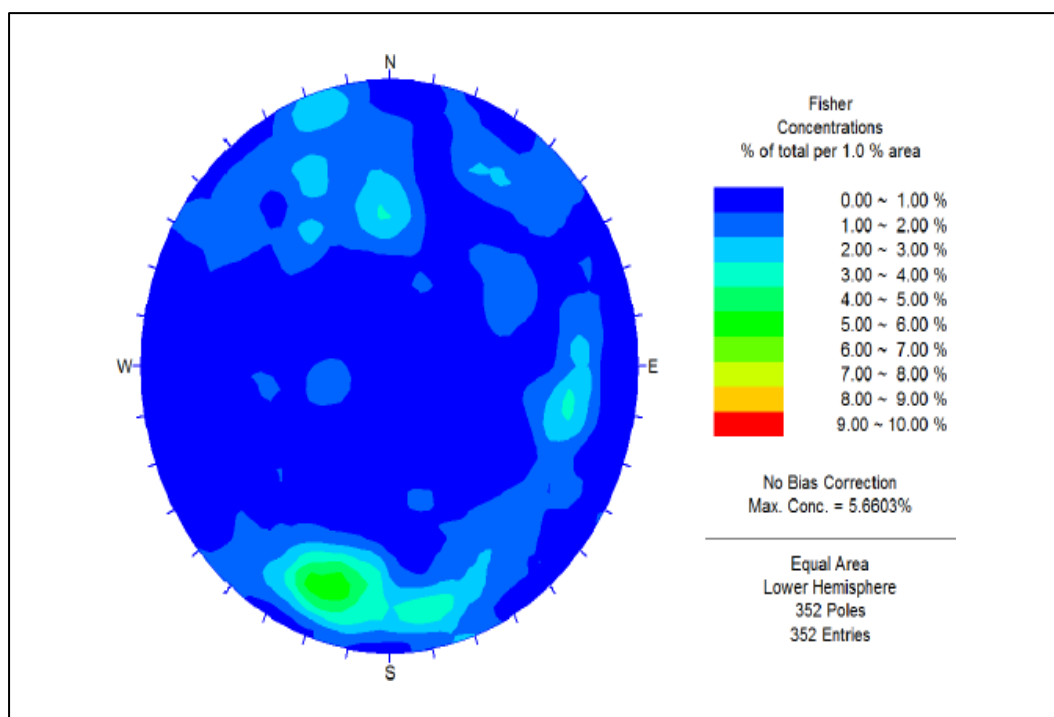
A manera de ejemplo, en las Ilustraciones 5, 6, 7 se presentan la distribución de las discontinuidades registradas en el compósito de discontinuidades encontradas para la veta Mirtha.

Un resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 4 y en el Anexo 2 el detalle de la estereografía de las tres vetas en estudio y sus entornos: Mirtha, Paola y Paola Norte.

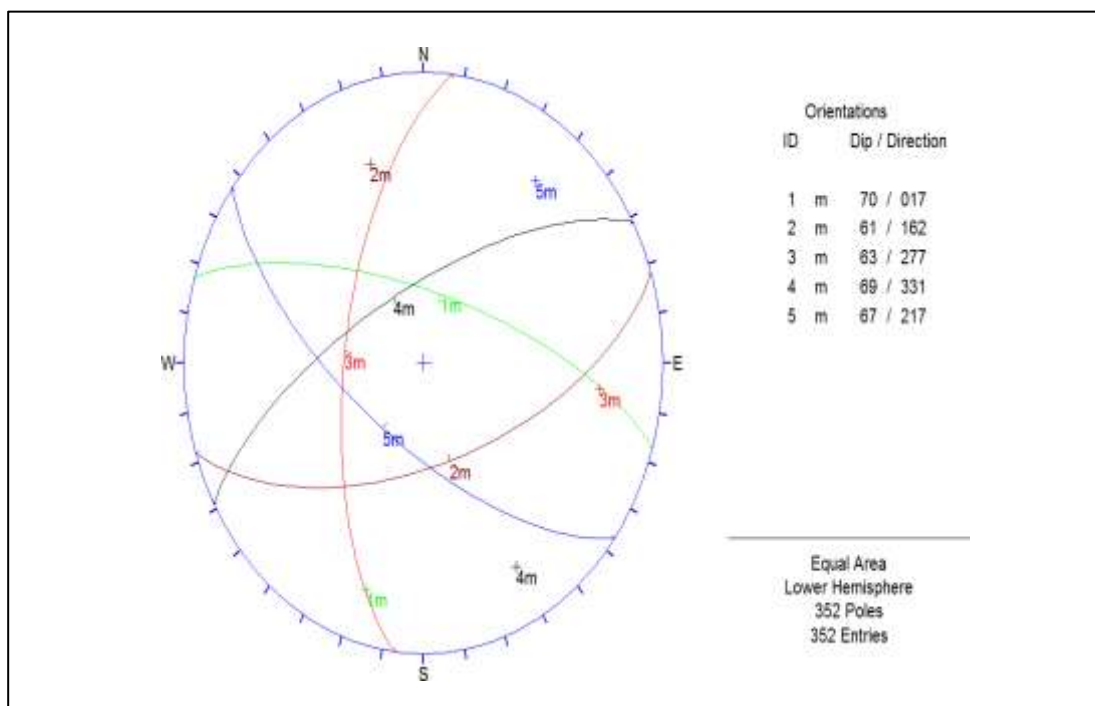
**Tabla 4.** *Sistemas de Discontinuidades Estructurales - (Rumbo/buzamiento – Dir. buzamiento/buzamiento)*

Veta	Sector	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
Mirtha	Caja Techo	N87°W/73°NE	N82°W/75°SW	N04°W/42°NE	N12°E/55°NW	---
		003°/73°	188°/75°	086°/42°	282°/55°	---
	Caja Piso	N75°W/69°NE	N71°E/60°SE	N05°E/64°NW	N59°E/69°NW	N49°W/72°SW
		015°/69°	161°/60°	275°/64°	329°/69°	221°/72°
Paola	Caja Techo	N87°E/63°NW	N84°E/65°SE	N33°W/71°SW	N35°W/61°NE	N10°E/37°SE
		357°/63°	174°/65°	237°/71°	055°/61°	100°/37°
	Mineral	N60°E/57°NW	N80°E/76°SE	N24°W/64°NE	N36°E/62°SE	---
		330°/57°	170°/76°	066°/64°	126°/62°	---
	Caja Piso	N84°W/74°NE	N81°W/67°SW	N09°E/68°NW	N21°E/65°SE	N31°W/65°NE
		006°/74°	189°/67°	279°/68°	111°/65°	059°/65°
Paola Norte	Caja Techo	N06°E/68°SE	N31°W/68°NE	N07°W/72°SW	N76°W/74°NE	N55°W/63°SW
		096°/68°	059°/68°	263°/72°	014°/74°	215°/63°
	Mineral	N14°W/51°NE	N58°E/78°NW	N77°E/79°SE	---	---
		076°/51°	328°/78°	167°/79°	---	---
	Caja Piso	N13°W/54°NE	N48°E/76°NW	N69°E/74°SE	N86°W/74°NE	N32°W/73°SW
		077°/54°	318°/76°	159°/74°	004°/74°	238°/73°

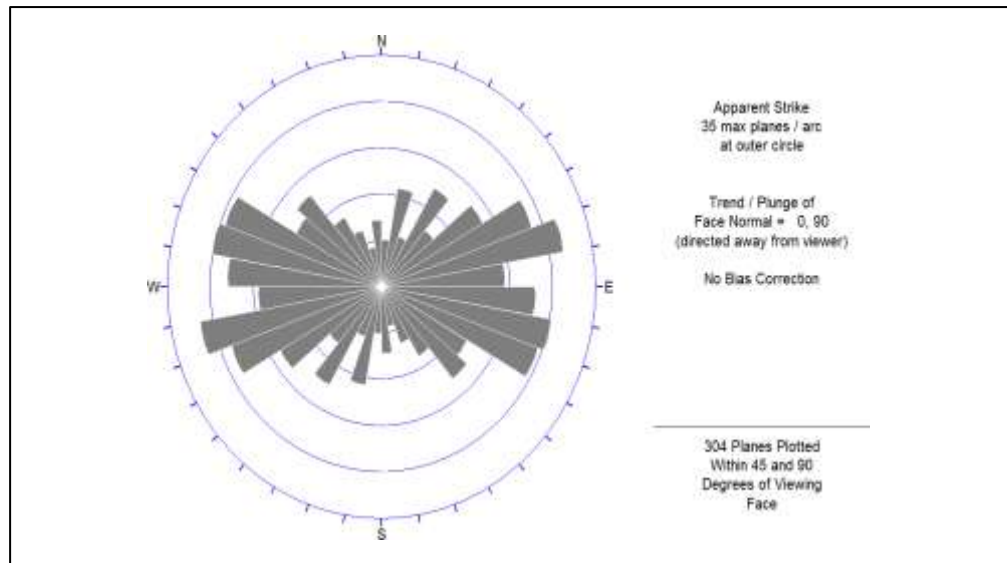
**Ilustración 3.** Diagrama estereográfico de contornos (compósito veta Mirtha)



**Ilustración 4.** Diagrama estereográfico de planos principales (compósito veta Mirtha)



**Ilustración 5. Diagrama de roseta (compósito veta Mirtha)**



El análisis realizado es producto de toda la información que se ha registrado y se ha tenido disponible, además según lo revisado de los planos geológicos disponibles, el arreglo estructural encontrado es concordante con lo existente en los planos. Por otro lado, se revisó la información estructural establecida en estudios geomecánicos previos (Ref.: 15), los resultados mostrados en aquel entonces también guardan relación con lo determinado para la presente evaluación. De los resultados encontrados podemos señalar lo siguiente:

#### **Veta Mirtha**

- En el caso del mineral y la caja techo, se observa la presencia de un sistema principal Sistema 1 que es paralelo al alineamiento de la veta y que tiene rumbo aproximado EW con alto buzamiento al N. Un segundo sistema principal Sistema 2 tiene el mismo rumbo, pero de buzamiento contrario.
- En este mismo sector, hay otros dos sistemas secundarios, Sistema 3 y Sistema 4, que tienen ambos, rumbo NS con buzamiento moderado tanto al E y W respectivamente. Para el caso de la caja piso existe un sistema principal Sistema 1 casi EW con alto buzamiento al N, este sistema está asociado al

rumbo de la veta. Un segundo sistema principal Sistema 2 tienen rumbo NEE con moderado buzamiento al SE.

- En la caja piso, el tercer sistema principal Sistema 3 tiene rumbo NS con alto buzamiento al W. Los otros sistemas secundarios tienen rumbo NE y NW con altos buzamientos al NW y SW respectivamente.

### **Veta Paola**

- En la caja techo se aprecia la presencia de dos sistemas principales, de los cuales el Sistema 1 siempre es paralelo al alineamiento de la veta con rumbo aproximado EW y alto buzamiento al N. El rumbo del Sistema 2 es similar (EW) pero el buzamiento es contrario y alto dirigido al S.
- Los otros sistemas en la caja techo son secundarios, teniendo el Sistema 3 y Sistema 4 rumbo aproximado de NW con alto buzamiento al SW y NE respectivamente. El Sistema 5 también secundario tiene rumbo NS con moderado buzamiento al E.
- Para el mineral, hay un sistema principal Sistema 1 con rumbo NEE con moderado buzamiento al NW, este sistema también está asociado al rumbo de la veta. Otro sistema principal es el Sistema 2, con una dirección aproximada EW y un fuerte desplazamiento hacia el S. Un tercer sistema principal es el Sistema 3, con una dirección NNW y un fuerte desplazamiento hacia el NE. Un cuarto sistema principal Sistema 4 tiene rumbo NE con alto buzamiento al SE
- Para la caja piso se aprecia la presencia de dos sistemas principales, Sistema 1 y Sistema 2, con rumbos similares EW y alto buzamiento al N y al S respectivamente. Los Sistemas 3 y 4, secundarios, tienen rumbo aproximado NS con altos buzamientos al W y E respectivamente. El Sistema 5,

secundario, es de rumbo NW con alto buzamiento al NE.

En resumen, el aspecto estructural de la veta Paola es similar al de la veta Mirtha, esto puede deberse a que la veta Paola nace como un ramal de la veta Mirtha con rumbo girado de aproximadamente 20°, de allí la similitud entre ambas.

### **Veta Paola Norte**

- Se puede apreciar en la caja techo un sistema principal Sistema 1 con dirección NS y un gran desplazamiento hacia el E. Un segundo sistema principal, el Sistema 2, se orienta hacia el NNW con una considerable inclinación hacia el NE. El tercer sistema principal, el Sistema 3, también posee una dirección NS y un gran desplazamiento hacia W.
- También se puede considerar como principal al cuarto sistema en la caja techo Sistema 4, ya que presenta un rumbo aproximado de EW con un fuerte desplazamiento hacia el N. Este sistema está vinculado al sistema de fallamiento EW presente en toda la zona, y también tiene relación con el Sistema 1 principal de las vetas Mirtha y Paola.
- En la roca mineralizada, se distinguen tres sistemas fundamentales: el Sistema 1 con rumbo NS y un buzamiento moderado hacia el E, además este sistema está vinculado con el rumbo y dirección de la veta, y los Sistemas 2 y 3 con rumbo cercano a NEE con buzamientos empinados y contrarios dirigidos al NW y SE respectivamente.
- Los sistemas principales que se han formado en el mineral se muestran en la caja de piso con una leve variación. Además, existe un Sistema 4 de rumbo EW con un gran desplazamiento al N. Además, se observa un Sistema 5 con orientación NNW y un fuerte desplazamiento SW.



- En ambas cajas se observa un sistema de rumbo EW con un gran desplazamiento hacia el N, este sistema podría estar relacionado con el sistema principal de las vetas Mirtha y Paola debido a su similitud, y también podría estar relacionado con el sistema principal de fallamiento.

Geológicamente se puede apreciar que la veta Paola Norte es la continuación de la veta Paola que por efecto del tectonismo y fallamiento de la zona ha desviado la veta Paola Norte hacia un rumbo NS, de allí que el arreglo estructural tiene similitud de comportamiento entre la veta y sus cajas.

### **Aspectos Estructurales**

Las propiedades estructurales de las discontinuidades se determinaron a través del análisis estadístico de la información recogida tanto en el mapa geomecánico interno de la mina como en el registro geomecánico interno, así como la información de estructuras registradas en los planos geológicos proporcionados, por otro lado, también se tiene información del logueo geotécnico de los testigos de los sondajes diamantinos (ver Anexos 1 y 2), la que se intentó sincronizar con las observaciones realizadas en el lugar. De acuerdo con esto, las siguientes son las características estructurales más relevantes de las discontinuidades, ya sean mayores o menores:

### **Discontinuidades mayores (fallas):**

Se ha podido observar las fallas comunes cercanas a las vetas que por lo general tienen espaciamientos alrededor de 5 m con persistencia de decenas de metros. La mayoría de estas fallas se orientan en línea recta con las vetas, mostrando relleno de materiales de arcilla, panizo y óxidos de espesores que oscilan entre 10 y 20 cm. Las aperturas son de 5 mm. En ciertos segmentos, las superficies de las caras son lisas y presentan espejos de fallas.

Esta descripción corresponde a las fallas comunes, ya que en el caso de las fallas Norte y Carmen, sus características son distintas. Las fallas constituyen conductos para el agua.

#### **Discontinuidades menores (diaclasas):**

La descripción de estas características es similar para el entorno de la masa rocosa en las tres vetas. Sus características estructurales son: espaciamiento por lo general está entre 6 a 20 cm, teniendo la masa rocosa alejada de las vetas, espaciamientos mayores a 20 cm a excepción de la caja techo de la veta Paola Norte. Se encuentra entre 3 y 10 m de persistencia, con una apertura variable inferior a 1 mm, con paredes levemente rugosas, el relleno es suave con presencia de arcilla y óxidos, las paredes de las discontinuidades presentan ligeras variaciones, y hay una presencia de humedad en las paredes de las discontinuidades.

#### **Clasificación de la Masa Rocosa**

La categorización geomecánica de la masa de roca se llevó a cabo empleando el criterio de Bieniawski de 1989 (RMR - Evaluación de la Masa Rocosa o Valoración de la Masa Rocosa). Los valores de resistencia compresiva de la roca sin alteraciones se lograron siguiendo los procedimientos detallados en la Sección 4.5.1 – Resistencia de la roca sin alteraciones. Los valores para determinar la calidad de la roca (RQD) se establecieron por un lado a través del registro lineal de discontinuidades utilizando la relación sugerida por Priest & Hudson (1986), donde la frecuencia de fracturamiento por metro lineal fue el principal parámetro de entrada. Por otro lado, se determinaron directamente durante el logueo geotécnico de los testigos mediante los sondeos diamantinos. La tabla siguiente muestra el criterio modificado de Bieniawski (1989) para esta

evaluación con el objetivo de categorizar a la masa rocosa:

**Tabla 5. Metodología para la Categorización de la Masa de Roca**

Tipo de Roca	Rango RMR	Rango Q	Calidad según RMR
II	> 60	> 5.92	Buena
IIIA	51 – 60	2.18 – 5.92	Regular A
IIIB	41 – 50	0.72 – 1.95	Regular B
IVA	31 – 40	0.24 – 0.64	Mala A
IVB	21 – 30	0.08 – 0.21	Mala B
V	< 21	<0.08	Muy Mala

Los datos para categorizar la masa de roca del área de evaluación se han obtenido principalmente de las actividades subterráneas, complementados con los datos del registro geotécnico de los testigos de roca, ambos efectuados en el marco de este estudio.

Los hallazgos de la clasificación geomecánica se exponen en los formatos de los Anexos 1 y 2, y también se exhiben en las Láminas 10 a 27 desde el punto de vista gráfico. Mediante el uso de todos los datos geomecánicos obtenidos, es posible determinar los rangos de calidad de la masa de roca (representada en RMR) en cada veta y sus cajas circundantes. En el Cuadro 4.4 se muestran estos resultados, los mismos que indican que la masa rocosa en general varía generalmente desde calidad Mala B (IV-B) hasta calidad Buena (II) en todos ellos, pero por lo general la masa rocosa está en el rango de Regular B (III-B).

