



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

**“Planeamiento de operaciones para el proyecto subnivel 2 - 3 - 4 en la
Sociedad de Producción Minera Jerusalén, cantón Camilo Ponce Enríquez -
provincia del Azuay”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:
Magíster en Minas con mención en Planeamiento Minero

Autor:

ADOLFO LEÓN VILLAQUIRÁN ENGRACIA

Director:

LEONARDO ANÍBAL NÚÑEZ RODAS

CUENCA, ECUADOR

2025

Adolfo León Villaquirán Engracia

Trabajo de Titulación

Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Junio, 2025

**“Planeamiento de operaciones para el proyecto Subnivel 2 - 3 - 4 en la
Sociedad de Producción Minera Jerusalén, cantón Camilo Ponce Enríquez -
provincia Del Azuay”**

DEDICATORIA

A mis padres, Adolfo León y Dolores Edith por su amor infinito y confianza, gracias por ser los mejores padres que la vida me pudo dar.

A Viviana Giselle, mi esposa, mi compañera de vida incondicional, gracias por todo el cariño y haberme acompañado en este largo camino, por creer en mí y por motivarme a seguir adelante.

A mi amada hija, Paula Renata, fuente interminable de amor y alegría, esta meta también es tuya.

Adolfo León Villaquirán Engracia

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento a mi Tutor el Ing. Leonardo Núñez y al Ing. Patricio Feijoo por la guía, paciencia y orientación a lo largo de este trabajo.

A todos los profesores que participaron en el programa de maestría, quienes compartieron sus conocimientos profesionales, fueron un pilar fundamental para lograr desarrollar nuestro aprendizaje.

De manera especial agradezco a todos mis compañeros por la unión y apoyo, siempre nos dimos una mano para no rendirnos y seguir adelante.

Adolfo León Villaquirán Engracia

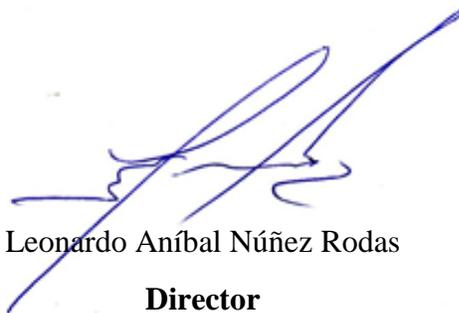
RESUMEN:

Se desarrolló la explotación de los subniveles 2, 3 y 4 en la mina Jerusalén, basado en análisis geomecánicos y operativos. La roca encajante (basalto) presenta una resistencia a la compresión de 48.93 MPa y un índice GSI promedio de 65, clasificándola como competente. El método UBC (puntaje: 34) confirmó el corte y relleno como óptimo para vetas angostas (5–15 cm de potencia, buzamiento $>80^\circ$). Se diseñaron 12 bloques (50–55 m de longitud) con pilares de 3 m (techo) y 4 m (piso), asegurando estabilidad.

El nuevo sistema de izaje (winche #2) optimizará el transporte, con capacidad de 1.06 t/viaje y producción estimada de 600 t/mes de mineral. La velocidad de izaje será de 0.83 m/s, utilizando un cable de 1.2 cm de diámetro y motor de 20 HP.

Estas estrategias buscan mantener una productividad sostenible (7.39 t/h) con seguridad operativa.

Palabras clave: Planeamiento minero, corte y relleno, geomecánica, UBC.

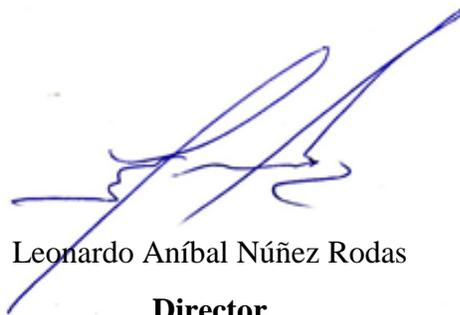


Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Director

ABSTRACT:

This study develops the mining plan for sublevels 2, 3, and 4 at the Jerusalén mine (Azuay, Ecuador), based on geomechanical and operational analyses. The host rock (basalt) exhibits a uniaxial compressive strength (UCS) of 48.93 MPa and an average GSI of 65, classifying it as competent. The UBC method (score: 34) confirmed cut-and-fill as the optimal technique for narrow veins (5–15 cm width, dip $>80^\circ$). The design includes 12 blocks (50–55 m length) with protective pillars (3 m roof, 4 m floor) to ensure stability. A new hoisting system (winch #2) will optimize ore transport, with a capacity of 1.06 t/trip and an estimated production of 600 t/month. The hoisting speed will be 0.83 m/s, using a 1.2 cm diameter cable and a 20 HP motor. These strategies aim to maintain sustainable productivity (7.39 t/h) while ensuring operational safety.

Keywords: Mine planning, cut and fill, geomechanics, UBC method.



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN:	v
ABSTRACT:.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Justificación del problema	3
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2.....	4
2. ASPECTOS GENERALES	4
2.1. Ficha técnica del proyecto	4
2.2. Estado del arte y marco teórico	5
CAPÍTULO 3.....	9
3. GEOLOGÍA.....	9
3.1. Geología regional	9
3.2. Litoestratigrafía.....	10
3.3. Geología local.....	11
3.4. Caracterización mineralógica de las vetas de estudio	11
CAPÍTULO 4.....	16
4. PLANEAMIENTO MINERO.....	16
4.1. Factores geomecánicos y geométricos.....	16
4.2. Selección del Método de Explotación	21
4.3. Diseño de subniveles y fases de explotación	22
4.4. Diseño de vías para la carga y transporte	32

4.5. Maquinaria y equipos	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
Conclusiones	43
Recomendaciones.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
Anexos	46

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Mapa de Ubicación del área de trabajo</i>	4
<i>Figura 2. Esquema del Corte y Relleno ascendente</i>	7
<i>Figura 3. Mapa de Regiones Morfo-estructurales del Ecuador Continental</i>	9
<i>Figura 4. Ubicación de la Mina Jerusalén dentro del Mapa Geológico del Distrito Minero Ponce.....</i>	10
<i>Figura 5. Difractograma de los minerales identificados en la Veta 1.....</i>	13
<i>Figura 6. Difractograma de los minerales identificados en la Veta 2.....</i>	14
<i>Figura 7. Fotografía de la Veta 1, en el Subnivel 1.....</i>	15
<i>Figura 8. Fotografía de la Veta 2, en el Subnivel 1.....</i>	15
<i>Figura 9. Obtención de la profundidad del yacimiento mediante aplicación de la topografía del área de estudio.</i>	17
<i>Figura 10. Martillo de Schmidt tipo L.....</i>	17
<i>Figura 11. Correlación del Martillo de Schmidt – Miller (1965).....</i>	19
<i>Figura 12. Análisis de la compresión de la roca encajante mediante el Software RocData.</i>	20
<i>Figura 13. Selección del Método de Minado (UBC).</i>	21
<i>Figura 14. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 1.....</i>	23
<i>Figura 15. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 2.....</i>	23
<i>Figura 16. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 2.....</i>	24
<i>Figura 17. Vista lateral S – N de la línea principal (naranja), Subnivel 1 (rojo), izaje por winche (azul) y buzones de almacenamiento (verde)</i>	25

<i>Figura 18. Vista en planta de la Línea principal y el Subnivel 1 con el desarrollo actual de las labores mineras.</i>	26
<i>Figura 19. Vista lateral NW - SE del Subnivel 2, 3, 4, en la veta 1.</i>	28
<i>Figura 20. Vista lateral NW - SE del Subnivel 2, 3, 4, en la veta 2.</i>	29
<i>Figura 21. Vista en planta de la Línea principal y el Subnivel 1, 2, 3,4 con la planificación minera planteada a corto y a largo plazo.</i>	30
<i>Figura 22. Vista lateral SW – NE de la línea principal (naranja), Subnivel 1 (rojo), Subnivel 2 (morado), Subnivel 3 (celeste), Subnivel 4 (magenta), izaje por winche #1 (azul), izaje por winche #2 (negro) y buzones de almacenamiento (verde).</i>	31
<i>Figura 23. Instalación de cimbras metálicas con planchas acanaladas en el techo y topes de bolsas de concreto.</i>	33
<i>Figura 24. Componentes de la línea principal</i>	34
<i>Figura 25. Detalle de acotamiento dimensional de la línea principal</i>	35
<i>Figura 26. Buzón de almacenamiento cargando mineral a los vagones.</i>	37
<i>Figura 27. Giro del balde para descarga de mineral en el buzón.</i>	38
<i>Figura 28. Componentes de pozo # 1.</i>	39
<i>Figura 29. Perforadora Secoroc YT27.</i>	40
<i>Figura 30. Compresor Kaeser.</i>	41
<i>Figura 31. Cargadora eléctrica.</i>	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Minerales identificados por el XRD en la Veta 1.	12
Tabla 2. Minerales identificados por el XRD en la Veta 2.	14
Tabla 3. Ensayos realizados en el nivel 0, línea principal y subnivel 1.	18

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Determinación de los valores de GSI en función de la calidad geológica y las condiciones estructurales del macizo rocoso, mediante el uso del software RocData.	46
Anexo 2: Determinación in situ de la mineralización macroscópica en la Veta 1, con predominancia de pirita y calcita.	46
Anexo 3: Mapa geológico regional del área de estudio, por el PhD. Arturo Egüez.....	47
Anexo 4: Personal altamente capacitado para la operación del sistema de izaje en el Pozo #1...	47
Anexo 5: Vista lateral NW–SE de la Veta 1, con representación de los subniveles propuestos y los sistemas de izaje planificados.	48
Anexo 6: Vista lateral NW–SE de la Veta 2, con representación de los subniveles propuestos y los sistemas de izaje planificados.	49
Anexo 7: Dimensionamiento del vagón utilizado en el sistema de transporte mediante locomotora eléctrica	50
Anexo 8: Cálculos técnicos para el diseño del sistema de izaje mediante winche.....	50

INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las mayores actividades económicas del Ecuador, especialmente en el cantón Camilo Ponce Enríquez, que posee una alta concentración de yacimientos polimetálicos. La Sociedad de Producción Minera Jerusalén ha efectuado desde 2018 actividades extractivas de oro mediante el sistema de explotación corte y relleno ascendente, debido a que sus estructuras mineralizadas presentan geometría vetiforme y el macizo rocoso es estable. Estas características han permitido desarrollar labores subterráneas de manera técnica y eficiente, orientadas a la producción dentro del régimen de pequeña minería.

El presente trabajo se enfocó en el planeamiento minero para estos subniveles, utilizando el análisis geológico, la clasificación geomecánica mediante el sistema UBC, y la selección del método de explotación más adecuado. Se propuso el diseño de bloques de explotación, galerías, vías principales y secundarias, así como la implementación de un sistema de izaje que permita optimizar el transporte de mineral.

Se describe también la maquinaria utilizada en la operación y se consideran aspectos clave como el sostenimiento en zonas críticas, alineando la propuesta con las condiciones del macizo rocoso. Finalmente, se presenta un diseño integral para los subniveles, que incluye la instalación de un sistema de izaje adicional para mejorar la eficiencia sin comprometer la seguridad ni los límites operativos de la concesión.

Este trabajo busca ser una herramienta técnica útil para la toma de decisiones de la empresa, respetando las restricciones del régimen de pequeña minería; cabe señalar que, por acuerdos de confidencialidad, no se incluyen análisis económicos.

CAPÍTULO 1

1.1. Descripción del problema

El Planeamiento Minero es un conjunto de metodologías indispensables en función del tiempo para el correcto control de las operaciones en las actividades extractivas, se emplea fundamentalmente para cumplir los objetivos de producción y metas trazadas con el mayor rédito económico posible. Las empresas que no trazan sus objetivos simplemente no pueden cumplir sus metas, no existe un manejo adecuado de personal, insumos, máquinas y no hay indicadores que demuestren en tiempo real la calidad de las operaciones.

La mina Jerusalén desde enero del 2018 está trabajando en explotación de cuerpos geológicos vetiformes en su contrato de operación dentro de la Concesión San Sebastián II Código 101450 por medio de subniveles, cabe recalcar que preparar un subnivel para la posterior explotación debido a su límite de financiamiento y capacidad operativa se emplea aproximadamente luego de un año y medio.

La mina con su Departamento de Producción ha realizado la preparación del Subnivel 1, así como su respectivo análisis geológico y geomecánico, pero se necesita la planificación operativa a detalle para la propuesta de construcción y preparación de los siguientes subniveles (2 - 3 - 4) para su ejecución en este año 2025, de allí la necesidad de aplicar el planeamiento minero mediante el análisis geológico, geomecánico y con el diseño óptimo de explotación, para conseguir resultados positivos, que estén alineados con la realidad actual de la empresa.

1.2. Justificación del problema

El adecuado levantamiento de información técnica junto con los parámetros operativos actuales de la mina permitirá esclarecer la situación actual, con lo cual será posible que se efectúe un diseño optimizado de explotación que conlleve operaciones y procesos eficientes para la eficiente extracción de los recursos minerales presentes en el área de operación.

1.3. Objetivo general

Desarrollar el Planeamiento Minero de los Subniveles 2, 3, 4 en la Sociedad Minera Jerusalén ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez Provincia del Azuay, con el levantamiento de información técnica de parámetros de operación minera para la correcta y eficiente extracción de los recursos minerales.

1.4. Objetivos específicos

- Recolectar y analizar la información geológica y minera del proyecto minero para el reconocimiento del área de estudio.
- Elaborar la propuesta de diseño de mina factible para los nuevos subniveles mediante el diagnóstico de parámetros técnicos y operativos.
- Revisar las alternativas de sostenimiento y el sistema de transporte (capacidad, eficiencia y costos) para seleccionar la solución óptima que garantice la estabilidad de las labores mineras y el flujo continuo de mineral en los subniveles 2, 3 y 4 de la mina.

