

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Incremento de la productividad y reducción de costos utilizando
emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Francisco Franco Rojas Boza

 [0009-0003-6883-6701](https://orcid.org/0009-0003-6883-6701)

Asesor

M.Sc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

| | |
|------------------------------|---|
| Citar/How to cite | Rojas Boza [1] |
| Referencia/Reference | [1] F. Rojas Boza, " <i>Incremento de la productividad y reducción de costos utilizando emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025. |
| Estilo/Style: IEEE (2020) | |

| | |
|--------------------------------|---|
| Citar/How to cite | (Rojas, 2025) |
| Referencia/Reference | Rojas, F. (2025). <i>Incremento de la productividad y reducción de costos utilizando emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style: APA (7ma ed.) | |

Dedicatoria

*A mis padres Bertha y Francisco, por siempre estar conmigo
y por la confianza depositada en mí.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a la empresa Minera Volcan Compañía Minera, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional, así también agradezco a todo el personal de la Unidad Minera Ticlio, porque han aportado mucho en mi formación profesional y como humano.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la aplicación de emulsiones bombeables gasificables como alternativa a los métodos convencionales de voladura en minería subterránea, analizando su impacto en la productividad y la reducción de costos. Para ello, se desarrolló un análisis económico comparativo, orientado a cuantificar los ahorros por disparo frente al uso de explosivos tradicionales, así como un análisis técnico basado en simulaciones con JK SimBlast – 2D Face. Este permitió examinar variables clave como la distribución de energía, la velocidad pico de partícula (VPP), la carga operante y los criterios de daño en el macizo rocoso.

Los resultados muestran que el empleo de emulsiones a granel contribuye a una menor generación de gases tóxicos, mejorando las condiciones de ventilación y seguridad ocupacional. Este efecto se traduce en un mayor confort y productividad del trabajador, en comparación con explosivos convencionales como dinamita y ANFO.

Asimismo, la información geológica y geomecánica constituye un insumo esencial en perforación y voladura, dado que determina la selección de aceros, mezclas explosivas y accesorios. En este contexto, las emulsiones gasificables permiten ajustar la densidad en función de los parámetros físico–mecánicos del macizo rocoso, asegurando una adaptación más precisa a las condiciones del terreno.

Finalmente, la voladura de rocas se reconoce como una operación crítica dentro del ciclo de minado, al influir directamente en la eficiencia de procesos posteriores como carguío, transporte y sostenimiento. Por ello, resulta imprescindible implementar un seguimiento riguroso de esta etapa, con el fin de garantizar una operación segura, eficiente y sostenible.

Palabras clave — Emulsiones bombeables gasificables, voladura subterránea, reducción de costos, productividad minera, JK SimBlast, ventilación y seguridad, geomecánica aplicada.

Abstract

This research aims to evaluate the application of pumpable gasifiable emulsions as an alternative to conventional blasting methods in underground mining, analyzing their impact on productivity and cost reduction. A comparative economic analysis was carried out to quantify savings per blast compared to traditional explosives, along with a technical assessment based on simulations using JK SimBlast – 2D Face. This allowed the examination of key variables such as energy distribution, peak particle velocity (PPV), operating charge, and rock damage criteria.

The results show that the use of bulk emulsions reduces toxic gas emissions, thereby improving ventilation conditions and occupational safety. This effect translates into greater worker comfort and productivity compared to conventional explosives such as dynamite and ANFO.

In addition, geological and geomechanical information is essential in drilling and blasting, as it determines the selection of steels, explosive mixtures, and blasting accessories. In this context, gasifiable emulsions offer the advantage of adjusting density according to the rock mass's physical–mechanical parameters, ensuring better adaptation to site conditions.

Finally, rock blasting is recognized as a critical operation within the mining cycle, directly influencing the efficiency of subsequent processes such as loading, hauling, and ground support. For this reason, strict monitoring of this stage is essential to ensure a safe, efficient, and sustainable operation.

Keywords — Pumpable gasifiable emulsions, underground blasting, cost reduction, mining productivity, JK SimBlast, ventilation and safety, applied geomechanics.

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|--|------|
| Resumen | v |
| Abstract | vi |
| Introducción | xiii |
| Capítulo I. Parte introductoria del trabajo | 1 |
| 1.1 Descripción del problema de investigación..... | 1 |
| 1.2 Objetivo..... | 2 |
| 1.2.1 Objetivo general | 2 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3 Hipótesis | 2 |
| 1.3.1 Hipótesis general | 2 |
| 1.3.2 Hipótesis específicas..... | 3 |
| 1.4 Operacionalización de variables..... | 3 |
| 1.4.1 Variable independiente (V.I)..... | 3 |
| 1.4.2 Variable dependiente (V.D) | 3 |
| 1.5 Antecedentes referenciales | 5 |
| 1.5.1 Antecedentes internacionales | 5 |
| 1.5.2 Antecedentes nacionales | 6 |
| Capítulo II. Marcos teórico y conceptual..... | 8 |
| 2.1 Marco teórico | 8 |
| 2.1.1 Explosivos en minería subterránea | 8 |
| 2.1.2 Emulsiones bombeables gasificables..... | 9 |
| 2.1.3 Productividad en minería subterránea | 10 |
| 2.1.4 Costos operativos asociados a explosivos | 11 |
| 2.1.5 Seguridad y sostenibilidad operativa | 11 |
| 2.1.6 Indicadores técnicos de evaluación..... | 12 |
| 2.2 Marco conceptual..... | 13 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.2.1 | Minería subterránea | 13 |
| 2.2.2 | Ciclo de minado | 13 |
| 2.2.3 | Explosivos industriales | 13 |
| 2.2.4 | Emulsiones bombeables gasificables..... | 13 |
| 2.2.5 | Fragmentación de la roca..... | 14 |
| 2.2.6 | Sobrerotura (overbreak) | 14 |
| 2.2.7 | Productividad minera..... | 14 |
| 2.2.8 | Costos operativos de voladura | 14 |
| 2.2.9 | Seguridad operativa | 14 |
| 2.2.10 | Sostenibilidad minera | 15 |
| Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación | | 16 |
| 3.1 | Unidad de estudio | 16 |
| 3.1.1 | Ubicación y accesibilidad | 16 |
| 3.2 | Marco geológico y mineralización..... | 17 |
| 3.2.1 | Geología regional..... | 17 |
| 3.2.2 | Geología local | 23 |
| 3.3 | Caracterización de los explosivos y métodos de carguío | 29 |
| 3.4 | Diseño experimental de la investigación..... | 30 |
| 3.4.1 | Definición del sistema UBT | 30 |
| 3.4.2 | Definición del sistema UBT | 34 |
| 3.5 | Procedimiento experimental | 37 |
| 3.5.1 | Pruebas con ANFO | 37 |
| 3.5.2 | Pruebas con emulsiones gasificables..... | 38 |
| 3.6 | Enfoque metodológico..... | 38 |
| Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados | | 40 |
| 4.1 | Resultados técnicos en campo..... | 40 |
| 4.1.1 | Avance lineal..... | 40 |
| 4.1.2 | Fragmentación | 40 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.3 | Sobre-rotura..... | 41 |
| 4.1.4 | Tiempo de carguío | 42 |
| 4.1.5 | Generación de gases | 42 |
| 4.1.6 | Ajuste de densidad..... | 42 |
| 4.2 | Análisis económico | 43 |
| 4.3 | Implicancias para la decisión operativa | 45 |
| | Conclusiones | 46 |
| | Recomendaciones | 47 |
| | Referencias bibliográficas..... | 49 |
| | Anexos | 51 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1 : Matriz de consistencia..... | 4 |
| Tabla 2 : Comparación técnica entre ANFO y emulsión gasificable | 29 |
| Tabla 3 : Característica Emulsión Matriz..... | 32 |
| Tabla 4 : Característica emulsión gasificada Slurrex Bs..... | 32 |
| Tabla 5 : Tabla de gasificación teórica..... | 33 |
| Tabla 6 : Característica emulsión gasificada Slurrex Bs..... | 33 |
| Tabla 7 : Característica emulsión gasificada Slurrex Bs..... | 34 |
| Tabla 8 : Características de las labores | 34 |
| Tabla 9 : Distribución de taladros..... | 36 |
| Tabla 10: Consumo de explosivos y accesorios..... | 37 |
| Tabla 11: Resumen de parámetros técnicos de voladuras con ANFO | 37 |
| Tabla 12: Resumen de parámetros técnicos de voladuras con Slurrex BS | 38 |
| Tabla 13: Comparativo de costos..... | 44 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1 : Mapa de ubicación del proyecto minero | 16 |
| Figura 2 : Plano de accesibilidad a la mina Ticlio | 17 |
| Figura 3 : Plano regional | 18 |
| Figura 4 : Columna estratigráfica | 21 |
| Figura 5 : Sección transversal – Geología local | 24 |
| Figura 6 : Mapa geológico local | 25 |
| Figura 7 : Sección transversal de vetas | 28 |
| Figura 8 : Diagrama de proceso de carguío con ANFO vs Emulsión gasificable | 30 |
| Figura 9 : Vista del módulo UBT anclado sobre un camión chasis | 31 |
| Figura 10: Malla de perforación RP 350..... | 35 |
| Figura 11: Malla de perforación SN 744 W | 35 |
| Figura 12: Malla de perforación AC 741 | 36 |
| Figura 13: Diagrama de flujo metodológico del estudio..... | 39 |
| Figura 14: Eficiencia de voladura | 40 |
| Figura 15: Análisis de fragmentación | 41 |
| Figura 16: Análisis de Sobrerotura..... | 41 |
| Figura 17: Comparación tiempos de carguío | 42 |
| Figura 18: Consumo de explosivo por disparo | 43 |
| Figura 19: Costo de voladura por disparo | 43 |
| Figura 20: Comparativo de costo directo..... | 44 |

Glosario de términos

- ANFO:
Ammonium Nitrate – Fuel Oil
- BS:
Bulk System (sistema a granel)
- UBT:
Unidad de Bombeo para Túneles
- VOD:
Velocity of Detonation (Velocidad de detonación)
- VPP:
Velocidad Pico de Partícula
- USD/t:
Dólares estadounidenses por tonelada
- Kg/t:
Kilogramos de explosivo por tonelada de roca volada

Introducción

La minería subterránea contemporánea enfrenta el desafío de optimizar sus operaciones unitarias, garantizando al mismo tiempo eficiencia técnica, seguridad ocupacional y sostenibilidad económica. Dentro de este contexto, la operación de perforación y voladura constituye un eslabón crítico del ciclo minero, pues de su desempeño dependen la productividad, los costos y la calidad de las labores desarrolladas. El uso de explosivos convencionales como el ANFO, frente a alternativas tecnológicas más avanzadas como las emulsiones bombeables gasificables, abre un campo de análisis que permite identificar oportunidades de mejora en términos de ahorro de costos, incremento de productividad y reducción de riesgos.

El presente trabajo se estructura en cuatro capítulos principales, organizados de manera progresiva para asegurar una comprensión clara del problema, del enfoque metodológico y de los resultados alcanzados:

Capítulo I corresponde a la parte introductoria, donde se expone la descripción del problema de investigación y se formulan los objetivos general y específicos que guían el estudio. Asimismo, se plantean la hipótesis general y las hipótesis específicas, junto con la definición de las variables independiente y dependiente, precisando los indicadores que permiten su medición. Finalmente, se revisan antecedentes referenciales —tanto nacionales como internacionales— que contextualizan el estado del arte en el uso de explosivos en minería subterránea y fundamentan la pertinencia de la investigación.

Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual, abordando los temas esenciales que sostienen el estudio. Se incluyen los fundamentos de los explosivos empleados en minería subterránea, con énfasis en las características de las emulsiones bombeables gasificables, así como en la relación entre productividad y costos operativos. También se discuten aspectos de seguridad y sostenibilidad asociados al empleo de distintos tipos de explosivos. Esta sección se complementa con el marco conceptual, en el

que se definen con precisión los términos clave que se emplearán a lo largo de la investigación.

Capítulo III se centra en el desarrollo del trabajo de investigación. Se inicia con la caracterización de la unidad de estudio —la mina Ticlio—, incluyendo su ubicación, accesibilidad y características geológicas relevantes. Luego se presenta el marco geológico y la mineralización, a fin de comprender el contexto en el que se realizaron las pruebas. Finalmente, se describe el procedimiento experimental: se detallan las pruebas realizadas con emulsiones gasificables Slurrex BS, así como la información recopilada de disparos con ANFO, con el propósito de contar con una base de comparación homogénea.

Capítulo IV presenta el análisis y la discusión de resultados. Se abordan, en primer lugar, los resultados técnicos de campo en términos de avance lineal, fragmentación, sobre-rotura, tiempos de carguío, generación de gases y capacidad de ajuste de densidad de los explosivos. A continuación, se expone el análisis económico comparativo, que incluye costos directos por disparo, costos unitarios por tonelada, y un análisis de sensibilidad frente a variaciones de precios y consumos. Finalmente, se presentan las implicancias para la decisión operativa, destacando el impacto que la elección del tipo de explosivo tiene sobre la productividad y los costos de la operación subterránea.

La investigación culmina con la presentación de conclusiones, derivadas del análisis técnico-económico realizado, y recomendaciones prácticas, orientadas a la implementación de emulsiones gasificables en operaciones subterráneas. Se incluye, además, la bibliografía que respalda el marco teórico y metodológico, y un conjunto de anexos con información complementaria de los disparos ejecutados.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

La minería subterránea constituye un componente esencial de la actividad extractiva en el Perú, particularmente en regiones como Pasco, Junín, Huancavelica y Ayacucho, donde se explotan yacimientos polimetálicos de alta ley a profundidades crecientes. No obstante, este tipo de explotación enfrenta desafíos operativos complejos, derivados de restricciones de espacio, condiciones geomecánicas adversas, presencia de agua en los frentes de trabajo y de los altos estándares de seguridad y sostenibilidad exigidos por la normativa vigente (D.S. N° 024-2016-EM).

Dentro de este contexto, uno de los procesos más críticos es la perforación y voladura, que constituye el inicio del ciclo productivo subterráneo. La eficiencia de esta etapa incide directamente en la fragmentación, la sobreexcavación, la estabilidad de las labores y, en última instancia, en la productividad global y el costo unitario del minado. Tradicionalmente, las operaciones subterráneas peruanas han empleado ANFO (Nitrato de Amonio–Fuel Oil) como explosivo estándar debido a su bajo costo y disponibilidad. Sin embargo, este agente presenta limitaciones significativas: alta sensibilidad al agua, menor energía de detonación y necesidad de manipulación manual, lo cual compromete la seguridad y la eficiencia operativa.

En respuesta a estas limitaciones, la industria ha desarrollado y promovido el uso de emulsiones bombeables gasificables, que ofrecen ventajas sustanciales en términos de seguridad, automatización del carguío, mejor fragmentación, menor generación de gases y reducción de la sobrerotura. A pesar de estas ventajas, muchas operaciones subterráneas en el Perú mantienen esquemas de voladura tradicionales, limitando la optimización integral del ciclo minero (perforación–voladura–carguío–transporte), lo que genera retrasos, mayores consumos energéticos y costos operativos elevados.

El problema central radica en que no se ha cuantificado de manera integral el impacto del uso de emulsiones bombeables gasificables sobre los indicadores de

productividad y costos en minería subterránea. Esta carencia de información limita su adopción estratégica en las unidades mineras del país. En consecuencia, resulta necesario desarrollar un estudio técnico-económico comparativo, que permita determinar, con datos reales, cómo esta innovación tecnológica puede transformar los resultados operativos y contribuir a una minería más eficiente, segura y sostenible.

A partir de este escenario, surgen interrogantes claves que orientan la investigación:

¿En qué medida la sustitución del ANFO por emulsiones bombeables gasificables impacta en los indicadores de productividad del ciclo minero subterráneo?

¿En qué medida la aplicación de emulsiones bombeables gasificables contribuye a la reducción de costos operativos y a la optimización energética?

¿En qué medida la incorporación de esta tecnología puede mejorar la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras subterráneas en el Perú?

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de la utilización de emulsiones bombeables gasificables sobre la productividad y los costos operativos en una operación minera subterránea.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto del cambio de explosivo sobre la fragmentación, sobrerotura y eficiencia del carguío.
- Analizar los costos asociados al manejo, logística y seguridad de ambos tipos de explosivos.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

El uso de emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea incrementa la productividad y reduce los costos operativos respecto al uso de ANFO convencional.

1.3.2 Hipótesis específicas

La fragmentación generada por emulsiones gasificables mejora la eficiencia del transporte, acarreo y procesamiento.

Los indicadores de seguridad se reducen al implementar emulsiones bombeables.

1.4 Operacionalización de variables

1.4.1 Variable independiente (V.I)

X1: Tipo de explosivo utilizado

- Densidad del explosivo

1.4.2 Variable dependiente (V.D)

Y1: Productividad y costos.

- Costo por disparo.
- Costo por tonelada.

Y3: Fragmentación.

Y4: Condiciones de seguridad y salud

Tabla 1

Matriz de consistencia

| PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPOTESIS | VARIABLE | INDICADORES |
|---|--|---|---|---|
| <p>Problema general</p> <p>¿En qué medida la utilización de emulsiones bombeables gasificables impacta en la productividad y en los costos operativos de una operación minera subterránea?</p> | <p>Objetivo general</p> <p>Evaluar el impacto de la utilización de emulsiones bombeables gasificables sobre la productividad y los costos operativos en una operación minera subterránea.</p> | <p>Hipótesis general</p> <p>El uso de emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea incrementa la productividad y reduce los costos operativos respecto al uso de ANFO convencional.</p> | <p>Y1: Dependiente / Efecto</p> <p>Productividad y costos.</p> | <p>Rendimiento de avance lineal (>60%)</p> |
| <p>Problema específico 1</p> <p>¿En qué medida el cambio de ANFO a emulsiones bombeables gasificables influye en la fragmentación, la sobrerotura y la eficiencia del carguío?</p> | <p>Objetivo específico 1</p> <p>Determinar el efecto del cambio de explosivo sobre la fragmentación, sobrerotura y eficiencia del carguío.</p> | <p>Hipótesis específica 1</p> <p>La fragmentación generada por emulsiones gasificables mejora la eficiencia del transporte, acarreo y procesamiento.</p> | <p>X1: Independiente / Causa</p> <p>. Tipo de explosivo utilizado.</p> | <p>Y2: Dependiente / Efecto</p> <p>Fragmentación</p> <p>Tamaño promedio menor a 25- 30 cm</p> |
| <p>Problema específico 2:</p> <p>¿En qué medida los costos asociados al manejo, logística y seguridad difieren entre el uso de ANFO y emulsiones bombeables gasificables?</p> | <p>Objetivo específico 2:</p> <p>Analizar los costos asociados al manejo, logística y seguridad de ambos tipos de explosivos.</p> | <p>Hipótesis específico 2:</p> <p>Los indicadores de seguridad se reducen al implementar emulsiones bombeables.</p> | <p>Y3: Dependiente / Efecto</p> <p>Condiciones de seguridad y salud</p> | <p>Menor generación de gases tóxicos</p> <p>Mejores condiciones de ventilación</p> |

Nota: Elaboración propia

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes internacionales

Smith, R. & Chang, M. (2019). "Innovative Use of Pumpable Emulsion Explosives in Narrow Vein Mining". *Journal of Mining Engineering*. Esta investigación se realizó en operaciones subterráneas de vetas angostas, con el objetivo de analizar la aplicación de emulsiones bombeables gasificables y su impacto en la continuidad de la producción. El estudio surge de la necesidad de superar las limitaciones operativas de los explosivos tradicionales en espacios reducidos. La metodología consistió en pruebas de campo con voladuras ejecutadas tanto con ANFO como con emulsiones bombeables, evaluando tiempos de recarga, fragmentación y dilución. Los resultados demostraron que el uso de emulsiones bombeables permitió reducir significativamente los tiempos muertos por recarga y mejorar la fragmentación del macizo rocoso, lo que se tradujo en una mayor eficiencia global del ciclo de minado. El estudio concluye que las emulsiones representan una alternativa viable para optimizar la productividad en minas de vetas angostas.

