



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

N° 062-DI-FIMM-2025

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MINADO SUBLEVEL STOPING
Y PRODUCTIVIDAD OPERATIVA EN ZONA CUERPOS –
MINERA ALPAYANA 2024”**

Presentado por:

RAMOS BORDA RICARDO JHAIROL

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 17%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 15 de agosto de 2025.

Atentamente,

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

**UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS Y METALURGIA**



**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MINADO SUBLEVEL
STOPING Y PRODUCTIVIDAD OPERATIVA EN ZONA
CUERPOS – MINERA ALPAYANA 2024**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo en ciencias puras, ciencias de la tierra e ingeniería de procesos

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

PRESENTADO POR

BACH. RICARDO JHAIROL RAMOS BORDA

ICA, PERÚ

2025

Dedicatoria

A Dios.

A mis padres.

Agradecimiento

Gracias por todo padres queridos.

A mi alma mater, la FIMM de la Universidad San Luis Gonzaga.

A la unidad minera y sus profesionales.

Siempre agradecido, Ramos Borda Ricardo.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Antecedentes.....	15
1.2.1. Internacionales.....	15
1.2.2. Nacionales	19
1.3. Bases teóricas	23
1.3.1. Método de minado sublevel stoping	23
1.3.1.1. Definición	23
1.3.1.2. Características.....	23
1.3.1.3. Ventajas de desventajas	24
1.3.1.4. Componentes claves.....	26
1.3.1.5. Labores de preparación	27
1.3.1.6. Labores de desarrollo	29
1.3.1.7. Fases de construcción	30

1.3.1.8.	<i>Variantes del método</i>	32
1.3.1.9.	<i>Influencia en la productividad operativa</i>	34
1.3.2.	<i>Productividad operativa</i>	37
1.3.2.1.	<i>Definición</i>	37
1.3.2.2.	<i>Objetivos</i>	39
1.3.2.3.	<i>Factores que afectan</i>	41
1.3.2.4.	<i>Importancia</i>	44
1.3.2.5.	<i>Medición</i>	47
1.3.2.6.	<i>Relación con los indicadores</i>	48
1.4.	<i>Formulación de los problemas</i>	50
1.4.1.	<i>Problema general</i>	50
1.4.2.	<i>Problemas específicos</i>	50
1.5.	<i>Justificación</i>	51
1.6.	<i>Objetivos</i>	52
1.6.1.	<i>Objetivo general</i>	52
1.6.2.	<i>Objetivos específicos</i>	52
1.7.	<i>Hipótesis</i>	53
1.7.1.	<i>Hipótesis específica</i>	53
1.7.2.	<i>Hipótesis específica</i>	53
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA	54
2.1.	<i>Tipo de investigación</i>	54
2.2.	<i>Nivel de investigación</i>	54

2.3.	Diseño de investigación	54
2.4.	Población y muestra	55
2.4.1.	<i>Población</i>	55
2.4.2.	<i>Muestra</i>	55
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	55
2.6.	Técnicas de análisis e interpretación de datos	56
III.	RESULTADOS	57
3.1.	Generalidades de la unidad minera	57
3.1.1.	<i>Ubicación</i>	57
3.1.2.	<i>Aspectos geológicos</i>	58
3.1.2.1.	<i>Geología local</i>	58
3.1.2.2.	<i>Geología económica</i>	59
3.2.	Implementación del método Sublevel Stopping	60
3.3.	Ciclo de minado	61
3.3.1.	<i>Perforación y voladura</i>	61
3.3.2.	<i>Carguío de mineral</i>	65
3.3.3.	<i>Acarreo, transporte y descarga</i>	65
3.4.	Fases del ciclo de minado	65
3.5.	Labores de preparación y desarrollo	68
3.5.1.	<i>Galería</i>	68
3.5.2.	<i>Rampas</i>	69
3.5.3.	<i>By pass</i>	69

3.5.4.	<i>Chimenea V.C.R.</i>	69
3.5.5.	<i>Chimenea Slot</i>	70
3.6.	Metros de avance lineal	71
3.7.	Toneladas de mineral extraídas	73
3.8.	Rendimiento de perforación	76
3.9.	Productividad	77
IV.	DISCUSION	79
4.1.	Hipótesis general	79
4.2.	Hipótesis específica 1	80
4.3.	Hipótesis específica 2	81
4.4.	Hipótesis específica 3	82
V.	CONCLUSIONES	83
VI.	RECOMENDACIONES	84
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
VIII.	ANEXOS	92
	Anexo N°1: Operacionalización de variables	93
	Anexo N° 2: Matriz de consistencia	94
	Anexo N° 3: Ubicación	96
	Anexo N° 4: Evaluación geomecánica	97

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Cumplimiento metros de avance lineal, zona cuerpos 2024</i>	71
Tabla 2. <i>Cumplimiento de las toneladas de mineras extraídas, zona cuerpos 2024</i>	73
Tabla 3. <i>Cumplimiento del rendimiento de perforación en jumbos de 14ft (m), zona cuerpos 2024</i>	76
Tabla 4. <i>Productividad operativa (Ton/HHT), zona cuerpos 2024</i>	77
Tabla 5. <i>Prueba de hipótesis general</i>	79
Tabla 6. <i>Prueba de hipótesis específica 1</i>	80
Tabla 7. <i>Prueba de hipótesis específica 2</i>	81
Tabla 8. <i>Prueba de hipótesis específica 2</i>	82

Índice de figuras

Figura 1. <i>Malla de perforación y voladura - sección 4x4m - roca regular con ANFO</i>	63
Figura 2. <i>Malla de perforación y voladura - sección 4.5x4m - roca regular con ANFO</i>	64
Figura 3. <i>Esquema del minado</i>	65
Figura 4. <i>Etapa 1: preparación de labores</i>	66
Figura 5. <i>Etapa 2: perforación y voladura con taladros positivos</i>	66
Figura 6. <i>Etapa 3: Limpieza de carga de mineral por el nivel inferior de extracción</i>	67
Figura 7. <i>Etapa 4: Perforación de taladros negativos y positivos. Voladura de taladros en negativo y limpieza por el nivel inferior</i>	67
Figura 8. <i>Etapa 5: Relleno de tajo por el subnivel intermedio para posterior minado de taladros en positivo</i>	68
Figura 9. <i>Diseño de chimenea slot 2x2m</i>	70
Figura 10. <i>Cumplimiento metros de avance lineal, zona cuerpos 2024</i>	72
Figura 11. <i>Cumplimiento de las toneladas de mineras extraídas, zona cuerpos 2024</i>	75
Figura 12. <i>Cumplimiento del rendimiento de perforación en jumbos de 14ft (m), zona cuerpos 2024</i>	77
Figura 13. <i>Productividad operativa (Ton/HHT), zona cuerpos 2024</i>	78

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024. Es de tipo aplicada, explicativa, pre experimental, transversal, La población estará conformada por la zona cuerpos de explotación minera en la Unidad Operativa Americana, en el año 2024. Con un $t=-10.00$ y $p=0.02<0.05$, se demuestra una influencia positiva en la productividad operativa a partir de la aplicación del método de minado sublevel stoping, como consecuencia de conseguir un promedio de 8.56 Ton/HHT mayor a los 7.50 Ton/HHT programado o una variación positiva de 14.14%, además, se logró 105.97% de cumplimiento en los metros lineales de avance, así como 102.12% de en las toneladas extraídas y solamente 88.65% en el rendimiento por taladro de perforación de jumbos, en la zona cuerpos, Alpayana 2024.

Palabras Claves: método de minado, productividad, sublevel stoping.

Abstract

The objective of this study is to determine that the application of the sublevel stoping mining method influences operational productivity in the area of Minera Alpayana 2024. It is of an applied, explanatory, pre-experimental, cross-sectional type, The population will be made up of the mining bodies in the American Operational Unit, in the year 2024. With a $t=-10.00$ and $p=0.02<0.05$, a positive influence on operational productivity is demonstrated from the application of the sublevel stoping mining method, as a result of achieving an average of 8.56 Ton/HHT higher than the programmed 7.50 Ton/HHT or a positive variation of 14.14%, in addition, 105.97% compliance was achieved in the linear meters of advance, as well as 102.12% of the tons extracted and only 88.65% in the yield per jumbo drilling drill, in the body area, Alpayana 2024.

Keywords: *mining method, productivity, sublevel stoping.*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La minería en Perú ha sido, desde tiempos históricos, un elemento esencial para el progreso económico del país, al aportar de manera significativa mediante la recaudación de impuestos y regalías y fomentar inversiones en infraestructura y la creación de empleo. No obstante, el incremento en la producción de minerales se traduce en mayores costos operativos, lo que lleva a las empresas a buscar estrategias que maximicen la eficiencia en el uso de recursos y disminuyan los costos de explotación. En este sentido, el método de minado sublevel stoping se plantea como una opción eficaz, permitiendo una extracción más óptima con menores requerimientos de personal y equipos en comparación con métodos convencionales como el corte y relleno ascendente [1].

Diversos estudios y proyectos internacionales han comprobado que el uso de metodologías innovadoras en la minería subterránea, en particular el sublevel stoping, resulta en mejoras notables de la productividad operativa. Un ejemplo claro es el proyecto minero en Ecuador, donde la implementación de técnicas análogas ha contribuido a la reducción de costos y a la optimización de los índices de recuperación, adecuándose a las condiciones geotécnicas particulares del yacimiento. Este enfoque, al incrementar la productividad, ha despertado un creciente interés en la comunidad internacional, pues se traduce en una mayor competitividad en un mercado global altamente dinámico y cambiante [2].

A nivel nacional, se identifican desafíos y posibilidades que respaldan la implementación de métodos mineros más eficientes. En Arequipa, investigaciones han revelado que la adopción del sublevel stoping conduce a un

aumento en la producción y a una reducción notable de los costos operativos, especialmente en minas con yacimientos tabulares o casi verticales y condiciones geomecánicas favorables [1]. De forma análoga, estudios realizados en Huancayo han demostrado que este método no solo optimiza el ciclo de minado, sino que también mitiga los riesgos operativos y mejora la seguridad del personal, atribuyéndose a la estabilidad del macizo rocoso y a la posibilidad de automatizar procesos críticos [3], [4].

En síntesis, se enfatiza la urgencia de incorporar alternativas mineras capaces de afrontar los desafíos actuales relacionados con la productividad y la eficiencia. La constante necesidad de disminuir los costos operativos, en un entorno marcado por la alta inestabilidad en los precios globales de los metales, impulsa a las empresas mineras a revisar y modernizar sus métodos de explotación. La evidencia tanto internacional como nacional sugiere que la adopción del método de sublevel stoping puede resultar en una mayor rentabilidad y en un incremento en los volúmenes de extracción, al mismo tiempo que se mantienen elevados niveles de seguridad y sostenibilidad en las operaciones [5].

El estudio se motiva por la necesidad de optimizar la productividad en la zona cuerpos de Minera Alpayana que continúan empleando técnicas semi mecanizadas, las cuales, aunque rentables en el pasado, se han quedado atrás frente a las actuales demandas de competitividad y seguridad. Por ello, la inclusión del método se apoya en el impacto económico positivo que se logra al reducir el costo por tonelada extraída y mejorar la eficiencia del ciclo minero.

Se propone la aplicación del método sublevel stoping y de su modelo integrado que aúne el análisis geomecánico, la simulación tridimensional y la evaluación económica, con el objetivo de determinar de forma precisa los parámetros

críticos que influyen en la eficiencia del método sublevel stoping. Dicho modelo permitirá establecer protocolos estandarizados para su implementación, apoyándose en herramientas de modelado y análisis de datos que optimicen el ciclo de minado. Paralelamente, se acompañó con programas de capacitación y actualización tecnológica que aseguren el cumplimiento de los estándares de seguridad y operatividad en la aplicación de la técnica.

En conclusión, la problemática que enfrenta la unidad minera se centra en la necesidad de modernizar sus métodos de explotación para mejorar la productividad operativa y reducir los costos de extracción. La aplicación del método sublevel stoping, potenciado por tecnologías de perforación avanzada, representa una alternativa que puede traducirse en mejoras cuantificables a través de indicadores operativos clave. La medición de los metros de avance lineal resulta fundamental para evaluar la eficiencia del desarrollo del frente de minado, mientras que el rendimiento de perforación permite identificar la capacidad y eficacia de los equipos en condiciones reales de operación. Por otro lado, el indicador de toneladas extraídas es esencial para determinar la rentabilidad del método, pues refleja la relación directa entre el volumen de mineral recuperado y los costos de producción. La integración de estos tres indicadores en un modelo de análisis integral no solo posibilitará una evaluación detallada del desempeño del método, sino que también ofrecerá una base sólida para implementar mejoras continuas y estandarizar prácticas operativas el sector mineralizado de la unidad minera. Así, se logra un enfoque multidimensional que abarca tanto la optimización técnica como la eficiencia económica, permitiendo que la empresa transiten hacia modelos de producción más competitivos y

sostenibles, alineados con las tendencias internacionales y las demandas del mercado nacional.

De todo ello, la investigación es pertinente y relevante para los fines empresariales.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

López J. y Ríos J. [6], en Ecuador, en el año 2023, llevaron a cabo un estudio que tuvo como finalidad principal “Implementar una metodología para el diseño de explotación subterránea de un yacimiento polimetálico, realizado por etapas”. Fue un estudio de tipo descriptivo, estudio de campo, método cuantitativo y diseño descriptivo transversal. Las conclusiones señalaron:

- Se describe la planificación y metodología para la explotación de un yacimiento mineral mediante el método de taladros largos en sublevel stoping, el cual se basa en la extracción de mineral desde galerías o subniveles, dirigiéndolo hacia embudos o zanjas. Se menciona también una técnica complementaria en la que el mineral es extraído mediante golpes verticales, generando un sótano de dimensiones considerables, principalmente en dirección vertical. La elección de este método responde a la necesidad de optimizar la recuperación del mineral y maximizar la eficiencia operativa dentro del yacimiento.
- Como parte del diseño del proyecto, se contempla la construcción de una nueva galería tipo rampa y la división del

depósito mineral en dos bloques con el objetivo de mejorar la eficiencia en la extracción. El bloque 1 contará con siete subniveles, mientras que el bloque 2 tendrá seis subniveles, ambos operando mediante dos frentes de trabajo simultáneos. Sin embargo, el texto presenta una redundancia en la descripción de los subniveles explotados, lo que podría generar confusión respecto a la planificación operativa.

- Finalmente, se establece que el diseño propuesto tiene como finalidad extender la vida útil de la mina a medida que continúa la exploración del depósito mineral. Sin embargo, se observa una falta de claridad en la última oración respecto a la viabilidad futura del diseño, lo que podría mejorarse con una redacción más precisa. En términos generales, la propuesta busca asegurar la sostenibilidad de la explotación minera mediante una planificación estratégica, optimizando tanto la infraestructura como los procesos operativos para maximizar la eficiencia y recuperación del mineral.

Maldonado D. [7], en Ecuador, en el año 2022, llevaron a cabo un estudio que tuvo como objetivo principal “Implementar una metodología de diseño como base de modelo de explotación de un yacimiento mineral aurífero de la mina Voluntad de Dios, ubicada en el cantón El Guabo”. Fue un estudio de tipo descriptivo, experimental, transversal y prospectivo con estudio de campo y técnicas de observación. Las conclusiones señalaron:

- Se describe el proceso de planificación y preparación para la explotación de un yacimiento, destacando la selección del

sistema de extracción y el diseño de la infraestructura minera, incluyendo galerías mayores y de producción dentro del cuerpo mineralizado.

- Se enfatiza la implementación de una producción semimecanizada mediante la disposición estratégica de las actividades de carguío y transporte en galerías con dimensiones adecuadas para albergar la instalación operativa.
- Esta optimización de procesos busca mejorar la eficiencia productiva, proyectando un incremento del 22.2% en la producción y del 15.5% en la productividad, lo que sugiere un impacto positivo en el rendimiento operativo y en la sostenibilidad de la explotación.

Flores V. y Niemes M. [8], en Ecuador, en el año 2021, ejecutaron un estudio que tuvo como objetivo principal “Proponer un método de explotación del mineral que se encuentra en subniveles antiguos del contrato de explotación del proyecto minero Bosque de Oro S.A. con el fin de aumentar la producción y reducir gastos de la empresa”. Fue un estudio de tipo descriptivo, comparativo con método analítico, observacional y técnicas de campo. Las conclusiones señalaron:

- Se presenta un análisis de la distribución de leyes minerales en función de la intensidad de explotación, evidenciando un incremento en las concentraciones de oro (de 4,60 g/t a 9,5 g/t), plata (de 10,83 g/t a 12 g/t) y cobre (de 1,4% a 3%). Este fenómeno conlleva un aumento en la ley de corte, lo que influye directamente en la rentabilidad de la operación minera al

incrementar el ingreso por tonelada extraída. Dicho comportamiento es relevante para la planificación y optimización del proceso de explotación, ya que permite ajustar estrategias de extracción en función de la variabilidad del contenido mineral en el yacimiento.

- La reactivación de un antiguo subnivel, el cual se conecta con vetas de interés, permitió a la empresa BOSOROMIN S.A. reducir costos operativos en 53 mil dólares, optimizando la extracción y facilitando el afloramiento del mineral. Esta decisión estratégica favoreció un incremento del 95% en la producción, alcanzando 117 toneladas diarias en un período de dos meses. Este crecimiento en la capacidad productiva resalta la importancia de aprovechar infraestructuras mineras preexistentes para mejorar la eficiencia operativa y reducir inversiones en nuevas obras, lo que representa un enfoque costo-efectivo en la gestión de los recursos mineros.
- Como resultado del aumento en la producción, la empresa obtuvo un ingreso neto de 162.224,45 dólares, recursos que podrán ser reinvertidos en investigaciones adicionales sobre nuevos yacimientos dentro de la concesión. Este aspecto es clave para garantizar la sostenibilidad y expansión de la actividad minera en el tiempo. Sin embargo, sería pertinente incluir un análisis sobre el impacto ambiental y las condiciones de estabilidad del subnivel reactivado, con el fin de evaluar los posibles riesgos asociados a esta estrategia de optimización.

En términos generales, el texto evidencia cómo la combinación de estrategias operativas y financieras adecuadas puede potenciar la rentabilidad y el desarrollo de la empresa minera.

1.2.2. Nacionales

Silva V. [5], en Huancayo, en el año 2022, ejecutó un estudio que tuvo como objetivo esencial “Evaluar el rendimiento del método Sublevel Stoping para optimizar la producción en la Compañía Minera Condestable S.A”. Fue un estudio de tipo aplicada, nivel descriptivo, explicativo, método deductivo analítico y diseño descriptivo simple. Las conclusiones señalaron:

- El mapeo geomecánico a nivel -490 arroja un RMR de 89 sobre 71, ubicándolo en la clase IIB, que se caracteriza por estructuras cerradas, relleno firme y fuerte resistencia.
- Se crean tres grandes familias; las dos primeras no causan inestabilidad en relación con la orientación del bloque, pero la tercera tiende a alinearse con el bloque y crear cuñas en la corona. En caso de que se necesite soporte de pernos con malla, se deben examinar las preparaciones.
- Dependiendo del área de análisis, las cuñas que se crean en los frontones por el análisis de descuñas deben sujetarse con un perno de punta o sistemático. Sin embargo, debido a su tamaño, la estabilidad del bloque no se vería afectada por las cuñas que se desarrollan en sus paredes.

Anchiriaco J. [3], en Huancayo, en el año 2021, ejecutaron un estudio que tuvo como alcance esencial “Determinar la medida en que el Método de

Minado Sublevel Stoping se relacionará con la productividad del tajo 682 Zona Limpe Centro de la Compañía Minera Quenuales – Unidad Iscaycruz”. Fue un estudio de tipo aplicada, nivel descriptivo, método analítico sintético y diseño no experimental. Las conclusiones señalaron:

- Se demostró que la productividad y la producción mensual están correlacionadas positivamente. En términos de productividad, el aspecto más significativo de la producción mensual utilizando el método de explotación de detención de subniveles fue que el tajo produjo más toneladas que con el método de corte y relleno ascendente. Esto se debió a que cada sección de tiro tenía una altura de banco de 10 metros de subnivel a subnivel, lo que generó un mayor volumen de mineral quebrado. Debido a que la detención de subniveles es un método de explotación altamente mecanizado, la producción mensual en relación con la productividad es un desafío porque depende del funcionamiento del equipo en el tajo. Cuando fallas mecánicas causan detenciones, el ciclo de explotación se retrasa, poniendo en peligro el cumplimiento del tonelaje programado para el tajo.