CAPÍTULO 2

2. ASPECTOS GENERALES

2.1. Ficha técnica del proyecto

La Sociedad de Producción Minera Jerusalén se ubica en el occidente de la provincia del Azuay, Cantón Camilo Ponce Enríquez sector Santa Martha a una altura de 280 m.s.n.m. formando parte de la Concesión San Sebastián II como un operador minero. El acceso por vía terrestre a la mina se lo realiza por medio de la Carretera Panamericana (E25) hasta el sector San Alfonso, luego se toma un camino de segundo orden hasta la mina, por 8 km.

Figura 1. Mapa de Ubicación del área de trabajo.



Fuente. Tomado del Trabajo de Graduación previo a la obtención del Título de: Ingeniero en geología. “Caracterización mineralógica de vetas auríferas de la concesión Sociedad de producción Minera Jerusalén – Ponce Enríquez, Provincia del Azuay - Ecuador”. Por Reyes, J., Menoscal G. ESPOL.

2.2. Estado del arte y marco teórico

Planeamiento Minero: Es un conjunto de metodologías indispensables en función del tiempo para el correcto control de operación en las actividades extractivas, se emplea fundamentalmente para cumplir los objetivos de producción y metas trazadas con el mayor rédito económico posible. (Sociedad Nacional de Minería, 2013)

Dichos procesos incluyen desde la conceptualización de la mina mediante las etapas de prefactibilidad, sondeos, análisis geológico, hasta el diseño y planificación de las operaciones mineras rutinarias durante la faena de explotación, es pertinente recalcar que la planificación minera se encuentra influida bajo el comportamiento económico y de acuerdo con la gestión de diversas incertidumbres a lo largo del tiempo. (Hustruid, 2018)

Dentro de la minería subterránea dentro del régimen de pequeña escala el planeamiento minero debe considerar al menos factores clave como la geología del yacimiento, selección adecuada del método de minado, control de la estabilidad del macizo rocoso, manejo de aguas, adecuación de sistemas de ventilación, transporte, drenaje y condiciones de trabajo seguras para el personal de mina, dentro de la normativa actual vigente. (Camus, 2022)

Selección del Método de Explotación: Es una decisión fundamental dentro de la planificación minera, debido a que esta decisión impacta considerablemente en la viabilidad del proyecto, dentro de las diversas metodologías la más consolidada y aplicada es el Método UBC (University of British Columbia) o, por su creador el Método Nicholas; en donde dicha metodología se aplica mediante ponderaciones para clasificar diversos criterios geológicos – técnicos del macizo rocoso. (Kim, 2021)

Para diagnosticar la selección del método de extracción más adecuado, estos criterios básicos en la UBC incluyen:

- Geometría del depósito mineral.
- Calidad del Macizo Rocos.

- Factores económicos y de producción (como profundidad, accesibilidad, entre otros).

Entre las principales ventajas del Método UBC tenemos su objetividad y facilidad de interpretación e implementación, además es pertinente enfatizar que depende mucho de la cantidad y calidad de información preliminar del yacimiento, por ende, se recomienda siempre que las características del depósito mineral sean complementadas con estudios geomecánicos y económicos específicos. (Mijalkovski, 2022)

Método de Corte y Relleno: Es una técnica de explotación minera subterránea que se caracteriza principalmente por su alta selectividad, ideal para estructuras mineralizadas vetiformes y con una ley gradual. Dicho método es muy adecuado cuando se requiere una estricta estabilidad del macizo rocoso y un control riguroso del mineral extraído, siendo muy común dentro del régimen de la **pequeña minería** y en la explotación de yacimientos **polimetálicos** de naturaleza epitermal. (Hustruid, 2018)

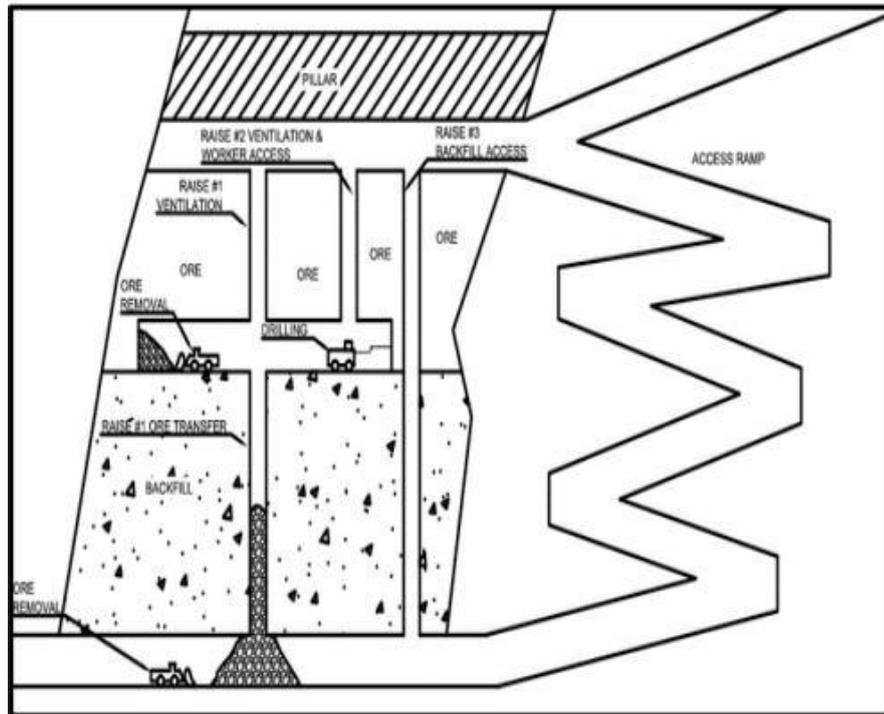
La explotación se ejecuta por medio de cortes horizontales o ligeramente inclinados que se realizan en secuencia, generalmente de abajo hacia arriba (bottom-up). Una vez que el mineral de un corte es extraído, el espacio vacío es rellenado con material de relleno, el cual puede ser estéril, relave o una mezcla cementada, dependiendo de los requerimientos técnicos. Además, este relleno actúa como un soporte temporal o permanente, permitiendo mayor seguridad en las labores mineras. (Jungal, 2021)

Dentro de los tipos de relleno más utilizados se encuentran:

- **Relleno hidráulico:** Compuesto por relaves de mina, que requieren previamente un proceso de decantación.
- **Relleno con pasta cementada:** Mezcla compuesta por agua y cemento, la cual proporciona alta resistencia estructural y permite una consolidación más rápida.

- **Relleno seco o con escombros:** Utilizado mayormente en la pequeña minería, este relleno se compone de material estéril (caja).

Figura 2. Esquema del Corte y Relleno ascendente



Fuente. (Elias, 2012).

Las ventajas más relevantes del Método Corte y Relleno son:

- ✓ **Control de la dilución:** Al ser un método altamente selectivo, se reduce drásticamente la mezcla de material estéril con mineral, mejorando la ley del mineral extraído.
- ✓ **Seguridad:** El relleno provee soporte continuo a las labores de explotación, reduciendo el riesgo de colapsos y permitiendo entornos de trabajo más seguros.
- ✓ **Adaptabilidad:** Se adapta al medio local y a la geometría vetiforme de los yacimientos, siendo muy útil en la pequeña minería.

RQD: Rock Quality Designation, es un valor de la calidad del macizo en función del índice de fracturas por metro lineal. (λ) (Priest & Hudson, 1976)

RMR: Rock Mass Rating, es un sistema de clasificación o índice de calidad del macizo rocoso in situ, es un criterio muy usado en la construcción de obras de ingeniería civil como taludes, túneles, entre otros. (Priest & Hudson, 1976)

RCS: Resistencia a la Compresión Simple, se determina mediante un ensayo directo de resistencia de compresión uniaxial. El ensayo consiste en aplicar una fuerza axial a una probeta cilíndrica, llevándola hasta la rotura mediante una prensa. (Galván Ceballos & Restrepo, 2016)

GSI: Geological Strength Index, es un sistema e índice de evaluación que se usa para estimar las propiedades del macizo rocoso a partir de dos observaciones fundamentales de campo: la macroestructura en función del grado de fracturación del macizo y la condición de las discontinuidades. (Toro Añazco, 2016)

CAPÍTULO 3

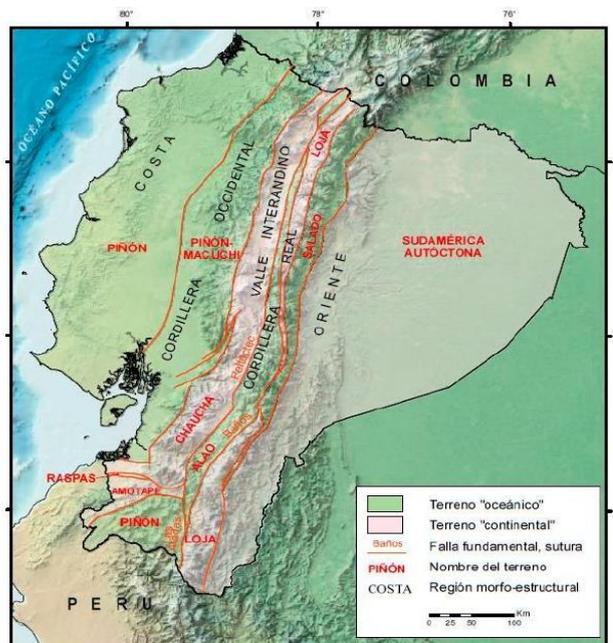
3. GEOLOGÍA

3.1. Geología regional

El Ecuador Continental en morfologías y estructuras consta de 5 regiones, las cuales se encuentran delimitadas por estructuras y fallas, de Este a Oeste estas regiones son: Cuenca Amazónica, Cordillera Oriental, Callejón Interandino, Cordillera Occidental y Región Litoral.

Nuestra área de trabajo se encuentra en las estribaciones de la Cordillera Occidental, la cual está controladas por importantes fallas de desplazamiento con dirección Norte Noreste (NE) que intersecan las zonas de fracturas tensionales de tendencia Noroeste (NW); éstas últimas son las principales sectores idóneos y favorables para la mineralización.

Figura 3. Mapa de Regiones Morfo-estructurales del Ecuador Continental.

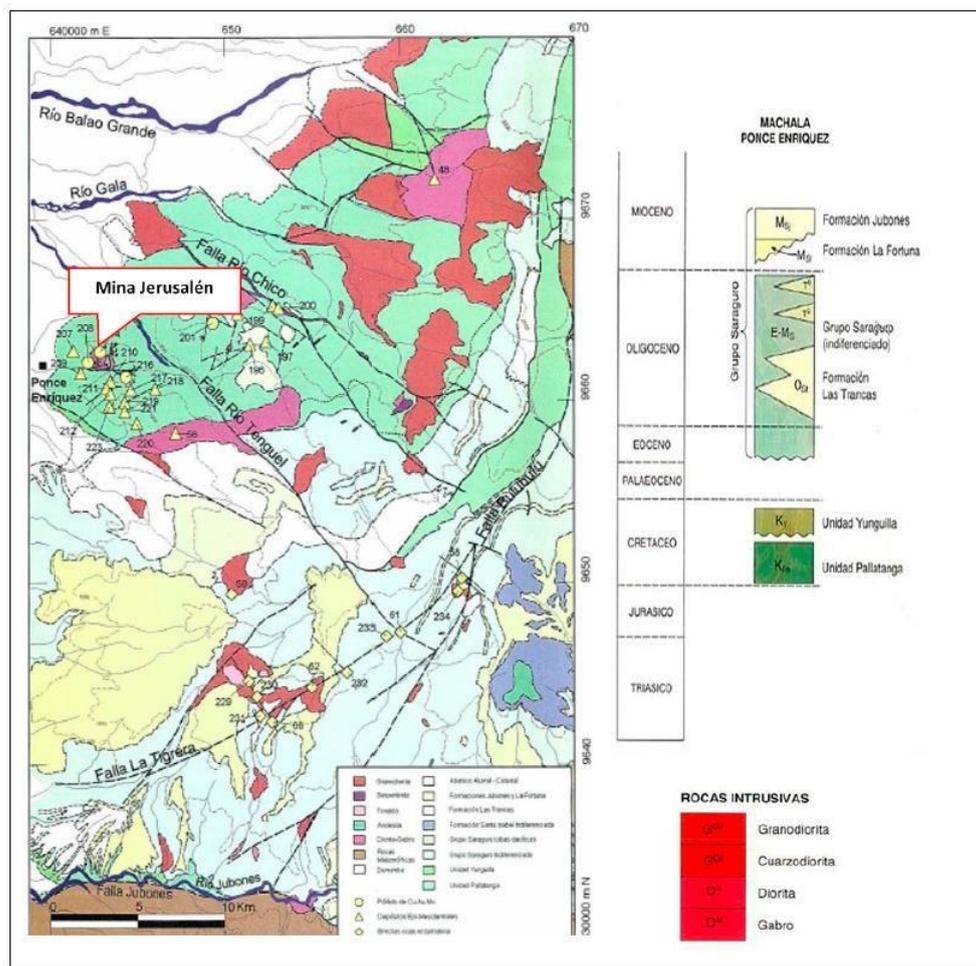


Fuente. MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES e INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO. Por Egüez A.

3.2. Litoestratigrafía

Esta estratigrafía del área del proyecto está compilada del Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3° a 4° S, escala 1:2000.000 PRODEMINCA y (BGS y CODIGEM), resumida en la siguiente ilustración:

Figura 4. Ubicación de la Mina Jerusalén dentro del Mapa Geológico del Distrito Minero Ponce.



Fuente. Mapa geológico simplificado del Distrito Azuay Campo minero Ponce Enríquez junto con la columna estratigráfica, escala 1:500000 (PRODEMINCA, 2000), (BGS – CODIGEM, 1997).