**Tabla 6. Tipo de Roca y Calidad de la Masa Rocosa**

Veta	Sector	Litología	Rango RMR	Calidad de la masa rocosa
Mirtha	Caja techo	Toba and.	22 – 55	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Veta	Brecha de Qz (min)	33 – 55	IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Lava and.	33 – 63	IVA, IIIB, IIIA y II
Paola	Caja techo	Toba and.	22 – 57	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Veta	Brecha de Qz (min)	33 – 52	IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Lava and.	27 – 60	IVB, IVA, IIIB y IIIA
Paola Norte	Caja techo	Toba and.	27 – 49	IVB, IVA y IIIB
	Veta	Brecha de Qz (min)	29 – 54	IVB, IVA, IIIB y IIIA
	Caja piso	Toba and.	40 – 54	IVA, IIIB y IIIA

## **Zonificación Geomecánica de la Masa Rocosa**

Para la implementación lógica de los distintos métodos de cálculo de la mecánica de rocas, es imprescindible que la masa de roca en estudio sea segmentada en zonas con propiedades estructurales y mecánicas parecidas. Esto se debe a que los criterios de diseño y el análisis de los resultados sean válidos únicamente en masas rocosas que muestren características físicas y mecánicas parecidas. Por esta razón, en la planificación de excavaciones subterráneas, es habitual definir el área de análisis en áreas geomecánicas o dominios estructurales.

Se han tenido en cuenta los factores litológicos, geoestructurales y de calidad de la masa rocosa para la zonación geomecánica de la masa rocosa. De acuerdo con esto, la zonación realizada se muestra en secciones, en las Láminas 28 a 47 donde se han tomado en cuenta los promedios ponderados de las calidades de la masa de roca en cada área para cada veta.

Para la zonificación geomecánica en las distintas vetas, se ha utilizado mayormente la información del registro de calidad de masa rocosa en las labores mineras de los distintos niveles. Además, se ha tenido disponible información de logueo geotécnico de sondajes realizado como parte del presente estudio y también los disponibles de estudios previos (15).

Cabe mencionar que la zonificación geomecánica realizada en estudios previos (Ref.: 15) fue un estimado grueso de la calidad de la masa rocosa en base al logueo geotécnico de sondajes, así como del mapeo geomecánico de unas pocas labores mineras subterránea, lo que permitió realizar la citada zonificación. Los resultados de esta zonificación han servido como referente para ver la tendencia de la calidad en distintos sectores de la mina. Otro aspecto a tomar en cuenta es

la calidad de la información geomecánica obtenida en el campo, en algunos casos, según la experiencia o criterio del personal que toman los datos geomecánicos durante los trabajos de campo puede tener repercusión directa en los resultados de cualquier modelo realizado, esto se ha podido constatar que según el modelo realizado en la Ref.: 15, en muchos sectores de la mina la calidad presentada al parecer se halla sobrestimada en unos sectores y subestimada en otros.

En ese sentido, se ha creído conveniente mostrar la información de la zonificación geomecánica de la Ref.: 15 de modo paralelo en los distintos planos de las secciones geomecánicas realizadas por DCR con la finalidad de contrastar ambas zonificaciones.

En las distintas secciones geomecánicas realizadas para el presente estudio se observa que en varios niveles de la mina y para las tres vetas, la información geomecánica adquirida por DCR no es suficiente, en consecuencia, en varios niveles de la mina no se ha podido mostrar la zonificación geomecánica, por tanto, la información de la zonificación realizada en la Ref.: 15 ha permitido ayudar a ver la tendencia de la calidad en dichos sectores.

Según lo descrito en los párrafos precedentes se ha realizado la zonificación en distintas secciones tanto para la veta Mirtha, Paola y Paola Norte. En los siguientes acápites se muestran los resultados de dicha zonificación para cada veta en particular.

### **Zonificación Geomecánica en la Veta Mirtha**

En este caso se elaboraron las secciones 480, 520, 580, 760, 800, 840, 880 y 720, en las cuales se presenta la zonificación. En la Tabla 7 se presenta el resumen obtenido.

**Tabla 7. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Mirtha**

Veta	Nivel	Sección	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Mirtha	4790 – 4890	920, 880	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Lava andesítica	35	DE-IVA
		840, 800, 760, 580, 520, 480	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB
	4540 – 4640	880, 840, 800	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Lava andesítica	35	DE-IVA
		760	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB

En este cuadro puede apreciarse los valores promedio de calidad para cada litología según las secciones correspondientes y en los niveles mencionados. Como se puede apreciar, para el caso de las secciones 980 y 880 que se hallan hacia el extremo Este, la calidad de la masa rocosa es de menor calidad, esto puede estar asociado a que en este sector se halla próximo la veta Paola Norte y la influencia del mismo puede haber influido en que la zona se halle perturbada y las condiciones geomecánicas sean menos favorables. También es importante mencionar que la calidad de la roca caja alejada mejora al dominio DE-IIIB.

Cabe mencionar que lo citado para lo comprendido entre los niveles 4540 y 4640, la información es escasa y lo resumido corresponde principalmente a lo observado en el nivel 4540.

### **Zonificación Geomecánica en la Veta Paola**

Para este caso se puede observar las secciones 760, 800, 840, 880 y 720, las mismas que se presentaron para la veta Mirtha, ya que ambas vetas son ligeramente paralelas. En la Tabla 8 se presenta el resumen obtenido.

**Tabla 8. Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola**

Veta	Nivel	Sección	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Paola	4640 – 4740	920, 840	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB
		880	Caja techo	Toba andesítica	55	DE-IIIA
			Veta	Brecha de Qz (min)	55	DE-IIIA
			Caja piso	Lava andesítica	55	DE-IIIA
	4540 – 4640	880, 840, 800	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Lava andesítica	45	DE-IIIB

Las condiciones geomecánicas en la veta Paola son ligeramente favorables respecto al caso de la veta Mirtha. En general la calidad promedio de la masa rocosa mineralizada y roca encajonante pertenece al dominio DE-IIIB, salvo en una sección, la 880 donde se observa que la calidad puede llegar al dominio DE- IIIA.

Para esta veta, la calidad entre los niveles 4540 y 4640 también no tiene suficiente información, pero la tendencia de la calidad puede inferirse según lo citado en el cuadro previo.

### **Zonificación geomecánica en la veta Paola Norte**

En el caso de la veta Paola Norte, los resultados de la zonificación geomecánica muestran una mayor variación respecto al caso de las vetas Mirtha y Paola, razón por lo que se ha generado 12 secciones espaciadas cada 20 m (020, 040,

220, y 240) con la finalidad de poder apreciar en mayor detalle dicha variación de calidad.

Esta veta tiene un rumbo promedio de NS y el plunge de la estructura va profundizando de Sur a Norte, es decir en las primeras secciones (20 al 80) el

mineral se halla encima del Nv. 4640, en las secciones siguientes ubicadas más al Norte (100 al 140) el mineral llega hasta el Nv. 4540, finalmente en las secciones que continúan al Norte (160 al 240) la estructura mineralizada pasa hasta debajo del Nv. 4540 pero asciende solamente hasta el Nv. 4640, solo en la sección 240 se aprecia que el mineral se encuentra generalmente debajo del Nv. 4540. En tal sentido, la zonificación de la veta Paola Norte estará indicado según las secciones correspondientes que son resumidas en el siguiente cuadro:

**Tabla 9.** Resumen de la zonificación geomecánica en la Veta Paola Norte

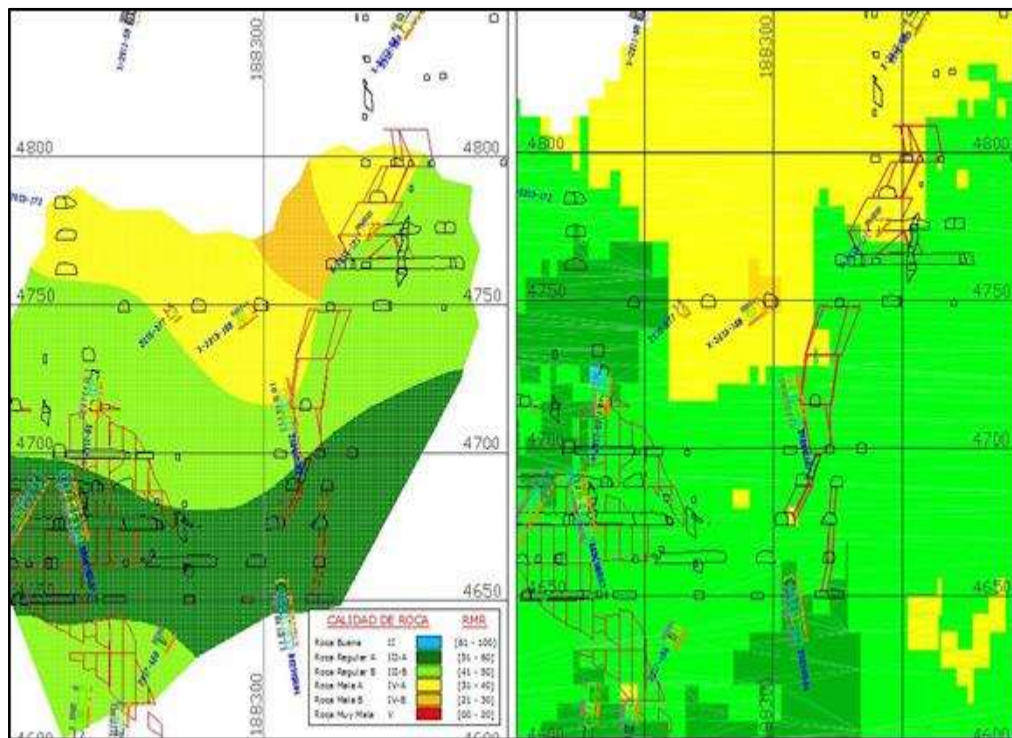
Veta	Sección	Nivel	Sector	Litología	RMR promedio	Dominio estructural
Paola Norte	020	4740 – 4790	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Caja piso	Toba andesítica	35	DE-IVA
	040	4690 – 4790	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB
	060, 080, 100	4640 – 4740	Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	55	DE-IIIA
			Caja piso	Toba andesítica	55	DE-IIIA
	120, 140, 160	4640 – 4690	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Caja techo	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	35	DE-IVA
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Toba andesítica	35	DE-IVA
			Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB
	120, 140, 160, 180, 200, 220, 240	4540 – 4590	Caja techo	Toba andesítica	45	DE-IIIB
			Veta	Brecha de Qz (min)	45	DE-IIIB
			Caja piso	Toba andesítica	45	DE-IIIB

En la Ilustración se muestra como ejemplo los resultados encontrados en la Sección 040, donde el lado izquierdo indica la zonificación realizada con los datos registrados del mapeo geomecánico y el de la derecha es lo encontrado con la Ref.: 15.

A partir de este cuadro podemos señalar los siguientes comentarios:



**Ilustración 6. Ejemplo de Zonificación Geomecánica – Sección 040**



Fuente: Departamento de Geomecánica.

- La zona superior ubicada encima del nivel 4740 tiene por lo general calidad del dominio DE-IVA y DE-IIIB, y localmente DE-IVB, tal es así que en la sección 020, el mineral y las cajas tienen calidad DE-IVA, en el caso de la sección 040 el mineral y la caja techo presentan DE-IVA y DE-IVB, y aproximadamente la mitad del mineral y la caja piso tiene calidad del dominio DE-IIIB. En este caso la zonificación realizada en la Ref.: 15 se asemeja a lo encontrado por DCR.
- Para el mineral que se halla en estas mismas secciones entre los Niveles 4640 y 4740 se observa que la calidad es homogénea y pertenece a los dominios DE-IIIB y DE-IIIA, salvo que en la sección 040 aparece en la caja techo calidad DE-IVA debajo del nivel 4740.
- En las secciones 060, 080 y 100 el mineral se halla entre los niveles 4640 y 4740 y la calidad es del dominio DE-IIIA y en la sección 120 del dominio

DE-IIIB. En el caso de la zonificación de la Ref.: 15 la calidad es generalmente DE-IIIB. Para el caso de la caja techo, ésta es generalmente DE-IVA y la caja piso al dominio DE-IIIA. Cercano al nivel

- 4640 localmente hay rocas del dominio DE-IVA tanto en la caja techo, en el mineral y en la caja piso.
- En la sección 140, tanto el mineral y las cajas se hallan en el dominio DE-IVA entre los niveles 4640 y 4690, esta zonificación coincide con la determinada en la Ref.: 15.
- Un aspecto resaltante a mencionar es que en las secciones 080, 100, 120 y 140, entre los niveles 4640 y 4740, la veta Paola Norte invierte su buzamiento por lo que las cajas también cambiarían de denominación.
- A partir de la sección 160 el mineral a minar se ubica entre los niveles 4540 y 4640. Los resultados de la zonificación de DCR muestra solamente en la zona cercana al nivel 4540 donde la calidad del mineral y las cajas es del dominio DE-IIIB. Esta zonificación coincide en parte con la obtenida en la Ref.: 15 con la diferencia de que en las secciones 160 y 180 la calidad del mineral y la caja techo debajo del nivel 4540 pertenece al dominio DE-IVA.

### **Resistencia de la Roca**

#### **Resistencia de la Roca Intacta**

El comportamiento mecánico de la masa de roca es crucial por la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta ( $c$ ), también conocida como UCS. En el marco del estudio geomecánico de la masa de roca y el análisis geotécnico de los observadores de los sondeos de diamantes, se realizaron pruebas de impacto con el martillo geólogo, conforme a las directrices de la ISRM, y también pruebas de rebote con el martillo de Schmidt, con el objetivo de calcular

la resistencia compresiva de la roca sin alteraciones.

Los valores de rebote con el martillo de Schmidt realizados en campo para estimar el rango de resistencias de la roca intacta, son presentados en el cuadro para las estructuras mineralizadas en estudio. Aquí se puede ver que los valores registrados generalmente son de baja a moderada resistencia lo que servirá más adelante para realizar algunos afinamientos en la adopción de los valores más representativos.

**Tabla 10.** Resultados de los rangos de UCS según el martillo de Schmidt

Veta	Litología	Rango
Mirtha	Lava andesítica	R3 – R4
	Mineral	R3 – R4
	Toba andesítica	R3
	Toba Bx andesítica	R2 – R3
Paola	Mineral	R2 – R4
	Toba andesítica	R2 – R4
	Toba Bx andesítica	R2 – R3
Paola Norte	Mineral	R2 – R4
	Toba andesítica	R2 – R3
	Toba Bx andesítica	R2 – R3

Por otro lado, en la evaluación geomecánica previa realizada el año 2015 (Ref.: 15), se llevó a cabo una cantidad muy significativa de ensayos de mecánica de rocas de los cuales se han aprovechado dichos resultados para la presente evaluación. En aquella oportunidad se realizaron ensayos de carga puntual, compresión uniaxial y compresión triaxial, cuyos resultados resumidos se muestran. En el cuadro se muestra el resumen de los resultados obtenidos de carga puntual  $I_s$  normalizados a diámetro 50 mm.

**Tabla 11. Resultados de ensayos de carga puntual (A) – Ref.: 15**

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	I <sub>s</sub> (MPa)	σ <sub>c</sub> (MPa)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	2.9	69.6
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	5.93	142.32
4590	1	Paola	CP	T-And	2.18	52.32
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	2.09	50.16
4590	3	Paola Techo	VT	Min	1.1	26.4
4640	1	Mirtha	CT	T-And	5.64	135.36
4640	2	Paola	VT	Min	4.57	109.68
4640	3	Paola Norte	VT	Min	4.82	115.68
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	2.56	61.44
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.60	14.4
4690	1	Mirtha	CP	T-And	5.78	138.72
4690	2	Paola	VT	Min	5.26	126.24
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	5.99	143.76
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	1.15	27.6
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	6.29	150.96
4740	2	Paola	CT	T-And	1.47	35.28
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	1.78	42.72
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	3.72	89.28
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	6.31	151.44
4790	2	Paola	VT	Min	6.28	150.72
4840	1	Mirtha	CP	T-And	6.36	152.64
4840	2	Paola	CP	T-And	4.79	114.96
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.82	19.68
4890	2	Paola	VT	Min	5.75	138

También se realizaron ensayos de carga puntual en la mina en las distintas vetas, así como en diferentes litologías y niveles de la misma. El resumen de estos resultados está resumido en la Tabla12, donde la resistencia compresiva ha sido

estimada por el consultor con los datos disponibles de Is. En la tabla se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial, en la otra tabla se muestra los resultados de los ensayos de compresión triaxial, también se han logrado, además de la resistencia compresiva no confinada de la roca sin defectos, los valores de la constante "mi" del criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006) y los parámetros de resistencia al corte de Mohr Coulomb: cohesión y ángulo de fricción, todos estos parámetros corresponden a la roca sin defectos.