Beltrán J. [4], en Huancayo, en el año 2020, elaboró un estudio que tuvo como objetivo esencial “Determinar el resultado del incremento de la producción mediante la implementación del método de explotación Sublevel stoping con taladros largos en la veta 11 de la U.E.A. Manuelita”. Fue un estudio de tipo descriptivo transversal, nivel descriptivo, diseño no

experimental en base a observación y método descriptivo. Las conclusiones señalaron:

- Como resultado de la instalación de la técnica de parada de explotación Sublevel con amplias plataformas, que mejoró la eficiencia del ciclo minero y redujo los gastos operativos, se registró un aumento en la producción de alrededor de 30.000 toneladas durante el período 2017 y 2018. De hecho, la potenciación de factores operativos como la recuperación de mineral y el control de dilución permitieron incrementar el valor del mineral a lo largo de los años 2017 y 2018, pasando los valores del mineral de 131 dólares por tonelada a 158 dólares por tonelada respectivamente.
- Con un costo total de \$723.226,71 y un ingreso total de \$10.376.050, la implementación del Método de Detención de Explotación por Subnivel con Grandes Plataformas resultó en un aumento en la productividad del ciclo minero en el veto 11 durante el periodo 2018. Esto resultó en un total de 65.850 toneladas producidas, lo que resultó en un margen operativo de \$9.652.823,29.
- Teniendo en cuenta el plan diario de producción, costos operativos, dilución y recuperación, las variables técnicas que se consideraron para la selección e implementación del método de minado Subnivel con plataformas anchas en el veto 11 dieron como resultado un costo total de \$59 por tonelada, \$54

por tonelada y \$82 por tonelada para los métodos de extracción de corte y relleno, banco y relleno y subnivel, respectivamente. Castillo E. [1], en Arequipa, en el año 2020, elaboró un estudio que tuvo como objetivo esencial “Evaluar la implementación del método sublevel stoping con taladros largos y su incremento en la producción en el tajo 830E en la zona de profundización de la compañía minera Bateas S.A.C.”. Fue un estudio de método aplicado, cuantitativo, alcance descriptivo, diseño pre experimental y nivel explicativo. Las conclusiones señalaron:

- Se determina que el rendimiento en la Tj 830E disparando dos hileras de taladros largos es de 190 TMS/Shot al incluir la técnica de Sublevel Stopping dentro de los procedimientos operativos. Esto se traduciría en importantes ahorros a largo plazo si se utilizaran otros tajos con características comparables. Además, desde el inicio de la preparación del tajo, el método produce minerales a un ritmo constante de alrededor de 1600 toneladas diarias. Cuando el método se ponga en práctica, producirá 18.000 toneladas mensuales, que es la producción actual en todo el nivel 12.
- La evaluación encontró que la utilización del método Sublevel Stopping con taladros largos redujo los costos generales de la mina en US\$ 2.181.697, lo que a su vez redujo el costo por tonelada extraída en US\$ 4,07/t. Como resultado, los costos anuales proyectados generados por la aplicación de este método en el tajo 830E arrojan un costo operativo de US\$ 4.501.429 y un costo anual de US\$ 38,00/t. Esto demuestra

que en la explotación es donde se presenta la mayor diferencia de costos, siendo el método Sublevel Stopping más rentable y eficiente.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Método de minado sublevel stoping

1.3.1.1. Definición

El Sublevel Stopping, conocido también como tajeo por subniveles, es un método de explotación subterránea que se caracteriza por la extracción en tajadas verticales, lo que permite fraccionar el yacimiento en caserones o secciones definidas mediante subniveles. En este procedimiento se habilitan niveles intermedios desde los cuales se perfora el cuerpo mineral utilizando taladros largos y posteriormente se ejecuta la voladura de manera segmentada. De esta forma, el mineral roto cae por gravedad hacia la parte inferior del caserón, donde es recogido a través de embudos o ventanas de extracción situados en la base. Para su aplicación, es esencial que la roca encajonante tenga la resistencia suficiente para mantener abiertas grandes cavidades sin derrumbarse, evitando así el uso inmediato de relleno. Este aspecto convierte al método en una alternativa adecuada para yacimientos con fuerte buzamiento y alojados en macizos rocosos de calidad media a buena [9].

1.3.1.2. Características

El Sublevel Stopping se define como una técnica minera que se apoya en el sostenimiento natural del macizo, sustentado tanto por la resistencia intrínseca de la roca como por la conservación de pilares de mineral que se dejan sin extraer para servir de soporte estructural. Durante la fase de

extracción primaria, se evita el empleo de relleno, optándose por mantener pilares estratégicos ubicados en el techo (crown pillar), en el piso (sill pillar) y entre caserones adyacentes, lo que permite soportar las tensiones del macizo y delimitar de forma segura las distintas cámaras de explotación [10]

Esta metodología es particularmente apropiada para yacimientos masivos de configuración regular, ya que posibilita la extracción de grandes volúmenes de mineral en cada caserón. Asimismo, se destaca su aplicación en cuerpos mineralizados de fuerte buzamiento, donde la acción de la gravedad favorece el movimiento del mineral fragmentado. Entre las características técnicas más relevantes se encuentran el uso intensivo de perforación mediante taladros largos, la realización de voladuras secuenciales por subnivel y la opción de implementar sistemas mecanizados avanzados. La estabilidad y eficiencia del método dependen en gran medida de la calidad geomecánica del macizo, recomendándose su empleo en rocas con un índice RMR superior a 50 y ángulos de fricción interna elevados, condiciones esenciales para mantener la integridad de las cavidades durante la explotación [11].

1.3.1.3. Ventajas de desventajas

El método Sublevel Stopping se caracteriza por ofrecer ventajas operativas relevantes en la minería subterránea, alcanzando altos niveles de eficiencia y productividad. En operaciones mecanizadas, se han logrado rendimientos que alcanzan gran cantidad de toneladas por trabajador durante un turno, cifras que superan notablemente a las obtenidas mediante métodos tradicionales. Con una adecuada administración, el

método puede alcanzar tasas de producción mensuales excelentes, llegando a triplicar la productividad cuando se compara con métodos selectivos, tales como el corte y relleno en vetas angostas [1].

Además, este método se distingue por mejorar las condiciones de seguridad al reducir la exposición de los trabajadores en terrenos inestables, ya que la mayor parte de las labores de preparación y extracción se efectúan en galerías protegidas. Las voladuras controladas contribuyen a mantener la pureza del mineral extraído, minimizando la dilución con material estéril. Por otro lado, una vez ejecutada la voladura en un subnivel, se permite iniciar de manera casi inmediata la extracción del material fragmentado, lo que agiliza el ciclo de minado en comparación con otros métodos que requieren períodos de asentamiento [1].

El método Sublevel Stoping se enfrenta a desafíos significativos debido a su naturaleza no selectiva, lo que implica que requiere que el cuerpo mineral presente una geometría regular y continuidad. En depósitos con formas irregulares o en aquellos que contienen múltiples vetas ramificadas, la aplicación de este método resulta inviable o conduce a importantes pérdidas de mineral. Este requisito geométrico limita su uso a escenarios donde la estructura del yacimiento se ajuste a estas condiciones estrictas [1].

Otro inconveniente crítico es la marcada disminución en el rendimiento cuando el buzamiento del depósito no alcanza niveles elevados, siendo idealmente mayor al 50°. La operatividad del método depende en gran medida de la gravedad para facilitar el desplazamiento del mineral fragmentado, y en condiciones de pendientes moderadas el material

tiende a acumularse, lo que encarece y dificulta el proceso de extracción. Esta dependencia del ángulo de inclinación del yacimiento subraya la importancia de contar con condiciones geológicas óptimas para su implementación [1].

Finalmente, se subraya la problemática asociada a la pérdida de mineral en los pilares de seguridad. Por motivos de seguridad, se dejan pilares en áreas como la corona, el piso o entre caserones, los cuales pueden contener mineral valioso que no siempre resulta recuperable, afectando así la eficiencia en la recuperación total del depósito. Además, la extracción de estos pilares implica un alto riesgo de colapso del caserón, lo que refuerza la necesidad de recurrir a métodos alternativos en entornos con rocas de baja competencia, como en macizos fracturados, donde el Sublevel Stopping tradicional no sería viable sin inversiones adicionales en sostenimientos artificiales [1].

1.3.1.4. Componentes claves

La aplicación del Sublevel Stopping demanda la instalación de una infraestructura minera esencial, en la cual destaca la construcción del nivel de producción o galería principal de transporte. Esta se localiza generalmente en la parte inferior del bloque mineral y cumple una doble función: facilitar el ingreso de los equipos y constituir la vía principal para el acarreo del mineral extraído [12].

En el piso del caserón se establecen puntos de extracción en forma de embudos o zanjas recolectoras (drawpoints), los cuales están conectados a la galería de transporte. Estos embudos permiten que el mineral fragmentado, que cae desde los subniveles superiores, se acumule de

manera organizada, facilitando su carga eficiente mediante el uso de equipos especializados como las máquinas LHD o sistemas de cintas transportadoras [12].

A lo largo del cuerpo mineral se desarrollan galerías de perforación en subniveles, que son túneles horizontales cortos destinados al taladrado del depósito. Estos subniveles se trazan siguiendo la configuración del yacimiento, ya sea a lo largo del rumbo de la veta o de forma transversal, y se separan verticalmente conforme a la eficacia de la perforación y a consideraciones geomecánicas relacionadas con la estabilidad entre niveles [12].

Otro elemento fundamental es la chimenea de servicios o raise, la cual posee una función doble: por un lado, establece la conexión vertical entre los distintos niveles, permitiendo el tránsito del personal, la ventilación y la evacuación; y por otro, funciona como slot para iniciar la rotura del macizo rocoso en el proceso de explotación. Esta chimenea, ubicada de manera estratégica dentro del caserón, se voladura al comienzo de la secuencia de minado con el fin de generar un vacío inicial que facilite la correcta disposición del mineral fragmentado en las voladuras de producción, asegurando de este modo una infraestructura sólida y eficiente [12].

1.3.1.5. Labores de preparación

Antes de comenzar la extracción del mineral por medio del Sublevel Stoping, es esencial ejecutar una serie de labores de desarrollo en el yacimiento. Inicialmente, se establecen los límites del bloque a explotar y se lleva a cabo un estudio geomecánico detallado para definir las

dimensiones seguras del caserón, considerando el ancho, la altura y la necesidad de pilares según la calidad de la roca y las tensiones in situ.

Con el diseño validado, se procede a la construcción de las galerías de acceso y transporte ubicadas en el nivel inferior del bloque, que facilitan la entrada de maquinaria y la salida del mineral. De manera simultánea, se erigen las chimeneas necesarias, siendo la principal destinada a servicios como la ventilación, la comunicación y la función de tiro inicial, y, en caso de ser requerido, se instalan chimeneas adicionales para la extracción del mineral o para proporcionar ventilación auxiliar en caserones de mayor extensión [12].

En cada subnivel planificado se excavan galerías de perforación a lo largo del depósito, siguiendo la configuración del mineral. Estas labores se inician desde las chimeneas y se extienden hacia los extremos del cuerpo mineral, de modo que las galerías queden organizadas en paralelo, abarcando el volumen total del caserón proyectado para facilitar la extracción subsecuente [10].

En el nivel de producción se habilitan puntos de extracción mediante la realización de pequeños recortes o chimeneas invertidas que conectan la galería base con el inicio del mineral. Además, se instalan los servicios indispensables, como el tendido de rieles, tuberías de aire comprimido y agua, líneas eléctricas y sistemas de ventilación, junto a chimeneas de exhaustación. Estas acciones logísticas y de seguridad deben completarse antes de iniciar las voladuras de producción, garantizando así un proceso de extracción continuo y controlado [11].

1.3.1.6. Labores de desarrollo

Durante la fase de explotación mediante Sublevel Stopping se ejecuta un ciclo operativo reiterativo que abarca diversas actividades esenciales para el minado. Este proceso comprende la perforación de producción, la voladura, el carguío del mineral, su transporte y, en determinadas circunstancias, la fortificación del terreno, estableciendo un sistema integrado que permite extraer el mineral de manera continua y controlada. La perforación se efectúa desde las galerías de subnivel utilizando equipos especializados, como taladros largos o jumbos de producción, que generan abanicos de barrenos en el cuerpo del mineral conforme a un diseño malla preestablecido. Estos barrenos, de longitudes que pueden superar los 15–20 metros y de diámetros entre 2 y 6 pulgadas, se preparan para la carga de explosivo a granel, como el ANFO, adecuándose a las características geométricas del depósito [11].

Previo a la ejecución de la voladura de producción, se realiza una voladura preliminar denominada tiro piloto o voladura de la chimenea inicial, que tiene como finalidad crear un espacio vacío (slot) en el caserón. A continuación, se lleva a cabo la voladura en etapas, disparando de manera secuencial los barrenos de un subnivel y, posteriormente, replicando el proceso en los subniveles siguientes, de forma que el bloque de mineral colapse de manera controlada hacia el espacio previamente abierto, siguiendo una secuencia de detonación cuidadosamente planificada con dispositivos de retardo [9].

El mineral fragmentado tras la voladura se carga en embudos mediante cargadores de bajo perfil (LHD), que suelen operar de forma remota para garantizar la seguridad. Posteriormente, el mineral se transporta a través de la galería principal, para luego ser extraído de la mina mediante camiones de gran tonelaje o sistemas de transporte como fajas y equipos de izaje, conforme a la infraestructura disponible en la instalación minera. Finalmente, se llevan a cabo labores de sostenimiento y mantenimiento orientadas a garantizar la seguridad dentro del caserón. Estas comprenden la instalación de pernos de anclaje, la colocación de mallas en los techos de las galerías, y el refuerzo estructural de los subniveles, junto con la aplicación de medidas de ventilación y limpieza tras cada voladura para eliminar gases y polvo en suspensión. Cuando se presentan acumulaciones de bloques de gran tamaño, se recurre a la fragmentación secundaria, cerrando así el ciclo operativo que se replica en cada subnivel hasta completar la extracción del caserón [11].

1.3.1.7. Fases de construcción

En la fase inicial de explotación mediante Sublevel Stopping, una vez concluidas las labores de preparación —como el desarrollo de galerías y subniveles—, se procede a la apertura del caserón. Este paso se logra mediante la generación de un vacío que actúa como espacio de alivio para las primeras voladuras de producción. Usualmente, dicho vacío se obtiene a través de la excavación o voladura de una chimenea (raise) ubicada en uno de los extremos del bloque, o bien mediante la perforación y disparo de un slot piloto desde un subnivel superior [13]

La segunda fase se caracteriza por la extracción secuencial del mineral a través de subniveles, donde el caserón se “construye” de arriba hacia abajo. En este proceso, se inicia volando el mineral desde el subnivel superior y se avanza en cortes verticales descendentes. En cada subnivel, la voladura se efectúa en forma de abanicos o anillos (ring blasting) que separan un bloque de mineral desde el techo hasta el piso, permitiendo que este colapse de manera controlada hacia el espacio vacío generado en fases anteriores [14].

La coordinación en la secuencia de detonación es fundamental para que, al disparar un subnivel, el espacio inferior esté disponible para recibir el mineral fragmentado. Esta planificación minuciosa evita la formación de cuñas colgadas y garantiza que, tras la voladura de un subnivel, el mineral se desplace de manera ordenada hacia el vacío, facilitando su extracción. El proceso se repite de manera sistemática en cada subnivel hasta alcanzar el piso del caserón [12].

Una vez se ha extraído el mineral de todos los subniveles, se ingresa en la tercera fase, que varía según el plan minero adoptado. En sistemas sin relleno, se deja el caserón vacío como cámara final y se continúa con la explotación de caserones adyacentes, dejando pilares de soporte. En contraste, en métodos con relleno se inicia el proceso de colocación de material de relleno en el caserón agotado antes de avanzar a las áreas contiguas, permitiendo una explotación continua y segura [12].

La cuarta fase, considerada como etapa de cierre o recuperación, se dedica a la limpieza final de la zona minada. Durante esta fase, se

estabilizan los fragmentos sueltos remanentes y se prepara el área para el inicio de la próxima zona de extracción. Este proceso es esencial para asegurar que el sitio quede en condiciones seguras y aptas para futuras operaciones [10].

Finalmente, la explotación secuencial por Sublevel Stopping, se alterna la construcción de caserones primarios y secundarios. Inicialmente, se extraen caserones espaciados, dejando algunos sin explotar que actúan como pilares temporales. Posteriormente, una vez estabilizados o rellenados los vacíos primarios, se procede a la extracción de los caserones secundarios remanentes. Esta alternancia garantiza un soporte continuo en la mina, ya sea por medio de la roca o mediante el uso de material de relleno, lo que contribuye a la seguridad y al orden del proceso minero.

1.3.1.8. Variantes del método

El método tradicional de Sublevel Stopping ha sido objeto de múltiples modificaciones y variantes, desarrolladas para ajustarse a diferentes condiciones geológicas y optimizar aspectos operativos específicos. En este contexto, se introduce la variante LBH o big-hole stopping, la cual se caracteriza por el uso de taladros de producción de mayor diámetro y longitud, permitiendo así la explotación de caserones más altos con menos desarrollos intermedios [9].

De acuerdo con datos técnicos, la variante LBH posibilita la perforación de galerías de subnivel más espaciadas, alcanzando separaciones superiores a 30 metros. Esto se logra mediante el uso de taladros largos de aproximadamente 90 metros de longitud y 15 cm de diámetro que

aseguran una fragmentación adecuada del mineral. La reducción en el número de subniveles a desarrollar se traduce en una optimización de costos y tiempos operativos, aunque demanda equipos de perforación más potentes y un riguroso control para prevenir desviaciones en los barrenos [9].

Esta modalidad ha demostrado ser exitosa en yacimientos polimetálicos y en minas de cobre de gran escala, especialmente en países como Chile, donde se cuenta con maquinaria moderna. En estos casos, la implementación de la variante LBH ha permitido sustituir métodos convencionales como el corte y relleno, contribuyendo a un aumento significativo en la producción por trabajador y evidenciando su viabilidad en operaciones mineras a gran envergadura [9].

De igual manera, el método de Sublevel Stopping ha sido modificado mediante la incorporación de un sistema de relleno, conocido también como el método de caserón abierto con relleno o fill stoping híbrido. En este enfoque, después de extraer el mineral de un caserón, el vacío resultante se repone utilizando material cementado, lo que permite continuar la explotación de los caserones adyacentes sin comprometer la estabilidad del macizo [9].

Esta técnica se centra en la mejora de la recuperación y estabilidad del depósito mineral. Al rellenar el caserón primario, se pueden minar de manera segura los caserones secundarios que previamente funcionaban como pilares de soporte, posibilitando así la recuperación casi total del mineral contenido en el bloque. Esta estrategia elimina las pérdidas asociadas a la necesidad de dejar pilares intactos [9].

Aunque la aplicación de esta variante implica costos y tiempos adicionales debido al proceso de relleno, los avances tecnológicos han permitido superar estas limitaciones. El desarrollo de plantas dosificadoras de cemento de alta capacidad y la utilización de rellenos bombeables han facilitado la implementación de este método a gran escala, compensando el mayor esfuerzo operativo requerido [9].

Adicionalmente, la técnica conocida como Vertical Crater Retreat (VCR), que se presenta como una evolución del sublevel stoping. Este método utiliza taladros de gran diámetro y una técnica de voladura especial para fracturar el mineral en secciones verticales descendentes, creando una ranura vertical en el caserón que permite disparos coordinados para formar cráteres superpuestos y lograr un derrumbe controlado [9].

En síntesis, las variantes del Sublevel Stopping ya sea mediante la incorporación del relleno estructural, el aumento del tamaño de los taladros o la modificación de la técnica de voladura en el caso del VCR—han ampliado la aplicabilidad del método en diferentes condiciones geológicas. La elección de la variante idónea depende de factores como la resistencia del mineral, la geometría del cuerpo, la tecnología disponible y el balance entre el costo del relleno y el valor del mineral recuperado, lo que ha llevado a la adopción de enfoques híbridos para optimizar la eficiencia y seguridad en la extracción [9].

1.3.1.9. Influencia en la productividad operativa

Los avances tecnológicos recientes y los aportes de la investigación académica han impulsado mejoras significativas en el método Sublevel Stopping, enfocadas en incrementar la productividad, la seguridad y la

eficiencia en la recuperación del mineral. La incorporación de la automatización integral y de equipos electro-hidráulicos de gran capacidad ha optimizado el ciclo de explotación, mediante el empleo de jumbos de perforación computarizados, que proporcionan mayor precisión y rapidez en la ejecución de largos abanicos, así como de cargadores LHD con control remoto, los cuales permiten extraer el mineral sin que los operadores se vean expuestos directamente [1].

Asimismo, en las operaciones modernas se emplean perforadoras tipo jumbo con barras de 14 pies y sistemas de long-hole drilling que consiguen taladrar verticalmente más de 17 metros con muy pocas desviaciones. La utilización de detonadores electrónicos programables ha posibilitado la realización de secuencias de voladuras complejas, reduciendo la dilución y mejorando el colapso del mineral en cada subnivel. Además, la automatización parcial en el carguío y transporte, como se ejemplifica con sistemas tipo AutoMine, ha incrementado las horas de operación efectiva al permitir trabajar en entornos con ventilación marginal, lo que resulta en un aumento del tonelaje extraído diariamente. La integración de herramientas de planificación y optimización computacional ha transformado el método Sublevel Stopping. El empleo de diseño asistido y algoritmos de optimización permite reestructurar la disposición de los caserones y programar la extracción de manera precisa, basándose en modelos matemáticos que buscan maximizar el valor económico de las minas [1].