3.3. Geología local

La Sociedad de Producción Minera Jerusalén se encuentra ubicada en el flanco Suroeste de la Cordillera Occidental, específicamente en el Distrito Minero Azuay, Campo Minero Ponce Enríquez. Sitio caracterizado por sus depósitos de Cu – Au en formaciones vetiformes (vetas filones, vetilleos), brechas hidrotermales, enrejados (stockworks) y disseminaciones relacionadas con pórfidos, éstos se desarrollan en roca de caja volcánica como por ejemplo la Andesita, Basalto, Gabros, entre otros. (PRODEMINCA, 2000).

La zona de estudio contiene un tren de vetillas mineralizadas para la explotación con una dirección con tendencias NE – SO con un elevado grado de buzamiento ($> 80^\circ$), el cual poseen una potencia de promedio de 10 cm. La roca encajante del yacimiento en estudio está compuesto mayoritariamente por basaltos, con una densidad promedio de 2800 kg/m^3 .

3.4. Caracterización mineralógica de las vetas de estudio

En nuestro caso de estudio, la veta 1 y veta 2 son estructuras mineralizadas con formación vetiforme y con elevado ángulo de buzamiento, donde a continuación detallaremos su caracterización mineralógica de forma macroscópica, cabe recalcar que para las 2 estructuras vetiformes vamos a clasificar en 3 grupos de minerales, siendo estos:

- 1) Minerales Primarios.
- 2) Minerales Secundarios.
- 3) Minerales de Mena.

Además en Diciembre 2020 en la Galería Principal de la mina se realizó un estudio de Difracción de rayos X en el trabajo de titulación denominado: “Caracterización mineralógica de vetas auríferas de la concesión Sociedad de producción Minera Jerusalén – Ponce Enríquez, Provincia del Azuay – Ecuador” realizado por los Ing. Jorge Reyes y Gonzalo Menoscal, este ensayo (XRD) consiste en una técnica analítica cuantitativa que se aplica

fundamentalmente para la identificación de fases en un material cristalino, es decir, el patrón XRD es único para cada elemento.

Veta 1:

Con una identificación macroscópica se observó minerales primarios Actinolita y Moscovita, siendo estos característicos de procesos magmáticos hidrotermales acorde a la Geología Local. Dentro de los minerales secundarios se encuentra el Clinocloro, debido a la alteración de minerales ferromagnesianos; finalmente dentro de los minerales de mena tenemos presencia del Cuarzo, Pirita, Pirrotina y Calcita.

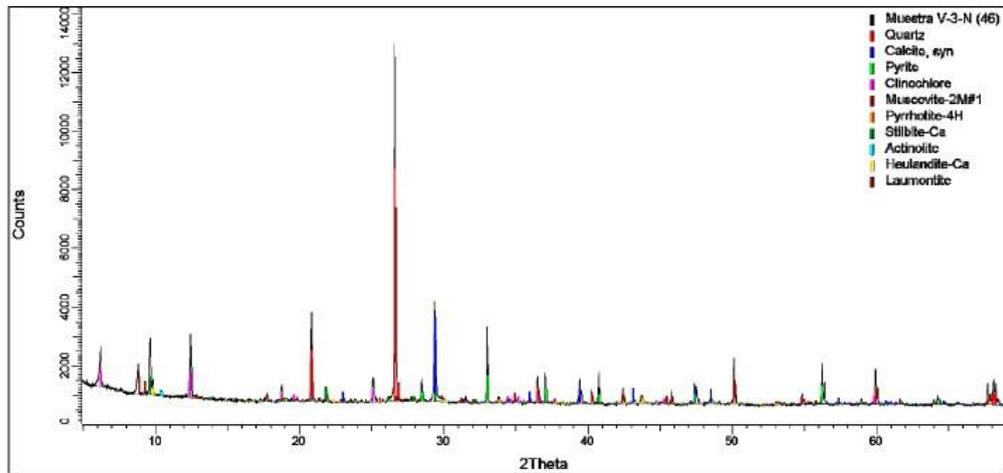
Los minerales identificados con la técnica XRD guardan correlación con el análisis macroscópico, los cuales estos resultados se detallan a continuación:

Tabla 1. Minerales identificados por el XRD en la Veta 1.

Nombre Mineral	Fórmula general	Porcentaje de presencia en muestra (aproximado)
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})^2$	2
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	4
Clinocloro	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	7
Cuarzo	SiO_2	60
Pirita	FeS_2	10
Pirrotina	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$	3
Calcita	CaCO_3	12
Otros	xxx	2

Fuente. La tabla expone los porcentajes de presencia de mineral. Tomado del trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero en Minas. Por Reyes, J. Menoscal, G. 2020.

Figura 5. Difractograma de los minerales identificados en la Veta 1.



Fuente. Tomado del trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero en Minas. Por Reyes, J. Menoscal, G. 2020

Veta 2:

Se observa dentro de los minerales primarios mayormente Actinolita, siendo característico de procesos magmáticos hidrotermales acorde a la Geología Local. Dentro de los minerales secundarios se encuentra el Clinocllore, debido a la alteración de minerales ferromagnesianos; finalmente dentro de los minerales de mena tenemos presencia del Cuarzo, Pirita, Calcopirita, Magnetita y Pirrotina.

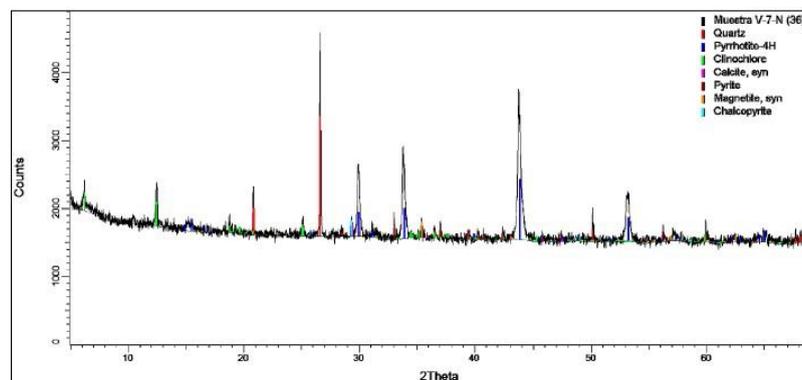
Los minerales identificados con la técnica XRD guardan correlación con el análisis macroscópico, los cuales estos resultados se detallan a continuación:

Tabla 2. Minerales identificados por el XRD en la Veta 2.

Nombre Mineral	Fórmula general	Porcentaje de presencia en muestra (Aproximado)
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	2
Clinocloro	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	5
Cuarzo	SiO_2	23
Pirita	FeS_2	3
Pirrotita	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$	62
Calcopirita	CuFeS_2	2
Magnetita	Fe_3O_4	2
Otros	xxx	1

Fuente. La tabla expone los porcentajes de presencia de mineral. Tomado del trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero en Minas. Por Reyes, J. Menoscal, G. 2020.

Figura 6. Difractograma de los minerales identificados en la Veta 2.



Fuente. Tomado del trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero en Minas. Por Reyes, J. Menoscal, G. 2020

Figura 7. Fotografía de la Veta 1, en el Subnivel 1.



Fuente. Autoría propia, 2023.

Figura 8. Fotografía de la Veta 2, en el Subnivel 1.



Fuente. Autoría propia, 2023.

CAPÍTULO 4

4. PLANEAMIENTO MINERO

4.1. Factores geomecánicos y geométricos

En este apartado se describen las características clave para la posterior selección del método de explotación:

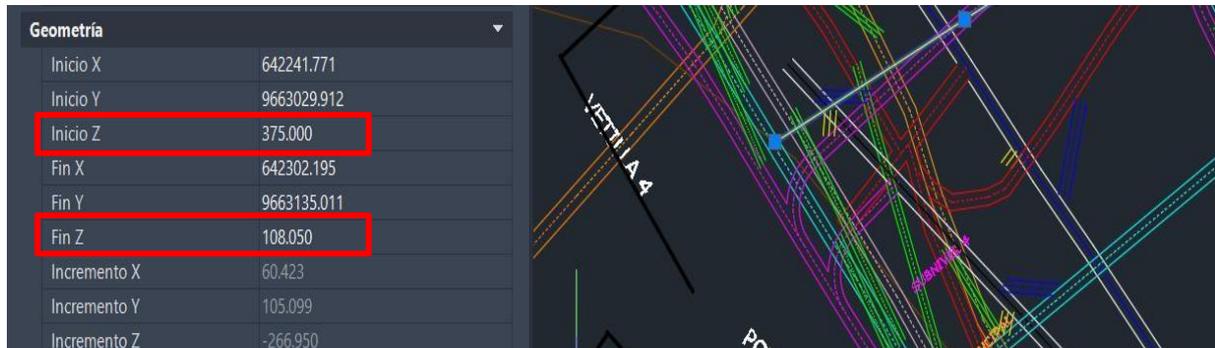
Geometría: De acuerdo con nuestra geología local se posee en la zona de estudio formaciones vetiformes (vetas, filones, vetillas); por tal motivo es una geometría **tubular**.

Potencia: Las formaciones tubulares o en vetillas poseen potencias que van desde los 5 cm a 15 cm, por ende, son potencias **muy angostas** (< a 3 m).

Inclinación: Mediante el análisis geológico tenemos inclinaciones o buzamientos que supera los 80°, siendo esto una inclinación prácticamente **vertical**.

Profundidad: La cota promedio de la superficie del terreno respecto a la profundidad del yacimiento lo pudimos obtener mediante topografía usando AutoCAD, analizando las curvas de nivel del área de estudio, tenemos una cota (z) del nivel del suelo promedio de 375 m.s.n.m; en base a la profundidad del yacimiento, y por ende la profundidad promedio del cuerpo minera a explotar tenemos la cota 175 m.s.n.m; dándonos una profundidad de 200 m (**profundidad intermedia**).

Figura 9. Obtención de la profundidad del yacimiento mediante aplicación de la topografía del área de estudio.



Fuente. Autoría propia, 2024.

Leyes: Por directrices de confidencialidad de la empresa, no se publican los resultados de las leyes de Au, pero se considera para este caso de estudio una **distribución gradual**.

Resistencia de la roca intacta: De acuerdo con información obtenida durante las labores de explotación en el Nivel 0 (296.500 m.s.n.m), la línea principal (284.600 m.s.n.m) y el subnivel 1 (239.530 m.s.n.m) se obtuvo los siguientes valores UCS (Unconfined Compressive Strength) por medio del uso de un martillo de Schmidt tipo L para la roca encajante y la mineralización.

Figura 10. Martillo de Schmidt tipo L.



Fuente. Tomado de Testmak, 2024.

Los valores obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Ensayos realizados en el nivel 0, línea principal y subnivel 1.

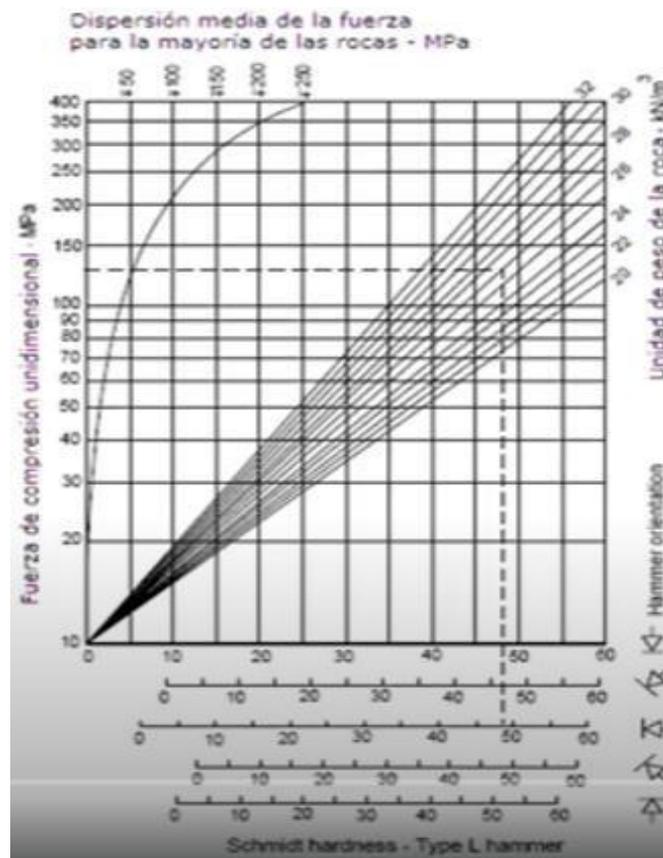
Nivel o Descripción del Sector	Valor número de rebotes
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	54
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	58
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	58
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	51
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	59
Nivel 0 (296.500 m.s.n.m)	56
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	60
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	47
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	50
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	59
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	56
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	51
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	58
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	58
Línea Principal (284.600 m.s.n.m)	58
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	51
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	47
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	57
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	60
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	58

Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	46
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	59
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	58
Subnivel 1 (239.530 m.s.n.m)	58
PROMEDIO	55

Fuente. Autoría propia, entre 2022 a 2024.

De acuerdo con la correlación del martillo de Schmidt según Miller (1965), con una densidad promedio de 2800 kg/m^3 tenemos un valor de UCS promedio de **220 MPa**.

