

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Evaluación de la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada
en minería subterránea: mejora de la eficiencia de avance y
reducción de la sobrerotura**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Raúl César Quispe Gonzales

 [0009-0007-1886-9467](https://orcid.org/0009-0007-1886-9467)

Asesor

MBA. Henry Mamfredo Zambrana Flores

 [0000-0001-9019-191X](https://orcid.org/0000-0001-9019-191X)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Quispe Gonzales [1]
Referencia/Reference	[1] R. Quispe Gonzales, " <i>Evaluación de la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada en minería subterránea: mejora de la eficiencia de avance y reducción de la sobrerotura</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Quispe, 2025)
Referencia/Reference	Quispe, R. (2025). <i>Evaluación de la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada en minería subterránea: mejora de la eficiencia de avance y reducción de la sobrerotura</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación, con profundo amor y gratitud, a mi familia, especialmente a mis padres, quienes han sido mi pilar, mi guía y mi mayor fuente de inspiración a lo largo de este camino. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar esta meta. También lo dedico al amor de mi vida, Yesenia, por estar a mi lado, por su compañía constante y por motivarme cada día a ser una mejor versión de mí mismo.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme la formación académica, los recursos y el entorno necesario para desarrollar mis capacidades profesionales. Cada etapa vivida en esta institución ha sido fundamental para mi crecimiento personal y académico.

A mis compañeros de estudio, gracias por compartir conmigo este camino lleno de desafíos, aprendizajes y momentos inolvidables. Su apoyo, colaboración y amistad han sido pilares importantes durante mi formación.

A mis compañeros de trabajo, por su constante respaldo, comprensión y por permitirme aplicar y enriquecer mis conocimientos en el ámbito profesional. Su experiencia y compromiso han sido una fuente de inspiración en mi desarrollo como ingeniero.

Resumen

La presente investigación tendrá como objetivo evaluar el desempeño técnico y económico del uso de emulsión a granel no sensibilizada, aplicada mediante carguío mecanizado, en comparación con la emulsión encartuchada tradicional utilizada en minería subterránea. La investigación se desarrollará en la Veta Santa Rosa, dentro de los niveles 4100 y 4450, donde se ejecutarán voladuras controladas con ambas tecnologías bajo condiciones operativas equivalentes de geología, ventilación y geometría de labor.

El estudio se centrará en el análisis de tres indicadores principales: eficiencia de avance, sobrerotura y costo operativo unitario, los cuales serán registrados en campo y procesados en hojas de cálculo y software estadístico Minitab. Los resultados demostrarán que la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada incrementará la eficiencia de avance en aproximadamente 9.4 %, reducirá la sobrerotura en 37.6 % y disminuirá los costos operativos en 6.4 %, en comparación con la emulsión encartuchada.

Adicionalmente, el análisis económico mediante el Valor Actual de Costos (VAC) evidenciará un ahorro acumulado equivalente al 11 % en valor presente, confirmando la viabilidad financiera del cambio tecnológico. Desde el punto de vista operativo, el uso de emulsión a granel mejorará la seguridad del personal, al eliminar la manipulación directa de explosivos sensibilizados y reducir la exposición a gases postvoladura.

En conclusión, la emulsión a granel no sensibilizada constituirá una alternativa tecnológicamente eficiente, segura y económicamente rentable para la minería subterránea moderna, al optimizar el proceso de voladura y contribuir a la sostenibilidad de la operación minera.

Palabras clave — Emulsión a granel, emulsión encartuchada, voladura subterránea, sobrerotura, eficiencia operativa, costo unitario.

Abstract

This research will aim to evaluate the technical and economic performance of unsensitized bulk emulsion, applied through mechanized charging, compared to traditional cartridged emulsion used in underground mining. The study will be carried out at the Santa Rosa Vein, within levels 4100 and 4450, where controlled blast tests will be performed using both technologies under equivalent operating conditions of geology, ventilation, and tunnel geometry.

The analysis will focus on three key indicators: advance efficiency, overbreak, and unit operating cost, which will be recorded in the field and processed using spreadsheets and Minitab statistical software. The results will show that the use of unsensitized bulk emulsion will increase advance efficiency by approximately 9.4%, will reduce overbreak by 37.6%, and will decrease unit operating costs by 6.4%, compared to cartridged emulsion.

Additionally, the economic evaluation based on the Present Value of Costs (PVC) will indicate an accumulated savings of around 11%, confirming the financial feasibility of adopting this technology. From an operational standpoint, the use of bulk emulsion will improve safety conditions by eliminating direct handling of sensitized explosives and reducing exposure to post-blast gases.

In conclusion, the use of unsensitized bulk emulsion will represent a technically efficient, safe, and economically profitable alternative for modern underground mining operations, optimizing the blasting process and contributing to sustainable productivity.

Keywords — Bulk emulsion, cartridged emulsion, underground blasting, overbreak, operational efficiency, unit cost.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis	4
1.4.1 Hipótesis general	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Operacionalización de variables.....	4
1.5.1 Variable independiente (V.I).....	4
1.6 Antecedentes referenciales	6
1.6.1 Antecedentes internacionales	6
1.6.2 Antecedentes nacionales	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	9
2.1 Marco teórico	9
2.1.1 Fundamentos de la voladura en minería subterránea.....	9
2.1.2 Voladura en minería subterránea	9
2.1.3 Agentes de voladura	11
2.1.4 Carguío mecanizado	13
2.1.5 Control de sobrerotura	14
2.1.6 Indicadores de eficiencia de avance.....	14
2.2 Marco conceptual.....	15

2.2.1	Carguío	15
2.2.2	Eficiencia.....	15
2.2.3	Emulsión	15
2.2.4	Fragmentación	15
2.2.5	Seguridad.....	15
2.2.6	Sobrerotura	15
2.2.7	Voladura.....	15
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		16
3.1	Recolección de datos	16
3.1.1	Unidad de estudio	16
3.1.2	Geología regional.....	19
3.1.3	Diseño metodológico y enfoque	28
3.1.4	Variables y parámetros registrados	28
3.1.5	Fuentes y técnicas de recolección.....	29
3.1.6	Condiciones geométricas y parámetros de perforación	29
3.2	Procesamiento de información	30
3.2.1	Datos de proyección operativa del ciclo de voladura	30
3.2.2	Organización y consolidación de datos	33
3.2.3	Cálculo de indicadores técnicos	33
3.2.4	Agrupación y depuración de resultados.....	37
3.2.5	Herramientas y procedimientos de análisis	37
3.2.6	Elaboración de cuadros de resumen	38
3.2.7	Evaluación económica y valor actual de costos (VAC)	38
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		42
4.1	Análisis de la eficiencia de avance	42
4.2	Análisis del control de sobrerotura	43
4.3	Análisis de costos operativos	43
4.4	Interacción entre eficiencia, sobrerotura y costos operativos.....	47

4.5 Prueba de hipótesis.....	48
Conclusiones	51
Recomendaciones	53
Referencias bibliográficas	54
Anexos	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 : Variables y parámetros registrados.....	28
Tabla 3 : Condiciones geométricas y parámetros de perforación por labor	30
Tabla 4 : Disparos realizados con emulsión encartuchada (E).....	31
Tabla 5 : Disparos realizados con emulsión a granel no sensibilizada (EB)	32
Tabla 6 : Comparativo de costos - Subnivel (EB).....	36
Tabla 7 : Comparativo de costos – Cámara Acceso (EB)	36
Tabla 8 : Comparativo de costos - Rampa (EB)	37
Tabla 9 : Beneficio en metros de avance	38
Tabla 10: Plan mensual de avances proyectados	39
Tabla 11: Resultados del VAC	41
Tabla 12: Beneficio en metros de avance	42
Tabla 13: Relación funcional entre indicadores técnicos y económicos	47

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Mapa de ubicación y ruta al proyecto minero	18
Figura 2 : Mapa metalogenético local	19
Figura 3 : Mapa de geología regional.....	20
Figura 4 : Columna estratigráfica	22
Figura 5 : Eficiencia de avance en rampas	34
Figura 6 : Eficiencia de avance en cámaras.....	34
Figura 7 : Análisis de sobrerotura en rampas.....	35
Figura 8 : Análisis de sobrerotura en cámaras	35
Figura 9 : Costo operativo total por tipo de labor (E vs EB).....	45
Figura 10: Distribución porcentual del ahorro por actividad y tipo de labor.....	46
Figura 11: Histograma de avance real al 95% de confianza.....	49
Figura 12: Prueba t de una muestra – Avance real (m).....	49
Figura 13: Histograma de sobrerotura al 95% de confianza.....	50
Figura 14: Prueba t de una muestra – Sobrerotura (%).....	50

Glosario de términos

ANFO: Ammonium Nitrate Fuel Oil (Nitrato de amonio y combustible diésel):

Mezcla explosiva tradicional utilizada en minería, de bajo costo y limitada resistencia al agua.

BE: Emulsión a granel no sensibilizada (Bulk Emulsion):

Tipo de explosivo bombeable que se sensibiliza in situ, permitiendo una carga continua y segura.

CAD: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora):

Software utilizado para modelar y calcular los patrones de perforación y voladura.

C_o: Costo operativo unitario:

Indicador económico que expresa el costo total por metro de avance excavado (US\$/m).

EA: Eficiencia de avance:

Relación entre la longitud excavada y el tiempo total de ejecución del ciclo (m/ciclo o m/mes).

EB: Emulsión a granel no sensibilizada:

Explosivo bombeable aplicado mecánicamente, que mejora la uniformidad del carguío y reduce la exposición del personal.

E: Emulsión encartuchada:

Explosivo de uso convencional presentado en cartuchos o tubos plásticos, cargado manualmente en los taladros.

FA: Factor de carga:

Cantidad de explosivo utilizada por metro cúbico de roca excavada (kg/m³).

FP: Factor de perforación:

Cantidad de metros perforados requeridos para alcanzar un metro lineal de avance.

HS: High Sulphidation (Alta sulfuración):

Tipo de mineralización asociada a sistemas hidrotermales de alta temperatura.

LS: Low Sulphidation (Baja sulfuración):

Tipo de mineralización hidrotermal de menor temperatura, frecuente en vetas epitermales.

m³: Metro cúbico:

Unidad de medida de volumen utilizada para cuantificar el material excavado o la roca volada.

Minitab:

Software estadístico utilizado para realizar análisis de varianza, pruebas t y validación de hipótesis.

PF: Perforación y voladura:

Etapa del ciclo de minado en la que se realiza la fragmentación controlada del macizo rocoso mediante explosivos.

S (%): Sobrerotura:

Exceso de excavación respecto al contorno teórico del diseño de la labor, expresado en porcentaje.

SSEE: Sistema de Sostenimiento y Estabilidad de Excavaciones:

Conjunto de medidas que aseguran la integridad estructural de las labores mineras.

SSO: Seguridad y Salud Ocupacional:

Disciplina que establece los procedimientos para prevenir accidentes y enfermedades ocupacionales.

t: Tiempo de ciclo:

Duración total del proceso de perforación, carguío, ventilación y limpieza.

VAC: Valor Actual de Costos:

Indicador económico que calcula el valor presente de los costos proyectados de operación, considerando una tasa de descuento.

VAN: Valor Actual Neto:

Indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de proyectos, calculado como la diferencia entre beneficios y costos descontados

Introducción

La minería subterránea moderna enfrentará el desafío constante de incrementar la eficiencia productiva y mantener elevados estándares de seguridad operacional, especialmente en las etapas de perforación y voladura, donde se concentra gran parte del costo y del riesgo de las operaciones. En este contexto, el proceso de voladura adquiere una relevancia estratégica, pues su correcta ejecución influirá directamente en el avance de las labores, la estabilidad de las excavaciones y los costos globales del ciclo minero.

Tradicionalmente, muchas operaciones subterráneas continuarán utilizando emulsión encartuchada, cuyo proceso de carguío es manual, discontinuo y con mayor exposición del personal a riesgos asociados a la manipulación de explosivos. Este método, aunque probado y de bajo requerimiento tecnológico, limitará la velocidad de operación y el control del contorno, generando mayores niveles de sobrerotura y costos de sostenimiento. Frente a ello, la emulsión a granel no sensibilizada, aplicada mediante sistemas de carguío mecanizado, representará una alternativa tecnológica avanzada, que permitirá reducir la intervención directa del trabajador, optimizar la dosificación del explosivo y asegurar una carga continua y homogénea en los taladros.

El presente trabajo de investigación se enfocará en comparar el desempeño técnico y económico entre ambos métodos de aplicación de emulsión, evaluando su impacto en la eficiencia de avance, el control de sobrerotura y los costos operativos unitarios bajo condiciones reales de mina. La investigación buscará demostrar que la adopción de emulsión a granel no sensibilizada contribuirá a mejorar la productividad y la rentabilidad, sin comprometer la seguridad del proceso ni la estabilidad geomecánica de las labores.

La tesis se estructura en cuatro capítulos principales, organizados de forma secuencial para brindar una comprensión integral del problema, el marco conceptual, la metodología aplicada y los resultados obtenidos:

Capítulo I corresponde a la parte introductoria, donde se presentan las generalidades de la minería subterránea y el proceso de voladura, describiendo el problema de investigación asociado a la limitación operativa del uso de emulsión encartuchada. Se formulan los objetivos general y específicos, así como las hipótesis de trabajo, que plantean que la emulsión a granel no sensibilizada incrementará la eficiencia de avance y reducirá la sobrerotura en comparación con la emulsión encartuchada. Finalmente, se desarrollan los antecedentes nacionales e internacionales que sustentan el marco referencial del estudio.

Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, abordando los fundamentos técnicos de la perforación y voladura en minería subterránea, los principios de funcionamiento de las emulsiones explosivas y las diferencias entre emulsión encartuchada y emulsión a granel no sensibilizada. Se incluyen los conceptos de carguío mecanizado, control de sobrerotura y eficiencia de avance, que servirán de base para la interpretación de los resultados.

Capítulo III presenta el desarrollo del trabajo de investigación, detallando la unidad de estudio, las características geológicas del área, el diseño metodológico y la recolección de datos (3.1) obtenidos de disparos controlados en la Veta Santa Rosa. Asimismo, describirá el procesamiento de la información (3.2) y el cálculo de los indicadores técnicos (eficiencia de avance, sobrerotura y costo operativo unitario). Finalmente, el capítulo incorporará la evaluación económica, incluyendo el cálculo del Valor Actual de Costos (VAC) sobre el plan de avances, con sus supuestos, flujos y resultados comparativos entre emulsión encartuchada y emulsión a granel no sensibilizada.

Capítulo IV expondrá el análisis y discusión de resultados, comparando ambas tecnologías en términos de eficiencia de avance, sobrerotura y costos operativos unitarios, con cuadros y gráficos que evidencien las diferencias observadas. Sobre esa base, se realizará la validación estadística de las hipótesis mediante pruebas de significancia en Minitab (nivel de confianza 95%), confirmando si las mejoras técnicas registradas son estadísticamente significativas. El capítulo cerrará con la interpretación crítica de los

hallazgos y su implicancia operativa, tomando como referencia los resultados económicos ya consolidados en el Capítulo III.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En la minería subterránea, la voladura constituye una etapa fundamental dentro del ciclo de minado, siendo el método más utilizado para el rompimiento y fragmentación del macizo rocoso con el propósito de habilitar frentes de avance, accesos y cámaras de explotación. Este proceso requiere una planificación técnica minuciosa, que abarca el diseño del patrón de perforación, la selección del tipo de explosivo, la secuencia de iniciación y la logística del carguío, buscando lograr una fragmentación uniforme, un perfil estable y una operación segura.

Históricamente, la mayoría de minas subterráneas peruanas han empleado emulsiones encartuchadas y ANFO como agentes de voladura, los cuales son cargados manualmente en los taladros mediante el uso de cartuchos y accesorios convencionales. Si bien estos sistemas han sido efectivos durante décadas, presentan limitaciones importantes en cuanto a seguridad, continuidad operativa y control del diseño, debido a la exposición directa del personal a materiales explosivos activos, la variabilidad en la carga y los tiempos muertos asociados al proceso manual de preparación y encendido.

Con el avance de la tecnología aplicada a la minería, han surgido alternativas más seguras y eficientes, entre ellas la emulsión a granel no sensibilizada, la cual se bombea directamente desde equipos especializados hacia los taladros, eliminando la manipulación directa del explosivo y mejorando la homogeneidad de la carga. Esta tecnología permite realizar el carguío mecanizado de los frentes de voladura, reduciendo los tiempos de preparación y optimizando el aprovechamiento energético del explosivo dentro del macizo.

Además, el uso de emulsiones a granel favorece un mayor control operativo gracias a la posibilidad de ajustar el factor de carga, la densidad y la longitud de columna en función del diseño técnico del frente. En términos de seguridad, su condición no sensibilizada durante el transporte y almacenamiento representa una mejora significativa frente a los

métodos tradicionales, disminuyendo los riesgos de detonación accidental y mejorando la trazabilidad del proceso.

En paralelo, la incorporación de sistemas de iniciación electrónicos y plataformas de control remoto ha fortalecido la integración entre las etapas de perforación, voladura y ventilación, reduciendo la exposición del personal a zonas de riesgo y promoviendo una operación más segura y sostenible. Estas innovaciones responden a la tendencia global de automatización y control digital en la minería subterránea moderna.

En este contexto, el estudio de la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada adquiere especial relevancia, pues representa una evolución del proceso convencional de voladura hacia un modelo mecanizado, preciso y seguro. Su implementación adecuada no solo contribuye al incremento de la productividad y la eficiencia operativa, sino que también fortalece la gestión de seguridad ocupacional y reduce los impactos asociados a la sobrerotura y al consumo energético.

1.2 Descripción del problema de investigación

En las operaciones de minería subterránea, la etapa de voladura constituye un eslabón esencial dentro del ciclo de minado, pues de su correcta ejecución dependen la productividad, el control geométrico de las labores y la estabilidad del macizo rocoso. No obstante, en muchas unidades mineras continúa empleándose emulsión encartuchada como agente principal de voladura, un sistema que presenta limitaciones técnicas y operativas que afectan de manera directa la eficiencia y los costos del proceso.

El carguío manual de los cartuchos en los taladros es una tarea lenta, discontinua y dependiente de la habilidad del operador. Esta condición genera irregularidades en la distribución del explosivo, ocasionando columnas de carga no homogéneas, lo cual repercute en fragmentaciones desiguales y sobreroturas significativas respecto al diseño teórico de la labor. Como consecuencia, se incrementa la necesidad de sostenimiento, el volumen de relleno y el consumo de materiales complementarios, lo que repercute en un aumento del costo total por metro excavado.

Desde la perspectiva de seguridad, la manipulación directa de explosivos sensibilizados expondrá al personal a mayores riesgos operativos, como detonaciones accidentales, impactos por caída de roca o inhalación de gases postvoladura. A ello se suma el tiempo adicional requerido para el retiro del personal, ventilación y limpieza del frente, generando paradas no productivas que prolongan el ciclo operativo y reducen la disponibilidad efectiva de los equipos.

En términos económicos, el método con emulsión encartuchada presentará mayores costos unitarios y menor eficiencia de avance, debido al aumento del tiempo de carguío, al desperdicio de explosivo por discontinuidades y a la pérdida de control sobre el factor de carga. La variabilidad en los resultados de avance y sobrerotura dificultará la planificación de la producción y la estandarización de los indicadores operativos.

En conjunto, estos factores reflejan un problema técnico, operativo y económico persistente: la dependencia de un sistema de voladura manual, discontinuo y de bajo control, que limita el rendimiento, eleva los costos y mantiene condiciones de riesgo para el personal minero.

En este contexto, surgen las siguientes interrogantes de investigación:

¿Cuáles son las causas y consecuencias del uso de emulsiones encartuchadas en el incumplimiento de los avances planificados en labores subterráneas?

¿De qué manera la aplicación manual de explosivos encartuchados influye en el incremento de la sobrerotura y en la inestabilidad de las labores?