Orica (2022). *Technical Bulletin – Underground Pumped Emulsions*. Este documento técnico se elaboró a partir de experiencias en minas subterráneas de Canadá y Australia, con el objetivo de cuantificar los beneficios operativos de la implementación de emulsiones bombeables gasificables. El análisis incluyó indicadores de costo unitario, rendimiento de perforación-voladura, seguridad y tiempos de operación. Los resultados evidenciaron que la adopción de emulsiones bombeables redujo el costo por tonelada de mineral y mejoró el rendimiento del ciclo de perforación y voladura. Se concluye que la tecnología ofrece ventajas significativas en productividad y costos, especialmente en operaciones de gran escala.

Dyno Nobel (2021). *Performance Analysis of Pumpable Emulsions in Underground Mining*. El estudio se llevó a cabo en diversas operaciones mineras subterráneas, con el objetivo de medir el impacto de las emulsiones bombeables en la productividad y la seguridad. Se aplicaron pruebas comparativas en diferentes frentes de explotación, analizando fragmentación, tiempos de ciclo, costos logísticos y riesgos operativos. Los

resultados mostraron un incremento del 15% en productividad y reducciones significativas en los costos logísticos y de seguridad, gracias a la automatización del carguío y al menor riesgo de manipulación. El informe concluye que el uso de emulsiones bombeables representa un avance tecnológico clave para modernizar las operaciones subterráneas.

Zhou, L. et al. (2023). "Field Application of Emulsion Pump Systems in Deep Underground Coal Mines". China University of Mining and Technology. Esta investigación se desarrolló en minas de carbón profundo en China, con el objetivo de evaluar la aplicación de sistemas de emulsiones bombeables bajo condiciones geológicas extremas. La metodología incluyó pruebas piloto en frentes con alta presencia de gas metano y condiciones de humedad, evaluando seguridad, eficiencia y trazabilidad de la operación. Los resultados revelaron que las emulsiones bombeables contribuyeron a reducir el riesgo de explosiones por metano, eliminar la necesidad de almacenar explosivos sensibles en superficie y facilitar un sistema de entrega "just-in-time" que mejoró la seguridad y trazabilidad. El estudio concluye que esta tecnología es altamente adecuada para operaciones de alto riesgo, reforzando la sostenibilidad y seguridad de la minería profunda.

1.5.2 Antecedentes nacionales

MINEM – Dirección General de Minería (2023). Informe sobre experiencias en minas polimetálicas peruanas. El reporte recopila experiencias en diversas minas subterráneas polimetálicas del Perú, con el objetivo de evaluar el impacto del uso de emulsiones bombeables en los ciclos de minado. El análisis incluyó reportes operativos y registros de seguridad de varias unidades productivas. Los resultados evidencian que el uso de emulsiones bombeables permitió reducir hasta en 2 horas los ciclos de minado por jornada, lo que se tradujo en mayor productividad y seguridad. El informe concluye que esta tecnología constituye una herramienta efectiva para optimizar la eficiencia operativa en minas polimetálicas peruanas.

Vásquez, H. (2020). Aplicación de emulsiones bombeables en minería subterránea mecanizada – Unidad Atacocha. Universidad Nacional de Ingeniería. Esta investigación se desarrolló en la Unidad Minera Atacocha (Pasco – Perú), con el objetivo de evaluar la

sustitución del ANFO por emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea mecanizada. La metodología se basó en pruebas de campo comparativas entre voladuras con ANFO y con emulsiones, analizando fragmentación, sobrerotura, eficiencia del carguío y costos unitarios. Los resultados mostraron una reducción del 20% en los costos de voladura, acompañada de mejoras en la fragmentación y disminución de riesgos en la manipulación del explosivo. El estudio concluye que el uso de emulsiones bombeables incrementa tanto la eficiencia operativa como la seguridad de las operaciones subterráneas.

Apaza, L. (2021). Estudio comparativo entre ANFO y emulsiones gasificables en una mina subterránea de Ayacucho. Universidad Nacional de San Agustín. Este estudio se llevó a cabo en una mina subterránea de Ayacucho, con el objetivo de comparar el desempeño de ANFO y emulsiones bombeables gasificables en labores horizontales. La metodología consideró pruebas de voladura en distintos frentes, midiendo fragmentación, sobrerotura y consumo energético en planta. Los resultados mostraron que las emulsiones gasificables alcanzaron un rendimiento superior en labores horizontales, disminuyeron la sobrerotura y optimizaron el consumo energético en planta. El estudio concluye que las emulsiones representan una alternativa tecnológica eficiente y adecuada para yacimientos polimetálicos subterráneos en la sierra peruana.

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE, 2022). Informe técnico sobre nuevas tecnologías en minería subterránea. Este informe recoge experiencias de implementación de emulsiones bombeables en minas subterráneas de Cajamarca, Pasco y Junín. El análisis incluyó indicadores de productividad, seguridad y cumplimiento normativo. Los resultados mostraron un incremento de 150 toneladas diarias de producción, reducción de la exposición a riesgos críticos en frentes húmedos y con caída de rocas, y un mayor cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. 024-2016-EM). El documento concluye que las emulsiones bombeables son una tecnología alineada con la productividad, seguridad y sostenibilidad de la minería subterránea peruana.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Explosivos en minería subterránea

En minería subterránea, los explosivos son insumos estratégicos para la fragmentación del macizo rocoso y la consecuente liberación del mineral. El ciclo de minado comienza con la perforación y voladura, operación que condiciona la eficiencia de todas las fases posteriores: ventilación, carguío, transporte, chancado y procesamiento (Zhou et al., 2023). Una voladura eficiente garantiza un perfil cercano al diseño, una fragmentación adecuada y menores costos asociados a sobrerotura y re-trabajos.

El explosivo más difundido en la minería subterránea de Latinoamérica ha sido históricamente el ANFO (Ammonium Nitrate – Fuel Oil). Su popularidad se debe a su bajo costo de producción, facilidad de preparación y disponibilidad de insumos. Sin embargo, presenta limitaciones técnicas y de seguridad que se han vuelto más evidentes en el contexto de minas más profundas, mecanizadas y con mayores estándares ambientales:

- **Sensibilidad al agua:**

El ANFO pierde propiedades detonantes en frentes húmedos, lo que genera disparos fallidos o fragmentación deficiente.

- **Baja densidad energética:**

Produce una distribución irregular de energía y, por tanto, fragmentación heterogénea y mayor sobreexcavación.

- **Carguío manual:**

Exige manipulación directa del material explosivo, aumentando la exposición del personal.

- **Elevadas emisiones post-voladura:**

Genera CO y NOx que incrementan la carga sobre el sistema de ventilación.

En respuesta a estas limitaciones, la industria minera ha incorporado explosivos de nueva generación, entre los cuales destacan las emulsiones bombeables gasificables.

Estas ofrecen ventajas en seguridad, eficiencia energética y adaptabilidad a distintos escenarios de mina, y han sido ampliamente implementadas en países con minería mecanizada como Canadá, Australia, Chile y China (Orica, 2022; MINEM, 2023).

2.1.2 Emulsiones bombeables gasificables

Las emulsiones bombeables gasificables son mezclas densas y estables que se transportan en estado no explosivo y se convierten en un agente explosivo al momento de su aplicación. Su composición básica incluye:

- **Fase oxidante:**

Nitrato de amonio en solución acuosa.

- **Fase combustible:**

Aceites, ceras o derivados de hidrocarburos.

- **Emulsificante:**

Compuesto estabilizador que mantiene la estructura.

- **Sensibilización:**

Incorporación de microesferas de gas durante el carguío, que permiten la detonación.

2.1.2.1 Funcionamiento operativo. El explosivo se transporta mediante camiones explosiveros especializados, los cuales realizan la mezcla, gasificación y bombeo directamente en los taladros perforados en el frente. Este proceso elimina la manipulación manual, reduce riesgos y permite un carguío mecanizado y continuo (Smith & Chang, 2019).

2.1.2.2 Ventajas frente al ANFO. Son las siguientes:

- **Mayor densidad energética y VOD (Velocidad de detonación):**

Genera fragmentación más uniforme.

- **Resistencia al agua:**

Mantiene su desempeño en frentes húmedos, donde el ANFO pierde eficacia.

- **Automatización del carguío:**

Reduce la exposición humana y mejora la seguridad.

- **Menores emisiones:**

Disminuye la concentración de CO y NOx, acortando tiempos de ventilación.

- **Flexibilidad operativa:**

posibilidad de ajustar densidad para adaptarse a diferentes condiciones geomecánicas.

Estudios internacionales reportan mejoras de productividad entre 10% y 20%, así como reducciones significativas en costos logísticos y de seguridad al migrar de ANFO a emulsiones bombeables (Dyno Nobel, 2021).

2.1.3 Productividad en minería subterránea

La productividad en minería subterránea se define como la relación entre el volumen de mineral extraído y los recursos empleados (tiempo, personal, equipos). Está determinada por múltiples factores interdependientes:

- Eficiencia del ciclo de minado (perforación, voladura, ventilación, carguío, transporte).
- Fragmentación del macizo rocoso, que condiciona la facilidad de carguío y el rendimiento del acarreo.
- Continuidad operativa, medida en función de detenciones planificadas y no planificadas.
- Grado de mecanización y automatización de los procesos.

El uso de emulsiones bombeables tiene efectos directos sobre la productividad:

- Menor tiempo de carguío por el bombeo mecanizado.
- Mayor avance por disparo debido a mejor transmisión de energía.
- Reducción de voladuras secundarias gracias a fragmentación más homogénea.

Investigaciones en Canadá y Australia reportan incrementos de 150–200 t/día en producción atribuibles a la implementación de emulsiones (Orica, 2022). En Perú, el MINEM (2023) documenta ahorros de hasta 2 horas por jornada en el ciclo de minado al

sustituir ANFO, lo que se traduce en un mejor uso de la jornada laboral y mayor utilización de equipos.

2.1.4 Costos operativos asociados a explosivos

Los costos de voladura en minería subterránea no se limitan al precio unitario del explosivo por kilogramo, sino que involucran componentes adicionales:

- **Costo de carguío y logística:**

- ANFO requiere preparación, mezcla, transporte y manipulación manual.
- Las emulsiones bombeables se cargan in situ de manera mecanizada.

- **Sobrerotura y fragmentación no controlada:**

Generan mayor volumen de material estéril y aumentan los costos de carguío y transporte.

- **Duración del ciclo de minado:**

Voladuras deficientes prolongan el ciclo, incrementando consumo de energía y horas de equipo.

- **Costos de seguridad y salud:**

Exposición del personal, riesgo de accidentes y mayores requerimientos de ventilación.

Estudios (Orica, 2022; Dyno Nobel, 2021) muestran que el uso de emulsiones puede reducir 10–20 % los costos totales de ciclo (USD/m o USD/t). En Perú, Vásquez (2020) documenta una reducción del 20 % en mina Atacocha al reemplazar ANFO.

2.1.5 Seguridad y sostenibilidad operativa

La seguridad en minería subterránea constituye una prioridad estratégica, dado que los explosivos representan un riesgo crítico en el frente de trabajo. El uso de ANFO implica manipulación manual y almacenamiento de materiales sensibles, aumentando la exposición del personal.

En contraste, las emulsiones bombeables presentan las siguientes ventajas:

- Reducción del contacto humano directo con material explosivo.
- Menores emisiones post-voladura, lo que disminuye la necesidad de ventilación secundaria.
- Mayor control de vibraciones y reducción del daño en roca remanente.
- Trazabilidad y control logístico, gracias a sistemas de “just-in-time delivery” (Zhou et al., 2023).

Estas características no solo fortalecen la seguridad, sino que además favorecen la sostenibilidad operativa y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales, como el D.S. N.º 024-2016-EM en Perú o los estándares del International Society of Explosives Engineers (ISEE).

2.1.6 Indicadores técnicos de evaluación

Para evaluar el impacto del cambio de explosivo en una operación subterránea, se utilizan indicadores cuantitativos que reflejan productividad, costos, fragmentación y seguridad:

- **Productividad:**

Tonelaje extraído por turno o día, tiempo de carguío por frente.

- **Costos:**

Costo por disparo, costo unitario de voladura (USD/ton o USD/m), consumo específico de explosivo (kg/m).

- **Fragmentación:**

Índice P80, distribución granulométrica, porcentaje de sobrerotura.

- **Seguridad:**

Número de incidentes, nivel de exposición humana, concentración de gases post-voladura.

Estos indicadores permiten operacionalizar las variables dependientes planteadas en la investigación y contrastar las hipótesis respecto a la productividad y reducción de costos mediante el uso de emulsiones bombeables gasificables.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Minería subterránea

Método de extracción de minerales que se desarrolla bajo la superficie terrestre, mediante la construcción de galerías, rampas, chimeneas y cámaras. Su aplicación se justifica en depósitos de geometría angosta o profundos, donde la explotación a cielo abierto resulta técnica o económicamente inviable.

2.2.2 Ciclo de minado

Conjunto de actividades operativas que permiten la extracción continua del mineral en minería subterránea. Incluye:

- Perforación de la roca.
- Voladura con explosivos.
- Ventilación del frente afectado por gases.
- Carguío del material fragmentado.
- Transporte hacia el punto de descarga o planta.

La eficiencia de cada fase impacta directamente en la productividad global.

2.2.3 Explosivos industriales

Sustancias químicas diseñadas para liberar energía en forma de onda expansiva al detonar. En minería subterránea se emplean principalmente para fragmentar el macizo rocoso y facilitar su extracción. Los más comunes son:

- ANFO (Ammonium Nitrate – Fuel Oil): explosivo económico y ampliamente utilizado, aunque limitado en presencia de agua.
- Emulsiones bombeables gasificables: explosivos modernos, más seguros y adaptables, que se gasifican en el momento del carguío.

2.2.4 Emulsiones bombeables gasificables

Explosivos compuestos por una fase oxidante (nitrato de amonio), fase combustible (aceites o ceras), emulsificante y sensibilizantes gaseosos. Se transportan en estado no explosivo y se cargan directamente en los taladros mediante camiones explosivos

especializados. Sus principales ventajas son: resistencia al agua, mejor fragmentación, automatización del carguío y reducción de emisiones post-voladura.

2.2.5 Fragmentación de la roca

Distribución granulométrica resultante tras la voladura. Se mide mediante parámetros como el P80 (tamaño por debajo del cual se encuentra el 80% del material). Una buena fragmentación optimiza el carguío, transporte y procesamiento, mientras que la sobrerotura o la fragmentación inadecuada incrementan costos y tiempos.

2.2.6 Sobrerotura (*overbreak*)

Exceso de excavación respecto al perfil de diseño, causado por una voladura ineficiente. Genera costos adicionales en fortificación, ventilación y manipulación de material estéril.

2.2.7 Productividad minera

Relación entre la cantidad de mineral extraído y los recursos empleados (personal, tiempo, equipos). En minería subterránea, se mide frecuentemente en toneladas extraídas por jornada, por turno o por hora-hombre.

2.2.8 Costos operativos de voladura

Gastos asociados al uso de explosivos en minería subterránea, incluyendo:

- Costo del explosivo.
- Logística y transporte.
- Mano de obra y tiempos de carguío.
- Ventilación y gestión de gases post-voladura.
- Consecuencias de la sobrerotura.

2.2.9 Seguridad operativa

Conjunto de medidas orientadas a reducir la exposición del personal a riesgos durante el manejo y aplicación de explosivos. Incluye control de emisiones, reducción del contacto humano con sustancias sensibles y cumplimiento normativo (ej. D.S. N.º 024-2016-EM en Perú).

2.2.10 Sostenibilidad minera

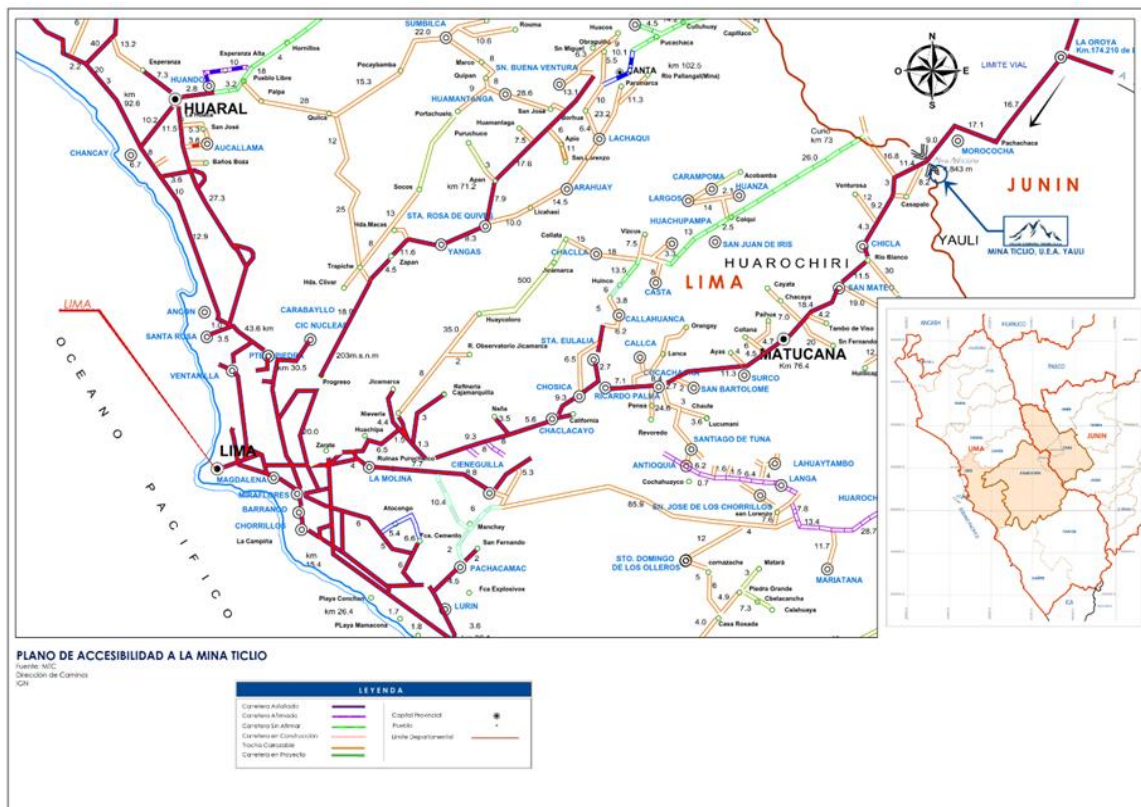
Principio que busca equilibrar la rentabilidad económica de las operaciones con la seguridad laboral, la eficiencia energética y la reducción de impactos ambientales. En el caso de los explosivos, implica el uso de tecnologías más limpias y seguras como las emulsiones bombeables gasificables.