La gestión de la información y el monitoreo han sido cruciales en estos avances. La utilización de escaneo láser 3D y levantamientos

fotogramétricos posteriores a cada etapa de minado posibilita la comparación entre el diseño teórico y la forma real del caserón, permitiendo calcular con exactitud la recuperación y la dilución del mineral en cada ciclo, lo que a su vez proporciona datos valiosos para ajustar parámetros operativos [1].

De manera complementaria, se han introducido mejoras en las prácticas operativas que han favorecido el aumento de la productividad. La implementación de sistemas de ventilación de mayor eficiencia, equipados con sensores y ventiladores de alta potencia controlados según la demanda, ha permitido la rápida evacuación de los gases posteriores a la voladura, posibilitando la reanudación inmediata de las operaciones. Asimismo, la aplicación de estrictos programas de mantenimiento preventivo en los equipos de perforación y transporte ha contribuido a disminuir las paradas no planificadas y a optimizar la disponibilidad de la maquinaria [1].

Finalmente, la capacitación especializada de los operarios, a través de simuladores y entrenamientos virtuales, ha optimizado la ejecución del Sublevel Stopping, minimizando errores en la secuencia de disparo y en las maniobras de carguío. En el ámbito tanto peruano como global, la transición de métodos tradicionales a un enfoque modernizado de Sublevel Stopping ha resultado en incrementos sustanciales de producción y en una disminución del costo unitario, lo que evidencia la importancia de la innovación tecnológica y la mejora en la gestión operativa en la minería subterránea [1].

1.3.2. Productividad operativa

1.3.2.1. Definición

La productividad operativa se define, en términos generales, como la proporción que existe entre los insumos empleados y el producto final obtenido en un proceso de producción. Este indicador de eficiencia permite evaluar cómo una organización utiliza de forma adecuada sus recursos humanos, tecnológicos y materiales para alcanzar resultados deseados, proporcionando una medida clara de su desempeño. En este contexto, el indicador cuantifica la cantidad de unidades producidas, por ejemplo, toneladas de mineral por cada unidad de recurso utilizado, como horas de trabajo, maquinaria o energía. Así, se establece que tanto la productividad laboral, medida en toneladas extraídas por trabajador en un turno o por hora, como la productividad de equipos, evaluada en toneladas movidas por hora efectiva de operación, reflejan la capacidad operativa de la organización para maximizar la producción con los recursos disponibles [15].

En el ámbito de la minería subterránea, la productividad operativa adquiere un significado particular, ya que la medición tradicional basada en las toneladas producidas por hombre-turno no abarca todas las dimensiones de las operaciones mineras. Es decir, dos minas pueden presentar indicadores similares en términos de producción por trabajador, pero mostrar diferencias sustanciales en su funcionamiento, especialmente en lo que respecta al grado de mecanización y el empleo de tecnologías avanzadas. La noción de productividad en el ámbito minero ha evolucionado desde medidas básicas hacia conceptos más

amplios e integrados. En sus orígenes, el rendimiento minero se vinculaba casi exclusivamente a indicadores laborales, como las toneladas producidas por cada trabajador, enfatizando la preponderancia del factor humano en la producción [16].

A medida que avanzaba el siglo XX, la incorporación de tecnología en forma de maquinaria pesada, perforación mecanizada y sistemas de transporte subterráneo transformó radicalmente las operaciones mineras. Este progreso permitió que la productividad por trabajador se incrementara de forma considerable, evidenciando la relevancia de la mecanización en la optimización de recursos. En los años 80 y 90, surgieron metodologías basadas en modelos econométricos, como el índice de productividad total de Rodríguez (1996), que buscaban evaluar de manera integral la productividad a nivel regional o nacional. No obstante, estos índices agregados resultaron ser demasiado amplios y dificultaban su aplicación para implementar mejoras específicas en las operaciones mineras [17].

En la actualidad, el concepto de productividad operativa en la minería ha ampliado su alcance al incorporar elementos esenciales como la calidad del trabajo, la seguridad en las operaciones y la sostenibilidad ambiental. Este nuevo paradigma no se centra únicamente en la cantidad de material extraído, sino en lograr resultados de forma eficaz y responsable, evitando la necesidad de reprocesos. En definitiva, la productividad en el sector minero se ha redefinido como un equilibrio entre eficiencia, seguridad y sostenibilidad, apoyado en tecnologías que permiten una operación más segura y eficiente. La automatización y la integración de nuevos métodos

han propiciado una visión más completa, donde el rendimiento se evalúa no solo en términos de producción, sino también considerando la calidad del proceso y el impacto ambiental [18].

1.3.2.2. Objetivos

En el contexto de la minería subterránea, el incremento de la productividad operativa se presenta como un medio para lograr objetivos estratégicos y operativos, tales como la eficiencia económica, el cumplimiento de las metas de producción y la sostenibilidad del negocio minero a lo largo del tiempo, los siguientes objetivos son [17], [19]:

- El primer aspecto se enfoca en la maximización de la eficiencia y la reducción de los costos unitarios, es decir, producir más utilizando la misma cantidad de recursos o incluso menos, lo que resulta en una disminución del costo por tonelada extraída. Esta estrategia se traduce en mayores márgenes de beneficio para la empresa minera al optimizar el rendimiento de cada turno, máquina y capital invertido.
- El segundo objetivo consiste en garantizar el cumplimiento de los programas de producción y responder adecuadamente a la demanda del mercado. Las minas subterráneas deben adherirse a planes de producción rigurosos para satisfacer tanto contratos como la demanda internacional de concentrado de mineral, lo que es esencial para aprovechar los periodos de precios altos y mantener la competitividad.
- El tercer objetivo destaca la importancia de hacer económicamente viable la explotación de yacimientos de baja ley y, al mismo tiempo,

prolongar la vida útil de la mina. Al reducir el costo por tonelada mediante una mayor eficiencia, es posible incorporar reservas de menor ley al plan de explotación, extendiendo así la operatividad de la mina y aprovechando al máximo sus recursos geológicos.

- El cuarto propósito se centra en incrementar la competitividad en un entorno global. Las empresas mineras que alcanzan niveles de productividad elevados pueden obtener mayores beneficios y posicionarse favorablemente en el mercado internacional, lo que les permite afrontar los ciclos de precios bajos y la competencia de otras jurisdicciones mineras.
- El quinto objetivo se relaciona con mejorar la sostenibilidad y la capacidad de resistencia ante las crisis de precios. Dado que la minería está sujeta a fluctuaciones en los ciclos económicos, contar con una operación altamente productiva es vital para que, incluso en momentos de precios bajos, la mina pueda seguir operando de manera rentable.
- El sexto objetivo radica en la optimización de los procesos internos y el fomento de la mejora continua. Esto implica instaurar una cultura de excelencia operacional mediante la capacitación del personal, la optimización de procedimientos y la eliminación de ineficiencias, lo cual se logra a través de la medición constante de indicadores clave y la implementación de acciones correctivas.
- El séptimo y último objetivo integra la productividad operativa con la garantía de calidad y seguridad en las operaciones. En la actualidad, producir más se asocia con la necesidad de mantener

altos estándares de seguridad y evitar reprocesos, lo que permite a las empresas mineras mejorar su producción mientras aseguran un entorno de trabajo seguro y de calidad.

1.3.2.3. Factores que afectan

Factores internos

Son aquellos inherentes a la operación minera, vinculados a las condiciones del yacimiento y los recursos empleados. Entre los más importantes destacan [17], [20]:

- El primer aspecto que se aborda es la influencia del yacimiento mineral y las características del macizo rocoso en la eficiencia operativa. Factores como la ley del mineral, la dureza y fracturación de la roca, la presencia de agua, la temperatura y la estabilidad geotécnica determinan la velocidad y seguridad de los avances en la mina, mientras que el tipo de depósito (vetas angostas frente a mantos masivos) influye en la elección del método minero y, en consecuencia, en la productividad.
- El segundo punto se refiere a la elección del método de explotación y al nivel de mecanización implementado. Los diferentes métodos subterráneos tales como corte y relleno, sublevel stoping o block caving presentan variaciones en cuanto a su capacidad para maximizar la producción, especialmente cuando se emplean equipos modernos y tecnologías avanzadas. Además, la infraestructura complementaria, como rampas y sistemas de izaje, juega un papel determinante en la eficiencia del movimiento del mineral.

- El tercer elemento destaca la relevancia de los equipos y la tecnología en la operación minera. La capacidad y rendimiento de la maquinaria, que abarca desde perforadoras hasta camiones y sistemas de ventilación, son cruciales para alcanzar altos niveles de productividad. La efectividad de estos equipos, medida a través de indicadores similares al OEE, depende en gran medida de su disponibilidad, mantenimiento y uso efectivo, aspectos que influyen directamente en la producción real de la mina.
- El cuarto aspecto enfatiza la importancia del recurso humano y la organización del trabajo en la productividad. La experiencia y capacitación del personal, junto con una adecuada supervisión y coordinación, permiten que los operadores realicen sus tareas con mayor eficacia, reduciendo errores y tiempos improductivos. La gestión eficiente del talento humano, mediante incentivos y estrategias para mitigar la fatiga, es esencial para sostener la productividad en el entorno minero.
- El quinto y último aspecto se centra en la estandarización de los procesos y la calidad en la ejecución operativa. La implementación de procedimientos optimizados y uniformes para cada tarea en la cadena productiva minimiza las demoras y reduce la necesidad de reprocesos, lo cual mejora la eficiencia global. Una correcta fragmentación y un perfil de voladura adecuado aseguran que el carguío y el transporte del material se realicen de manera óptima, consolidando así un desempeño operativo de alta calidad.

Factores externos

Son elementos fuera del control inmediato de la operación, pero que inciden en el desempeño productivo [16], [20]:

- El primer elemento señalado es la importancia de contar con un suministro oportuno de insumos críticos y una infraestructura logística adecuada. El acceso puntual a recursos como energía, explosivos, acero y repuestos, junto con la existencia de vías de transporte y sistemas de comunicación eficientes, es fundamental para mantener la continuidad de las operaciones mineras. La ausencia o deficiencia en estos aspectos puede ocasionar interrupciones en la producción y elevar los costos operativos, especialmente en áreas remotas.
- El segundo aspecto destaca la relevancia del mercado laboral y la disponibilidad de personal calificado. La presencia de operadores y trabajadores bien entrenados es esencial para minimizar los periodos de adaptación y garantizar un alto rendimiento operativo. Además, factores externos como las regulaciones laborales, los conflictos sindicales y la elevada rotación de personal pueden afectar las horas efectivas trabajadas y disminuir la productividad global de la mina.
- El tercer punto enfatiza el impacto de las políticas estatales y el entorno regulatorio en la actividad minera. Las normativas en materia de seguridad, minería y tributación, aunque pueden introducir retrasos debido a trámites e inspecciones, también impulsan la adopción de prácticas adecuadas. Un marco tributario que favorezca la inversión puede promover la incorporación de

tecnologías avanzadas, mientras que condiciones económicas adversas y cargas impositivas elevadas pueden limitar los recursos destinados a la modernización.

- El cuarto y último elemento se centra en la influencia del precio de los metales sobre las operaciones mineras. Si bien los precios no alteran de manera directa la producción en términos de toneladas extraídas por hora, sí determinan la estrategia operativa. En períodos de precios bajos, las empresas tienden a recortar gastos y reducir personal, lo que puede llevar a una operación por debajo de la capacidad instalada. En contraste, durante épocas de precios altos, se busca maximizar la producción, incluso en zonas con desafíos operativos, lo que puede impactar en la productividad promedio debido a la explotación de sectores de menor ley o más complejos.

1.3.2.4. Importancia

La productividad operativa reviste una importancia estratégica en la industria minera subterránea debido a sus profundas implicaciones en los costos, la eficiencia global, la sostenibilidad y la competitividad de las operaciones. Una mejora o deterioro en la productividad puede significar la diferencia entre una mina rentable o una mina en riesgo de cierre. A continuación, se destacan las razones por las que la productividad operativa es crucial en minería [19], [21]:

- La productividad operativa influye directamente en los costos de producción y en la rentabilidad de las empresas mineras. Una operación eficiente permite repartir los costos fijos y variables sobre

un mayor volumen de producción, lo que reduce el costo unitario por tonelada extraída y mejora los márgenes de ganancia. Por el contrario, cuando la productividad es baja, se invierte un mayor recurso en cada unidad producida, lo que puede comprometer la estabilidad económica de la mina, especialmente en mercados de metales con alta volatilidad.

- En cuanto a la eficiencia, una operación con alta productividad asegura un uso óptimo de los recursos disponibles, minimizando desperdicios en tiempo, materiales y esfuerzo. Cada equipo y cada turno de trabajo contribuyen de manera significativa al volumen de producción, lo que permite que la mina se acerque a su capacidad operativa teórica y reduzca consumos innecesarios. Este aprovechamiento integral de los recursos es esencial para maximizar el rendimiento de la infraestructura existente.
- La productividad también tiene un rol crucial en la sostenibilidad ambiental. Al aumentar la eficiencia operativa, se disminuye el consumo de recursos y la generación de residuos o emisiones por tonelada extraída. La adopción de tecnologías y equipos automatizados no solo incrementa la producción, sino que además reduce la huella de carbono y otros impactos ambientales, al permitir una explotación más rápida y, por ende, una vida operativa menor de la mina.
- En términos de competitividad, la productividad operativa se posiciona como un factor clave para que las empresas mineras puedan ofrecer productos a menor costo y captar inversiones en el

mercado global. Una industria con altos niveles de productividad no solo mejora su posición competitiva, sino que también contribuye al desarrollo económico regional y nacional, fortaleciendo la presencia de los países mineros en el ámbito internacional.

- Asimismo, la eficiencia operativa repercute positivamente en la seguridad y el desempeño laboral. La optimización de los procesos reduce cuellos de botella y tiempos muertos, mejorando las condiciones de trabajo y disminuyendo los riesgos asociados a las operaciones mineras. La integración de sistemas automatizados y de teleoperación, además de aumentar la productividad, permite que los trabajadores operen en entornos más seguros y con menor exposición a peligros.
- La continuidad y sostenibilidad del negocio minero también dependen de la productividad operativa, ya que una mayor eficiencia permite extender la vida útil de la mina y mantener la operación rentable a lo largo del tiempo. Esto se traduce en beneficios económicos sostenidos para las comunidades locales y el Estado, al garantizar que la explotación del recurso se realice de manera prolongada y eficiente, incluso en zonas de menor ley.

En conclusión, la productividad operativa en la minería subterránea es un indicador integral que abarca aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales. Su mejora reduce los costos de producción, optimiza el uso de recursos, minimiza el impacto ambiental, aumenta la competitividad en un mercado globalizado y mejora las condiciones laborales. Así, la gestión de la productividad se erige como un

componente esencial para asegurar la sostenibilidad y competitividad de la industria minera en el contexto actual.

1.3.2.5. Medición

La cuantificación de la productividad operativa se efectúa a través de fórmulas e indicadores matemáticos que vinculan los recursos empleados con los resultados obtenidos, facilitando así la evaluación del desempeño, la comparación de resultados y el seguimiento de mejoras a lo largo del tiempo. En el ámbito de la minería subterránea se aplican tanto cálculos básicos para medir indicadores específicos, como la productividad del personal o de un equipo, como modelos complejos que permiten evaluar la productividad integral de la operación.

$$PRODUCTIVIDAD = \frac{PRODUCTO OBTENIDO}{RECURSOS UTILIZADOS}$$

Al aplicar cálculos de productividad, es fundamental contextualizar e interpretar los resultados, ya que un valor numérico por sí solo resulta insuficiente sin compararlo con la productividad histórica de la operación, las metas establecidas o el rendimiento de operaciones similares. Es esencial que las fórmulas utilizadas aseguren la homogeneidad entre las entradas y salidas para evitar interpretaciones erróneas; por ejemplo, una reducción en la ley del mineral puede mantener constante la productividad en términos de toneladas por hora, pero disminuirla en términos de onzas de metal por hora, lo que modifica las conclusiones según el “output” considerado.

Asimismo, para obtener una visión completa del desempeño operativo, se emplean diversos indicadores complementarios que abarcan desde la

productividad individual del personal y de los equipos hasta la productividad global de la operación. Estos cálculos, que van desde simples relaciones como toneladas por hombre o toneladas por hora-equipo hasta índices compuestos multifactoriales, constituyen herramientas esenciales para la gestión de la mejora continua, permitiendo identificar áreas con rendimientos por debajo de lo esperado y cuantificar los avances resultantes de iniciativas de optimización.

1.3.2.6. Relación con los indicadores

En la administración diaria de una mina subterránea se recurre a indicadores fundamentales de productividad, tales como los metros de avance lineal, el rendimiento en perforación y las toneladas extraídas, que permiten medir de forma concreta el desempeño de la operación. Estos indicadores, al estar intrínsecamente ligados a la productividad operativa, se utilizan para impulsar la mejora continua y alcanzar los objetivos de optimización en el ciclo minero. A continuación, se detalla la relevancia de cada indicador y su vínculo con la productividad, así como métodos para optimizarlos [22], [23].

- El indicador de metros de avance lineal se define como la medida de la longitud de desarrollo alcanzada en áreas como galerías, rampas o cruceros, durante un período determinado, ya sea medido en metros diarios o mensuales. Este indicador es vital en la minería subterránea, ya que el progreso en el desarrollo de accesos determina la capacidad para explotar nuevas reservas, reflejando así la eficiencia operativa al obtener más metros de túnel con los mismos recursos.

- Una mayor tasa de avance lineal se traduce en el desarrollo más rápido de frentes de extracción, lo cual permite iniciar las labores de minado de reservas con mayor prontitud y evita la formación de cuellos de botella por la falta de nuevos frentes. Por lo tanto, este indicador se utiliza para evaluar cómo la eficiencia en el uso de insumos se traduce en una mayor producción de infraestructura minera.
- El rendimiento de perforación se refiere a la eficacia en la perforación de tiros, medido en términos de metros perforados por hora, por turno o por equipo. Un rendimiento elevado en este proceso es fundamental, ya que la perforación constituye el ritmo del ciclo minero, y una mayor eficiencia en esta etapa reduce el tiempo total del ciclo, permitiendo realizar un mayor número de disparos en el mismo periodo.
- Para mejorar este rendimiento, se aplican diversas estrategias, como la modernización de equipos, la capacitación en técnicas de perforación y el mantenimiento preventivo de la maquinaria. La implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas automatizados y de registro de datos, permite detectar ineficiencias en tiempo real y ajustar parámetros operativos para maximizar la velocidad de perforación sin comprometer la vida útil de las herramientas.
- El indicador de toneladas extraídas mide la cantidad total de mineral extraído en un periodo específico, reflejando el output global de la operación. Este parámetro es clave para determinar la

productividad, aunque su interpretación debe considerar el uso de recursos, puesto que un incremento en toneladas extraídas que se logre mediante un aumento proporcional en los insumos no necesariamente implica una mejora en la eficiencia operativa.

- En conjunto, la integración y análisis de estos indicadores –metros de avance lineal, rendimiento de perforación y toneladas extraídas– permite implementar estrategias de optimización, como aumentar el número de frentes de trabajo, agilizar los ciclos operativos y minimizar los tiempos de inactividad. Esta visión holística posibilita la mejora continua de la productividad operativa, lo cual se traduce en una mayor rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

1.4. Formulación de los problemas

1.4.1. Problema general

¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?
- ¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en el rendimiento de perforación en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?

- ¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?

1.5. Justificación

Para maximizar la efectividad del proceso de extracción y aumentar la rentabilidad del yacimiento, es fundamental investigar cómo el método de minado Sublevel Stopping afecta la productividad operacional en la zona de Cuerpos de Minera Alpayana. Desde un punto de vista económico, esta investigación nos permitirá evaluar los efectos de la implementación de este método en los gastos operacionales mediante el análisis de métricas importantes como el rendimiento de perforación de roca, la extracción de mineral y los metros de avance lineal. Al optimizar estos factores, podemos reducir los gastos relacionados con voladuras y perforaciones, mejorar el uso del mineral y limitar las pérdidas por dilución, todo lo cual aumentará la rentabilidad y competitividad de la unidad minera.

En términos prácticos, el estudio busca formas de mejorar el diseño e implementación del Sublevel Stopping para maximizar los ciclos operativos y garantizar una mayor eficiencia de producción. Al evaluar el desempeño de la perforación de roca, se pueden desarrollar planes para optimizar el uso del equipo y mejorar la fragmentación del material, lo que facilitará la extracción y reducirá el tiempo perdido. De manera similar, la evaluación de los metros de avance lineal y la extracción de mineral puede ayudar a modificar el diseño de las operaciones mineras, reducir el retrabajo y garantizar una mejor coordinación entre las diversas fases del proceso minero.