¿Cómo inciden las limitaciones operativas del método encartuchado en los costos unitarios y en la eficiencia global del ciclo de voladura?

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el uso de la emulsión a granel no sensibilizada en labores de minería subterránea, la cual mejora la eficiencia de avance, el control de la sobrerotura y la optimización de los costos operativos unitarios.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Cuantificar la eficiencia de avance (m/mes) obtenida por la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada en las operaciones de la mina.

Analizar la sobrerotura (%) generada por el uso de emulsión a granel no sensibilizada.

Estimar la reducción en los costos operativos unitarios (US\$/m) asociados al uso de emulsión a granel no sensibilizada.

1.4 Hipótesis

1.4.1 *Hipótesis general*

La implementación de la emulsión a granel no sensibilizada mejorará significativamente la eficiencia de avance, reducirá la sobrerotura y optimizará los costos operativos unitarios en las labores de minería subterránea.

1.4.2 *Hipótesis específicas*

La aplicación de emulsión a granel no sensibilizada incrementará la eficiencia de avance (m/mes) en las labores subterráneas.

El uso de emulsión a granel no sensibilizada disminuirá la sobrerotura (%).

La implementación de emulsión a granel no sensibilizada reducirá los costos operativos unitarios (US\$/m) asociados al ciclo de perforación y voladura.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 *Variable independiente (V.I)*

X1: Tipo de explosivo utilizado

- Emulsión a granel no sensibilizada.

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

Y1: Eficiencia de avance (m/mes)

Y2: Sobrerotura (%)

Y3: Costo operativo unitario (US\$/m)

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	INDICADORES
<p>Problema general ¿En qué medida el uso de emulsión encartuchada en minería subterránea limita la eficiencia de avance, incrementa la sobrerotura y eleva los costos operativos unitarios?</p>	<p>Objetivo general Evaluar la implementación de la emulsión a granel no sensibilizada en labores de minería subterránea, determinando su efecto en la eficiencia de avance, el control de la sobrerotura y la optimización de los costos operativos unitarios.</p>	<p>Hipótesis general El uso de emulsión a granel no sensibilizada incrementará la eficiencia de avance, reducirá la sobrerotura y disminuirá los costos operativos unitarios en minería subterránea, en comparación con la emulsión encartuchada.</p>	<p>Y0: Dependiente / Efecto</p> <p>Desempeño global del ciclo de avance subterráneo</p>	<p>KPI's P&V</p>
<p>Problema específico 1 ¿Cuáles son las causas y consecuencias del uso de emulsiones encartuchadas en el incumplimiento de los avances planificados?</p>	<p>Objetivo específico 1 Cuantificar la eficiencia de avance (m/mes) obtenida con la aplicación de emulsión a granel no sensibilizada en condiciones reales de mina.</p>	<p>Hipótesis específica 1 La aplicación de emulsión a granel no sensibilizada incrementará la eficiencia de avance (m/mes) en las labores subterráneas.</p>	<p>X1: Independiente / Causa</p>	<p>Y1: Dependiente / Efecto Eficiencia de avance (m/mes).</p> <p>Metros lineales avanzados por mes. Cumplimiento del plan de avance (%). Variación del tiempo total de ciclo de voladura (h/ciclo).</p>
<p>Problema específico 2 ¿De qué manera la aplicación manual de explosivos encartuchados influye en el incremento de la sobrerotura y en la estabilidad de las labores?</p>	<p>Objetivo específico 2 Analizar la sobrerotura (%) generada por el uso de emulsión a granel no sensibilizada.</p>	<p>Hipótesis específica 2 El uso de emulsión a granel no sensibilizada disminuirá la sobrerotura (%).</p>	<p>Tipo de explosivo utilizado (emulsión granel no sensibilizada).</p>	<p>Y2: Dependiente / Efecto Sobrerotura (%) respecto al diseño.</p> <p>Diferencia entre sección teórica y sección real del túnel (m²). Porcentaje de sobrerotura acumulada en la labor (%).</p>
<p>Problema específico 3 ¿Cómo inciden las limitaciones operativas del método encartuchado en el aumento de los costos unitarios de producción?</p>	<p>Objetivo específico 3 Estimar la reducción en los costos operativos unitarios (US\$/m) asociados al uso de emulsión a granel no sensibilizada.</p>	<p>Hipótesis específica 3 La implementación de emulsión a granel no sensibilizada reducirá los costos operativos unitarios (US\$/m) asociados al ciclo de perforación y voladura.</p>		<p>Y3: Dependiente / Efecto Costo operativo unitario (US\$/m de avance).</p> <p>Costo de explosivos por metro de avance (US\$/m). Costo total del ciclo de voladura (US\$/ciclo). Variación del costo operativo respecto al presupuesto inicial (%).</p>

Nota: Fuente elaboración propia.

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Pastor, R. (2019). “Nuevas Tecnologías de Voladura”. En este artículo se describe la implementación de sistemas de iniciación remota mediante red Ethernet en la Minera Tizapa, del Grupo Peñoles (México). El proyecto contempló la instalación de infraestructura de comunicación subterránea, la calibración de equipos y la capacitación integral del personal operativo. Para el año 2022, la operación había superado las 6,000 voladuras iniciadas desde un centro remoto de control, evidenciando mejoras sustanciales en la seguridad del personal, al reducir el contacto directo con los explosivos y minimizar riesgos por caída de roca y exposición a gases postvoladura. Este caso internacional demuestra cómo la automatización y el control remoto de la voladura contribuyen a una operación más segura y eficiente, principios también aplicables a la mecanización del carguío con emulsión a granel.

Valdez, R. (2017). “Impacto del uso de Tecnología de Voladura en la geometría y costos en Tunelería”. El autor analizó el efecto del uso de tecnologías modernas de voladura sobre la geometría de excavación y los costos operativos en obras subterráneas. Los resultados indicaron que la adopción de tecnologías avanzadas —como sistemas electrónicos, emulsiones bombeables y diseños optimizados de carga— permite ajustarse con mayor precisión a la sección de diseño, reduciendo el sobreexcavado y los costos derivados de sostenimiento y relleno. Asimismo, demostró que el equilibrio técnico–económico de la voladura puede ser modelado en función de las dimensiones de la labor, lo que evidencia la relevancia de controlar variables operativas y energéticas para alcanzar eficiencia en el proceso de minado.

Jarra, G. (2013). “Indicadores Claves para la Gestión de la Gerencia de Producción de una Minera de Cobre de Gran Producción en Chile”. Esta investigación de posgrado desarrolló un modelo de indicadores clave de desempeño (KPI) aplicados a la gestión de producción en minería de cobre a gran escala. El estudio concluyó que los indicadores asociados a eficiencia operativa, control de costos y calidad del avance son determinantes

para optimizar la productividad y la toma de decisiones en faenas mineras. Si bien no aborda directamente la voladura, sus aportes metodológicos respaldan la importancia de medir la eficiencia y el control de sobrerotura como variables dependientes críticas para la mejora continua de los procesos subterráneos.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Tomás, J. (2018). “Impacto de las Nuevas Tecnologías en las Competencias Requeridas por la Industria Minera Peruana”. El autor analizó la incorporación progresiva de tecnologías en la minería peruana, señalando que el nivel de transformación digital y tecnológica depende de las condiciones geológicas y económicas de cada operación. Destacó que la evolución tecnológica en minería subterránea no es homogénea, coexistiendo diferentes niveles de automatización, y que el desarrollo de competencias laborales debe centrarse en mejorar la seguridad operativa y la eficiencia productiva. Esta perspectiva se alinea con la implementación de emulsión a granel, que requiere capacitación técnica y un enfoque preventivo en seguridad y salud ocupacional.

Pérez, E. (2012). “Mejoras en la Unidad Uchucchacua de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.” En su tesis, Pérez recomendó la creación de un área especializada en productividad y control operativo, responsable de consolidar y analizar diariamente los indicadores de desempeño de mina, planta, mantenimiento y logística. Su propuesta enfatiza la importancia de contar con información técnica oportuna y confiable para la gestión de mejoras continuas. Estos principios son aplicables al seguimiento de indicadores como eficiencia de avance, sobrerotura y costos, esenciales para evaluar el impacto del uso de emulsión a granel.

Guerrero, D. (2005). “Sistema de Indicadores Mineros para la Explotación Sostenible de los Recursos Minerales”. Esta tesis doctoral plantea un Sistema de Indicadores de Sostenibilidad (SIS) para el sector minero, organizado en tres niveles: indicadores de presión, estado y respuesta. El modelo promueve una visión integral de la gestión minera, integrando variables técnicas, económicas y ambientales. En el contexto de la presente investigación, su enfoque metodológico respalda la necesidad de cuantificar

de forma sistemática los efectos operativos y económicos de nuevas tecnologías, como la emulsión a granel no sensibilizada, para garantizar decisiones sostenibles y basadas en evidencia.

Clemente, R. (2021). “Aplicación de Emulsión a Granel en Voladuras Subterráneas: Evaluación Técnica y Económica en una Mina Polimetálica del Perú”. Universidad Nacional de Ingeniería. Este estudio analizó la implementación de emulsión a granel en minería subterránea como alternativa a los explosivos encartuchados. Evaluó la velocidad de carguío, la fragmentación del macizo rocoso, la sobrerotura y los costos operativos. Los resultados demostraron una mejora en la continuidad operativa, una reducción de incidentes asociados al manejo manual de explosivos, y una disminución significativa de la sobrerotura en zonas de alta fracturación. Además, se evidenció una optimización general del ciclo de minado. Este antecedente es particularmente relevante, pues constituye una referencia directa del mismo tipo de tecnología analizada en la presente investigación.

Mota, E. (2017). “Innovaciones Tecnológicas en Perforación y Voladura”. Congreso PERVOL XVII – Universidad Nacional de Ingeniería. El autor destacó que, aunque no se han producido avances disruptivos recientes en los explosivos mismos, sí ha habido mejoras sustanciales en las operaciones conexas, como la automatización del carguío, la digitalización de los controles de voladura y la optimización de la fragmentación. Estas innovaciones, orientadas a la eficiencia y la seguridad, fortalecen el argumento de que la modernización de los procesos —como la aplicación de emulsión bombeable no sensibilizada— es un paso necesario hacia una minería subterránea más productiva, segura y sostenible.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Fundamentos de la voladura en minería subterránea

El proceso de voladura tiene como objetivo principal la fragmentación del macizo rocoso mediante el uso controlado de explosivos. Para lograr una voladura efectiva, se requiere un diseño que contemple la geometría de los taladros, la densidad energética del explosivo, el factor de carga y la secuencia de iniciación (Konya & Walter, 2016). Un diseño deficiente puede provocar sobrerotura, inestabilidad estructural, vibraciones excesivas o una fragmentación ineficiente del material (Jimeno et al., 1995).

En minería subterránea, el tipo de roca, el sistema de sostenimiento y las condiciones geomecánicas determinan los parámetros de perforación y voladura. El control del contorno, especialmente en labores de desarrollo, resulta esencial para minimizar la sobrerotura y mantener la integridad del perfil excavado (López, 2018).

En síntesis, una voladura bien diseñada y ejecutada garantizará una fragmentación controlada, la estabilidad del macizo rocoso y una eficiencia sostenida en las operaciones posteriores de carguío, acarreo y sostenimiento (Jiménez, 2019; Villa, 2021).

2.1.2 Voladura en minería subterránea

La voladura constituye una de las operaciones más críticas dentro del ciclo de minado subterráneo, ya que de su correcta ejecución depende la fragmentación del macizo rocoso, la eficiencia del avance y la estabilidad del contorno de las labores (Jimeno et al., 1995). Su finalidad es liberar y fracturar la roca mediante el uso de explosivos industriales, generando fragmentos de tamaño adecuado para las etapas posteriores de carguío, transporte y sostenimiento.

Aunque la perforación constituye una fase previa esencial —pues define el patrón geométrico de los taladros que recibirán el explosivo—, el rendimiento global de la operación depende fundamentalmente de la calidad del diseño y ejecución de la voladura. Factores como el tipo de explosivo, la distribución de la carga, la secuencia de iniciación y

la precisión de retardo determinan el comportamiento energético del disparo y, por tanto, la eficiencia del proceso (Konya & Walter, 2016; Szumny et al., 2020).

En la minería subterránea moderna, la optimización de la voladura ha estado fuertemente vinculada al desarrollo de nuevas tecnologías de emulsiones bombeables, las cuales ofrecen una mayor uniformidad de carga, control del factor energético y una significativa mejora en la seguridad operativa (Dyno Nobel, 2015; Rapokhin & Akgün, 2023). En particular, la emulsión a granel no sensibilizada ha desplazado progresivamente al método tradicional basado en emulsiones encartuchadas, caracterizadas por su manipulación manual y las discontinuidades en la columna explosiva (Valdez, 2017).

La emulsión a granel permite un carguío mecanizado continuo, realizado directamente dentro de los taladros mediante equipos especializados, eliminando la exposición directa del personal a materiales explosivos activos. Este método asegura una distribución homogénea de la energía, reduciendo los problemas de sobrerotura, mejorando la fragmentación del material y disminuyendo los tiempos del ciclo operativo (Orica, 2010; Pastor, 2019).

Por otro lado, la precisión en el diseño de la perforación sigue siendo un factor complementario que influye en la calidad de la voladura, ya que desviaciones en la alineación o en la profundidad de los taladros pueden alterar la propagación de la onda de choque y generar ineficiencias energéticas. Sin embargo, los avances en emulsiones controladas y carguío mecanizado han permitido compensar parte de esas variaciones, otorgando mayor robustez al proceso frente a las condiciones variables del macizo rocoso (Szumny et al., 2020).

En síntesis, la integración de emulsiones a granel no sensibilizadas dentro del sistema de voladura subterránea representa una evolución tecnológica que combina eficiencia operativa, seguridad y control geométrico. La comparación entre este método y el sistema tradicional de emulsión encartuchada constituye el eje de análisis de la presente investigación, orientada a determinar sus efectos sobre la productividad, la sobrerotura y los costos unitarios del proceso minero (Jarra, 2013; Rapokhin & Akgün, 2023).

2.1.3 Agentes de voladura

Los agentes de voladura son mezclas químicas diseñadas para producir una detonación controlada capaz de fracturar la roca mediante la liberación súbita de gases a alta presión y temperatura (Jarre, 2013). Su selección depende de factores como el tipo de roca, las condiciones geológicas, el nivel de humedad, el tipo de labor y los requerimientos de fragmentación (Konya & Walter, 2016).

En minería subterránea, la evolución tecnológica de los explosivos ha estado orientada a mejorar la seguridad operativa, la resistencia al agua, el control energético y la eficiencia del carguío (Orica, 2010; Dyno Nobel, 2015). De esta manera, los agentes de voladura han transitado desde formulaciones simples como el ANFO, hacia sistemas más sofisticados basados en emulsiones bombeables, que ofrecen un desempeño más uniforme y seguro (Valdez, 2017; Pastor, 2019).

2.1.3.1 ANFO. El ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil) fue durante décadas el explosivo más utilizado en minería, gracias a su bajo costo y facilidad de preparación. Está compuesto por una mezcla de nitrato de amonio y combustible diésel o destilado ligero, lo que le confiere una velocidad de detonación entre 3 200 y 4 500 m/s, dependiendo de su densidad y confinamiento (Jimeno et al., 1995).

A pesar de su economía y potencia aceptable, el ANFO presenta limitaciones importantes en minería subterránea:

- Baja resistencia al agua, lo que lo hace ineficaz en zonas húmedas o con filtraciones.
- Riesgo de desensibilización en ambientes con alta humedad.
- Manipulación directa del material explosivo, lo que incrementa la exposición del personal (Konya & Walter, 2016).

Estas limitaciones impulsaron el desarrollo de emulsiones explosivas, que ofrecen mayor estabilidad, control energético y seguridad durante el manejo y aplicación (Orica, 2010; Dyno Nobel, 2015).

2.1.3.2 Emulsiones explosivas. Las emulsiones son mezclas de una fase oxidante (solución concentrada de nitrato de amonio) y una fase combustible (aceites o ceras), estabilizadas mediante agentes emulsionantes que generan una estructura de agua en aceite (Valdez, 2017).

Su composición y estructura permiten una resistencia al agua muy superior al ANFO, un control de densidad ajustable y un alto rendimiento energético, con velocidades de detonación que pueden superar los 5 000 m/s (Dyno Nobel, 2015).

Dependiendo de su forma de presentación y aplicación, las emulsiones se clasifican en dos grupos principales:

2.1.3.2.1 Emulsión encartuchada. Se presenta en tubos o cartuchos plásticos sellados, que se introducen manualmente en los taladros. Este método, aunque ampliamente usado en minas subterráneas peruanas por su estabilidad y facilidad de almacenamiento, requiere mayor tiempo y mano de obra, genera discontinuidades en la columna de carga y aumenta la exposición directa del personal a materiales explosivos activos (Pastor, 2019).

A nivel energético, la emulsión encartuchada ofrece velocidades de detonación entre 4 000 y 5 000 m/s, con una densidad promedio de 1.1 g/cm³ y una resistencia al agua moderada (Orica, 2010).

2.1.3.2.2 Emulsión a granel no sensibilizada. Representa la evolución más reciente de los agentes de voladura empleados en minería subterránea. Se transporta en estado inerte y es sensibilizada in situ durante el bombeo, mediante microesferas de gas o reactivos químicos. Entre sus principales ventajas destacan:

- **Seguridad mejorada:**

La emulsión en estado no sensibilizado es inerte durante el transporte y almacenamiento, reduciendo drásticamente el riesgo de detonación accidental.

- **Carguío mecanizado continuo:**

Permite un llenado uniforme de los taladros, evitando vacíos o discontinuidades.

- **Control preciso del factor de carga:**

Posibilita ajustar la densidad según el diseño de voladura, optimizando el consumo de explosivo.

- **Alta resistencia al agua:**

Su estructura agua en aceite evita la degradación por humedad.

- **Eficiencia operativa:**

El carguío mecanizado reduce tiempos y costos de mano de obra, además de disminuir la exposición del personal.

Estudios de Szumny et al. (2020) y Rapokhin & Akgün (2023) demuestran que este sistema incrementa la productividad y reduce la sobrerotura, constituyéndose en una alternativa moderna y segura para operaciones subterráneas.

2.1.4 Carguío mecanizado

El carguío mecanizado es el proceso mediante el cual los explosivos se introducen en los taladros utilizando equipos automatizados. Este método reemplaza el carguío manual con cartuchos, optimizando la precisión y reduciendo la exposición del personal (Orica, 2010).

Las principales ventajas del carguío mecanizado son (Rapokhin & Akgün, 2023; Szumny et al., 2020):

- Reducción de los tiempos de operación al permitir cargar varios taladros de forma continua.
- Mejor control del factor de carga, garantizando una detonación más uniforme.
- Menor exposición al riesgo humano, al disminuir la manipulación directa de materiales explosivos.

El carguío mecanizado, combinado con emulsión a granel, constituye una herramienta eficaz para aumentar la productividad, mejorar la calidad del avance y fortalecer la seguridad en la mina (Dyno Nobel, 2015).

2.1.5 Control de sobrerotura

La sobrerotura es la rotura excesiva de la roca más allá del contorno de diseño de la labor minera. Este fenómeno genera sobreexcavación, pérdida de estabilidad geomecánica, incremento de los costos de sostenimiento y mayor volumen de relleno (López, 2018).

Los principales factores que influyen en la sobrerotura son (Jarre, 2013):

- Diseño inadecuado de la malla de perforación.
- Mala alineación de los taladros.
- Factor de carga excesivo o inhomogéneo.
- Retardos inadecuados entre detonaciones.

El control de la sobrerotura implica un diseño preciso del contorno, la selección adecuada del explosivo y el control riguroso del carguío. La emulsión a granel, al permitir una carga continua y controlada, contribuye a reducir significativamente la sobrerotura y mejorar el perfil final del túnel (Rapokhin & Akgün, 2023; Dyno Nobel, 2015).