Accesibilidad

El acceso a la mina Ticlio, perteneciente a la Unidad Yauli de la Compañía Minera Volcan S.A.A., se realiza a través de la carretera asfaltada y la vía férrea que conecta Lima con La Oroya (170 km) y, posteriormente, desde La Oroya hacia Yauli en un tramo adicional de 40 km.

Figura 2

Plano de accesibilidad a la mina Ticlio



Nota: Geología Mina Ticlio – VOLCAN CIA MINERA S.A.A

3.2 Marco geológico y mineralización

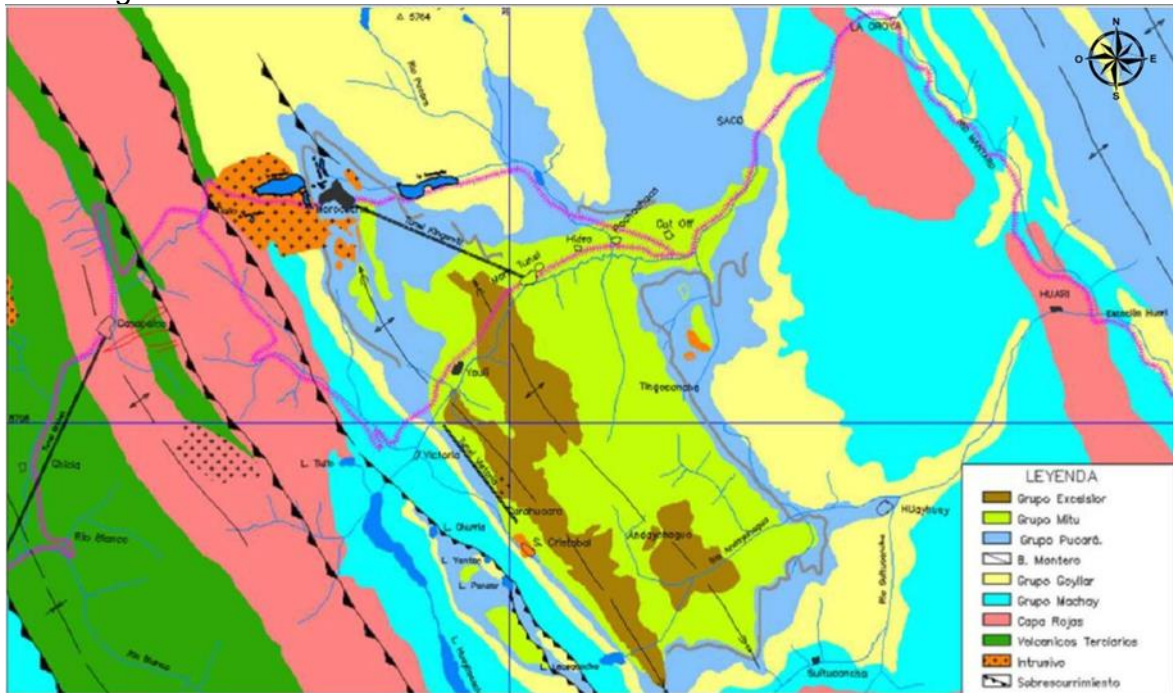
3.2.1 Geología regional

La propiedad de la mina abarca una extensión de 909.44 Has, amparadas por 116 concesiones a nombre de Volcán Cía. Minera S.A.A., tiene como coordenadas UTM centrales 8716556 N – 370296 E. La estructura regional dominante es el Domo de Yauli (DY), que se extiende longitudinalmente por 35 Km. desde SuitucanCHA hasta el norte de Ticlio y transversalmente por 10 a 15 kilómetros; el rumbo promedio de esta estructura es N40°W, es asimétrico, su flanco oriental buza entre 30 y 40° mientras que su flanco

occidental lo hace entre 45° y 70°. El Domo Yauli transversalmente es un gran Anticlinorium formado por tres anticlinales, el anticlinal de Pomacocha en el lado oeste, el de San Cristóbal - Morococha en la parte central y el de Ultimátum en el flanco este.

Figura 3

Plano regional



Nota: Proyecto minero

La morfología que exhibe el Domo Yauli es alargada, orientada según pliegues y fracturas del dominio andino, en la zona central de esta ventana tectónica aparece el “zócalo paleozoico” mientras que los flancos son cubiertos por rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas como las calizas del grupo Pucará, areniscas de la formación Goyllarisquiza, calizas de las formaciones Chulec, Pariatambo y Jumasha y capas rojas del grupo Casapalca y finalmente son instruidos por plutones de tipo Diorita Anticonca, Cuarzo-monzonita Toromocho, Cuarzo-monzonita “Ticlio”, etc.

3.2.1.1 Estratigrafía. La columna estratigráfica de la zona está conformada por:

- **Grupo Goyllarisquiza (Cretáceo):**

Representado por una secuencia de areniscas y lutitas que constituyen un conglomerado rojo expuesto al Este del yacimiento. Se identificaron horizontes basálticos amigdaloides y diabásicos intercalados en la secuencia de areniscas y

lutitas rojas, cuarcitas y capas de caliza gris. Esta secuencia varía hacia el tope de una caliza masiva de color gris azulado a una caliza fosfática gris oscuro que es la base del grupo Machay.

- **Grupo Machay (Cretáceo):**

Compuesto por calizas que afloran al Norte del abra Anticona (Ticlio) de color gris oscuro con resto de fósiles en la base, sobre yaciendo una caliza de color claro y algunos horizontes lutáceos y fosfáticos continúan hasta el techo.

- **Formación Jumasha:**

Sobreyacen concordantemente a la formación Pariatambo, está compuesta por capas medias a gruesas de calizas, calizas dolomíticas, dolomitas de coloración gris claro a blanquecino y gris amarillento; al contacto con la diorita en esta zona forma un pequeño skarn de Fe, algunos niveles presentan débil marmolización con presencia de wollastonita. Esta formación ha sido cortada por estructuras tensionales de rumbo N50° a 65° E y buzamiento de 60° a 80° SE; estructuralmente, afectan a la diorita Anticona y permiten la mineralización como parte de un sistema de vetas en Ticlio. Se observa cerca al campamento de Ticlio estas estructuras formando remanentes marmolizados con rumbo NW a S-SE, con afloramientos de pequeños remanentes de caliza que pertenecen posiblemente a la formación Jumasha; se hallan también moderadamente marmolizados y sobreyacen a los intrusivos dacíticos y dioríticos, los cuales están brechados en el contacto y bordeado por aglomerados volcánicos (Formación Carlos Francisco?); a esta formación se le asigna una edad perteneciente al Cretaceo inferior (Cenoniano – H. Salazar, 1983)

- **Formación Casapalca (terciario):**

Representado por las capas rojas y conglomerado Carmen, que afloran al Oeste del yacimiento. Las capas rojas se caracterizan por intercalaciones de lutitas y areniscas limolíticas, limolitas y limolitas calcáreas y calizas de coloración rojiza (alteración ferrífera, F. Mégard, 1979; H. Salazar, 1983); los ambientes calcáreos

han sido skarnificados con débil a moderada intensidad por los intrusivos dacíticos y dioríticos, cuyo resultado son niveles de hornfels con calco-silicatos y epidota.

- **Formación Carlos Francisco:**

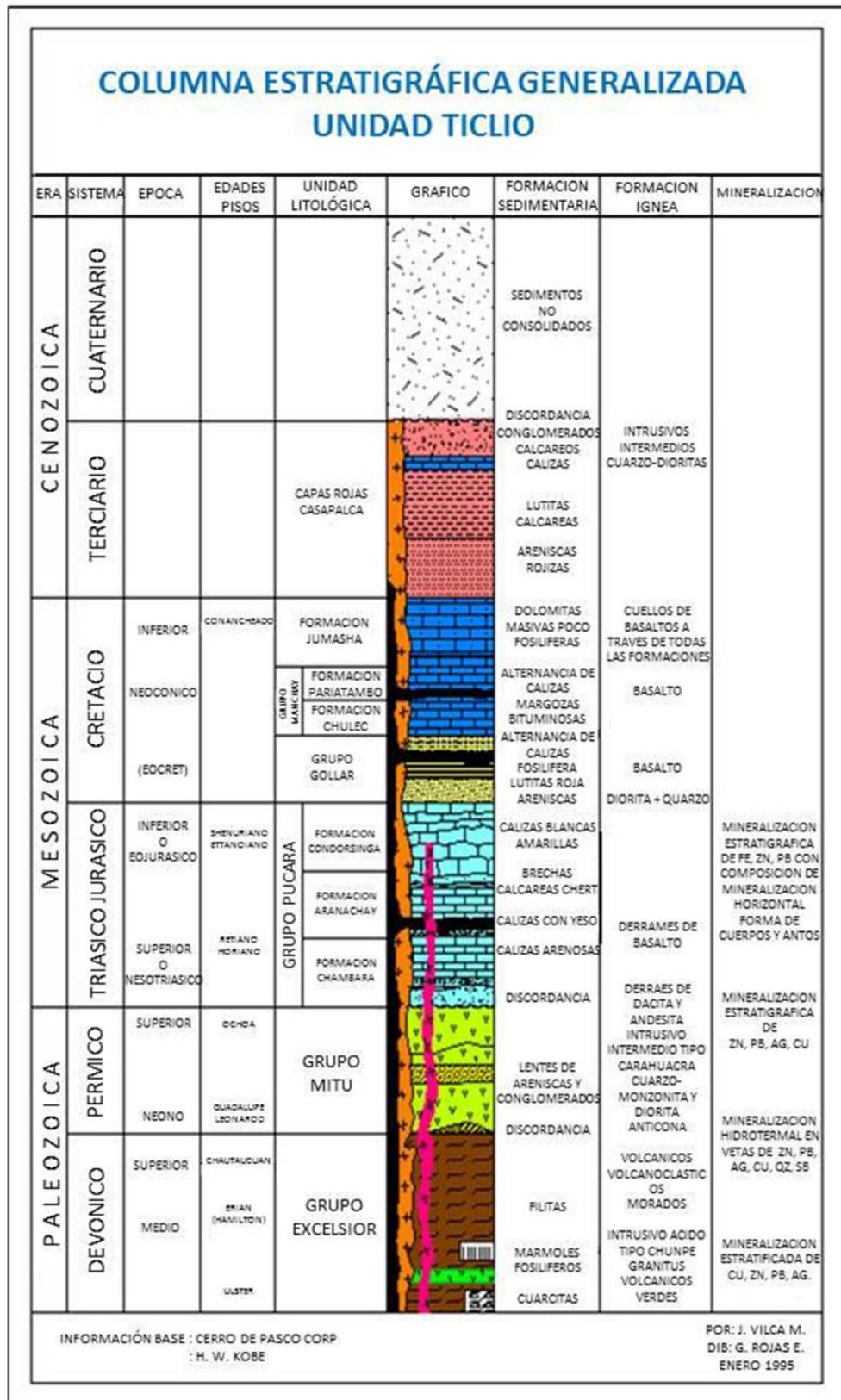
Representada por una potente serie de rocas volcánicas, que se dividen en 3 miembros: Los Volcánicos Tabla Chaca que sobreyacen al conglomerado Carmen, en una sucesión de rocas volcánicas constituidas por tufos, brechas, conglomerados, aglomerados y rocas porfíricas con afloramientos al Oeste del yacimiento. Existen afloramientos de los Volcánicos Carlos Francisco y los Tufos Yauliyacu cuyas características no son reconocidas en la unidad Ticlio.

- **Formación Río Blanco:**

En las partes más altas y ocupando la mayor extensión de los denuncios (Norte del Yacimiento), se dispone una potente serie de volcánicos bien estratificados, de constitución andesita, que corresponde a los Volcánicos Pacococha y que se manifiestan en el área sobre yaciendo a la diorita Anticona.

Figura 4

Columna estratigráfica



Nota: Proyecto minero

3.2.1.2 Rocas Ígneas. Las siguientes:

▪ **Diorita Anticona:**

Constituye un "Stock" que se extiende entre Morococha y Anticona con una dirección general hacia el Nor - Este. Hacia el Este, ha sido instruido en varios lugares por el Pórfido Cuarzo Monzonita de Morococha y Ticlio.

Estas rocas constituyen la intrusión Miocénica más antigua existente en el Domo de Yauli y aún no está relacionada a ningún tipo de mineralización polimetálica, excepto por la formación de hornfels y pequeños cuerpos de magnetita en las calizas huéspedes. Esta ausencia de mineralización en skarn y su asociación a minerales de naturaleza hidratados sugiere la ausencia de fluidos durante el emplazamiento del cuerpo intrusivo de diorita hace 14.11 +/- 0.04 Ma. (Mioceno - S. Beuchat, R. Moritz et al, 2,002)

La Diorita Anticona es color verde oscuro, textura porfirítica, mesócrata, con una matriz compuesta de plagioclasas, cuarzo y óxidos; los fenocristales consisten en plagioclasas, biotita y hornblenda; como minerales accesorios se incluye al apatito y el circón. Las plagioclasas en algunas zonas están parcialmente alteradas a illita-smectita, algo caolinizado y esporádicamente epidotizadas.

La Diorita Anticona contiene numerosos xenolitos negros foliados que pueden variar en diámetro desde unos pocos centímetros hasta un metro, ellos están generalmente compuestos de ensambles micro granulares de plagioclasas, epidota, corindón, cuarzo, turmalina, arcillas y pirita. (R. Moritz et al; 2,002)

▪ **Cuarzo Monzonita Ticlio (Pórfido de Ticlio):**

Aflora en la parte Norte, Nor-Este y Este del campamento. Es una apófisis alargada de rumbo NW – SE e intruyen a la diorita Anticona. En la parte Norte del campamento, intruye a los carbonatos de la formación Jumasha. Es leucócrata, de color blanquecino a rosáceo, grano grueso, textura porfirítica, panidiomórfica con fenocristales de hasta 3 cm., de diámetro de k-feldespatos euhedrales (10-15%) con textura perthítica. Está constituido por plagioclasas euhedrales a subhedrales

(10%), ojos de cuarzo (5–10%), hornblendas y biotita subhedrales; como accesorios a manera de alteración, se observan clorita, sericita y argilita. Los Feldespatos están moderadamente argilizados y esporádicamente sericitizados. Dataciones Radiométricas por U-Pb en circones del monzo-granito de Toromocho, han reportado 9.11 +/- 0.10 m.a., (Mioceno - R. Moritz, 2,002), la similitud litológica con el Pórfido de “Ticlio”, nos permiten suponer una edad semejante.

▪ **Pórfido Dacítico:**

Es un pequeño stock que aflora al Sur y Sureste de los campamentos de Ticlio, es de forma irregular y alargado con rumbo NW – SE. La longitud de afloramiento es de poco más de 1 Km., se halla intruyendo a la Diorita Anticona, a los aglomerados volcánicos de la formación Carlos Francisco y las calizas de la formación Jumasha. El pórfido es de color gris a gris claro, grano medio, leucócrata - melanócrata, textura porfirítica e hipidiomórfica; con fenocristales de plagioclasas y K-feldespatos subhedrales además de ojos de cuarzo anhedrales; las rocas se alteran con débil a moderada argilitización; los minerales accesorios presentes son la hornblenda y la biotita, resaltando en ellos una débil alteración clorítica.

▪ **Diorita Porfirítica Meiggs:**

Estas rocas afloran al Suroeste del área cartografiada, (Monte Meiggs), intruyen a los conglomerados, limolitas calcáreas y limo-arenitas de la formación Casapalca en forma discordante generando a su paso halos de alteración (skarnificación) de hasta unas decenas de metros, afloran con rumbo similar a las capas de la formación Casapalca NW – SE e inclinación de 40° a 50° al SW. Se le puede asignar una edad Terciario superior (Mioceno), ya que puede pertenecer al pulso magmático que permitió el emplazamiento del pórfido de Ticlio.

3.2.2 Geología local

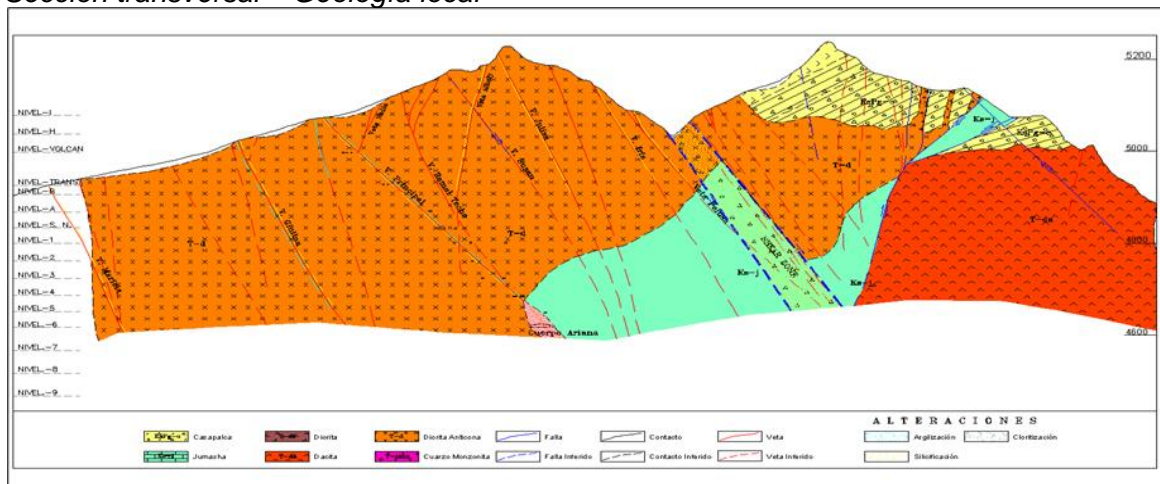
El yacimiento Ticlio corresponde a un sistema hidrotermal de tipo filoneano, caracterizado por la presencia de vetas y cuerpos mineralizados de reemplazamiento desarrollados principalmente en rocas calcáreas. Estos se asocian al contacto intrusivo

entre diorita y caliza Jumasha (Cuerpo Ariana), a brechas calcáreas silicificadas ubicadas en el extremo suroeste del Nivel 5 (túnel Huacracocha), así como a mantos en calizas Jumasha (Manto Adrián) y a pequeños cuerpos de pirita localizados al sur del depósito. Todos ellos se formaron a partir del relleno de fracturas preexistentes en rocas dioríticas, andesíticas y calizas Jumasha.