En términos técnicos, esta investigación proporcionará detalles completos sobre cómo la técnica de Sublevel Stopping interactúa con las características geomecánicas del área de Cuerpos. Con el fin de maximizar la fragmentación y minimizar los impactos adversos en las estructuras mineras, se examinarán variables que incluyen la estabilidad de las cámaras mineras, la eficiencia de la voladura y la correlación entre el tipo de roca y el desempeño de la perforación. Comprender cómo estos elementos afectan la productividad operativa permitirá al estudio sugerir cambios en el diseño e implementación del método, garantizando a Minera Alpayana un proceso de extracción más efectivo, seguro y duradero.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.
- Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en el rendimiento de perforación en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.
- Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis específica

La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

1.7.2. Hipótesis específica

- La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.
- La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en el rendimiento de perforación en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.
- La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Tipo de investigación

Tipo aplicada [24]. El objetivo de la investigación aplicada es proporcionar conocimientos para un fin específico y útil, es decir, para abordar cuestiones concretas en situaciones del mundo real. La investigación aplicada aplica conceptos científicos para producir soluciones, mejorar procesos o crear tecnologías que beneficien a la sociedad o a una industria específica, a diferencia de la investigación fundamental, que se concentra en desarrollar conocimientos teóricos sin aplicación directa.

2.2. Nivel de investigación

Nivel explicativo [25]. Encontrar las causas y consecuencias de un fenómeno es el objetivo primordial de la investigación explicativa. Al identificar los componentes que crean un fenómeno y proporcionar una explicación de cómo y por qué sucede, la investigación explicativa va más allá de la investigación descriptiva, que solo pretende caracterizar una realidad, o la investigación correlacional, que busca vínculos entre variables.

2.3. Diseño de investigación

Diseño preexperimental transversal [26]; la investigación de diseño preexperimental transversal tiene como objetivo examinar la vinculación entre variables en un contexto particular. Se caracteriza por la intervención a un solo grupo sin comparación con un grupo de control. Esto permite una estimación preliminar de los efectos de una variable independiente sobre una variable dependiente, pero restringe el grado de control sobre los factores externos, además, las variables se miden todas a la vez sin ningún seguimiento en el

tiempo. Esto hace posible analizar los efectos inmediatos de la intervención o fenómeno sin tener en cuenta sus modificaciones a largo plazo o evolutivas.

2.4. Población y muestra

2.4.1. Población

La población de estudio se refiere al grupo personas u objetos que son objeto de análisis, por ello, es esencial contar con una población para determinar el alcance y la aplicabilidad de los hallazgos [27]; en ese sentido, la población de investigación estará conformada por todas las zonas de explotación minera en la Unidad Operativa Americana, en el año 2024.

2.4.2. Muestra

La muestra se refiere a una parte de población de estudio que se enfoca consecuentemente en la generalización de los hallazgos [28]; en ese sentido, la muestra de investigación estará conformada por la Zona Cuerpos, Unidad Operativa Americana, en el año 2024.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación usará la técnica de la observación [29], sirve para recopilar datos para la investigación y consiste en documentar de forma metódica, precisa y fiable las acciones, los sucesos o las circunstancias en un contexto determinado, además, resulta especialmente útil para analizar fenómenos en sus contextos naturales sin modificar los factores. También se utilizará la técnica del fichaje [30], pues es una forma de reunir y organizar el material, para facilitar su análisis, categorización y recuperación, implica introducir metódicamente material pertinente de diversas fuentes (incluidos libros, artículos científicos, informes, tesis y más) en fichas, ya sean digitales o analógicas.

En relación con los instrumentos, se usará las fichas de elaboración propia del autor e informes preparados para el sustento a la empresa basado en la variable de estudio a medir (productividad operativa) y sus indicadores (metros de avance lineal, rendimiento de perforación y toneladas extraídas).

2.6. Técnicas de análisis e interpretación de datos

La información recopilada será categorizada una vez recopilada mediante las herramientas designadas, luego será analizada estadísticamente y ordenada de acuerdo a los estándares establecidos por los indicadores. De acuerdo con las indicaciones señaladas anteriormente, los resultados finales serán presentados en tablas y gráficos. Es importante recordar que para el procesamiento de los datos se utilizará el programa estadístico Microsoft Excel 2016 para realizar el análisis descriptivo.

III. RESULTADOS

3.1. Generalidades de la unidad minera

3.1.1. Ubicación

La UEA Americana, perteneciente a la empresa Alpayana S.A., es una empresa dedicada a la extracción polimetálica de minerales. La empresa tiene planeado realizar actividades de explotación minera de 5,000 TMD, mediante las operaciones mineras subterráneas de un yacimiento que contiene minerales de zinc, plata, cobre y plomo.

La Unidad Minera Americana se localiza en el paraje Piedra Parada, en la zona de Carmen Chicla del departamento de Lima, en la región central, al flanco oeste de la cordillera de los Andes. Su posición geográfica se detalla mediante coordenadas UTM (366761.70E; 8710455.60N), y se indica que el campamento Alpayana se ubica a 4350 m.s.n.m., mientras que la bocamina principal Alex y la bocamina El Carmen se encuentran a 4414 m.s.n.m y 4456 m.s.n.m respectivamente, evidenciando la altitud característica de la zona.

La descripción continúa con la información sobre las infraestructuras viales que conectan la unidad minera. Se especifica que la carretera asfaltada de la ruta Lima – Casapalca abarca aproximadamente 129 km, con un tiempo estimado de recorrido de tres horas; asimismo, la ruta Huancayo – La Oroya – Casapalca, con una distancia de 100 km, requiere un tiempo similar para su tránsito. Además, se señala que existe una trocha carrozable de 3 km desde Casapalca Piedra Parada hasta la unidad minera, la cual se recorre en unos 15 minutos, proporcionando así un enlace complementario que mejora la accesibilidad operativa.

3.1.2. Aspectos geológicos

3.1.2.1. Geología local

En el distrito minero de Casapalca se exponen de manera amplia rocas sedimentarias y volcánicas que datan del Cretáceo Superior y del Terciario. Entre ellas se encuentran las areniscas, lutitas y conglomerados que integran la formación Casapalca, las rocas volcánicas pertenecientes a la formación Carlos Francisco, las capas de caliza de la formación Bellavista y la secuencia volcánica de la formación Río Blanco, lo cual evidencia la variabilidad y complejidad de la litología presente en la región. La manifestación de la tectónica andina en el área es notable a través de la existencia de estructuras plegadas, específicamente el anticlinal y sinclinal Casapalca, que han sido alterados por diversos sistemas de fallas y fracturas de ámbito tanto regional como local, entre ellos las fallas denominadas Carmen y Americana. Estos elementos estructurales juegan un papel crucial en la configuración geológica del distrito y en la distribución de sus recursos minerales.

La mineralización en Casapalca se presenta en dos formas: mediante vetas y cuerpos mineralizados. En superficie, el sistema de vetas se extiende hasta 5 km de longitud y se ha explorado en profundidades que alcanzan los 1,300 metros, originándose por procesos hidrotermales que rellenan fracturas. Además, se distinguen dos tipos de cuerpos: aquellos formados por procesos de reemplazamiento o skarn, y las diseminaciones resultantes del relleno de fisuras, lo que refleja la diversidad de ambientes de formación mineral en el área.

La formación de las vetas se atribuye a procesos hidrotermales que han rellenado fracturas derivadas de combinaciones de tensiones y cizallamientos previas a la mineralización. Los cuerpos mineralizados, en cambio, se han generado por procesos de reemplazamiento metasomático y por el relleno de cavidades en las rocas de las formaciones Casapalca y Carlos Francisco, evidenciados por la presencia de epidota mineral calcosilicatada y un marcado zonamiento desde la zona central de los cuerpos hasta la roca circundante. La mineralogía se compone principalmente de minerales metálicos como esfalerita, galena y calcopirita, acompañados de minerales de mena como calcita, cuarzo, rodocrosita y pirita, mientras que la alteración de las rocas de caja se caracteriza por procesos de cloritización, epidotización, piritización, calcitización y silicificación.

3.1.2.2. Geología económica

La UEA Americana es un yacimiento polimetálico cuyas reservas minerales se encuentran en vetas y en cuerpos, con mineralogía simple, los principales minerales son: esfalerita, galena, tetraedrita/freibergita, calcopirita, pirita, cuarzo, calcita y rodocrosita.

Los depósitos mineralizados se han formado por el relleno de cavidades y mediante reemplazamiento metasomático en areniscas y conglomerados de la Formación Casapalca, presentando morfologías irregulares. Se observa que el mayor volumen de estos depósitos se encuentra en las areniscas que han experimentado epidotización y silicificación en el Miembro Capas Rojas, mientras que en los conglomerados del Miembro Carmen, los cuerpos mineralizados son de

menor volumen, más estrechos y se disponen en concordancia con la estratificación original.

La detección de epidota, un mineral calcosilicatado, indica la incorporación de sílice, aluminio, hierro y magnesio en las areniscas y conglomerados calcáreos, lo que sugiere que se trata de un yacimiento skarn de zinc. Además, la alteración muestra un zoneamiento que va desde la zona central, donde predomina la epidotización, hasta la periferia con mayor silicificación, extendiéndose hasta las areniscas rojizas. Este patrón de alteración resulta crucial para interpretar los procesos hidrotermales y metasomáticos implicados en la formación del yacimiento.

3.2. Implementación del método Sublevel Stopping

productividad de equipos, un cumplimiento riguroso de la producción y una optimización de la seguridad durante las operaciones.

Para la realización de esta técnica, se contempla la ejecución de trabajos preparatorios que incluyen la construcción de bypass, galerías, cruceros y rampas, con secciones estándar de 4.00x4.00 m y 4.50x4.00 m, adaptadas a las características del equipamiento a utilizar. Además, se ha establecido que la altura del bloque a extraer en los cuerpos Casapalca y Esperanza será de 70 metros, distribuidos en dos niveles principales y un subnivel intermedio, lo que facilita el reconocimiento y la delimitación de la estructura mineralizada.

El proceso de minado se organiza de manera que, tras el reconocimiento mediante galerías en los niveles principales, se desarrolle el subnivel intermedio para definir la bancada de minado. Se planifica, además, la preparación de un bypass a 20 metros de distancia y la disposición de ventanas de extracción separadas por 40 metros, lo que contribuye a una limpieza eficiente del mineral.

Paralelamente, se han considerado cámaras de acumulación y carguío cada 200 metros, con el fin de maximizar el uso eficiente de los equipos de acarreo y transporte.

3.3. Ciclo de minado

3.3.1. Perforación y voladura

La perforación se ejecuta utilizando el equipo que ofrezca las condiciones óptimas en términos de seguridad, producción y recuperación, considerando aspectos técnicos como la longitud, la sección mínima, los movimientos de basculación, los ángulos operativos mínimos y máximos, y un diámetro de broca de 64 mm. En este contexto, se destacan los equipos Simbas H1254 y S7D como las principales opciones para llevar a cabo las operaciones de perforación.

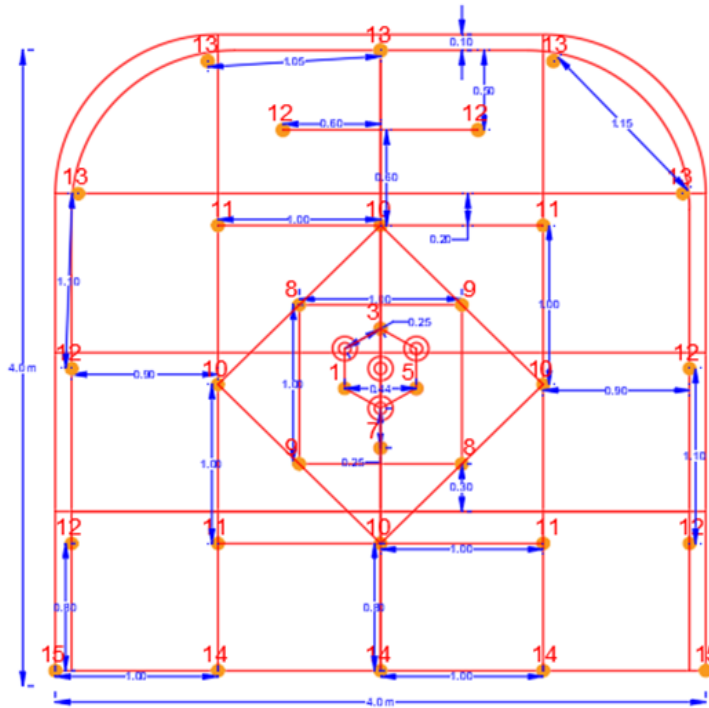
Se emplean chimeneas del tipo SLOT y del método VCR (Vertical Crater Retreat) con una sección definida de 2,0 x 2,0 metros, diseñadas para generar la cara libre en el cuerpo minero en producción. La determinación del “burden” y el espaciamiento respecto a la cara libre y las filas de perforación depende de las características geométricas del tajo, considerándose parámetros esenciales como la potencia del cuerpo y la altura del banco. En este sentido, para cuerpos con potencia superior a 3 m, el “burden” y el espaciamiento se fijan en 1,5 m; para aquellos con potencia entre 2 y 3 m, en 1,2 m; y para cuerpos con potencia inferior a 2 m, en 0,6 m, aunque estas medidas se definirán en coordinación con el área operativa.

El método se aplica preferentemente en condiciones donde se presenten cuerpos macizos o vetas estrechas, siempre que la mecánica de la roca

sea favorable, garantizando la estabilidad de paredes y techos. La calidad de la roca debe ser adecuada y contar con un ángulo de buzamiento superior a 60°, lo que indica que esta técnica se orienta principalmente a yacimientos verticales que presenten formas y dimensiones regulares.

En las voladuras primarias se utiliza ANFO a granel, cuya dosificación se adapta a la dureza de la roca, complementado con un booster de 1/2 lb y el uso exclusivo de detonadores no eléctricos, además de incorporar medidas de seguridad mediante detonadores ensamblados de 9 pies y un taco de 1.0 m en áreas minerales. En contraste, para las voladuras secundarias se emplea emulsión a granel, alcanzando un factor de potencia de carga promedio de 0.60 kg/t; el carguío en taladros positivos se realiza con el equipo jetanol, logrando una densidad presurizada de 0.85 gr/cc, mientras que en taladros en negativo se efectúa mediante el método de carguío por gravedad.

MAILLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA CON JUMBO
SECCIÓN 4.00X4.00 - ROCA REGULAR III A - III B (RMR 41 - 60)
CON ANFO



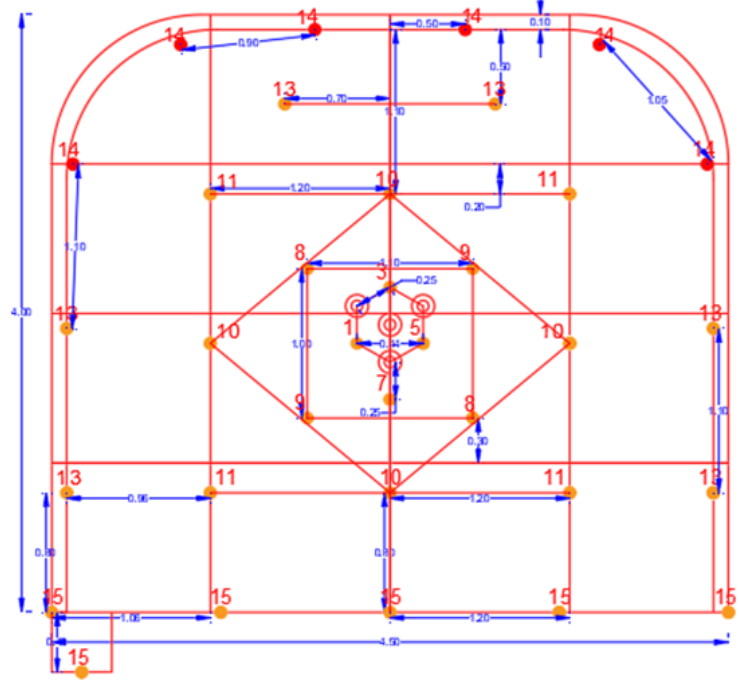
FANELES 4.2 m	
SEC.	CANT.
Nº 1	1
Nº 2	
Nº 3	1
Nº 4	
Nº 5	1
Nº 6	
Nº 7	1
Nº 8	2
Nº 9	2
Nº 10	4
Nº 11	4
Nº 12	6
Nº 13	5
Nº 14	3
Nº 15	2
Nº 16	
TOTAL	32

PARAM. DE PERFORACIÓN		
LONG. BARRA	ft	14
LONG. BARRA	m	4.27
LONG. PERFORACIÓN	m	3.6
EF. PERFORACIÓN		84%
Nº TAL. PERFORADOS		36
Nº RIMADOS		4
DIAM. BROCA	mm	51 y 45
DIAM. RIMADO	mm	102
EXPLOSIVO Y ACCESORIOS		
ANFO	Kg	160
EMULNOR 5000 1 1/2"X8"	cart	90
EMULNOR 3000 1 1/8"X12"	cart	-
CORDÓN DETONANTE	m	51
CARMEX	und	4
MECHA RÁPIDA	m	0.6

PARAM. TÉCNICOS		
TIPO DE ROCA	REGULAR	
SECCIÓN (BXA)	4.0	4.0
DENSIDAD ROCA	Ton/m ³	2.7
VOL. INSITU ROTO	m ³	46.56
RENDIMIENTOS		
MTS PERF. X DISP	mp/disp	129.6
MTS PERF. X AVANCE	mp/ml	43.2
MTS PERF. X TON	mp/ton	1.0
RESULTADOS		
AVANCE POR DISP.	m	3
F. AVANCE	kg/m	61
F. CARGA	kg/m ³	3.95
F. POTENCIA	kg/ton	1.46

Figura 1. Malla de perforación y voladura - sección 4x4m - roca regular con ANFO

MALLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA CON JUMBO
SECCIÓN 4.50X4.00 - ROCA REGULAR III A - III B (RMR 41 - 60)
CON ANFO



FANELES 4.2 m	
SEC.	CANT.
Nº 1	1
Nº 2	
Nº 3	1
Nº 4	
Nº 5	1
Nº 6	
Nº 7	1
Nº 8	2
Nº 9	2
Nº 10	4
Nº 11	4
Nº 12	
Nº 13	6
Nº 14	6
Nº 15	6
Nº 16	
TOTAL	34

● Taladros Cargados

○ Rimados

PARAM. DE PERFORACIÓN		
LONG. BARRA	ft	14
LONG. BARRA	m	4.27
LONG. PERFORACIÓN	m	3.7
EF. PERFORACIÓN		87%
Nº TAL. PERFORADOS		38
Nº RIMADOS		4
DIAM. BROCA	mm	51 y 45
DIAM. RIMADO	mm	102
EXPLOSIVO Y ACCESORIOS		
ANFO	Kg	192
EMULNOR 5000 1 1/2"X8"	cart	59
EMULNOR 3000 1 1/8"X12"	cart	-
CORDÓN DETONANTE	m	51
CARMEX	und	4
MECHA RÁPIDA	m	0.6

PARAM. TÉCNICOS		
TIPO DE ROCA	REGULAR	
SECCIÓN (BXA)	4.5	4.0
DENSIDAD ROCA	Ton/m3	2.7
VOL. INSITU ROTO	m3	52.38
RENDIMIENTOS		
MTS PERF. X DISP	mp/disp	140.6
MTS PERF. X AVANCE	mp/ml	46.9
MTS PERF. X TON	mp/ton	1.0
RESULTADOS		
AVANCE POR DISP.	m	3
F. AVANCE	kg/m	69
F. CARGA	kg/m ³	3.96
F. POTENCIA	kg/ton	1.47

Figura 2. Malla de perforación y voladura - sección 4.5x4m - roca regular con ANFO

3.3.2. Carguío de mineral

El mineral disparado cae por gravedad y es recolectado por las ventanas o drawpoints, mediante equipos LHD, Caterpillar R1600 (6 yds cúbicas) y R1300 (4.1 yds cúbicas) hacia las cámaras de carguío y acumulación.

3.3.3. Acarreo, transporte y descarga

Una vez el mineral está ubicado en las cámaras de acumulación y carguío; este es cargado a los volquetes y transportado al ore pass de transferencia y/o rompebancos; posterior a ello el mineral es llevado a los echaderos del pique principal de extracción (PIQUE 650), el cual realiza el izaje de carga hasta el nivel superior de extracción que es el túnel Alex. Finalmente, el mineral es transportado y descargado con Volquetes de 30 Tn. hasta la planta de tratamiento.

3.4. Fases del ciclo de minado

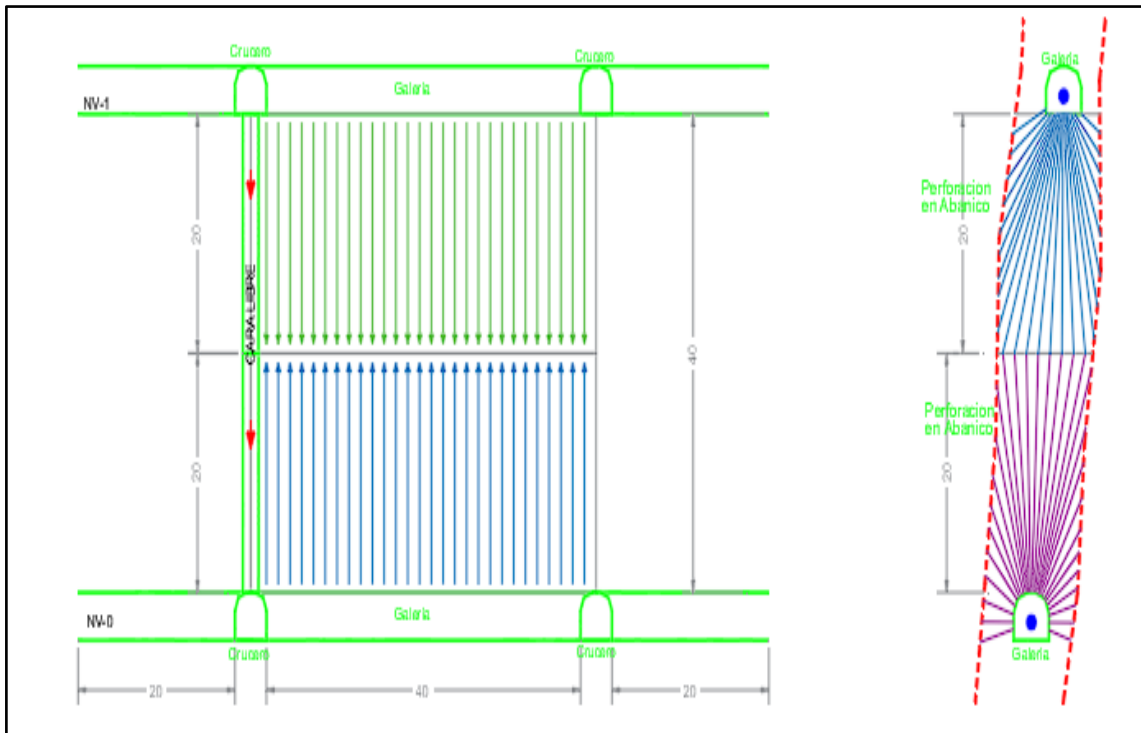


Figura 3. Esquema del minado

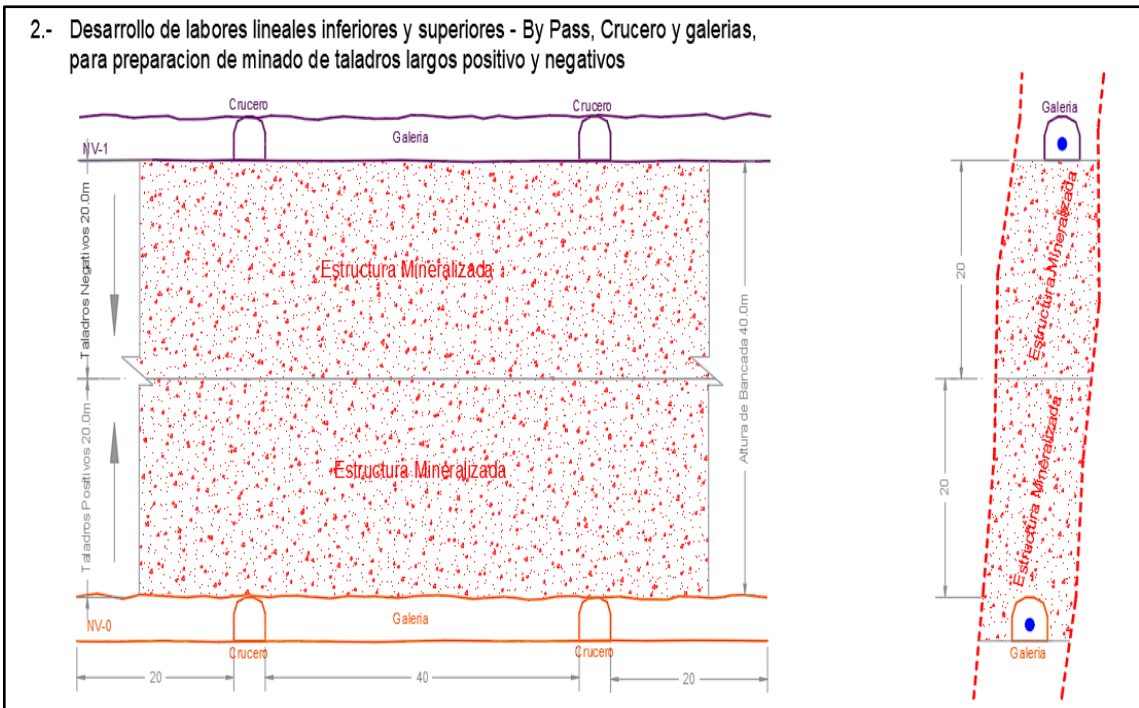


Figura 4. Etapa 1: preparación de labores

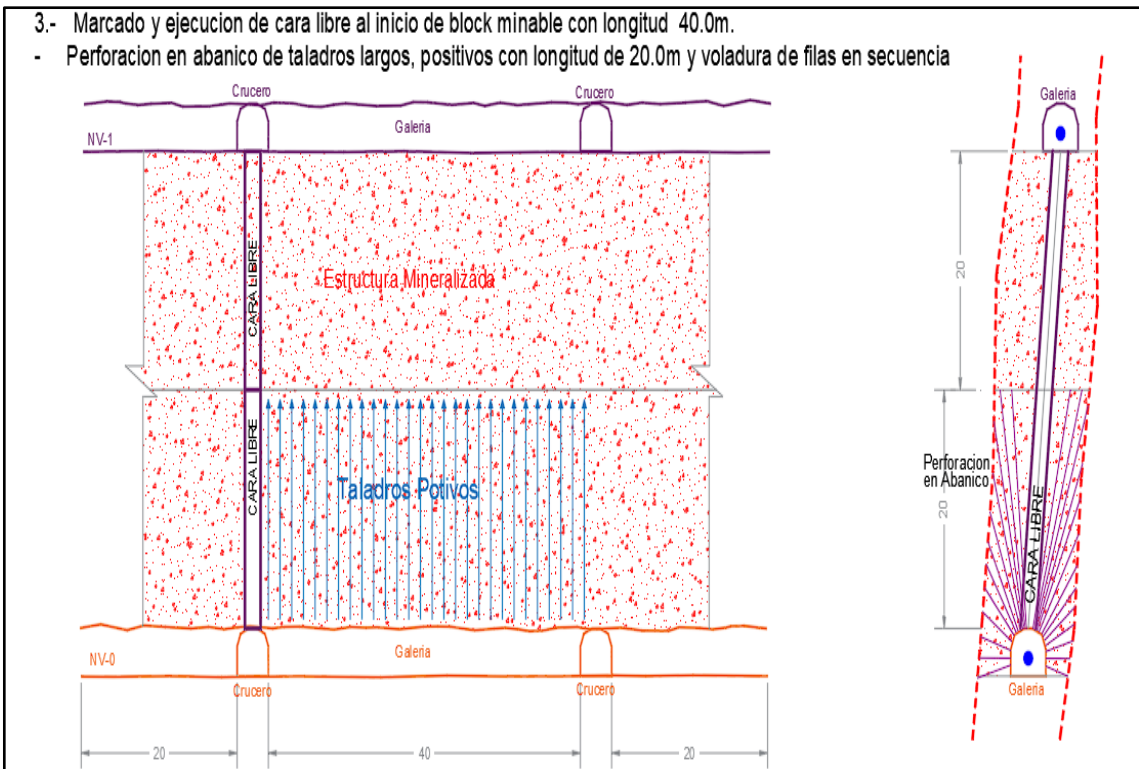


Figura 5. Etapa 2: perforación y voladura con taladros positivos

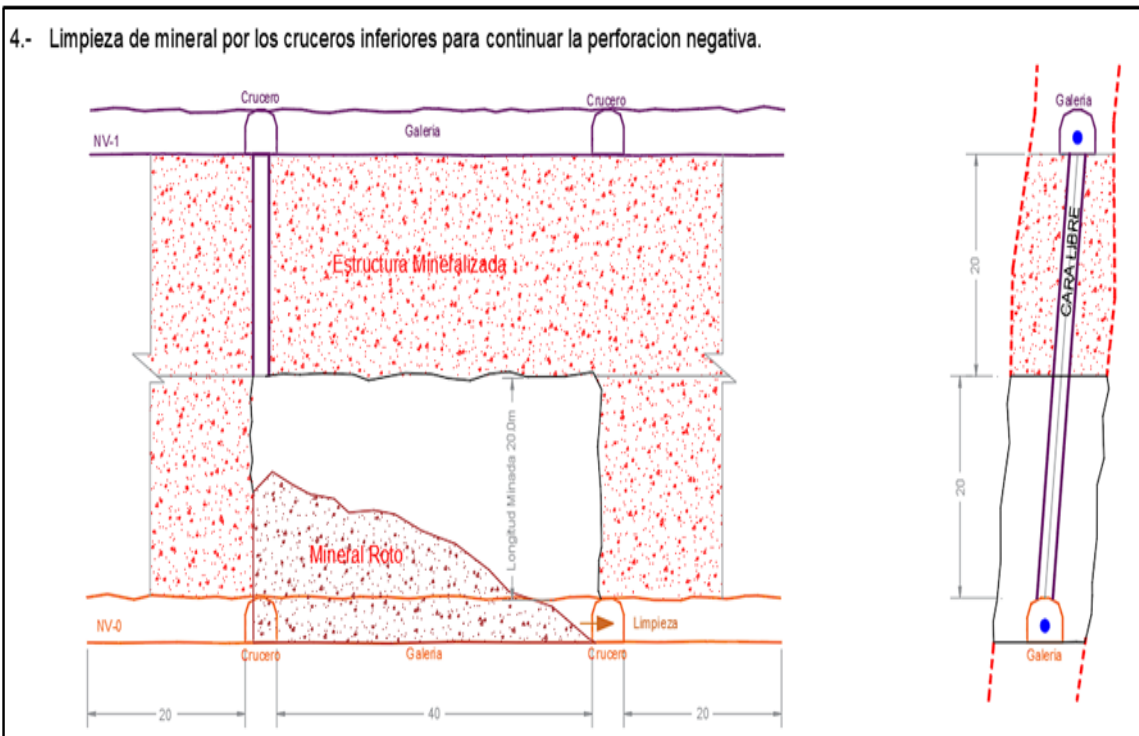


Figura 6. *Etapa 3: Limpieza de carga de mineral por el nivel inferior de extracción*

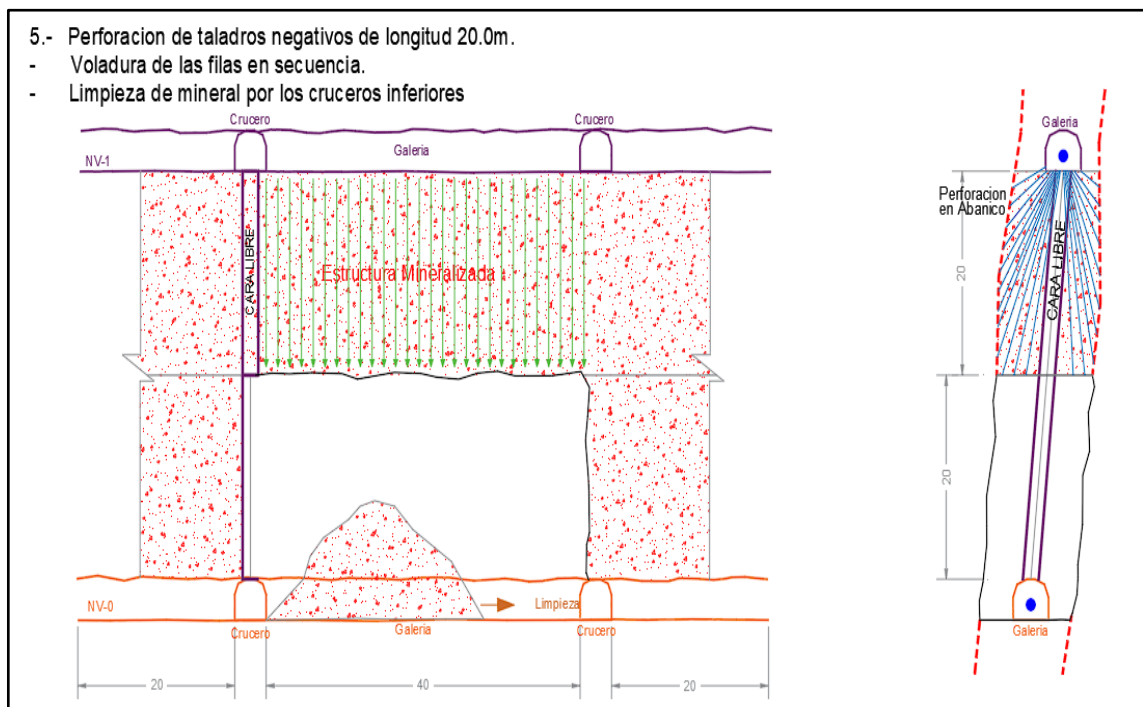


Figura 7. *Etapa 4: Perforación de taladros negativos y positivos. Voladura de taladros en negativo y limpieza por el nivel inferior*

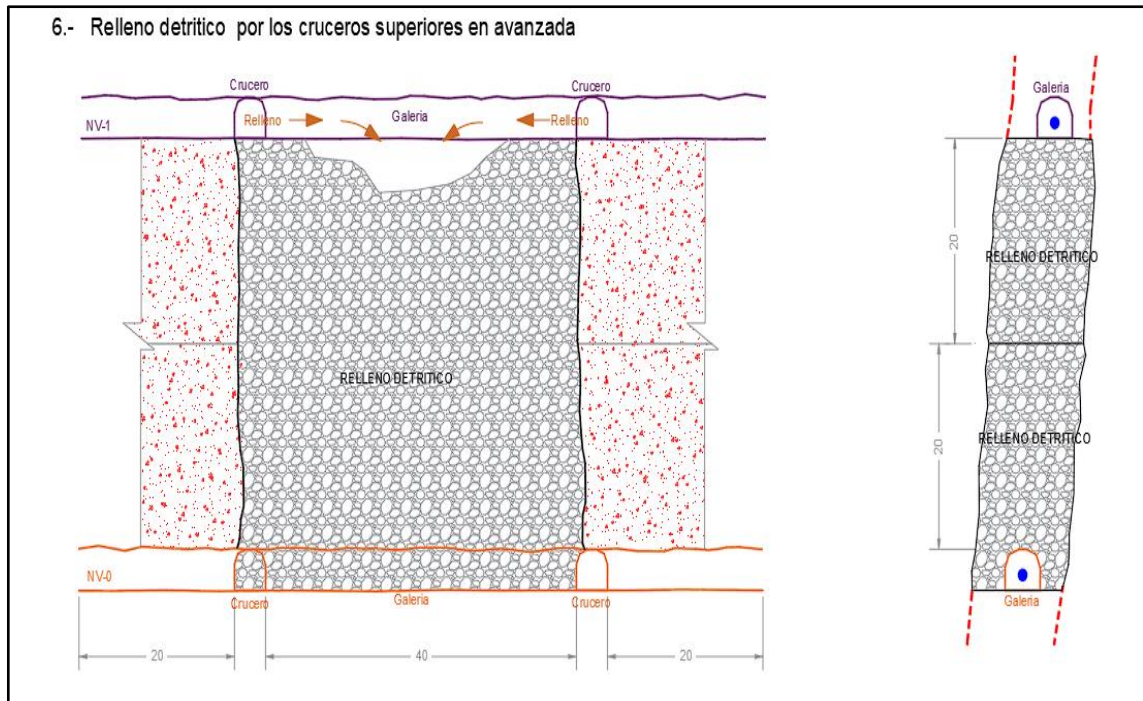


Figura 8. *Etapa 5: Relleno de tajo por el subnivel intermedio para posterior minado de taladros en positivo*

3.5. Labores de preparación y desarrollo

3.5.1. Galería

Se describe inicialmente las labores necesarias para el acceso al depósito mineral, resaltando la importancia de establecer rutas adecuadas para el personal y la movilización de herramientas, materiales, equipos y maquinarias. Asimismo, se enfatiza la necesidad de verificar la continuidad del yacimiento y se detallan las infraestructuras imprescindibles para el funcionamiento de la mina, tales como las conducciones destinadas a energía eléctrica, aire comprimido y desagüe, fundamentales para garantizar la operatividad del sistema.

En el contexto de las minas mecanizadas, como es el caso de Alpayana, se utilizan jumbos electrohidráulicos de un brazo para realizar la

perforación de los frentes mineros. Se señala que una galería estándar cuenta con una sección de 4.0 x 4.0 metros y que el frente se perfora a una profundidad de 14 pies. Además, se explica que los taladros se cargan de forma neumática con ANFO y se detonan utilizando detonadores no eléctricos de retardo breve, lo que refleja la integración de técnicas precisas y medidas de seguridad en el proceso de voladura.

3.5.2. Rampas

Desarrolladas sobre roca o material estéril, las secciones típicas en Alpayana son de 4.5x4.0 con pendiente (+/- 13%). La rampa une dos o más niveles de diferentes cotas.

Sus funciones son:

Labor de accesos de equipos y maquinarias pesadas sobre llantas a interior mina desde la superficie o entre los niveles, permite la extracción de mineral por medios rápidos y flexibles con equipos de bajo perfil, además de servir como acceso de personal, materiales, insumos y herramientas.

3.5.3. By pass

Los By-passes son labores paralelas a la estructura mineralizada, de manera que sirva como labor de evacuación de mineral.

3.5.4. Chimenea V.C.R.

Las chimeneas del tipo V.C.R. (Vertical Crater Retreat) de sección 2,0 x 2,0 m, son construidas para crear la cara libre de un determinado cuerpo en producción como se muestra en la siguiente imagen.

Las principales características de las operaciones de Perforación y Voladura para la construcción de una chimenea del tipo V.C.R. son las siguientes:

- o Iniciador.
- o Retardo: Detonadores no eléctricos Ms.
- o Taco Superior: 1.0 m.

3.5.5. Chimenea Slot

Las chimeneas del tipo SLOT de sección 2,0 x 2,0 m, son construidas para crear la cara libre de un determinado cuerpo en producción como se muestra en la siguiente imagen.

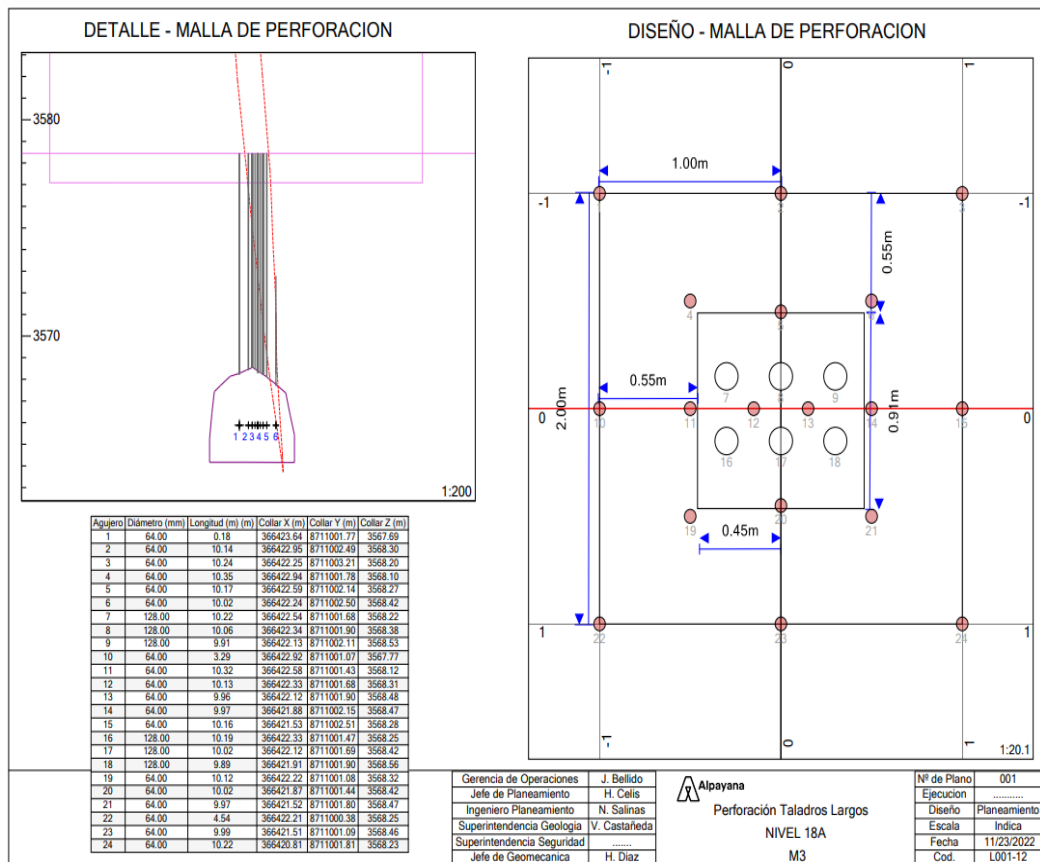


Figura 9. Diseño de chimenea slot 2x2m

3.6. Metros de avance lineal

En la tabla 1 se observa que la meta programada para cada mes (1440 metros de avance lineal) presenta, en la mayoría de los casos, un valor menor que la ejecución real. La excepción más notable se da en enero, donde se registra un avance real de 1374.55 metros, lo cual equivale a un 95.24% de lo programado. A partir de febrero, el valor real supera al programado, con porcentajes de variación (VAR %) que oscilan entre 101.08% y 114.48%.

Asimismo, se refleja de manera directa la diferencia entre lo programado y lo real. El mayor incremento mensual se observa en junio (208.45 metros adicionales), seguido de julio (200.44 metros).

Por último, se observa que, en el periodo de enero a noviembre, se programaron 15,840 metros de avance lineal y se alcanzaron 16,845.26 metros en la realidad. La variación acumulada de 105.97% confirma un superávit de 1,005.26 metros respecto de la meta prevista.

Tabla 1.
Cumplimiento metros de avance lineal, zona cuerpos 2024

METROS DE AVANCE LINEAL				
MES	PROGRAMADO	REAL	DIF	VAR %
ENERO	1440.00	1374.55	-65.45	95.24
FEBRERO	1440.00	1455.50	15.50	101.06
MARZO	1440.00	1365.10	-74.90	94.51
ABRIL	1440.00	1541.18	101.18	106.57
MAYO	1440.00	1586.00	146.00	109.21
JUNIO	1440.00	1648.47	208.47	112.65
JULIO	1440.00	1605.05	165.05	110.28
AGOSTO	1440.00	1548.48	108.48	107.01
SETIEMBRE	1440.00	1505.00	65.00	104.32
OCTUBRE	1440.00	1615.48	175.48	110.86
NOVIEMBRE	1440.00	1600.45	160.45	110.03
TOTAL	15840.00	16845.26	1005.26	105.97

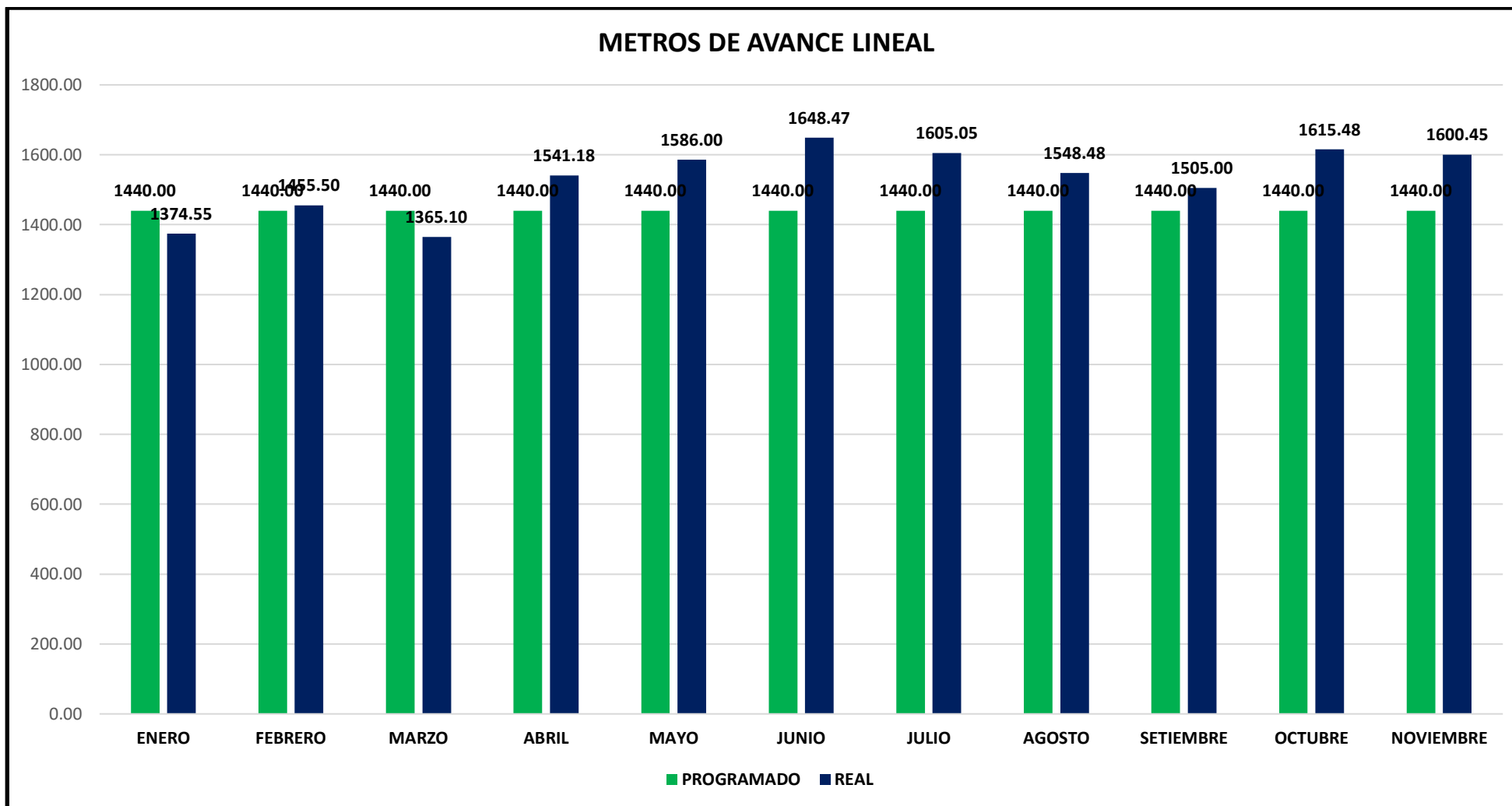


Figura 10. Cumplimiento metros de avance lineal, zona cuerpos 2024

3.7. Toneladas de mineral extraídas

En la tabla 2 se observa la comparación entre las toneladas de mineral programadas y las realmente extraídas, se evidencia un comportamiento positivo en la mayoría de los meses. Si bien en enero se observa un ligero déficit de 1,549 toneladas (98.75% de lo programado), a partir de febrero los valores reales superan las metas establecidas, alcanzando variaciones que oscilan entre el 100.67% y el 102.81%.

Este patrón sugiere una eficiencia operacional creciente o la introducción de mejoras en los procesos de extracción que han contribuido a un rendimiento superior al esperado.

Tabla 2. *Cumplimiento de las toneladas de mineras extraídas, zona cuerpos 2024*

TONELADAS DE MINERAL EXTRAÍDAS				
MES	PROGRAMADO	REAL	DIF	VAR %
ENERO	125000.00	123451.00	-1549.00	98.75
FEBRERO	125000.00	125845.00	845.00	100.67
MARZO	125000.00	126458.00	1458.00	101.15
ABRIL	125000.00	124856.00	-144.00	99.88
MAYO	125000.00	127487.00	2487.00	101.95
JUNIO	125000.00	127845.00	2845.00	102.23
JULIO	130000.00	132457.00	2457.00	101.85
AGOSTO	130000.00	131458.50	1458.50	101.11
SETIEMBRE	130000.00	130884.55	884.55	100.68
OCTUBRE	130000.00	141152.55	11152.55	107.90
NOVIEMBRE	130000.00	138457.00	8457.00	106.11
TOTAL	1400000.00	1430351.60	30351.60	102.12

En tabla también se observa la diferencia (DIF) mensual que, proporciona una medida directa de la brecha entre lo programado y lo real. Los mayores incrementos se presentan en octubre (3,518 toneladas) y agosto (3,000 toneladas), lo que indica picos de productividad que superan con amplitud las

estimaciones originales. Tales resultados podrían atribuirse a la optimización de recursos humanos y técnicos, o a condiciones externas favorables (por ejemplo, clima o mercado).

Por último, el análisis global muestra que la meta de 1,400,000 toneladas fue superada, con un total de 1,430,351.60 toneladas extraídas, lo que representa un 102.12% de la meta prevista y un excedente de 30,351.60 toneladas.

Este logro global confirma la solidez de la planificación y la capacidad de respuesta operativa ante posibles fluctuaciones mensuales, respaldando la continuidad de las estrategias implementadas y la posibilidad de optimizarlas para sostener e incluso incrementar estos niveles de desempeño.

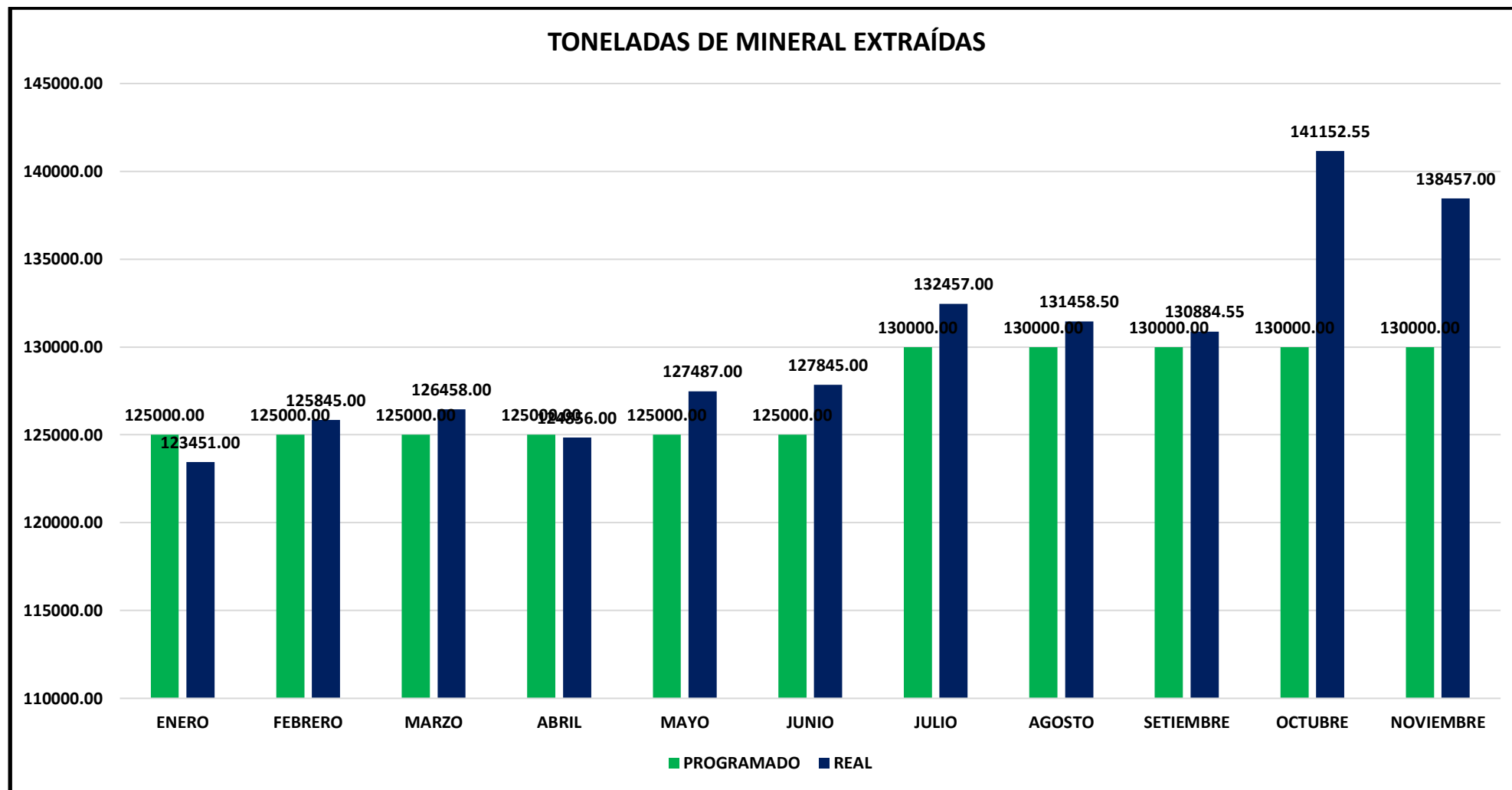


Figura 11. Cumplimiento de las toneladas de mineras extraídas, zona cuerpos 2024

3.8. Rendimiento de perforación

Respecto al rendimiento de perforación medidos en metros perforados por cada taladro. En la tabla 3 se aprecia que el rendimiento de perforación real (3.15 metros en promedio) se sitúa por debajo del valor programado (3.50 metros). Esta diferencia se evidencia en cada uno de los meses, con variaciones porcentuales (VAR %) que van desde 81.36% (enero) hasta 88.00% (octubre). Si bien el mes de octubre presenta el menor déficit (-0.42 m), en conjunto, el balance global indica una brecha de -0.35 metros respecto de la meta establecida, situando el rendimiento acumulado en un 88.65%.

Asimismo, el comportamiento mensual muestra ciertos repuntes de productividad. Por ejemplo, agosto y octubre destacan con valores reales de 3.06 y 3.08 metros, respectivamente, sugiriendo una mejora relativa en la operación de perforación. En contraste, marzo registra el mayor déficit (-0.64 m), lo que indica la necesidad de analizar las causas específicas que pudieron influir en ese rendimiento.

Tabla 3.
Cumplimiento del rendimiento de perforación en jumbos de 14ft (m), zona cuerpos 2024

RENDIMIENTO DE PERFORACIÓN (metros perforados/taladro)				
JUMBO 14ft				
MES	PROGRAMADO	REAL	DIF	VAR %
ENERO	3.50	2.95	-0.55	81.36
FEBRERO	3.50	3.01	-0.49	83.72
MARZO	3.50	3.14	-0.36	88.54
ABRIL	3.50	2.95	-0.55	81.36
MAYO	3.50	2.98	-0.52	82.55
JUNIO	3.50	3.15	-0.35	88.89
JULIO	3.50	3.35	-0.15	95.52
AGOSTO	3.50	3.44	-0.06	98.26
SETIEMBRE	3.50	3.35	-0.15	95.52
OCTUBRE	3.50	3.36	-0.15	95.68
NOVIEMBRE	3.50	3.01	-0.49	83.72
TOTAL	3.50	3.15	-0.35	88.65

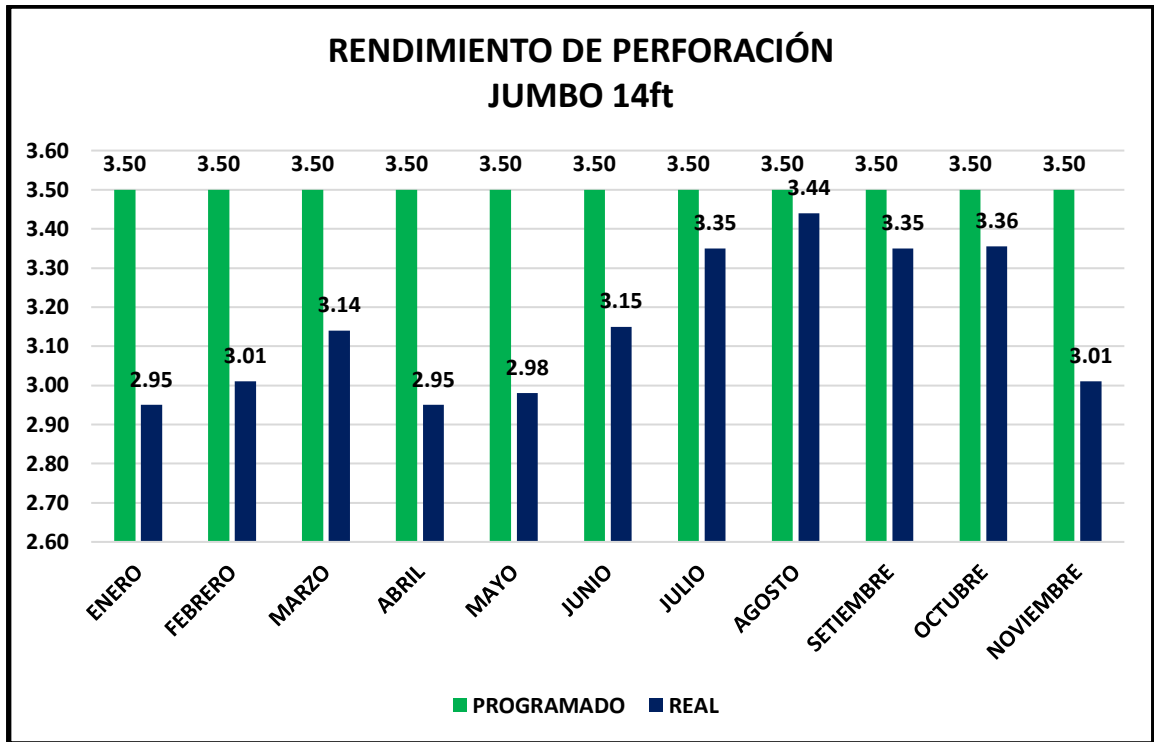


Figura 12. Cumplimiento del rendimiento de perforación en jumbos de 14ft (m), zona cuerpos 2024

3.9. Productividad

Tabla 4.
Productividad operativa (Ton/HHT), zona cuerpos 2024

PRODUCTIVIDAD OPERATIVA (Ton/HHT)					
MES	Ton	HHT	REAL	PROG	VAR %
ENERO	123451.00	15449.00	7.99	7.50	6.54
FEBRERO	125845.00	14955.00	8.41	7.50	12.20
MARZO	126458.00	15127.00	8.36	7.50	11.46
ABRIL	124856.00	15336.00	8.14	7.50	8.55
MAYO	127487.00	15206.00	8.38	7.50	11.79
JUNIO	127845.00	14976.00	8.54	7.50	13.82
JULIO	132457.00	15240.00	8.69	7.50	15.89
AGOSTO	131458.50	15464.00	8.50	7.50	13.35
SETIEMBRE	130884.55	14948.00	8.76	7.50	16.75
OCTUBRE	141152.55	15167.00	9.31	7.50	24.09
NOVIEMBRE	138457.00	15248.00	9.08	7.50	21.07
TOTAL	130031.96	15192.36	8.56	7.50	14.14

En la tabla 4 se aprecia que la productividad operativa (Ton/HHT) supera de manera consistente el valor programado (7.50 Ton/HHT) a lo largo de todos los meses. Esto se refleja en el promedio global de 8.56 Ton/HHT frente a la meta establecida, lo que representa un incremento del 14.14%. Dicho resultado indica que, en términos generales, las operaciones han alcanzado niveles de eficiencia superiores a los inicialmente proyectados.

Asimismo, el comportamiento mensual exhibe ciertas fluctuaciones en la productividad real. El mes con mayor índice es agosto (8.68 Ton/HHT), alcanzando un 15.73% por encima de lo programado, mientras que enero muestra la menor diferencia positiva (6.54%), aun así, por encima del objetivo.

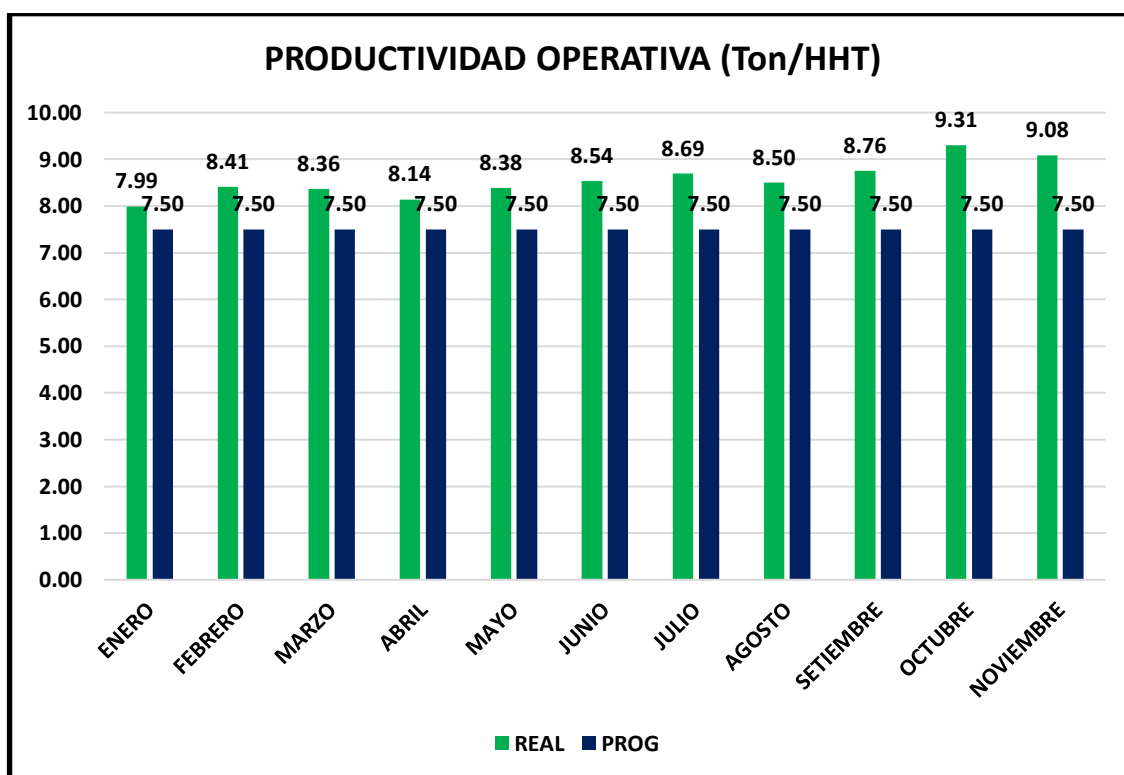


Figura 13. Productividad operativa (Ton/HHT), zona cuerpos 2024

IV. DISCUSION

4.1. Hipótesis general

Ha: La aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Ho: La aplicación del método de minado sublevel stoping NO influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Tabla 5.
Prueba de hipótesis general

	<i>PROGRAMADO</i>	<i>REAL</i>
Media	7.5	8.617191205
Varianza	0	0.124720561
Observaciones	10	10
Grados de libertad	9	
Estadístico t	-10.00364979	
P(T<=t) dos colas	0.023451156	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

En la tabla 5 se evidencia que la media real (8.617) supera de manera notable a la media programada (7.5). Al aplicar la prueba t, el valor del estadístico (-10.0036) y la probabilidad asociada ($p = 0.0235$) permiten rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, pues el valor absoluto del estadístico t es claramente mayor que el valor crítico (2.262). En otras palabras, existe evidencia estadísticamente significativa (al nivel del 5%) de que la media real difiere y, en este caso, excede de forma consistente la meta establecida.

Finalmente, considerando el procesamiento de datos, la prueba t y el p-valor que es menor a 0.05, se concluye que la aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

4.2. Hipótesis específica 1

Ha: La aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Ho: La aplicación del método de minado sublevel stoping NO influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Tabla 6.
Prueba de hipótesis específica 1

	<i>PROGRAMADO</i>	<i>REAL</i>
Media	1440	1547.071
Varianza	0	7332.583188
Observaciones	10	10
Grados de libertad	9	
Estadístico t	-3.95406095	
P(T<=t) dos colas	0.003334131	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

En la tabla 6, la comparación de las medias evidencia una diferencia notable entre el valor programado (1440) y el valor real (1547.071). Este resultado se corrobora con la prueba t, cuyo estadístico (-3.954) y probabilidad asociada ($p = 0.0033$) se encuentran por debajo del nivel de significancia comúnmente aceptado (5%). Dado que el valor absoluto del estadístico t supera al valor crítico (2.262), se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. En términos prácticos, ello significa que la media real es significativamente mayor que la media programada.

Finalmente, considerando el procesamiento de datos, la prueba t y el p-valor que es menor a 0.05, se concluye que la aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

4.3. Hipótesis específica 2

Ha: La aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Ho: La aplicación del método de minado sublevel stoping NO influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Tabla 7.
Prueba de hipótesis específica 2

	<i>PROGRAMADO</i>	<i>REAL</i>
Media	127500	130690.06
Varianza	6944444.444	29701623.49
Observaciones	10	10
Grados de libertad	9	
Estadístico t	-2.760125528	
P(T<=t) dos colas	0.022107619	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

En la tabla 7 se observa que la media de los valores reales (130,690.06) supera a la media programada (127,500). Esta diferencia se analiza mediante la prueba t, cuyo estadístico (-2.7601) y probabilidad asociada ($p = 0.0221$) indican que la diferencia entre ambas medias es estadísticamente significativa al 5%. Dado que el valor absoluto del estadístico t es mayor que el valor crítico (2.2622), se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluye que, en promedio, lo obtenido en la realidad difiere de manera apreciable de lo programado.

Finalmente, considerando el procesamiento de datos, la prueba t y el p-valor que es menor a 0.05, se concluye que la aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en las toneladas de mineras extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

4.4. Hipótesis específica 3

Ha: La aplicación del método de minado sublevel stoping SI influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Ho: La aplicación del método de minado sublevel stoping NO influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024

Tabla 8.
Prueba de hipótesis específica 2

	<i>PROGRAMADO</i>	<i>REAL</i>
Media	3.5	3.1735
Varianza	0	0.034311389
Observaciones	10	10
Grados de libertad	9	
Estadístico t	-1.573962422	
P(T<=t) dos colas	0.250345618	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

En la tabla 7 se observa que la media real (3.1735) es ligeramente menor que la meta programada (3.5). Sin embargo, el estadístico t obtenido (-1.5739) y la probabilidad asociada ($p = 0.2503$) indican que esta diferencia no es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 5%. Puesto que el valor absoluto del estadístico t (1.5739) es menor que el valor crítico (2.2622), se falla en rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, lo cual sugiere que la aparente diferencia podría deberse al azar o a variaciones normales de la operación.

Finalmente, considerando el procesamiento de datos, la prueba t y el p-valor que es mayor a 0.05, se concluye que la aplicación del método de minado sublevel stoping NO influye en las toneladas de mineras extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024.

V. CONCLUSIONES

- 1°. Con un $t=-10.00$ y $p=0.02<0.05$, se demuestra una influencia positiva en la productividad operativa a partir de la aplicación del método de minado sublevel stoping, como consecuencia de conseguir un promedio de 8.56 Ton/HHT mayor a los 7.50 Ton/HHT programado o una variación positiva de 14.14%, en la zona cuerpos, Alpayana 2024.
- 2°. Con un $t=-3.95$ y $p=0.00<0.05$, se demuestra una influencia positiva en los metros de avance lineal a partir de la aplicación del método de minado sublevel stoping, como consecuencia de conseguir 1005.26 metros más a los programado o una variación positiva de 105.97%, en la zona cuerpos, Alpayana 2024.
- 3°. Con un $t=-2.76$ y $p=0.00<0.05$, se demuestra una influencia positiva en las toneladas de mineras extraídas a partir de la aplicación del método de minado sublevel stoping, como consecuencia de conseguir 30 351.60 toneladas más a los programado o una variación positiva de 102.12%, en la zona cuerpos, Alpayana 2024.
- 4°. Con un $t=-1.57$ y $p=0.25>0.05$, se demuestra que no existe influencia en el rendimiento de perforación a partir de la aplicación del método de minado sublevel stoping, como consecuencia de conseguir un promedio de 3.15 metros/taladro menor los 3.50 metros/taladro programado o una variación máxima de 88.65%, en la zona cuerpos, Alpayana 2024.

VI. RECOMENDACIONES

- 1º.** Es vital que el personal operativo y de supervisión reciba capacitación especializada en el uso de tecnologías, metodologías de análisis y gestión de riesgos asociada al minado sublevel stoping.
- 2º.** Se debe incorporar sistemas de monitoreo en tiempo real, automatización de equipos y uso de software de planificación minera contribuye a optimizar la extracción y la seguridad operativa. La digitalización permite ajustar de forma dinámica los parámetros operativos, mejorar la comunicación entre las áreas de supervisión y control, y reducir el tiempo de respuesta ante contingencias, lo que en conjunto mejora la productividad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Castillo, “Implementación del método sublevel stoping con taladros largos para el incremento de la producción en el tajo 830E en la zona de profundización de la compañía Minera Bateas S.A.C. (Tesis de pregrado)”, Universidad Continental, Arequipa, 2020. Consultado: el 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8732>
- [2] V. Flores y M. Niemes, “Diseño del método de explotación de un cuerpo mineralizado en subniveles para conexión con frente de avance en el proyecto Minero Bosque de Oro (Tesis de Titulación en Ingeniería)”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2021. Consultado: el 22 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52304>
- [3] J. Anchiraico, “El método de minado sublevel stoping y la productividad en la Compañía Minera Quenuales - Unidad Isaycruz - 2020 (Tesis de Maestría)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021. Consultado: el 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7117>
- [4] J. Beltrán, “Análisis de la implementación del método de explotación sublevel stoping con taladros largos en la veta 11 para la mejora de la producción – U.E.A Manuelita de Compañía Minera Argentum S.A. (Tesis de pregrado)”, Universidad Continental, Huancayo, 2020. Consultado: el 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8421>

- [5] V. Silva, "Evaluación del método sublevel stoping para optimizar la producción en CIA. minera condestable S.A. (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2022. Consultado: el 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10853>
- [6] J. López y J. Ríos, "Propuesta de diseño de explotación subterránea en la mina polimetálica de la Sociedad Oro Inca, Santa Isabel-Azuay (Tesis de pregrado)", Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador, 2023. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13699>
- [7] D. Maldonado, "Propuesta de diseño de explotación subterránea para la extracción de oro en el área minera Patricia, El Guabo – El Oro (Tesis de pregrado)", Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador, 2022. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12378>
- [8] V. Flores y M. Niemes, "Diseño del método de explotación de un cuerpo mineralizado en subniveles para conexión con frente de avance en el proyecto Minero Bosque de Oro (Tesis de pregrado)", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2021. Consultado: el 20 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52304>
- [9] PennState College of Earth and Mineral Sciences, "Introduction to mining engineering", e-education. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.e->

education.psu.edu/mng230/node/904#:~:text=method,it%20will%20be%20drawn%20off

- [10] A. Mateo, E. Asencios, y B. Oré, “Aplicación Del Método Sublevel Stopping Con Relleno Cementado En Minera Colquisir”, 2020.
- [11] 911Metallurgist, “Sublevel Stopping in Small Mines”. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/blog/sublevel-stopping-small-mines/#:~:text=Since%20this%20is%20an%20open,but%20need%20not%20be%20hard>
- [12] W. Paucar, “Factores influyentes en la producción de la Minera Sierra Antapite 2021 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6938/T010_72951842_T.pdf?sequence=1#:~:text=Preparación%2C%20se%20considera%2C%20un%20Nivel,es%20la%20construcción%20de%20una
- [13] W. R. Alata TTito, “Implementación del método Sublevel Stopping con taladros largos para el minado del Tajo 012, Nv 18 Veta Ximena - Zona Oroya - Cia Minera Casapalca (Tesis de Titulación)”, Universidad Nacional de San Antonio de Abad, 2018. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4801/253T20190714_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] I. Jiménez y E. Rivera, “Ventajas Económicas de la Implementación del Método de Explotación Sublevel Stopping en Vetas Angostas frente al Método de Explotación Convencional de Corte y Relleno Ascendente en la

Zona Codiciada de la Mina Morococha”, Universidad Nacional de Trujillo, 2016.

- [15] I. Jiménez y J. Molina, “Propuesta de medición de la productividad en minería de oro vetiforme y reconocimiento de estándares productivos sostenibles”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 19, pp. 73–86, 2006, Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [Dialnet-PropuestaDeMedicionDeLaPropuestaDeMedicionDeLaProd-6434830.pdf](#)
- [16] A. Lala, M. Moyo, S. Rehbach, y R. Sellschop, “A new metric shows just how far mining productivity has declined. It also points to ways to improve productivity more effectively”, McKinsey & Company. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/productivity-in-mining-operations-reversing-the-downward-trend#/>
- [17] H. Bernaola, “Gestión de productividad en empresas de minería subterránea”, *gestiopolis*. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestiopolis.com/gestion-de-productividad-total-mineria-subterranea/#:~:text=Los%20doce%20principios%20de%20la,con%20costos%20unitarios%20bajos%20y>
- [18] G. Vallejo, “La rentabilidad como factor financiero para medir la eficiencia y productividad de los recursos invertidos en la IPS Los Ángeles de Ipiales periodo 2010-2012 (Tesis de Especialización)”, Universidad de Nariño, Colombia, 2013. Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sired.udenar.edu.co/1816/1/89613.pdf#:~:text=45%20La%20produ>

ctividad%20operativa%2C%20se,inmovilizaciones%20de%20dinero%20que%20la

- [19] E. Sánchez, “Planeamiento estratégico para la mejora de la productividad y competitividad subterránea en el Perú”, *Gestionar: revista de empresa y gobierno*, vol. 3, núm. 2, 2023, Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.35622/j.rg.2023.02.005>
- [20] E. Guerra-López y A. Montes de Oca-Risco, “Relación entre la productividad, el mantenimiento y el reemplazo del equipamiento minero en la gran minería”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 45, pp. 14–21, 2019, Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rbct.n45.68711>
- [21] K. Moreau, C. Laamanen, R. Bose, H. Shang, y J. Scott, “Life cycle assessment to demonstrate how automation improves the sustainability performance of an underground mining operation”, *Journal of Sustainable Mining*, vol. 19, 2020, Consultado: el 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1016>
- [22] F. Rowland, “Impacto de la capacitación en la productividad. Caso empresas chilenas del sector minería y sector alimentos”, *Journal of Management & Business Studies*, vol. 3, núm. 2, pp. 1–20, 2021, Consultado: el 12 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uautonoma.cl/index.php/jmabs/article/view/1630>
- [23] J. Fernández, “Gestión de operaciones y su relación con la productividad de la Minera Sierra Antapite 2023 (Tesis de Maestría en Gestión Minera)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2023. Consultado: el

- 11 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/97>
- [24] C. Cruz, S. Olivares, y M. Gonzáles, *Metodología de la investigación*. México D.F: Patria, 2014.
- [25] G. Baena, *Metodología de la Investigación*, 3era ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [26] R. Hernández, C. Fernández, y M. del P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 6ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2014. Consultado: el 14 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en:
https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- [27] M. Cortés Cortés y M. Iglesias León, *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Campeche, México: Unviersidad Autónoma del Carmen, 2004. Consultado: el 16 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en:
https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- [28] J. Hurtado, *Metodología de la Investigación Holística*, 3era ed. Caracas: Fundación Sypal, 2000.
- [29] C. Ocegueda, *Metodología de la Investigación: Métodos, técnicas y estructuración de trabajos académicos*, 2da ed. México D.F: ALBOX, 2015. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/330409452_Metodologia_de_la_Investigacion_Metodos_Tecnicas_y_estructuracion_de_trabajos_academicos

- [30] S. Carrasco, *Metodología de la Investigación*, 2da Edició. Lima: Editorial San Marcos, 2008.
- [31] J. Herrera, *Introducción a la minería subterránea*, vol. IV. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2020. Consultado: el 10 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/62726/1/>
- [32] E. Guerra López y A. Montas de Oca Risco, “Relación entre la productividad, el mantenimiento y el reemplazo del equipamiento minero en la gran minería”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 45, pp. 14–21, 2018, doi: <https://doi.org/10.15446/rbct.n45.68711>.

VIII. ANEXOS

Anexo N°1: Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TÉCNICA/INSTRUMENTO
<p>VARIABLE X:</p> <p>METODO DE MINADO SUBLEVEL STOPING</p>	<p>Se utilizar en los yacimientos de gran escala, con una pendiente moderada a vertical y con una excelente competencia del macizo rocoso, que se fundamenta en la formación de numerosos niveles horizontales, o subniveles, en el interior del cuerpo mineralizado, de los cuales se barrenan y perforan importantes cantidades de roca para su posterior extracción mediante maquinaria [31].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño del ciclo de minado • Diseño de labores mineras • Diseño de mallas de perforación 	<p>Técnica de la observación</p>
<p>VARIABLE Y:</p> <p>PRODUCTIVIDAD OPERATIVA</p>	<p>La productividad operativa, que mide la eficacia con la que se emplean los recursos disponibles para producir una determinada cantidad de producción, es una métrica crucial en la gestión de actividades industriales y extractivas como la minería. En términos generales, es la capacidad de una operación para aumentar la producción utilizando la menor cantidad posible de recursos (incluidos tiempo, dinero e insumos), preservando o mejorando la calidad y la seguridad del proceso. Al optimizar estas métricas, se puede aumentar la rentabilidad de la operación y minimizar los gastos y los efectos ambientales [32].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metros de avance lineal • Rendimiento de perforación • Toneladas extraídas 	<p>Técnica del fichaje y la observación</p>

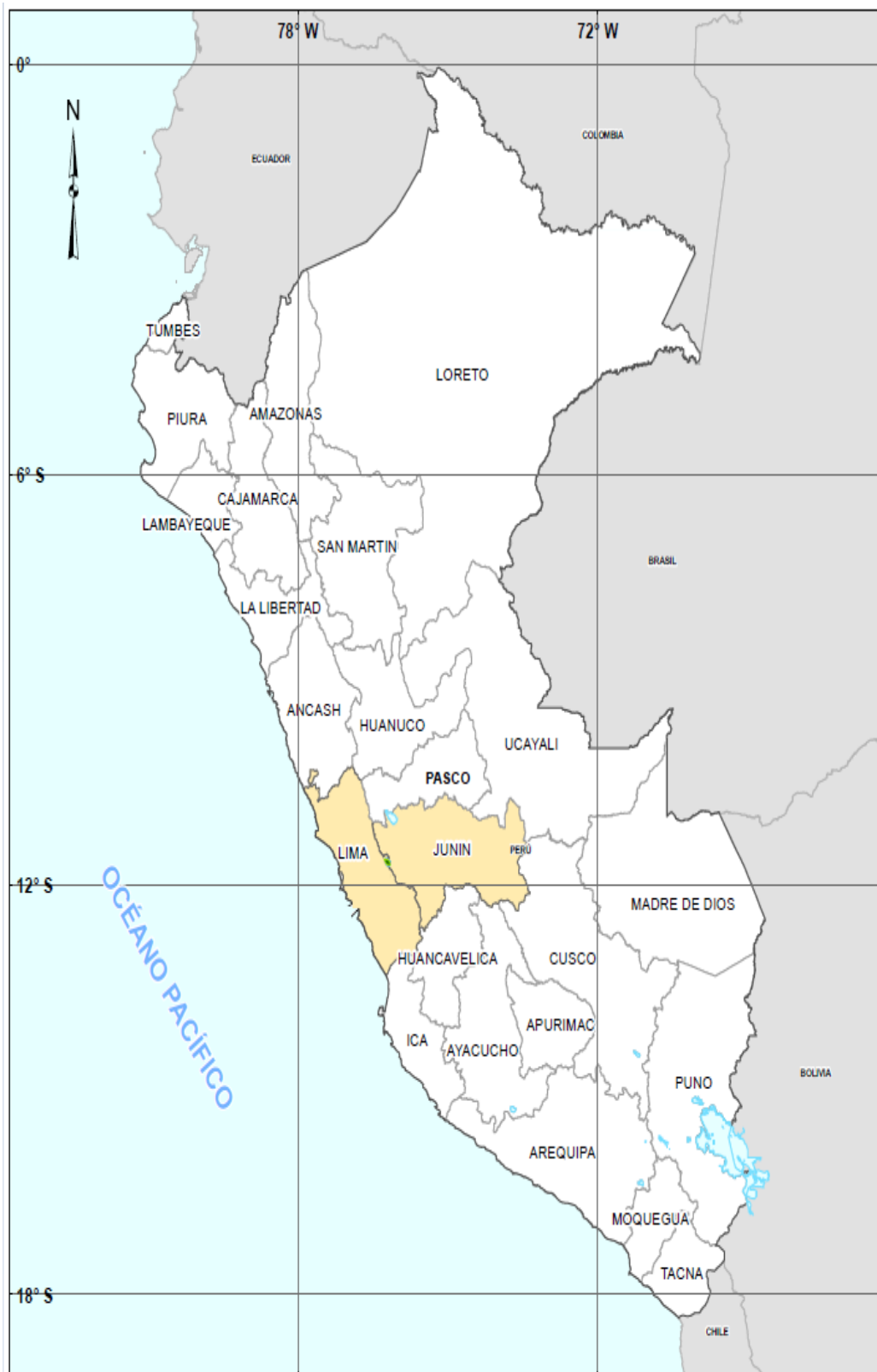
Anexo N° 2: Matriz de consistencia

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MINADO SUBLEVEL STOPING Y PRODUCTIVIDAD OPERATIVA EN ZONA CUERPOS – MINERA ALPAYANA 2024

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable X: METODO DE MINADO SUBLEVEL STOPING	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño del ciclo de minado • Diseño de labores mineras • Diseño de mallas de perforación 	Tipo: Aplicativa Nivel: Explicativa Diseño: Pre experimental – transversal Población: La población estará conformada por todas las zonas de explotación minera en la Unidad Operativa
¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?	Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024	La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en la productividad operativa en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Y: PRODUCTIVIDAD OPERATIVA	<ul style="list-style-type: none"> • Metros de avance lineal • Rendimiento de perforación • Toneladas extraídas 	
¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?	Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024	La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en los metros de avance lineal en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024 La aplicación del método de minado			

<p>¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en el rendimiento de perforación en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?</p> <p>¿De qué manera la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024?</p>	<p>Determinar que la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en el rendimiento de perforación en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024</p> <p>Determinar la aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024</p>	<p>sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024</p> <p>La aplicación del método de minado sublevel stoping influye en las toneladas extraídas en zona cuerpos – Minera Alpayana 2024</p>			<p>Americana, en el año 2024.</p> <p>Muestra: La investigación estará conformada por la Zona Cuerpos, Unidad Operativa Americana, en el año 2024.</p> <p>Técnicas: La observación y el fichaje</p>
---	---	--	--	--	--

Anexo N° 3: Ubicación



Anexo N° 4: Evaluación geomecánica

La empresa ALPAYANA S.A. (CASAPALCA), ha encargado a la empresa consultora Geomecánica Latina S.A. (GLSA) realizar la EVALUACIÓN GEOMECAÁNICA DEL MINADO EN LA ZONA DE PROFUNDIZACIÓN_ CUERPOS CASAPALCA-ESPERANZA (Evaluación) a través de la Orden de Servicio N°295-2017. Según los términos convenidos en la Orden de Servicio N°295-2017, la empresa Alpayana S.A, se compromete entre otros aspectos a proporcionar información técnica necesaria para desarrollar la evaluación, por su parte la empresa Geomecánica Latina asume realizar investigaciones geomecánicas complementarias de campo y laboratorio (registro geomecánico de labores subterráneas, registro geotécnicos de sondajes diamantinos, estudios petrográficos), evaluar los factores que influyen en la inestabilidad de las excavaciones subterráneas, realizar ensayos en campo y laboratorio, en gabinete procesar, analizar e interpretar la información técnica recopilada y finalmente elaborar el informe.

La empresa Geomecánica Latina S.A., ha desarrollado la Evaluación en dos etapas:

Etapa 1.- Investigaciones complementarias de campo en sectores de interés, para determinar las condiciones actuales que presenta la Mina respecto a factores que influyen en la estabilidad de la masa rocosa, identificar problemas de inestabilidad asociados a la calidad de roca y el método de explotación actual, establecer las necesidades de instrumentación geomecánica, realizar investigaciones petrográficas de laboratorio.

Etapa 2.- Realizar investigaciones de gabinete (revisión, proceso, análisis e interpretación de la información técnica proporcionada por Casapalca e información obtenida por Geomecánica Latina S.A.) y finalmente elaborar el informe titulado EVALUACIÓN GEOMECAÁNICA EL MINADO EN LA ZONA DE PROFUNDIZACIÓN_CUERPOS CASAPALCA-ESPERANZA.

La información técnica para desarrollo del informe se constituye de:

Información topográfica superficial y subterránea (fecha 15-01-2018, proporcionada por Alpayana), investigaciones de laboratorio (EMR), estudio de medición de esfuerzos, entre otras evaluaciones de interés.

Registro geomecánico en excavaciones subterráneas, registro geotécnico de sondajes diamantinos, ensayos de mecánica de rocas en campo utilizando “martillo de rebote, picota de geólogo, perfilómetro”, muestreo de rocas para ensayos de petrografía, interpretación de los ensayos de mecánica de rocas en laboratorio, “proceso, análisis e interpretación” de información obtenida en investigaciones de “campo, laboratorio y gabinete”.

La información técnica, ha sido “procesada, analizada e interpretada” para desarrollar los alcances solicitados por Alpayana S.A. El desarrollo, los resultados, las conclusiones y recomendaciones del informe se presentan líneas abajo.

Aspectos litológicos.- La explotación subterránea en la zona de Cuerpos y Vetas asociadas a cuerpos entre los Niveles 12 al 18 de la Mina Casapalca, se encuentra emplazada íntegramente en rocas sedimentarias caracterizadas por la predominancia de secuencias sedimentarias de ambiente continental representados por "areniscas calcáreas y calizas arenosas" de grano grueso a fino intercaladas con niveles finos de "margas y lutitas" afectadas por un intenso metasomatismo que nos permite definir a estas unidades litológicas en su conjunto como un “Skarn de Epidotas, Cuarzo, Calcita, Micas Blancas y esporádicamente granates" que estratigráficamente corresponden a la Formación Casapalca (Miembro Capas Rojas). Como estructuras de interés económico (mineralización) se tiene la presencia de “sulfuros masivos, sulfuros diseminados y vetillas” en menas de “Esfalerita, Bornita, Galena, Calcopirita, Tetraedrita, Galena, Tenantita” y como minerales accesorios “Cuarzo, Pirita, Calcita, Rodocrosita, Especularita y Hematita” emplazados en forma de Cuerpos (Casapalca y Esperanza, figura 2) y vetas asociadas a cuerpos “Esperanza Norte, Chiara, Vetas M”.

Distribución de discontinuidades estructurales. - Los datos estructurales considerados para el análisis estereográfico en el informe, constituyen la información estructural obtenida en los registros geomecánicos. El análisis estereográfico de diaclasas se ha realizado mediante proyección estereográfica equiangular, cuyos resultados muestran la presencia de tres sistemas principales de diaclasas principales en el área de interés, estos sistemas se han agrupado y jerarquizado en atención a su influencia en la inestabilidad estructuralmente controlada (S1, S2, S3). También se ha realizado el análisis estereográfico de distribución

de fallas a nivel compósito los cuales muestran la presencia de dos sistemas de fallas principales definidas como F1 y F2. Esta información obtenida sobre los sistemas principales de discontinuidades estructurales (fallas y diaclasas) es válida para evaluar la dirección conceptual del tensor de esfuerzos pre-minado y desarrollar el análisis de estabilidad estructuralmente (AEEC).

Clasificación geomecánica de la masa rocosa. - Los resultados de la clasificación geomecánica de la masa rocosa usando el sistema de "Clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski-1989, Modificado por Romana-2000 con adaptaciones de GLSA para fines del informe" indican la presencia de variados rangos en la calidad de rocas. Estas variaciones están asociadas al grado de fracturamiento, la influencia del agua en el deterioro de las propiedades resistentes (cohesión-fricción), los diversos grados de meteorización que afectan a las rocas y los tipos de alteración hidrotermal por metasomatismo presentes.

Zonificación geomecánica. - Para fines del Estudio la "zonificación geomecánica" consiste en discretizar la masa rocosa en dominios geomecánicos y asignar propiedades resistentes a cada dominio conceptualizado con la finalidad de elaborar un modelo geomecánico conceptual bajo ciertos "considerandos y limitaciones" que constituye la siempre escasa información de base.

Propiedades de resistencia.- La estimación de propiedades de resistencia en "roca intacta, discontinuidades y masa rocosa" en dominios geomecánicos, ha sido obtenida mediante el tratamiento estadístico de cálculos realizados aplicando criterios empíricos (Hoek & Brown: 2002-2006; Serafín & Pereyra: 1983, Karzulovic: 1999, Kalamaras-Bieniawski; Aydan-Ulusay-Kawamoto, Sen-Sadagh), ensayos de Mecánica Rocas (ensayos realizados en campo y laboratorio según procedimientos sugeridos por "ISRM" y Normas "ASTM").

Condiciones de agua subterránea. - Las condiciones de agua subterránea (seco, húmedo, mojado, goteo y flujo) en la masa rocosa, observadas durante investigaciones de campo son muy variables, por lo general están en función al nivel de explotación actual y la condición estructural que presenta la masa rocosa (permeabilidad inducida por el fracturamiento). En la fecha evaluada Setiembre 2017, las valoraciones respecto a condiciones de agua subterránea se pueden definir predominantemente como "húmedas,

mojadas y eventualmente presencia de zonas con goteo a flujo moderado de agua". Las condiciones más desfavorables del agua (goteo a flujo moderado) están asociadas a la presencia de zonas altamente permeables (fallas y zonas de corte).

En Mina Alpayana, se puede inferir conceptualmente que el agua subterránea está asociada a infiltraciones de los cuerpos de agua superficial a través de la permeabilidad "natural e inducida" que expone la masa rocosa. Dadas las características estructurales que exponen las rocas (fracturadas, muy fracturadas y porosas) éstas se tipifican como medios permeables (acuíferos) por donde el agua superficial se infiltra y migra hacia niveles más profundos de la Mina. El efecto negativo del agua es que influye en el deterioro de las propiedades resistentes de la masa rocosa y el deterioro de los elementos de sostenimiento instalados, siendo las unidades litológicas más afectadas las que están en contacto o en zonas adyacentes a "fallas y zonas de corte", la estructura mineralizada, por su condición de ligeramente fracturada, muy fracturadas, intensamente fracturadas, alteradas y zonas de corte).

A escala local (Zona de Cuerpos Nv.12 al Nv.18) se puede inferir que el nivel freático y/o en su defecto los caudales de drenajes en dichas zonas no son significativas o están drenadas por túneles adyacentes (Túnel Graton); sin embargo debemos resaltar que en superficie sobre el nivel de explotación actual existe una amplia distribución de suelos hidromórficos (bofedales y cuerpos de agua superficiales, lagunas posiblemente asociados a acuíferos no confinados, cuya evaluación no está en los alcances del informe), por las características permeables de las rocas, se infiltran e influyen en la inestabilidad de las excavaciones subterráneas en algunos sectores. Definitivamente para poder "contrastar, negar y/o validar" estas hipótesis conceptuales es necesario consultar con la información existente en evaluaciones hidrogeológicas.

Estado tensional. - El conocimiento de la "magnitud y dirección" de los esfuerzos naturales e inducidos, es una componente esencial en el diseño subterráneo. Para fines del informe sobre la base de mediciones de esfuerzos in-situ mediante técnicas de OverCoring realizados por Geomecánica Latina S.A. en Casapalca e hipótesis del comportamiento Tectónico Andino en el contexto regional, utilizando los criterios de "Sheorey 1994 y criterio de fallas conjugadas" se estima la constante de transmisión de esfuerzos (K) y la

orientación del tensor de esfuerzos in-situ (pre-minado) que constituyen información válida para fines del informe.

Análisis de estabilidad debido a esfuerzos – AEDE.

Identificación del modelo de inestabilidad estructuralmente controlada. - En base a información obtenida del análisis estereográfico de datos estructurales, en el área de interés se prevé que los modelos de inestabilidad asociados al control estructural en las excavaciones subterráneas de Mina Casapalca serán desprendimientos del tipo “Cuñas y Lajamientos”.

Análisis de estabilidad.- Los resultados del análisis de estabilidad (debido a esfuerzos y estabilidad estructuralmente controlada) advierten que los procesos de inestabilización expresados a modo de “desprendimiento de cuñas, strainburst, spalling, swelling, squeezing, disking” están asociados a factores naturales (influencia del agua, control estructural, grado de meteorización y alteraciones hidrotermales) y factores inducidos por la operación minera (sobredimensionamiento de excavaciones, falta de relleno, debilitamiento estructural de puentes y pilares por sobre rotura, secuenciamiento de minado desfavorable, no confinamiento de espacios abiertos usando rellenos adecuados, aplicación incorrecta de los elementos de sostenimiento, etc.).

Instrumentación geomecánica. - La evaluación de instrumentación geomecánica actual en Mina Casapalca es coherente con las necesidades, adicionalmente a esta se sugiere implementar alguna instrumentación complementaria a la existente para una gestión integral de los aspectos inherentes a la Geomecánica en la Mina.

3.2.1. Conclusiones

En base a resultados de las investigaciones geomecánicas con fines de EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MINADO EN LA ZONA DE PROFUNDIZACIÓN_CUERPOS CASAPALCA-ESPERANZA, se concluye:

El análisis estereográfico de datos estructurales (fallas, diaclasas), indica un marcado control estructural de la mineralización y afecta considerablemente a la estabilidad de las excavaciones subterráneas, cuando estas excavaciones se ejecutan “longitudinal y

transversalmente al rumbo de las estructuras” induciendo inestabilidades en el borde de excavaciones.

Las masas rocosas evaluadas presentan un amplio rango de calidades de roca, según la escala de valoración RMR89 de Bieniawski-1989 modificada por Manuel Romana-2000, con adaptaciones realizadas por Geomecánica Latina S.A., para fines del informe. Los resultados tipifican calidades de masa rocosa a nivel de dominios geomecánicos “Buena, Regular” y puntualmente “Rocas Malas” asociadas a fallas y zonas de corte.

La estimación conceptual del estado tensional en la masa rocosa para fines del informe ha sido desarrollada mediante aplicación de los criterios de “Sheorey, fallas conjugadas” y tendencias de investigaciones regionales del comportamiento tectónico andino en el Perú”.

La influencia del agua subterránea en el deterioro de la calidad de masa rocosa, se muestra en los procesos de inestabilización de las excavaciones con el paso del tiempo, esto se debe a la disminución progresiva de las propiedades de resistencia (cohesión y fricción) y degradación de la estructura interna de las rocas, que se evidencian en la presencia de distintos grados de meteorización que exponen las masas rocosas más próximas a la superficie (zona alta) y disminuyen en la profundización (zona intermedia y baja).

El método de explotación actual es mixto, una variante del método “Taladros largos, Cámaras & Pilares, Corte & Relleno Ascendente” de bajo costo, en el corto plazo aparentemente favorables.

El dimensionamiento de excavaciones (tajeos) y estructuras naturales (puentes y pilares) en roca, realizados mediante aproximaciones empíricas muestran factores de seguridad estables según los criterios de diseño. Es importante señalar que estos resultados determinan geometrías de “excavaciones y estructuras en roca” para determinadas condiciones (calidad de roca, propiedades resistentes, magnitud de esfuerzos principales, orientación de los ejes de excavaciones, profundidad debajo de la superficie topográfica) y no consideran la interacción del sostenimiento. En este sentido es necesario indicar que las dimensiones obtenidas para “Tajeos, Puentes y Pilares” deben considerar la aplicación

del Estándar de Sostenimiento elaborado para Mina Casapalca (Anexo 8: Misceláneos /Cartilla Geomecánica, Cartilla de Sostenimiento).

Los resultados del análisis de estabilidad a nivel local (análisis de estabilidad estructuralmente controlada, AEEC), indican que el uso de elementos de sostenimiento como “refuerzo y/o soporte de rocas” (pernos, shotcrete, cable bolting, etc.) mejora considerablemente el factor de seguridad en cuñas potencialmente inestables definidas en función a la orientación de excavaciones (Diseño Longitudinal y Transversal al rumbo de las estructuras) y modelo estructural.

Los resultados del análisis de estabilidad a nivel global (análisis de estabilidad debido a esfuerzos – AEDE), donde se ha simulado la explotación mediante aplicación del método mixto (Taladros largos, Cámaras & Pilares, Corte & Relleno Ascendente) para la explotación longitudinal al rumbo de los Cuerpos con potencias mayores a 10 metros, los tajeos son rellenados usando rellenos “detríticos e hidráulico y/o rellenos mixtos”, es una alternativa favorable desde el punto de vista de optimización y estabilidad física a largo plazo. El método Mixto (Taladros largos, Corte & Relleno Ascendente) para explotación en dirección longitudinal al rumbo de las estructuras con potencias menores a 10 metros. El secuenciamiento de minado para condiciones representativas del yacimiento en base a la profundidad debajo de la superficie topográfica, la configuración de magnitud de esfuerzos principales pre-minado y aplicación de rellenos granulares (estructural y detrítico) en distintas formas (excavaciones sin relleno, con relleno parcial y con relleno total), advierten la presencia de zonas potencialmente inestables con factores de seguridad (Resistencia/ Esfuerzo máximo inducido) entre “0.36-1.1” cuyas trayectorias de esfuerzos principales y vectores de deformación muestran concentración de esfuerzos en puentes y convergencia en excavaciones abiertas. Esto es debido a características geomecánicas que presenta la masa rocosa. En el corto plazo se esperan condiciones estables mediante aplicación del sostenimiento estándar y el confinamiento total de tajeos con relleno detrítico, a mediano y largo plazo se espera que existan escenarios de inestabilización especialmente en zonas con excavaciones abiertas sin rellenos.

Las potenciales zonas de inestabilidad en la Mina Alpayana, deducidas como resultados del análisis de estabilidad están asociadas a factores naturales (influencia del agua, control

estructural, alteraciones que exponen los dominios geomecánicos, esfuerzos naturales) y factores inducidos por la operación minera (tajeos sin relleno, tajeos con relleno parcial, tiempo de exposición de tajeos abiertos sin sostenimiento mostrados como deterioro de la estructura rocosa en puentes mineralizados).

Según apreciaciones In-Situ, la masa rocosa que involucra el minado actual presenta características de “roca masiva, rígida y altos esfuerzos tectónicos” en algunos sectores (20-30%) para la ocurrencia del estallido de rocas en los niveles evaluados, se puede ver evidencias de estos fenómenos (Strainburst, Spalling, Squeezing, Discking, Swelling) en la zona de interés.

Los resultados de evaluación del sostenimiento actual en Mina Alpayana, indican la necesidad de implementar un Estándar de Sostenimiento, acordes a las disposiciones y recomendaciones sobre sostenimiento de excavaciones subterráneas dadas en el D.S.024-2016 y modificatorias dadas en el D.S.023-2017 (estandarización del código de colores asignados en función a las calidades de roca, definiciones de labor temporal-permanente, dimensiones de sostenimiento en función a dimensiones de excavaciones, etc.).

Según inspecciones visuales realizadas en la superficie del terreno en sectores próximos a la explotación de los niveles superiores, no se observan rasgos físicos de procesos de subsidencia, no hay instrumentación instalada que permita “advertir y/o descartar” la ocurrencia de estos procesos de inestabilización.

De las conclusiones del informe EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MINADO EN LA ZONA DE PROFUNDIZACIÓN_CUERPOS CASAPALCA-ESPERANZA, se recomienda:

Revisar estándares y procedimientos para aplicación de los distintos elementos de sostenimiento (incluye el relleno), sostenimiento en función a la calidad de roca, tiempo de vida útil (temporal-permanente) y controles de calidad según disposiciones dadas en D.S.024-2016 y modificatorias dadas en el D.S.023-2017.

Estandarización del método de explotación actual, para su aplicación en determinados escenarios (minado longitudinal y transversal). Esto con la finalidad de establecer alturas máximas de excavación en función a las variantes del método, dimensiones de sostenimiento en función al ancho-altura de las excavaciones, restricciones para el

desatado manual (máximo hasta 4.0 metros de altura), tipo de relleno a aplicar (Detrítico, Hidráulico, Mixto), según disposiciones dadas en el D.S.024-2016 y modificatorias dadas en el D.S.023-2017.

Considerar las conclusiones y recomendaciones dadas en el estudio hidrogeológico y del sistema de drenajes (el cual entre otros aspectos debe incluir controles de sedimentación, impermeabilización de estaciones de bombeo) para proyectar el caudal de agua de bombeo-drenaje, tratamiento y disposición final.

Establecer las restricciones de velocidad pico de partícula crítico en la voladura de rocas, deducidas de los estudios de microsismicidad.

Evaluar las propiedades geotécnicas de los rellenos detrítico, hidráulico y rellenos mixtos (detrítico+hidráulico) que permita seleccionar un relleno adecuado a las características del Minado actual en Alpayana.

Considerando la profundidad actual de la Mina Casapalca (Nv. 18), características de la masa rocosa (rocas moderadamente rígidas, ligeramente fracturadas, fracturadas a muy fracturadas en sectores puntuales, módulos elásticos intermedios en litologías predominantes), es de esperarse que hasta el Nivel 19 persistan dichas condiciones naturales en las masas rocosas; sin embargo será siempre necesario realizar evaluaciones geomecánicas para ajustar el modelo geomecánico conceptual de Mina Casapalca.

En toda excavación subterránea realizada en masas rocosas fracturadas existen bloques potencialmente inestables (inclusive en rocas muy buenas), considerando el método de excavación (perforación-voladura) empleado en Mina Casapalca, la inestabilidad asociada al control estructural se muestra como desplazamientos excesivos y pérdida de propiedades de resistencia en bloques de roca (cuñas) cuya geometría está definida por la intersección de las estructuras (diaclasas-fallas) con el eje de las excavaciones subterráneas. La estabilización de estos bloques de roca se logra mediante aplicación del sostenimiento estándar (considerar que el sostenimiento debe realizarse conforme al avance, para minimizar los riesgos de desprendimientos de rocas).

Es necesario evaluar la necesidad de realizar algunas adquisiciones de instrumentación e implementar rutinas de monitoreo e instrumentación geomecánica complementarias a las

existentes en Mina Casapalca (ver capítulo 8), ejecutar siempre el programa de mantenimiento del sostenimiento instalado para garantizar la calidad del sostenimiento y control de estabilidad local a nivel de excavaciones subterráneas en la Mina, en ese sentido DESCARTAMOS TODA INSTRUMENTACIÓN SOFISTICADA (MONITOREO MICROSÍSMICO, TELEMETRÍA POR LO MENOS HASTA EL NIVEL EVALUADO) puesto que el “simple registro, observación e interpretación” de información que se pueda obtener de la “medición-monitoreo”, controles de calidad y cambios sugeridos en este informe serán suficientes para conocer el comportamiento de la masa rocosa, tomar las decisiones oportunas y garantizar la estabilidad durante las operaciones en Mina Casapalca, claro está SIEMPRE Y CUANDO SE REALICEN BUENAS PRÁCTICAS DE MINADO (configurar puentes, pilares corona, escudos, rellenar los espacios abiertos en interior mina, sostenimiento oportuno en función al Estándar Geomecánico, Monitoreo de vibraciones inducidas por voladuras, secuenciamiento adecuado de la explotación, etc.).

Respecto al control geomecánico del sostenimiento, se recomienda un mayor control de la supervisión de operaciones, específicamente en cumplir y hacer cumplir las disposiciones del Departamento de Geomecánica-Mina Casapalca respecto a la aplicación del sostenimiento en labores “temporales y permanentes”, cuyos beneficios “directos e indirectos” son cumplir con el diseño proyectado, seguimiento de la variabilidad en la calidad de roca para redefinir y calibrar el sostenimiento de las excavaciones oportunamente, optimizar el diseño de excavaciones, minimizar el daño por voladuras, anticipar calidad del macizo rocoso, anticipar el sostenimiento, avalar modificaciones a la geometría de las excavaciones, retroalimentar la información geomecánica para obtener diseños más aproximados como parte de los procesos de mejora continua en Mina Casapalca.

En el mediano y largo plazo de ser favorables los programas de exploración en la profundización de los cuerpos, se debe realizar una reinterpretación del método de explotación actual, así como evaluar la aplicación de rellenos estructurales para optimizar la altura de los puentes (reducir), maximizar la recuperación, controlar la dilución, confinar los espacios abiertos y procurar una redistribución adecuada de los esfuerzos que garantice la estabilidad global de la Mina.