2.1.6 Indicadores de eficiencia de avance

La eficiencia de avance es un indicador que relaciona los metros lineales excavados con el tiempo, los recursos y los costos empleados. En minería subterránea, se expresa generalmente en metros por mes (m/mes) o metros por ciclo (m/ciclo) (Villa, 2021).

Los principales indicadores de desempeño asociados a la eficiencia de avance son (Jarre, 2013; Dyno Nobel, 2015):

- Cumplimiento del plan de avance (%).
- Tiempo total del ciclo de voladura (h/ciclo).
- Costo operativo unitario (US\$/m).
- Disponibilidad y utilización del equipo de perforación.

El análisis comparativo de estos indicadores entre emulsión encartuchada y emulsión a granel permite cuantificar la mejora operativa y económica derivada del cambio tecnológico (Pastor, 2019; Szumny et al., 2020).

2.2 Marco conceptual

A continuación, se definen los principales conceptos utilizados en la investigación:

2.2.1 Carguío

Proceso de introducir el explosivo en los taladros.

2.2.2 Eficiencia

Rendimiento de avance por unidad de tiempo o ciclo.

2.2.3 Emulsión

Agente de voladura agua–aceite estabilizado, sensibilizado in situ o encartuchado.

2.2.4 Fragmentación

Distribución de tamaños resultante de la voladura.

2.2.5 Seguridad

Condiciones que minimizan la exposición al riesgo en el ciclo de voladura.

2.2.6 Sobrerotura

Exceso de excavación respecto al contorno de diseño.

2.2.7 Voladura

Proceso mediante el cual se fragmenta la roca utilizando energía liberada por explosivos, permitiendo la excavación de labores mineras.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 *Unidad de estudio*

Los proyectos Santa Rosa, Piedra Imán, Parallel Veins y Atahualpa son de propiedad al 100% de SMC Toropunto Ltd. Sucursal del Perú.

Estas operaciones se localizan en la zona norte de la Cordillera de los Andes peruanos, a una altitud promedio de 4,200 metros sobre el nivel del mar, dentro del distrito de Pamparomas, provincia de Huaylas, departamento de Áncash.

Geográficamente, el conjunto de proyectos se encuentra aproximadamente a 62 kilómetros al suroeste de la ciudad de Caraz y a 400 kilómetros al norte de Lima (Figura 1). Estas coordenadas ubican el distrito minero dentro del sector occidental del Callejón de Huaylas, una región caracterizada por su relieve montañoso pronunciado, presencia de depósitos polimetálicos y un marco geológico asociado a intrusiones de edad Miocena.

Las coordenadas geográficas aproximadas de los depósitos son las siguientes:

- **Mina Santa Rosa:**

Latitud -9.18333333 (°) y Longitud -77.90000000 (°).

- **Mina Piedra Imán:**

Latitud -9.16666667 (°) y Longitud -77.88333333 (°).

- **Proyecto Parallel Veins:**

Latitud -9.18333333 (°) y Longitud -77.88333333 (°).

- **Proyecto Atahualpa:**

Latitud -9.16123333 (°) y Longitud -77.90425278 (°).

En conjunto, los cuatro proyectos comprenden un total de doce (12) concesiones mineras, que abarcan una superficie aproximada de 6,088 hectáreas.

Las principales concesiones son:

- **Santa Rosa:**

Concesión María Cecilia Dos–SR.

- **Piedra Imán:**

Concesión Troy XVII.

- **Parallel Veins:**

Concesiones María Cecilia Dos–SR, Troy XVII y Troy XVIII.

- **Atahualpa:**

Concesión María Cecilia Cinco.

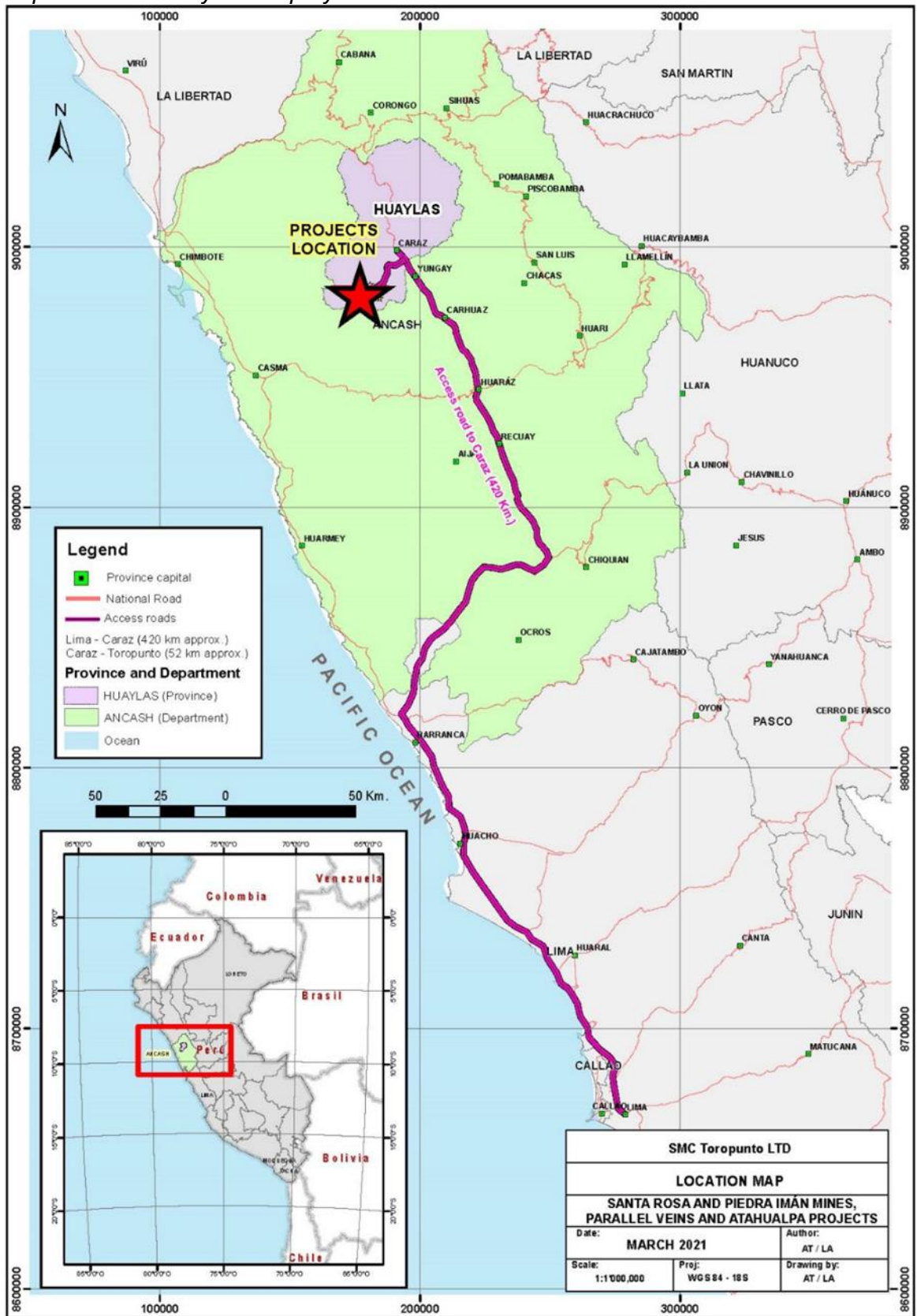
Estas concesiones se ubican dentro del dominio geológico de la Cordillera Negra, conocido por albergar yacimientos de tipo epitermal, pórfido y skarn asociados a eventos intrusivos del Mioceno.

La Figura 1 muestra la localización de las concesiones y su distribución espacial dentro del distrito minero Toropunto.

Mapa de ubicación y vías de acceso de las minas Santa Rosa y Piedra Imán, y de los proyectos Parallel Veins y Atahualpa.

Figura 1

Mapa de ubicación y ruta al proyecto minero



Nota: Fuente proyecto minero.

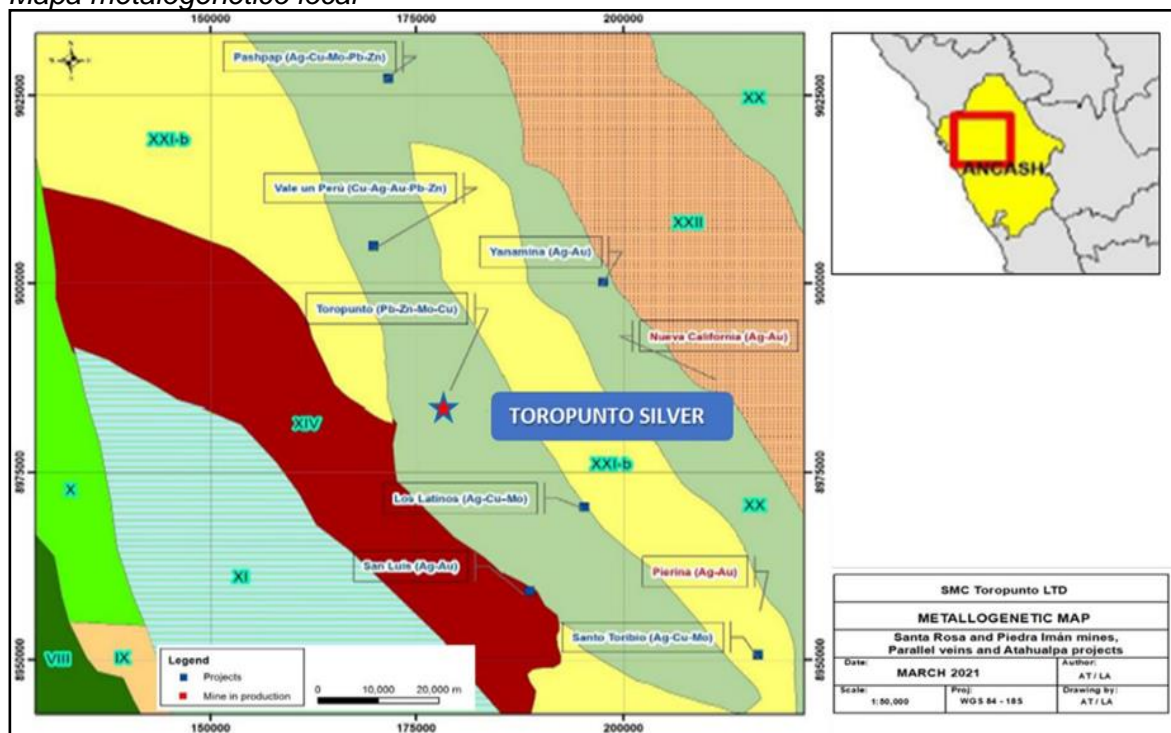
3.1.2 Geología regional

El distrito minero Toropunto se emplaza dentro del cinturón metalogenético epitermal y porfirítico del Cretácico, desarrollado sobre secuencias sedimentarias de la misma edad. Este cinturón, identificado como el cinturón metalogenético XX (según la notación romana utilizada en los estudios metalogenéticos del Perú), se caracteriza por alojar pórfidos de Cu-Mo-Au, depósitos tipo skarn de Pb-Zn-Cu-Ag y yacimientos polimetálicos asociados al emplazamiento de intrusivos (Carlotto et al., 2009).

El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la hoja Carhuaz (19h) del mapa geológico nacional elaborado por INGEMMET.

Figura 2

Mapa metalogenético local



Nota: Fuente proyecto minero.

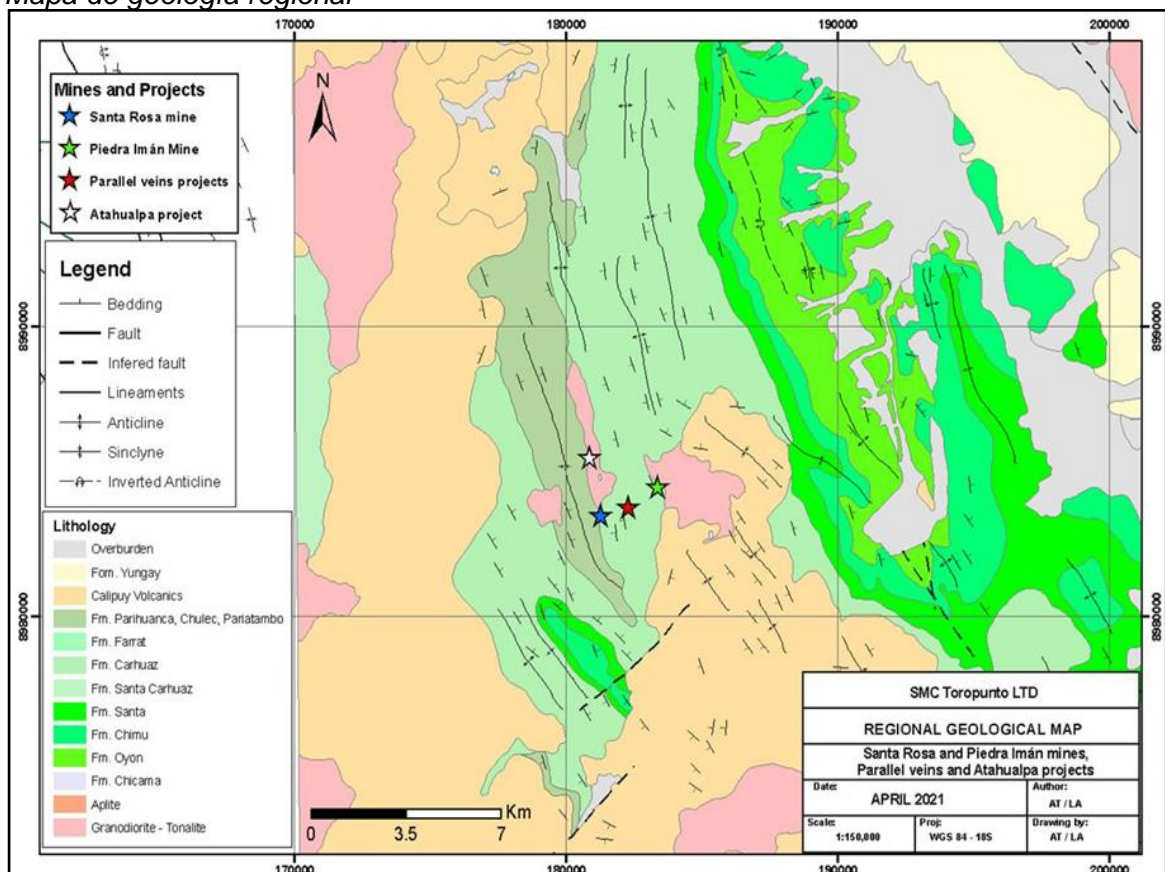
Geotectónicamente, las propiedades mineras se ubican en la Cordillera Negra, la cual pertenece al dominio geológico número 3, conocido como la Cordillera Occidental (Carlotto et al., 2009).

Este dominio constituye una franja estructural relevante dentro de los Andes Centrales del norte del Perú y se caracteriza por albergar una gran diversidad de depósitos minerales, entre los que destacan los polimetálicos, los epitermales de alta y baja sulfuración, y los yacimientos tipo pórfido y skarn.

Entre los principales depósitos de la región se encuentran las minas Hilarión y Hércules (polimetálicos), Pierina (epitermal de alta sulfuración), San Luis (epitermal de baja sulfuración), Santo Toribio (epitermal indiferenciado), y Los Latinos, Adriana y Magistral (tipos pórfido y skarn). Estas minas representan ejemplos típicos del potencial metalogénico de la Cordillera Negra y sirven como referencia para la caracterización del distrito Toropunto.

Figura 3

Mapa de geología regional



Nota: Fuente proyecto minero.

Desde un punto de vista geológico regional, el área está compuesta por rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcano-sedimentarias del Cenozoico, intruidas por

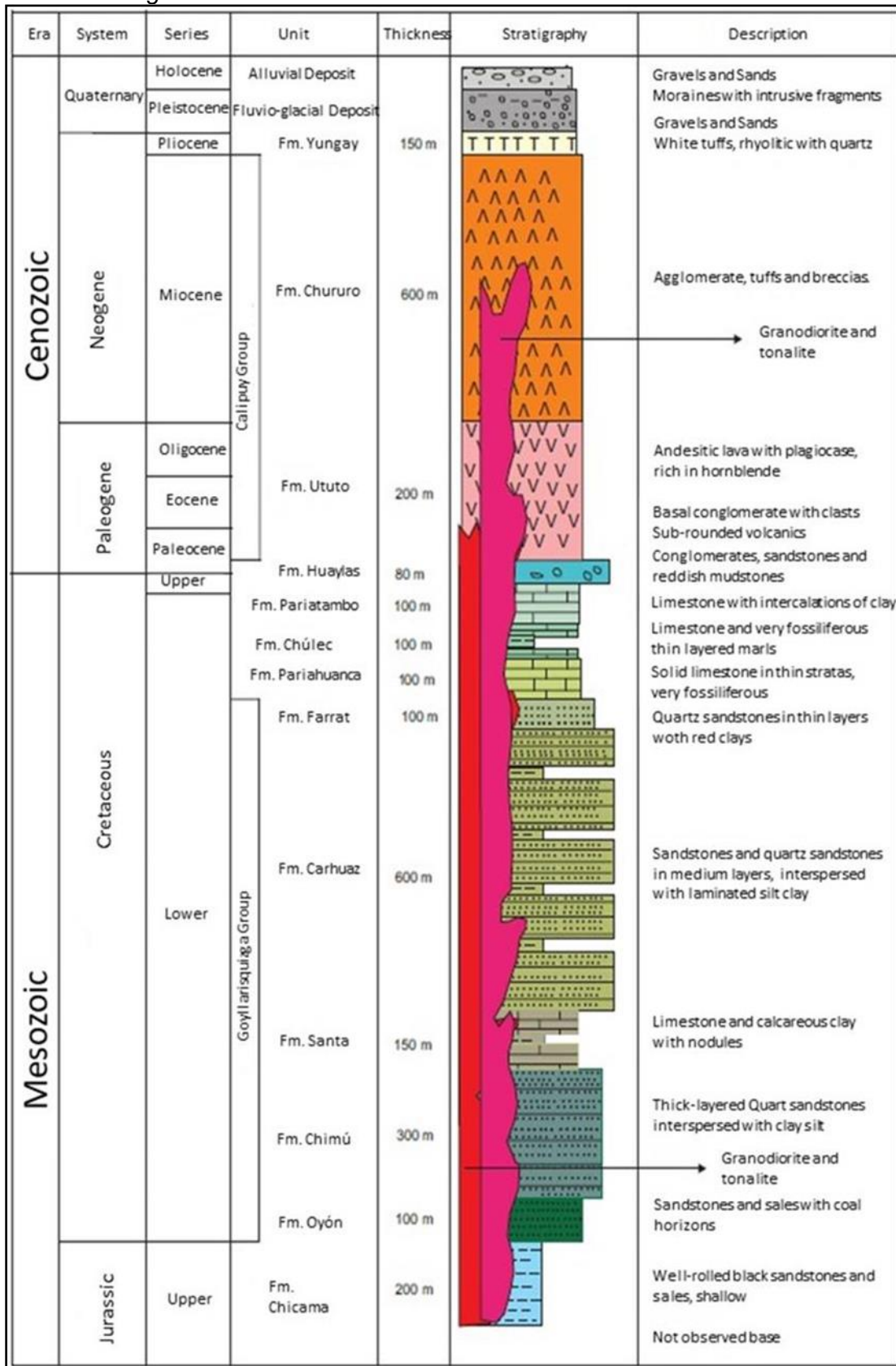
cuerpos ígneos de composición granítica a tonalítica correspondientes al Mioceno y Plioceno (Cobbing et al., 1981; Pfiffner y Gonzales, 2013).

Dichas intrusiones generaron procesos hidrotermales responsables de la formación de sistemas epitermales y pórfidos mineralizados, los cuales constituyen el marco geológico regional en el que se emplazan los proyectos Santa Rosa, Piedra Imán, Parallel Veins y Atahualpa.