**Tabla 12. Resumen de los ensayos de carga puntual (B) – Ref.: 15**

Veta	Litología	I <sub>s</sub> (MPa)			c (MPa)		
		Rango	Promedio	Desv. est.	Rango	Promedio	Desv. est.
Mirtha							
	Lava andesítica	0.78 – 8.64	3.84	2.68	18.9 – 230.1	102.9	71.4
	Mineral	0.24 – 9.11	4.00	2.13	6.7 – 238.0	108.0	56.5
	Toba andesítica	0.04 – 8.53	3.47	2.10	1.0 – 239.9	73.5	58.5
	Toba Bx andesítica	0.05 – 9.17	1.85	1.78	1.3 – 219.3	50.2	47.7
Paola	Mineral	0.03 – 8.38	3.19	2.61	0.8 – 212.4	84.1	68.1
	Toba andesítica	0.17 – 3.16	1.41	0.92	4.2 – 81.2	37.2	23.8
	Toba Bx andesítica	0.02 – 3.16	1.68	1.51	0.5 – 81.2	43.3	38.9
Paola Norte	Mineral	0.52 – 3.78	2.09	1.08	14.2 – 100.9	56.0	29.7
	Toba andesítica	0.31 – 2.88	1.12	0.89	9.7 – 78.5	31.2	24.4
	Toba Bx andesítica	0.06 – 4.36	1.75	1.44	1.6 – 109.7	45.5	35.2

**Tabla 13. Resultados de ensayos de compresión uniaxial – Ref.: 15**

<b>Nivel</b>	<b>Muestra</b>	<b>Veta</b>	<b>Sector</b>	<b>Litología</b>	<b>Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)</b>
4540	1	Paola	CP	TBx-And	47.75
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	93.83
4590	1	Paola	CP	T-And	61.89
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	49.47
4590	3	Paola Techo	VT	Min	41.93
4640	1	Mirtha	CT	T-And	71
4640	2	Paola	VT	Min	53.30
4640	3	Paola Norte	VT	Min	93.31
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	84.29
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	19.91
4690	1	Mirtha	CP	T-And	82.05
4690	2	Paola	VT	Min	47.75
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	109.96
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	39.73
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	123.11
4740	2	Paola	CT	T-And	39.89
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	42.12
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	72.21
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	67.4
4790	2	Paola	VT	Min	62.88
4840	1	Mirtha	CP	T-And	54.15
4840	2	Paola	CP	T-And	99.72
4890	1	Mirtha	CT	T-And	34.82
4890	2	Paola	VT	Min	108.5

**Tabla 14. Resultados de ensayos de compresión triaxial – Ref.: 15**

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	$\sigma_c$ (MPa)	$\mu$	Cohesión (MPa)	Angulo de fricción (°)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	52.3	8.29	10.1	47.04
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	219.9	50	18.756	69.9
4590	1	Paola	CP	T-And	57.9	11.17	9.878	51.31
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	41.5	50	4.43	64.56
4590	3	Paola Techo	VT	Min	41.8	7.91	8.258	45.77
4640	1	Mirtha	CT	T-And	74.1	37.284	7.719	64.69
4640	2	Paola	VT	Min	55.4	10.67	9.638	50.59
4640	3	Paola Norte	VT	Min	87.4	28.577	9.927	62.92
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	65.9	24.427	8.132	60.52
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	16.4	3.674	4.378	32.15
4690	1	Mirtha	CP	T-And	82.1	1	8.827	64.08
4690	2	Paola	VT	Min	46.4	16.254	6.869	55.03
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	115.5	50	10.284	68.36
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	23.4	27.367	3.276	56.87
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	117.8	19.948	15.414	60.07
4740	2	Paola	CT	T-And	41.8	5.702	9.414	41.13
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	41.8	8.018	8.225	45.95
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	67.6	38.945	7.042	64.61
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	74.5	50	7.020	66.95
4790	2	Paola	VT	Min	67.6	31.736	7.539	63.01
4840	1	Mirtha	CP	T-And	68.6	22.288	8.755	59.75
4840	2	Paola	CP	T-And	96.8	17.991	13.317	58.45
4890	1	Mirtha	CT	T-And	38.4	50	5.71	54.58
4890	2	Paola	VT	Min	159.8	50	13.862	69.21

Adicionalmente, para la roca intacta también se han realizado ensayos de tracción indirecta por el Método Brasileiro y ensayos de propiedades físicas,

presentándose los resultados. En el cuadro se presenta el resumen de resultados de tracción indirecta y en el cuadro el resumen para el caso de propiedades físicas.

**Tabla 15. Resultados de ensayos de tracción indirecta – Ref.: 15**

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Resistencia a la tracción (MPa)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	5.05
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	6.09
4590	1	Paola	CP	T-And	3.83
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	6.51
4590	3	Paola Techo	VT	Min	3.72
4640	1	Mirtha	CT	T-And	5.07
4640	2	Paola	VT	Min	3.92
4640	3	Paola Norte	VT	Min	3.82
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	3.43
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	1.21
4690	1	Mirtha	CP	T-And	3.22
4690	2	Paola	VT	Min	4.52
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	5.61
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	2.59
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	5.13
4740	2	Paola	CT	T-And	4.27
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	4.63
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	6.44
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	6.22
4790	2	Paola	VT	Min	5.89
4840	1	Mirtha	CP	T-And	6.19
4840	2	Paola	CP	T-And	4.49
4890	1	Mirtha	CT	T-And	2.11
4890	2	Paola	VT	Min	5.66



**Tabla 16.** Resultados de las propiedades físicas de la roca intacta – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Porosidad Aparente (%)	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Aparente (kN/m <sup>3</sup> )
4540	1	Paola	CP	TBx-And	0.27	2.58	25.28
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	0.02	2.73	26.73
4590	1	Paola	CP	T-And	0.18	2.39	23.45
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	0.08	2.63	25.73
4590	3	Paola Techo	VT	Min	0.11	3.30	32.37
4640	1	Mirtha	CT	T-And	0.55	2.44	23.92
4640	2	Paola	VT	Min	0.55	2.44	23.92
4640	3	Paola Norte	VT	Min	0.05	3.07	30.14
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	0.13	2.55	24.99
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.17	2.26	22.14
4690	1	Mirtha	CP	T-And	0.36	2.63	25.8
4690	2	Paola	VT	Min	0.15	2.58	25.31
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	0.41	2.48	24.32
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	1.21	2.33	22.89
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	0.09	2.42	23.72
4740	2	Paola	CT	T-And	0.42	2.47	24.17
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	0.32	2.28	22.35
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	0.22	2.54	24.94
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	0.05	2.31	22.66
4790	2	Paola	VT	Min	0.30	2.36	23.11
4840	1	Mirtha	CP	T-And	0.09	2.14	21.01
4840	2	Paola	CP	T-And	0.26	2.7	26.45
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.48	2.32	22.79
4890	2	Paola	VT	Min	0.19	2.14	20.95

Los valores a utilizarse para los análisis de diseño, que son presentados en el capítulo siguiente han sido motivo de análisis de interpretación a partir de la data extraída del informe de la Ref.: 15 y de las observaciones de campo realizadas como parte del presente estudio.

### **Resistencia de las Discontinuidades**

Desde la perspectiva de la estabilidad regulada por las discontinuidades estructurales, resulta crucial entender las propiedades de resistencia al corte de las discontinuidades, dado que estas representan superficies de debilidad de la masa de roca y, por ende, posibles planos de fallo. En este escenario, la

resistencia al corte se rige por los parámetros de fricción y cohesión establecidos en los criterios de falla de Mohr-Coulomb. Estos parámetros se establecieron a través de pruebas de corte directo en un laboratorio especializado en mecánica de rocas.

**Tabla 17.** Valores de la cohesión y ángulo de fricción de las discontinuidades – Ref.: 15

Nivel	Muestra	Veta	Sector	Litología	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
4540	1	Paola	CP	TBx-And	0.076	29.64
4540	2 A-B	Paola Techo	CT	T-And	0.104	33.94
4590	1	Paola	CP	T-And	0.112	27.12
4590	2	Paola Norte	CP	T-And	0.122	31.47
4590	3	Paola Techo	VT	Min	0.040	36.57
4640	1	Mirtha	CT	T-And	0.098	31.53
4640	2	Paola	VT	Min	0.090	29.17
4640	3	Paola Norte	VT	Min	0.130	33.35
4640	4	Paola Techo	CP	TBx-And	0.132	28.99
4640	5	Paola T. Norte	CT	T-And	0.026	27.37
4690	1	Mirtha	CP	T-And	0.080	30.96
4690	2	Paola	VT	Min	0.080	31.64
4690	3	Paola Norte	CP	TBx-And	0.058	30.45
4690	4 A-B	Paola T. Norte	CT	T-And	0.056	29.23
4740	1	Paola (Mirtha)	CP	T-And	0.110	35.61
4740	2	Paola	CT	T-And	0.138	32.86
4740	3 A-B	Paola Norte	CP	T-And	0.095	28.81
4740	4	Paola T. Norte	CI	T-And	0.114	30.91
4790	1	Mirtha	CP	TBx-And	0.084	30.91
4790	2	Paola	VT	Min	0.081	31.36
4840	1	Mirtha	CP	T-And	0.106	31.42
4840	2	Paola	CP	T-And	0.076	33.40
4890	1	Mirtha	CT	T-And	0.084	29.11
4890	2	Paola	VT	Min	0.104	33.94

### Resistencia de la Masa Roca

Para calcular los indicadores de resistencia de la masa de roca, se aplicó

el criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006), utilizando el software ROCLAB de Rocscience Inc. (2013). Por lo que se ha considerado con sumo cuidado en seleccionar los valores más representativos de los resultados de laboratorio correlacionando con las observaciones realizadas durante los trabajos de campo, dado esto, se determinan los valores de calidad de la masa de roca involucrada en cada dominio estructural, la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta, y la constante "mi" de la roca intacta, todos estos valores se desarrollan en esta evaluación para cada veta. El cuadro siguiente muestra los parámetros de resistencia para la masa de roca.

**Tabla 18. Factores de Resistencia de la Masa Rocosa**

Litología	GSI*	$\sigma_{ci}$ (MPa)	(kN/m <sup>3</sup> )	"mi"	m <sub>b</sub>	S <sub>mr</sub>	E <sub>mr</sub> MPa	$\nu$
<b>Veta Mirtha</b>								
Toba andesítica	35	30	24.5	15	1.137	0.000436	897	0.28
Toba andesítica	45	50	24.5	15	1.691	0.001434	2917	0.26
Brecha de Qz-min	35	50	26.0	25	1.896	0.000436	1602	0.28
Brecha de Qz-min	45	80	26.0	25	2.819	0.001434	5000	0.25
Lava andesítica	35	40	25.0	22	1.668	0.000436	1367	0.28
Lava andesítica	45	70	25.0	22	2.481	0.001434	4667	0.26
<b>Veta Paola</b>								
Toba andesítica	45	55	24.5	15	1.691	0.001434	3208	0.26
Toba andesítica	55	80	24.5	15	2.515	0.004714	8770	0.24
Brecha de Qz-min	35	35	26.0	25	1.896	0.000436	1122	0.28
Brecha de Qz-min	45	60	26.0	25	2.819	0.001434	3750	0.26
Lava andesítica	45	60	25.0	22	2.481	0.001434	4000	0.26
Lava andesítica	55	90	25.0	22	3.689	0.004714	11276	0.24

<b>Veta Paola Norte</b>								
Toba andesítica	35	25	24.5	15	1.137	0.000436	748	0.28
Toba andesítica	45	50	24.5	15	1.691	0.001434	2917	0.26
Toba andesítica	55	70	24.5	15	2.515	0.004714	7674	0.24
Brecha de Qz-min	35	35	28.0	25	1.896	0.000436	1122	0.28
Brecha de Qz-min	45	60	28.0	25	2.819	0.001434	3750	0.26
Brecha de Qz-min	55	80	28.0	25	4.192	0.004714	9396	0.24

Donde:

GSI : Calidad de la masa rocosa  $GSI = RMR$  (para condiciones húmedas)  $\sigma_{ci}$  : Resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta  $\gamma$  : Densidad de la roca intacta  $M_i$  : Constante de la roca intacta  $M_b$  : Constante de la masa rocosa  $smr$  : Constante de la masa rocosa

$E_{mr}$  : Módulo de deformación de la masa rocosa  $\nu$  : Relación de Poisson de la masa rocosa

Cabe señalar que en las vetas Mirtha y Paola la toba andesítica está relacionada con la caja techo la brecha de cuarzo con el mineral y la lava andesítica con la caja piso. En el caso de Paola Norte la toba andesítica está relacionada a la caja techo y piso y la brecha de cuarzo al mineral.

### **Condiciones del Agua Subterránea**

La existencia de agua en la masa de roca afecta de manera negativa las condiciones de estabilidad de las actividades subterráneas. Su principal impacto es la presión que aplica a las discontinuidades, reduciendo la resistencia al corte y, consecuentemente, reduciendo el factor de seguridad o nivel de estabilidad. Por esta razón, es crucial considerarlo.

Como se pudo prestar atención durante los mapeos geomecánicos de las

labores subterráneas que la masa rocosa se muestra húmeda a seca a pesar de que la evaluación se hizo en época de lluvias, en un mínimo porcentaje (5 %) de las estaciones de mapeo se han registrado condiciones mojadas con ligera filtración de agua.

Cuando la masa rocosa es de mala calidad la presencia del agua puede influir significativamente de manera negativa en las condiciones de estabilidad de las labores mineras que crucen por estos sectores, en ese sentido es recomendable controlar la presencia del agua llevando un adecuado manejo y drenaje de ella a medida que la operación se desarrolle.

En algunos sectores se ha podido apreciar las filtraciones de agua que son debidas a:

- La presencia de cámaras de bombeo en las labores de los subniveles superiores.
- Filtraciones por fallas paralelas a las estructuras de las vetas.
- Presencia de agua estancada en labores de subniveles superiores.
- Filtraciones de agua en labores cercanas a superficie en el nivel 4840 por algunos tramos de la Falla Mirtha y de la Falla 1, muy cercanos a las estructuras de la veta Paola.

En el último caso, la presencia del agua influye considerablemente en la estabilidad del macizo rocoso debido a que la filtración se halla en zona donde el macizo es de calidad IVA con tendencia a IVB con rellenos de panizos y brechas.

Según el estudio hidrogeológico realizado por GWR Ingenieros Asociados S.

A. C. en el año 2015, las filtraciones y el drenaje subterráneo en la Unidad Minera Tambomayo se evidencian a través de las labores mineras y galerías de

drenaje en los Niveles 4890, 4840, 4790 y 4740. Ese mismo estudio deja constancia que existe presencia mínima de agua subterránea en los diferentes niveles, que se manifiestan mediante goteos a través del medio fracturado y diaclasas del macizo rocoso.

### **Esfuerzos in-situ**

Es crucial determinar la envergadura de los esfuerzos in-situ, dado que estos afectarán directamente las condiciones de estabilidad de las excavaciones. En vista de que no se dispone de mediciones de esfuerzos in-situ para la Mina Tambomayo se han estimado los mismos tomando en cuenta 2 razonamientos:

- El primero, empleando la noción de carga litostática (Hoek & Brown, 1978) en combinación con el criterio de Sheorey (1994).
- El otro, empleando los datos del Mapa Mundial de Esfuerzos (WSM).

Se ha tomado en cuenta la profundidad media de las distintas áreas de estudio y la constante "k" del criterio de Sheorey, tal como se muestra en la tabla. La veta Paola Norte varía en profundidad de 300 a 400 m.

***Tabla 19. Magnitud de los Esfuerzos in-situ.***

<b>Zona</b>	<b>Profundidad media (m)</b>	<b>Constante "k"</b>	<b>Esfuerzo vertical (MPa)</b>	<b>Esfuerzo horizontal (MPa)</b>
Paola Norte	350	0.52	9.1	4.7
Paola	320	0.54	8.3	4.5
Mirtha	150	0.80	3.9	3.1
Mirtha	420	0.50	10.4	5.2

De modo particular del sitio de minado en cada veta, existen varias profundidades de minado según el nivel donde se lleve a cabo la explotación. En

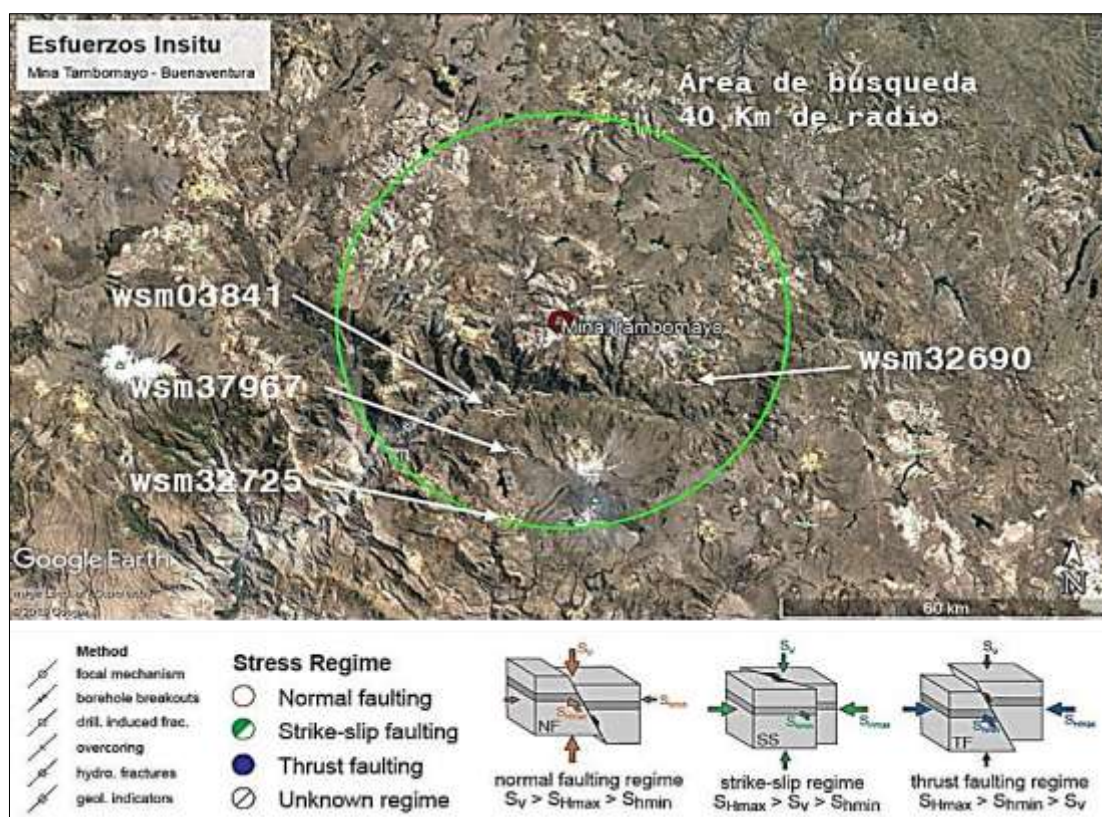
ese sentido para los modelos particulares de simulación se han establecido los esfuerzos in-situ en los distintos modelos para los cálculos correspondientes.

Respecto al WSM (Ref.: 8), se ha considerado un área de búsqueda de 40 km a lo largo de la circunferencia. En este área de búsqueda se han considerado los 4 datos existentes (wsm03841, wsm32690, wsm37967 y wsm32725).