En la parte norte del yacimiento se ha identificado un afloramiento mineralizado en forma de cuerpo, además de estructuras tabulares en calizas Jumasha, observadas en campañas de exploración superficial, cuya continuidad constituye un objetivo de investigación geológica.

Figura 5

Sección transversal – Geología local



Nota: Proyecto minero

Dentro del conjunto de vetas, destacan por su importancia la Veta Principal, Ramal Techo, Julisa Escondida y Giuliana, además de estructuras secundarias como Rosario y Milagro. Los trabajos de campo recientes han permitido reconocer otras vetas como Iris, Silvia, Pelusa y Blanca, así como la Veta Andrea, identificada a partir de su afloramiento en superficie.

En términos estructurales, el rumbo predominante de las vetas es noreste–suroeste, con espesores que varían entre 0.10 m y 2.00 m, alcanzando en algunos casos extensiones longitudinales de hasta 1,200 m, como ocurre con la Veta Principal. Estas estructuras presentan abundantes lazos cimoides, explotados de manera parcial, y zonas

se desarrolla por procesos de reemplazamiento en intercalaciones de calizas gris claras, moderadamente silicificadas, y calizas blanquecinas de textura marmolizada. En ciertos tramos se observan fisuras abiertas y geodas, las cuales actúan como vías de pérdida de agua. Aunque también se han identificado zonas mineralizadas dentro del intrusivo, la mayor concentración se encuentra alojada en las calizas Jumasha, especialmente en sectores con relleno de paquetes calcáreos próximos al contacto intrusivo.

Actualmente, el manto mineralizado se encuentra en desarrollo en el Nivel 8 (pisos -02 y -03), donde se avanza una rampa de acceso hacia el piso -04. En este nivel, el cuerpo se prepara mediante la labor BP-668W, de orientación N 60°–70° W y buzamiento de 10°–30° hacia NE y SW. Su geometría es ligeramente ovalada, con extremos achatados, alcanzando dimensiones aproximadas de 40 m de ancho por 60 m de longitud, con un espesor medio de 20 m. Aún queda por explorar hacia el sur y el oeste, lo que podría ampliar su extensión.

Las observaciones en los pisos -02 y -03 confirman que la mineralización es de tipo reemplazamiento, con un buen contenido mineralógico y buzamiento de bajo ángulo en la parte central. Se interpreta que el cuerpo se ha formado gracias al aporte mineral de la Veta Principal, Ramal Techo y posiblemente otras vetas angostas ubicadas hacia el sur, las cuales, al intersectar calizas y el contacto intrusivo, actuaron como estructuras alimentadoras (feeders). El área presenta fallamiento y fracturamiento transversal al contacto, además de geodas con pequeñas aberturas. La mineralización predominante está constituida por esfalerita rubia y galena argentífera como relleno de fracturas, con diseminaciones de pirita, acompañadas de cuarzo, calcita y ankerita.

El intrusivo diorítico Anticona constituye la caja techo, presentando textura granular a porfirítica, de tonalidades gris verdosas por procesos de cloritización, y blanquecinas en sectores afectados por argilización moderada a intensa cerca de la mineralización. Desde un punto de vista geomecánico, este litotipo se clasifica entre tipos II y III.

Por su parte, la caja piso está conformada por una intercalación de calizas brechadas, calizas gris claras a oscuras con moderada silicificación y calizas marmolizadas

de color blanco a gris claro. Estas unidades presentan tramos fracturados y algunos horizontes impregnados con bitumen.

3.2.2.2 Veta Principal. La veta principal de Ticlio corresponde a una estructura vetiforme de cizalla, que presenta sistemas secundarios de tensión conformando lazos cimoides visibles tanto en sección horizontal como vertical. Su potencia es variable, mostrando espesores reducidos de 0.05 m a 0.10 m en ciertos tramos, hasta alcanzar dimensiones mayores de 1.20 m a 3.50 m en otros sectores. Esta estructura constituye la unidad más importante, explotada y desarrollada históricamente en Ticlio, dado su potencial y continuidad.

En términos de dimensiones, la veta ha sido reconocida a lo largo de aproximadamente 1,250 m en sentido horizontal y más de 670 m en vertical. Los sondeos recientes hacia el oeste (dentro de calizas) y los avances de laboreo hacia el este (en intrusivos) han demostrado que la mineralización se prolonga a profundidades superiores a la cota 4,537 m.s.n.m. (Nivel 8).

En las áreas de Santa Catalina y San Nicolás, el desarrollo de subniveles cada 10 m ha permitido su explotación mediante el método de taladros largos. Allí, se ha confirmado una longitud de 250 m y una altura de 115 m, alcanzando hasta el Nivel 03. Asimismo, en la zona de San Nicolás y Nivel 1, se han identificado bloques en blanco representados en antiguos planos de la veta principal, en los que se ha comprobado la existencia de mineral. Esto ha dado lugar a la preparación de nuevos subniveles cada 10 m, con longitudes de hasta 75 m y alturas de 40 m, también destinados a su explotación con taladros largos.

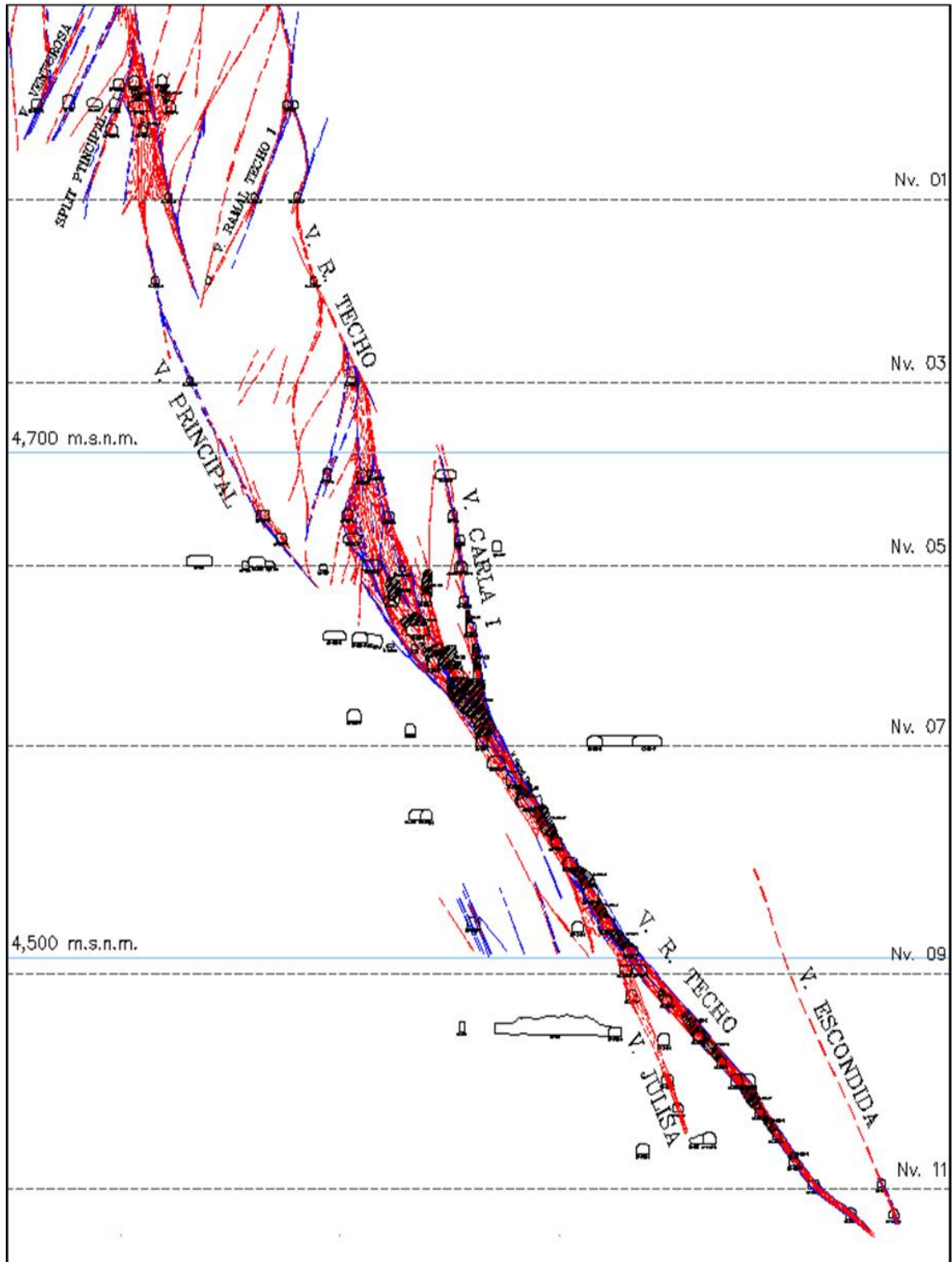
El rumbo general de la estructura es NE–SW, con un buzamiento que varía entre 65° y 70° hacia el SE. Desde el punto de vista mineralógico, el ensamble principal está conformado por esfalerita y galena, acompañadas en menor proporción por ankerita, calcita, rodocrosita, cuarzo y pirita, presentándose en texturas bandeadas o brechadas.

La roca encajonante corresponde a un intrusivo diorítico porfirítico de tonalidad gris verdosa, el cual exhibe procesos de cloritización débil a moderada. En las proximidades de la estructura, se observa una coloración gris clara asociada a alteración argílica y tramos

silicificados, lo que evidencia los procesos hidrotermales que acompañaron la formación y emplazamiento de la veta.

Figura 7

Sección transversal de vetas



Nota: Proyecto minero

3.3 Caracterización de los explosivos y métodos de carguío

La investigación comparó el desempeño de dos tipos de explosivos utilizados en minería subterránea:

- **ANFO (Ammonium Nitrate–Fuel Oil):**

Explosivo económico y de uso extendido, pero con limitaciones importantes como baja resistencia al agua, densidad fija y necesidad de carguío manual.

- **Emulsión bombeable gasificable Slurrex BS:**

Explosivo moderno que se transporta en estado no sensible y se gasifica durante el carguío. Sus principales ventajas son la resistencia al agua, mayor densidad energética, posibilidad de ajuste de densidad (1.06–1.20 g/cm³) y reducción de gases post-voladura.

Tabla 2

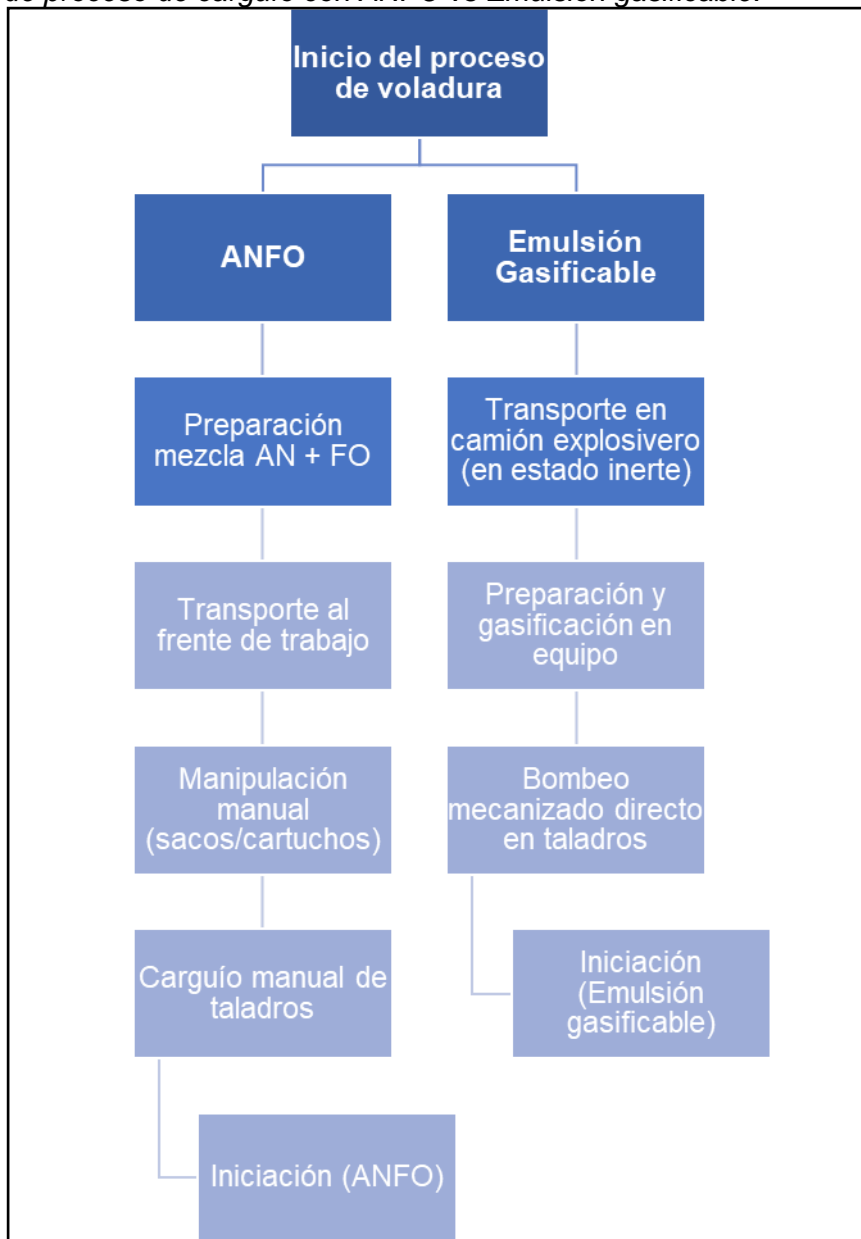
Comparación técnica entre ANFO y emulsión gasificable

| PROPIEDAD TÉCNICA | ANFO | EMULSIÓN GASIFICABLE (Slurrex BS) |
|------------------------------------|--|---|
| Densidad (g/cm ³) | 0.80 – 0.85 | 1.06 – 1.20 (ajustable) |
| Velocidad de detonación (VOD, m/s) | 3,000 – 3,200 | 4,500 – 5,200 |
| Resistencia al agua | Muy baja, se degrada en presencia de humedad | Alta, estable en frentes mojados |
| Método de carguío | Manual, con manipulación directa | Bombeo mecanizado in situ |
| Seguridad en transporte | Sensible, requiere condiciones de seguridad elevadas | Se transporta en estado no explosivo |
| Emissiones post-voladura | Altas concentraciones de CO y NOx | Reducción significativa de gases tóxicos |
| Flexibilidad operativa | Parámetros fijos (densidad y energía) | Densidad ajustable según geomecánica del macizo |
| Nivel de exposición del personal | Alto (contacto directo) | Bajo (carguío mecanizado) |
| Propiedad técnica | ANFO | Emulsión gasificable (Slurrex BS) |
| Densidad (g/cm ³) | 0.80 – 0.85 | 1.06 – 1.20 (ajustable) |

Nota: Elaboración propia

Figura 8

Diagrama de proceso de carguío con ANFO vs Emulsión gasificable.



Nota: Proyecto minero

3.4 Diseño experimental de la investigación

3.4.1 Definición del sistema UBT

SISTEMA UBT (Unidad Bombeable de Túneles): Tecnología basada en una emulsión bombeable gasificable, este producto consiste en el bombeo del tipo de emulsión Agua en Aceite, esta se sensibiliza dentro del taladro y está diseñada para tunelería y labores de desarrollo horizontales y verticales negativos en minería subterránea.

- Recomendable para taladros de diámetro mayores a 51mm.

- Emulsión a granel no sensible en su transporte ni almacenamiento.
- Empleando soluciones especiales para el control de la densidad final se sensibilizada mediante la gasificación química obteniéndose así la condición de explosivo recién en los taladros ya cargados luego del bombeo Mediante las unidades UBT (Unidad Bombeable de Túneles).
- Al gasificarse durante los 15min alcanza un esponjamiento promedio que varía de un 10 a 15% lo que permite un alto grado de confinamiento y por ende alta eficiencia.
- Excelente resistencia al agua.

Figura 9

Vista del módulo UBT anclado sobre un camión chasis



Nota: Proyecto minero

3.4.1.1 Características Matriz Slurrex Bs (Emulsión Oxidante Gasificable).

Emulsión a base de nitrato de amonio y agentes potenciadores formulada para sensibilizarse químicamente a través de una dosis de Nitrito de Sodio dentro del taladro, una vez gasificada es sensible al detonador N° 8 a más.

Tabla 3

Característica Emulsión Matriz

| CARACTERÍSTICA EMULSIÓN MATRIZ | VALOR |
|---|---------------|
| Viscosidad (cP) equipo Brookfield DV-II+ Pro Spring 7 a 20 RPM. | 45000 – 55000 |
| Densidad (g/cm ³) | 1.34 – 1.36 |
| Velocidad de gasificado ¹ | 15 minutos |
| Diámetro de micro gota (um) | 08 – 16 |
| Sensibilidad al fulminante en 2" de diámetro | O K |
| Resistencia al bombeo | 5 bombeos |
| Estabilidad al tiempo (condiciones normales) | 3 meses |
| Resistencia al agua | O K |

Nota: Elaboración propia

Las burbujas formadas en el gasificado son uniformes y de un tamaño adecuado para una buena detonación (menores a 0.5 mm).

3.4.1.2 Características técnicas de la emulsión gasificada Slurrex Bs. Estas

se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4

Característica emulsión gasificada Slurrex Bs

| CARACTERÍSTICA | VALOR |
|---|-------------|
| Vod (m/s) (tubo de cartón 2" iniciado con fulminante N°8) | 3600 - 4200 |
| Energía (Kcal/Kg) | 857.8 |
| Presión (Kbar) | 79.6 |
| Volumen de gases (L/Kg) | 949.5 |
| Potencia relativa peso (%) | 94.9 |
| Potencia relativa Volumen (%) | 133.8 |
| Balance de Oxigeno | -6 |
| Shell Life (Condiciones Normales) Días | |

Nota: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla de velocidad de gasificado empleando las soluciones L-9 y N-17 a una temperatura de Matriz Bs de 20°C la densidad inicial de la matriz es de 1.37 g/cm³.