3.1.2.1 Estratigrafía. Las rocas estratigráficas que afloran en la región del distrito minero Toropunto abarcan una amplia secuencia que comprende rocas sedimentarias mesozoicas, volcano-sedimentarias cenozoicas, y depósitos cuaternarios recientes (INGEMMET; Wilson et al., 1967) (Figura 4).

Figura 4

Columna estratigráfica



Nota: Fuente proyecto minero.

Formación Chicama

Las rocas más antiguas corresponden a la Formación Chicama, que aflora en los sectores suroriental y nororiental de la zona. Está compuesta principalmente por lutitas y areniscas finas ligeramente metamorfizadas, probablemente debido a la influencia tectónica de la falla regional de la Cordillera Blanca.

El contacto superior es una discordancia paralela con la Formación Oyón. Wilson et al. (1967) reportaron la presencia de amonites, los cuales indican una edad Jurásico Superior (Tithoniano).

Grupo Goyllarisquizga

El Grupo Goyllarisquizga está conformado predominantemente por sedimentos clásticos que abarcan desde el Neocomiano hasta el Aptiano, ampliamente distribuidos en los Andes Centrales y del Norte del Perú.

En la Cordillera Occidental, las facies que afloran están compuestas por cuarcitas, lutitas y calizas, divididas en cuatro unidades principales: Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. A esta secuencia se asocia la Formación Oyón (Cobbing, 1973), reconocida por su continuidad lateral y transición gradual hacia la Formación Chimú.

Formación Oyón

La Formación Oyón está compuesta por areniscas grises a gris oscuro, de grano fino a medio, con intercalaciones de limolitas y lutitas carbonosas.

En la base presenta estratos delgados con laminación ondulosa y paralela; en la parte media, alternan lutitas con areniscas; y hacia el techo predominan las areniscas con capas de carbón.

El contacto superior es concordante, marcado por las areniscas cuarzosas gruesas de la Formación Chimú. Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad Neocomiana Inferior (probablemente Berriasiana).

Formación Chimú

La Formación Chimú está constituida por cuarcitas, areniscas y lutitas con delgados mantos de carbón antracítico, alcanzando un espesor de hasta 300 metros. Se divide en dos miembros:

- **Miembro inferior:**

Areniscas y cuarcitas intercaladas con lutitas.

- **Miembro superior:**

Cuarcitas blancas a grisáceas.

Estratigráficamente, es concordante y se le asigna una edad correspondiente al Valanginiano Inferior a Medio.

Formación Santa

La Formación Santa está conformada por calizas y margas, acompañadas de lutitas grises a pardas con nódulos calcáreos y calizas oolíticas en capas medianas a gruesas. Su espesor aumenta significativamente en el Callejón de Huaylas. El registro fósil indica una edad Valanginiana, en concordancia con la sobreyacente Formación Carhuaz.

Formación Carhuaz

La Formación Carhuaz se compone de areniscas y cuarcitas beige en capas delgadas intercaladas con lutitas. En algunos sectores se observan intercalaciones de calizas con yeso cerca de la base.

En el Callejón de Huaylas, alcanza un espesor aproximado de 600 metros, llegando a superar los 1,000 metros en otras zonas (Cobbing et al., 1981).

Benavides (1956) reportó fósiles en la parte inferior, lo que sugiere una edad Valanginiana Superior.

Formación Farrat

La Formación Farrat está conformada por areniscas de grano fino a medio en capas delgadas a medianas, intercaladas con lutitas rojas.

Su espesor varía entre 100 y 150 metros en el sector norte y disminuye hacia el oeste (30–50 m). Se apoya concordantemente sobre la Formación Carhuaz y subyace con ligera discordancia angular a la Formación Pariahuanca.

Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad Aptiana.

Formación Pariahuanca

Compuesta por calizas grises finas en bancos medianos a gruesos, con escasas intercalaciones de lutitas oscuras.

El contacto inferior presenta una ligera discordancia sobre las lutitas de la Formación Carhuaz, mientras que el superior está claramente definido por el paso a las calizas laminadas y margas de la Formación Chulec.

Los fósiles indican una edad Aptiano–Albiano Inferior.

Formación Chulec

La Formación Chulec aflora ampliamente en la Cordillera Occidental del norte y centro del Perú. Está constituida por calizas laminadas, margas y lutitas calcáreas, con espesores promedio de 100 m, alcanzando hasta 250 m en algunos sectores.

Su edad es Albiana Media Inferior, determinada por la presencia de amonites característicos. Su contacto superior es concordante con la Formación Pariatambo.

Formación Pariatambo

Formada por margas y lutitas negras con intercalaciones de caliza, alcanzando un espesor de alrededor de 100 m.

El registro fósil indica ambientes pelágicos y bentónicos del Albiano Medio Superior. Esta formación subyace en discordancia al Grupo Calipuy.

Grupo Calipuy

El Grupo Calipuy está compuesto predominantemente por tobas, aglomerados, brechas volcánicas y lavas de composición andesítica a riolítica.

Se reconocen dos formaciones principales: Formación Ututo: lavas verdosas, púrpuras y rojizas, bien estratificadas, con intercalaciones de lutitas grises, alcanzando espesores de hasta 100 m.

Formación Chururo: tobas, aglomerados y lavas porfíricas de color gris verdoso a rojizo, que forman secuencias gruesas y resistentes.

Dataciones radiométricas K/Ar (Farrar y Noble, 1976) indican edades entre 58 y 36.5 Ma (Eoceno–Oligoceno) para la Ututo, y entre 23.5 y 18.1 Ma (Mioceno) para la Chururo.

Estas rocas conforman la Cuenca Volcánica Calipuy, interpretada como un volcanismo continental de carácter extenso.

Estudios en la Cordillera Negra (Chávez et al., 2010) identifican cuatro centros volcánicos principales, además de un complejo volcánico compuesto por los centros Huinoc y Alto Ruri, que representan tres etapas eruptivas entre el Eoceno Superior y Mioceno Inferior.

Formación Yungay

Constituida por rocas piroclásticas observadas en el valle del río Santa (Yungay). Incluye tobas blancas friables e ignimbritas dacíticas con disyunción columnar, con un espesor estimado de 150 m.

Data del Mioceno Superior (5.8–7.8 Ma) y se apoya en discordancia sobre el Grupo Calipuy y las secuencias cretácicas.

Depósitos Cuaternarios

Corresponden a depósitos fluvio-glaciales, morrenas, arenas y gravas ampliamente desarrollados en las cercanías de la Cordillera Blanca, así como terrazas fluviales y aluviales en el valle del río Santa. Estos depósitos representan los procesos más recientes de sedimentación superficial en la región.

3.1.2.2 Rocas intrusivas. El plutonismo regional está dominado por el Batolito Andino (o Batolito de la Costa) y el Batolito de la Cordillera Blanca, los cuales conforman los principales cuerpos intrusivos en la región de Áncash (Rodríguez et al., 2011).

Las litologías varían desde granitos hasta gabros, con la presencia de stocks y diques aislados en la Cordillera Negra, que intruyen tanto las rocas sedimentarias mesozoicas como las volcano-sedimentarias cenozoicas.

Batolito de la Costa

Corresponde a uno de los ensambles plutónicos más extensos e importantes de los Andes peruanos. Este cuerpo calco-alcálido se extiende paralelamente a la costa del Pacífico en dirección NW–SE, con un ancho de 50 a 80 km y una longitud aproximada de 1,600 km.

Las litologías varían de gabros y dioritas (en facies máficas) a tonalitas, granodioritas y monzogranitos en las facies félsicas. Los contactos con las rocas encajonantes son verticales y claramente definidos.

Batolito de la Cordillera Blanca

Este batolito corresponde a un complejo intrusivo del Mioceno Medio a Superior, con una longitud aproximada de 200 km, emplazado dentro de la cuenca del río Santa.

Está limitado al norte por el Sistema de Falla Transformante de Trujillo y al sur por la Flexura de Chiquián (Rodríguez et al., 2011).

Su litología principal es granítica, con bordes contaminados hacia tonalitas y dioritas, y la presencia de stocks tardíos de granodiorita y diques de pórfido cuarzoso.

Dataciones radiométricas K–Ar indican edades entre 13 y 2 Ma, con una edad promedio de 9 Ma, correspondiente al Mioceno Superior (Petford et al., 1996).

El batolito intruye las lutitas de la Formación Chicama (Jurásico Superior), las cuales aparecen plegadas y cortadas por las rocas ígneas, evidenciando un emplazamiento post-tectónico.

Stocks de alto nivel

Los stocks de alto nivel son intrusiones menores situadas al este del Batolito de la Cordillera Blanca, principalmente dentro de las rocas volcánicas del Grupo Calipuy y en los bloques del Marañón.

Se encuentran a altitudes cercanas a los 4,000 m s.n.m., presentando formas de stocks y diques, con tamaños de afloramiento que varían entre 4 y 10 km².

Están compuestos por rocas porfíricas con fenocristales de plagioclasa (hasta 2 cm), biotita y hornblenda, con cuarzo común en granos redondeados.

Cuando estos cuerpos presentan alteración hidrotermal, se observa caolinización y decoloración, además de sulfuros diseminados, lo que sugiere su posible relación con eventos mineralizantes en la Cordillera Occidental.

Aunque no todos los stocks están directamente asociados a mineralizaciones significativas, muchos depósitos conocidos de la región se encuentran espacialmente vinculados a este tipo de intrusiones, lo que indica su probable papel como fuentes térmicas o estructurales en la génesis de los sistemas mineralizados.

3.1.3 *Diseño metodológico y enfoque*

La metodología adoptada fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo-comparativo. Se desarrolló bajo un diseño experimental de campo, en el que se registraron indicadores operativos del ciclo de perforación y voladura utilizando ambos tipos de explosivo.

El proceso de recopilación de información comprendió tres etapas:

- Recolección de data histórica: revisión de reportes operativos, partes diarios y KPIs del área de Operaciones Mina.
- Ejecución de pruebas controladas: aplicación de emulsión encartuchada y emulsión a granel en labores con características geológicas y geométricas equivalentes.
- Registro de resultados: medición de tiempos de ciclo, metros avanzados, sobrerotura y costos operativos unitarios (US\$/m).

3.1.4 *Variables y parámetros registrados*

Tabla 2

Variables y parámetros registrados

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Tipo de explosivo	Emulsión encartuchada / a granel	-	Variable independiente del estudio
Eficiencia de avance	Metros de túnel por mes	m/mes	Mide el rendimiento operativo
Sobrerotura	Diferencia entre sección real y diseño	%	Evalúa el control del contorno
Costo operativo unitario	Costo promedio por metro de avance	US\$/m	Evalúa el impacto económico

Nota: Fuente elaboración propia.

Estas variables fueron medidas bajo un mismo esquema operativo, utilizando las mismas cuadrillas, equipos y condiciones de ventilación y sostenimiento.

3.1.5 Fuentes y técnicas de recolección

Las principales fuentes fueron los partes de guardia, reportes de producción y voladura, y los registros de perforación y carguío mecanizado generados por los equipos de la empresa contratista.

Las técnicas empleadas incluyeron:

- Observación directa de los procesos de perforación y voladura.
- Registro fotográfico de los contornos de las labores.
- Toma de datos de tiempo mediante cronometraje digital.
- Lectura de secciones reales con distanciómetro láser.
- Consolidación de información en hojas de cálculo y software estadístico.

3.1.6 Condiciones geométricas y parámetros de perforación

Con el objetivo de asegurar la comparabilidad técnica y estadística entre las pruebas realizadas con emulsión encartuchada (E) y emulsión a granel no sensibilizada (EB), se mantuvieron constantes las condiciones geométricas y los parámetros de perforación en todas las labores evaluadas.

Esta uniformidad permitió eliminar la influencia de variables externas —como dimensiones del frente, patrón de perforación o número de taladros—, asegurando que las variaciones observadas en los indicadores de eficiencia, sobrerotura y costos operativos se deban exclusivamente al tipo de explosivo utilizado.

La Tabla 4 resume los parámetros geométricos y operativos registrados durante la etapa de campo, correspondientes a las labores desarrolladas en la Veta Santa Rosa, ubicadas entre los niveles 4100 y 4450. Estas labores presentan características geomecánicas de roca tipo III-A y III-B, consideradas representativas del macizo rocoso predominante en la unidad minera.

Tabla 3*Condiciones geométricas y parámetros de perforación por labor*

DESCRIPCIÓN	RP_106(-)	RP_106(-)	RP_205(-)	CA_386 SW	CA_380 SE
Tipo de Roca	III-A	III-B	III-B	III-B	III-A
Ancho	4.00	4.00	4.00	3.50	3.50
Alto	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Barra de Perforación	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Eficiencia de Perforación	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Longitud Perforación Efectiva	3.30	3.20	3.10	3.20	3.10
Taladros Cargados	43	36	38	37	35
Taladros Rimados	4	4	4	4	4

Nota: Fuente elaboración propia.

Los valores reflejan la uniformidad del diseño de perforación, tanto en geometría como en cantidad de taladros, lo que garantizó un escenario controlado para la evaluación de las emulsiones.

Las secciones de 3.5 x 4.0 m y 4.0 x 4.0 m fueron las más comunes, mientras que la eficiencia de perforación se mantuvo alrededor del 90%, indicando un aprovechamiento adecuado de la longitud útil de barra y un mínimo de desviaciones angulares.

El número de taladros cargados y rimados permaneció prácticamente constante, con un promedio de 39 y 4 respectivamente, lo que permitió aplicar los mismos factores de carga y espaciamiento para ambos tipos de emulsión.

De esta manera, las condiciones de diseño constituyen un punto de partida homogéneo para los análisis comparativos de avance, sobrerotura y costo operativo que se desarrollan en el Capítulo 4.

3.2 Procesamiento de información

3.2.1 Datos de proyección operativa del ciclo de voladura

El procesamiento de información se realizó a partir de datos operativos reales obtenidos directamente de los registros de disparos efectuados durante la campaña de campo en la Veta Santa Rosa, niveles 4100 y 4450. Los datos fueron organizados en hojas de cálculo estructuradas por tipo de emulsión, fecha, labor y dimensiones geométricas del frente, con el objetivo de comparar de forma directa el desempeño entre emulsión encartuchada (E) y emulsión a granel no sensibilizada (EB).

Cada registro incluyó los siguientes parámetros:

- Longitud de avance por disparo (m),
- Tiempos de perforación y carguío (min),
- Porcentaje de sobrerrotura (%),
- Factores de carga (kg/m³) y avance (kg/m), y
- Costos operativos unitarios (US\$/m).

El conjunto de datos constituye la base empírica principal del estudio y refleja condiciones operativas reales sin uso de proyecciones sintéticas. Los valores provienen exclusivamente de voladuras controladas realizadas por el personal operativo, bajo las mismas condiciones de ventilación, equipos y cuadrillas. Los datos fueron verificados y depurados mediante la revisión cruzada de partes diarios y reportes de producción, eliminando registros incompletos o inconsistentes y homogenizando las unidades de medida (m, m² y US\$/m). Asimismo, se aplicó una codificación estandarizada —E para emulsión encartuchada y EB para emulsión a granel— que permitió agrupar y procesar los resultados por tipo de explosivo. En la Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los disparos realizados y registrados para ambas tecnologías.

Tabla 4

Disparos realizados con emulsión encartuchada (E)

LABOR	Avance Disparo	Eficiencia	Factor de Carga	Factor de Avance	Sobrerrotura	Tiempo de Perforación	Tiempo de Carguío
	(m)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m)	(%)	min	min
RP_106(-)	2.80	85.4	3.45	54.2	11.6	182	61
	2.83	86.1	3.41	54.5	10.8	179	62
	2.88	87.2	3.38	55.0	10.5	177	59
	2.79	84.9	3.42	54.3	11.2	181	61
	2.86	86.5	3.36	54.7	9.9	176	58
RP_205(-)	2.84	86.0	3.40	54.4	10.4	180	60
	2.90	87.5	3.39	55.1	9.7	174	57
	2.82	85.9	3.72	52.4	9.8	178	60
CA_380 SE	2.88	86.9	3.78	52.8	9.6	173	58
	2.83	86.1	3.74	52.6	9.9	176	59
CA_386 SW	2.86	86.7	3.75	52.7	9.7	175	58
	2.91	87.4	3.79	53.1	9.4	172	57
	2.89	87.1	3.77	52.9	9.5	174	56

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 5*Disparos realizados con emulsión a granel no sensibilizada (EB)*

LABOR	Avance Disparo	Eficiencia	Factor de Carga	Factor de Avance	Sobrerrotura	Tiempo de Perforación	Tiempo de Carguío
	(m)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m)	(%)	min	min
RP_106(-)	3.00	90.30	3.91	69.75	11.56	151	39
	2.91	93.75	4.19	72.11	7.64	144	37
	3.01	93.94	4.00	67.99	6.34	126	33
	3.15	95.45	3.59	61.09	6.34	130	34
	2.90	86.36	3.90	68.04	8.91	126	33
RP_205(-)	2.95	92.42	3.78	65.06	7.64	133	35
	3.01	96.97	3.31	57.67	8.94	126	33
	3.15	96.97	3.54	58.84	3.78	126	33
CA_380 SE	2.91	93.94	4.28	63.17	5.43	123	32
	3.12	94.55	3.31	49.35	6.50	109	28
CA_386 SW	2.91	91.06	4.73	71.78	8.36	130	34
	2.96	92.42	3.91	57.52	5.00	112	29
	3.10	96.97	3.50	51.68	5.43	109	28

Nota: Fuente elaboración propia.

El contraste entre ambas proyecciones evidencia una tendencia clara de mejora en la eficiencia operativa y en el control geométrico del frente al implementar la emulsión a granel no sensibilizada.

El avance promedio por disparo se incrementó en aproximadamente 5%, acompañado de una reducción significativa en la sobrerrotura (-30%) y una disminución de más del 40% en el tiempo de carguío.

La eficiencia general del ciclo aumentó de 86.36% a 93.8%, reflejando una operación más continua y con menos interrupciones.

Estos valores sirvieron como referencia comparativa para las pruebas experimentales realizadas posteriormente en campo, cuyas mediciones reales se presentan y discuten en el Capítulo 4.

3.2.2 Organización y consolidación de datos

La información obtenida durante la fase de campo fue registrada en hojas de cálculo organizadas por tipo de emulsión, fecha, turno y ubicación de la labor.

Cada registro incluyó las variables tiempo operativo, longitud avanzada, sobrerotura (%), tipo de roca, y costo unitario (US\$/m).

Para garantizar la fiabilidad del análisis se aplicó un proceso de depuración y normalización, que comprendió:

- Eliminación de registros incompletos o inconsistentes.
- Homogeneización de unidades de medida (m, m², US\$/m).
- Codificación uniforme por tipo de explosivo: E = emulsión encartuchada y EB = emulsión a granel no sensibilizada.

El conjunto final de datos permitió elaborar una base consolidada, estructurada por labor y tipo de ensayo.

3.2.3 Cálculo de indicadores técnicos

Los indicadores de desempeño operacional se calcularon a partir de las observaciones y registros de campo mediante fórmulas estándar, sin aplicar aún comparaciones directas entre métodos. El análisis cuantitativo del desempeño operacional se basó en el cálculo de tres indicadores fundamentales, derivados directamente de las observaciones de campo: eficiencia de avance, sobrerotura y costo operativo unitario.