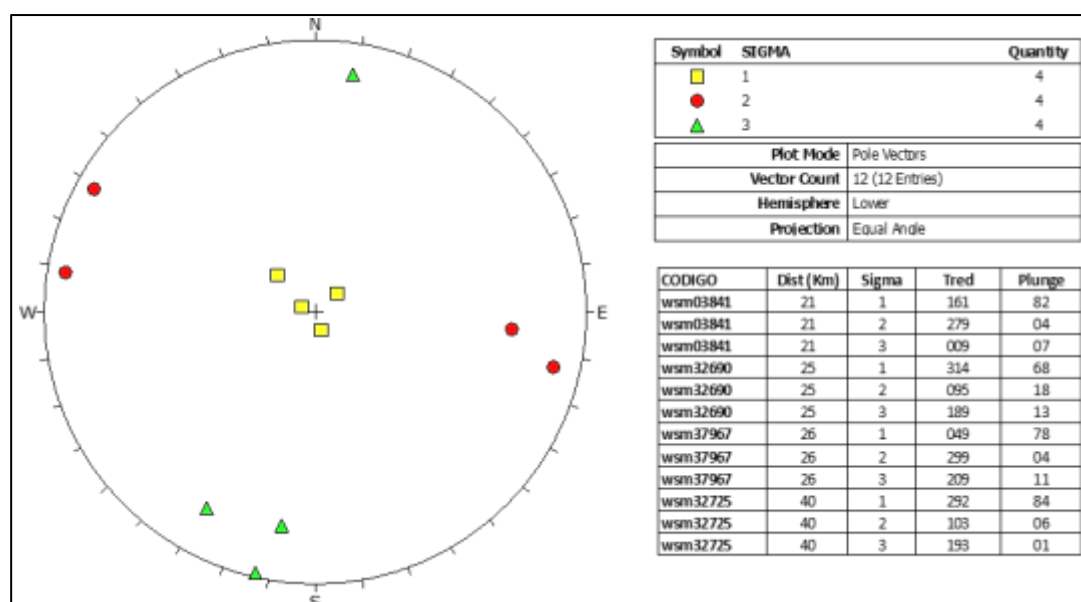
En la ilustración se muestra el estereograma con la orientación de los esfuerzos principales de los 4 datos encontrados en WSM para la estimación de los esfuerzos in-situ.

A partir de la información obtenida del WSM se puede mencionar lo siguiente:

**Ilustración 7.** Ubicación de los datos obtenidos del WSM.



**Ilustración 8.** Orientación de los Esfuerzos Principales de los datos obtenidos del WSM.



- En todos los casos el esfuerzo principal mayor es aproximadamente vertical.
- En todos los casos los esfuerzos principales menor e intermedio son aproximadamente horizontales.
- El esfuerzo principal menor tiene orientación aproximada NS y el esfuerzo principal intermedio tiene una orientación EW.
- En base a estos 3 puntos se concluye que el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal, es decir  $k < 1$ .

Considerando lo señalado en los párrafos anteriores y hasta que no se cuenten con mediciones de esfuerzos in-situ, es conveniente asumir para el caso de Mina Tambomayo valores de la constante  $k$  igual a 1 o menores que 1.

#### 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

##### Consideraciones sobre las Condiciones de Estabilidad

##### Orientaciones Preferenciales de Avance de las Excavaciones

Hay direcciones favorables donde se puede coordinar el progreso de las excavaciones, con el fin de alcanzar condiciones de estabilidad superiores para



ellas. Las condiciones más propicias para la estabilidad se producen cuando las excavaciones se realizan en sentido perpendicular al sistema principal de discontinuidades estructurales. Por otro lado, las condiciones más desfavorables para la estabilidad se producen cuando las excavaciones se realizan en sentido paralelo al sistema principal de discontinuidades.

Para el asunto de la veta Mirtha, en el mineral y en la caja techo la dirección preferencial ocurre cuando se avanza en dirección SW-NE o en la dirección NW-SE, debido a que los sistemas principales tienen rumbo NS y EW. En la caja piso solo queda el alineamiento SW-NE.

En la veta Paola, la dirección preferencial tanto en la roca mineralizada y roca encajonante ocurre en el alineamiento de NS al SW-NE.

Para el caso de la veta Paola Norte, según el arreglo estructural que presenta la masa rocosa del mineral y en la caja techo, la dirección preferencial ocurre cuando las excavaciones son orientadas en la dirección SW-NE a EW, y en el caso de la caja piso resulta que la dirección debería estar dirigida de EW hacia el NW-SE.

Con la dirección preferencial citada se lograría mejores condiciones de estabilidad de las excavaciones que se realizarán como parte del minado del yacimiento por lo que es recomendable adoptar estas direcciones en la medida que sea posible, lo cual favorecerá a la mejora de las condiciones de estabilidad, utilización de menor sostenimiento y mayor velocidad al minado. Para el caso de los tajeos en las vetas, por razones de orden técnico estos por lo general estarán alineados con el rumbo de las mismas y en las zonas potentes la opción es adoptar tajeos alineados perpendicular a la veta. En cualquier caso, hay que tener en cuenta estos hechos para la adopción de los sistemas de

sostenimiento requeridos.

### **Aberturas máximas de las Excavaciones y Sostenimiento**

Para realizar esta evaluación, las excavaciones se han clasificado en tres grupos:

- Excavaciones permanentes
- Excavaciones temporales
- Tajeos.

#### **Excavaciones Permanentes**

Incluyen estos elementos: rampas, galerías de nivel, cámaras de trituración, talleres de mantenimiento, estaciones de bombeo, comedores, polvorines, entre otros.

Como sea posible, estas excavaciones deben dirigirse en función de las direcciones de progreso más favorables previamente mencionadas. En dicho escenario, se optimizarán las condiciones de estabilidad, la rapidez de progreso de la excavación y se reducirán las necesidades de sustentabilidad.

En estas excavaciones se requiere la instalación de un sostenimiento también permanente, que resista la corrosión y pueda resistir cargas extra derivadas de las variaciones en las condiciones de esfuerzos durante toda la vida de la mina.

De acuerdo con los hallazgos de la categorización y la zonación geomecánica de las diversas vetas y su ambiente circundante, las excavaciones permanentes se ubicarán en la caja piso para todos los casos ya que en este sector la roca se presenta con las mejores condiciones geomecánicas donde predomina la presencia de masas rocosas de los dominios DE-III A y DE-III B.

Si tomamos en cuenta el criterio previo para categorizar la masa de

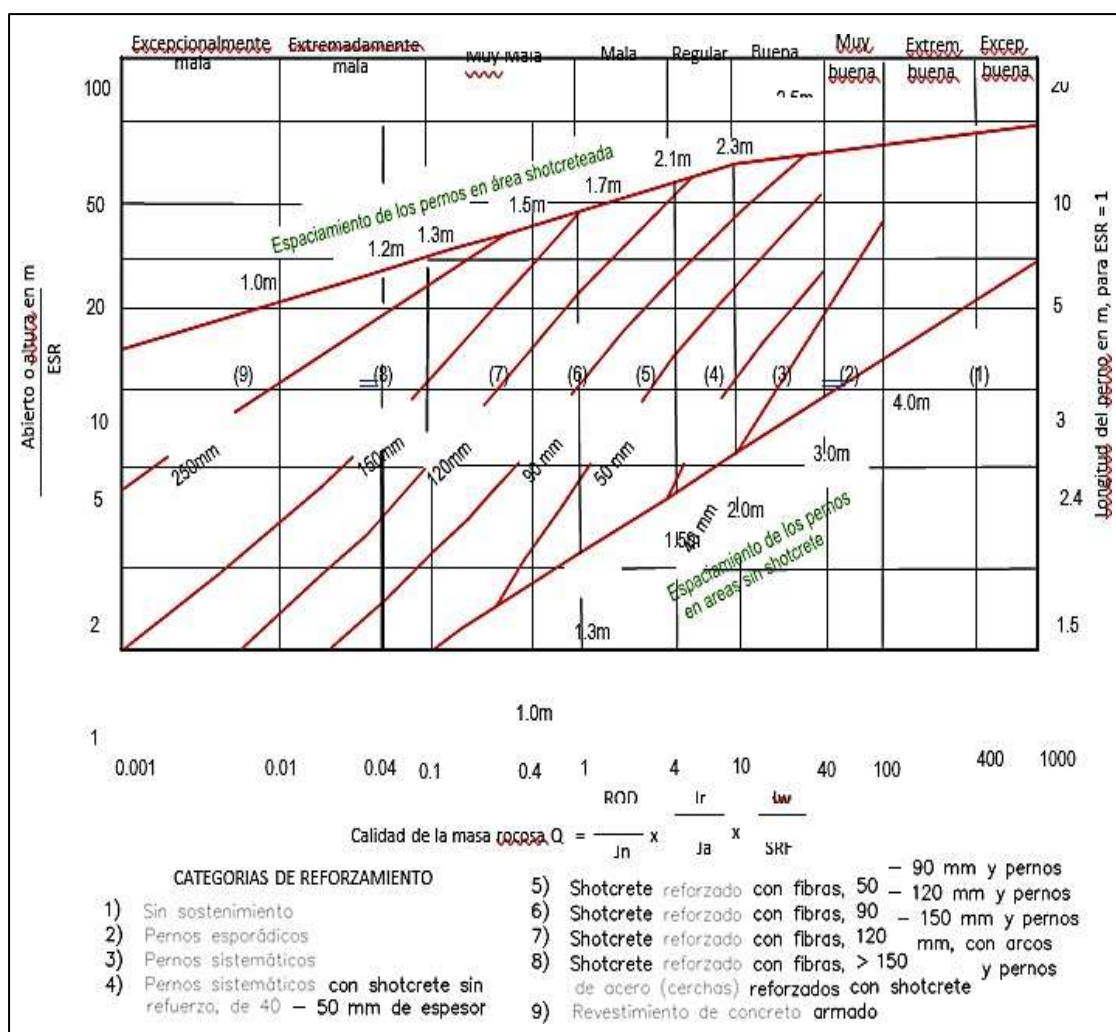
roca del yacimiento, podemos determinar las siguientes aperturas máximas medias sin sostenimiento sistemático de excavaciones para los distintos rangos de valores RMR ajustados por la dirección de las discontinuidades, considerando también la profundidad en la que se encuentra el minado.

Tabla 20. Maximización de las Aberturas de las Excavaciones Permanentes

Dominio	Rango RMR	Promedio RMR	Abertura promedio (m)	Tiempo de autosostenimiento
DE-II	> 60	65	9.0	4 meses
DE-III A	51 – 60	55	5.7	1 mes
DE-III B	41 – 50	45	3.5	4 días
DE-IV A	31 – 40	35	2.4	20 horas

Si tomamos en cuenta los criterios de calidad reportados en el capítulo previo, aplicando los criterios de Bieniawski (1989), se calcula que la abertura máxima sin sostenimiento sistemático para masas rocosas de calidad Regular A (III A) es de alrededor de 5.7 m aproximadamente. En el contexto de las masas rocosas de calidad Buena (III A), las aperturas de cerca de 5.7 m o menos requerirán únicamente sostenimiento esporádico dependiendo del requerimiento local de la roca. Esto se puede corroborar en la Figura 11, donde  $Q = 3.39$  (RMR cerca de 55) y  $ESR = 1.6$ . El sostenimiento esporádico se realizaría con pernos de roca de forma de barra o varilla corrugada, cementados o recubiertos con resina, con una longitud de 7 a 8 pies. La implementación del sostenimiento también requiere considerar la creación de cuñas en el techo y paredes conforme a los resultados obtenidos.

**Ilustración 9.** Guía para el sostenimiento de excavaciones permanentes  
(Grimstad y Barton, 1993)



Es importante destacar que en la minería subterránea del país, los trabajos mineros permanentes más habituales son aquellos con aproximadamente 5 m de abertura máxima (rampas y galerías de nivel, entre otros), situación que también se presenta en la mina Tambomayo. Para estas labores, el sostenimiento recomendado se presenta en la tabla.

**Tabla 21.** *Sostenimiento para labores de avance permanentes*

Dominio	Rango RMR	Sostenimiento
DE-II	> 60	Solo necesita un sostenimiento esporádico
DE-III A	51 – 60	Necesita solo un sostenimiento temporal.
DE-III B	41 – 50	Pernos sistemáticos de 7 pies de longitud, dispuestos entre 1.3 y 1.5 metros de distancia. Si es necesario instalar una malla de metal. Alternativamente, puedes utilizar una capa de shotcrete de 2"
DE-IV A	31 – 40	Pernos sistemáticos de 7 pies de longitud, espaciados cada 1.0 m + si es necesario una malla metálica + shotcrete de 2" a 3" de grosor.
DE-IV B	21 – 30	Previamente, aplicar una capa de shotcrete reforzado de 2" de grosor. Pernos sistemáticos con una longitud de 7 pies, espaciados cada 1.0 m, con una malla metálica y un shotcrete de 2" a 3" de espesor. Por otro lado, cimbras de tipo 6W20 con espaciado de 1.3 a 1.5 m.

Para el caso de las excavaciones permanentes, los pernos de roca recomendados son los de tipo varilla corrugada o barra helicoidal, completamente inyectados con cemento o con resina (cuando haya presencia de agua). Para excavaciones de mayor o menor envergadura, se requerirán nuevas estimaciones del sostenimiento. Para ello, entre otros aspectos, se aconseja el uso de la guía de sostenimiento presente en la ilustración.

Por otro lado, hay que tener en cuenta la presencia de zonas de falla o intersecciones de fallas, en estos casos se deberá realizar una evaluación geomecánica particular para la estimación de la calidad de la masa rocosa y finalmente definir adecuadamente el sostenimiento utilizando y según el tamaño de la excavación, siendo recomendable instalar sostenimiento sistemático en bóveda y hastiales, utilizando pernos de roca tipo varilla corrugada o barra helicoidal y shotcrete de ser necesario. La longitud y espaciamiento de los pernos, así como el espesor del shotcrete serán determinados mediante la evaluación geomecánica mencionada.

El análisis que se ha expuesto hasta ahora es legítimo únicamente si no

existen formaciones de cuñas en los techos y paredes de las excavaciones. Por lo tanto, este estudio debe ser complementado con la valoración de la estabilidad regulada estructuralmente que se expone más adelante.

### **Excavaciones Temporales**

Aquí se contemplan las tareas de progreso vinculadas al minado en los tajeos, tales como cruceros y galerías de perforación en los subniveles. Estos son excavaciones temporales destinadas al ingreso de personal dentro de estas, de tamaño lo suficientemente reducido para facilitar un adecuado desatado periódico o reforzarla adicionalmente. Además, en este escenario se podrían considerar excavaciones de 5 metros de anchura.

En la tabla se presentan los estimados para el sostenimiento de labores de avance temporales. Considerando las calidades medias de masa de roca, se ha establecido el soporte requerido para este tipo de excavaciones.

***Tabla 22. Mantenimiento para trabajos de progreso temporal***

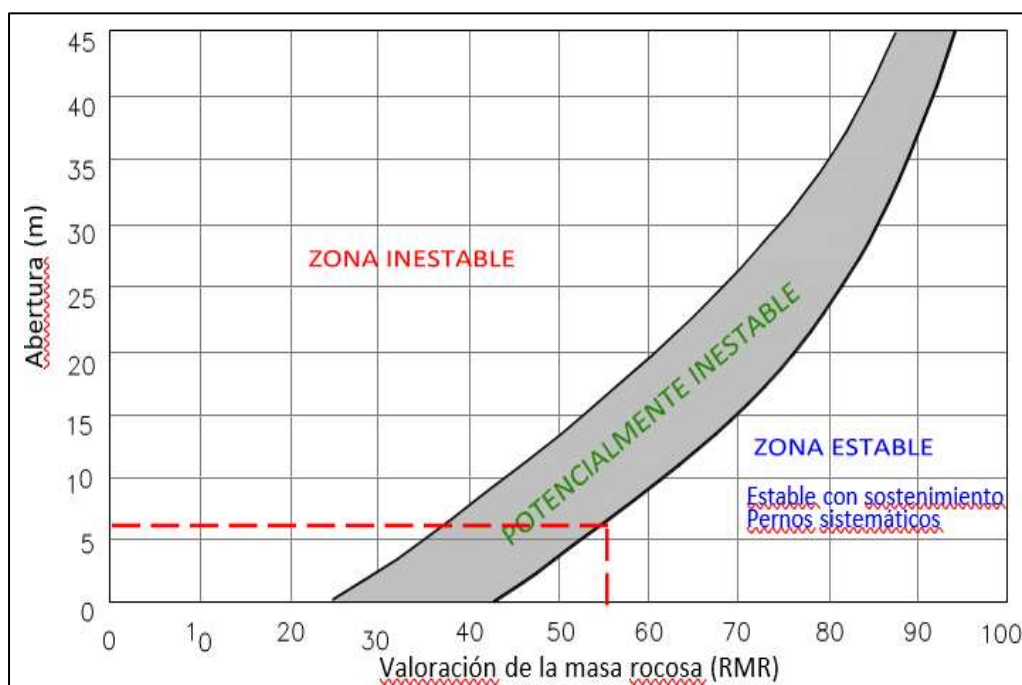
Dominio	Rango RMR	Sostenimiento
DE-II	> 60	Requiere solo sustento esporádico.
DE-IIIA	51 – 60	Requiere solo sustento esporádico.
DE-IIIB	41 – 50	Pernos de 7 pies de longitud, dispuestos cada 1.5 m. Malla de metal si es necesaria. Como opción, una capa de shotcrete de 2” de espesor puede ser utilizada.
DE-IVA	31 – 40	Pernos metálicos de 7 pies de longitud, espaciados entre 1.2 y 1.5 m, si se necesita malla metálica + una capa de shotcrete de 2” de espesor si es necesario.
DE-IVB	21 – 30	Inicialmente, ubicar una capa de shotcrete de 2”. Posteriormente, pernos sistemáticos de 7 pies de longitud, dispuestos cada 1.0 m, con una malla metálica y un shotcrete de 2” de espesor.

Para trabajos temporales, se aconseja el uso de pernos de roca de tipo split sets, mientras que en terrenos difíciles como DE-IVA y DE-IVB, es

aconsejable utilizar pernos de tipo hydrabolts. También es aconsejable emplear shotcrete reforzado con fibras de acero en estos suelos. Para excavaciones de tamaño superior o inferior al anterior, se deben efectuar nuevos cálculos de sostenimiento.