Tabla 5

Tabla de gasificación teórica

| % L-9 | % N-17 | Densidad a 15 minutos | Densidad de Estabilización |
|-------|--------|-----------------------|----------------------------|
| 0.5 | 0.5 | 1.17 | 1.14 |
| 0.6 | 0.5 | 1.14 | 1.10 |
| 0.7 | 0.5 | 1.10 | 1.04 |
| 0.6 | 0.6 | 1.10 | 1.08 |
| 0.5 | 0.6 | 1.16 | 1.15 |
| 0.5 | 0.7 | 1.15 | 1.14 |

Nota: Elaboración propia

Datos técnicos operativos promedio modulo UBT, emulsión matriz y aditivos sensibilizantes.

Tabla 6

Característica emulsión gasificada Slurrex Bs

| PARÁMETRO | VALOR |
|--|------------------------------------|
| Flujo de Carguio | 16 kg/min |
| Presión promedio de operación | 15 - 30 PSI. |
| Temperatura de Matriz (condición para la dosificación de aditivos) | 4 - 7 °C |
| Solución L – 9 | 0.72 – 0.75% |
| Solución N – 17 | 0.76 – 0.80% |
| Densidad Variable según macizo roca | 1 – 1.19gr/cm ³ (15min) |

Nota: Elaboración propia

La calidad de roca en los frentes donde realizamos las pruebas son variables, por lo que para medir dicha característica se utilizó el RMR (Rock Mass Rating - calidad del

macizo rocoso) según Bieniawski (1989) en un rango de 25 – 61, en una valoración de 0 a 100; de acuerdo con lo anterior es necesario usar el explosivo con densidad variable adecuado a la condición de macizo rocoso.

Considerando la información geotécnica a mayor RMR se tiene que ajustar la densidad del Slurrex BS más alta (VOD Alto) y a menor RMR menos densidad de la emulsión gasificada (VOD medio a bajo).

La densidad del Slurrex BS con que se trabajó fue de:

Tabla 7

Característica emulsión gasificada Slurrex Bs

| TIPO DE ROCA | VALOR |
|--------------------|--------------------|
| Roca tipo IV. | 1 – 1.10gr/cm3 |
| Roca tipo III. | 1.10, - 1.15gr/cm3 |
| Roca tipo II - IB. | 1.15 – 1.20gr/cm3 |

Nota: Elaboración propia

3.4.2 Definición del sistema UBT

Los parámetros de diseño fueron:

- Sección de galería: 3.5–5.0 m².
- Taladros: 38–45 mm de diámetro, 2.8-3.0 m de longitud.
- Malla de perforación: burden promedio de 0.8-1.0 m y espaciamiento de 1.0-1.2 m.
- Avance teórico esperado: 2.5-3.0 m por disparo.

Tabla 8

Características de las labores

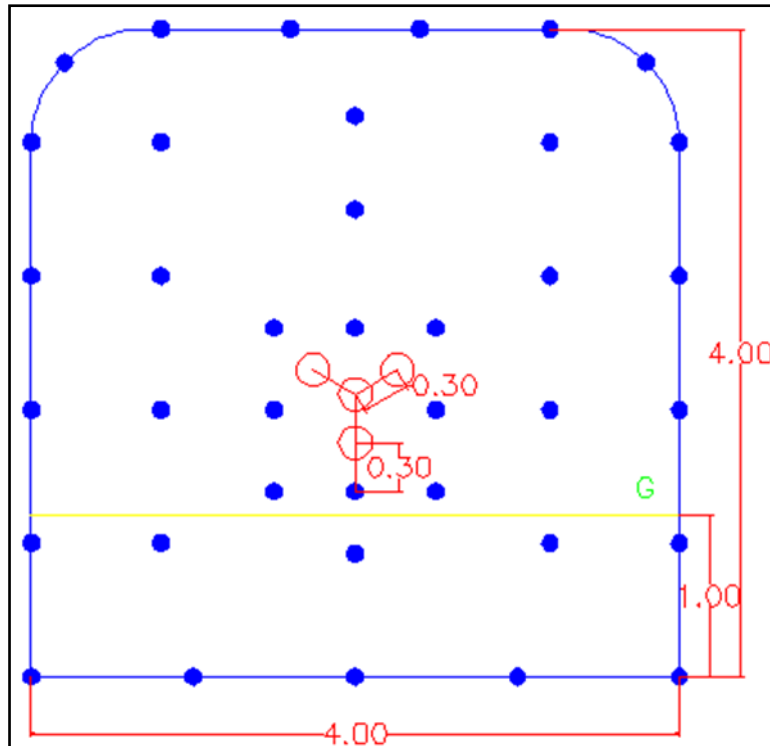
| Labor | Tipo de Labor | Tipo de Material | RMR | Ancho (m) | Alto (m) |
|------------|---------------|------------------|------|-----------|----------|
| AC_741 | Acceso | Desmante | IIIB | 3.5 | 3.5 |
| AC_742 | Acceso | Desmante | IVA | 3.5 | 3.5 |
| RP(+)_350 | Rampa | Desmante | IIIB | 4 | 4.5 |
| | Rampa | Desmante | IVA | 4 | 4.5 |
| SN_544-W-1 | Subnivel | Mineral | IIIB | 3.5 | 3.5 |
| SN_544-W-2 | Subnivel | Mineral | IIIB | 3.5 | 3.5 |
| SN_544-W-3 | Subnivel | Mineral | IVA | 3.5 | 3.5 |

Nota: Elaboración propia

Mallas de perforación de labores disparadas con SLURREX BS – EXSA.

Figura 10

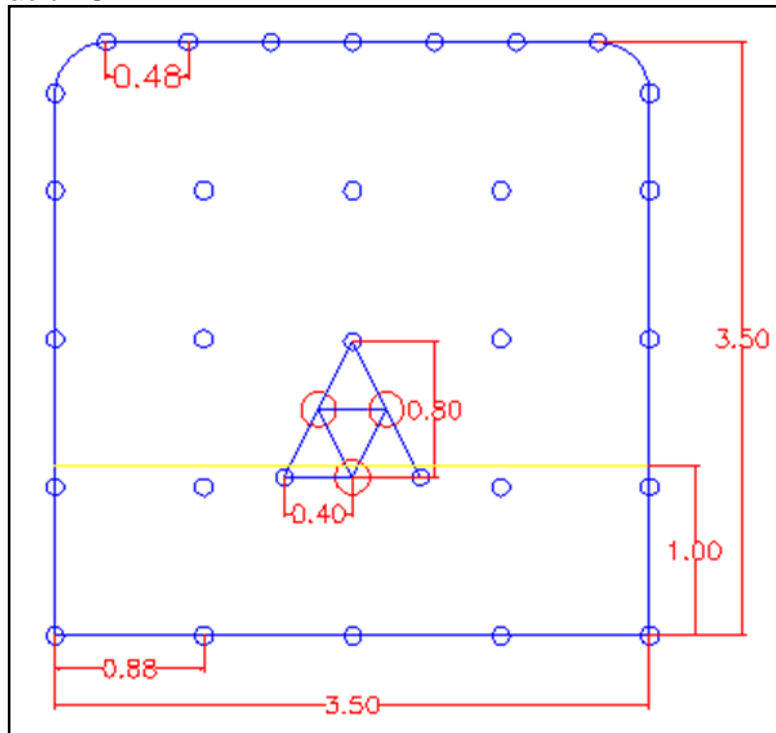
Malla de perforación RP 350



Nota: Elaboración propia

Figura 11

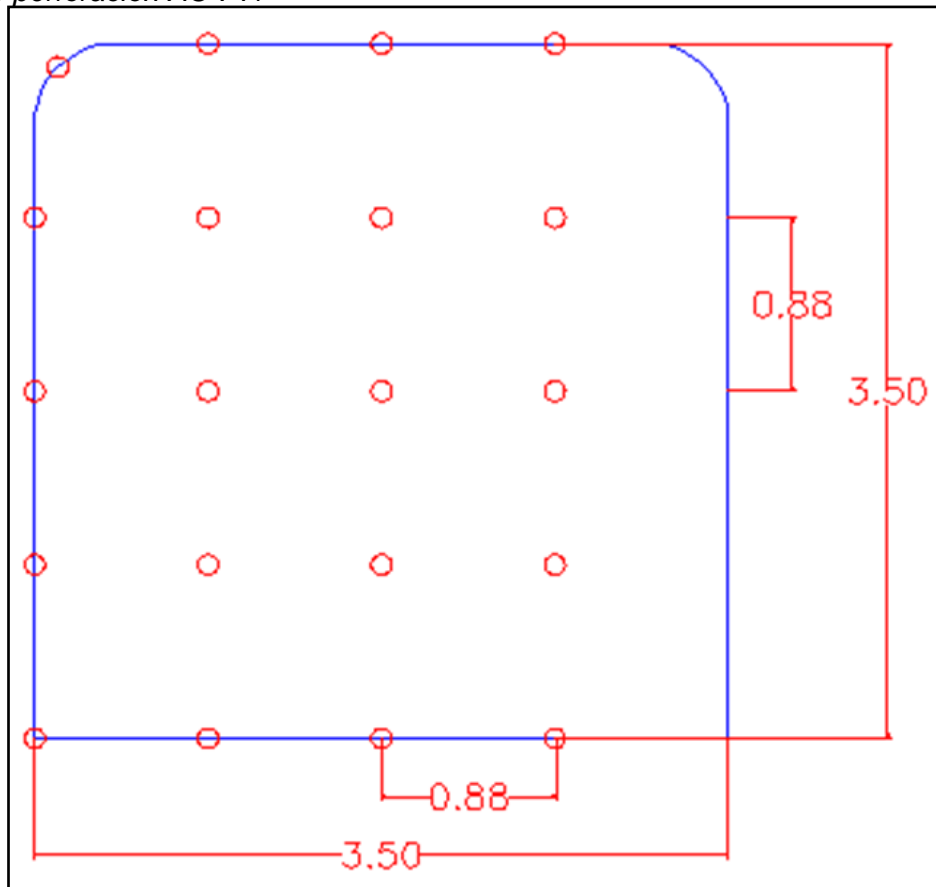
Malla de perforación SN 744 W



Nota: Elaboración propia

Figura 12

Malla de perforación AC 741



Nota: Elaboración propia

Tabla 9

Distribución de taladros

| LABOR | ANFO | | | EMULSIÓN GASIFICABLE | | |
|------------|------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| | N° Taladros Producción | "N° Taladros Alivio | N° Taladros Rimado | N° Taladros Producción | "N° Taladros Alivio | N° Taladros Rimado |
| AC_741 | 20 | 3 | 1 | 20 | 3 | 1 |
| AC_742 | 21 | 3 | 2 | 21 | 3 | 2 |
| RP(+)_350 | 43 | 9 | 4 | 43 | 9 | 4 |
| | 42 | 9 | 4 | 42 | 9 | 4 |
| SN_544-W-1 | 24 | | 3 | 24 | 5 | 3 |
| SN_544-W-2 | 31 | | 3 | 31 | 5 | 3 |
| SN_544-W-3 | 26 | 5 | 3 | 26 | 5 | 3 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 10*Consumo de explosivos y accesorios*

| LABOR | Semexsa 65 1 1/2x12 (Cart) | Semexsa 65 1 1/2x12 (Kg) | ANFO (Kg) | Exsanel (Detonador Eléctrico Retardo) (Und) | Cordón Detonante 4N (m) | Mecha Rápida (m) | Detonador Ensamblado (Und) |
|----------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|---|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| AC_741 | 20 | 7.35 | 65.00 | 22 | 12 | 0.2 | 2 |
| AC_742 | 21 | 7.72 | 86.25 | 23 | 15 | 0.2 | 2 |
| RP(+)_350 | 43 | 15.81 | 117.50 | 45 | 25 | 0.2 | 2 |
| | 42 | 15.44 | 124.00 | 44 | 25 | 0.2 | 2 |
| SN_544- W-1 | 24 | 8.82 | 60.00 | 26 | 15 | 0.2 | 2 |
| SN_544- W-2 | 31 | 11.40 | 102.50 | 33 | 15 | 0.2 | 2 |
| SN_544- W-3 | 26 | 9.56 | 125.00 | 28 | 15 | 0.2 | 2 |

Nota: Elaboración propia

3.5 Procedimiento experimental**3.5.1 Pruebas con ANFO**

Se utilizaron datos históricos de voladuras realizadas con ANFO en la misma unidad minera. Estos registros incluyeron parámetros técnicos y económicos tales como: avance lineal, fragmentación, sobre-rotura, tiempo de carguío, gases residuales y costos directos.

Tabla 11*Resumen de parámetros técnicos de voladuras con ANFO*

| LABOR | Avance Real (m) | Sobrerotura (%) | Eficiencia de Voladura (%) | Tiempo de Carguío (min) | Costo Total (\$) |
|------------|-----------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| AC_741 | 2.00 | 15% | 87% | 50 | 132 |
| AC_742 | 1.76 | 15% | 74% | 50 | 162 |
| RP(+)_350 | 2.81 | 12% | 84% | 66 | 285 |
| SN_544-W-1 | 1.80 | 12% | 86% | 54 | 143 |
| SN_544-W-2 | 2.65 | 14% | 85% | 54 | 211 |
| SN_544-W-3 | 2.03 | 15% | 81% | 54 | 218 |

Nota: Elaboración propia

3.5.2 Pruebas con emulsiones gasificables

Se realizaron disparos experimentales con el explosivo Slurrex BS, aplicando bombeo mecanizado directo en taladros. Además de los parámetros ya descritos para ANFO, se controló el rango de densidad ajustado por gasificación y la eficiencia del proceso de carguío.

Tabla 12

Resumen de parámetros técnicos de voladuras con Slurrex BS

| LABOR | Avance Real (m) | Sobrerotura (%) | Eficiencia de Voladura (%) | Tiempo de Carguío (min) | Costo Total (\$) |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| AC_741 | 2.05 | 12% | 98% | 50 | 132 |
| AC_742 | 2.28 | 12% | 98% | 50 | 162 |
| RP(+)_350 | 3.29 | 9% | 98% | 66 | 285 |
| SN_544-W-1 | 2.05 | 9% | 98% | 54 | 143 |
| SN_544-W-2 | 2.85 | 11% | 90% | 54 | 211 |
| SN_544-W-3 | 2.33 | 12% | 97% | 54 | 218 |

Nota: Elaboración propia

3.6 Enfoque metodológico

El estudio se enmarca en un diseño aplicado y comparativo, con un enfoque cuasi-experimental, ya que las pruebas con emulsiones se realizaron en condiciones reales de mina, mientras que los resultados con ANFO se obtuvieron de datos históricos de la misma operación.

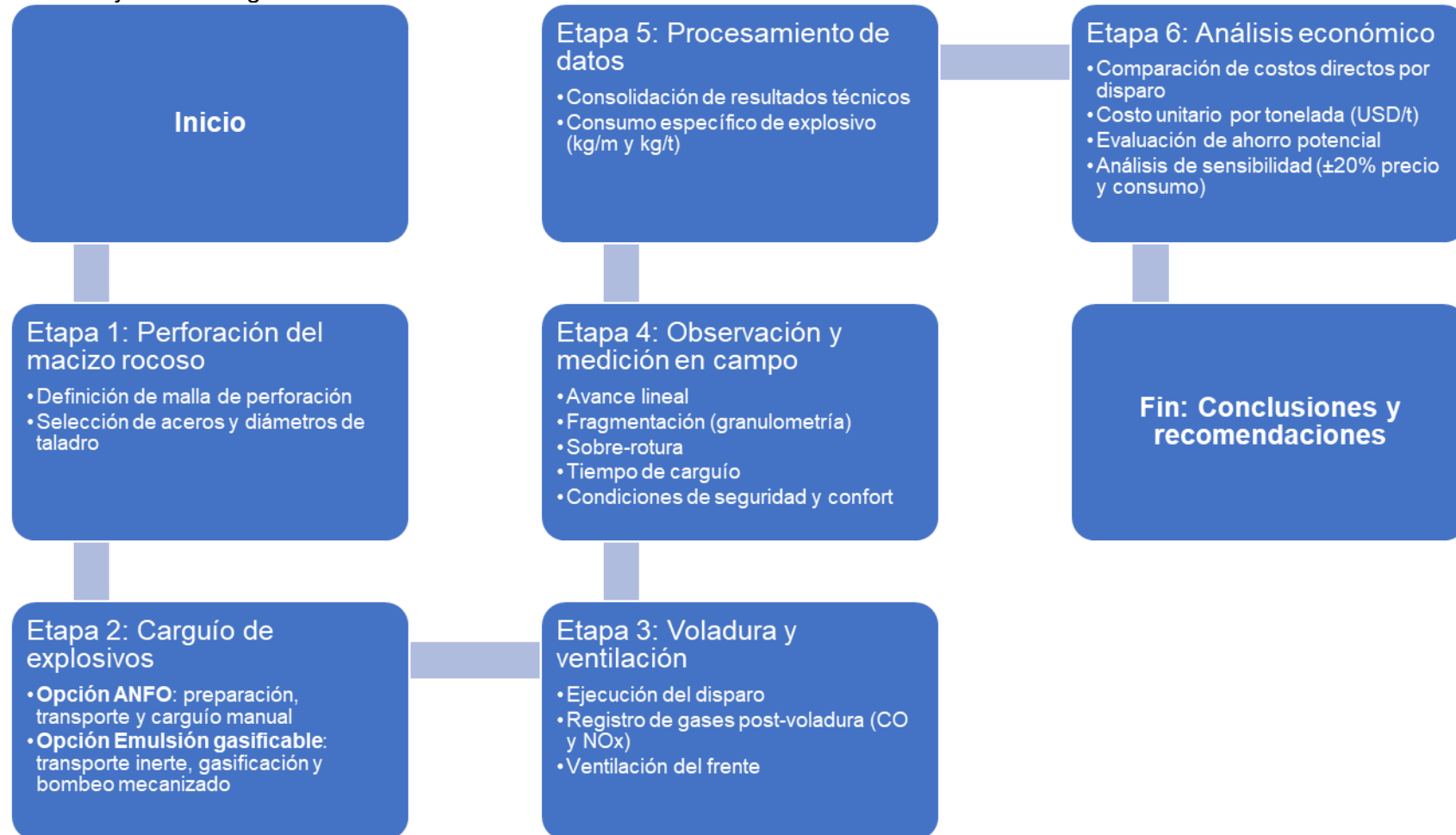
La metodología asegura comparabilidad bajo las siguientes premisas:

- Diseño de malla constante.
- Condiciones de perforación equivalentes.
- Registro de los mismos indicadores técnicos y económicos.