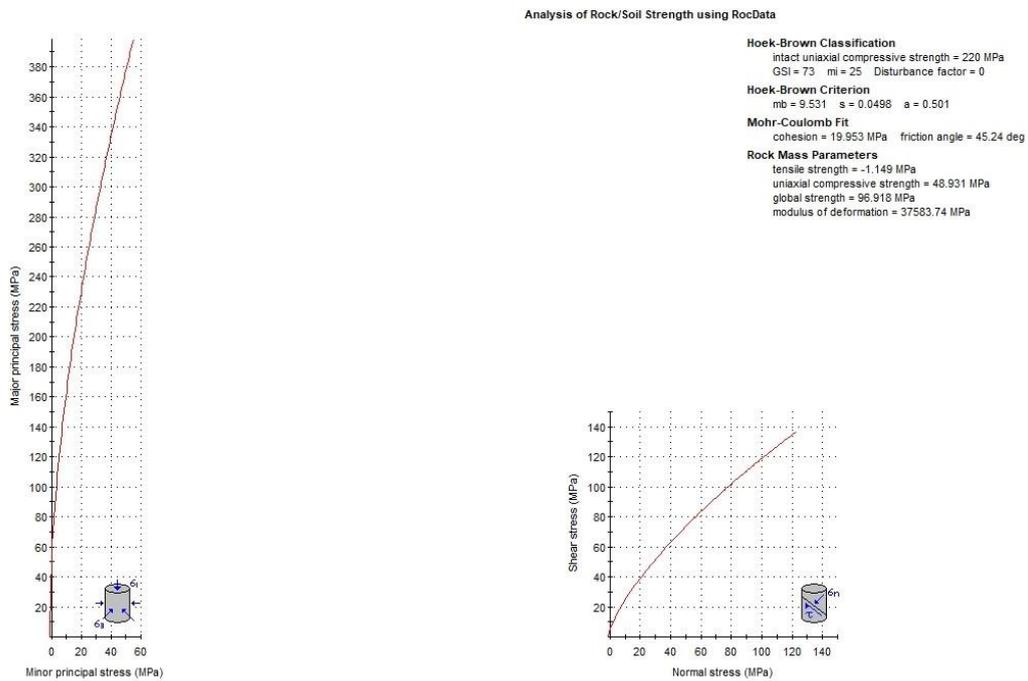
Figura 11. Correlación del Martillo de Schmidt – Miller (1965).



Fuente. Tomado de Miller, 1965.

Mediante la aplicación del software RocData se obtienen los otros parámetros geotécnicos relevantes como es el Geological Strength Index (GSI), factor de disturbancia, entre otros. Finalmente obteniendo un valor de Resistencia a la compresión simple de **48.93 MPa**.

Figura 12. Análisis de la compresión de la roca encajante mediante el Software RocData.



Fuente. Autoría propia, 2024.

De acuerdo con la Metodología UBC, la competencia de la roca encajante es:

$$\sigma_v = (0.027) \cdot H = (0.027) \cdot (200 \text{ m}) = 5.4 \text{ MPa}$$

$$\frac{UCS}{\sigma_v} = \frac{48.93 \text{ MPa}}{5.4 \text{ MPa}} = 9.061$$

Esto corresponde a una **competencia mediana** ($8 < \frac{UCS}{\sigma_v} \leq 15$) Debido a la homogeneidad del área de estudio se tomarán estos mismos valores en la caja techo y en la caja piso.

4.2. Selección del Método de Explotación

Aplicando la metodología UBC con todos nuestros factores geomecánicos y geométricos aplicado el Método UBC, arrojando el siguiente resultado:

Figura 13. Selección del Método de Minado (UBC).

SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MINADO
Método Numérico (Nicholas - 1981)

Características del mineral (yacimiento)

Geometría:	Tabular
Potencia:	Muy angosto < 3m (10 Pies)
Inclinación:	Parado > 55°
Distribución de leyes:	Gradual
Profundidad:	Intermedio (200m - 500m)
Resistencia de la roca intacta:	Competencia ntermedia (6-)
Número de estructuras:	Poco Fracturado (3-10 f/m)
Condiciones de las	Competente

Características geomecánicas de la Caja Techo:

Resistencia de la roca intacta:	Competencia ntermedia (6-)
Número de fracturas:	Poco Fracturado (3-10 f/m)
Condición de las fracturas:	Muy Competente

Características geomecánicas de la Caja Piso:

Resistencia de la roca intacta:	Competencia ntermedia (6-)
Número de fracturas:	Poco Fracturado (3-10 f/m)
Condición de las fracturas:	Muy Competente

Elección del método de minado:

Cut and Fill / Corte y relleno	34
Sub Level Stopping / Tajeo por subniveles	33
Shrinkage Stopping / Almacenamiento	33
Square Set / Cuadros de madera	32
Room and Pillar / Cámaras y Pilares	31
Open Pit / Tajo abierto	-1
Sub Level Caving / Hundimiento por	-17
Block Caving / Hundimiento por bloques	-18
Top Slicing / Hundimiento por rebanadas	-22
Long Wall Mining / Tajeo Largo	-71

Cut and Fill / Corte y relleno

By: Nilson Garrido

Fuente. Comunidad e Innovación en Minería, 2022.

Con un puntaje de 34, el método de **Corte y Relleno** se consolida como la opción más adecuada para continuar con la explotación del yacimiento. Esta elección no solo se respalda por el análisis técnico a través de la metodología UBC, sino también por la experiencia práctica en el Subnivel 1, donde ya se encuentra en fase de explotación utilizando este mismo

método. Además, en la mayoría de las labores operativas del sector, el Corte y Relleno ha demostrado ser eficiente y seguro, adaptándose favorablemente a vetas angostas, buzamientos pronunciados y condiciones geomecánicas complejas. Su implementación permite un mejor control de la estabilidad del macizo rocoso y una mayor seguridad para los trabajadores, factores decisivos que sustentan su continuidad en el presente proyecto.

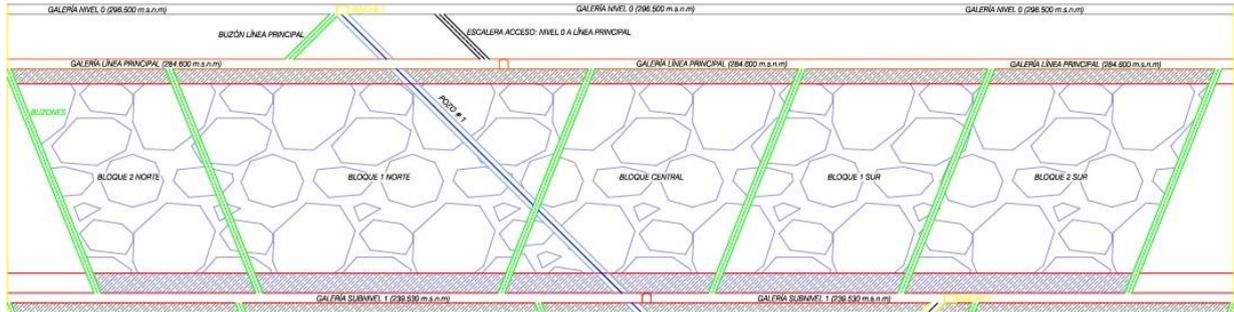
4.3. Diseño de subniveles y fases de explotación

Situación actual: El análisis se centra en la revisión de la situación actual de la mina, en donde ya tiene desarrollado y en fase de explotación el Subnivel 1. Este avance operativo ha permitido recolectar información valiosa en cuanto a la geometría del depósito, distribución de bloques, comportamiento del macizo rocoso y condiciones operativas reales, lo cual fortalece la planificación de los subniveles posteriores (2, 3 y 4).

Respecto al Nivel 0, toma la función de ser una galería de protección debido a que el límite del área de operación con otra mina vecina y dicho límite se encuentra en la cota 320 m.s.n.m; por tal motivo es restrictivo una actividad de explotación directa en dicha cota, además el Nivel 0 desempeña un papel estratégico, ya que se encuentra instalado el sistema de izaje (winche) que va en caja mediante un ángulo de 45° respecto a la horizontal.

En el Subnivel 1 en la Veta 1 se tiene 5 bloques de explotación, debido a que la limitante geográfica también es el límite de la concesión en el flanco Sur – Este, La vista lateral en dirección noroeste-sureste (NW-SE) muestra con claridad la distribución y secuencia de explotación de estos bloques, facilitando una planificación progresiva y controlada de las labores extractivas.

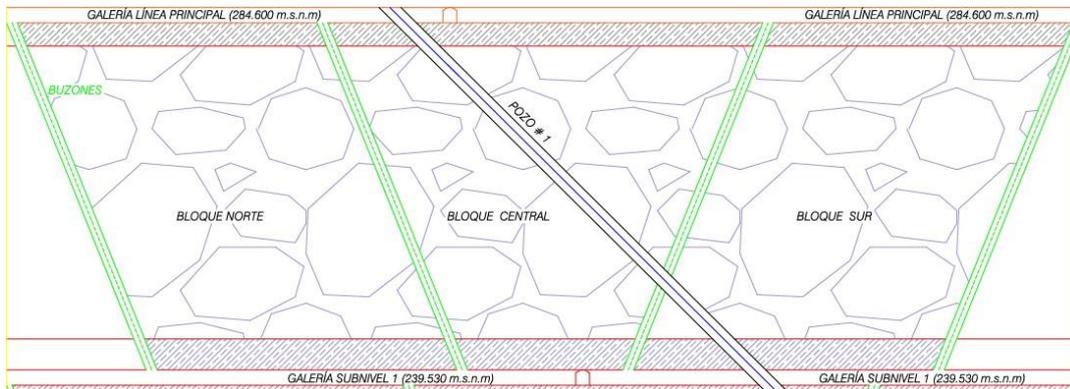
Figura 14. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 1.



Fuente. Autoría propia, 2025.

Por otro lado, en la Veta 2, aunque la mineralización presenta una menor extensión en comparación con la Veta 1, se ha logrado estructurar una secuencia de al menos tres bloques de explotación. Es importante señalar que el acceso a la Veta 2 se realiza a través de la línea principal, la cual no solo cumple funciones de desplazamiento del personal y acarreo del material, sino que también actúa como cortaveta, garantizando así una conexión operativa eficiente entre las distintas zonas del subnivel.

Figura 15. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 2.

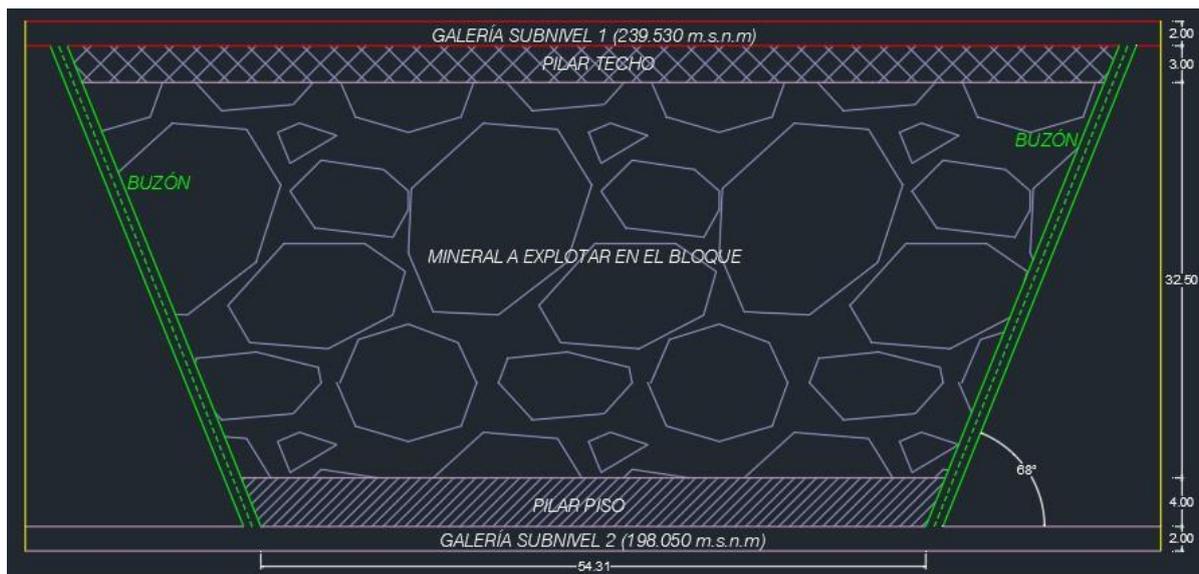


Fuente. Autoría propia, 2025.

En lo que respecta a la geometría de los bloques de explotación, centrando el análisis en un solo bloque representativo, se han definido los siguientes parámetros técnicos:

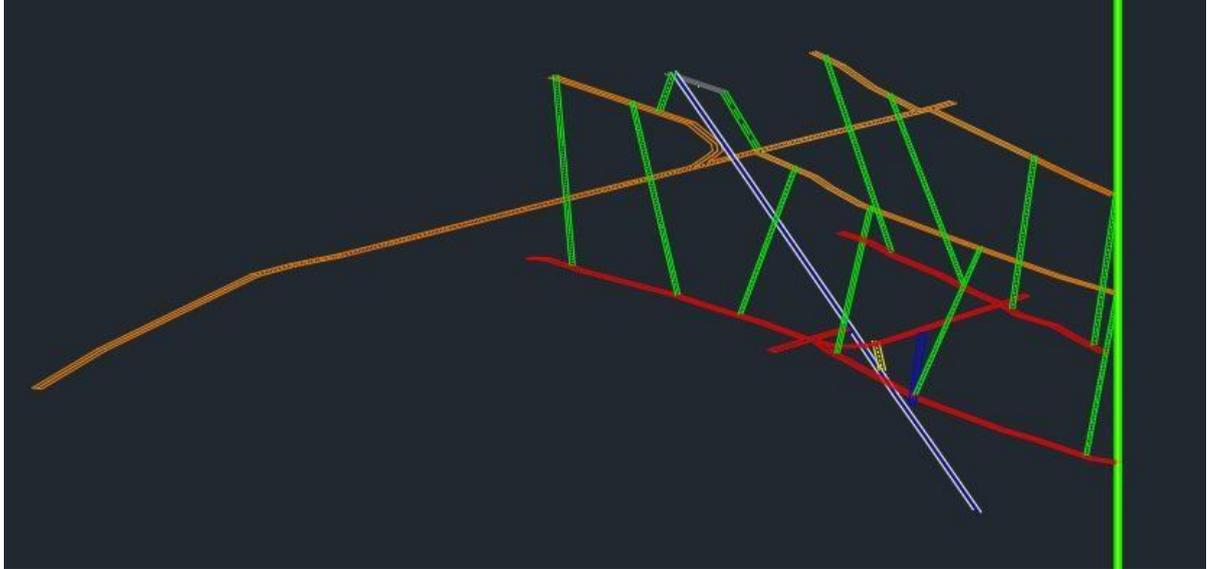
- ✓ Pilares de protección techo: 3 m
- ✓ Pilares de protección piso: 4 m
- ✓ Ángulo de inclinación buzónes de almacenamiento: 68°
- ✓ Longitud promedio de un bloque: entre 50 a 55 m.
- ✓ Altura de mineral útil a explotar: 32.50 m
- ✓ Altura galerías: 2 m

Figura 16. Vista lateral NW - SE del Subnivel 1, en la veta 2.



Fuente. Autoría propia, 2025.

Figura 17. Vista lateral S – N de la línea principal (naranja), Subnivel 1 (rojo), izaje por winche (azul) y buzones de almacenamiento (verde)



Fuente. Autoría propia, 2025.

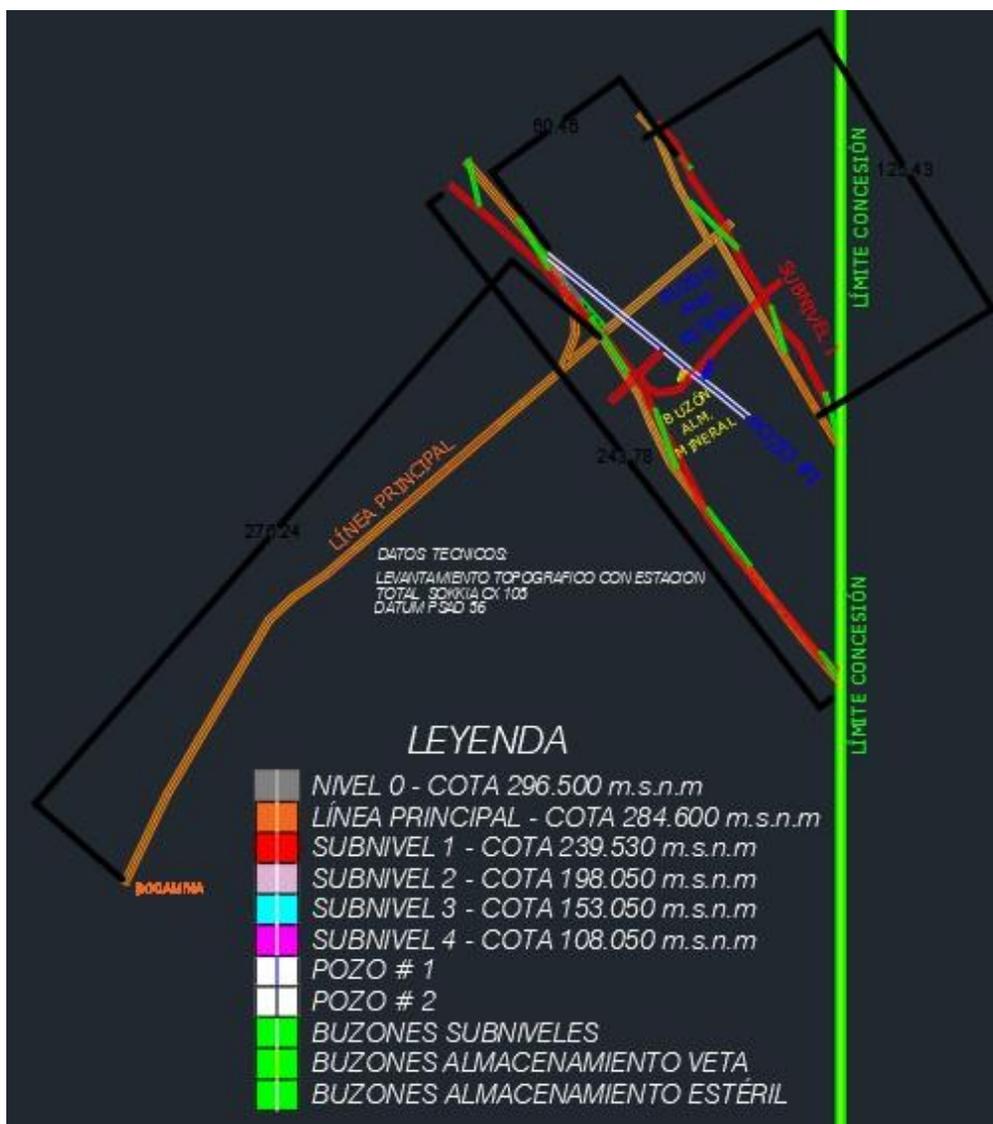
La Figura 17 muestra una **vista lateral con orientación Sur – Norte**, la cual permite visualizar de forma integral la disposición y conectividad de los principales componentes operativos del yacimiento en la zona de explotación activa. En **color naranja** se identifica la **línea principal**, que actúa como eje estructural y logístico, debido a que a través de esta se garantiza el acceso a las vetas mineralizadas, así como el transporte del personal, y maquinarias.

En **color rojo** se observa el desarrollo del **Subnivel 1**, nivel en el que actualmente se ejecutan labores de explotación tanto en la Veta 1 como en la Veta 2. Este subnivel conecta de manera funcional con las zonas de producción, asegurando una secuencia organizada de explotación por bloques.

El trazado en **color azul** representa el **sistema de izaje vertical mediante winche**, el cual se ubica dentro la roca encajante y conecta el Subnivel 1 con el Nivel 0. Finalmente, en

color verde, se ilustran los **buzones de almacenamiento**, que son estructuras inclinadas utilizadas para la acumulación temporal del mineral antes de su izaje. Estas estructuras están diseñadas con un ángulo de inclinación de aproximadamente 68° , lo que permite un flujo gravitacional eficiente.

Figura 18. Vista en planta de la Línea principal y el Subnivel 1 con el desarrollo actual de las labores mineras.

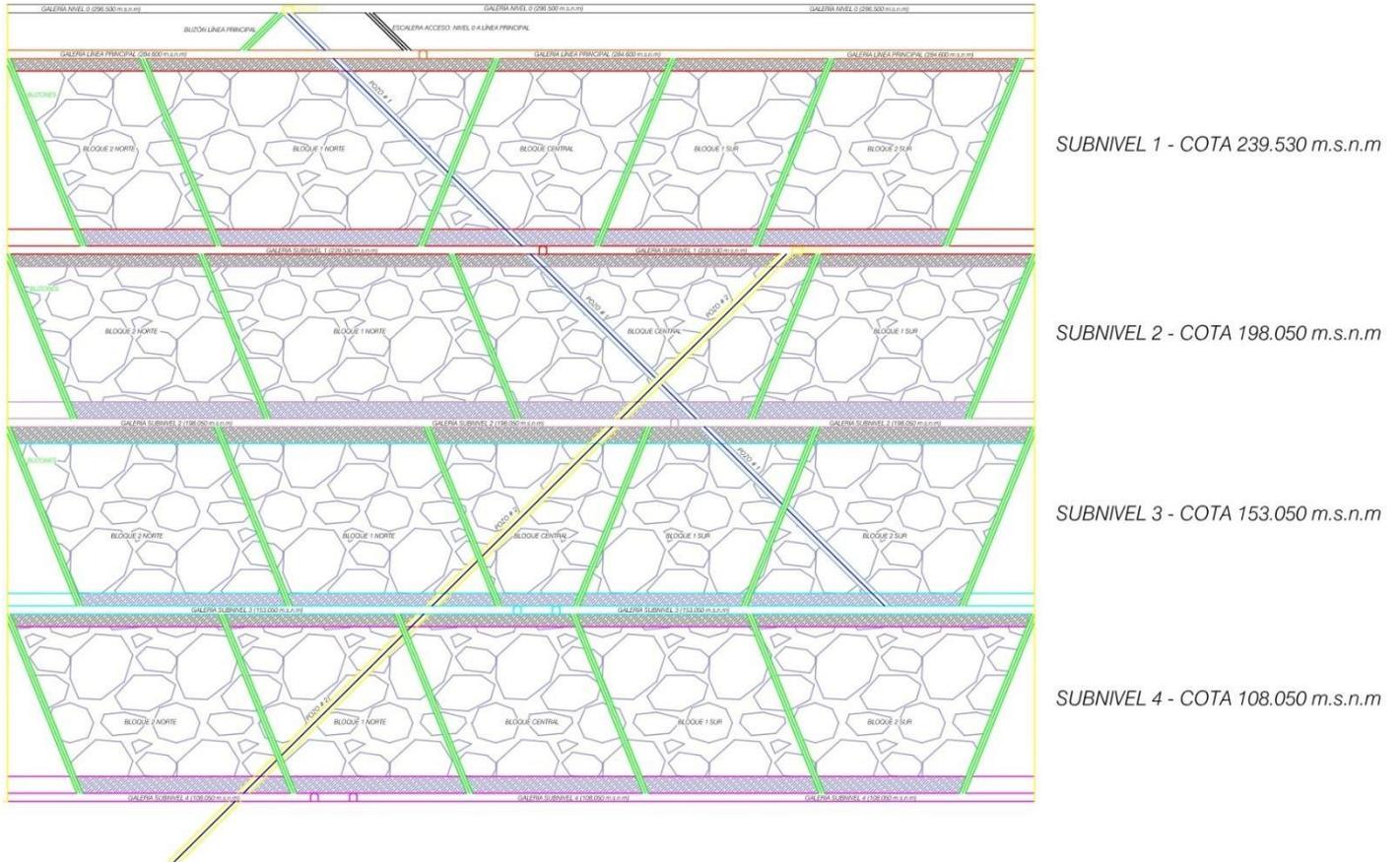


Fuente. Autoría propia, 2025.

Planificación para la creación de los subniveles 2, 3 y 4: Dado que las condiciones geotécnicas del yacimiento se mantienen homogéneas se decide seguir utilizando las geometrías previamente usadas para la distribución de los bloques de explotación; por ende, los siguientes subniveles tendrán en común las siguientes características:

- ✓ Se mantiene las dimensiones de las galerías de transporte y almacenamiento, así como el dimensionamiento de los bloques y sus respectivos pilares de protección.
- ✓ Se propone la creación de un nuevo sistema de izaje (winche #2) para izaje debido a que la trayectoria del actual (winche #1) se aproxima al límite de la concesión, lo cual podría generar conflictos operativos y legales.
- ✓ Se seguirá usando la maquinaria disponible, adecuada al régimen de pequeña minería bajo el cual opera la empresa.

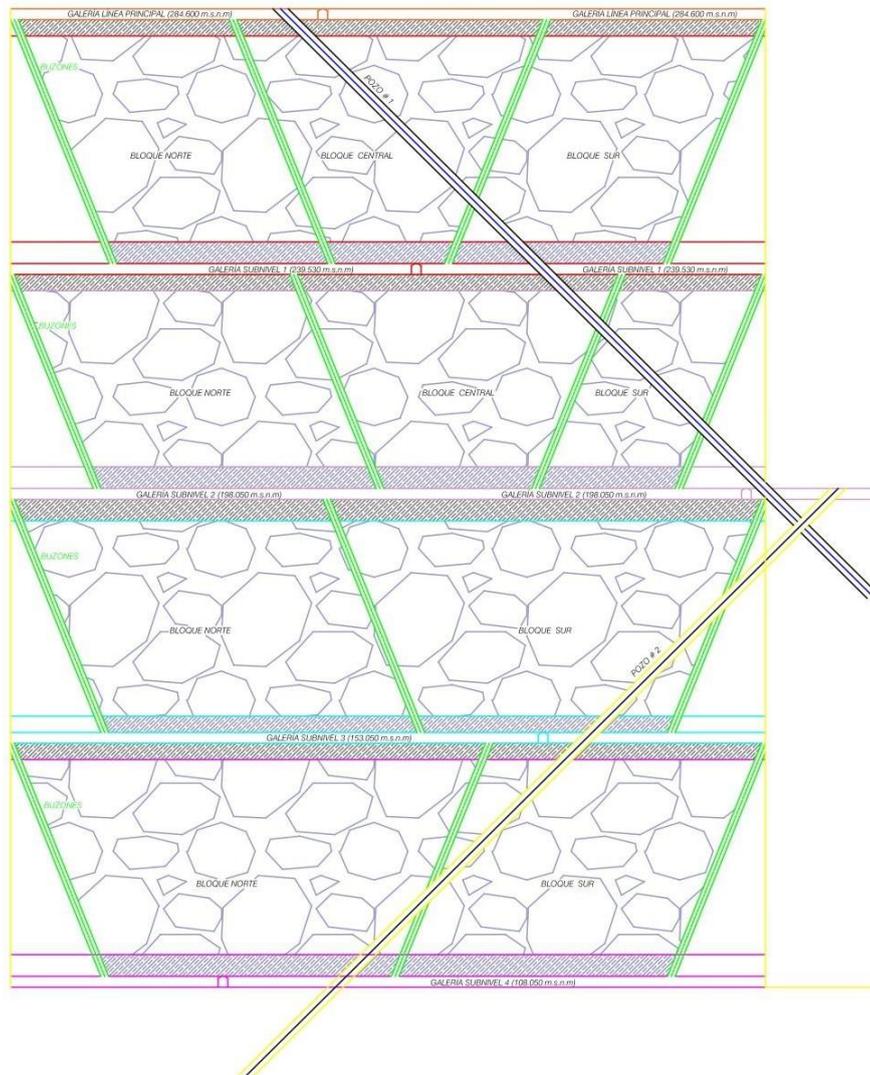
Figura 19. Vista lateral NW - SE del Subnivel 2, 3, 4, en la veta 1.



Fuente. Autoría propia, 2025.

Las figuras 19 y 20 muestra la planificación a corto y a largo plazo de los siguientes subniveles, como son el 2, 3 y 4; esta representación permite visualizar la continuidad del esquema de explotación por bloques aplicando el método corte y relleno ascendente, manteniendo la alineación estructural y operativa.

Figura 20. Vista lateral NW - SE del Subnivel 2, 3, 4, en la veta 2.

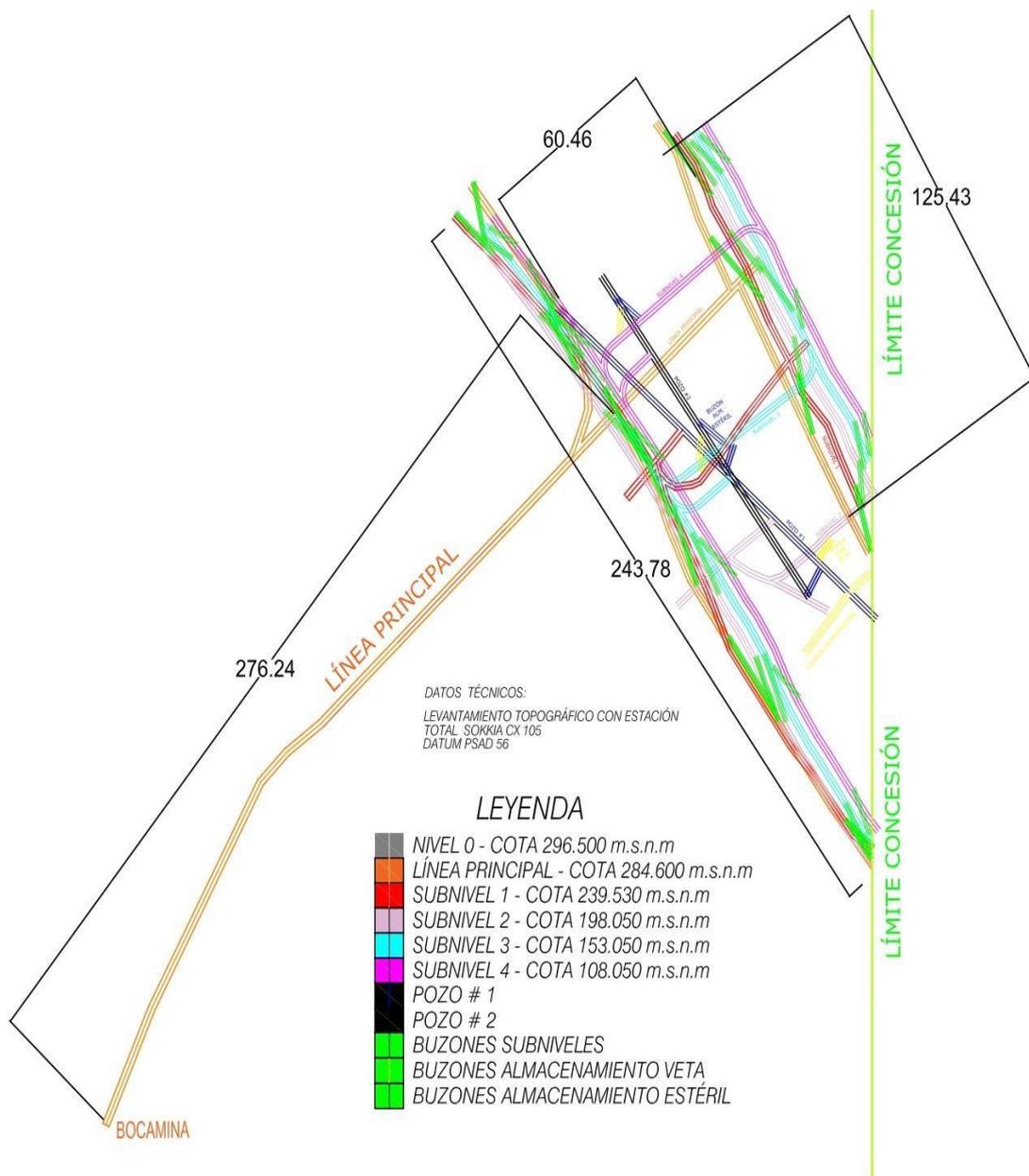


Fuente. Autoría propia, 2025.

De manera similar al Subnivel 1, en la **Veta 1** se contempla la conformación de **cinco bloques de explotación** para cada uno de los subniveles proyectados (2, 3 y 4). La incorporación de un **nuevo sistema de izaje**, ubicado estratégicamente más alejado del límite de la concesión, permite mejorar las condiciones de seguridad operativa y facilita el acceso a una mayor cantidad de mineral, lo que resulta beneficioso para la continuidad del desarrollo minero.

Por su parte, en la **Veta 2**, dada su **menor extensión** en comparación con la Veta 1, se ha planteado una planificación que contempla entre **dos y tres bloques de explotación** por subnivel. Esta decisión se basa en la configuración del yacimiento y busca mantener un equilibrio entre eficiencia operativa y aprovechamiento del recurso.

Figura 21. Vista en planta de la Línea principal y el Subnivel 1, 2, 3,4 con la planificación minera planteada a corto y a largo plazo.



Fuente. Autoría propia, 2025.

Figura 22. Vista lateral SW – NE de la línea principal (naranja), Subnivel 1 (rojo), Subnivel 2 (morado), Subnivel 3 (celeste), Subnivel 4 (magenta), izaje por winche #1 (azul), izaje por winche #2 (negro) y buzones de almacenamiento (verde).



Fuente. Autoría propia, 2025.

En la **Figura 22** se muestra una vista lateral con orientación SW - NE, donde se puede apreciar claramente la disposición de los subniveles ya ejecutados y los que están en fase de planificación. El **Subnivel 1** aparece en rojo, mientras que los **Subniveles 2, 3 y 4** se distinguen con los colores morado, celeste y magenta, respectivamente. También se representa el sistema de izaje actual (**winche #1**, en azul) y el nuevo izaje proyectado (**winche #2**, en negro), ubicado más al interior del área de concesión para asegurar un

desarrollo más seguro. Para cada subnivel se han **proyectado los buzones de almacenamiento de mineral y buzones de almacenamiento de caja**, manteniendo la organización y el esquema operativo definido previamente.

4.4. Diseño de vías para la carga y transporte

Desde el año 2018, bajo una nueva administración, la Sociedad de Producción Minera Jerusalén ha venido desarrollando mejoras significativas en la infraestructura vial al interior de la mina. Estas mejoras incluyen tanto la optimización de las vías existentes como la construcción de nuevas rutas de transporte subterráneo, siempre en cumplimiento con los estándares de seguridad y calidad exigidos por la normativa vigente.

En este apartado se describen específicamente las características de la línea principal de transporte y las vías asociadas al sistema de izaje del pozo N°1, actualmente en operación.

Línea principal

El *sostenimiento*, según estudios geomecánicos realizados en las zonas más críticas del recorrido, donde el índice de calidad del macizo rocoso presenta valores bajos; ha sido resuelto mediante la instalación de cimbras metálicas. Este tipo de sostenimiento pasivo es ampliamente utilizado en labores permanentes debido a su alta resistencia mecánica. Las cimbras están conformadas por perfiles de acero en forma de bóveda, diseñados para soportar condiciones estructurales exigentes.

El sistema se complementa con elementos como tirantes (varillas y ángulos), postes, costillas, tabloneros y bloques de tope (con material estéril o concreto), lo que permite una integración estructural eficiente.

Figura 23. Instalación de cimbras metálicas con planchas acanaladas en el techo y topes de bolsas de concreto.



Fuente. Camus, 2022.

La **vía férrea** está compuesta por rieles, durmientes y balasto, junto con diversos componentes complementarios que aseguran su funcionalidad, como los dispositivos de unión entre durmientes. Uno de los aspectos más relevantes del diseño es el manejo del agua de mina, la cual tiende a ser corrosiva para los sistemas de transporte, especialmente para los vagones y la locomotora.

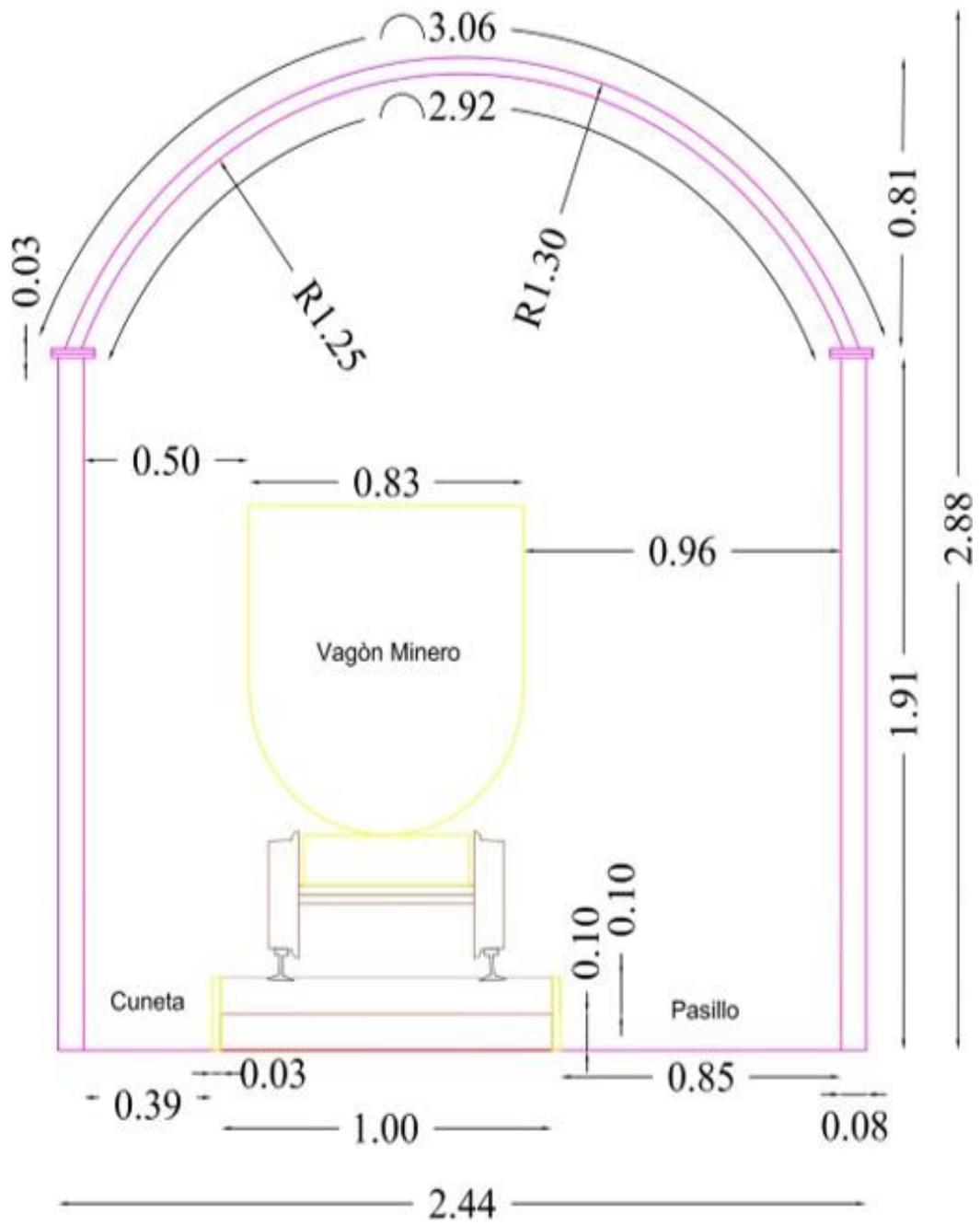
Para mitigar estos efectos, el balasto juega un papel fundamental. Este está conformado por material estéril con granulometría controlada, y cumple varias funciones esenciales: proporciona soporte a los durmientes, distribuye las cargas de manera uniforme, reduce los esfuerzos transversales generados por el paso de la maquinaria, y facilita la formación de cunetas laterales que canalizan el agua, manteniendo la vía seca y en condiciones óptimas de operación.

Figura 24. Componentes de la línea principal.



Fuente. Autoría propia, 2024.

Figura 25. Detalle de acotamiento dimensional de la línea principal.



Fuente. Autoría propia, 2024.

Sistema de izaje del pozo N° 1

El sistema de izaje actualmente en funcionamiento fue diseñado considerando las condiciones reales de la faena y su proyección operativa, con una producción promedio de 600 toneladas/mes de mineral y 2400 toneladas/mes de estéril. La elección del equipamiento, el diseño del pozo y sus componentes auxiliares responden tanto a la capacidad de extracción requerida, como a la realidad económica de la mina, buscando siempre un equilibrio entre eficiencia, seguridad y sostenibilidad operativa.

- ***Accionamiento principal:***

El sistema está impulsado por un motor eléctrico trifásico de 20 HP, cuya potencia fue determinada mediante cálculos técnicos en base a parámetros como la longitud del pozo, el peso de carga por ciclo, el tipo de cable, la velocidad de izaje y la producción estimada. Este dimensionamiento se detalla en los anexos.

Este tipo de motor presenta ventajas importantes: bajo nivel de mantenimiento, buena eficiencia energética, confiabilidad operativa y facilidad para su integración con sistemas de control.

- ***Buzones de almacenamiento:***

En la parte superior del pozo se han implementado buzones diferenciados para mineral y material estéril, lo que permite organizar de forma más eficiente la carga extraída. Esta distribución reduce los tiempos de espera y facilita el despacho del material hacia planta.

Figura 26. Buzón de almacenamiento cargando mineral a los vagones.



Fuente. Autoría propia, 2023.

- ***Revisión y mantenimiento del cable:***

Se lleva a cabo una inspección constante del cable de izaje, evaluando desgaste, tensado y posibles fallas estructurales. Estas inspecciones son parte de un programa de mantenimiento preventivo que garantiza la seguridad operativa del sistema y evita fallas que podrían comprometer la continuidad de la producción.

- ***Gradiente del pozo:***

El pozo tiene una inclinación de 45 grados respecto a la horizontal, lo que ha resultado ser una solución práctica y eficiente para las condiciones de la actividad minera. Este ángulo permite que la gravedad juegue un rol a favor durante el izaje, ayudando a que el motor trabaje con menos esfuerzo, lo cual se nota en un menor consumo eléctrico y menos

desgaste del equipo. Además, facilita el movimiento del balde a lo largo del pozo, haciendo que el traslado del material sea más fluido y rápido.

Figura 27. Giro del balde para descarga de mineral en el buzón.



Fuente. Autoría propia, 2023.

- ***Distribución de servicios y dimensiones:***

El pozo tiene una sección útil de 2.20 metros de alto por 2.20 metros de ancho, lo cual permite una organización eficiente de todos los elementos necesarios para su operación:

- ✓ Vía férrea, para el desplazamiento de carros de carga.
- ✓ Sistema de iluminación artificial, fundamental para la seguridad del personal.
- ✓ Redes de comunicación y señalización, que permiten mantener contacto constante entre superficie e interior mina.
- ✓ Sistema de drenaje por bombeo, esencial para mantener el área operativa libre de acumulación de agua.
- ✓ Red eléctrica, para la alimentación del sistema de izaje y otros equipos auxiliares.

Figura 28. Componentes de pozo # 1.



Fuente. Autoría propia, 2023.

- ***Gestión operativa***

El sistema es manejado por personal técnico capacitado, con experiencia en faenas de izaje y conocimiento de protocolos de seguridad. Esta capacitación no solo reduce los riesgos de accidentes, sino que permite una respuesta rápida y adecuada ante situaciones inesperadas. La correcta operación del sistema es clave para mantener el ritmo productivo y minimizar paradas no programadas.

4.5. Maquinaria y equipos

En cualquier operación minera subterránea, el equipamiento disponible juega un papel decisivo en la planificación de los trabajos. Más allá de su capacidad técnica, es importante considerar cómo se integran estos equipos al ritmo de trabajo, a las condiciones del yacimiento y a los objetivos de producción, en este caso la maquinaria se encuentra relacionada a la pequeña minería aplicada en la Sociedad de Producción Jerusalén.

Equipos de perforación y voladura

Las perforadoras Secoroc YT27, que operan con aire comprimido a 6 bar, son las principales herramientas para el desarrollo de frentes de trabajo. Su número (15 en total) permite mantener un buen ritmo de avance, cubriendo varias zonas al mismo tiempo. Estas perforadoras han demostrado ser fiables, con un rendimiento constante, especialmente en rocas de dureza intermedia a alta.

Figura 29. Perforadora Secoroc YT27.



Fuente. Autoría propia, 2023.

Transporte interno – locomotoras eléctricas

Las locomotoras utilizadas (Hunan Yutong Mining) funcionan con batería recargable de litio y son capaces de mover cerca de 15 toneladas por ciclo. Su uso representa una buena decisión desde el punto de vista operativo, ya que ofrecen velocidades de hasta 10 km/h y cinco marchas, lo que da cierta versatilidad en los desplazamientos.

Sistemas de aire y energía

El aire comprimido, indispensable para varias funciones, se garantiza mediante dos compresores Kaeser, que trabajan a 125 PSI y 250 HP. Este equipo es clave no solo para las

perforadoras, sino también para otras labores menores como limpieza de frentes o accionamiento de herramientas. En paralelo, se cuenta con un generador Kohler a diésel, el cual es esencial como respaldo energético, especialmente en zonas donde la red eléctrica puede presentar fallas.

Figura 30. Compresor Kaeser.



Fuente. Autoría propia, 2023.

Maquinaria de carga y auxiliares

La cargadora eléctrica incluida en el sistema cumple una función estratégica en el acarreo primario del mineral. Con una capacidad que varía entre 20 a 40 m³/h, su eficiencia permite reducir tiempos de ciclo en cada labor de extracción. A esto se suman equipos complementarios como los blowers y kits de termofusión, que apoyan las tareas de ventilación y montaje de infraestructura interna respectivamente.

Figura 31. Cargadora eléctrica.



Fuente. Autoría propia, 2023.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La caracterización mineralógica previa XRD en 2020, junto con el análisis macroscópico de las vetas angostas observadas en la línea principal y el Subnivel 1, justifican técnicamente la aplicación del método de explotación Corte y Relleno, seleccionado mediante la metodología UBC. Esta elección se ve reforzada por la presencia de una roca encajante competente, con una resistencia a la compresión simple (UCS) de 48,93 MPa.
- La planificación de los subniveles 2, 3 y 4 mantiene un diseño similar al Subnivel 1 ya desarrollado, con bloques de entre 50 y 55 metros de longitud y pilares de protección de 3 metros en techo y 4 metros en piso. Esta configuración asegura la estabilidad estructural y garantiza la continuidad operativa en las futuras etapas de explotación.
- La experiencia obtenida durante la operación del Subnivel 1 servirá como base para optimizar los procesos de perforación, voladura, acarreo y relleno en los subniveles siguientes. Esto permitirá reducir los tiempos de ciclo y aumentar los índices de productividad.
- La incorporación de un nuevo winche en el Pozo #2 es una mejora clave en la infraestructura operativa, ya que su nuevo sentido de izaje permitirá acceder a mayores volúmenes de mineral, acercándose estratégicamente a los límites de la concesión minera colindante.

Recomendaciones

- Incorporar un análisis enfocado en la identificación y evaluación de los principales riesgos operacionales asociados a la minería subterránea. Entre estos destacan la inestabilidad de los frentes de trabajo, fallas en el sistema de izaje, acumulación de gases nocivos y riesgos eléctricos. La aplicación de una matriz de riesgos, que relacione probabilidad e impacto, permitiría anticipar escenarios críticos y fortalecer la planificación desde una perspectiva preventiva.
- Para futuras investigaciones, se sugiere incorporar una sección dedicada al análisis de los costos asociados al mantenimiento de equipos críticos, como locomotoras, compresores, winches y cargadoras. Este enfoque complementaría la visión técnica desarrollada, permitiendo estimar con mayor precisión la vida útil de los equipos y facilitar una planificación más eficiente de los recursos en el mediano y largo plazo.
- Evaluar la incorporación progresiva de tecnologías de automatización y monitoreo en la operación subterránea, tales como sistemas de control digital de flota, drones para inspección topográfica superficial y plataformas móviles de comunicación. Estas herramientas permitirían optimizar la eficiencia operativa, mejorar la toma de decisiones en tiempo real y reforzar los estándares de seguridad, contribuyendo a una gestión minera más moderna y sostenible.
- Elaborar una proyección estimada del horizonte de vida útil de la operación minera, considerando el ritmo actual de producción, la ejecución planificada de subniveles y el potencial de nuevas zonas mineralizadas. El establecimiento de escenarios a 5, 10 y 15 años permitiría una planificación estratégica más robusta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bedoya, A. M. (1961). *dspace*. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17951/1/El%20Cojitambo.pdf>
- Camus. (2022). *Planificación Minera: Diseño y planificación de minas y operaciones mineras*. Santiago de Chile.
- Correa, C. D. (2019). *EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE EXPLOTACIÓN MEDIANTE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL. CASO PRÁCTICO YACIMIENTO DE HIERRO EN VENTANILLAS, YONÁN, CAJAMARCA*.
- CURSO/GUÍA PRÁCTICA DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA*. (2019). INMOLEY.
- Gonzales, A. O., & Pozo, A. R. (12 de 2015). *Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/324507378_Inestabilidad_del_terreno_en_zonas_urbanas_de_Zaruma_y_Portovelo_Ecuador_Factores_condicionantes_y_desencadenantes
- Hustruid, K. (2018). *Open Pit Mine Planning and Design*. Boca Ratón.
- INMOLEY. (2019). *CURSO/GUÍA PRÁCTICA PLANIFICACIÓN MINERA ESTRATÉGICA*.
- Jungal, V. F. (2021). *Diseño del método de explotación de un cuerpo mineralizado en subniveles para conexión con frente de avance en el Proyecto Minero Bosque de Oro*. Guayaquil: ESPOL.
- Kim. (2021). *Selection mining methods via multiple criteria decision analysis using TOPSIS and modification of the UBC method*. *Journal of Sustainable Mining*.
- LOCOSPOOR, C. (1960). *LIGHY RAILWAY MATERIAL*.
- Manual de Residuos Industriales Mineros. (2015). Granulometría en porcentaje de paso de malla.
- Menoscal, R. . (2021). *Caracterización mineralógica de vetas auríferas de la concesión Sociedad de producción Minera Jerusalén – Ponce Enríquez, Provincia del Azuay - Ecuador*. Guayaquil: ESPOL.
- Mijalkovski. (2022). *Application of UBC methodology for underground mining method selection*.
- Sociedad Nacional de Minería, P. y. (2013). *Planificación Minera*. Lima.

Anexos

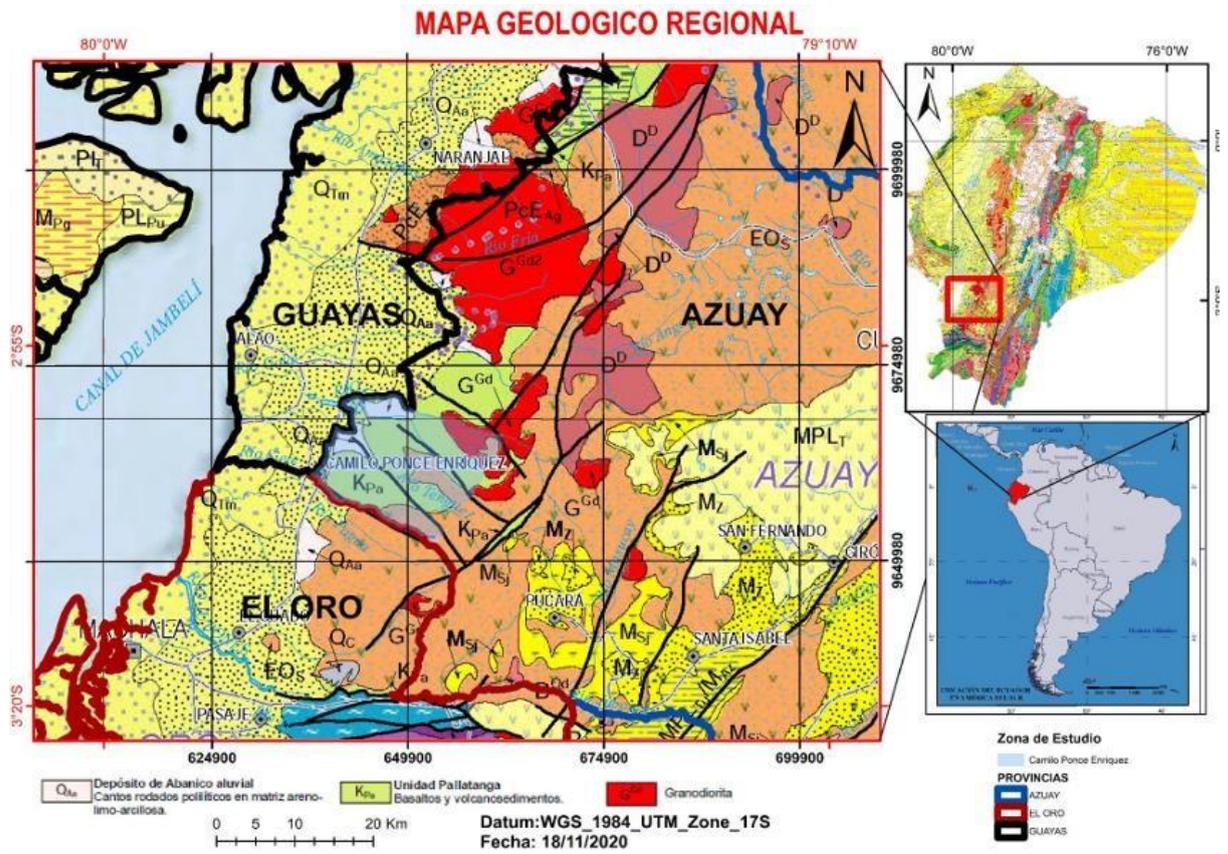
Anexo 1: Determinación de los valores de GSI en función de la calidad geológica y las condiciones estructurales del macizo rocoso, mediante el uso del software RocData.

Rock Type: <input type="text" value="General"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="73"/>						
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
     	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	90			N/A	N/A
		80	70 <input type="text" value="73"/>			
		60		50		
		40			30	
		20				10
		N/A	N/A			

Anexo 2: Determinación in situ de la mineralización macroscópica en la Veta 1, con predominancia de pirita y calcita.



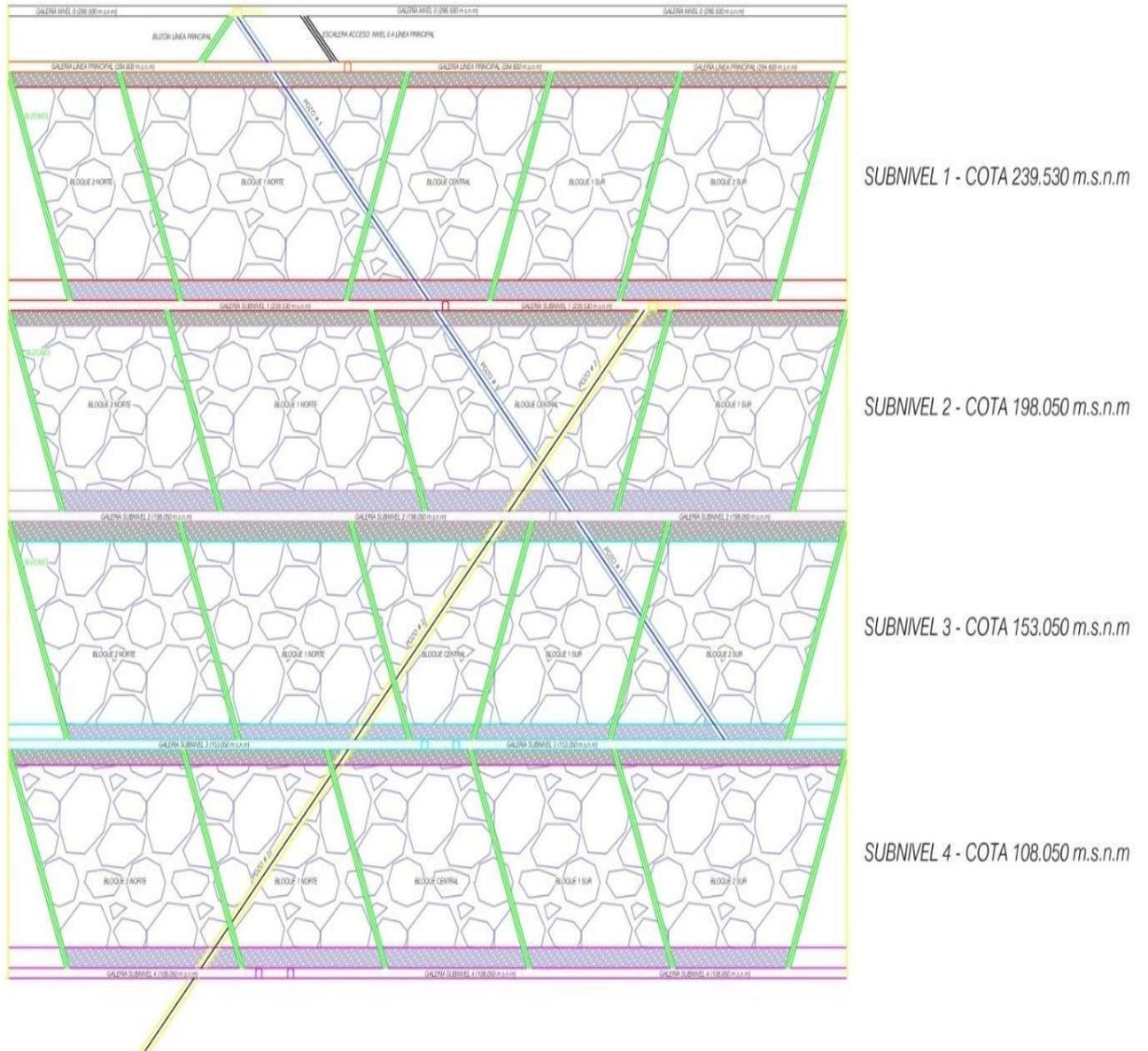
Anexo 3: Mapa geológico regional del área de estudio, por el PhD. Arturo Egüez.



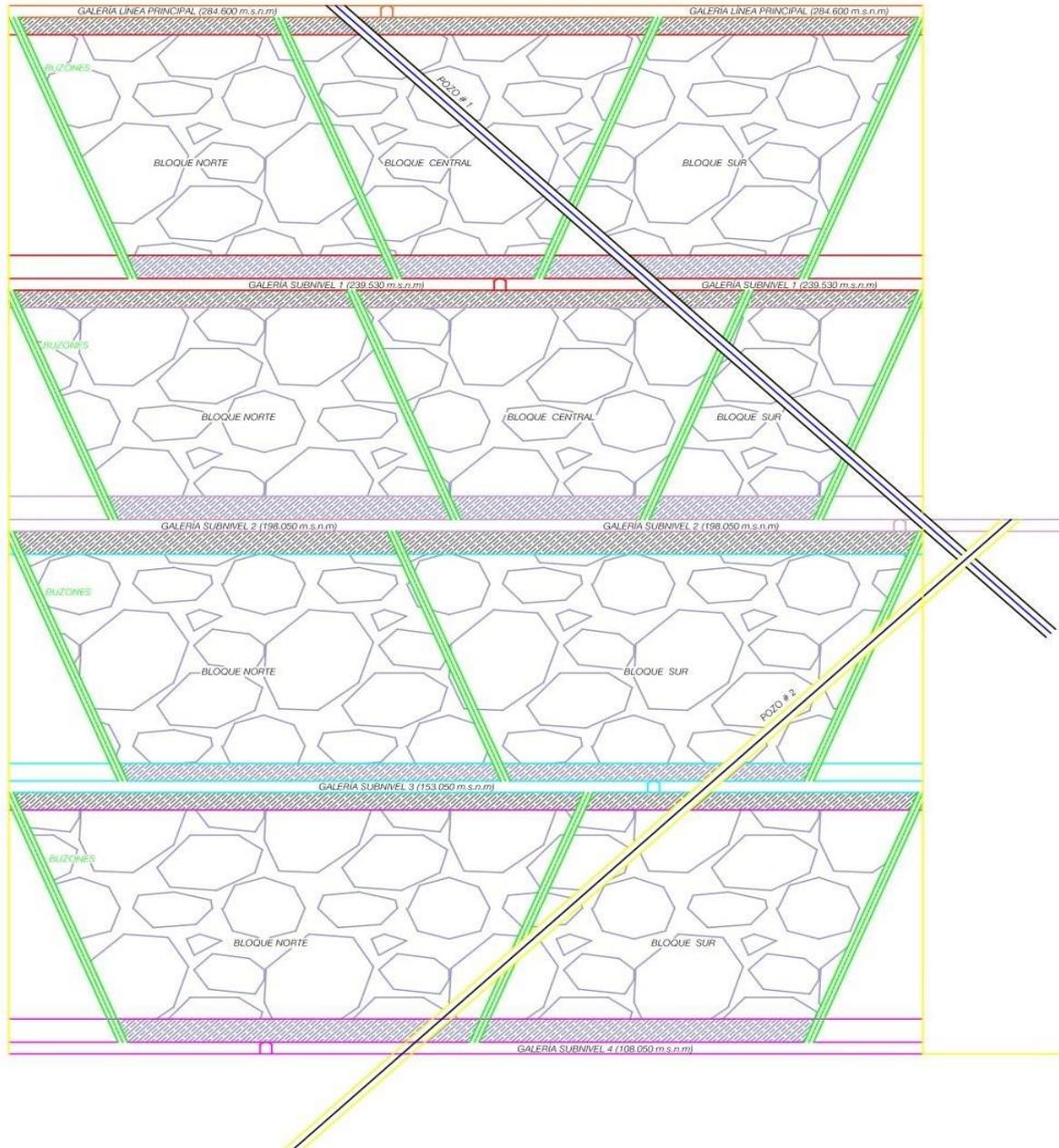
Anexo 4: Personal altamente capacitado para la operación del sistema de izaje en el Pozo #1.



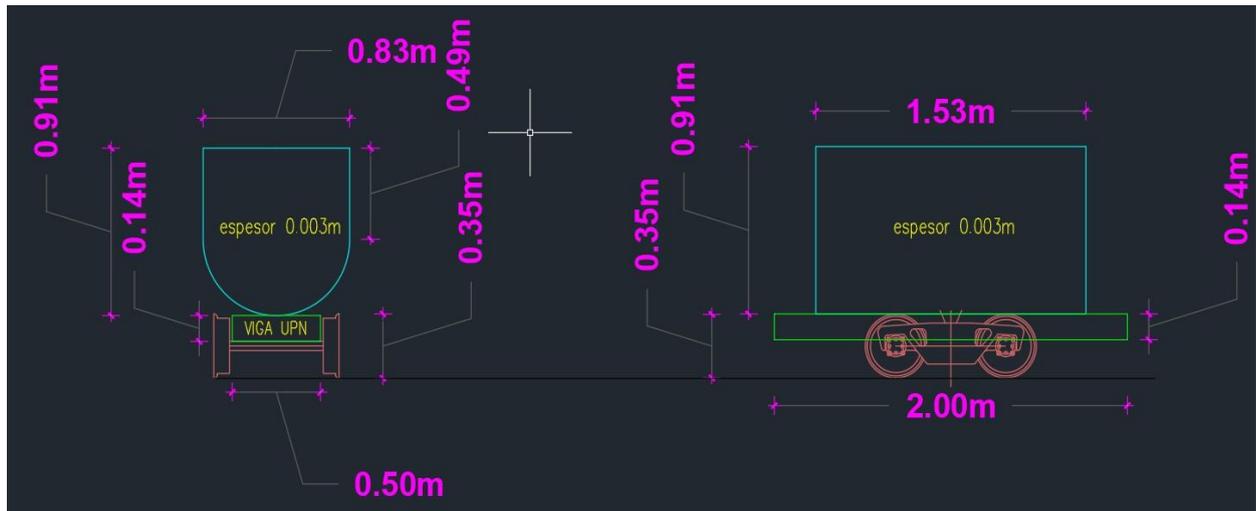
Anexo 5: Vista lateral NW–SE de la Veta 1, con representación de los subniveles propuestos y los sistemas de izaje planificados.



Anexo 6: Vista lateral NW–SE de la Veta 2, con representación de los subniveles propuestos y los sistemas de izaje planificados.



Anexo 7: Dimensionamiento del vagón utilizado en el sistema de transporte mediante locomotora eléctrica.



Anexo 8: Cálculos técnicos para el diseño del sistema de izaje mediante winche.

DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN MEDIANTE USO DEL WINCHE			
<i>Cálculo de equipos y materiales</i>			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud a winchar	L	400	m
Largo Balde		1	m
Ancho Balde		0.8	m
Alto Balde		0.7	m
Volumen carro minero	Vc	0.6	m ³
Densidad mineral	pm	2.8	t/m ³
Densidad estéril	pe	2.7	t/m ³
Humedad	h	0.03	
Densidad mineral incluyendo humedad	p	2.884	t/m ³
Densidad estéril incluyendo humedad	p	2.781	t/m ³
Factor de carguío	fc	0.85	
Esponjamiento mineral	em	0.3	
Esponjamiento estéril	ee	0.3	
Capacidad de carga unitaria para mineral	cm	1.06	t
Capacidad de carga unitaria para estéril	ce	1.02	t
Número de carros	n	1	
Capacidad de carga por viaje de mineral		1.06	t
Capacidad de carga por viaje de estéril		1.02	t
Capacidad de carga máxima		1.06	t
Peso carro minero	mc	0.25	t
Peso total carros		0.25	t
Peso total por viaje	mT	1.31	t
<i>Cálculo del cable óptimo</i>			
Coefficiente de aceleración	A	0.125	
Ángulo alfa		45	°
Seno alfa	G	0.707	
Coseno alfa	COS	0.707	
Coefficiente de resistencia del tren	Q	0.1	

Coefficiente de gradiente	R	0.01	
Constante de masa del cable	k	0.22	
Esfuerzo del cable	K	35	
Coefficiente equivalente cable		0.088	
Diámetro del cable calculado	d	1.029	cm
Diámetro del cable calculado	d	10	mm
Diámetro de cable a usar	d	1.2	cm
Masa equivalente cable	mC	0.317	kg/m
Fuerza ruptura del cable (tensión máxima)	S	50.4	kN
Producción			
Producción mensual mineral	m	600	t/mes
Producción mensual estéril	m	2400	t/mes
número de días trabajados por año	d	350	días
horas efectivas de trabajo por día	h	16	horas
Producción anual mineral	a	7200	t
Producción anual estéril	a	28800	t
Producción total anual	a	36000	t
Coefficiente de irregularidad de la producción, para extracción de skips y carros mineros	c	1.15	
Capacidad horaria de extracción	Qh	7.39	t/h
Velocidad carro subida	vs	0.86	m/s
Velocidad carro bajada	vb	3.89	m/s
tiempo de 1 subida	ts	0.13	h
tiempo de 1 bajada	tb	0.03	h
tiempo efectivo de izaje por turno		8	horas
Máximo tonelaje por turno	Mt	59.14	t/turno
Número máximo de viajes por hora (mineral)	N	8	viajes/h
Número máximo de viajes por hora (estéril)	N	8	viajes/h
Tiempo por viaje mineral		0.16	horas
Tiempo por viaje estéril		0.16	horas
Situación más crítica		0.16	horas
Tiempo de descanso nivel superior e inferior		45	seg
Tiempo efectivo viaje		479	seg
Velocidad promedio cuerda		0.83	m/s
Cálculo de masas y eficiencias para un sistema no balanceado			
Ancho del tambor	Atmb	0.75	m
Diámetro del tambor del winche mínimo	Dtmb	0.576	m
Velocidad cuerda	v	0.83	m/s
Longitud total del cable	l	400	m
Masa del material a manipular	W	1056	kg
Masa del carro minero	ws	250	kg
Masa del cable	wr	126.72	kg
Tiempo de aceleración - desaceleración	t	7	s
Masa del cable enrollado durante la aceleración	wa	0.93	kg
Masa del cable enrollado durante la desaceleración	wb	0.93	kg
Peso total del cable	wr0	255.29102 61	kg
Masa equivalente de las partes en movimiento (para operaciones balanceadas y no balanceadas), reducido al radio del tambor, incluyendo engranajes, tambores con embragues, poleas, pero no la armadura del motor	W0	31.03	kg

Masa total del sistema de izaje	W'	1592.3087 18	kg
Constante de eficiencia para piques inclinados y verticales	k	0.05	
Eficiencia del mecanismo	E	0.7975183 09	
<i>Cálculo de las potencias por períodos</i>			
Potencia de aceleración máxima	1	0.0482538 34	kW
Potencia de desaceleración máxima	2	- 0.0482538 34	kW
Potencia en el comienzo de aceleración (equivalente)	3	8.2903285 49	kW
Potencia en la velocidad máxima en el final de la aceleración	4	8.2849730 9	kW
Potencia en la velocidad máxima al principio de la desaceleración	5	7.5624217 8	kW
Potencia al final de la desaceleración (potencia equivalente)	6	7.5570663 21	kW
Potencia fricción máxima	7a	2.0687352 39	kW
Potencia fricción de rodamiento	7b	0.1511413 26	kW
Potencia fricción del cable	7c	0.0733262 23	kW
Potencia por fricción (promedio) para piques inclinados	7	2.2932027 88	kW
<i>Cálculo de los valores finales para cada punto del diagrama de izaje</i>			
Punto A	A	10.578175 88	kW
Punto B	B	10.353708 33	kW
Punto C	C	9.8556245 68	kW
Punto D	D	9.7633848 5	kW
Potencia máxima	RMS	13	kW
Potencia máxima	RMS	20	Hp
<i>RESULTADOS</i>			
Peso total a izar		1.6	t
Velocidad		0.83	m/s
Diámetro del cable		1.2	cm
Potencia requerida		20	Hp
Diámetro mínimo del tambor		0.576	m