Para ciertos casos, puede que sea necesario ejecutar excavaciones temporales de mayores dimensiones del tipo de ingreso del personal, principalmente asociados a los tajeos. En este caso podemos estimar la abertura máxima utilizando el criterio de Lang et.al. (1991), según el gráfico, elaborado a partir de 172 casos históricos derivados de excavaciones subterráneas temporales, que abarcan una variedad extensa de condiciones de la roca, cubriendo una variedad extensa de condiciones de la roca.

**Ilustración 10.** Diagrama de Estabilidad para excavaciones del tipo ingreso del personal (Según Lang et.al., 1991).



Considerando el valor promedio de RMR de 55, es decir calidad Regular A (IIIA), se pueden excavar aberturas temporales de 7 m de ancho utilizando sostenimiento sistemático con pernos de roca, siempre y cuando no se den circunstancias de presencia de fallas geológicas u otros rasgos estructurales adversos antes señalados. En caso que ocurra esto último, el sostenimiento deberá ser más severo.

Para el caso de excavaciones de 6 a 7 m de abertura en masas rocosas de calidad Regular A (IIIA) será: pernos sistemáticos tipo split sets, de 8 a 10 pies de longitud, espaciados cada 1.5 a 2.0 m. Para menores tamaños de aberturas solo se requerirá sostenimiento esporádico. Para aberturas de mayor tamaño será necesario hacer nuevas estimaciones del sostenimiento.

### **Tajeos**

Para establecer las dimensiones de los tajeos, tomamos en cuenta dos modalidades: la primera, la modalidad de ingreso del personal en el tajeo; y la segunda, la modalidad de no ingreso del personal en el tajeo. El análisis llevado a cabo en el Acápite 4.2.2.2 anterior es válido para el primer caso: del tipo de ingreso del personal dentro del tajeo.

En el segundo caso, inicialmente podemos utilizar los estimados de los abiertos máximos y los tiempos de autosostenimiento para labores temporales de las excavaciones que se muestran en el Cuadro 5.4, el cual cubre rango de calidades de masa rocosa que pueden darse en la mina Tambomayo, para ello hemos considerado relacionar los valores promedio de RMR y un valor de ESR igual a 3 para el caso de labores temporales.



**Tabla 23.** *Aberturas máximas y tiempos de autosostenimiento para Tajeos*

Dominio	Rango RMR	Promedio RMR	Abertura promedio (m)	Tiempo de autosostenimiento
DE-II	> 60	65	17	1 mese
DE-IIIA	51 – 60	55	11	1 semana
DE-IIIB	41 – 50	45	7	30 horas
DE-IVA	31 – 40	35	4.4	5 horas

Este diagrama nos proporciona una perspectiva de las aberturas máximas de las excavaciones en general, que pueden iniciarse como tareas de preparación y extracción del mineral, así como los periodos de autosostenimiento de estos.

En este mismo segundo escenario, se realizan excavaciones del tipo de no ingreso del personal en el tajeo. Para su dimensionamiento, se puede emplear el Método Gráfico de Estabilidad (MGE), tal como se muestra en la obra de Hoek, Kaiser y Bawden (1995) – Ref. 9. Este enfoque fue creado por Potvin (1988), Potvin y Milne (1992) y Nickson (1992), basándose en las investigaciones iniciadas por Mathews et al. y otros (1981). El método actual, fundamentado en el estudio de más de 350 casos históricos obtenidos de minas subterráneas en Canadá, considera los factores clave que inciden en el diseño de los tajeos. Información acerca de la estructura y resistencia de la masa de roca, los esfuerzos circundantes a la excavación, el tamaño, forma y dirección de la excavación, se emplea para establecer si el tajeo permanecerá estable sin sostenimiento, o estable incluso con sostenimiento, o inestable incluso con sostenimiento. El procedimiento también es apropiado para el cálculo del sostenimiento con cable bolt.

En resumen, el proceso de diseño utilizando este método se fundamenta en la determinación de dos factores: S y N. El primer número representa la modificación de la estabilidad y simboliza la capacidad del macizo rocoso de

mantenerse estable bajo un escenario de esfuerzo establecido. El segundo factor, conocido como radio hidráulico, considera el tamaño y la forma del tajeo.

La cantidad de estabilidad  $N'$  se establece como:  $N' = Q' \times A \times B \times C$ ,  
donde:

$Q'$  se modifica el Índice de Calidad Tunelera  $Q$

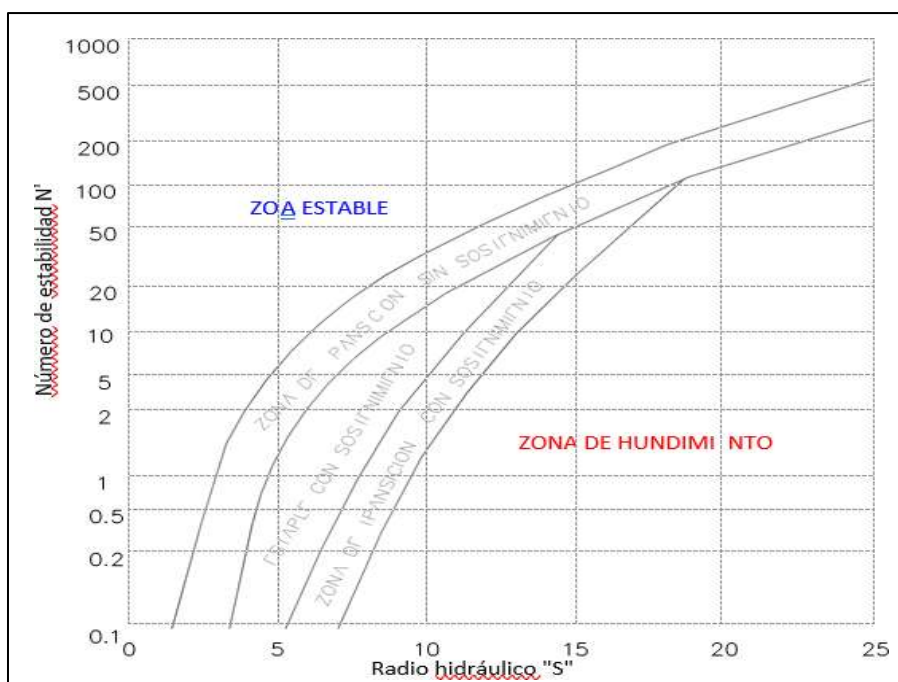
se refiere al elemento de esfuerzo en la roca

$A$  es el ajuste proporcional a la dirección de las uniones

$B$  es el elemento de adaptación a la gravedad

El factor de forma o radio hidráulico  $S$ , correspondiente a la superficie del tajeo en estudio, se determina dividiendo el "área de la superficie examinada" entre el "perímetro de la superficie estudiada". Mediante el uso de los valores del número de estabilidad  $N'$  y el radio hidráulico  $S$ , es posible calcular la estabilidad de un tajeo mediante el "gráfico de estabilidad" mostrado en la representación gráfica.

**Ilustración 11.** Gráfico de estabilidad. Según Potvin (1988), modificado por Nickson (1992)



Un punto crucial a destacar en este método es el impacto del ordenamiento estructural de la masa de roca, dado que los resultados están sujetos al parámetro B. Cuando se examina una superficie, como el techo de los tajeos o las paredes de estos, el sistema crítico se muestra de forma paralela a la superficie en estudio. Cuando este sistema se presenta de forma oblicua, resulta beneficioso para la estabilidad del tajeo, lo que facilita el aumento de la longitud. La circunstancia más ventajosa se presenta cuando el sistema se encuentra en perpendicular con la superficie examinada.

Para el caso del análisis en el techo, donde el buzamiento del mismo es  $0^\circ$ , el rumbo puede tomar cualquier valor para cualquier dirección de avance, la junta crítica será siempre el sistema subhorizontal o el de menor buzamiento. En tal sentido, para dicho análisis, el resultado encontrado para una dirección de avance en particular, significará el mismo resultado para cualquier otra dirección de avance del tajeo.

En el caso del análisis en las paredes de los tajeos, si importa conocer la dirección de avance, y el resultado en una dirección será distinta para cualquier otra, de aquí la importancia de definir las direcciones preferenciales de avance.

Se ha empleado el programa STOPESOF, creado por Graeme Fitz (1999), para realizar los cálculos y también se ha efectuado la comprobación del análisis en una hoja de cálculo de Excel.

Debido a la moderada calidad del macizo rocoso mineralizado, así como las cajas inmediatas, en mina Tambomayo se tiene ya establecidas dimensiones de tajeos en las tres vetas. En tal sentido, la evaluación geomecánica está orientada a realizar la verificación de dichas dimensiones y evaluar otras adicionales con la finalidad de establecer condiciones de estabilidad

satisfactorias para el minado.

Las alturas de los tajeos que se manejan comúnmente en la mina son 16 y 17 m y los anchos de los tajeos varían generalmente de 4 a 8 m. Para esta evaluación consideraremos anchos de minado de 6, 8, 10 y 12 m, en el caso de las alturas los análisis se realizarán para 16, 17, 18 y 20 m de altura. En los anchos de tajeos menores a 6 m, los análisis de la estabilidad de los techos (corona) bajo esta metodología no son muy relevantes ya que la estabilidad de los mismos está condicionada al sostenimiento que se pueda aplicar durante la apertura de subniveles.

Estos análisis se han realizado en las tres estructuras mineralizadas (Mirtha, Paola y Paola Norte) Tomando en cuenta el alineamiento de los tajeos, se evaluaron diversas longitudes de estos y los resultados se agruparon en el Gráfico de Estabilidad, con el objetivo de determinar si el diseño se desplaza en las zonas "estables sin sostenimiento", "estables con sostenimiento opcional" o "estables con sostenimiento obligatorio", o en la zona de "hundimiento".

En los tramos donde la veta es mayor a 10 m se ha realizado la alternativa de minado transversal a la veta como es el caso en las vetas Paola y Paola Norte. En el Anexo 5 se presenta un resumen de los análisis realizados para cada veta.

### **Veta Mirtha**

La tabla muestra las dimensiones máximas sugeridas para los tajeos abiertos bajo la modalidad de no ingreso del personal.

**Tabla 24. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Mirtha**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral (corona y paredes)								Análisis en estéril			
	Ancho de tajeo =				Altura de pared vertical =				Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIA												
ESS												
ESO												
ECS												

ESS = Estable Sin Sostenimiento

ESO = Estable Sostenimiento Opcional ECS = Estable Con  
Sostenimiento obligado

sr: Significa (sin restricción) que no hay límite de longitud en la superficie  
analizada para dicha condición de estabilidad.

### **Veta Paola**

La Tabla 25 muestra las dimensiones óptimas sugeridas para los tajeos abiertos  
con la modalidad de no ingreso del personal.

**Tabla 25. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral (corona y paredes)								Análisis en estéril			
	Ancho de tajeo =				Altura de pared vertical =				Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS												
ESO												
ECS												
Calidad del dominio DE-IIIA												
ESS												
ESO												
ECS												

ESS = Estable Sin Sostenimiento

ESO = Estable Sostenimiento Opcional ECS = Estable Con  
Sostenimiento obligado

sr: Significa (sin restricción) que no hay límite de longitud en la superficie  
analizada para dicha condición de estabilidad.

### **Veta Paola Norte**

Los resultados encontrados para la veta Paola Norte son resumidos en la  
tabla. Para este caso se ha considerado las diferentes alternativas en las que  
pueden presentarse la calidad de la masa rocosa tanto en el mineral y en las  
cajas críticas.

**Tabla 26. Dimensiones máximas de longitud de tajeos abiertos – Veta Paola Norte**

Condición de estabilidad	Análisis en el mineral								Análisis en estéril			
	ML y MT - Ancho de tajeo =				MT - Altura de pared vertical =				ML - Altura de caja techo =			
	6 m	8 m	10 m	12 m	16 m	17 m	18 m	20 m	16 m	17 m	18 m	20 m
Calidad del dominio DE-IVA												
ESS	7	5	-	-	6	6	5.5	5	6	5.5	5.5	5
ESO	16	13	-	-	14	13	12	12	15	14	13	12
ECS	-	-	-	-	25	24	22	20	25	24	23	21
Calidad del dominio DE-IIIB												
ESS	16	12	10	9	11	10	9	9	9	9	9	8
ESO	100	40	30	22	26	24	22	19	26	23	21	18
ECS	200	80	50	40	45	42	38	32	42	40	37	31
Calidad del dominio DE-IIIA												
ESS	45	30	20	18	22	20	18	16	16	16	15	14
ESO	sr	100	60	45	60	55	47	37	45	45	40	33
ECS	sr	sr	100	65	150	120	90	60	100	90	70	53

ML: minado longitudinal, MT: minado transversal.

En Paola Norte, el mineral es por lo general del dominio DE-IIIB con sectores de la caja techo que se hallan entre DE-IIIB y DE-IVA. Cuando la veta es angosta, el tajeo será alineado al rumbo de la veta por lo que la caja techo puede estar en dominios DE-IVA o DE-IIIB. Lo crítico es cuando la calidad de la caja techo es del dominio DE-IVA, este hecho hace que la estabilidad del tajeo se haga crítica cuando se pretenda exponer tajeos de mayor longitud, en ese sentido la alternativa de utilizar cable bolting para reforzar el techo es una alternativa que está funcionando en la mina.

Según el cuadro, se puede observar que la longitud del tajeo es dependiente de la longitud de la caja techo en estéril o pared vertical en mineral,

este último es cuando el minado se realiza transversal a la veta. Los resultados de los análisis en el techo cuando la calidad es del dominio DE-IVA no son contundentes ya que la metodología no es aplicable para este rango de calidad e inferiores, la estabilidad de los techos en este caso estará condicionada al sostenimiento que se coloque a medida que se aperturan los subniveles.

Por ejemplo, en el caso de tener un tajeo donde el mineral y la caja techo son del dominio DE-IIIB, para un ancho de minado de 8 m se puede alcanzar una longitud de 40 m en la condición ESO y para una altura de tajeo de 17 m se tendría una longitud de 23 m para la

misma condición, en resumen, el tajeo para el ancho y altura citadas podrá alcanzar solamente 23 m de longitud para la condición ESO, es decir la longitud final la define la menor longitud.

Para las mismas dimensiones iniciales de ancho y altura de tajeo citadas en el párrafo anterior, si la calidad de la caja techo fuera del dominio DE-IVA, la longitud del tajeo en la caja techo solo podrá alcanzar 14 m para la condición ESO, si se pretendiese tener mayor longitud se puede utilizar refuerzo con cable bolting y con ello se puede alcanzar hasta 24 m. Según la experiencia ganada en la mina, se ha observado que se están consiguiendo algo más de 24 m

utilizando cable bolting y está dando resultados favorables.

### **Estabilidad Estructuralmente Controlada**

La geometría tridimensional de las excavaciones, en términos de la disposición espacial de las discontinuidades (fallas, diaclasas, estratos, etc.), que son planos de debilidad, afectan las condiciones de estabilidad de cualquier excavación. Por esta razón, a este tipo de estabilidad se le conoce como



"estabilidad estructuralmente controlada". Al ser interceptados, los planos de debilidad podrían generar cuñas o bloques de roca en el techo y paredes de la excavación, mostrando libertad para descolgarse, rotar o deslizarse.

Para valorar el impacto del ordenamiento estructural que muestra la masa de roca de la mina Tambomayo en la estabilidad de las excavaciones, se ha llevado a cabo un estudio de estabilidad controlada estructuralmente, empleando el software UNWEDGE (Rocscience, 2004). Este análisis se ha llevado a cabo de forma específica para cada veta.

Para llevar a cabo este análisis, se ha tomado en cuenta la información proporcionada en los Acápites 4.2.3 (Distribución de discontinuidades) y

4.5.2 (Resistencia a las discontinuidades). Además, para llevar a cabo este estudio, se ha necesitado entender el alineamiento de las excavaciones. En este contexto, se ha llevado a cabo el análisis para tareas de avance siguiendo la dirección paralela a las vetas y las direcciones. Los análisis han sido realizados tanto para la roca estéril y para la roca mineralizada utilizando la información particular de cada una de ellas. Para el caso de los tajeos, también se ha realizado el análisis considerando los mismos alineamientos.

A continuación, se hará una descripción particular para lo encontrado en cada veta. Es importante recordar que este estudio es más relevante cuando la calidad de la masa de roca es de Regular B (DE-IIIB) o superior.

### **Veta Paola Norte**

Para el caso de labores de desarrollo como los bypass y nieves principales, se ha realizado el análisis siguiendo el rumbo paralelo a la veta (NS) y también perpendicular (EW) al mismo. En este caso se ha considerado asumir una sección de 5 m de ancho y 4 m de altura.

e puede apreciar en la dirección NS la aparición de cuñas grandes e inestables en el techo y de cuñas pequeñas y estables en las paredes. Para estabilizar estas cuñas, se necesitan pernos de forma helicoidal de 7 a 8 pies de longitud y espaciados a 1.3 m.

Cuando las excavaciones siguen un alineamiento EW que es perpendicular al rumbo de la veta, se observa la formación de cuñas inestables en el techo que son de tamaño mediano, así mismo hay formación de cuñas delgadas en las paredes que son firmes. Para estabilizar estas cuñas, se necesitan pernos de forma helicoidal de 7 a 8 pies de longitud con separaciones de

1.7 m.

En el caso de las labores para los subniveles que tienen menor dimensión de aproximadamente 4 m de ancho y 3.5 m de altura, la formación de cuñas es similar a lo descrito para el caso de las labores de desarrollo, asumiendo las dos direcciones de avance.

Para las excavaciones que siguen alineamiento NS, las cuñas pueden ser estabilizadas con pernos tipo swellex o split set de 7 pies de longitud ubicados sistemáticamente a 1 m. En las excavaciones alineadas EW se requiere los mismos pernos espaciados a 1.5 m.

Para los tajeos también se ha analizado la formación de cuñas. Para ello se ha considerado un tajeo de 6 m de ancho y altura de 16 m. Se nota la creación de alargadas cuñas en el techo que resultan inestables, así como de grandes y delgadas cuñas en las paredes. Para la estabilidad de estas cuñas se ha visto que colocando cablebolts de 4 a 5 de longitud y espaciados a 1.7 m se logra mantener la estabilidad de la caja techo y corona.