Se reconocen algunas limitaciones: el número de disparos analizados, la variabilidad del macizo rocoso y la disponibilidad de información histórica, factores que fueron mitigados mediante control estricto de condiciones y validación cruzada de resultados.

Figura 13

Diagrama de flujo metodológico del estudio



Nota: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

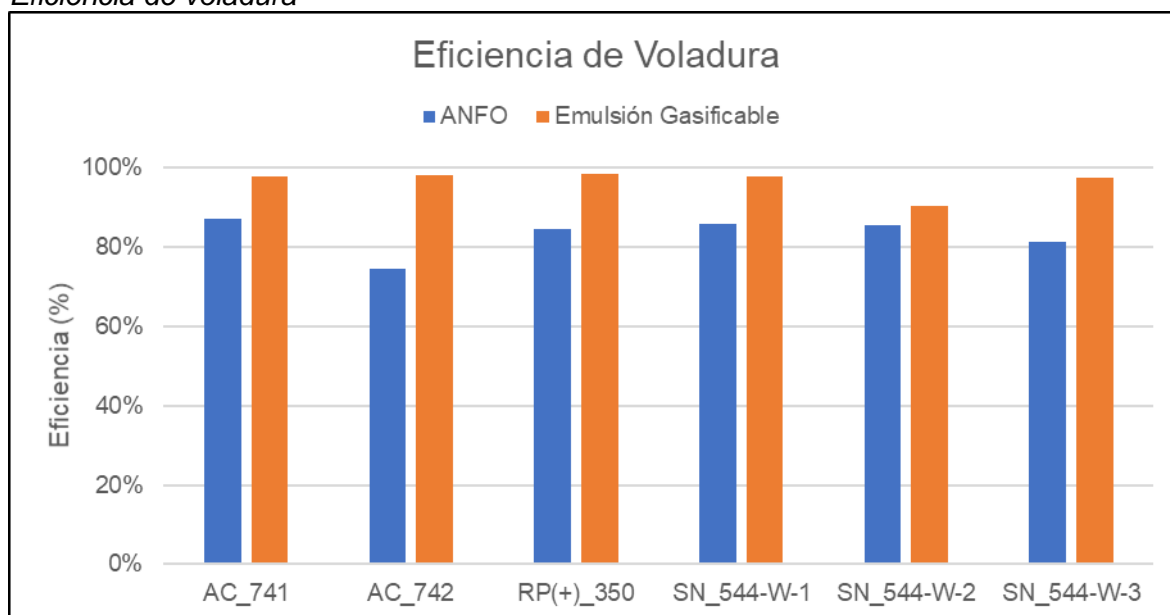
4.1 Resultados técnicos en campo

4.1.1 Avance lineal

Las pruebas de voladura realizadas en la mina Ticlio muestran que el uso de emulsiones bombeables gasificables (Slurrex BS) alcanzó un rendimiento de avance lineal del 96 % respecto al diseño teórico, superando al ANFO, que registró un avance del 82 %. Este resultado evidencia una mayor eficiencia en la transferencia de energía de la emulsión hacia el macizo rocoso, lo que permite lograr avances más cercanos al planeado y mejorar la continuidad del ciclo de minado.

Figura 14

Eficiencia de voladura



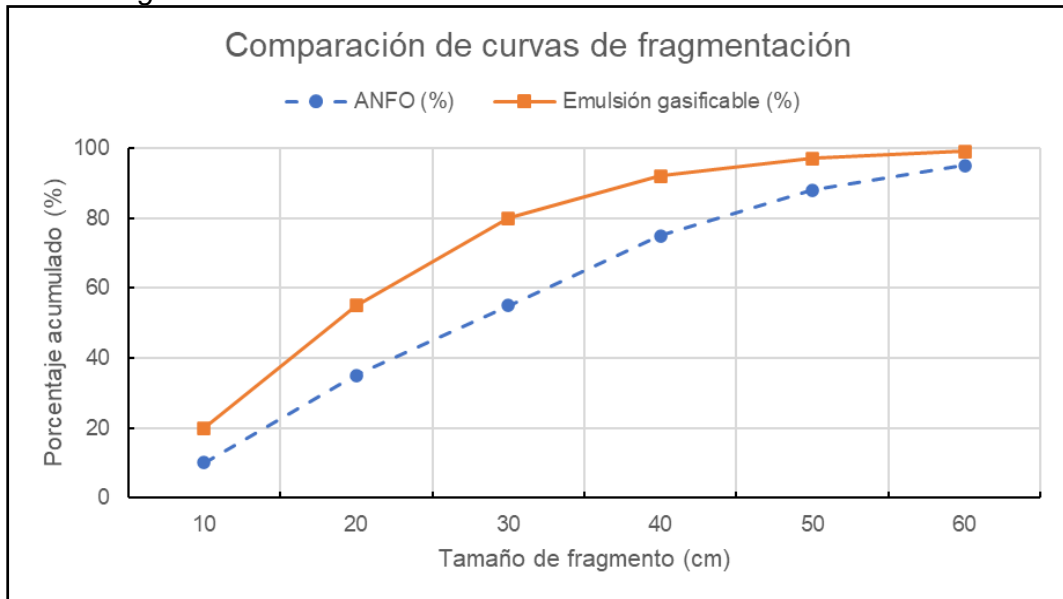
Nota: Proyecto minero

4.1.2 Fragmentación

La fragmentación obtenida con Slurrex BS presentó un tamaño promedio de 25–30 cm, con distribución homogénea y sin presencia significativa de bloques sobredimensionados. En contraste, el ANFO generó fragmentos de mayor tamaño, con promedios superiores a los 45 cm, lo que incrementó la necesidad de operaciones de reducción secundaria y, por ende, mayores costos asociados.

Figura 15

Análisis de fragmentación



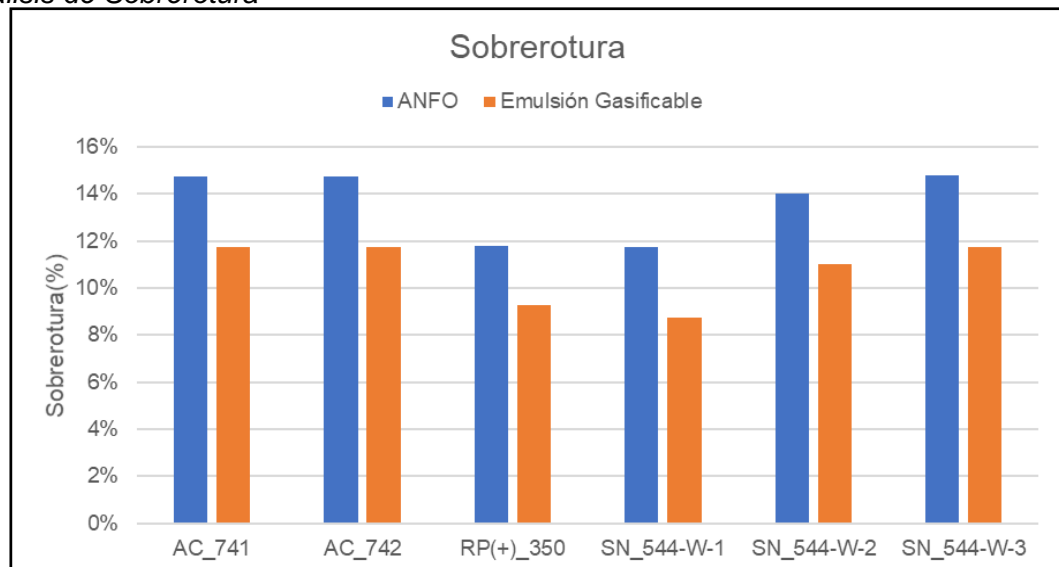
Nota: Proyecto minero

4.1.3 Sobre-rotura

El control de la sobre-rotura es otro aspecto diferenciador: las voladuras con emulsiones presentaron un nivel de sobre-rotura menor al 10 %, frente al 18 % obtenido con ANFO. Esta diferencia impacta directamente en la estabilidad de los contornos excavados y en la reducción de costos de sostenimiento, al disminuir la afectación del macizo circundante.

Figura 16

Análisis de Sobrerotura



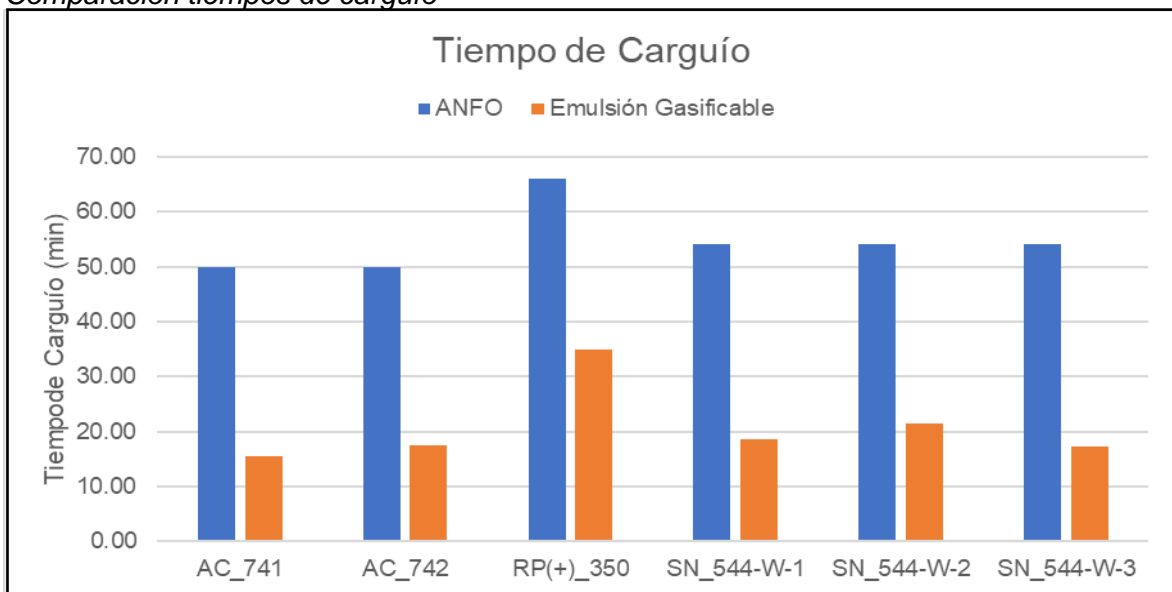
Nota: Proyecto minero

4.1.4 Tiempo de carguío

El empleo de equipos de bombeo para la carga de emulsiones permitió una reducción significativa en los tiempos de operación. En promedio, el tiempo total de carguío se redujo en un 60–70 % respecto al método manual con ANFO, lo que se traduce en una mayor disponibilidad de los frentes de trabajo y en una optimización del ciclo productivo.

Figura 17

Comparación tiempos de carguío



Nota: Proyecto minero

4.1.5 Generación de gases

Se registró una disminución importante en la generación de gases tóxicos (CO y NOx) al emplear emulsiones gasificables, en comparación con el ANFO. Esta reducción no solo contribuyó a mejorar la ventilación de los frentes, sino que además permitió acortar los tiempos de espera post-disparo y elevar el nivel de seguridad y confort para los trabajadores.

4.1.6 Ajuste de densidad

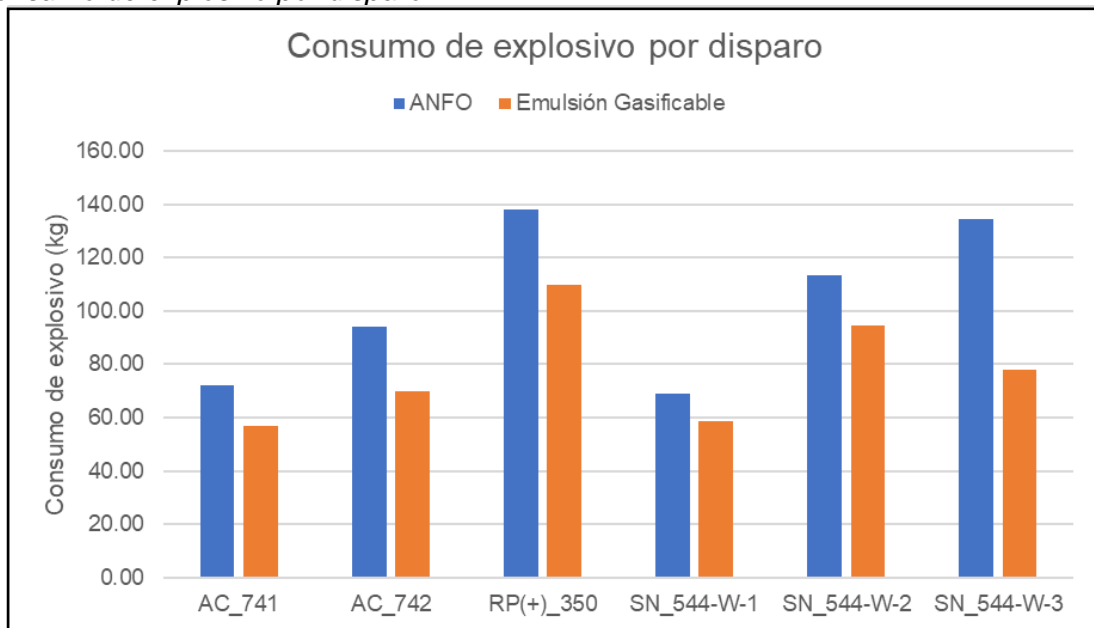
Una de las ventajas técnicas más relevantes de las emulsiones gasificables es la posibilidad de ajustar la densidad en un rango de 1.06–1.20 g/cm³, adaptándose a las condiciones específicas del macizo rocoso en cada disparo. El ANFO, en cambio, posee una densidad fija que limita su capacidad de optimización frente a variaciones geomecánicas.

4.2 Análisis económico

El análisis económico realizado permitió comparar los costos directos de la voladura entre el uso de ANFO y emulsiones bombeables gasificables (Slurrex BS), considerando el consumo de explosivos, accesorios de voladura, mano de obra de carguío y el volumen de roca removida en cada disparo.

Figura 18

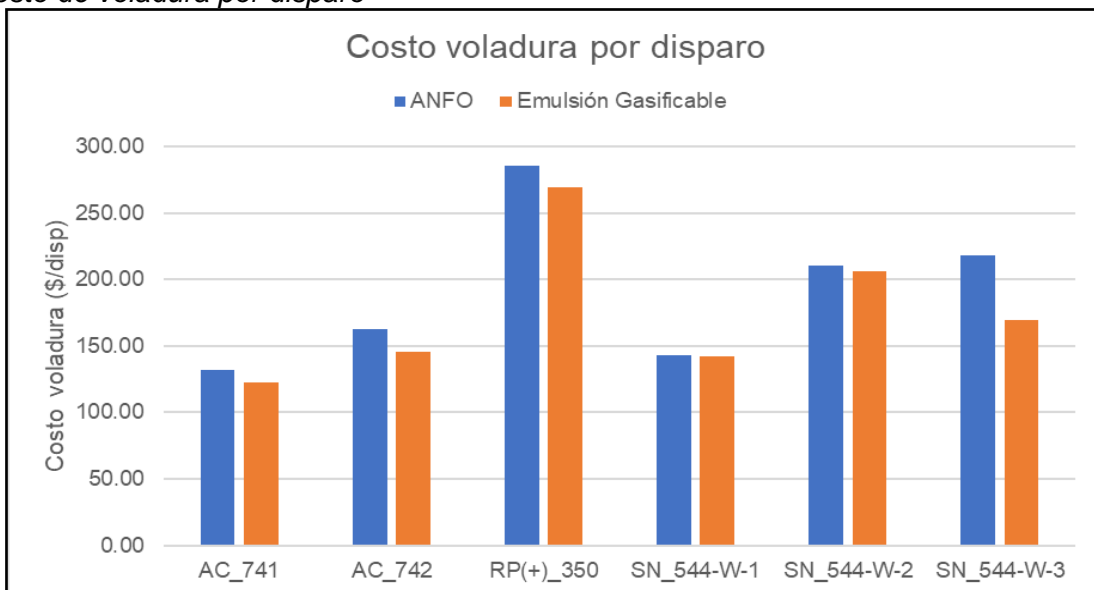
Consumo de explosivo por disparo



Nota: Proyecto minero

Figura 19

Costo de voladura por disparo



Nota: Proyecto minero

Los resultados evidencian que, en promedio, el Slurrex BS presenta un costo total menor por disparo (195.86 USD) que el ANFO (213.60 USD), aun cuando su precio unitario por kilogramo es superior. Esta ventaja se explica principalmente por el menor consumo por disparo y la reducción significativa en los tiempos de carguío debido al bombeo mecanizado.

Tabla 13

Comparativo de costos

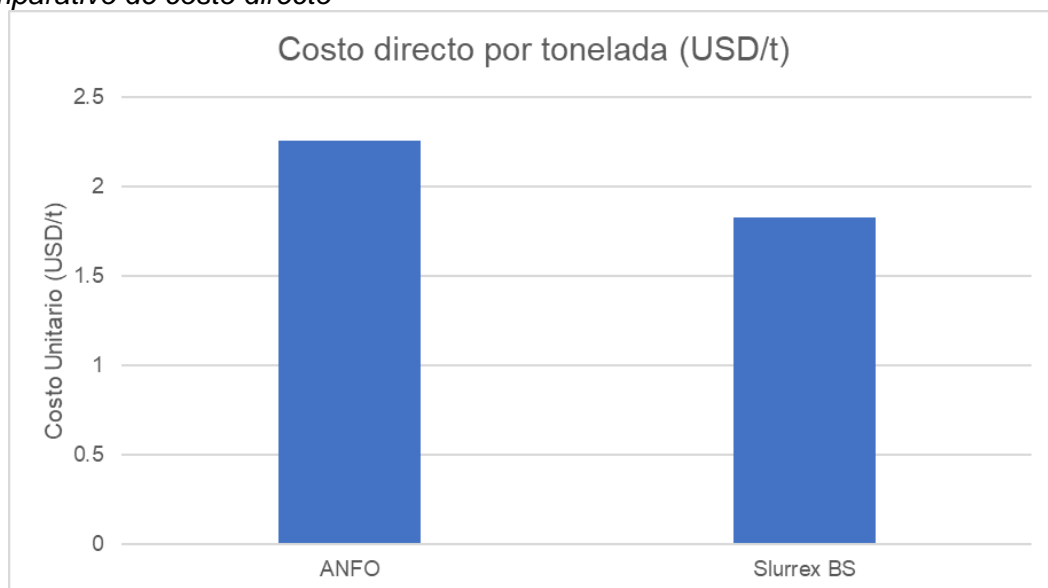
| CONCEPTO | ANFO | Slurrex BS | Diferencia |
|------------------------------------|-------|------------|------------|
| Costo total por disparo (USD) | 213.6 | 195.86 | -17.73 |
| Toneladas voladas por disparo (t) | 94.42 | 107.01 | -0.43 |
| Costo directo por tonelada (USD/t) | 2.26 | 1.83 | -8.3 % |

Nota: Elaboración propia

En términos de productividad, el Slurrex BS movió en promedio 107.01 t/disparo, frente a 94.42 t/disparo con ANFO, lo cual se traduce en un costo directo unitario de 1.83 USD/t para emulsiones frente a 2.26 USD/t para ANFO. La diferencia de 0.43 USD/t (-8.3 %) representa un ahorro directo por disparo de aproximadamente 17.73 USD, consolidando a las emulsiones como una alternativa más competitiva.