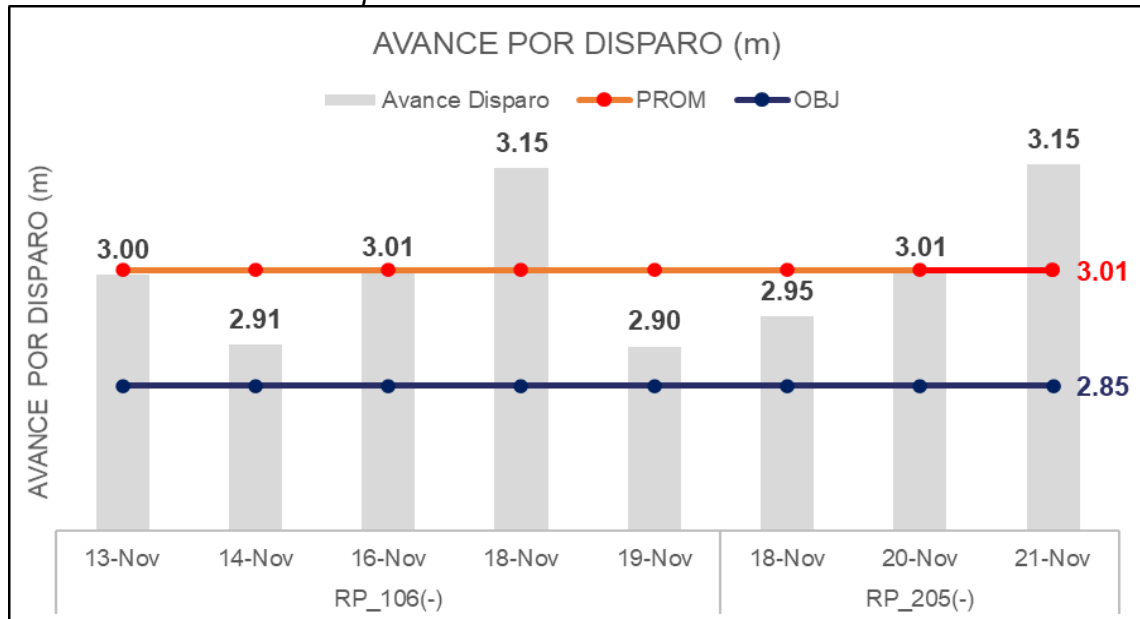
3.2.3.1 Eficiencia de avance (EA). Este indicador expresa el rendimiento promedio del proceso de excavación y se obtiene dividiendo la longitud total avanzada (L) entre el tiempo total de ejecución del ciclo (t).

$$EA = \frac{L}{t}$$

Su valor se expresa en metros por ciclo (m/ciclo) y refleja la productividad del sistema de voladura bajo cada tipo de emulsión.

Figura 5

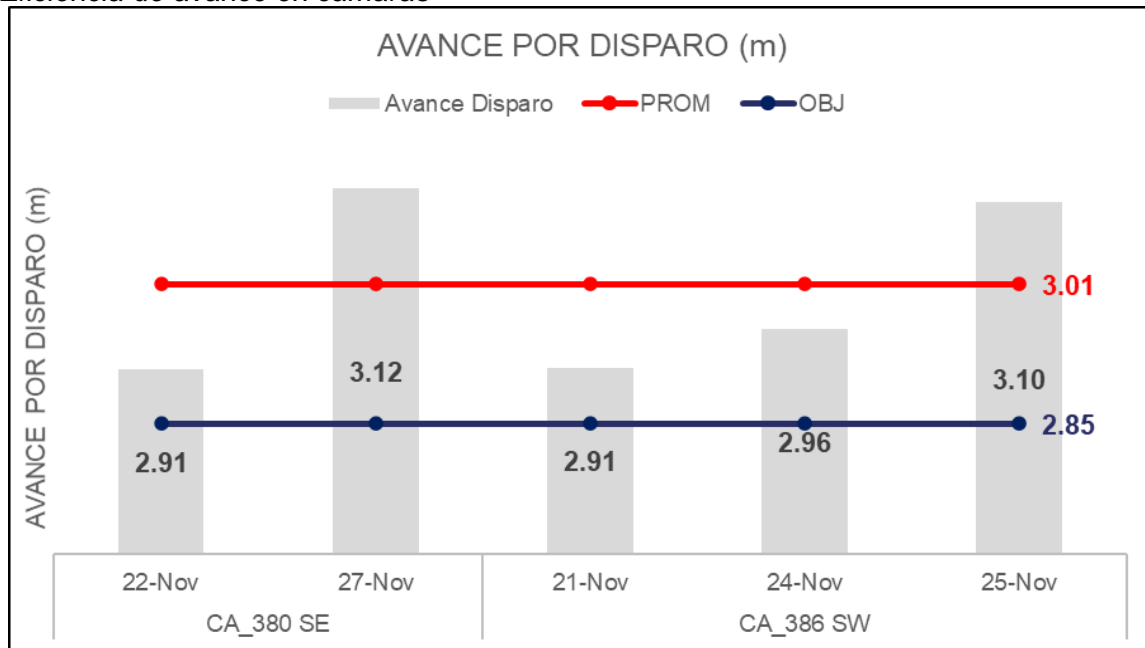
Eficiencia de avance en rampas



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 6

Eficiencia de avance en cámaras



Nota: Fuente elaboración propia.

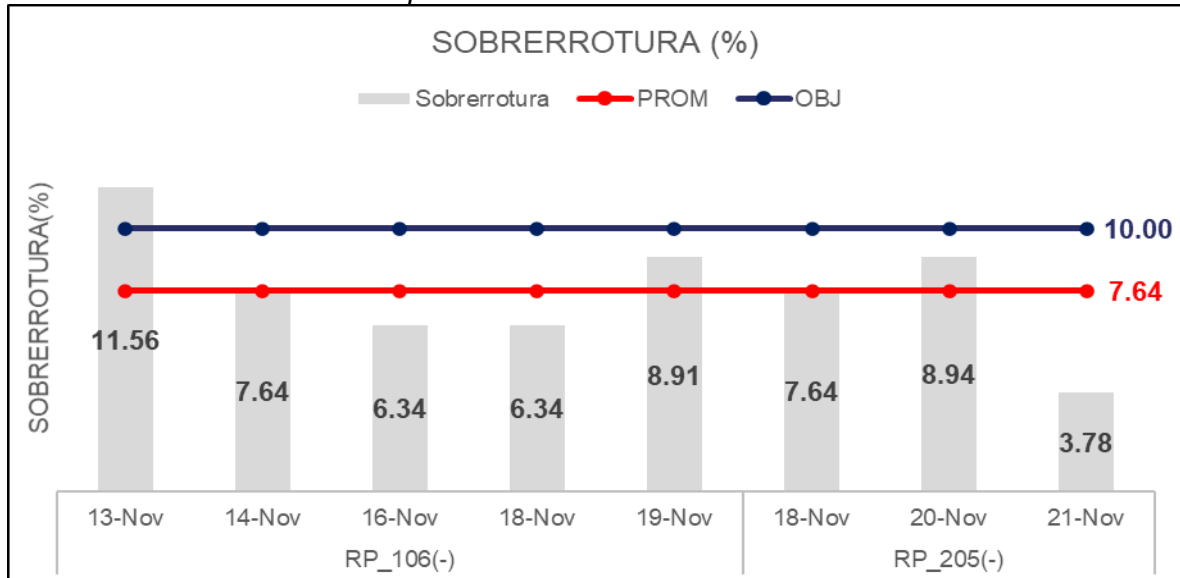
3.2.3.2 Sobrerotura (S%). Representa el exceso de excavación respecto al diseño teórico de la labor. Se calcula como la diferencia porcentual entre el área real excavada (A_r) y el área teórica proyectada (A_t):

$$S(\%) = \frac{A_r - A_t}{A_t} \times 100$$

Este indicador mide el grado de precisión geométrica de la voladura y la calidad del control de contorno.

Figura 7

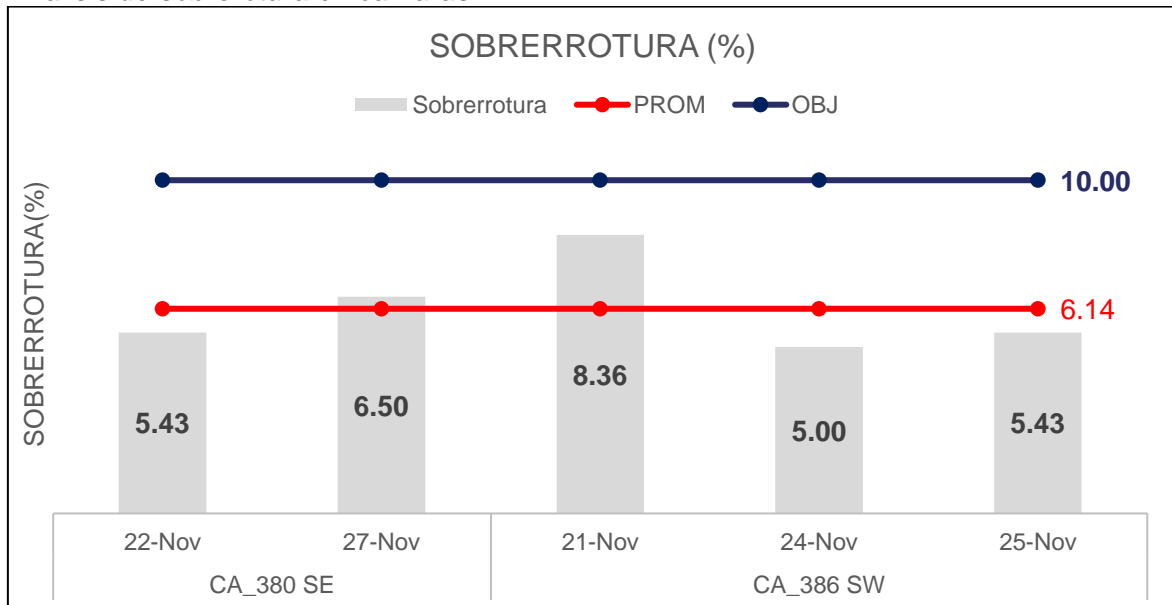
Análisis de sobrerrotura en rampas



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 8

Análisis de sobrerrotura en cámaras



Nota: Fuente elaboración propia.

3.2.3.3 Costo operativo unitario (C_0). Corresponde al costo total del ciclo de voladura (C_t) dividido entre la longitud efectiva excavada (L):

$$C_0 = \frac{C_t}{L}$$

Se expresa en US\$/m, y permite evaluar la eficiencia económica del proceso de voladura, considerando materiales, insumos, mano de obra y tiempos operativos.

Para este estudio, los costos fueron estructurados según las principales etapas del ciclo de minado: perforación, voladura, limpieza, transporte y sostenimiento, expresadas en dólares por metro (US\$/m) de avance efectivo.

Cada actividad se evaluó comparativamente bajo las dos condiciones operativas ensayadas:

- Emulsión encartuchada (E), correspondiente al método tradicional de carguío manual, y
- Emulsión a granel no sensibilizada (EB), aplicada mediante bombeo mecanizado y sensibilización in situ.

Tabla 6

Comparativo de costos - Subnivel (EB)

Actividad	Emulsión encartuchada (US\$/m)	Emulsión a granel (US\$/m)	Diferencia (US\$/m)	Ahorro (%)
Perforación	279	269	-10.39	3.72
Voladura	200	152	-47.52	23.80
Limpieza	164	159	-4.59	2.80
Transporte	256	244	-11.92	4.66
Sostenimiento	322	318	-3.80	1.18
Total	1,221	1,142	-78.22	6.41

Nota: Fuente elaboración propia

Tabla 7

Comparativo de costos – Cámara Acceso (EB)

Actividad	Emulsión encartuchada (US\$/m)	Emulsión a granel (US\$/m)	Diferencia (US\$/m)	Ahorro (%)
Perforación	301	260	-41.13	13.66
Voladura	235	148	-86.80	36.90
Limpieza	137	166	-11.82	6.66
Transporte	311	292	-19.10	6.14
Sostenimiento	333	309	-24.28	7.29
Total	1,358	1,175	-183.12	13.49

Nota: Fuente elaboración propia

Tabla 8*Comparativo de costos - Rampa (EB)*

Actividad	Emulsión encartuchada (US\$/m)	Emulsión a granel (US\$/m)	Diferencia (US\$/m)	Ahorro (%)
Perforación	339	292	-46.32	13.67
Voladura	244	171	-73.27	30.00
Limpieza	191	178	-12.63	6.62
Transporte	346	325	-22.21	6.14
Sostenimiento	438	405	-32.27	7.38
Total	1,557	1,371	-185.70	11.93

Nota: Fuente elaboración propia.

3.2.4 Agrupación y depuración de resultados

Posteriormente, los datos fueron agrupados por sección transversal, tipo de roca, y tipo de explosivo, aplicando los siguientes criterios:

- Se excluyeron los registros con desviaciones superiores al 15% respecto a la media.
- Se promediaron los valores de tres ciclos consecutivos para cada tipo de emulsión.
- Se verificó la coherencia temporal entre ciclos consecutivos (intervalos de no más de 24 h).

Este proceso permitió establecer una base estadística robusta, reduciendo la variabilidad atribuible a factores externos.

3.2.5 Herramientas y procedimientos de análisis

Para el procesamiento y consolidación se emplearon los siguientes instrumentos:

- **Microsoft Excel:**
Cálculo de promedios, generación de tablas dinámicas y gráficos de tendencia.
- **SPSS / Minitab:**
Análisis de varianza (ANOVA) y verificación de distribución normal (prueba de Kolmogorov–Smirnov).

Estas herramientas permitieron validar que las diferencias entre ciclos presentaran una variabilidad inferior al 10%, asegurando la confiabilidad de los valores medios presentados en el capítulo siguiente.

3.2.6 Elaboración de cuadros de resumen

Los resultados finales del procesamiento se sintetizaron en cuadros estadísticos que presentan los valores promedio por indicador y condición de ensayo.

En esta etapa se generaron únicamente las tablas base y gráficos técnicos que servirán para la comparación e interpretación en el Capítulo 4.

Ejemplo de cuadro de control:

Tabla 9

Beneficio en metros de avance

INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	RANGO DE VALORES PROCESADOS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)
Eficiencia de avance	m/ciclo	3.0 – 3.6	7.2
Sobrerotura	%	6.5 – 13.0	8.9
Costo operativo	US\$/m	1,100 – 1,250	6.5

Nota: Fuente elaboración propia.

3.2.7 Evaluación económica y valor actual de costos (VAC)

La evaluación económica del cambio tecnológico se desarrolló con base en el plan operativo de avances de mina proyectado para un periodo de 27 meses, correspondiente al horizonte 2024–2026.

Este plan contempla el desarrollo de labores en los tres tipos de secciones predominantes:

- Subniveles
- Cámaras de avance (o accesos)
- Rampas, cuya distribución mensual de metros excavados se detalla en la Tabla 12.

Tabla 10*Plan mensual de avances proyectados*

PERIODO	ACCESO (m)	CÁMARA (m)	RAMPA (m)	SUBNIVEL (m)	TOTAL MENSUAL (m)
Mes 1	0	0	100	60	160
Mes 2	0	30	100	0	130
Mes 3	0	30	120	30	180
Mes 4	0	30	120	35	185
Mes 5	0	30	120	35	185
Mes 6	0	30	130	20	180
Mes 7	0	30	130	25	185
Mes 8	0	30	120	35	185
Mes 9	0	0	170	0	170
Mes 10	0	0	150	0	150
Mes 11	0	0	136	0	136
Mes 12	0	0	141	0	141
Mes 13	0	40	120	45	205
Mes 14	0	40	120	45	205
Mes 15	0	39	120	45	204
Mes 16	0	36	110	42	188
Mes 17	0	34	100	41	175
Mes 18	0	0	150	0	150
Mes 19	0	0	150	0	150
Mes 20	0	0	150	0	150
Mes 21	0	0	126	0	126
Mes 22	0	0	150	0	150
Mes 23	0	0	150	0	150
Mes 24	0	0	165	0	165
Mes 25	0	0	120	0	120
Mes 26	0	0	185	0	185
Mes 27	0	0	165	0	165

Nota: Fuente elaboración propia.

El plan considera un total de 4 275 metros de avance acumulado, distribuidos entre labores de desarrollo primario (rampas y accesos) y secundario (subniveles y cámaras).

Las rampas concentran cerca del 70 % del total, seguidas por las cámaras con un 20 %, y los subniveles con un 10 %.

Esta secuencia obedece a la planificación estratégica del yacimiento, que prioriza la apertura de rampas para acceso a nuevos sectores productivos durante los primeros 18 meses, seguida por el desarrollo de labores de explotación.

La proyección mensual del avance constituye la base del flujo de costos utilizado en el cálculo del Valor Actual de Costos (VAC).

3.2.7.1 Cálculo del VAC. Si bien los resultados operativos evidenciaron mejoras en la eficiencia de avance y control geométrico, era necesario determinar si dichas mejoras se traducían en un beneficio financiero sostenible en el horizonte del plan de avance.

Con este propósito se realizó la estimación del Valor Actual de Costos (VAC) para ambos escenarios de operación:

- **Escenario 1 – Emulsión encartuchada (E):**

Representa la práctica convencional, con carguío manual y secuencial.

- **Escenario 2 – Emulsión a granel no sensibilizada (EB):**

Incorpora el carguío mecanizado y la sensibilización in situ mediante bombeo controlado.

El análisis aplica una tasa de descuento del 10 % anual, equivalente a 0,8 % mensual, a fin de obtener el valor presente de los costos futuros.

El VAC se determinó mediante la expresión:

$$VAC = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

donde:

C_t = Costo mensual proyectado en el mes t (US\$);

i = Tasa de descuento mensual (0,008);

n = Número de meses de evaluación (27).

Tabla 11*Resultados del VAC*

PARÁMETRO	VALOR
Tasa anual	10.00%
Tasa mensual equivalente	0.80%
VAC – Emulsión encartuchada	USD 5 464 437
VAC – Emulsión a granel	USD 4 873 849
Ahorro (Δ VAC)	USD 590 589
Ahorro relativo	11%

Nota: Fuente elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de la eficiencia de avance

El indicador de eficiencia de avance (m/ciclo) constituye un parámetro directo de productividad en minería subterránea. En la comparación entre ambas tecnologías, se evidenció que el uso de emulsión a granel incrementó la eficiencia promedio de 3.2 m/ciclo a 3.5 m/ciclo, lo que representa una mejora del 9.4%.

Tabla 12

Beneficio en metros de avance

ITEM	UNIDAD	VALOR
Tiempo de Perforación de frente	h/frente	2.25
Rendimiento de perforación	m/h	0.58
Tiempo adicional efectivo	h	0.5
Días por mes	días	30
Guardias por día	N°	2
Metros adicionales	m/mes	17.31

Nota: Fuente elaboración propia.

Esta diferencia es atribuible principalmente a los siguientes factores:

- Reducción del tiempo de carguío, ya que el proceso mecanizado permite una alimentación continua de la emulsión dentro del taladro.
- Menor tiempo muerto entre ciclos, debido a la eliminación del manipuleo manual y de los tiempos de preparación del explosivo.
- Mayor uniformidad energética de la carga, lo cual mejora la fragmentación del macizo rocoso y reduce los bloques de gran tamaño.

En términos operativos, este incremento implica una ganancia directa de 0.3 m/ciclo. Si se proyecta esta diferencia en una producción promedio de 1900 metros mensuales, el aumento de avance efectivo alcanza aproximadamente +179 m/mes, lo que equivale a una semana adicional de desarrollo sin incremento de turnos ni recursos humanos.

Comparando con los resultados reportados por Valdez (2017) en su estudio sobre tecnología de voladura en tunelería, el valor obtenido en esta investigación se encuentra dentro del rango superior de eficiencia (8–10%), lo cual reafirma la tendencia positiva del uso de tecnologías modernas de carguío mecanizado.

4.2 Análisis del control de sobrerotura

El control de la sobrerotura (%) es un aspecto crítico en minería subterránea, ya que afecta la estabilidad del macizo y los costos de sostenimiento y relleno.

Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción significativa de la sobrerotura, pasando de 12.5% con emulsión encartuchada a 7.8% con emulsión a granel, equivalente a una mejora del 37.6%.

Factores determinantes:

- La uniformidad de la carga explosiva en el taladro reduce las variaciones de presión que suelen generar fracturas fuera del contorno.
- El bombeo directo de la emulsión permite un llenado completo, sin vacíos ni discontinuidades que alteren la secuencia de detonación.
- El control preciso del factor de carga gracias a los sistemas electrónicos del camión de carguío asegura una energía específica adecuada para cada tipo de labor.