Los hallazgos de este análisis de estabilidad controlada estructuralmente

deben considerarse junto con los sostenimientos previamente sugeridos en el Acápite 5.2. (Aberturas máximas de las excavaciones y sostenimiento). Hay que tener presente que este análisis solo contempla la información de los sistemas estereogramas, se muestra varias discontinuidades aleatorias y en consecuencia puede presentarse la formación de cuñas de modo local que requieran sostenimiento, los cuales deben ser manejados durante la operación.

### **Estabilidad Controlada por Esfuerzos**

Para estudiar la estabilidad regulada por los esfuerzos, se han llevado a cabo modelaciones numéricas de esfuerzo/deformación usando el programa PHASE2 de Rocscience (2010). Los exámenes han sido realizados simulando minado masivo con el método de minado de “Bench & fill” donde se utilizan taladros largos. Las dimensiones de los tajeos corresponden a las dimensiones actuales de minado que son tajeos de 4 a 8 m de ancho y de 15 a 17 m de altura.

### **Veta Paola Norte**

Para este análisis se ha utilizado dos secciones representativas, la 060 y la 140 las cuales presenta diferentes calidades de masa rocosa.

En el caso de la Sección 060, el mineral se halla en calidad del dominio DE-III A y la caja techo en DE-IV A. En el caso de la zonificación realizada en la Ref.: 15 el mineral y caja techo se halla en calidad DE-IIIB, pero en la zona superior la calidad de la caja techo baja a DE-IV A.

En la Sección 140, encima del Nv. 4640, el mineral y caja tiene calidad del dominio DE-IV A y debajo del citado nivel la calidad es generalmente del dominio DE-IIIB.

Para el caso de la Sección 060, se ha creído conveniente realizar el análisis asumiendo calidad en el mineral del dominio DE-III A y en otro análisis con

calidad DE-IIIB. Los resultados muestran que en todos los casos cuando los tajeos se hallan abiertos, la estabilidad en la caja techo es crítica lo que lleva a pensar que habría que adoptar algún tipo de sostenimiento.

Otra enseñanza de este modelamiento es que los tajeos no deben ser muy anchos, es decir no se recomendaría más de 10 m de ancho, ya que los resultados muestran que, para mayores anchos, la estabilidad de la corona se ve comprometida. La estabilidad de la caja piso es satisfactoria en ambas calidades de masa rocosa, habiendo mayor deformación en el caso del dominio DE-IIIB que para el dominio DE-IIIA. Así mismo para anchos mayores a 8 m se ha observado que estabilidad de los bancos de mineral que tienen entre 8 y 9 m de altura se pueden ver comprometidos debido a que la esbeltez (ancho/altura) aumenta.

Observando los resultados de la Sección 140, los tajeos que están simulados en el sector donde toda la roca es del dominio IVA, la estabilidad de las cajas se muestra crítica, lo que conlleva a anticipar que el minado en este tipo de terreno puede complicar la estabilidad de las excavaciones. En estos casos solo se podría minar si los tajeos son angostos ya que los subniveles tendrían sostenimiento obligatorio y la caja techo podría ser sostenida con cables bolts.

En la misma sección indicada, la simulación del minado encima del Nv. 4540 donde toda la roca es del dominio DE-IIIB, los resultados muestran condiciones aceptables de estabilidad lo que manifiesta que el método que se viene aplicando actualmente está correctamente aplicado.

Finalmente, en los modelamientos numéricos realizados se ha simulado el minado con tajeos de altura reales que están aplicando en la mina, que varía

entre 16 a 17 m. Estos resultados también son argumentados con lo encontrado del MGE que ayuda a definir las longitudes adecuadas de tajeos.

Por otro lado, también se ha simulado en la Sección 140 el minado transversal de Paola Norte en las mayores potencias de la veta. Los resultados muestran que con ancho de tajeos de 8 m debajo del techo de relleno cementado en el Nv. 4740 hay inestabilidad potencial en el techo de la excavación de relleno cementado de 1.7 MPa de resistencia, este hecho hace anticipar que minar con este ancho de tajeos debajo del Nv. 4740 no es conveniente. Si los tajeos se reduce a 4 m de ancho, las condiciones de estabilidad de estos tajeos pequeños debajo del Nv. 4740 muestran condiciones de estabilidad moderadas lo que indica que pueden adoptarse tajeos con este ancho de 4 m. El tajeo debajo del Nv. 4740 luego de explotado se debe rellenar con relleno cementado y debe estar topeado al techo antes de abrir el tajeo adyacente. Si esta actividad del topeo no se realiza correctamente, se puede complicar la estabilidad del techo conformado por relleno cementado.

#### **4.3. Prueba de hipótesis**

Para el proceso de la prueba de la hipótesis se identificó las variables Independiente y Dependiente, las cuales fueron determinada para acepta la Hipótesis: Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

- **H0:** Evaluación Geomecánica.
- **H1:** Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo.

#### **4.4. Discusión de resultados**

Selección del Método de Minado

En los capítulos previos, se han establecido las condiciones físicas del

depósito minero: propiedades geológicas, morfológicas (tipo, fuerza, dirección y desplazamiento, y profundidad bajo la superficie), reservas (volumen y amplitud de las leyes), geomecánicas (características de la masa de roca de las cajas y del mineral, resistencia de la roca y esfuerzos), y las propiedades de la presencia del agua subterránea.

Considerando los datos acerca de las condiciones naturales del depósito, se han implementado varias técnicas para la elección del método de minado, tales como las de Boshkov and Wright (1973), Hartman (1987), Dravo (1974), Nicholas (1981) y UBC (University of British Columbia, 1995), siendo esta última una versión modificada de la perspectiva de Nicholas. Estos dos últimos criterios mencionados consideran las condiciones naturales del depósito, influyendo en las condiciones geomecánicas de las rocas de cajas y del mineral.

Los resultados del proceso de selección del método de minado para cada una de las estructuras mineralizadas comprendidas en la presente evaluación han indicado lo siguientes:

#### **Veta Paola Norte**

De acuerdo con el criterio UBC, en el caso de Paola Norte, el proceso de clasificación de los distintos elementos vinculados a los distintos métodos de minado subterráneo, reveló lo siguiente:

- Desde una perspectiva técnica, el método de minado que mejor se ajusta a las condiciones naturales halladas es el "corte y relleno" (Cut & Fill – C&F), para todas las condiciones geomecánicas detectadas en Paola Norte, es decir, para las rocas de los dominios DE-III A, DE-III B y DE-IV A.
- El método de minado “subniveles con taladros largos” (Sublevel Stoping –

SLS) constituye una segunda alternativa para el minado de estas vetas, considerando asimismo todo el rango de condiciones geomecánicas encontradas en esta estructura mineralizada.

De acuerdo con el criterio de Nicholas, también desde una perspectiva técnica, el método de minado que mejor se ajusta a las condiciones naturales halladas es el C&F para todas las condiciones geomecánicas existentes en Paola Norte. Para las rocas de inferior calidad considerando particularmente la caja techo del dominio DE-IVA el SLS queda descartado, pero para las rocas de mejor calidad (dominios DE-III A y DE- III B) el SLS queda como método de minado alternativo al C&F.

La aplicación de los otros criterios de selección del método de minado subterráneo, nombrados en el segundo párrafo de este acápite, arroja resultados similares a los mencionados con el criterio de Nicholas.

Según los análisis realizados en el capítulo anterior en relación a la estabilidad de las excavaciones y según las experiencias que se vienen teniendo actualmente en mina Tambomayo, el método de minado SLS con cableado de la caja techo en roca del dominio DE-IVA puede funcionar adecuadamente.

Desde una perspectiva económica, el cuadro muestra de manera comparativa y organizada, de menos a más, los gastos de minado asociados a los principales métodos de minado subterráneo. En términos generales, se debe intentar determinar la utilidad de los métodos en un yacimiento mineral en la secuencia enumerada, descartando cada uno hasta hallar el método más económico que sea aplicable.

**Tabla 27. Métodos de Exploración Subterránea ordenados por costos**

Orden	Método de minado	Abreviación
1	Block <u>o</u> Panel Caving	BC
2	Room and Pillar	R&P
3	Sub Level Stopping	SLS
4	Sub Level Caving	SLC
5	Cut and Fill Stopping	C&F
6	Vertical Crater Retreat	VCR
7	Top Slicing	TS
8	Shrinkage Stopping	SHS
9	Square Set Stopping	SQS

Se desestima la utilidad del BC debido a las condiciones naturales que exhibe la veta Paola Norte, especialmente por la estructura de la mineralización y sus vínculos espaciales, y al tamaño reducido de las reservas. El R&P en sí mismo también se descarta principalmente debido a las condiciones morfológicas de la mineralización. No obstante, no se debe descartar la necesidad de utilizar pilares, ya que son un complemento a la mayoría de los métodos de minado. El SLS es una alternativa de acuerdo al proceso de selección realizado. El SLC se descarta por motivos parecidos a los del BC. El C&F es la técnica favorita. El resto de las técnicas de minado poseen costos superiores a los de los métodos previos, por lo que no se aconseja continuar con su evaluación.

### **Métodos Alternativos**

De acuerdo con los estudios efectuados en el apartado previo, se presentan como principales opciones para la explotación de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte, los siguientes procedimientos de minado:

### **Veta Paola Norte**

Quedan como alternativas el C&F y SLS. Actualmente se viene utilizando el método de minado SLS en su variante “banqueo y relleno” (Bench & Fill



– B&F). A continuación, se ofrece un estudio más detallado para cada uno de estos procedimientos de minado.

### **Corte y Relleno - C&F**

El corte y relleno presenta un amplio espectro de fluctuaciones debido al minado selectivo, una excelente recuperación y practicabilidad bajo diferentes condiciones geomecánicas, y es adecuado para la mecanización de la explotación. Las técnicas de relleno disponibles hoy en día pueden optimizar los aspectos técnicos y económicos de este método de minado, que a menudo ha sido sustituido por otros procedimientos. Esta alternativa de método de minado puede quedar como una opción a ser utilizada bajo condiciones geomecánicas adversas de la masa rocosa que puede presentarse durante el avance del minado.

Para las menores potencias, se puede aplicar la modalidad el C&F ascendente mecanizado a lo largo del rumbo de la veta teniendo como límite máximo de ancho de minado 6 a 7 m. Para las mayores potencias se puede aplicar la modalidad de “corte y relleno con pilares” o lo que es lo mismo “cámaras y pilares con relleno” (Post Room & Pillar Mining – PR&PM) que utiliza solo relleno no cementado, o la modalidad “galerías y relleno” (Drift & Fill – D&F) que utiliza de manera total o parcial relleno cementado. Estas dos modalidades de minado de C&F son ascendentes.

Desde que los estándares del método de minado C&F son bastante conocidos en nuestro medio, en este informe no se dará más detalles sobre el mismo, concentrando la atención en métodos de minado alternativos, con los cuales se pueda tener al mismo tiempo seguridad y mayor eficiencia en la explotación.

### **Subniveles con Taladros Largos – SLS**

En las menores potencias del mineral, la aplicación del Método Gráfico de Estabilidad (Acápite 5.2.3) y los modelamientos numéricos realizados (Acápite 5.4) han indicado que para mantener condiciones satisfactorias de estabilidad local y global es necesario la utilización del relleno de tajeos, esto lleva a considerar el método de minado “banqueo y relleno” (Bench & Fill – B&F) o denominado también AVOCA.

El B&F es una técnica híbrida entre el SLS y el C&F, siendo más eficaz que el C&F, utilizada cuando las condiciones geomecánicas lo permitan, usualmente en estructuras mineralizadas donde las cajas no son de alta calidad, tal como sucede con la caja techo de Paola Norte, que suele ser de calidad del dominio DE-IVA. Actualmente se viene utilizando este método de minado en Paola Norte en las menores potencias de la estructura mineralizada.

El B&F se distingue por trasladar el minado de forma longitudinal a la veta, se edifican subniveles (inferior y superior) dejando un banco de mineral entre ambos, el cual es explotado gradualmente a través de taladros largos. Al romper el mineral del banco por un lado, en su retirada, y limpiarlo por el subnivel inferior, se procede a rellenar el tajeo por el otro lado desde el subnivel superior, utilizando preferentemente un relleno detrítico seco. De esta forma, se reduce la longitud de las cajas expuestas, y el relleno se encarga de mantener las cajas en posición.

Durante el proceso del minado por B&F se deberá sostener adecuadamente los subniveles y todas las labores lineales circundantes al tajeo, de acuerdo a las recomendaciones dadas en el Acápite 5.2.

Para las mayores potencias la modalidad de SLS que puede utilizarse en Paola Norte es el “subniveles ascendentes con relleno cementado” (SARC).

Este minado se caracteriza por ser transversal al rumbo de la estructura mineraliza. Más adelante se dan mayores detalles de esta modalidad de método de minado.

### **Métodos de Minado Propuestos Veta Paola Norte**

De acuerdo a lo anteriormente señalado, para las menores potencias se propone aquí como método de minado de Paola Norte el método de minado B&F. Para las mayores potencias se propone el SARC, quedando también como alternativa el D&F, que podría aplicarse en casos especiales como por ejemplo la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785 que se presenta en el Anexo 8 de este informe.

En la figura siguiente se muestra la distribución de áreas de menor y mayor potencia de la veta Paola Norte, determinada a partir de la información suministrada por el personal de mina Tambomayo a DCR:

***Ilustración 12. Estimación de potencias del mineral en veta Paola Norte, por secciones y niveles. Vista mirando al oeste***

< Sur Sección	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	Norte e 220	> 240
Nivel												
4870	5											
4840	5											
4810	5	14										
4790	5	10										
4773	7	16										
4740	4	15	15	3	3.2							
4725		13	12	10	5	5.6	4					
4690		10	8	12	5	4.4	4.7					
4685		2.1	5	6.5	17	4.4	4.2					
4673		5.4	5	6.5	20	16	4.2					
4640				5		3.3	4	2.4				

4625				5		2.2	5	2.4	3			
4613				7		2	4.7	4.7	3	3.4	5.7	
4590				5			2.7	4.7	3.4	2.8	5.7	
4573				5			2.5	3.7	3.4	2.8	3.2	
4540							2.5	3.7	2.8	3.6	3.2	
4560							3.6	3.4	2.1	3.6	2.5	2.8
4540							3.6	3.4	2.1	3.6	2.5	2.8

Según esta figura, las potencias menores, dónde se aplicaría el método de minado B&F ocurren en los siguientes lugares:

- Sección 20, entre los niveles 4740 y 4870.
- Secciones 40 a 80, entre los niveles 4640 y 4685.
- Secciones 100 a 120, entre los niveles 4690 y 4740.
- Sección 140, entre los niveles 4673 y 4725.
- Secciones 80 a 240, toda la veta debajo del nivel 4640.

En todas estas áreas la potencia del mineral de Paola Norte por lo general es menor que 6 m, excepcionalmente puede alcanzar los 7 m. El B&F funcionaría adecuadamente, con refuerzo de cablebolts en la caja techo de las rocas del dominio DE-IVA.

En la Ilustración 14 también se muestra las áreas de mayores potencias de la veta Paola Norte, estas ocurren en los siguientes lugares.

- Secciones 40 a 80, entre los niveles 4690 y 4810.
- Secciones 100 a 120 entre los niveles 4673 y 4685.

En estas áreas el minado deberá ser transversal al rumbo de la estructura mineralizada utilizando el método de minado SARC.

### **Parámetros del Método de Minado de Veta Paola Norte**

#### **Método de Minado B&F**

## Ubicación de las Labores de Acceso y Servicios Permanentes

De acuerdo con los hallazgos de la clasificación y la zonación geomecánica de la masa de roca en diversas vetas, las excavaciones permanentes deben preferirse en las cajas distantes, preferentemente hacia la caja piso. Es importante considerar que la calidad de la masa de roca se incrementa a medida que nos alejamos de las vetas, en estos ámbitos la calidad se ubica en los dominios DE-IIIB y DE-IIIA.

## Esquema de Minado y Dimensiones de Tajeos

El esquema de minado típicos del método B&F, es el que actualmente se utiliza en la mina Tambomayo. Para el dimensionamiento del minado se toma en cuenta los diferentes aspectos tratados en el Acápite 4.2 en relación a las aberturas máximas de las excavaciones y el sostenimiento y a los modelamientos numéricos llevados a cabo.

En cuanto al ancho de los tajeos, este dependerá de la potencia de la veta, el ancho variará de acuerdo a lo señalado en la ilustración, este ancho será a lo más 6 m y excepcionalmente 7 m. En relación a la altura de los tajeos, esta se tendrá que adecuar a lo que ya se tiene construido en mina Tambomayo, subniveles de 16 a 17 m de altura piso a techo, considerando subniveles de 3.5 m de altura. Se puede adoptar otras alternativas de alturas de tajeos utilizando como guía el cuadro.

En relación a la longitud de los tajeos, la distancia máxima que se debe conservar entre el frente de rotura del mineral y la cresta del relleno debe ser a lo más 24 m para altura de bancos de 9 a 10 m.

Respecto a la longitud del block de minado, no hay restricciones desde el punto de vista geomecánico, por lo que este parámetro será establecido de

acuerdo a los procedimientos operacionales.

### **Relleno**

Según los diferentes aspectos mencionados en el acápite precedente, habrá necesidad de utilizar principalmente relleno convencional o no cementado. En el método de minado B&F es recomendable el uso de relleno detrítico, de preferencia seco o con mínima humedad.

Para dar a la mina mejores condiciones de estabilidad local y global sería recomendable construir con el avance del minado pilares artificiales tanto de rumbo como de buzamiento, con relleno cementado, para mejorar también de esta manera la recuperación de las reservas de mineral. Estos pilares serán dimensionados más adelante.

### **Secuencia de Avance del Minado**

El minado con el método de B&F que actualmente se utiliza en mina Tambomayo y de acuerdo a lo analizado realizados en la presente investigación es que más se adecua. Lo ideal es comenzar el minado en la parte más profunda del yacimiento y entre dos subniveles avanzar de manera longitudinal y horizontal, completado el minado de un horizonte se inicia el minado del horizonte superior. También con este método de minado se puede minar en horizontes múltiples, es simplemente establecer un ciclado adecuado y la construcción de los accesos correspondientes para la extracción del mineral y para el relleno. En caso de que no se sea posible iniciar el minado desde la parte más profunda del yacimiento, se puede comenzar de cualquier nivel, esto obligará a dejar un pilar puente de mineral que posteriormente se podrá recuperar colocando por ejemplo una losa de relleno cementado.