Figura 20

Comparativo de costo directo



Nota: Proyecto minero

4.3 Implicancias para la decisión operativa

El ahorro directo identificado al emplear emulsiones gasificables tiene importantes implicancias para la gestión minera:

- **Reducción en costos operativos:**

Slurrex BS reduce en promedio 0.43 USD/t los costos directos, lo que acumulado a la escala de una operación subterránea puede representar miles de dólares por mes.

- **Mayor productividad:**

La mayor cantidad de toneladas voladas por disparo mejora la continuidad operativa y disminuye la variabilidad del ciclo de minado.

- **Robustez del ahorro:**

Aun con fluctuaciones en precios y consumos, la emulsión mantiene su ventaja en la mayoría de escenarios razonables.

- **En operaciones con condiciones similares a Ticlio,**

La adopción de emulsiones gasificables debe considerarse como una estrategia costo-eficiente, que además aporta beneficios adicionales en seguridad y ventilación no contemplados en este análisis.

Conclusiones

En función del análisis técnico–económico realizado, se concluye que el uso de emulsiones bombeables gasificables en minería subterránea constituye una alternativa superior frente a los explosivos convencionales (dinamita y ANFO). Desde el punto de vista técnico, las pruebas en campo y las simulaciones demostraron un incremento tangible en la productividad en parámetros clave del ciclo de minado: aumento del volumen de material volado por disparo, pasando de 94.42 t/disparo con ANFO a 107.01 t/disparo con emulsión Slurrex BS lo que representa una mejora promedio del 13 % en la productividad operativa, el avance lineal alcanzó niveles superiores al 96 %, la fragmentación promedio se mantuvo en el rango óptimo de 25–30 cm y la sobre-rotura se controló por debajo del 10 %, contribuyendo a la estabilidad estructural de las labores. La reducción del tiempo de carguío en un 60–70 % y la menor generación de gases tóxicos validan además su aporte directo a la continuidad operativa, a la seguridad ocupacional y al confort de los trabajadores.

Desde la perspectiva económica, aunque el costo unitario del explosivo es ligeramente mayor al de dinamita y ANFO, los ahorros acumulados en ventilación, sostenimiento y reducción de voladura secundaria compensan sobradamente dicha diferencia. El análisis comparativo evidenció un ahorro global de entre 10 y 15 % en los costos operativos de voladura, consolidando a las emulsiones gasificables como una opción competitiva y rentable. Estos resultados se obtienen bajo condiciones representativas de operación subterránea y demuestran que el beneficio económico proviene no solo de la etapa de voladura, sino de la optimización integral del ciclo productivo.

En conjunto, el estudio confirma que la aplicación de emulsiones bombeables gasificables es técnica y económicamente viable, aportando mejoras tangibles en productividad, seguridad y sostenibilidad. Su adopción permite proyectar operaciones más eficientes y confiables, con impactos positivos en la rentabilidad global del proyecto minero.

Recomendaciones

Aunque los resultados obtenidos confirman que las emulsiones bombeables gasificables representan una alternativa más eficiente que el ANFO convencional, se recomienda complementar la evaluación mediante ensayos controlados a escala piloto que permitan validar la influencia de estas emulsiones en diferentes litologías y condiciones de humedad. Este tipo de pruebas facilitará la calibración de los parámetros de diseño de malla de perforación y optimizará los factores de carga.

El éxito en la implementación de emulsiones gasificables depende en gran medida de la correcta configuración de los equipos de bombeo, el control de la densidad del explosivo y la uniformidad de la gasificación. Por ello, resulta recomendable incorporar sistemas de monitoreo en tiempo real que permitan verificar la densidad y el volumen cargado en cada taladro, lo cual asegurará la consistencia del resultado y reducirá el riesgo de sobrerotura o fallas en la fragmentación.

Desde una perspectiva económica, se recomienda aplicar simulaciones de riesgo financiero (como Monte Carlo) que integren la variabilidad en los costos de insumos, el desempeño de fragmentación y la eficiencia en el acarreo y procesamiento. Este análisis permitirá conocer los rangos de sensibilidad del VAN y el costo por tonelada frente a fluctuaciones del mercado de explosivos o variaciones en la productividad.

En términos de seguridad operacional, la implementación de emulsiones bombeables debe ir acompañada de programas de capacitación específicos para el personal de mina, con énfasis en el manejo de equipos de bombeo, protocolos de carga y medidas de respuesta ante contingencias. La reducción del riesgo por manipulación de ANFO a granel será significativa solo si los operadores comprenden y aplican correctamente los procedimientos estandarizados.

Finalmente, considerando que los mayores beneficios de las emulsiones gasificables se observan en operaciones con altos niveles de humedad y con exigencia de fragmentación controlada, se recomienda priorizar su aplicación en zonas de geología

compleja o con mineralizaciones sensibles a la dilución. Esto permitirá maximizar el valor agregado del explosivo, optimizar los ciclos de producción y reducir costos asociados al retrabajo y la sobrerotura.

Referencias bibliográficas

- Aranibar, J., & Bringas, M. (2013). Informe técnico – *Carguío mecanizado con emulsión gasificada a granel en la mina subterránea Ticlio – Volcan Compañía Minera*. EXSA Asistencia Técnica Minería Subterránea, Perú.
- Aranibar, J., & Bringas, M. (2013). Informe técnico – *Carguío mecanizado complementario con emulsión gasificada a granel en la mina subterránea Ticlio – Volcan Compañía Minera*. EXSA Asistencia Técnica Minería Subterránea, Perú.
- Atlas Copco. (2012). Informe técnico – *Uso de aceros de perforación en mina Ticlio*. Atlas Copco Aceros, Perú.
- Cao Rodríguez, M. (s. f.). Conferencia – *Emulsiones explosivas en Colombia*. ENAEX, Colombia.
- Franco Rojas Boza, F. (2013). Informe técnico – *Uso de emulsiones bombeables gasificables a granel en labores de desarrollo y bancos (Bench and Fill) en la mina Ticlio*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (UNI-FIGMM), Perú.
- Franco Rojas Boza, F. (2013). *Informes técnicos de perforación y voladura en mina Ticlio*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (UNI-FIGMM), Perú.
- Franco Rojas Boza, F. (2014). *Informe de prácticas preprofesionales en la mina Ticlio*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (UNI-FIGMM), Perú.
- Guerra, A. (2010, marzo). Conferencia – *Emulsiones bombeables gasificadas pequeño diámetro: Aplicación en túneles y minería subterránea, Sistema UBT*. Seminario Internacional de Túneles y Aplicación ITS, Buenos Aires, Argentina.
- Jiménez Mujica, A. G. (2006, marzo). *Diseño y cálculo de la voladura de una galería* [Tesis de pregrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Morelia, Michoacán, México.

- Orica. (2004, enero). Informe técnico – *Diseño y construcción de un prototipo de carguío de emulsión gasificada a granel para la minería subterránea*. ORICA, Perú.
- Portilla, A. (2009). Informe técnico – *Carguío mecanizado de taladros con emulsión a granel por FAMESA en la Empresa Minera Subterránea ARGENTUM*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (UNI-FIGMM), Perú.
- Portilla, A. (2010, abril). Informe técnico – *Línea base: Volcan – EXSA Mina San Cristóbal*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (UNI-FIGMM), Perú.
- Proaño Cadena, G. (s. f.). *Apuntes del curso para la asignatura de Perforación y Voladura*. Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Rozas, E. (2012). Informe técnico – *Introducción a un nuevo sistema de aplicación de explosivos para el proyecto del túnel Chevez*. EXSA, Perú.

Anexos

| | Pág. |
|--|------|
| Anexo 1 : Ficha técnica Slurrex BS..... | 1 |
| Anexo 2 : Especificaciones técnicas de aditivos de dosificación | 2 |
| Anexo 3 : Proceso de Gasificación | 3 |
| Anexo 4 : Dispositivos de Seguridad en MODULO UBT - EXSA..... | 5 |
| Anexo 5 : Detalle del Módulo UBT | 10 |
| Anexo 6 : Ejecución del carguío con equipo UBT | 11 |
| Anexo 7 : Muestreo de densidad del producto | 12 |
| Anexo 8 : Control del Proceso de Gasificación en campo..... | 13 |
| Anexo 9 : Pantalla de Operación del equipo | 15 |
| Anexo 10: Frentes cargados con Emulsión Gasificable (Slurrex SB) | 16 |
| Anexo 11: Resultados de fragmentación..... | 18 |

SLURREX BS

Emulsión bombeable no explosiva desarrollada para ser aplicada en las operaciones subterráneas de manera segura, sencilla con mejoras en rendimiento y productividad.

Generalmente se usa en los trabajos de excavación de túneles y en labores de minería subterránea, como desarrollos, realce por subniveles y otros que utilicen taladros horizontales o taladros largos verticales en negativo.

Propiedades / Beneficios

- Alta versatilidad, puede ser usada en rocas de diferentes tipos de dureza.
- Su densidad puede ser regulada de acuerdo a la necesidad.
- Excelente resistencia al agua.
- Al momento de ser sensibilizada dentro de los límites de su detonabilidad, entrega una energía suficiente para vencer la resistencia del macizo rocoso.

Características técnicas

| Especificaciones técnicas | Unidades | Slurrex BS |
|-------------------------------|-------------------|---------------|
| Densidad relativa de matriz | g/cm ³ | 1.38 ± 3% |
| Densidad matriz sensibilizada | g/cm ³ | 0.80 – 1.20 |
| Velocidad de detonación* | m/s | 3,800 – 5,300 |
| Energía** | KJ/kg | 2,760 |
| RWS*** | % | 102 |
| RBS*** | % | 102 - 153 |
| Presión de detonación | Kbar | 31 - 110 |
| Volumen de gases** | l/Kg | 1,050 |
| Resistencia al agua | | Excelente |

*Confinado en tubo de acero de 2" como emulsión gasificada.

**Calculadas con programa de simulación TERMODET a condiciones ideales a 1 atm.

***Potencia relativa efectiva calculada a 100 MPa, Anfo con densidad 0.8 g/cm³ y energía efectiva de 2362 KJ/Kg.

Recomendaciones de uso

- Para iniciar la columna explosiva se recomienda usar explosivos de alta presión de detonación como el Booster de pentolita - EXSAPRIME o cartuchos de dinamita de mayor VOD que la emulsión bombeable.
- El tamaño del cebo dependerá del diámetro y longitud del taladro.
- No se recomienda usar en agua dinámica ni en taladros altamente fracturados.

Nota: Algunos usuarios prefieren usar cartuchos de explosivos como cebo debido a los costos, lo que no es una práctica recomendada si la VOD del cebo es similar al de la emulsión bombeable, ya que tardaría para alcanzar el estado estacionario de VOD de la columna explosiva.

Presentación y embalaje

Emulsión matriz que se distribuye en camiones cisternas o tanques especialmente acondicionados para transporte terrestre de 24 a 30 TM, el almacenamiento del producto es en silos de 30 a 90 TM.

Para otros formatos de presentación preguntar a un especialista EXSA.

Exclusión de responsabilidad

Estos explosivos han sido inspeccionados y encontrados en buen estado antes de ser embalados y/o entregados. Se deben almacenar en un lugar fresco, seco y bien ventilado, así como manipularse y transportarse de conformidad con las disposiciones legales vigentes. Por consiguiente, desde su entrega a los compradores, el fabricante no será responsable por su seguridad o por la obtención de los resultados que se busquen, ya sean estos expresos o implícitos. La totalidad del riesgo y de la responsabilidad, cualquiera sea su naturaleza, por accidentes, pérdidas, daños a la propiedad o personas (incluyendo la muerte), ya sean estos directos, indirectos, especiales y/o consecuenciales o de cualquier otro tipo derivado del uso de estos explosivos, es de los compradores desde la entrega de los mismos.



Almacenamiento y garantía

Conservado en su embalaje original y almacenado en condiciones de temperatura y humedad normales, conforme a las normativas vigentes, el producto está garantizado por 3 meses, después de su fecha de fabricación.

Transporte
CLASE: 5.1
UN: 3375



Anexo 2: Especificaciones técnicas de aditivos de dosificación

L – 9 (Nitrito de Sodio) Aditivo Gasificante

Solución Miscible en Agua formulada para el gasificado y/o Sensibilizador químico el Slurrex - BS y por último regulador de densidad de Emulsiones Gasificables.

Especificaciones Técnicas

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | UNIDADES | SOLUCIÓN |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|
| Densidad | Gr/cm ³ | 1.1 -1.15 |
| Cristalización | °C | -15 a - 20 |
| Color | | Verde |
| Ph | | 6 - 8 |
| Solubilidad En Agua | | Miscible |
| Vida Útil | Meses | 12 |

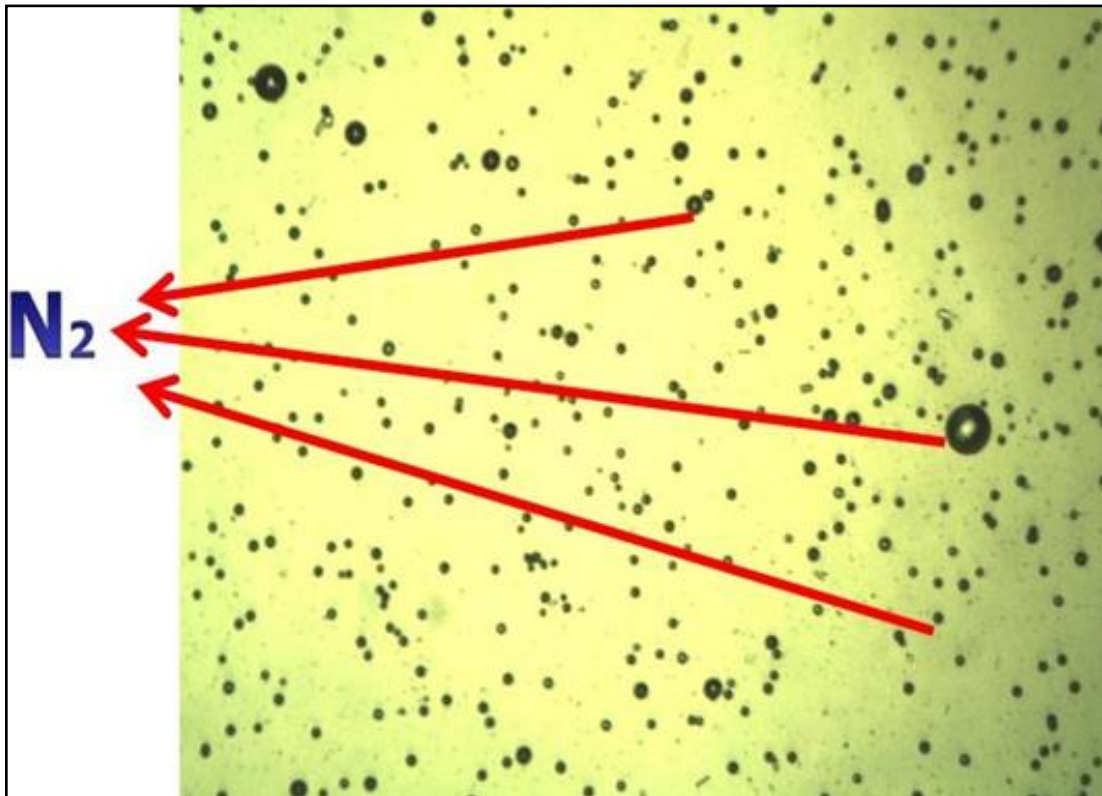
N – 17 (Ácido Acético) Aditivo Acelerante y o catalizador

Solución Acida Miscible en Agua formulada para acelerar el Gasificado químico el Slurrex – BS

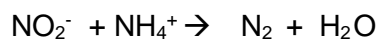
Especificaciones Técnicas

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | UNIDADES | SOLUCIÓN |
|----------------------------------|--------------------|------------------|
| Densidad | Gr/cm ³ | 1.04 -1.06 |
| Cristalización | °C | 40 a 60 |
| Color | | Incolora/Vinagre |
| Ph | | 2 - 3 |
| Solubilidad En Agua | | Miscible |
| Vida Útil | Meses | 12 |

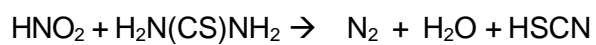
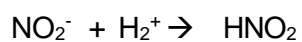
Anexo 3: Proceso de Gasificación



Reacciones químicas



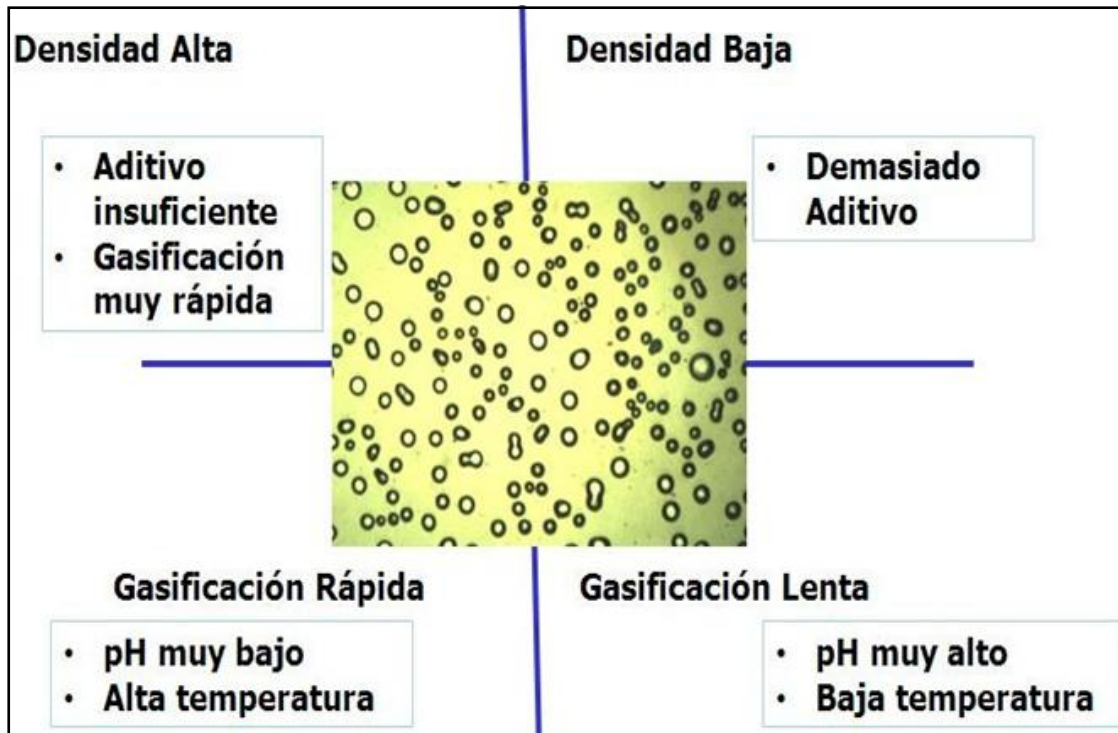
Catálisis



Efecto de la temperatura

La temperatura aumenta o disminuye la cinética del proceso de gasificación con el aumento de temperatura de la Matriz y viceversa.

Problemas potenciales



Anexo 4: Dispositivos de Seguridad en MODULO UBT - EXSA

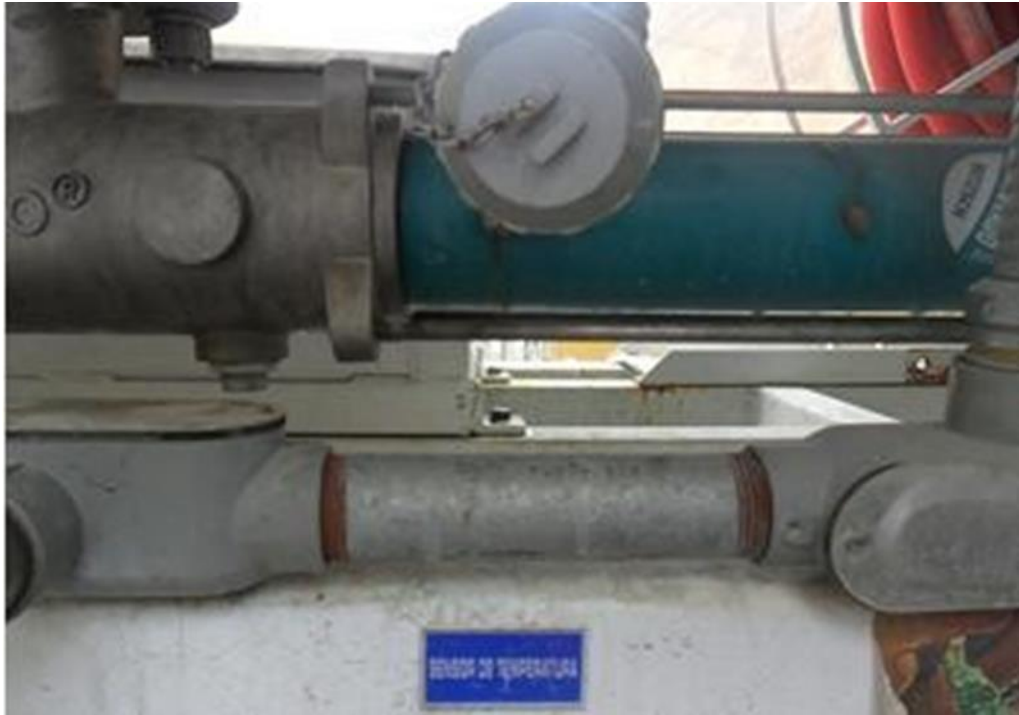
Sensor de Presión:

IP67 Ubicado luego de la bomba de cavidad progresiva. Protege al equipo ante el trabajo del equipo en vacío con parada de equipo por baja presión (Debajo de los 5PSI) y alta presión en el caso de trabajos por encima de los 90 PSI.



Sensor de Temperatura

Ubicado en la bomba Netzsh para proteger el trabajo de la bomba a temperaturas mayores a 35 °C.



Sensor Flujo

Este sensor tiene la capacidad de ser calibrarse de acuerdo a la viscosidad del producto con el que va a trabajar y así poder parar el equipo dentro del tiempo predeterminado en caso de no tener la viscosidad con que fue calibrado. Es decir protege al equipo por si trabajase en vacío o trabaja con otros líquidos.



Disco de Ruptura (200PSI):

El disco de ruptura tiene la función de proteger al equipo ante las presiones anómalas altas de trabajo. por encima de 200 PSI, rompiéndose.



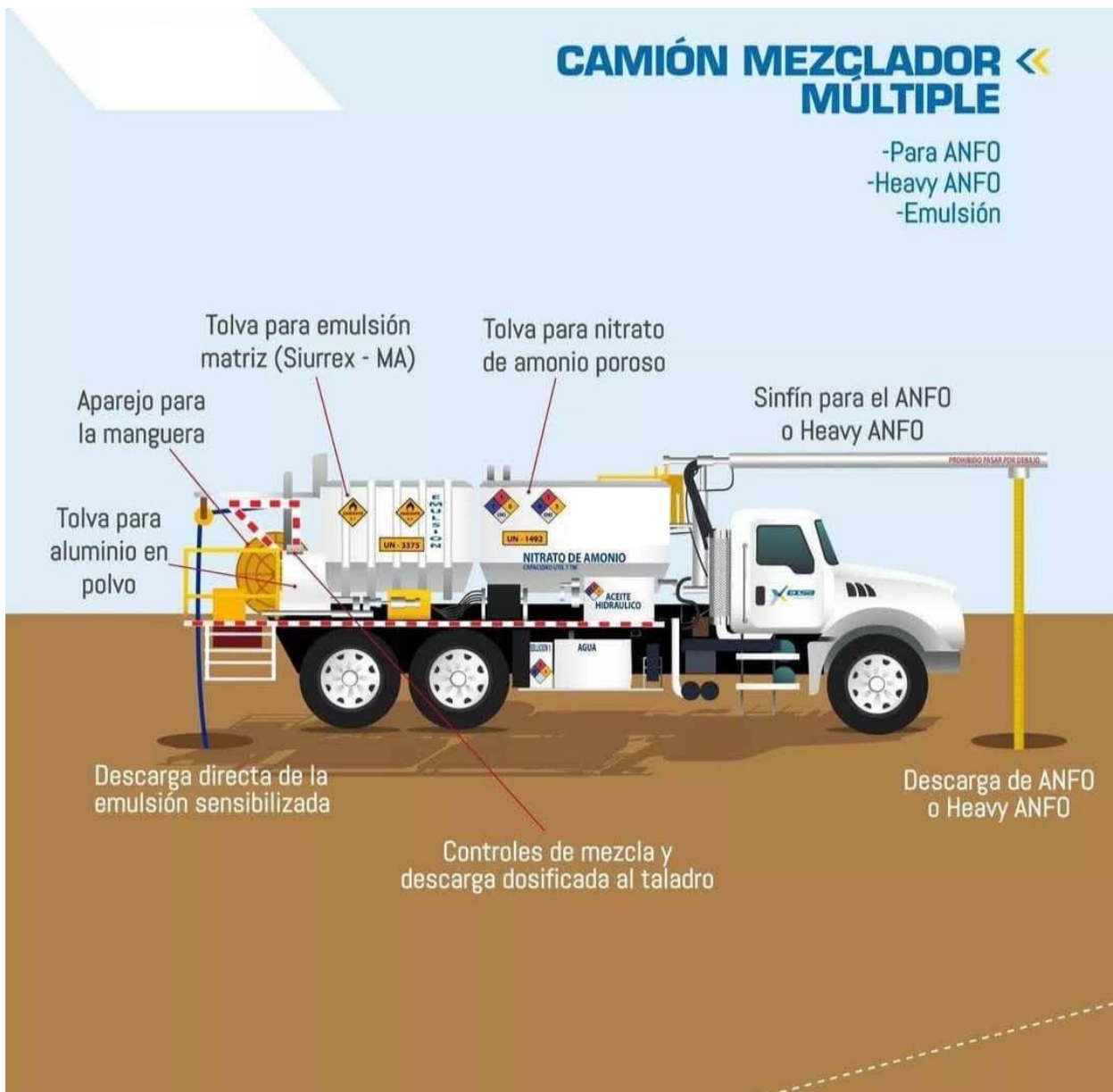
Manguera de Bombeo (24.5mm):

La manguera de bombeo es cercana al diámetro crítico del explosivo (22mm) por lo cual minimiza los riesgos de propagación de la explosión a través de la manguera al equipo; en el caso de detonación del cebo o booster.



Manguera ϕ interior de 25.4mm Soporta presiones de hasta 300PSI a 20°C

Anexo 5: Detalle del Módulo UBT



Anexo 6: Ejecución del carguío con equipo UBT



Anexo 7: Muestreo de densidad del producto



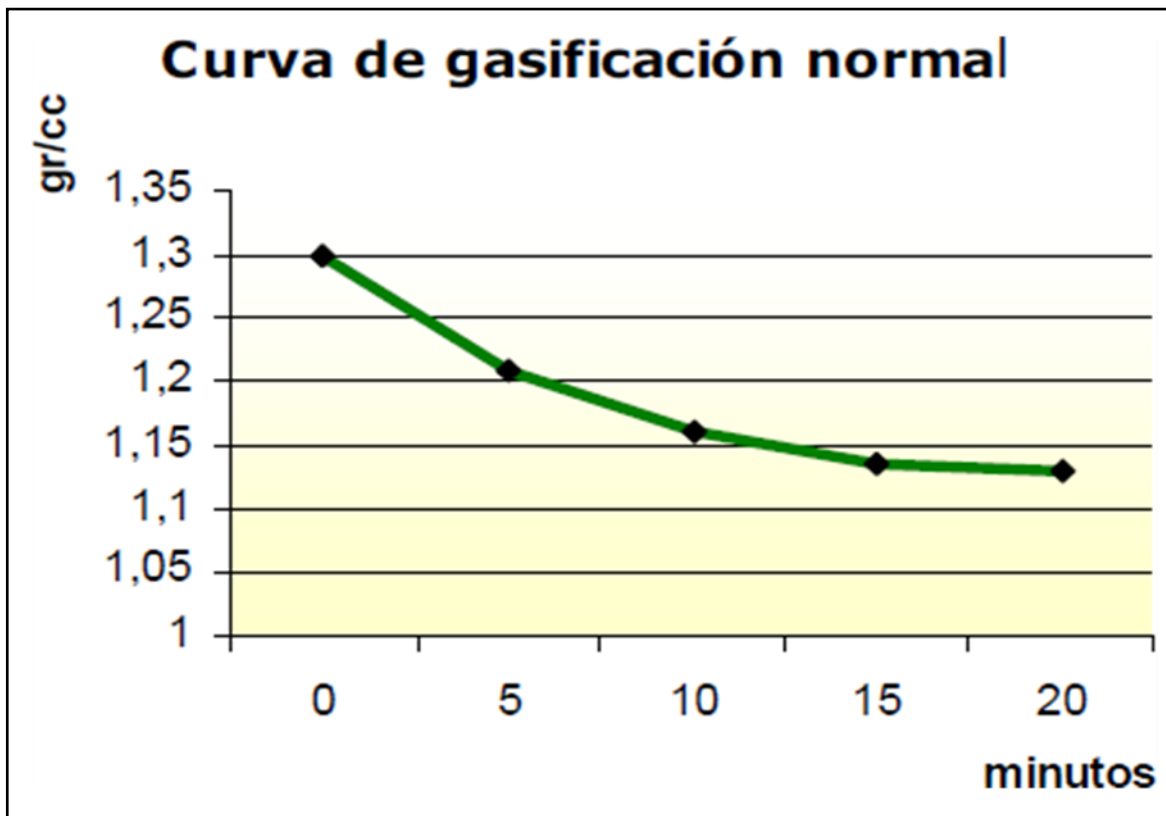
Anexo 8: Control del Proceso de Gasificación en campo



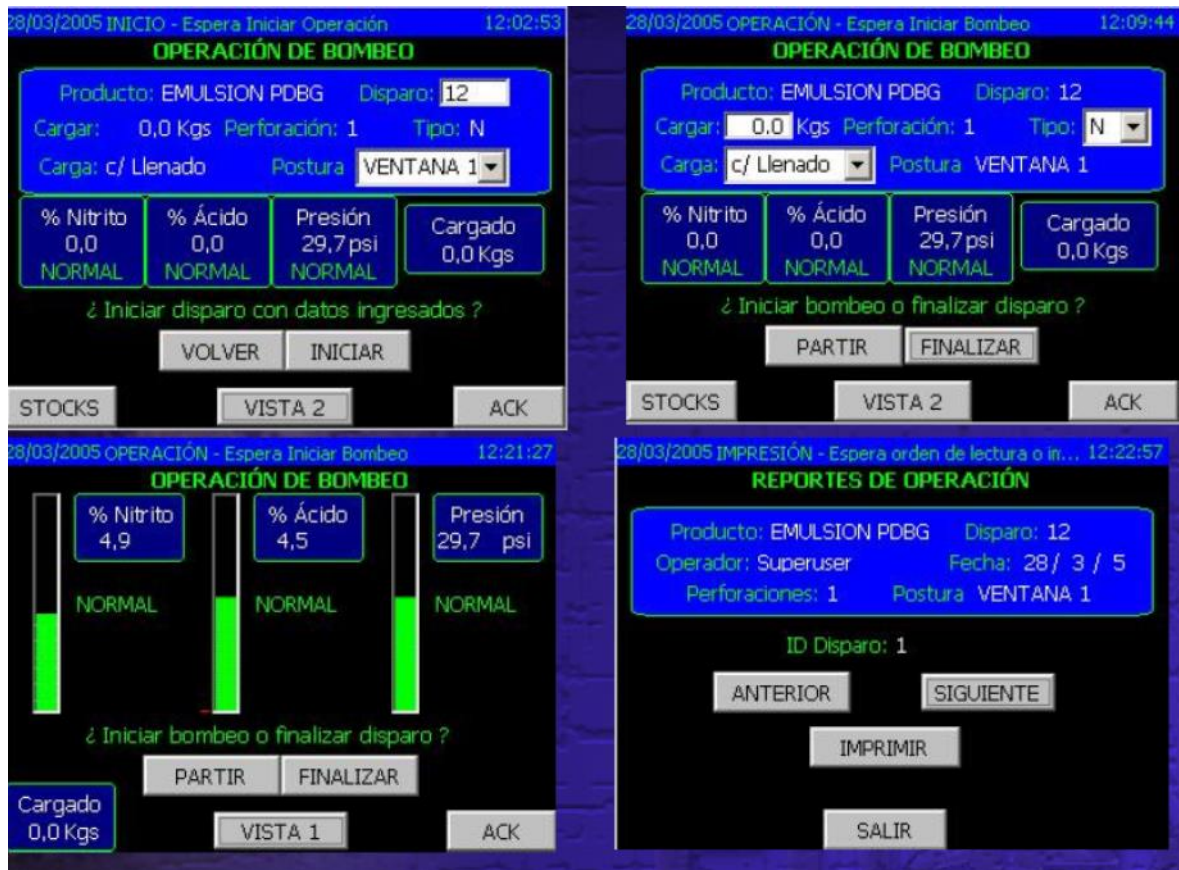
**INICIO DE LA
GASIFICACION**

El control de calidad de la emulsión inyectada es verificado mediante el control de la densidad en el frente de carguío a partir del 5° Taladro en carguío. Obteniéndose los siguientes cuadros

| Tiempo Minutos | Densidad gr/cc | Temp. Emulsión |
|----------------|----------------|----------------|
| 0 | 1,30 | 20° |
| 5 | 1,21 | 20° |
| 10 | 1,16 | 20° |
| 15 | 1,15 | 20° |
| 20 | 1,13 | 20° |



Anexo 9: Pantalla de Operación del equipo

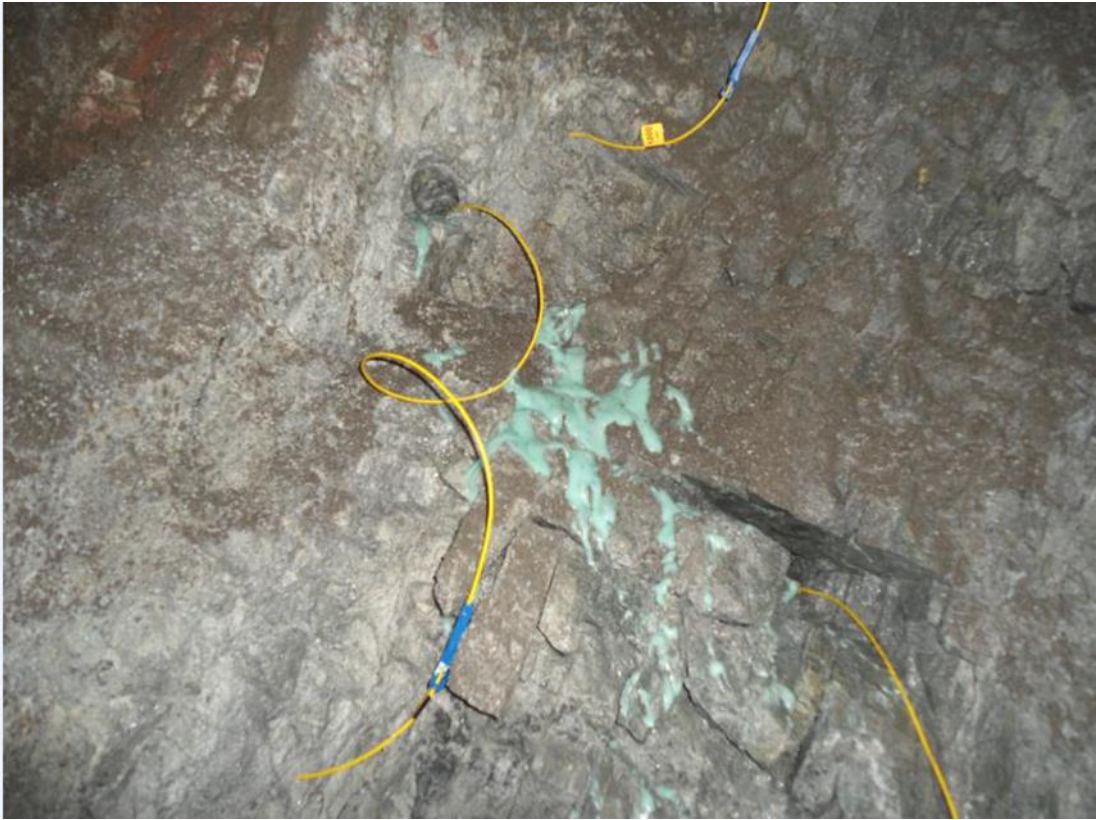


Anexo 10: Frentes cargados con Emulsión Gasificable (Slurrex SB)

Foto 1



Foto 2



Anexo 11: Resultados de fragmentación

Foto 1



Foto 2



Foto 3