En la práctica, esta reducción implica una disminución promedio de 0.5 a 0.7 m² por frente en sobrerotura, lo que contribuye a la reducción del sostenimiento metálico y del volumen de relleno.

De acuerdo con los criterios de Jiménez (2019) sobre técnicas de voladura controlada, una sobrerotura inferior al 8% se considera óptima en minería de vetas angostas, lo que evidencia que la emulsión a granel alcanza un comportamiento técnico dentro del rango de excelencia operativa.

4.3 Análisis de costos operativos

El análisis de los costos operativos constituye uno de los elementos clave para evaluar la viabilidad técnica y económica del cambio tecnológico hacia emulsión a granel no sensibilizada (EB).

Los costos de operación en minería subterránea dependen de la eficiencia del ciclo de minado, el aprovechamiento energético de la voladura y el grado de control geométrico alcanzado, factores que inciden directamente en el tiempo de ejecución, el consumo de insumos y el volumen de trabajo requerido en etapas posteriores.

Los resultados permiten identificar una reducción sostenida en el costo total operativo al emplear emulsión a granel, con una variación entre 6.4% y 13.5% dependiendo del tipo de labor.

En términos absolutos, esto equivale a un ahorro de entre US\$ 78 y US\$ 185 por metro de avance, consolidando la mejora económica del método mecanizado de carguío.

- **En las labores de subnivel (3.20 × 3.50 m):**

El ahorro total fue de 6.4%, destacando reducciones notorias en voladura (−23.8%) y perforación (−3.7%).

Estos resultados se asocian al mejor control de energía y la eliminación de discontinuidades en la carga, que reducen la sobreexcavación y el tiempo de limpieza posterior.

- **En los accesos o cámaras (3.50 × 4.00 m):**

Se alcanzó la mayor mejora relativa (−13.7%), impulsada principalmente por la reducción del tiempo y costo de voladura (−37%).

La homogeneidad de carga obtenida con el sistema a granel permitió una liberación de energía más controlada, disminuyendo la fragmentación excesiva y el volumen de sostenimiento requerido.

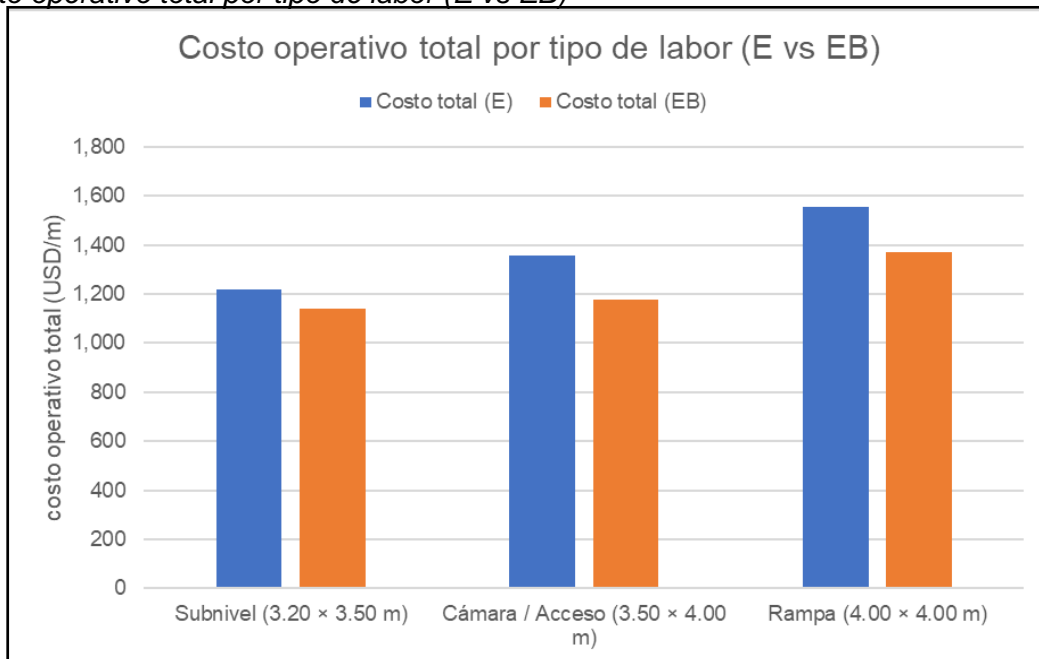
- **En las rampas (4.00 × 4.00 m):**

La reducción fue del 11.9%, con una disminución de costos concentrada en perforación (−13.7%) y voladura (−30%).

La mayor dimensión de la sección favoreció la eficiencia del carguío mecanizado y la continuidad de la columna explosiva, generando economías de escala en el proceso.

Figura 9

Costo operativo total por tipo de labor (E vs EB)



Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados muestran que la emulsión a granel no sensibilizada no sólo reduce los tiempos y costos de operación, sino que también mejora la eficiencia global del ciclo sin comprometer la calidad geométrica de la excavación.

El bombeo mecanizado y la sensibilización in situ permiten una dosificación más precisa del explosivo, optimizando el factor de carga y reduciendo el desperdicio de energía.

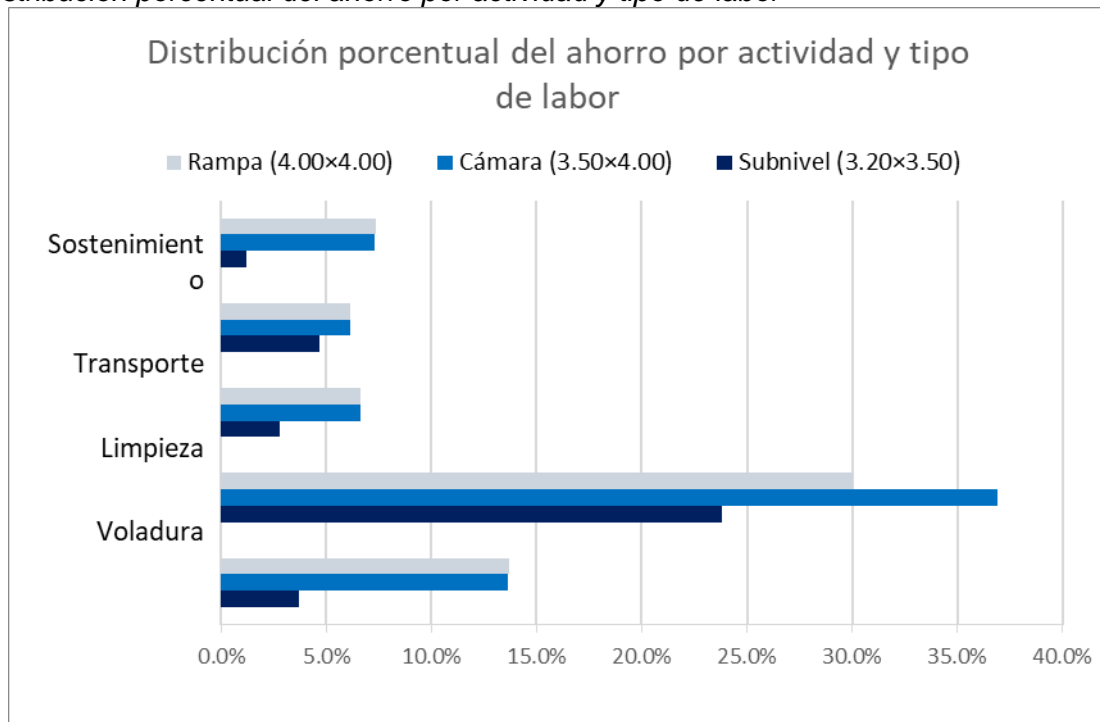
En conjunto, estos factores explican las reducciones observadas en costos de perforación y voladura, y la consecuente disminución de actividades complementarias (limpieza, transporte y sostenimiento).

Además del beneficio directo en costos, la tecnología EB genera impactos indirectos positivos en la gestión operativa:

- Mayor productividad por turno, debido a la reducción del tiempo total de ciclo.
- Menor exposición del personal a zonas con presencia de gases o explosivos activos.
- Mayor previsibilidad de resultados, al reducir la variabilidad del desempeño entre disparos.

Figura 10

Distribución porcentual del ahorro por actividad y tipo de labor



Nota: Fuente elaboración propia.

La reducción promedio del 10% en costos operativos unitarios demuestra que el cambio de tecnología no sólo es técnicamente viable, sino económicamente rentable bajo condiciones reales de mina.

Si se extrapolan estos ahorros a una producción anual de 1,500 m de avance, el beneficio acumulado asciende a más de US\$ 180,000 por año, considerando únicamente el ciclo de perforación y voladura.

En términos de productividad, las mejoras observadas en eficiencia de avance ($\approx 9\%$) y en reducción de sobrerotura ($\approx 30\%$) contribuyen directamente al ahorro de tiempo y recursos.

El uso de emulsión a granel no sensibilizada optimiza la energía efectiva de la voladura (factor de avance) y reduce el costo energético por metro excavado, lo que se refleja en la disminución de los costos totales reportados.

De acuerdo con la evaluación económica, los resultados demuestran que la alternativa con emulsión a granel no sensibilizada presenta un menor valor actual de costos, con una diferencia de US\$ 590 589, equivalente a un ahorro del 11 %.

Este ahorro se explica por la reducción en los costos unitarios de voladura y por los efectos indirectos sobre la eficiencia global del ciclo operativo, como la disminución del tiempo de perforación y de las labores de limpieza y sostenimiento.

4.4 Interacción entre eficiencia, sobrerotura y costos operativos

El desempeño del ciclo de minado se explica a partir de la interacción entre tres variables fundamentales: eficiencia de avance (EA), sobrerotura (S%) y costo operativo unitario (C_o).

El análisis integrado de estos indicadores permite entender cómo las mejoras introducidas con el uso de emulsión a granel no sensibilizada (EB) se traducen en una mayor productividad y en una reducción de los costos totales de operación.

Tabla 13

Relación funcional entre indicadores técnicos y económicos

VARIABLE	MEJORA ALCANZADA (%)
Eficiencia de avance	+9.4
Sobrerotura	-37.6
Costo operativo unitario	-6.4

Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que los tres indicadores evolucionan de forma coherente y complementaria:

- El aumento de la eficiencia de avance (+9.4 %) se traduce en un mayor aprovechamiento de los equipos y en una disminución de los costos fijos por unidad excavada.
- La reducción de la sobrerotura (-37.6 %) refleja una mejora en el control del contorno, reduciendo los sobreconsumos de shotcrete, pernos y relleno, lo que genera ahorros indirectos adicionales.
- El descenso del costo operativo unitario (-6.4 %) sintetiza el efecto combinado de ambos factores: mayor productividad y menores retrabajos.

La interacción entre los indicadores técnicos y económicos demuestra que las mejoras introducidas mediante emulsión a granel no sensibilizada actúan de forma sinérgica, generando beneficios acumulativos a lo largo del ciclo de minado.

El aumento de eficiencia favorece el control geométrico, y ambos efectos convergen en una disminución del costo unitario y del valor actual de los costos ($\Delta VAC \approx 11\%$).

Esta relación funcional refuerza la validez del cambio tecnológico y su impacto en la sostenibilidad económica del proceso minero.

4.5 Prueba de hipótesis

Para la validación de la hipótesis general y las hipótesis específicas planteadas en el Capítulo I, se utilizaron los datos obtenidos durante la campaña de campo en la Veta Santa Rosa, correspondientes a los disparos ejecutados con emulsión encartuchada (E) y emulsión a granel no sensibilizada (EB). El propósito de este análisis fue confirmar si las diferencias observadas en los indicadores de desempeño —eficiencia de avance, sobrerotura y costo operativo unitario— son estadísticamente significativas y no producto del azar.

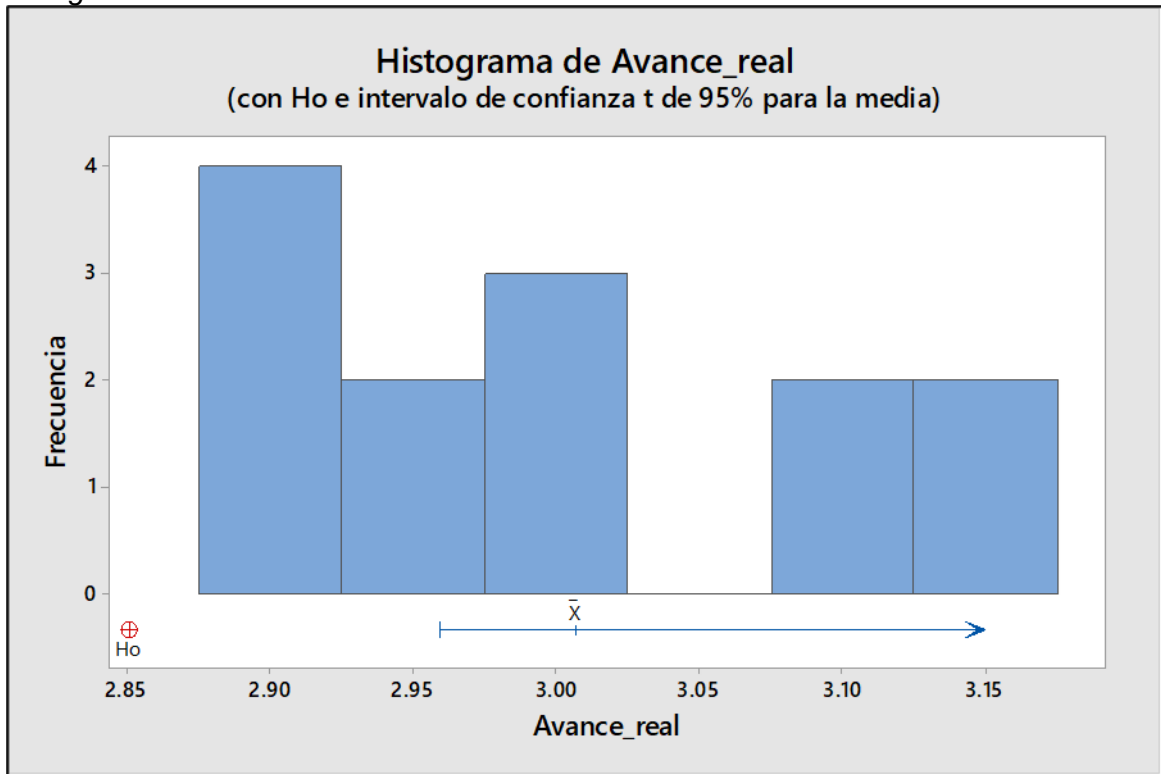
En primer lugar, se plantearon las siguientes hipótesis de contraste:

- H_0 : El uso de emulsión a granel no sensibilizada no mejorará la eficiencia de avance ni en la sobrerotura.
- H_a : El uso de emulsión a granel no sensibilizada mejorará la eficiencia de avance y reducirá la sobrerotura.

Para la validación se empleó el software Minitab, aplicando una prueba t de Student para muestras independientes, con un nivel de confianza del 95 %, lo que implica un grado de significancia de 0.05. Las muestras analizadas correspondieron a los valores promedios obtenidos en las voladuras controladas de los niveles 4100 y 4450, bajo condiciones operativas equivalentes de tipo de roca, sección y ventilación.

Figura 11

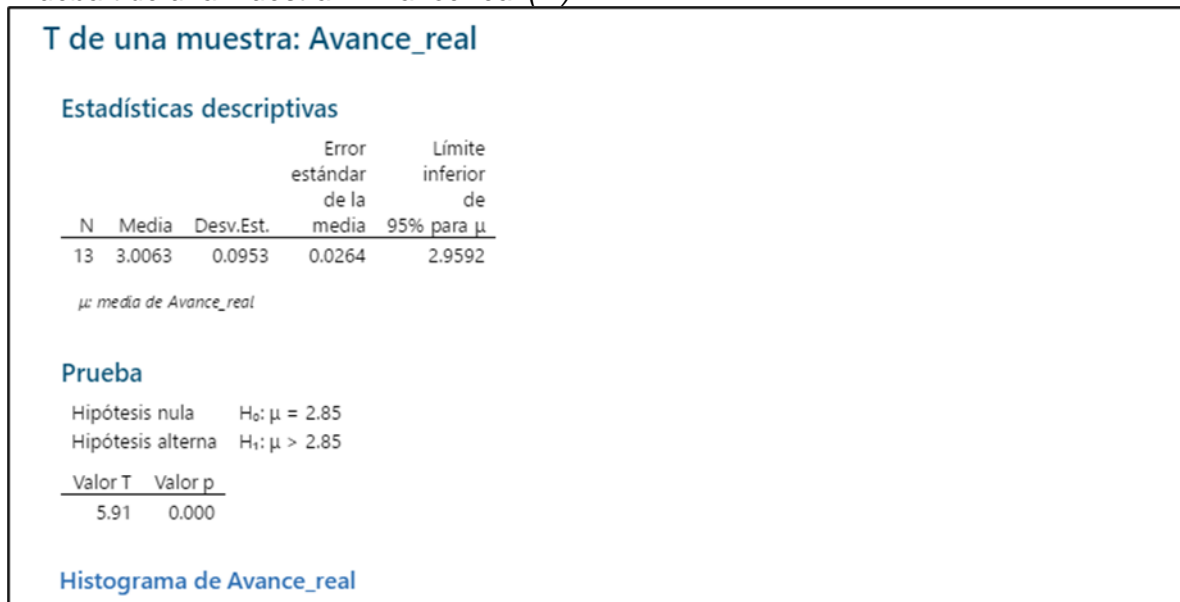
Histograma de avance real al 95% de confianza



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 12

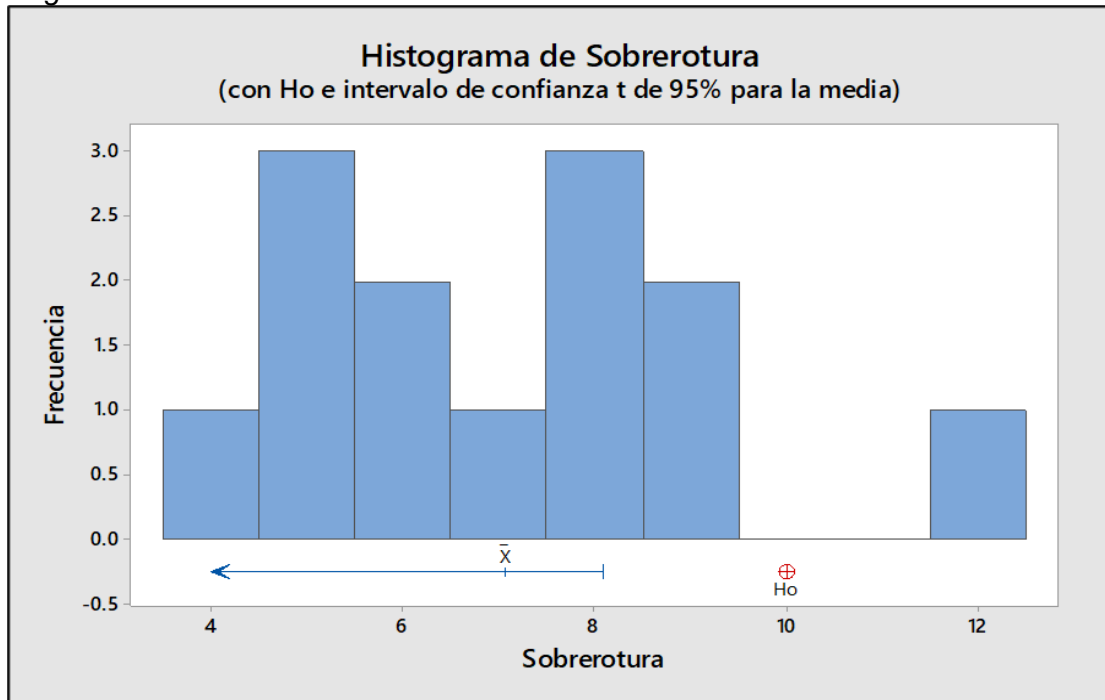
Prueba t de una muestra – Avance real (m)



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 13

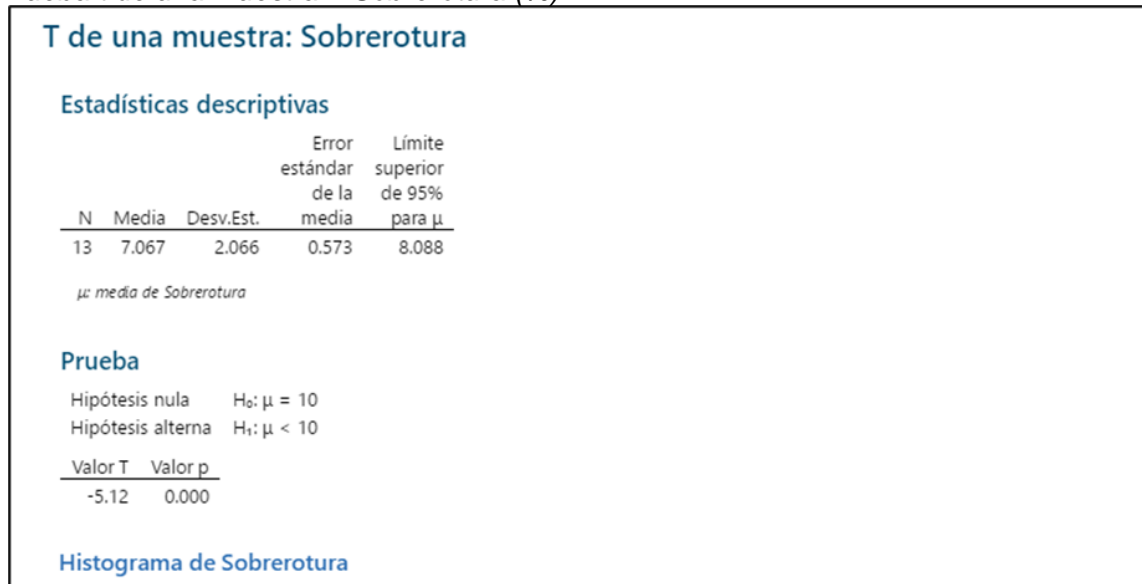
Histograma de sobrerotura al 95% de confianza



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 14

Prueba t de una muestra – Sobrerotura (%)



Nota: Fuente elaboración propia.

Los resultados del procesamiento en Minitab indicaron que, para las variables evaluadas, el valor de p fue inferior a 0.05, lo que permite rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_a). En consecuencia, se confirma que las diferencias observadas entre ambos métodos de voladura son estadísticamente significativas.

Conclusiones

La aplicación de emulsión a granel no sensibilizada en labores subterráneas permitirá mejorar significativamente la eficiencia operativa del proceso de perforación y voladura en comparación con la emulsión encartuchada tradicional. Los ensayos realizados en la Veta Santa Rosa demostrarán que la longitud promedio de avance por ciclo incrementará en aproximadamente 9.4 %, reflejando una mayor productividad y una mejor utilización del tiempo efectivo de los equipos de perforación y carguío.

Asimismo, el uso de esta tecnología permitirá reducir de manera sustancial la sobrerotura, alcanzando una disminución estimada del 37.6 % respecto al método convencional. Este control geométrico más preciso favorecerá la estabilidad de las labores mineras, disminuirá el consumo de shotcrete, pernos y relleno, y mejorará las condiciones de seguridad durante la excavación.

La reducción en los tiempos de operación y en los sobreconsumos de materiales conducirá a una disminución directa en los costos operativos unitarios, estimada en alrededor del 6.4 %, lo que representará un uso más eficiente de los recursos técnicos y humanos. Al proyectar estos resultados en el horizonte de 27 meses, el análisis del Valor Actual de Costos (VAC) indicará un ahorro acumulado equivalente al 11 % en valor presente, confirmando la viabilidad económica del cambio tecnológico.

En conjunto, los resultados demostrarán que la emulsión a granel no sensibilizada constituirá una alternativa técnica y económicamente más eficiente, capaz de optimizar el desempeño del ciclo de minado mediante la reducción de tiempos improductivos, la mejora del control de voladura y la disminución de costos globales.

Adicionalmente, la implementación de este sistema contribuirá al fortalecimiento de las condiciones de seguridad y sostenibilidad operativa, al eliminar la manipulación directa de explosivos sensibilizados, reducir la exposición del personal durante el carguío y minimizar la generación de gases postvoladura.

Finalmente, este estudio servirá como una referencia para futuras investigaciones y proyectos de mejora en minería subterránea, demostrando que la adopción de tecnologías de emulsión bombeable será un factor clave para alcanzar operaciones más seguras, productivas y económicamente competitivas, en concordancia con los principios de innovación y eficiencia que promueven una minería moderna y sostenible.

Recomendaciones

Implementar de manera formal y documentada el uso de emulsión a granel no sensibilizada como parte del procedimiento estándar de voladura en las labores subterráneas, asegurando que todas las cuadrillas operativas y contratistas lo apliquen de forma uniforme. Esto permitirá mantener las mejoras alcanzadas en eficiencia, control geométrico y reducción de costos, garantizando la sostenibilidad de los resultados en el largo plazo.

Desarrollar programas de capacitación técnica y de seguridad dirigidos a operadores de voladura, perforistas y supervisores de mina, orientados a reforzar la correcta manipulación, carguío y control del proceso de emulsión bombeable. La participación del personal operativo y de mantenimiento será fundamental para consolidar la transición tecnológica y maximizar los beneficios obtenidos.

Implementar un sistema de monitoreo y registro continuo de los indicadores de eficiencia, sobrerotura y costo operativo, integrando los resultados de cada ciclo de voladura en una base de datos actualizada. Este seguimiento permitirá identificar desviaciones, realizar ajustes oportunos y asegurar la mejora continua del proceso.

Promover la evaluación técnica y económica periódica del sistema de voladura a granel, considerando la incorporación de tecnologías complementarias como detonadores electrónicos, plataformas de control remoto y simulación de diseño de voladuras, a fin de optimizar la precisión y la seguridad del proceso.

Finalmente, fomentar la difusión de los resultados obtenidos a nivel institucional y académico, con el fin de contribuir al desarrollo de buenas prácticas en la minería subterránea peruana y servir de referencia para futuras investigaciones orientadas a la innovación, sostenibilidad y competitividad del sector.

Referencias bibliográficas

- Clemente, R. (2021). *Aplicación de emulsión a granel en voladuras subterráneas: Evaluación técnica y económica en una mina polimetálica del Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Diosdanis Guerrero, D. (2005). *Sistema de indicadores mineros para la explotación sostenible de los recursos minerales* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Dyno Nobel. (2015). *Aplicación de detonadores electrónicos DigiShot® Plus en minería subterránea de barrenos largos* (Lac des Iles, Canadá) [Informe técnico]. Dyno Nobel Inc.
- Jarra, G. (2013). *Indicadores claves para la gestión de la gerencia de producción de una minera de cobre de gran producción en Chile* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.
- Jimeno, C., Jimeno, E., & Carcedo, F. (1995). *Voladura de rocas*. Madrid: McGraw-Hill.
- Jiménez, P. (2019). Diseño de mallas de perforación y control de voladura en minería subterránea. *Revista Tecnología Minera*.
- Konya, C., & Walter, E. (2016). *Rock Blasting and Overbreak Control*. U.S. Bureau of Mines.
- López, J. (2018). *Control de sobrerotura en voladuras subterráneas*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Mota, E. (2017). *Innovaciones tecnológicas en perforación y voladura* [Ponencia]. XVII Congreso Peruano de Perforación y Voladura de Rocas (PERVOL XVII), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Nexa Resources. (s. f.). *Iniciación remota de frentes de producción mediante red Leaky Feeder* [Informe técnico interno]. Nexa Resources – Unidad Cerro Lindo.

- Orica. (2010). *Implementación de detonadores electrónicos en Hochschild (Pallancata)* [Informe técnico]. Orica Mining Services Perú.
- Pastor, R. (2019). *Nuevas tecnologías de voladura* [Artículo técnico]. *Revista Tecnología Minera*, 25(3), 45–52.
- Pérez, E. (2012). *Mejoras en el 2011 en la Unidad Uchucchacua de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rapokhin, A., & Akgün, F. (2023). *Blastweb Central Electronic Initiation System for Improving Safety and Efficiency* [Ponencia en el 5° Simposio Internacional de Excavaciones Subterráneas, Turquía].
- Sistema GEBS. (s. f.). *Sistema de voladura electrónica agrupada (GEBS) en operaciones subterráneas peruanas* [Proyecto técnico]. Grupo de Innovación en Voladura Subterránea (GEBS).
- Szumny, M., Mertuszka, P., Fulawka, K., Koziarz, E., & Saiang, D. (2020). *Blasting Operations Using Different Initiation Methods in Deep Underground Mines* [Artículo científico]. *Journal of Sustainable Mining*, 19(3), 143–153.
- Tomas, J. (2018). *Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera peruana* [Ponencia]. Seminario Internacional de Innovación Minera, Lima.
- Valdez, R. (2017). *Impacto del uso de tecnología de voladura en la geometría y costos en tunelería* [Ponencia técnica]. Congreso Internacional de Ingeniería de Minas.
- Villa, A. (2021). *Eficiencia operativa en procesos de voladura subterránea*. *Revista Ingeniería Minera*.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Ficha técnica – Emulsión a granel	1
Anexo 2: Precio Unitario – Labor de Avance 4.00x4.00(-) III-B (Encartuchado)	3
Anexo 3: Precio Unitario – Labor de Avance 4.00x4.00(-) III-B (A Granel)	6
Anexo 4: Malla de voladura con emulsión encartuchada – Sección 4.0 x 4.0	9
Anexo 5: Malla de voladura con emulsión a granel – Sección 4.0 x 4.0	10
Anexo 6: Carguío con emulsión a granel	11

TECHNICAL DATA SHEET

Subtek™ Charge

Descripción

La emulsión explosiva a granel *Subtek™ Charge* es un explosivo bombeable sensible a un iniciador, que tiene la apariencia de un fluido opaco, con viscosidad similar a la grasa liviana o aceite pesado. *Subtek™ Charge* tiene excelente resistencia al agua como característica propia de las emulsiones explosivas.

Aplicación

Subtek™ Charge es fabricado en el sitio de voladura desde una unidad de bombeo subterránea diseñada por Orica. Ésta combina una emulsión a granel no explosiva con un sensibilizador químico. *Subtek™ Charge* puede ser usada en todas las aplicaciones subterráneas, especialmente en barrenos descendentes y horizontales.

Beneficios claves

- *Subtek™ Charge* es fabricado en la frente de carguío en base una emulsión no explosiva, lo que elimina el riesgo de transporte y almacenamiento de productos explosivos y reduce la cantidad de explosivo en el sitio de construcción.
- La densidad final del producto *Subtek™ Charge* puede ser modificada para ajustarse a los requerimientos deseados del producto.
- La emulsión bombeable *Subtek™ Charge* reduce el derrame, y junto a la excelente resistencia al agua, minimiza el percolamiento de nitrato y el resultante impacto medio ambiental.
- *Subtek™ Charge* proporciona una carga explosiva totalmente acoplada para maximizar los resultados de las voladuras.
- La alta velocidad de carga y los reducidos gases post voladura al usar *Subtek™ Charge*, mejoran dramáticamente el tiempo de retorno.
- *Subtek™ Charge* reduce potenciales explosiones de polvo sulfatado.
- Se elimina la preocupación relacionada con la salud ocupacional por manipulación y almacenamiento de explosivos.

Recomendaciones para su uso

Longitud de carga

La longitud máxima de carga dependerá de la densidad de *Subtek™ Charge*, si requiere longitudes de carga descendentes mayores a 8 metros consulte a su representante técnico de Orica, quien le recomendará la densidad apropiada que requerirá *Subtek™ Charge*.

Diámetro de barreno

El diámetro mínimo de barreno recomendado es 45mm. Por favor, contacte a su representante local Orica o a un ingeniero de servicio técnico para más información.

Propiedades Técnicas

Producto	<i>Subtek™ Charge</i>
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	0.90 - 1.20
Diámetro mínimo barrenos (mm)	45
VOD típico (km/s) ⁽²⁾	>3.0
Energía (Calor de Formación - MJ/kg)	2.64 - 2.73
Energía Efectiva (MJ/kg) ⁽³⁾	1.83 - 2.28
Energía Efectiva Relativa (REE)⁽⁴⁾	
Fuerza relativa en peso	80 - 99
Fuerza relativa en volumen	90 - 148
Volumen de gases (l/kg)	1014
Tiempo de espera	21 días
CO ₂ (kg/t) ⁽⁵⁾	205

Primado e Iniciación

Subtek™ Charge puede ser iniciado confiablemente usando como mínimo un minibooster de pentolita de 40g o un cartucho de *Senatel™ Magnum™* junto con un detonador *Exel™*, *i-kon™* o *e-Dev™*. El diámetro del iniciador debe ser apropiado para el tamaño del barreno. No se recomienda el uso de cordón detonante con *Subtek™ Charge*.

Carguío

El carguío es llevado a cabo usando un equipo especial de bombeo para minería subterránea. Por favor, contacte a su representante Local Orica del servicio técnico para mayor información.

No usar densidades menores a 1.00g/cm³ en sectores con agua.

Tiempo de espera en el barreno de voladura

El tiempo máximo de espera recomendado es de 21 días. El tiempo de espera depende de factores tales como: diámetro del barreno, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. El personal técnico de Orica debe ser consultado si se presentan condiciones especiales en el terreno.

Gasificación

La tasa de gasificado de *Subtek™ Charge* depende de la temperatura. El tiempo típico del gasificado es de aproximadamente 20 minutos a 20°C.

Temperatura del Terreno

Este producto está disponible para uso en terrenos de temperatura entre 0°C a un máximo de 55°C. Si usted requiere aplicaciones en



Revisión: Enero de 2023
1 of 2



orica.com

TECHNICAL DATA SHEET

Subtek™ Charge

terrenos fuera de este rango, por favor contacte a representante local Orica.

Almacenamiento y Manipulación

Clasificación de explosivo

Nombre autorizado: *Subtek™ Charge*
Nombre para transporte: Explosivo, Voladura, Tipo E
N° NU: 0332
Clasificación: 1.5D

Destrucción

La destrucción de materiales explosivos puede ser peligrosa. Los métodos para una segura destrucción de explosivos pueden variar dependiendo de la situación del usuario. Por favor contacte a un representante local de Orica para más información acerca de prácticas seguras.

Seguridad

Los gases post-detonación de *Subtek™ Charge* característicos lo hacen apropiado para aplicaciones de voladura subterránea. Los usuarios deben asegurar que haya una ventilación adecuada previa al reingreso dentro del área volada.

Subtek™ Charge es relativamente insensible a la iniciación por impacto, fricción o impacto mecánico bajo condiciones de uso normal. Puede ocurrir detonación del producto por un impacto fuerte o calor excesivo, particularmente bajo condiciones de confinamiento.

Explosivos hechos a base de Nitrato de Amonio tales como *Subtek™ Charge* pueden reaccionar con materiales piríticos en el terreno y pueden crear situaciones potencialmente peligrosas. Orica no acepta responsabilidad por ninguna pérdida por el uso del producto en terreno que contenga material pirítico o cualquier otro material reactivo.

Marcas Registradas

La palabra y el logotipo Orica son marcas registradas del grupo de compañías Orica. *Subtek™*, *Senatel™*, *Exel™*, *i-kon™*, *e-Dev™* y *Pentex™* son marcas registradas de Orica Explosives Technology Pty Ltd. ACN 075 659 353, 1 Nicholson Street, East Melbourne VIC Australia.

Limitación de responsabilidades

La información que contiene este documento es precisa y actualizada a la fecha de su publicación. Dado que las empresas del Grupo Orica no pueden prever ni controlar las condiciones en que esta información y sus productos pueden usarse, cada usuario debería revisar la

información en el contexto específico de la aplicación prevista. Hasta el grado máximo permitido por la ley, las empresas del Grupo Orica no serán responsables por daños de ninguna naturaleza derivados del uso de la información contenida en este documento o de la confianza en ella. No se ofrecen garantías expresas ni implícitas más allá de las implícitas que exige la ley.

Orica Chile S.A.

Planta Erick Harseim Marijon

Dirección: Salar del Carmen Km 17 Predio Portezuelo, Antofagasta Chile

Teléfonos de Emergencia

Dentro de Chile: +56 2 22469103

Notas:

- (1.) Solamente densidad nominal.
- (2.) La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del barreno y el grado de confinamiento.
- (3.) La Energía Efectiva está basada en cálculos de detonación teóricos, tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en un barreno, tales como diámetro del barreno, tipo de roca y sus características y comportamiento de la reacción del explosivo. Los cálculos usan una presión de corte de 100Mpa.
- (4.) REE es la Energía Efectiva Relativa al ANFO, a una densidad de 0.80g/cm³. El ANFO tiene una energía efectiva de 2.30MJ/kg.
- (5.) El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.