### **Método de Minado SARC**

### **Ubicación de las Labores de Acceso y Servicios Permanentes**

Similar al B&F y por las mismas razones señaladas las labores de acceso y servicios deberán ubicarse en la caja piso. Un ejemplo del método SARC se presenta en la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785.

### **Esquema de Minado y Dimensiones de Tajeos**

Se debe tener en cuenta que en el mineral de Paola Norte de las partes de mayor potencia predomina la masa rocosa del dominio DE-IIIB, en la caja techo predomina DE-IVA y en la caja piso hay rocas de los dominios DE- IIIB y DE- IIIA. Según ello y de acuerdo a los análisis realizados en el Acápite 4.2, el ancho de los tajeos dependerá de las condiciones de la caja techo (al oeste).

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior un ancho adecuado de tajeos podría ser 6 sin refuerzos con cables bolts u 8 m con refuerzos de cables bolts en la caja techo. La altura de los tajeos establecida por Buenaventura varía de 16 a 17 m, los subniveles ya se encuentran o preparados o en preparación, teniéndose un banco de mineral de 9 a 10 m. La longitud de los tajeos estará en función de la potencia del mineral. Según la Ilustración 14 la máxima potencia puede llegar a 20 m. Es recomendable que, en este caso, para el inicio del minado se abra solo la mitad de la longitud del tajeo a manera de pilotaje, después de las experiencias que se tengan con el minado se podrá abrir en toda la longitud de ser el caso.

### **Relleno**

La principal función que deberá cumplir el relleno es mantener paredes auto estables cuando se mine en mineral del costado, lo cual significa tener un relleno estructural conformado por relleno cementado, para ello, según la

configuración de este método de minado es necesario que el relleno cementado tenga una resistencia compresiva uniaxial de 600 KPa.

### **Secuencia de Avance del Minado**

La secuencia de avance del minado denominado “secuencial ascendente y en retirada”. Desde el punto de vista de los análisis realizados esta es la secuencia de avance más adecuada para veta Paola Norte en sus mayores potencias. Los derrumbes ocurridos anteriormente encima del nivel 4740 se debieron entre otros a la aplicación de una secuencia de avance del minado inadecuada.

### **Método de minado D&F**

#### **Ubicación de las Labores de Acceso y Servicios Permanentes**

Similar al B&F y SARC y por las mismas razones señaladas las labores de acceso y servicios deberán ubicarse en la caja piso.

#### **Esquema de Minado y Dimensiones de Tajeos del B&F**

De acuerdo al esquema de minado de este método de explotación, denominado Over Hand Drift & Fill (OHD&F) por ser la modalidad ascendente del D&F. Las dimensiones de los tajeos pueden variar de 4 a 5 m igualmente la altura de los mismos.

Este método se utilizaría en las potencias mayores en condiciones geomecánicas desfavorables de la masa rocosa y en situaciones especiales como es la recuperación del banco de mineral ubicado entre los subniveles 4772 y 4785.

### **Relleno**

Es necesario utilizar relleno cementado por lo menos en los tajeos primarios, la resistencia del mismo puede ser alrededor de 300 kPa. Los tajeos secundarios, previa evaluación geomecánica pueden ser rellanados solo con



relleno detrítico sin cemento.

### **Secuencia de Avance del Minado**

En la secuencia de avance del minado. Primero salen los tajeos primarios, rellenándose luego con relleno cementado. Después salen los pilares dejados (tajeos secundarios) y se rellenan o con relleno cementado o con relleno sin cementar según indique la evaluación geomecánica previa.

### **Consideraciones Finales**

Para el caso del B&F, la dilución y recuperación dependen de la calidad de la masa de roca en las cajas y del mineral. Si la masa de roca es de baja calidad, la dilución se incrementa y la recuperación disminuye, y al contrario. Las vivencias previas en Perú señalan diluciones que oscilan entre el 10 y el 15 % y recuperaciones cercanas al 85 %. Además, la potencia de la veta tiene un impacto en la dilución, a potencias inferiores se produce una mayor dilución y una recuperación reducida, y a la inversa. En este escenario, también resulta crucial elaborar meticulosamente diseños y normas de ejecución para la perforación y voladura controlada, con el fin de preservar principalmente la estabilidad correcta de las cajas de los tajeos, especialmente de la caja techo.

En cuanto al método de minado SARC, las experiencias que se tienen en Perú indican que la dilución puede estar alrededor de 5 % y la recuperación alrededor de 90 %. Similares valores de dilución y recuperación pueden lograrse con el D&F.

Los ingenieros de Planeamiento y Diseño del Minado de Mina Tambomayo, tendrán que evaluar la factibilidad técnica económica de las alternativas de métodos de minado propuestos en este informe, tomando en cuenta los diferentes aspectos tratados y el nivel de producción que establezca Buenaventura.

## CONCLUSIONES

- La columna litoestratigráfica regional del área en estudio abarca diversas formaciones geológicas, desde rocas del Precámbrico hasta depósitos Cuaternarios. Estas incluyen rocas del Mesozoico (Jurásico-Cretácico) y Cenozoico (Terciario-Cuaternario), con la presencia de pulsaciones de domos volcánicos y cuerpos intrusivos menores. Destaca el Arco Volcánico Terciario-Cuaternario, en el cual los Volcánicos Santa Rosa juegan un papel clave debido a que contienen la mineralización asociada al proyecto Tambomayo.
- A nivel local, el área del proyecto está constituida por una extensa y compleja secuencia de actividad volcánica, que incluye rocas efusivas, fragmentales, volcanoclásticas y depósitos de avalanchas o lahares. Estos materiales forman un posible estratovolcán de varios kilómetros de diámetro. Los afloramientos en el área están compuestos por tufos, brechas, lavas y lahares, con composiciones que van desde traquiandesitas hasta dacitas, lo que subraya la diversidad litológica del entorno.
- El área de estudio está controlada estructuralmente por un sistema de fallas de rumbo Andino NW-SE, que ha generado fallas tensionales con dirección E-W. Estas fallas son cruciales para la mineralización, ya que concentran vetas epitermales de baja a intermedia sulfuración. Las principales estructuras mineralizadas evaluadas en el proyecto corresponden a la veta Mirtha, la veta Paola y la veta Paola Norte, todas ellas de gran relevancia económica.
- Las litologías simplificadas de la masa rocosa asociada a las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte indican que la mineralización se encuentra en brechas de cuarzo. En los tres casos, la caja techo está compuesta principalmente por tobas andesíticas y toba brecha andesítica, mientras que la caja piso exhibe lavas andesíticas.

Específicamente, en la falla Paola Norte, tanto la caja techo como la caja piso se componen de toba andesítica y toba brecha andesítica, dado que esta falla está situada al norte de la falla Norte y de la falla Mirtha. Esta distribución geológica sugiere un control estructural directo sobre la mineralización, influenciada por las características litológicas de las rocas anfitrionas.

- La caracterización regional y local de la geología del área del proyecto Tambomayo, en conjunto con su control estructural y características litológicas, proporciona una base sólida para comprender la distribución de las vetas mineralizadas. Las formaciones volcánicas y el control tectónico desempeñan un papel determinante en la localización de las vetas, lo que es crucial para la planificación y desarrollo de futuras actividades mineras en la zona.

## RECOMENDACIONES

- En este estudio se han identificado los métodos de minado subterráneo alternativos adecuados para la explotación de las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte, basándose en un análisis técnico de factibilidad y con una orientación geomecánica. El equipo de la mina Tambomayo ha estado adquiriendo experiencia en estos procedimientos, y esta experiencia, unida a los parámetros de diseño geomecánico ofrecidos en este informe, facilitará la mejora de la operación minera, volviéndola más segura y eficaz. Se recomienda seguir perfeccionando estas prácticas en función de las condiciones específicas de las vetas.
- Interacción entre Ingenieros: Para garantizar el uso adecuado de la información geomecánica desarrollada en este estudio, es esencial que exista una interacción continua y coordinada entre los ingenieros responsables de la planificación y diseño del minado y los ingenieros geomecánicos. Esta colaboración asegurará que el apoyo geomecánico se aplique de manera eficaz, mejorando tanto la seguridad como la eficiencia en las operaciones subterráneas.
- Se detallan los diversos parámetros de diseño geomecánico relacionados con los métodos de minado propuestos. Estos incluyen el esquema de minado, el dimensionamiento de las labores, la secuencia de avance y consideraciones críticas para la planificación y diseño del minado en las vetas Mirtha, Paola y Paola Norte. Es importante que estos parámetros sean seguidos rigurosamente para garantizar la estabilidad y eficiencia de las operaciones.
- Estabilización de Cuñas: Las investigaciones acerca del impacto del ordenamiento estructural de la masa de roca en las condiciones de estabilidad durante las excavaciones han señalado que es probable la creación de cuñas en techos y paredes. Se debe prestar especial atención a las recomendaciones para manejar de manera adecuada la estabilización de estas cuñas, y su identificación in-situ durante las

operaciones mineras será fundamental para evitar riesgos. La implementación de medidas preventivas y correctivas contribuirá a la seguridad general de las excavaciones subterráneas.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Bieniawski Z.T. “Engineering Rock Mass Classification” Wiley – Interscience Publication – 1989.
- Brady B.H.G. & Brown E.T. “Rock Mechanics for Underground Mining” George Allen & Unwin – London – 1985.
- Brown E.T. “Rock Characterization Testing and Monitoring” ISRM Suggested Methods – Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics – 1981.
- CEDIMIN. “Geología del Proyecto Tambomayo”. Informe elaborado por el Departamento de Geología del Proyecto Tambomayo. Enero 2013.
- Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. “Información Geológica, Planos y Secciones e Información Topográfica” Proporcionada al personal de DCR Ingenieros S.R.Ltda. para la presente evaluación. Febrero – marzo 2018.
- Córdova Rojas David. “Asesoramiento geomecánico en Mina Iscaycruz”. Informes Técnicos varios preparados para Empresa Minera Los Quenuales S.A. entre los años 1998 y 2012.
- DCR Ingenieros S.R.Ltda. “Evaluación Geomecánica para el Minado – Proyecto Tambomayo”. Informe Técnico preparado para Compañía de Exploraciones, Desarrollo e Inversiones S.A.C. marzo 2003.
- Heidbach O. et.al. “World Stress Map” 2009 – 2nd edition, based on the WSM database release 2008. Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences.
- Hoek E., Kaiser P., Bawden W. “Support of Underground Excavations in Hard Rock” A.A. Balkema 1995.
- Hoek E. “Practical rock engineering” Rocscience, 2002.
- Hustrulid W.A. and Bullock R.L. “Underground Mining Methods: Fundamentals and International Case Studies” SME – 2001.
- INGEMMET. “Geología del Perú” Serie A: Carta Geológica Nacional. Octubre 1995.
- Lulea University of Technology. “Mining with backfill” Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill. Lulea – Sweden. June 1983.
- SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc). “MINEFILL 2001”. Proceedings of the 7TH International Symposium on Mining with Backfill.

- VICOR Ingenieros. “Estudio Geomecánico del Proyecto Minero Tambomayo”. Informe Final preparado para Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. noviembre 2015.
- VICOR Ingenieros. “Estudio de Actualización del Modelo Geomecánico del Macizo Rocosó de la Mina Tambomayo”. Informe Final preparado para Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. junio 2017.
- Villaescusa Ernesto. “Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping”. Western Australian School of Mines. CRC Press Taylor & Francis Group. 2014.
- Weiss F. y Córdova D. “Influencia de las condiciones naturales en la selección del método de explotación en minería subterránea”, Informe INGEMMET – 1991.

# ANEXOS



*Anexo 1. Matriz de Consistencia*

<b>TÍTULO: Evaluación Geomecánica para Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo - Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</b> <b>Tesista: Bach. Luis Antonio SANTACRUZ BAILON</b>						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO Y NIVEL DE INVEST
<b>GENERAL:</b> ¿Es posible efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?	<b>GENERAL:</b> Efectuar la Evaluación Geomecánica para determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	<b>GENERAL</b> Con la Evaluación Geomecánica se determinará el Método de Minado de la Mina Tambomayo de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	<b>INDEPENDIENTE</b> X: Evaluación Geomecánica de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Evaluación  Identificación  Operaciones	Mina Tambomayo Compañía de Minas Buenaventura. Método de Minado	<b>TIPO:</b> Aplicada.
<b>Problemas Específicos</b>  A. ¿Cómo influye la aplicación de la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo? B. ¿Cómo obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo?	<b>Objetivos específicos</b> A. Aplicar la evaluación geomecánica para realizar la explotación de la Mina Tambomayo. B. Obtener los Parámetros Geotécnicos, para realizar un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo	<b>Hipótesis específicas</b> A. Con la aplicación de la evaluación geomecánica se realizar la explotación de la Mina Tambomayo. B. Con los Parámetros Geotécnicos, realizaremos un adecuado sostenimiento en la Mina Tambomayo.	<b>DEPENDIENTE</b> Y: Determinar el Método de Minado de la Mina Tambomayo en Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Mapeo Diseño  Control  Sostenimiento	Sostenimiento. Zonificación de la mina. Parámetros Geotécnicos. Mapeo Geomecánico. y Estructural. Mallas por tipo de roca.	<b>NIVEL:</b> Evaluativa.

## Anexo 2. Arreglo Estructural de la Masa Rocosa

### ANALISIS ESTEREOGRAF. EN VETA MIRTHA - CAJA TECHO Y MINERAL

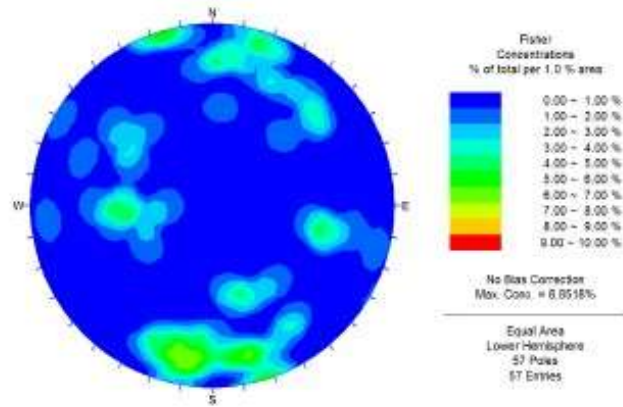


Figura 1: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

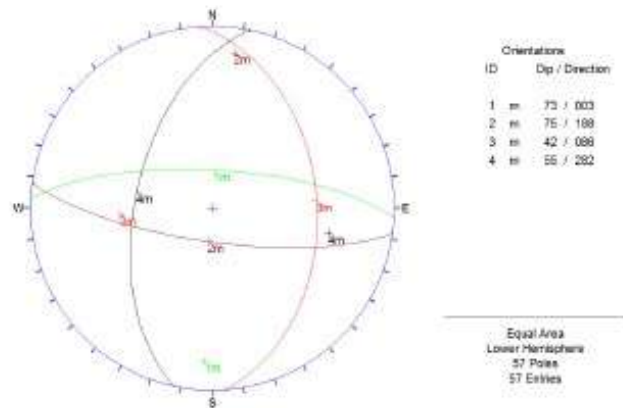


Figura 2: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

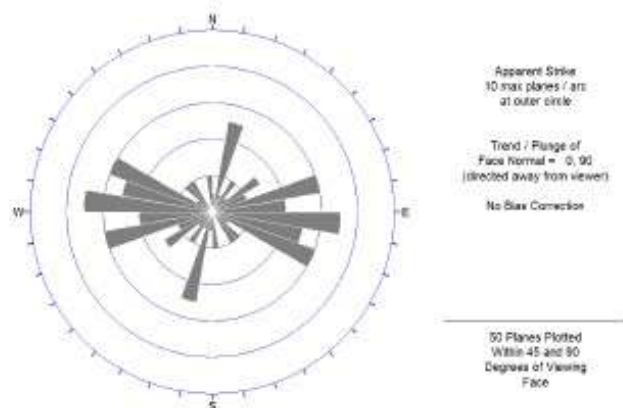


Figura 3: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA MIRTHA - CAJA PISO