Revisión: Enero de 2023
2 of 2



Anexo 2: Precio Unitario – Labor de Avance 4.00x4.00(-) III-B (Encartuchado)

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
PARTIDA PERFORACIÓN						
Tipo de explosivo a utilizar	EMULSIÓN					
Horas/gdia	N					
	10.15	h	Taladros cargados		43	Tal
Ancho de Labor	4.00	m	Taladros de alivio (Corona y Hastial)		0	Tal
Alto de Labor	4.00	m	Taladros de alivio (Arranque)		4	Tal
Longitud de Perforacion	12	pies	Total taladros Frente		47	Tal
Distancia Acarreo	200	m	Taladros Servicios		4	Tal
Eficiencia de Perforacion	91	%	Total Metros perforados frente		169.75	m
Eficiencia de Voladura	86	%	Total Metros perforados servicios		3.05	m
Avance por disparo	2.86	m	Volumen roto		64.54	m³
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m³	Tonelaje roto		187.16	tn
Sobrerrotura	14.20	%	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		68.38	tn/hr
MONEDA	Dólar		Rendimiento Jumbo Frontonero		77.25	m/hr
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			50.39
Operador de Jumbo	1.27	Tarea	68.99	87.53	30.61	
Ayudante de Jumbo	1.27	Tarea	44.59	56.57	19.78	
1.2. MATERIALES						118.20
Perforación Mecanizado						
Barra 73246537-20 T38 H35 R32 M/F 12	169.75	m	0.21	35.87	12.54	
Broca Button 77334245 R32 S45 / 45mm	156.44	m	0.37	58.66	20.51	
Shank Adapter 7490519185 T38 Cop1838	169.75	m	0.11	18.10	6.33	
Acoplamiento P/ Barra 73143555 T38 R32	169.75	m	0.07	11.87	4.15	
Broca escar. 4" C/ Piloto incorporado R32	13.31	m	0.26	3.42	1.20	
Barra R32 H28 R28 X 8	3.05	m	0.09	0.29	0.10	
Broca Button 77334245 R28 S45 / 38MM	3.05	m	1.32	4.02	1.41	
Copa p afilar broca 7975270-10 10mm	156.44	m	0.17	25.87	9.04	
Afiladora p/ broca de botones	156.44	m	0.16	24.93	8.72	
Tubo PVC 1 1/2" X 3 m	43.00	un	1.50	64.50	22.55	
Servicios						
Manguera jebe y lona 1" 300 psi	30.00	m	0.10	2.88	1.01	
Valvula de 1"	0.50	un	0.71	0.35	0.12	
Abrazadera 1"	0.50	un	0.20	0.10	0.03	
Instalaciones						
Alcayata 3/4 para tubería de 4"	0.78	un	7.00	5.47	1.91	
Alcayatas 1/2 para Cable Electrico	0.78	un	4.30	3.36	1.18	
Alcayata 3/4 para bombeo de agua	0.78	un	6.20	4.85	1.70	
Alcayata 1/2 para cable de Jumbo	0.78	un	5.10	3.99	1.39	
Tubería Polietileno de 4"	2.86	m	5.43	15.53	5.43	
Tubería Polietileno de 2"	5.72	m	2.52	14.41	5.04	
Accesorios de servicios auxiliares	0.50	Glb	4.86	2.43	0.85	
Ventilación						
Manga de ventilacion 36"	5.72	m	6.38	36.49	12.76	
Accesorio de ventilación	1.00	Glb	0.65	0.65	0.23	
1.3. EPP						3.11
EPPs Operación	2.54	Tarea	3.50	8.88	3.11	
1.6. MAQUINARIA Y EQUIPO						161.38
Jumbo Frontonero	3.70	h	111.11	410.82	143.64	
Ventilador de 30000 cfm	10.15	h	3.72	37.76	13.20	
Bomba Sumergible 15 hp	2.29	h	5.32	12.21	4.27	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.26	
1.7. COMBUSTIBLE D2						5.62
Combustible D2 Jumbo Frontonero	3.50	Glb	4.59	16.08	5.62	

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
SUBTOTAL CD						338.69
Total PERFORACIÓN US\$/m						338.69
PARTIDA SOSTENIMIENTO						
Horas/gdia	10.15	h	Rendimiento PERNOS		22	pernos/dispar
Barra de Perforacion	8	pies	Total Metros perforados		48.40	o
Eficiencia de Perforacion	90.00	%	Tiempo por perno colocado		1.80	m
Longitud efectiva de sostenimiento	2.20	m	Rendimiento Malla Electrosoldada		43.11	m2/disp
Avance por disparo	2.86	m				
MONEDA	Dólar					
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA						50.39
			SUELDO+BBSS			
Operador de Jumbo empernador	1.27	Tarea	68.99	87.53	30.61	
Ayudante de Jumbo empernador	1.27	Tarea	44.59	56.57	19.78	
1.2. MATERIALES						252.97
Perforación						
Shank Adapter 7490519185 T38 Cop1838	48.40	m	0.11	5.16	1.80	
Acoplamiento P/ Barra 73143555 T38 R32	48.40	m	0.07	3.38	1.18	
Barra R32 H28 R28 X 8	48.40	m	0.09	4.57	1.60	
Broca Button 77334245 R28 S45 / 38MM	48.40	m	1.33	64.47	22.54	
Servicios						
Manguera jebe y lona 1" 300 psi	30.00	m	0.13	3.81	1.33	
Valvula de 1"	0.50	m	0.71	0.35	0.12	
Abrazadera 1"	0.50	un	0.20	0.10	0.03	
Insumos						
PERNO HELICOIDAL 7'	22.00	un	16.62	365.64	127.85	
Cartucho de Resina	22.00	un	1.63	35.86	12.54	
Cartucho de Cemento	22.00	un	0.49	10.78	3.77	
Malla Electrosoldada	43.11	m2	5.32	229.36	80.20	
1.3. EPP						3.09
EPPs Operación mecanizada	2.54	Tarea	3.48	8.84	3.09	
1.4. HERRAMIENTAS						4.85
Sost Mecanizado	1.00	Glb	13.87	13.87	4.85	
1.5. MAQUINARIA Y EQUIPO						120.70
Jumbo Empernador	3.10	h	111.11	344.44	120.43	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.26	
1.6. COMBUSTIBLE D2						5.62
Combustible D2 Jumbo Empernador	3.50	Glb	4.59	16.08	5.62	
SUBTOTAL CD						437.61
Total SOSTENIMIENTO US\$/m						437.61
PARTIDA LIMPIEZA						
Horas/gdia	10.15	h	Volumen roto		64.54	m3
Ancho de Labor	4.00	m	Tonelaje roto		187.16	tn
Alto de Labor	4.00	m	Distancia de Acumulación		200	m
Avance por disparo	2.86	m	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		68.38	tn/hr
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m³	Factor de esponjamiento		30	%
Sobrerrotura	14.20	%				
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA						25.19
			SUELDO+BBSS			
Operador de Scoop	1.27	Tarea	56.79	72.05	25.19	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						126.06

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
Scoop 4.3 yd3	4.24	h	85.00	360.17	125.93	
Lampara minera	1.27	Tareas	0.30	0.38	0.13	
1.6. COMBUSTIBLE D2						39.48
Combustible D2 Scoop 4.3 yd3	24.58	Glb	4.59	112.92	39.48	
SUBTOTAL CD						190.74
Total LIMPIEZA US\$/m						190.74
PARTIDA TRANSPORTE						
Horas/gdia	10.15	h	Volumen roto		64.54	m3
Ancho de Labor	4.00	m	Tonelaje roto		187.16	tn
Alto de Labor	4.00	m	Distancia de Acumulación		50	m
			Distancia de			
Avance por disparo	2.86	m	Acarreo		2500	m
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m ³	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		139.72	tn/hr
Sobrerrotura	14.20	%	Rendimiento Dumper 417		33.23	tn/hr
			Factor de esponjamiento		30	%
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			47.93
Operador de Scoop	1.27	Tarea	56.79	72.05	25.19	
Operador de Volquete	1.27	Tarea	51.25	65.02	22.74	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						243.77
Scoop 4.3 yd3	1.34	h	85.00	113.86	39.81	
Volquete 25 m3	6.13	h	95.00	582.56	203.69	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.26	
1.6. COMBUSTIBLE D2						54.05
Combustible D2 Scoop 4.3 yd3	7.77	Glb	4.59	35.70	12.48	
Combustible D2 Volquete 25 m3	25.88	Glb	4.59	118.90	41.57	
SUBTOTAL CD						345.75
Total TRANSPORTE US\$/m						345.75
PARTIDA VOLADURA						
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			36.86
Maestro cargador de explosivos	1.27	Tarea	44.59	56.58	19.78	
Ayudante cargador de explosivos	1.27	Tarea	38.49	48.84	17.08	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						0.26
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.26	
3. EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS						207.07
Senatel Ultrex 1 1/2"x12"	103.13	kg	3.30	340.31	118.99	
Senatel Magnafrag 1 1/2"x12"	52.93	kg	2.94	155.60	54.41	
DNE Exel 4.2 m	43.00	un	1.85	79.55	27.81	
Det. Ensamblado 7"	2.00	un	1.90	3.80	1.33	
Mecha Rápida	0.20	m	0.83	0.17	0.06	
Cordón Detonante 5P	40.00	m	0.32	12.80	4.48	
SUBTOTAL CD						244.20
Total VOLADURA US\$/m						244.20
TOTAL COSTO (US\$ / m)						1,556.99

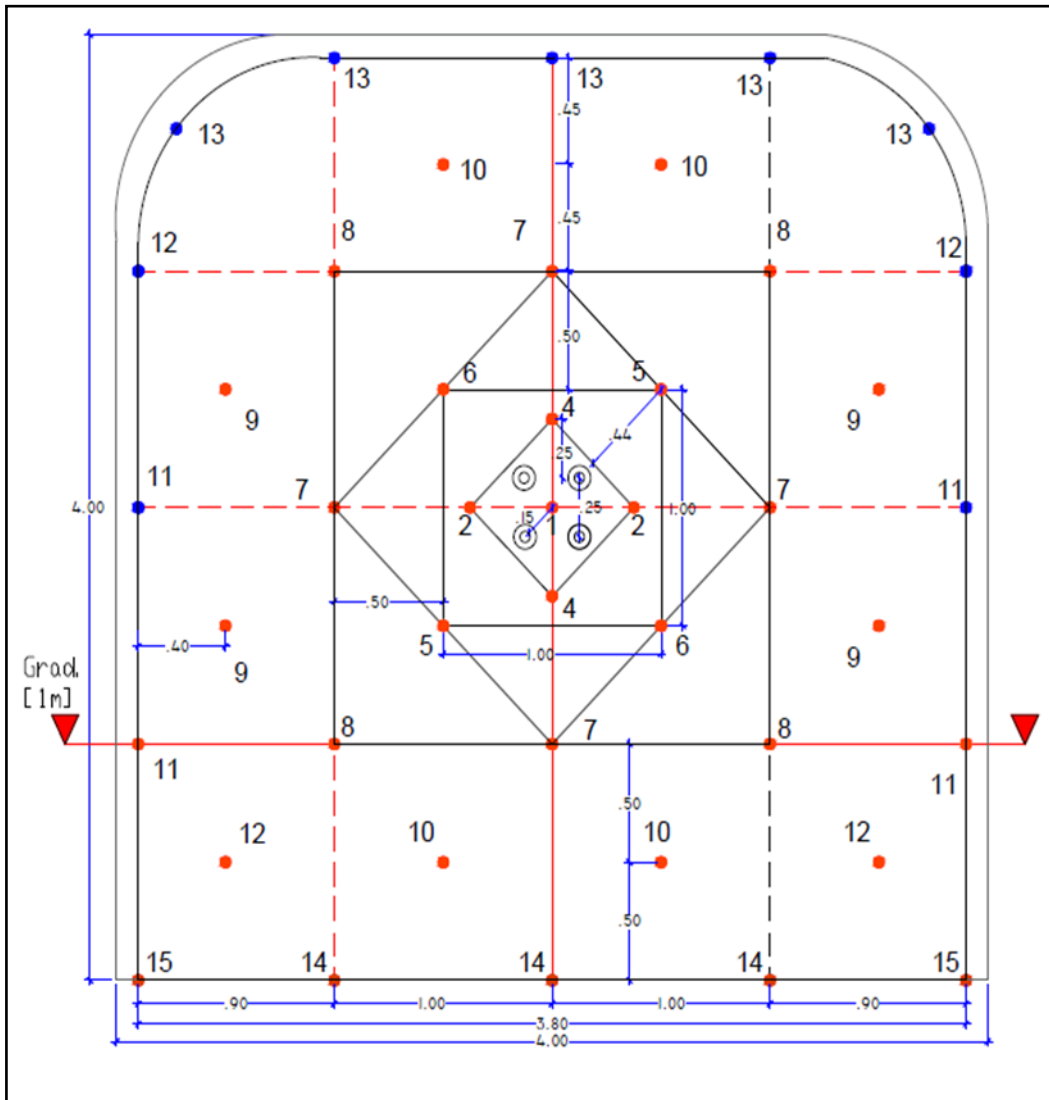
Anexo 3: Precio Unitario – Labor de Avance 4.00x4.00(-) III-B (A Granel)

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
PARTIDA PERFORACIÓN						
Tipo de explosivo a utilizar	EMULSIÓN					
Horas/gdia	10.15	h	Taladros cargados		36	Tal
Ancho de Labor	4.00	m	Taladros de alivio (Corona y Hastial)		0	Tal
Alto de Labor	4.00	m	Taladros de alivio (Arranque)		4	Tal
Longitud de Perforacion	12	pies	Total taladros Frente		40	Tal
Distancia Acarreo	200	m	Taladros Servicios		4	Tal
Eficiencia de Perforacion	91	%	Total Metros perforados frente		146.45	m
Eficiencia de Voladura	93	%	Total Metros perforados servicios		3.05	m
Avance por disparo	3.10	m	Volumen roto		65.94	m³
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m³	Tonelaje roto		191.22	tn
Sobrerrotura	7.64	%	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		68.38	tn/hr
MONEDA	Dólar		Rendimiento Jumbo Frontonero		77.25	m/hr
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			46.49
Operador de Jumbo	1.27	Tarea	68.99	87.53	28.24	
Ayudante de Jumbo	1.27	Tarea	44.59	56.57	18.25	
1.2. MATERIALES						99.76
Perforación Mecanizado						
Barra 73246537-20 T38 H35 R32 M/F 12	146.45	m	0.21	30.95	9.98	
Broca Button 77334245 R32 S45 / 45mm	133.14	m	0.37	49.92	16.10	
Shank Adapter 7490519185 T38 Cop1838	146.45	m	0.11	15.62	5.04	
Acoplamiento P/ Barra 73143555 T38 R32	146.45	m	0.07	10.24	3.30	
Broca escar. 4" C/ Piloto incorporado R32	13.31	m	0.26	3.42	1.10	
Barra R32 H28 R28 X 8	3.05	m	0.09	0.29	0.09	
Broca Button 77334245 R28 S45 / 38MM	3.05	m	1.32	4.02	1.30	
Copa p afilar broca 7975270-10 10mm	133.14	m	0.17	22.01	7.10	
Afiladora p/ broca de botones	133.14	m	0.16	21.22	6.84	
Tubo PVC 1 1/2" X 3 m	36.00	un	1.50	54.00	17.42	
Servicios						
Manguera jebe y lona 1" 300 psi	30.00	m	0.10	2.88	0.93	
Valvula de 1"	0.50	un	0.71	0.35	0.11	
Abrazadera 1"	0.50	un	0.20	0.10	0.03	
Instalaciones						
Alcayata 3/4 para tubería de 4"	0.85	un	7.00	5.93	1.91	
Alcayatas 1/2 para Cable Electrico	0.85	un	4.30	3.64	1.18	
Alcayata 3/4 para bombeo de agua	0.85	un	6.20	5.25	1.70	
Alcayata 1/2 para cable de Jumbo	0.85	un	5.10	4.32	1.39	
Tubería Polietileno de 4"	3.10	m	5.43	16.83	5.43	
Tubería Polietileno de 2"	6.20	m	2.52	15.62	5.04	
Accesorios de servicios auxiliares	0.50	Glb	4.86	2.43	0.78	
Ventilación						
Manga de ventilacion 36"	6.20	m	6.38	39.56	12.76	
Accesorio de ventilación	1.00	Glb	0.65	0.65	0.21	
1.3. EPP						2.86
EPPs Operación	2.54	Tarea	3.50	8.88	2.86	
1.6. MAQUINARIA Y EQUIPO						138.08
Jumbo Frontonero	3.40	h	111.11	377.31	121.71	
Ventilador de 30000 cfm	10.15	h	3.72	37.76	12.18	
Bomba Sumergible 15 hp	2.29	h	5.32	12.21	3.94	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.24	
1.7. COMBUSTIBLE D2						5.19
Combustible D2 Jumbo Frontonero	3.50	Glb	4.59	16.08	5.19	
SUBTOTAL CD						292.38
Total PERFORACIÓN US\$/m						292.38
PARTIDA SOSTENIMIENTO						
Horas/gdia	10.15	h	Rendimiento PERNOS		22	pernos/disparo
Barra de Perforacion	8	pies	Total Metros perforados		48.40	m

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
Eficiencia de Perforacion	90.00	%	Tiempo por perno colocado		1.80	min/perno
Longitud efectiva de sostenimiento	2.20	m	Rendimiento Malla Electrosoldada		44.05	m2/disp
Avance por disparo	3.10	m				
MONEDA	Dólar					
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			46.49
Operador de Jumbo empernador	1.27	Tarea	68.99	87.53	28.24	
Ayudante de Jumbo empernador	1.27	Tarea	44.59	56.57	18.25	
1.2. MATERIALES						234.99
Perforación						
Shank Adapter 7490519185 T38 Cop1838	48.40	m	0.11	5.16	1.66	
Acoplamiento P/ Barra 73143555 T38 R32	48.40	m	0.07	3.38	1.09	
Barra R32 H28 R28 X 8	48.40	m	0.09	4.57	1.47	
Broca Button 77334245 R28 S45 / 38MM	48.40	m	1.33	64.47	20.80	
Servicios						
Manguera jebe y lona 1" 300 psi	30.00	m	0.13	3.81	1.23	
Valvula de 1"	0.50	m	0.71	0.35	0.11	
Abrazadera 1"	0.50	un	0.20	0.10	0.03	
Insumos						
PERNO HELICOIDAL 7'	22.00	un	16.62	365.64	117.95	
Cartucho de Resina	22.00	un	1.63	35.86	11.57	
Cartucho de Cemento	22.00	un	0.49	10.78	3.48	
Malla Electrosoldada	44.05	m2	5.32	234.34	75.59	
1.3. EPP						2.85
EPPs Operación mecanizada	2.54	Tarea	3.48	8.84	2.85	
1.4. HERRAMIENTAS						4.48
Sost Mecanizado	1.00	Glb	13.87	13.87	4.48	
1.5. MAQUINARIA Y EQUIPO						111.35
Jumbo Empernador	3.10	h	111.11	344.44	111.11	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.24	
1.6. COMBUSTIBLE D2						5.19
Combustible D2 Jumbo Empernador	3.50	Glb	4.59	16.08	5.19	
SUBTOTAL CD						405.34
Total SOSTENIMIENTO US\$/m						405.34
PARTIDA LIMPIEZA						
Horas/gdia	10.15	h	Volumen roto		65.94	m3
Ancho de Labor	4.00	m	Tonelaje roto		191.22	tn
Alto de Labor	4.00	m	Distancia de Acumulación		200	m
Avance por disparo	3.10	m	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		68.38	tn/hr
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m ³	Factor de esponjamiento		30	%
Sobrerrotura	7.64	%				
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			23.24
Operador de Scoop	1.27	Tarea	56.79	72.05	23.24	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						117.93
Scoop 4.3 yd3	4.30	h	85.00	365.22	117.81	
Lampara minera	1.27	Tareas	0.30	0.38	0.12	
1.6. COMBUSTIBLE D2						36.94
Combustible D2 Scoop 4.3 yd3	24.92	Glb	4.59	114.50	36.94	
SUBTOTAL CD						178.11
Total LIMPIEZA US\$/m						178.11
PARTIDA TRANSPORTE						
Horas/gdia	10.15	h	Volumen roto		65.94	m3
Ancho de Labor	4.00	m	Tonelaje roto		191.22	tn

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
Alto de Labor	4.00	m	Distancia de Acumulación		50	m
Avance por disparo	3.10	m	Distancia de Acarreo		2500	m
Pe Mineral Insitu	2.90	tn/m ³	Rendimiento Scoop 4.3 yd3		139.72	tn/hr
Sobrerrotura	7.64	%	Rendimiento Dumper 417		33.23	tn/hr
			Factor de esponjamiento		30	%
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			44.22
Operador de Scoop	1.27	Tarea	56.79	72.05	23.24	
Operador de Volquete	1.27	Tarea	51.25	65.02	20.98	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						229.44
Scoop 4.3 yd3	1.37	h	85.00	116.33	37.53	
Volquete 25 m3	6.25	h	95.00	594.17	191.67	
Lampara minera	2.54	Tareas	0.30	0.76	0.24	
1.6. COMBUSTIBLE D2						50.88
Combustible D2 Scoop 4.3 yd3	7.94	Glb	4.59	36.47	11.76	
Combustible D2 Volquete 25 m3	26.39	Glb	4.59	121.27	39.12	
SUBTOTAL CD						324.54
Total TRANSPORTE US\$/m						324.54
PARTIDA VOLADURA						
DESCRIPCIÓN	Cantidad	Unidad	P.U.(US\$)	Parcial (US\$)	SubTotal (US\$/m)	TOTAL (US\$/m)
1.1. MANO DE OBRA			SUELDO+BBSS			26.80
Maestro cargador de explosivos	1.00	Tarea	44.59	44.59	14.38	
Ayudante cargador de explosivos	1.00	Tarea	38.49	38.49	12.42	
1.2. MAQUINARIA Y EQUIPO						0.19
Lampara minera	2.00	Tareas	0.30	0.60	0.19	
3. EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS						143.94
Senatel Ultrex 1 1/2"x12"	14.06	kg	3.30	46.41	14.97	
Senatel Magnafrag 1 1/2"x12"	187.33	kg	1.62	303.48	97.90	
DNE Exel 4.2 m	43.00	un	1.85	79.55	25.66	
Det. Ensamblado 7"	2.00	un	1.90	3.80	1.23	
Mecha Rápida	0.20	m	0.83	0.17	0.05	
Cordón Detonante 5P	40.00	m	0.32	12.80	4.13	
SUBTOTAL CD						170.93
Total VOLADURA US\$/m						170.93
TOTAL COSTO (US\$ / m)						1,371.30

Anexo 4: Malla de voladura con emulsión encartuchada – Sección 4.0 x 4.0



Anexo 6: Carguío con emulsión a granel