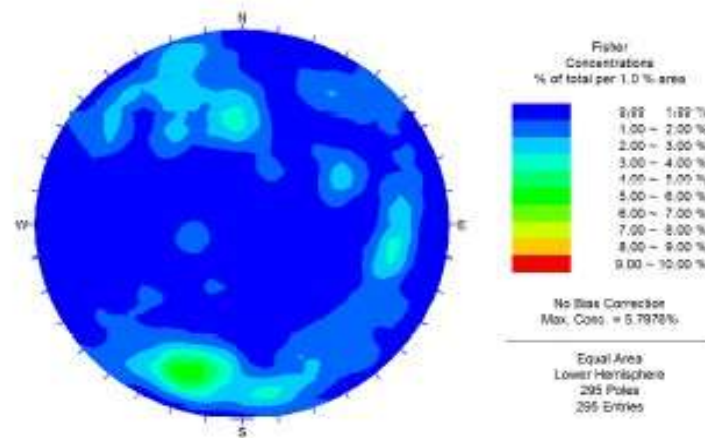


Figura 4: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

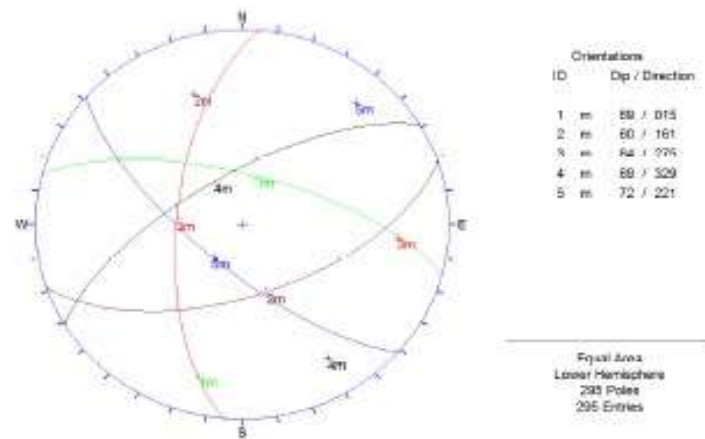


Figura 5: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

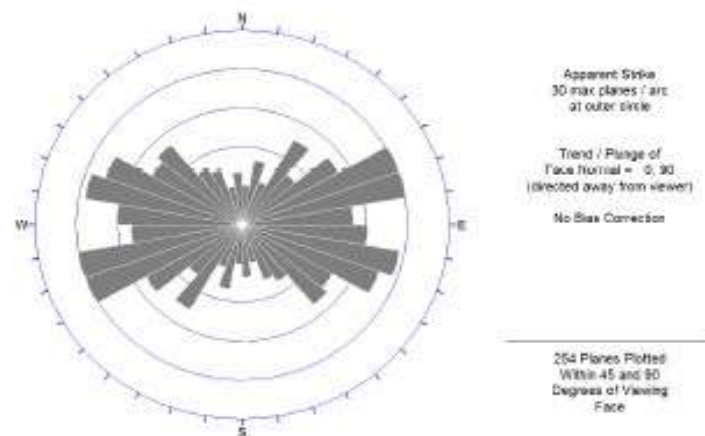


Figura 6: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - CAJA TECHO

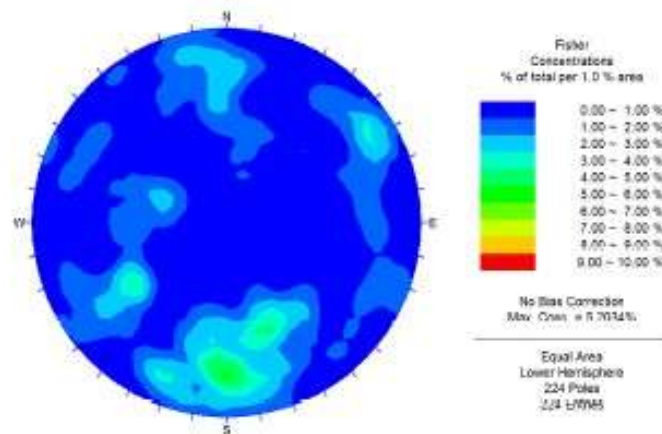


Figura 7: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

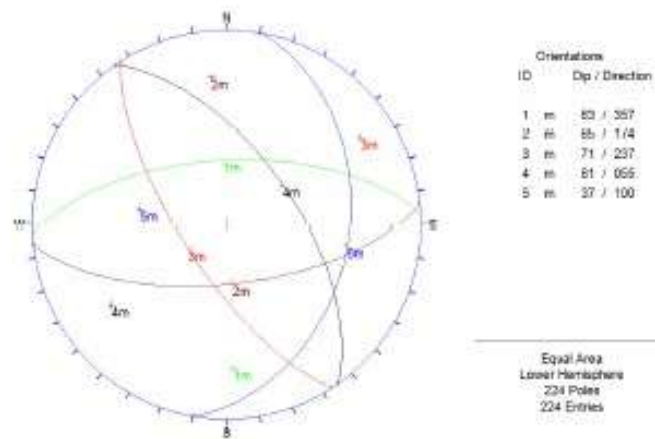


Figura 8: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

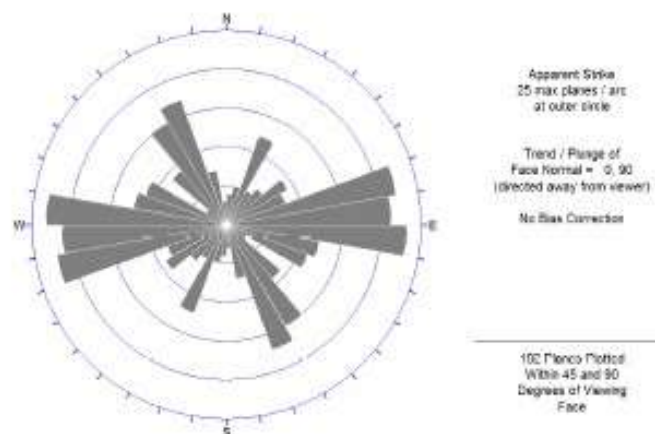


Figura 9: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - MINERAL

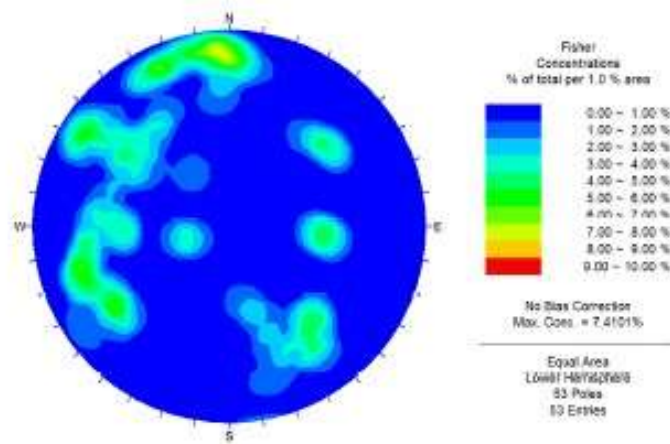


Figura 10: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

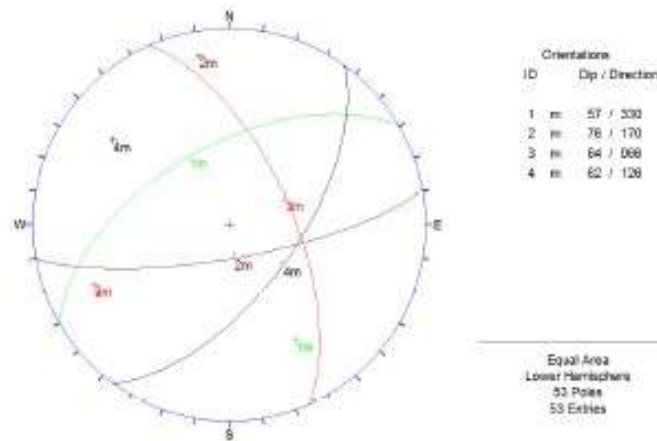


Figura 11: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

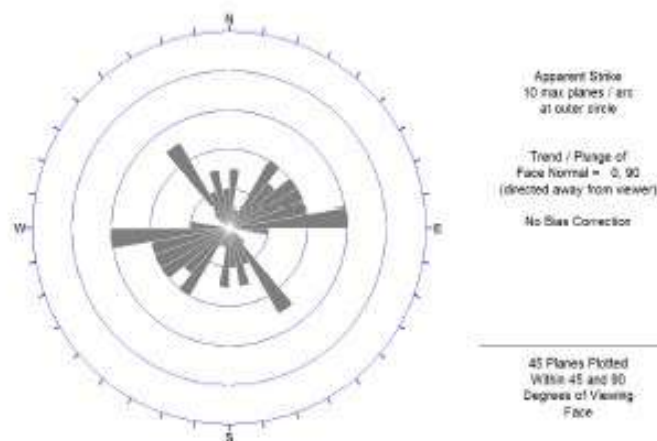


Figura 12: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA - CAJA PISO

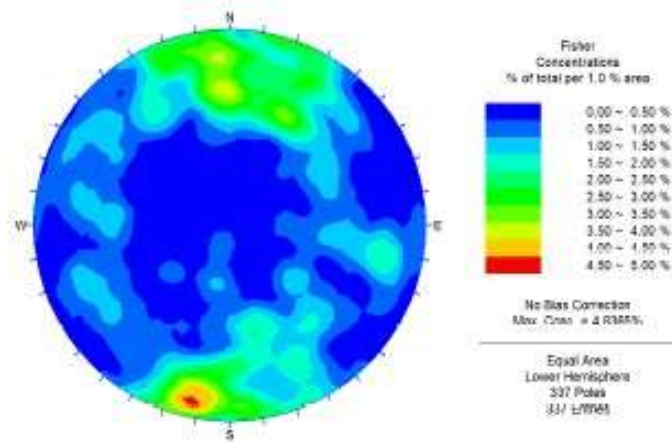


Figura 13: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

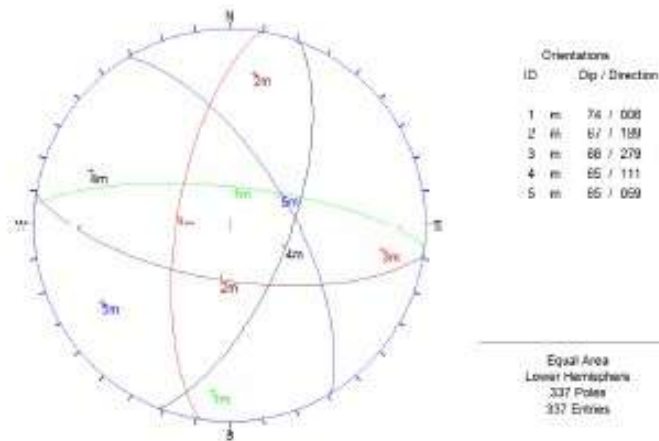


Figura 14: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

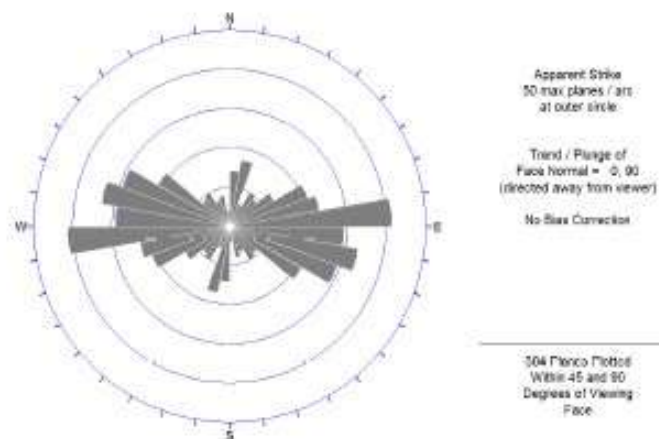


Figura 15: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.



## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - CAJA TECHO

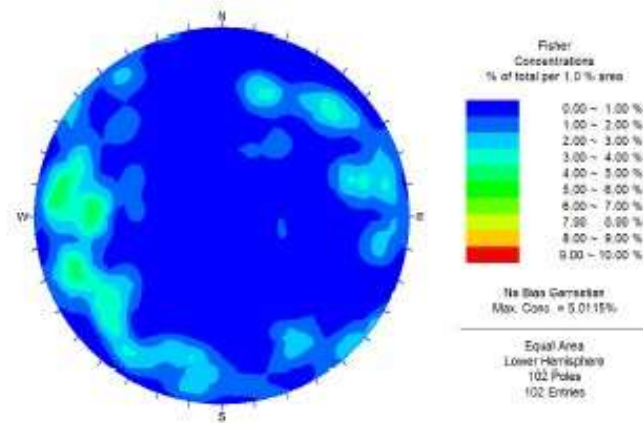


Figura 16: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

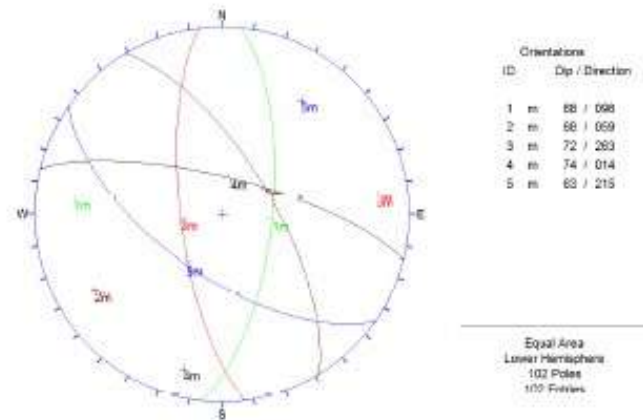


Figura 17: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

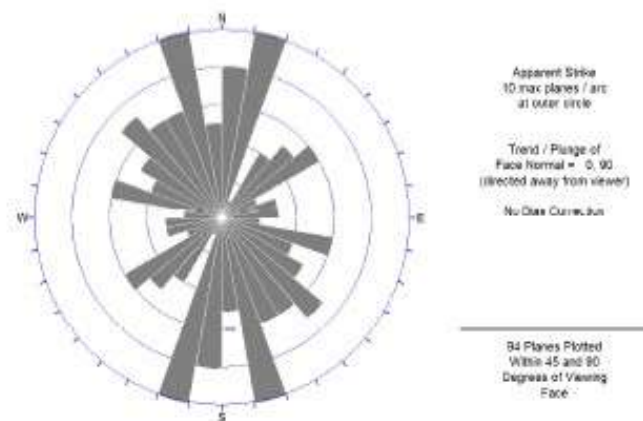


Figura 18: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.

## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - MINERAL

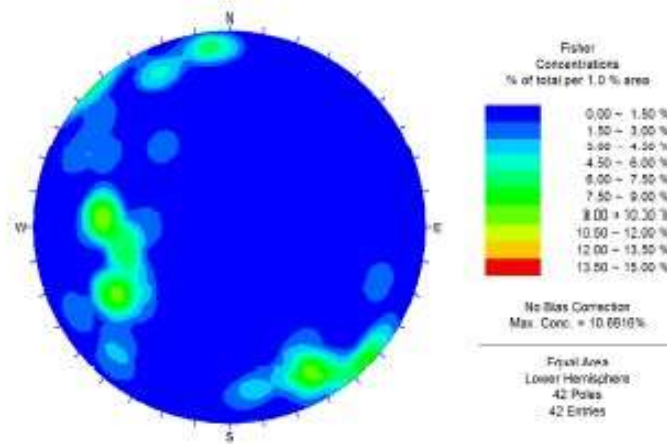


Figura 19: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

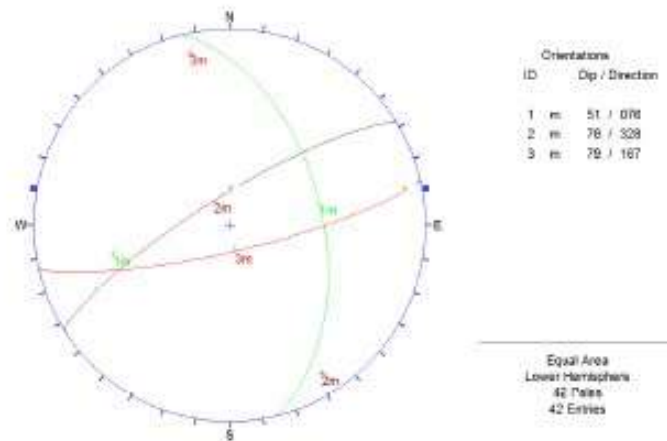


Figura 20: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

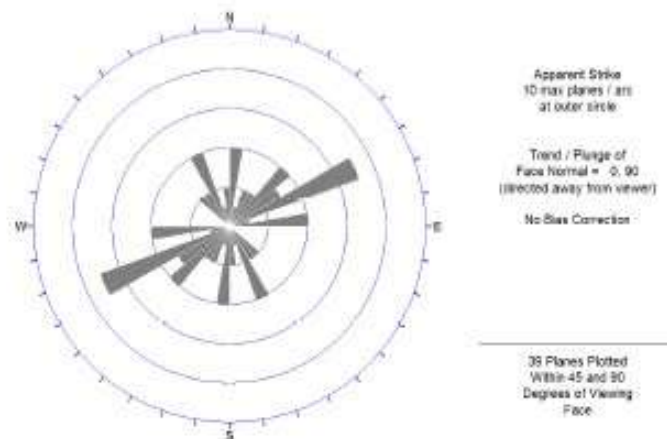


Figura 21: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.



## ANALISIS ESTEREOGRAFICO EN LA VETA PAOLA NORTE - CAJA PISO

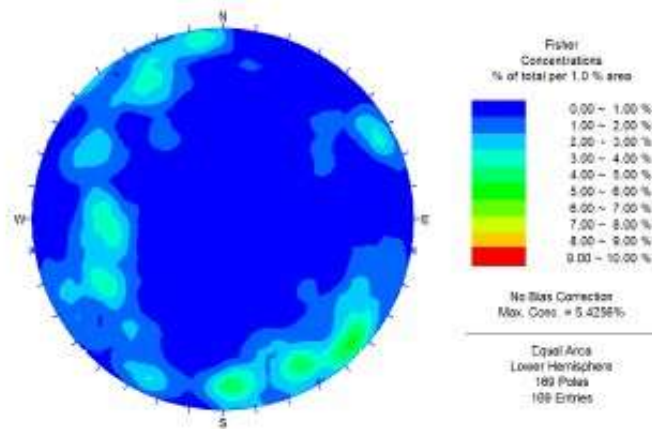


Figura 22: Diagrama estereográfico de contornos del compuesto de discontinuidades.

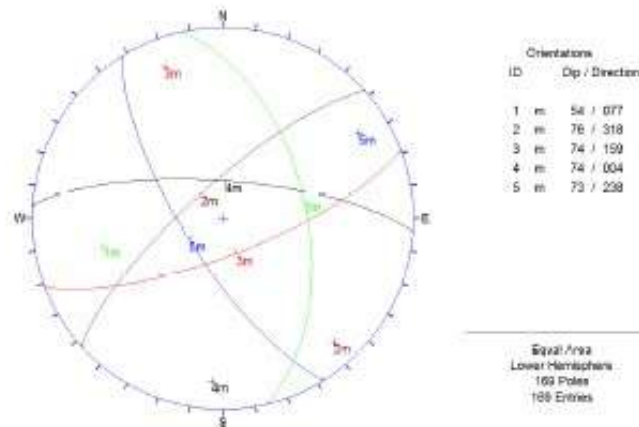


Figura 23: Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto de discontinuidades.

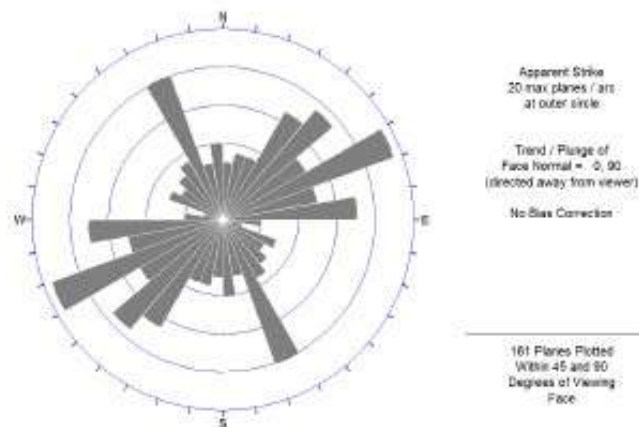


Figura 24: Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades.