



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Análisis comparativo del desempeño de un explosivo energético (Vertex)
frente a un explosivo estándar (Emulgex): evaluación del porcentaje de
finos y su impacto en el throughput en operaciones mineras del sur del
Perú, 2025**

Tesis presentada por:

Salazar Chuctaya, Diego Saul

ORCID: 0009-0000-0622-9410

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mag. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0002-4761-8911

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 10 de Abril del 2026

Dictamen: 016767-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 016767, presentado por:

2015801171 - SALAZAR CHUCTAYA DIEGO SAUL

Titulado:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE UN EXPLOSIVO ENERGÉTICO (VERTEX) FRENTE
A UN EXPLOSIVO ESTÁNDAR (EMULGEX): EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE FINOS Y SU
IMPACTO EN EL THROUGHPUT EN OPERACIONES MINERAS DEL SUR DEL PERÚ, 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE UN EXPLOSIVO ENERGÉTICO (VERTEX) FRENTE A UN EXPLOSIVO ESTÁNDAR (EMULGEX): EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE FINOS Y SU IMPACTO EN EL THROUGHPUT EN OPERACIONES MINERAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %

INDICE DE SIMILITUD

5 %

FUENTES DE INTERNET

1 %

PUBLICACIONES

3 %

TRABAJS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1 %

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1 %

3

repositorio.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

4

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

5

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

6

Submitted to Universidad Privada del Norte

Trabajo del estudiante

<1 %

7

unach.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

8

Pozo Garcia, Raul Rodolfo. "Modificación del
Sistema GSI en función de la Escala de
Análisis de Estabilidad de Taludes en Macizos
Rocosos", Pontificia Universidad Catolica del
Peru (Peru), 2023

Publicación

<1 %

9

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

DEDICATORIA

Dedico este logro, fruto de mi esfuerzo y constancia, a mis padres, quienes con su apoyo incondicional y enseñanzas han sido el pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

A mi familia, por su comprensión y aliento constante en cada etapa de este camino.

Asimismo, a mis docentes, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi desarrollo como bachiller en Ingeniería de Minas.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios por brindarme la vida, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis seres queridos, por su compañía, paciencia y confianza en cada desafío asumido durante este proceso.



EPÍGRAFE

El esfuerzo constante y la disciplina son el camino seguro hacia el logro de grandes objetivos.



RESUMEN

El presente estudio se centró en evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de un explosivo energético (Vertex) frente a un explosivo estándar (Emulgex) en voladuras de producción minera. Para ello, se implementó un diseño de malla ampliada de $8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$, comparado con la malla convencional de $6.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, manteniendo parámetros de perforación y factor de potencia específicos según las características geomecánicas de la litología MP01 (SPI 71 y UCS 39 MPa). Se midieron indicadores operativos clave como el throughput en planta, porcentaje de finos (<1 pulgada), generación de gases NO_x y vibraciones. Los resultados mostraron que el uso de Vertex permitió alcanzar un porcentaje de finos superior al 50 % y mantener un throughput estable alrededor de 2,050 t/h, sin superar los límites de seguridad ambiental ni operativa. Adicionalmente, la comparación económica evidenció reducciones significativas en costos de perforación (41 %), consumo de explosivo (10 %) y accesorios de voladura (34 %), generando un ahorro total de 0.061 USD/t (17 % de reducción). La fragmentación más fina y el desempeño constante del throughput confirmaron la eficacia del diseño de malla ampliada y del explosivo energético, lo que sugiere su implementación como estrategia para optimizar la eficiencia del proceso y reducir costos operativos sin comprometer la seguridad.

Palabras clave: Voladura de producción, explosivo energético, Emulgex.

ABSTRACT

This study focused on evaluating the technical and economic feasibility of using an energetic explosive (Vertex) compared to a standard explosive (Emulgex) in production blasting operations. An expanded 8.0 m × 8.0 m blast pattern was implemented and compared with the conventional 6.5 m × 6.5 m pattern, maintaining drilling parameters and specific powder factors according to the geomechanical characteristics of the MP01 lithology (SPI 71 and UCS 39 MPa). Key operational indicators such as plant throughput, fines percentage (<1 inch), NO_x gas generation, and vibration levels were measured. Results demonstrated that Vertex achieved a fines percentage greater than 50 % and maintained a stable throughput of approximately 2,050 t/h, without exceeding environmental or operational safety limits. Economic analysis revealed significant reductions in drilling costs (41 %), explosive consumption (10 %), and blasting accessories (34 %), resulting in a total saving of 0.061 USD/t (17 % reduction). The finer fragmentation and consistent throughput performance confirmed the effectiveness of the expanded blast pattern and energetic explosive, suggesting its implementation as a strategy to optimize process efficiency and reduce operational costs without compromising safety.

Key words: Production blasting, energetic explosive, Emulgex.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO TEÓRICO.....	5
1. Objetivos.....	6
1.1. Objetivo general	6
1.2. Objetivos específicos.....	6
2. Hipótesis	7
2.1. Hipótesis nula (H_0)	7
2.2. Hipótesis alterna (H_1)	7
2.3. Variables e indicadores	8
3. Fundamentos teóricos	9
3.1. Estado del arte	9
3.1.1. Antecedentes internacionales	9
3.1.2. Antecedentes nacionales	11
3.1.3. Antecedentes locales	13
3.2. Bases teóricas	14
3.2.1. Fundamentos de la voladura en minería de superficie	14
3.2.2. Explosivos industriales: conceptos y clasificación	18
3.2.3. Diseño de perforación y voladura	23
3.2.4. Fragmentación del material y generación de finos.....	26
3.2.5. Variables de control geomecánico y de proceso.....	32

3.3.	Líneas de investigación del desarrollo de la investigación.....	34
4.	Presentación de la investigación	35
4.1.	Justificación.....	35
4.2.	Resumen de la investigación	35
4.2.1.	Descripción de la investigación a medio y largo plazo.	37
4.2.2.	Usuarios de la investigación.....	37
4.2.3.	Aporte del desarrollo de la investigación.....	37
4.2.4.	Localización	38
4.2.5.	Análisis del futuro de la investigación	39
5.	Justificación	40
5.1.	Justificación de la investigación	40
5.1.1.	Aspectos técnicos	40
5.1.2.	Aspectos económicos	40
5.1.3.	Aspectos sociales.....	41
5.1.4.	Recursos de la investigación	41
CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO OPERACIONAL.....		42
1.	Metodología a emplear	43
1.1.	Tipo de investigación.....	43
1.1.1.	Diseño de investigación	43
1.1.2.	Nivel de investigación.....	43
1.2.	Población y muestra.....	44
1.2.1.	Población.....	44
1.2.2.	Muestra.....	44
1.2.3.	Inclusión	44
1.2.4.	Exclusión.....	44
1.2.5.	Tamaño muestral (guía).....	44

1.3.	Fuentes y métodos para la recolección de información.....	44
1.3.1.	Fuentes primarias:	44
1.3.2.	Procedimientos clave:	44
1.4.	Procesamiento de la información recolectada	45
1.5.	Modelo estadístico	49
CAPÍTULO III RESULTADOS.....		53
1.	Datos generales	57
2.	Litología.....	60
3.	Etapas de la ejecución de la ampliación de malla en 1.5 metros y minado exclusivo para el análisis de resultados en planta	62
4.	Análisis técnico de la ampliación de malla.....	65
4.1.	Aplicación de modelos matemáticos para estimar los parámetros de burden y espaciamiento	66
4.1.1.	Estimación de la malla óptima mediante el modelo de fragmentación Swebrec-KCO	67
4.2.	Propuesta de diseño de carga.....	69
4.3.	Simulación de halos de vibración en campo cercano	70
4.4.	Simulación de fragmentación	72
4.5.	Simulación de proyección roca.....	73
5.	Ejecución del carguío del proyecto de voladura	75
6.	Medición de los resultados post voladura	77
6.1.	Medición de resultados de gases NOx.....	77
6.2.	Medición de resultados de vibración	77
7.	Resultados de fragmentación en el frente de minado	79
8.	Análisis de los resultados de planta: Throughput y porcentaje de finos	80
8.1.	Resultado de Throughput y porcentaje de finos – Minado exclusivo	80
8.2.	Resultado de Throughput y porcentaje de finos – Minado total del proyecto.....	82

8.3. Resultados de planta en comparación con el banco superior	84
9. Análisis de costos de perforación y voladura	88
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97



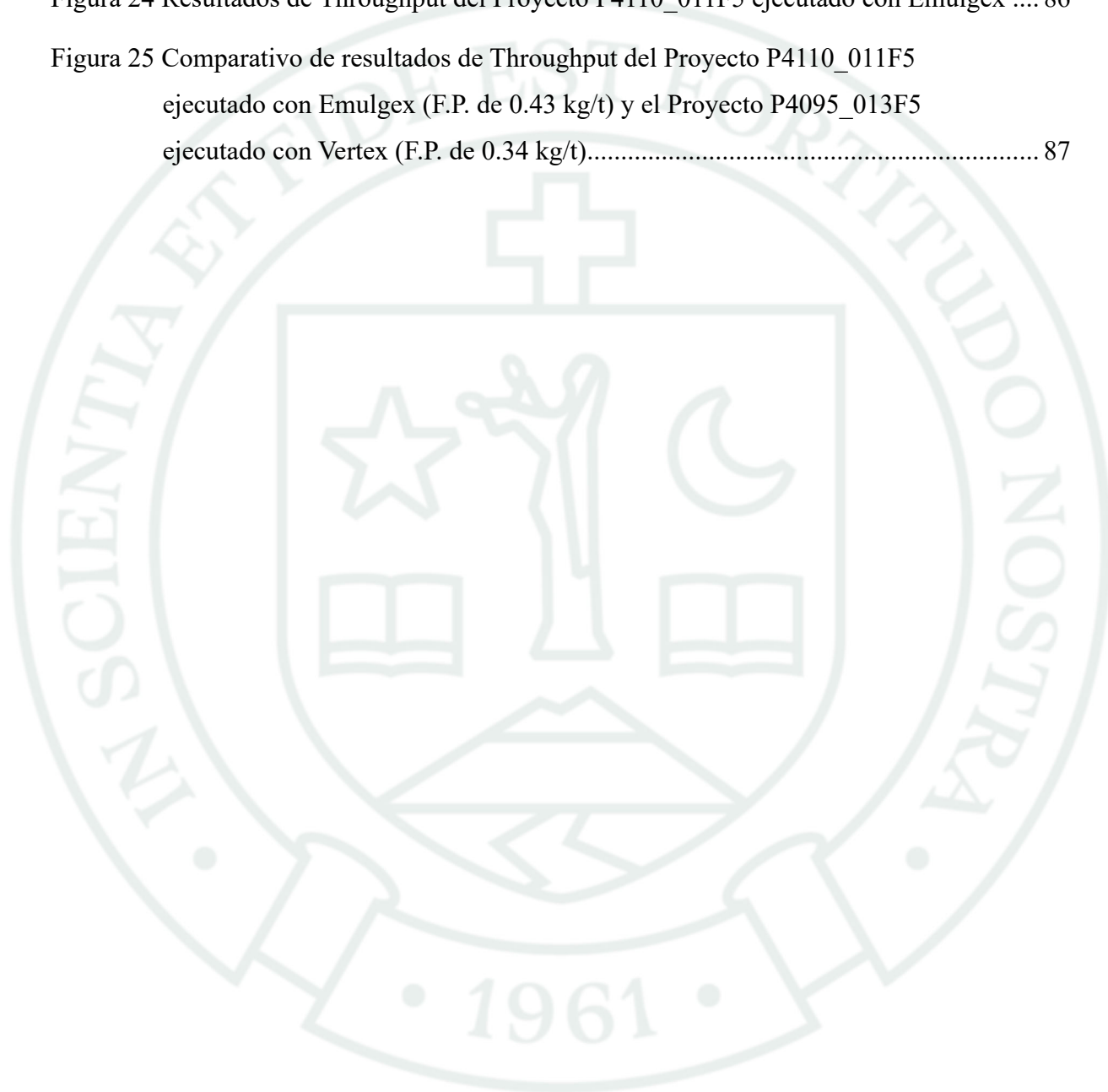
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	8
Tabla 2 Parámetros de los explosivos	56
Tabla 3 Diseño estándar y diseño propuesto en fase 05	59
Tabla 4 Cálculo de burden y espaciamiento referencial en base a modelos matemáticos	67
Tabla 5 Características del sector donde se realizó la ampliación de malla de 6.5 m x 6.5 m a 8.0 m x 8.0 m.....	68
Tabla 6 Cálculo de ahorro por ampliación de malla en sector con SPI de 71. Ampliación de malla de 6.5 m x 6.5 m a 8.0 m x 8.0 m	89
Tabla 7 Costo de Mezcla Explosiva	90
Tabla 8 Costo de Accesorios de Voladura	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proyecto de voladura P4095_013F5	58
Figura 2 Sector cargado con HA73-G Vertex fue la zona de producción	58
Figura 3 Litología MP01 (Izquierda)y Alteración Potásica (Derecha)	61
Figura 4 Mineralización hipógena.....	61
Figura 5 Proceso del proyecto	63
Figura 6 Sector de SPI donde se realizó la ampliación de malla a 8.0 m x 8.0 m – Sectpr con SPI de 71	65
Figura 7 Diseño de carga por taladro SPI:71 – Malla 8.0 m x 8.0 m.....	69
Figura 8 Diseño de carga en malla 4095_013F5 SPI:71 – Malla 8.0 m x 8.0 m	70
Figura 9 Análisis de Vibraciones en campo cercano. HA73-G Emulgex (6.5 x 6.5 m) y HA73-G Vertex (8.0 m x 8.0 m) – Vista de planta	71
Figura 10 Análisis de Vibraciones en campo cercano. HA73-G Emulgex (6.5 x 6.5 m) y HA73-G-Vertex (8.0 m x 8.0 m)- Vista de Perfil.....	71
Figura 11 Estimación de fragmentación en base la simulación KCO-Swebrec – Malla 8.0 x 8.0- HA73-G Vertex	72
Figura 12 Simulación de proyección de roca	74
Figura 13 Proyecto de voladura P4095_013F5	75
Figura 14 Mezcla explosiva HA73-G Vertex y ruta de los camiones PEQ06 y PEQ19	76
Figura 15 Ejecución del proyecto P4095_013f5.	76
Figura 16 Resultados de gases NOx – P4095_013F5.	77
Figura 17 Resultados de vibración P4095_013F5.....	78
Figura 18 Resultados de fragmentación promedio obtenido en el frente de minado del P4095_013F5	80
Figura 19 Seguimiento al Minado del Proyecto P4095_013F5	81
Figura 20 Resultados de Throughput asociados al porcentaje de Finos obtenido en ambas líneas de Planta.	81

Figura 21	Polígono 05-27-023-ORE_H asociado al proyecto P4095_013F5.....	83
Figura 22	Throughput del minado completo del Proyecto P4095_013F5 ejecutado con Vertex	83
Figura 23	Polígonos del Banco Superior (4110)	85
Figura 24	Resultados de Throughput del Proyecto P4110_011F5 ejecutado con Emulgex	86
Figura 25	Comparativo de resultados de Throughput del Proyecto P4110_011F5 ejecutado con Emulgex (F.P. de 0.43 kg/t) y el Proyecto P4095_013F5 ejecutado con Vertex (F.P. de 0.34 kg/t).....	87



INTRODUCCIÓN

En el contexto de la minería contemporánea, la reducción de tamaño desde la voladura hasta la molienda concentra una fracción sustantiva del consumo energético del proceso, por lo que cualquier mejora en la fragmentación inicial repercute de manera directa en la eficiencia global de la planta. En este marco, la integración “mine-to-mill” ha puesto de relieve que una fragmentación más fina, obtenida mediante un diseño de voladura optimizado, puede traducirse en aumentos medibles del throughput y en menores costos específicos de conminución. (Zhang et al, 2022)

Diversos estudios recientes han sistematizado cómo la distribución granulométrica del run-of-mine condiciona la productividad de equipos de carguío y chancado, así como la capacidad de los molinos. En particular, la fracción de finos —cuando se mantiene dentro de rangos operativamente óptimos— tiende a reducir el consumo energético específico y a incrementar el rendimiento horario de las líneas, mientras que distribuciones demasiado gruesas suelen generar cuellos de botella y recirculación excesiva. Esta relación entre fragmentación, generación de finos y desempeño aguas abajo ha sido documentada en revisiones actuales de ingeniería de minerales. Para anticipar estos efectos, la modelización de la fragmentación por voladura ha evolucionado con especial atención a la capacidad de predecir percentiles clave (por ejemplo, P80) y el contenido de finos. En ese avance, aproximaciones basadas en Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony y funciones tipo Swebrec han mostrado utilidad práctica y mejoras frente a formulaciones previas, favoreciendo la definición de parámetros de diseño bajo criterios de desempeño de planta. Estas herramientas permiten orientar campañas comparativas manteniendo constantes el patrón de perforación y el factor de potencia. (Mutinda et al, 2021)

En paralelo, la selección del agente de voladura es un determinante tecnológico. Las emulsiones explosivas —matrices agua-en-aceite que se sensibilizan física o químicamente—

han consolidado su uso por su estabilidad, bombeabilidad y desempeño en rocas duras y/o con presencia de agua, situándose como alternativa avanzada frente a formulaciones tradicionales basadas en nitrato de amonio, como ANFO. La literatura reciente destaca su versatilidad y el papel de la matriz y la sensibilización en los parámetros de detonación y en la eficiencia de la rotura. (Kramarczyk et al, 2022)



Asimismo, investigaciones de los últimos años han mostrado que modificaciones en la microestructura y en la fase gaseosa de las emulsiones (por ejemplo, el uso de microesferas o microglobos como sitios calientes) pueden alterar de forma significativa la velocidad de detonación y la presión pico, afectando la intensidad de rotura y, por ende, la generación de finos que recibe la planta. Tales hallazgos refuerzan la necesidad de evaluar, bajo condiciones de campo controladas, cómo distintas “familias” de emulsiones se traducen en respuestas granulométricas diferenciadas. (Chen et al, 2022)

De manera complementaria, también se ha evidenciado que la incorporación de aditivos energéticos en matrices basadas en nitrato de amonio modifica la brisancia y el trabajo relativo del explosivo, con incrementos verificables conforme aumenta el contenido del aditivo. Aunque estos ensayos se han realizado sobre ANFO y no sobre emulsiones, el principio físico —mayor energía efectiva de detonación, mayor potencial de conminución primaria— sustenta hipótesis comparativas entre emulsiones de distinta “energía efectiva”, con implicancias directas sobre el porcentaje de finos y el throughput. (Biessikirski et al, 2024)

Finalmente, trabajos recientes orientados a la sostenibilidad en voladura han analizado variantes de emulsiones de baja densidad y su impacto en la distribución de fragmentos, aportando evidencia de que la ingeniería fina del explosivo (densidad, gasificación, sensibilización) es un vector eficaz para ajustar el espectro granulométrico hacia ventanas de operación más favorables para chancado y molienda. A la luz de este estado del arte, se identifica una oportunidad concreta: realizar comparaciones en campo, manteniendo constantes los parámetros de perforación y el factor de potencia, para cuantificar con rigor el porcentaje de finos generado y el incremento de throughput al emplear una emulsión “energética” frente a una emulsión “estándar”. (Škrlec et al, 2024)

Ante esta situación, surge el interés por evaluar el desempeño de un explosivo energético de nueva generación, Vertex, formulado con aditivos que le otorgan mayor capacidad de energía y sensibilidad frente a condiciones complejas de voladura. La hipótesis de trabajo plantea que el uso de Vertex podría generar un incremento significativo en el porcentaje de finos y un mayor throughput, manteniendo constantes los parámetros de diseño de perforación y el factor de potencia, lo que permitiría optimizar la productividad sin elevar los costos de manera proporcional.

La problemática, por tanto, se centra en determinar si la sustitución del explosivo estándar por un explosivo energético constituye una alternativa técnica y económicamente viable que contribuya a la reducción de costos, el aumento del tonelaje procesado y la disminución de perforaciones requeridas, favoreciendo así la sostenibilidad del proceso minero.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del uso de un explosivo energético (Vertex) frente a un explosivo estándar (Emulgex) en el throughput de la planta de procesamiento, bajo condiciones controladas de diseño de perforación y factor de potencia.

1.2. Objetivos específicos

1. Medir el throughput (t/h) de la planta al emplear Emulgex.
2. Medir el throughput (t/h) de la planta al emplear Vertex.
3. Comparar los resultados de throughput obtenidos con ambos explosivos bajo condiciones equivalentes.
4. Cuantificar el porcentaje de finos generado en el material volado con cada explosivo.
5. Determinar el efecto económico asociado a la elección del explosivo, considerando costos de perforación, consumo de explosivo y variaciones en la productividad de la planta.

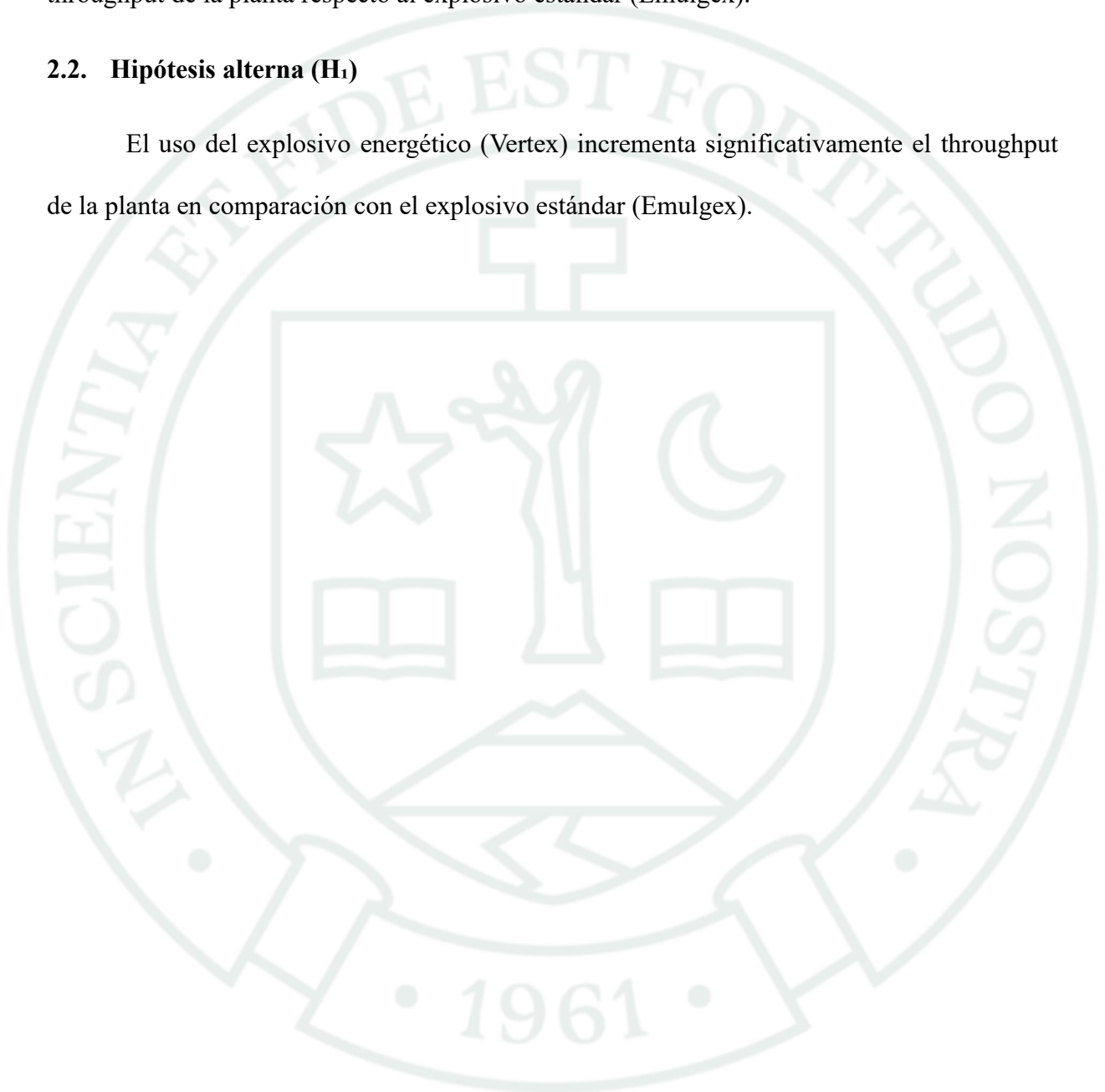
2. Hipótesis

2.1. Hipótesis nula (H_0)

El uso del explosivo energético (Vertex) no produce diferencias significativas en el throughput de la planta respecto al explosivo estándar (Emulgex).

2.2. Hipótesis alterna (H_1)

El uso del explosivo energético (Vertex) incrementa significativamente el throughput de la planta en comparación con el explosivo estándar (Emulgex).



2.3. Variables e indicadores

Tabla 1

Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Indicadores (qué se mide)	Subindicadores / operacionalización (cómo, con qué y en qué unidad)
Independiente	Tipo de explosivo	Condición de prueba	<i>Nivel 1:</i> Emulgex (estándar). <i>Nivel 2:</i> Vertex (energético). Registro por campaña/turno; verificación en partes de carguío y guías de consumo.
Dependiente principal	Throughput de planta	Throughput promedio	Promedio horario (t/h) por turno y por campaña; media diaria y por ventana de estabilidad (p. ej., 8–24 h post-arranque).
		Variación porcentual	$\Delta\%$ de throughput Vertex vs. Emulgex = $(t/h_{Vertex} - t/h_{Emulgex}) / t/h_{Emulgex} \times 100$.
		Estabilidad operativa	Desviación estándar del throughput (t/h), coeficiente de variación (%), tiempo en rango objetivo (% del turno).
Dependiente complementaria	% de finos en ROM	Fracción fina bajo umbral	%<P_umbral (definir, p. ej., <10 mm o <6 mm) por análisis de imagen calibrado en correas/stockpile o por tamizado representativo.
		Parámetros de fragmentación	P80, P50, P20 (mm) estimados por análisis de imagen/tamiz; curva y ajuste (R^2) del modelo de fragmentación.
Dependiente (económica)	Efecto económico	Costo unitario de proceso	Costo por tonelada procesada (USD/t): $(\text{costos perforación} + \text{explosivo} + \text{conminución} + \text{operación}) / \text{tp procesadas}$.
		Productividad incremental	Toneladas adicionales por turno (t/turno) atribuibles al cambio de explosivo; $\Delta\%$ vs. línea base.
		Consumo específico de energía (opcional)	kWh/t en chancado y molienda en la ventana de análisis; $\Delta\%$ vs. línea base.

Nota. Elaboración propia.

3. Fundamentos teóricos

3.1. Estado del arte

3.1.1. Antecedentes internacionales

Mertuszka et al. Implementación y verificación de la eficacia de un explosivo de emulsión a granel con parámetros energéticos mejorados en un entorno Subterráneo. 2022. Polonia. evaluaron una nueva formulación de explosivo de emulsión a granel (BK-2) en condiciones reales de minería subterránea en Polonia, comparándola con un explosivo comercial (E8L). Se realizaron pruebas en ocho frentes de avance mediante dos mezcladores (uno simple y otro doble), midiendo parámetros como velocidad de detonación, brisancia mediante el método de Hess, fragmentación de la roca, densidad y sensibilidad a impacto y fricción. El BK-2 demostró una estabilización de densidad más rápida (30 minutos) frente al E8L (más de 12 horas) y mantuvo una velocidad de detonación comparable (4030 m/s frente a 4020 m/s en pruebas con mezclador doble). Aunque no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la fragmentación de roca entre ambos explosivos, el BK-2 mostró una mayor estabilidad y eficiencia operativa. Se destaca que el uso de un mezclador doble mejora hasta en 6% la velocidad de detonación y más del 20% la fragmentación en algunas fracciones, indicando la importancia del proceso de mezcla en la efectividad del explosivo. (Mertuszka et al, 2022)

Paredes, Carla; Calderón, Edmundo. Relación consumo específico/avance, en operaciones de minería subterránea MAPE, caso de estudio Ecuador. 2024. Ecuador. En su investigación, analizaron la eficiencia de distintas combinaciones de explosivos en operaciones de minería subterránea bajo el régimen de Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE), específicamente en el distrito minero Zaruma–Portovelo, Ecuador. Se realizaron nueve ensayos experimentales variando el tipo de explosivo (emulsión/ANFO y emulsión/LDAN), la malla de perforación, el diseño del disparo y la carga específica. Los

resultados demostraron que la combinación emulsión/ANFO, con una carga específica promedio de $1,54 \text{ kg/m}^3$, logró los mejores resultados con un 95% de avance ideal, 99,23% en el ancho y 97,18% en el alto de la sección excavada, evidenciando mayor previsibilidad, eficiencia operativa y reducción de costos frente a métodos tradicionales. Aunque no se detallan valores de prueba estadística, se aplicaron comparaciones multicriterio y análisis cuantitativos mediante ponderaciones que reflejan diferencias significativas entre los métodos utilizados. Se concluye que una adecuada distribución de la carga, un buen diseño de malla y la elección correcta del explosivo son determinantes para maximizar el rendimiento y minimizar riesgos operativos. (Paredes & Calderón, 2024)

Kramarczyk, Bartłomiej; Mertuszka, Piotr. Estudio de la influencia del contenido de sensibilizador en la densidad de un explosivo de emulsión a granel utilizado en operaciones subterráneas Polonia en esta investigación se examinan en laboratorio los efectos del contenido del agente sensibilizador aplicado durante la carga de emulsión explosiva mediante dispositivos de mezcla estática en ductos de carga en minas subterráneas, donde la dosificación precisa es crucial para parámetros de detonación, aunque se ve afectada por condiciones operativas cambiantes; se encontró que aumentar dicha concentración en un 30 % y 50 % reduce la densidad del explosivo en un 4 % y 7 %, mientras que reducirla en los mismos porcentajes incrementa la densidad en un 7 % y 8 %, respectivamente, resultados que se complementan con datos sobre almacenamiento y calibración: variaciones en las densidades durante 60 min, análisis de múltiples unidades de mezcla, y un rango óptimo de densidades entre $0,95$ y $1,25 \text{ g/cm}^3$, concluyendo que la dosificación precisa y el monitoreo del tiempo son esenciales para mantener la eficiencia y seguridad de las detonaciones en condiciones reales de minería. (Kramarczyk & Mertuszka, 2021)

3.1.2. Antecedentes nacionales

Huaroc et al. Incremento de productividad y reducción de costos en mina de tajo abierto con la aplicación de explosivos de alta energía. Lima. El estudio se realizó en la mina Antapaccay, una operación a cielo abierto en el sur del Perú. Se aplicaron explosivos de alta energía (Vertex, 3.1 MJ/kg) con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa frente a condiciones geológicas complejas. Se registraron mejoras notables como la reducción del costo por tonelada en 12.9%, aumento de productividad en 2.6%, reducción de vibraciones en 6.5%, y una mejora en la fragmentación sin alterar los estándares ambientales y sociales. La investigación concluye que el uso del explosivo energético Vertex permite reducir significativamente los costos operativos y mejorar la eficiencia minera, manteniendo los KPIs planeados. (Huaroc et al, 2024)

Ccatamayo et al. “Optimizing Productive Time in Mining Cycles by Changing Explosives: A Value Stream Mapping Study in Horizontal Excavations” “Perú”: Este estudio aborda la optimización del ciclo minero en la mina Esmeralda mediante el cambio del explosivo ANFO por emulsión bombeable, aplicando la metodología de mapeo de flujo de valor (VSM). Se identificó una sobre-excavación inicial del 32 %, que se redujo al 18 % tras el cambio; el tiempo total de ciclo pasó de 22,1 h a 19,26 h, el tiempo productivo de 13,22 h a 11,28 h, el tiempo contributorio de 4,53 h a 4,00 h y el no contributorio de 5,11 h a 3,16 h. Esta estrategia mejora la eficiencia operativa, la productividad y disminuye costos y riesgos, además de reducir significativamente el tiempo de ventilación post-voladura. Se concluye que el uso de emulsión bombeable es una alternativa viable para optimizar ciclos mineros en excavaciones horizontales, mejorando eficiencia, seguridad y resultados económicos. (Ccatamayo et al, 2025)

Barriga, Christ; Salas, Juan. Rendimiento en la fragmentación de roca por emulsiones encartuchadas en actividades mineras Perú en esta investigación realizada en el nivel 1515 de la mina San Vicente (Morococha, Junín), se evaluó la eficacia de las emulsiones encartuchadas mediante estudios de voladura en rampas y tajos (Rampa 640, Rampa 8010, Tajo 632 N, Tajo 8093 y Tajo 8011); se empleó análisis geológico y geomecánico, mapeo y modelado, además del software WipFrag para cuantificar la fragmentación y realizar análisis económicos comparativos. Se identificó que la ejecución con emulsiones encartuchadas reduce significativamente el número de unidades utilizadas y los costos operativos (por ejemplo, una diferencia positiva de \$ 42,72 para Tajo 632 N), manteniendo o mejorando la fragmentación (P80 promedio de 16,40 cm frente al estándar de 15 cm). La metodología demostró eficiencia técnica y viabilidad económica para la fragmentación controlada en minería subterránea. (Barriga & Salas, 2021)

Torres, Mercedes. Evaluación técnica del explosivo Emulgex y San-G Apu para optimizar la fragmentación de la roca en Minera La Zanja, Cajamarca Perú en esta tesis se realizó un análisis comparativo de dos explosivos —Emulgex y San-G Apu— en la Unidad Minera La Zanja de la compañía Buenaventura, ubicada en Pulán, Santa Cruz, Cajamarca, con el objetivo de determinar cuál de ellos ofrece un mejor desempeño en la fragmentación de roca. La metodología incluyó revisión y validación de los diseños de perforación y voladura, así como ejecución práctica de pruebas en campo bajo condiciones geológicas reales, evaluando indicadores clave de fragmentación como el P80. Los resultados mostraron que el explosivo San-G Apu alcanzó un P80 de 4,44 pulgadas, frente al 5,23 pulgadas obtenido con Emulgex, lo cual evidencia una fragmentación más eficiente y adecuada para los requerimientos de planta. Se concluye que el San-G Apu es el explosivo más óptimo para las condiciones de la operación, recomendándose su implementación para mejorar productividad y cumplimiento de especificaciones de chancado. (Torres, 2025)

Canchanya, Jordy; Guillen, Miguel. Propuesta de implementación del cambio de explosivo Emulex (80, 65 y 45) a emulsión Quantex Sub para la reducción de costos de la voladura en la rampa NV175 Nancy de la Unidad Minera Animón de Empresa Administradora Chungar S.A.C. Perú en esta tesis se evaluó la factibilidad técnica y económica del reemplazo del explosivo encartuchado Emulex por emulsión Quantex Sub en labores de avance en la rampa NV175 de la Unidad Minera Animón, considerando los costos operativos de perforación y voladura, el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y la productividad minera. La metodología comprendió la caracterización geomecánica, diseño y ejecución de voladuras controladas, análisis de indicadores como número de taladros, eficiencia de avance, factor de carga y velocidad de detonación. Los resultados mostraron que la implementación del Quantex Sub redujo en promedio seis taladros por frente, alcanzando una eficiencia del 92 %, con un factor de carga de 2,78 kg/m³ y un ahorro económico de 43,14 US\$/m. Proyectando 420 m de avance mensual, el ahorro total ascendería a 18 118,8 US\$, evidenciando que el cambio de explosivo permite una reducción significativa de costos, optimizando la rentabilidad de la operación minera. (Canchanya & Guillen, 2019)

3.1.3. Antecedentes locales

No se encontraron investigaciones referentes en los años estudiados

3.2. Bases teóricas

3.2.1. *Fundamentos de la voladura en minería de superficie*

3.2.1.1. Mecánica de fractura en rocas y modos de rotura. La voladura en minería de superficie puede entenderse como un proceso de conminución primaria gobernado por fenómenos de alta tasa de deformación, en el que un frente de choque de muy corta duración interactúa con un medio elasto-frágil que contiene defectos, discontinuidades y anisotropías de diversa escala. En una primera fase, la presión cercana al taladro activa grietas radiales y circunferenciales que responden a tensiones de tracción superando el umbral de resistencia de la roca, mientras que en la zona más próxima a la columna de carga aparecen mecanismos de cizallamiento y trituración asociados a gradientes extremos de presión. A medida que las ondas alcanzan superficies libres o interfaces de contraste elástico, la reflexión en tracción produce fenómenos de spalling que contribuyen a separar láminas o placas próximas a la cara del banco, completando un patrón de rotura que combina apertura de fisuras, coalescencia, microfragmentación y desalojo por gases. La cinemática resultante depende de parámetros intrínsecos como la resistencia a tracción, la tenacidad y el módulo de Young, pero también del estado tensional in situ y de la orientación de estructuras persistentes, de modo que dos macizos con la misma resistencia pueden responder de manera muy distinta ante un mismo diseño de tiro. La ruta de energía desde el explosivo hacia la roca no se agota en la fase de choque: los gases de detonación mantienen presiones cuasiestáticas que prolongan la apertura de grietas y empujan los fragmentos, facilitando la expulsión hacia superficies libres. En suma, el resultado observacional —la distribución granulométrica del run-of-mine— es la huella integrada de estas etapas, condicionada por la geometría de perforación, el confinamiento y la naturaleza del explosivo empleado. (Bernaola et al, 2013)

3.2.1.2. Energía de detonación, presión de detonación y brisancia. La energía química disponible en un explosivo industrial se transforma, durante la detonación, en trabajo de fractura, deformación plástica a escala microscópica, calentamiento y energía cinética de fragmentos y gases; la fracción que efectivamente contribuye a rotura útil depende de la velocidad de detonación (VOD), de la presión en el frente de choque y de la capacidad de transferencia al macizo. La presión de detonación, próxima a la condición de Chapman–Jouguet, gobierna el tamaño de la zona de daño próximo al taladro, y su gradiente temporal está asociado a la brisancia, entendida operacionalmente como la “capacidad de triturar” en escalas muy cercanas a la carga. Explosivos con mayor VOD y mayor presión pico tienden a generar una fracción de finos superior en proximidad a la columna, aunque el efecto observado en la granulometría global será el resultado de la interacción con el patrón de malla, la presencia de superficies libres y la cronología de iniciación. La densidad de carga y el acoplamiento mecánico entre columna y pared del taladro también influyen de manera marcada: una columna bien acoplada reduce pérdidas de energía por ventilación y favorece una transmisión más eficiente del choque. No obstante, densidades excesivas sin el confinamiento adecuado pueden traducirse en sobre-rotura y proyecciones, mostrando que la energía no es un fin en sí mismo, sino un recurso que debe administrarse según el contexto geomecánico. Por ello, el diseño eficaz exige armonizar niveles de energía específica con las condiciones del macizo y los objetivos de planta, manteniendo el control del factor de potencia para aislar el efecto del tipo de explosivo. (Bernaola et al, 2013)

3.2.1.3. Propagación de ondas, gases de detonación y confinamiento. Luego del frente de detonación, las ondas compresivas y de cizallamiento se propagan y experimentan refracción y reflexión en función de la arquitectura interna del macizo, creando zonas alternadas de compresión y tracción que alimentan la nucleación y crecimiento de grietas. La aparición de la superficie libre convierte parte de la energía en aceleración de fragmentos, a la

vez que refleja ondas en tracción capaces de producir spalling a cierta distancia del taladro. Mientras tanto, los gases de detonación —de elevada temperatura y con un gradiente de presión más lento que el choque inicial— sostienen la apertura de fisuras, empujan el material y contribuyen a la expulsión dirigida hacia zonas de menor confinamiento, especialmente si la secuencia de retardos ha sido diseñada para “empujar” en un vector preferente. El nivel de confinamiento, que depende del stemming, de la columna de taco y de la rigidez del entorno, es decisivo para retener energía dentro del sistema roca-carga el tiempo suficiente como para convertirla en trabajo de fractura, evitando pérdidas por escape prematuro. Un stemming insuficiente incrementa la ventilación y propicia proyecciones; uno excesivo puede penalizar la liberación hacia la cara libre, disminuyendo la eficiencia de rotura. La distribución vertical de la carga, el uso de decking y la longitud de taco permiten modular la contribución relativa de ondas y gases, afinando la respuesta del macizo en función de objetivos como control de sobre-rotura, maximización de finos útiles o reducción de vibraciones ambientales. En un escenario bien ajustado, ondas y gases actúan sinérgicamente para construir una red de fracturas interconectadas que facilita la excavación y mejora la alimentabilidad a planta. (Bernaola et al, 2013)

3.2.1.4. Influencia de la geología local en la respuesta a la voladura. La geología local introduce condicionantes que trascienden la mera resistencia a compresión simple; propiedades como la anisotropía de elasticidad, la tenacidad a fractura, la densidad de discontinuidades y su persistencia, así como la presencia de mineralizaciones frágiles o zonas alteradas, determinan la facilidad con la que el macizo puede fragmentarse y evacuar energía. En roca dura y competente, con altos índices de SPI, la energía efectiva por tonelada requerida para alcanzar ventanas de P80 compatibles con la planta suele ser mayor, y pequeñas desviaciones en burden y espaciamiento se traducen en grandes diferencias de tamaño. En rocas estratificadas o con familias de juntas muy marcadas, la orientación del patrón de perforación y la dirección de avance adquieren relevancia porque pueden alinearse o contraponerse a los planos de debilidad, con impactos directos en la forma y tamaño de los bloques. La presencia de agua modifica el confinamiento, afecta la iniciabilidad de ciertas formulaciones y puede amortiguar la onda de choque, lo que obliga a privilegiar explosivos con buena resistencia al agua y diseños que preserven el contacto efectivo entre columna y pared. Incluso dentro de un mismo banco, cambios sutiles de litología o de calidad del macizo exigen ajustes locales de retardo, distribución de carga o longitud de taco para sostener la consistencia de resultados. Por ello, la caracterización geomecánica previa y la sectorización por dominios no son trámites formales, sino condiciones necesarias para interpretar con rigor las respuestas observadas y atribuirles al tratamiento correcto. (Bernaola et al, 2013)

3.2.2. Explosivos industriales: conceptos y clasificación

3.2.2.1. Emulsiones agua-en-aceite: estructura, estabilidad y desempeño. Las emulsiones industriales tipo agua-en-aceite utilizadas en minería de superficie se constituyen por una fase continua hidrocarbonada (combustible) y una fase interna acuosa oxidante rica en nitrato de amonio, estabilizadas por surfactantes que mantienen el tamaño de gota y la integridad del sistema frente a gradientes térmicos y mecánicos. La microestructura resultante —tamaño y distribución de gotas, espesor de la película interfacial, grado de gasificación— define propiedades operativas críticas como la viscosidad, la bombeabilidad, la estabilidad frente a la separación y la sensibilidad a la iniciación. Estas matrices son fabricadas para emplearse como base de ANFO pesados vaciables o bombeables, ajustando in situ la proporción con nitrato poroso para adaptar la energía efectiva y la densidad al contexto geomecánico y al diámetro de taladro. Desde el punto de vista de seguridad y desempeño, su resistencia intrínseca al agua, su relativa insensibilidad frente a estímulos mecánicos y su capacidad de ser cargadas con equipos de bombeo ofrecen ventajas sobre formulaciones más simples, especialmente en bancos húmedos o con infiltraciones. El control de la densidad aparente, obtenido por gasificación química o incorporación de microesferas, permite modular la VOD y el acoplamiento, mientras que aditivos específicos pueden mejorar la estabilidad térmica o la compatibilidad con materiales del entorno. Cuando se implementan con procedimientos de QA/QC y bajo rangos de almacenamiento recomendados, las emulsiones proveen una plataforma versátil para lograr fragmentaciones compatibles con metas de planta, reduciendo la variabilidad generada por condiciones ambientales cambiantes. (Jones et al, 1999)

3.2.2.2. Sensibilización (gasificación, microesferas) y su efecto en la VOD. La sensibilización dota a la emulsión de sitios calientes que facilitan la transición de deflagración a detonación y la sostenibilidad del frente a lo largo de la columna; se logra mediante gasificación química que produce microburbujas en la fase interna o a través de microesferas huecas que se incorporan como núcleos de cavitación. La elección del mecanismo y su dosificación inciden de manera directa en la densidad final, en la VOD y en la presión de detonación, variables estrechamente vinculadas al tamaño característico de la fragmentación próxima al taladro y a la robustez del proceso en condiciones de agua o de diámetros grandes. Un diseño de sensibilización que incremente excesivamente la densidad puede mejorar el acoplamiento y la presión pico, pero penalizar la iniciabilidad en condiciones desfavorables; en sentido inverso, densidades demasiado bajas facilitan la iniciación pero reducen la brisancia y pueden aumentar la ventilación si el stemming no es adecuado. La respuesta óptima, desde la perspectiva de planta, surge del equilibrio entre iniciabilidad, estabilidad temporal de la matriz (para evitar desensibilización por envejecimiento), VOD suficiente para asegurar rotura eficiente y una densidad que armonice acoplamiento mecánico con la energía específica buscada. En la práctica, esto se traduce en ventanas operativas de densidad y VOD ajustadas por dominio geomecánico y por objetivo de P80, manteniendo la trazabilidad de la formulación para relacionar, con validez estadística, la microestructura de la emulsión con los indicadores de desempeño en campo. (Quaresma et al, 2016)

3.2.2.3. Propiedades clave: densidad, VOD, energía específica y resistencia al agua. Las propiedades que guían la selección de un explosivo en minería a cielo abierto se articulan en torno a cuatro ejes: la densidad aparente, la VOD, la energía específica y la resistencia al agua. La densidad determina el acoplamiento eficaz con la pared del taladro y condiciona el factor de potencia alcanzable para un diámetro dado; la VOD, a su vez, se relaciona con la brisancia y con la capacidad de generar un frente de choque consistente a lo largo de toda la columna. La energía específica resume el potencial de trabajo disponible por unidad de masa y, combinada con el acoplamiento, aproxima la energía efectiva por tonelada que recibirá la roca; la resistencia al agua asegura que la matriz conserve su integridad y sensibilidad en presencia de humedad o infiltraciones, evitando pérdidas por lavado o por desensibilización. Variables operativas como la viscosidad y la estabilidad térmica complementan el cuadro al determinar la bombeabilidad y los márgenes de almacenamiento y uso. Desde la óptica de control estadístico, mantener estas propiedades dentro de rangos validados por la operación permite interpretar con nitidez la contribución del tipo de explosivo sobre la fragmentación y sobre el comportamiento del circuito de planta, minimizando el ruido generado por desviaciones de formulación o por envejecimiento de la matriz. (Agrawal & Mishra, 2018)

3.2.2.4. Caracterización técnica de los explosivos en estudio. En este trabajo se analizan comparativamente dos matrices de emulsión con usos y formulaciones industriales consolidadas, manteniendo constantes los parámetros de perforación y el factor de potencia para aislar el efecto atribuible al tipo de explosivo en contextos de roca dura y presencia eventual de agua. Por un lado, se emplea una emulsión matriz gasificable de uso extendido en ANFO pesados, orientada a minería de superficie y canteras; por otro, una emulsión matriz con aditivos energéticos orientada específicamente a mejorar el desempeño en macizos de mayor competencia, preservando bombeabilidad y resistencia al agua. La elección de ambas

responde a la necesidad de contrastar una alternativa “estándar” y otra “energética” dentro de una misma familia tecnológica, de modo que las diferencias observadas en la fragmentación y en la respuesta de planta puedan atribuirse con plausibilidad a la microestructura y a la energía efectiva de la carga, y no a cambios disruptivos de clase de explosivo. Esta caracterización se enmarca en la problemática y objetivos definidos en la ficha de diagnóstico, donde se establece explícitamente la comparación Vertex vs. Emulgex para evaluar porcentaje de finos y throughput bajo iguales condiciones de diseño de tiro, aspecto que aporta relevancia práctica y foco experimental al estudio. (Kramarczyk et al, 2022)

3.2.2.4.1. Emulgex (estándar): principios de formulación y uso. Emulgex G1 corresponde a una emulsión matriz tipo agua-en-aceite diseñada para la fabricación de ANFO pesados vaciables y bombeables mediante mezcla in situ con ANFO en proporciones variables, lo que permite modular la energía efectiva y la densidad de la carga según el dominio geomecánico y el diámetro de taladro. Se utiliza ampliamente como agente de voladura en minería de superficie, canteras y obras civiles, con sensibilización previa mediante una solución gasificante antes del carguío para garantizar iniciabilidad y sostenimiento del frente de detonación. La presentación a granel, su uso desde tanque o camión de bombeo y las recomendaciones de almacenamiento refuerzan su perfil operativo, mientras que las especificaciones técnicas consignan una densidad típica entre 1,30 y 1,40 kg/L y una viscosidad en el rango 20 000–40 000 cP, compatibles con el requerimiento de bombeabilidad y con la estabilidad de la matriz durante la operación. Estas características, junto a su resistencia al agua, sustentan su elección como referencia “estándar” en el presente contraste, en la medida en que representan una práctica habitual en distintas operaciones a cielo abierto. (Enaex, 2022)

3.2.2.4.2. Vertex (energético): principios de formulación y uso. Vertex es una emulsión matriz formulada para la fabricación de ANFO pesados vaciables y bombeables, con un posicionamiento explícito hacia roca de mayor dureza y condiciones con presencia de agua, aspectos en los que la microestructura y los aditivos energéticos incluidos (p. ej., urea y aceite mineral refinado) buscan mejorar la performance de la voladura. La documentación técnica destaca su recomendación para minería de superficie y su empleo como base en mezclas ajustables in situ, enfatizando la estabilidad operativa y la compatibilidad con diámetros y condiciones diversas. En términos de propiedades fisicoquímicas, se reporta una densidad en el rango 1,30–1,40 kg/L y viscosidad entre 30 000 y 37 000 cP, parámetros acordes con un compromiso entre acoplamiento, brisancia y bombeabilidad. En un diseño experimental que mantenga constantes el factor de potencia y la malla, el eventual diferencial de desempeño frente a una emulsión estándar puede reflejarse en variaciones del tamaño característico cerca del taladro y, en consecuencia, en la fracción de finos y en la alimentabilidad a planta, hipótesis que se pone a prueba en este estudio. (Enaex, 2022)

3.2.3. Diseño de perforación y voladura

3.2.3.1. Parámetros geométricos: burden, espaciamiento, diámetro y altura de banco. Los parámetros geométricos del diseño —burden, espaciamiento, diámetro y altura de banco— determinan el nivel de confinamiento, la superposición de zonas de fractura y la eficiencia con que la energía del explosivo se transforma en rotura útil. Un burden demasiado bajo favorece ventilación precoz y proyecciones; demasiado alto incrementa el riesgo de subperforación y fragmentación gruesa. El espaciamiento regula la interacción entre taladros y define la continuidad de grietas entre cargas adyacentes, por lo que su incremento más allá de la ventana óptima genera islas de material sin fracturar y tamaños sobredimensionados. El diámetro de taladro condiciona la tasa de carga y el acoplamiento, afectando el factor de potencia alcanzable y la distribución vertical de la energía; diámetros mayores permiten mayores cargas por metro, pero exigen mallas coherentes para evitar sobre-rotura. La altura de banco controla el volumen unitario en juego y la cantidad de superficies libres efectivas, además de influir en la logística de carguío y en el control de taludes. En operaciones que buscan aislar el efecto del tipo de explosivo, mantener estos parámetros dentro de tolerancias estrechas —y documentar las desviaciones reales frente al plan— es la condición de posibilidad para una comparación justa y para la interpretación causal de diferencias observadas en fragmentación o throughput. El control geométrico se complementa con una verificación topográfica post-perforación y con inspecciones de desviación de barrenos, especialmente en macizos heterogéneos o abrasivos. (Bernaola et al, 2013)

3.2.3.2. Factor de potencia (kg/t) y distribución de carga. El factor de potencia (FP) expresa la masa de explosivo por tonelada de roca y, en términos prácticos, aproxima la energía específica entregada al macizo; su fijación por dominio geomecánico y su mantenimiento entre tratamientos constituyen el principal mecanismo para aislar el efecto del tipo de explosivo. Un FP por debajo de la ventana óptima redonda en fragmentaciones gruesas

y mayor recirculación en planta; por encima, aumenta el riesgo de sobre-rotura, vibraciones y costos innecesarios. La distribución de carga —con columnas continuas, decking selectivo o cargas segmentadas— permite ajustar la contribución relativa de ondas y gases a lo largo de la altura del banco, dirigiendo la rotura hacia superficies libres o conteniendo energía en zonas críticas. La ubicación y longitud del taco (stemming) son la llave de control de la ventilación: un taco insuficiente pierde presión útil y eleva proyecciones; uno excesivo puede “ahogar” el disparo y empeorar la fragmentación. En campañas comparativas, medir el FP real (kg/m y kg/t) y la densidad efectiva de la carga, junto con el registro de la disposición vertical, otorga trazabilidad experimental y utilidades para modelar la respuesta del macizo. Esta combinación de constancia en FP y diseño de distribución de carga es, en definitiva, el marco que hace interpretable cualquier diferencia atribuible a la microestructura o energía efectiva del explosivo utilizado. (Dyno Nobel, 2010)

3.2.3.3. Sistema de iniciación, tiempos de retardo y dirección de avance. El sistema de iniciación y el programa de retardos definen la cronología de liberación de energía y la direccionalidad de la rotura, aspectos que condicionan la coalescencia de grietas y el aprovechamiento de superficies libres. Retardos demasiado cortos pueden provocar interferencias destructivas y zonas sin relieve suficiente para evacuar material; demasiado largos rompen la continuidad del frente, disminuyendo la superposición de zonas de fractura. La dirección de avance del disparo, alineada con superficies libres y con la orientación de discontinuidades, ayuda a guiar el empuje de gases y la rotura hacia la cara del banco, reduciendo sobre-rotura en taludes y mejorando la forma del montón de material. La elección entre detonadores electrónicos, no eléctricos o pirotécnicos influye en la precisión temporal y en la repetibilidad del patrón; en estudios de contraste, la precisión ayuda a disminuir la varianza experimental y a atribuir diferencias al tratamiento de interés. En todos los casos, la coherencia entre iniciación, retardo y geometría de malla es lo que determina, en último

término, si la energía disponible realizará trabajo de fractura donde conviene o se disipará sin traducirse en ganancias de planta. (Dotto & Pourrahimian, 2025)

3.2.3.4. Stemming, confinamiento y control de sobre-rotura. El stemming es un elemento aparentemente sencillo que, sin embargo, fija el balance entre retención de gases y liberación oportuna de energía; su dimensionamiento, material y compactación inciden en la eficiencia del disparo. Un stemming granular adecuadamente compactado ofrece fricción interna y transmite confinamiento hacia la columna de carga, mientras que materiales finos, húmedos o segregados pueden perder capacidad de sellado durante la detonación. El confinamiento lateral y vertical, producto de la geometría del banco y de la continuidad de la roca, completa el cuadro: un confinamiento excesivo eleva presiones y puede llevar a sobre-rotura o vibraciones; uno insuficiente reduce la porción de energía convertida en trabajo útil y multiplica proyecciones. En bancos con objetivos de control de talud, la combinación de distribución vertical de carga, retardo y stemming se utiliza para proteger zonas críticas y minimizar el overbreak. En un estudio comparativo, estandarizar los procedimientos de stemming y documentar su longitud real garantiza que las diferencias en fragmentación o finos no se deban a variaciones inadvertidas en este componente. (Dotto & Pourrahimian, 2025)

3.2.3.5. Fuentes de variabilidad operativa y su control. La operación introduce múltiples fuentes de variabilidad que pueden oscurecer el efecto del tipo de explosivo si no se controlan: desviaciones en malla real respecto al plan, variación de FP por errores de carguío, cambios litológicos dentro del mismo banco, humedad irregular, desviación de barrenos, mezcla de material de distintos disparos en el circuito de transporte y paradas intempestivas de planta. Un esquema de bloques geomecánicamente homogéneos, con asignación aleatoria de tratamientos por disparo, reduce la confusión por diferencias naturales del macizo; a ello se suma la trazabilidad del ROM mediante codificación por campaña para asegurar que el material analizado en planta corresponde al disparo estudiado. En planta, delimitar ventanas de estabilidad que excluyan arranques, cambios de set point y paradas, y registrar la disponibilidad y utilización, facilita interpretar los cambios de throughput. El conjunto de medidas de QA/QC en perforación, carguío, transporte y proceso crea el contexto en el que una diferencia de fragmentación atribuible a la microestructura del explosivo puede detectarse con suficiente potencia estadística y traducirse en conclusiones operativas sólidas. (Díaz et al, 2012)

3.2.4. Fragmentación del material y generación de finos

3.2.4.1. Distribución granulométrica: P20, P50, P80 y su interpretación operativa. La distribución granulométrica del material volado es el indicador más directo del resultado de la voladura y se resume habitualmente mediante percentiles como P80, P50 y P20, que aluden al tamaño bajo el cual pasa el 80 %, 50 % y 20 % de la masa, respectivamente. En términos operativos, el P80 es una variable diana para chancado, el P50 representa un tamaño medio que correlaciona con la eficiencia global de conminución, y el P20 aproxima la fracción fina que puede facilitar la alimentación pero, en exceso, saturar cribas o generar polvo y pérdidas. La interpretación eficaz de estos percentiles requiere consistencia metodológica: si se miden por análisis de imagen, se debe garantizar calibración

periódica con tamizado, control de iluminación y escala, así como estrategias para minimizar sesgos por segregación en correas o pilas. Cuando se trabaja con un umbral de “fino” definido (por ejemplo, $<6\text{--}10\text{ mm}$), conviene elaborar curvas complementarias que muestren el desplazamiento de toda la distribución, evitando conclusiones basadas en un único punto. En estudios comparativos, la lectura conjunta de P80 y % de finos permite discernir si un tratamiento produce trituración cerca del taladro sin mejorar el tamaño característico global, o si desplaza la curva de manera integral hacia tamaños más compatibles con las restricciones aguas abajo. (Silva et al, 2017)

3.2.4.2. Modelos de fragmentación: Kuz-Ram, Swebrec y enfoques híbridos. Los modelos de fragmentación ofrecen un marco para predecir y analizar la respuesta del macizo ante distintas combinaciones de malla, energía específica y propiedades de la roca. El modelo Kuz-Ram relaciona el tamaño medio con parámetros de diseño y características del macizo, proporcionando una estimación de la curva a partir de ajustes empíricos; por su parte, la función Swebrec ajusta la distribución completa con alta fidelidad, especialmente en los extremos fino y grueso, lo que resulta útil para cuantificar cambios de tail. En aplicaciones operativas, es frecuente combinar un modelo estructural con calibraciones locales y con retroalimentación desde la planta para cerrar el ciclo mine-to-mill. La utilidad no radica solo en predecir percentiles, sino en orientar el diseño experimental: al mantener constante el factor de potencia, el modelo ayuda a formular hipótesis sobre cómo variaciones en VOD, densidad o sensibilización —derivadas del tipo de explosivo— podrían reflejarse en desplazamientos de la curva. Integrar mediciones repetidas por bloque con ajustes Swebrec permite comparar tratamientos con métricas consistentes (diferencias en P80, cambios en pendiente logarítmica, área bajo la curva), generando evidencia más rica que la basada únicamente en promedios puntuales. (Gheibie et al, 2009)

3.2.4.3. Medición de fragmentación: tamizado vs. análisis de imagen. El tamizado es el patrón de referencia por su trazabilidad directa en masa, pero su costo logístico limita la frecuencia y la cobertura; además, la manipulación puede alterar el contenido de ultra-finos. El análisis de imagen en correa o stockpile permite muestreos de alta frecuencia sin interrumpir la operación, siempre que se aseguren condiciones de captura controladas y una calibración sistemática contra tamizados periódicos. La clave es tratar el método de imagen como un proxy calibrado que, sin reemplazar la referencia, la extiende a la escala operativa necesaria para detectar efectos de tratamiento con potencia estadística. En ambos casos, el diseño de muestreo debe anticipar la segregación por tamaño y densidad, el efecto de la humedad y la representatividad temporal respecto de la ventana de alimentación a planta; sin esta precaución, diferencias aparentes en finos pueden ser artefactos de muestreo. Finalmente, la definición estable del umbral de fino y la consistencia en el procesamiento de datos garantizan que cualquier variación observada obedezca al tratamiento y no a cambios de criterio. (López et al, 2023)

3.2.4.4. Definición operativa de “fino” y umbrales críticos para planta. La definición de “fino” debe surgir de la lógica del circuito de conminución: umbrales en el rango de 6–10 mm suelen reflejar el límite a partir del cual el material fluye sin generar cuellos de botella en chancado primario o secundario. Sin embargo, el óptimo es específico de cada planta y depende del set de las trituradoras, de la capacidad de las cribas y del perfil de dureza del mineral. Establecer el umbral ex ante, documentarlo y sostenerlo durante la campaña comparativa evita sesgos y permite interpretar de manera inequívoca la magnitud del efecto. En términos estadísticos, fijar el umbral y trabajar con proporciones (0–1) facilita modelar el % de finos con enfoques apropiados para variables acotadas, mientras que el análisis complementario de P80 y P50 ofrece contexto sobre la forma de la distribución. La coherencia entre definición operativa y medición es, por tanto, la condición para traducir resultados de fragmentación en decisiones de operación y en estimaciones de impacto sobre throughput. (Empírica, 2020)

3.2.4.5. Throughput de planta y su relación con la voladura. Concepto de throughput y métricas asociadas (t/h, CV, tiempo en rango). El throughput cuantifica la tasa de procesamiento de mineral (t/h) que el circuito es capaz de sostener en condiciones normales de operación, y se caracteriza no solo por su promedio, sino por su variabilidad (coeficiente de variación, CV) y por el tiempo en rango objetivo, entendidos como proxies de estabilidad y control. En estudios de intervención, el promedio puede mostrar una mejora modesta mientras que el tiempo en rango se incrementa sustancialmente, evidenciando un proceso menos propenso a atollos y paradas; por ello, reportar las tres métricas proporciona una visión más completa del desempeño. La alineación temporal entre el material procedente de un disparo y la señal de planta es crucial para evitar contaminación por blending o por transitorios de arranque, así como para excluir episodios de mantenimiento o eventos anómalos. En análisis por bloques, estimar el throughput medio por campaña y su dispersión permite realizar

comparaciones pareadas Vertex vs. Emulgex con mayor potencia estadística. Finalmente, la trazabilidad del dato —procedencia del ROM, ventana de observación, exclusión de paradas— refuerza la validez interna del estudio y habilita la inferencia causal que se persigue. (Angulo, 2020)



3.2.4.6. Efectos de la granulometría en chancado y molienda. La relación entre fragmentación y throughput es mediada por la alimentabilidad del circuito: una distribución con P80 menor y una fracción de finos suficiente reduce los requerimientos de conminución, disminuye la probabilidad de atollos en tolvas y chutes, y suaviza la carga circulante en molienda. En minerales competentes, el beneficio se expresa con mayor nitidez, puesto que la reducción de tamaño inicial evita que el molino absorba trabajo excesivo para romper partículas demasiado gruesas. Sin embargo, existe un punto de equilibrio: un exceso de finos puede saturar cribas, aumentar la generación de lamas y limitar la capacidad por fenómenos de arrastre; por ello, el objetivo es desplazar la curva hacia tamaños “útiles” sin crear cuellos de botella aguas abajo. La homogeneidad del tamaño —baja dispersión— contribuye además a estabilizar el control de proceso, facilitando mantener set points y reduciendo oscilaciones en caudal. Un diseño de voladura orientado por mine-to-mill evalúa la ganancia no solo en términos de tamaños medios, sino por su efecto operativo en las restricciones críticas del circuito. (Angulo, 2020)

3.2.4.7. Enfoque Mine-to-Mill: acoplamiento mina-planta. El enfoque Mine-to-Mill propone que el valor de una intervención en voladura se mida por su impacto en planta, integrando decisiones de malla, explosivo e iniciación con la realidad de chancado y molienda. Bajo esta mirada, el tipo de explosivo deja de ser un fin y se convierte en un medio para ajustar la energía efectiva entregada a la roca en función del cuello de botella dominante del circuito. Si la restricción es el chancado primario, el objetivo será producir una fracción suficiente bajo el tamaño de admisión para evitar atollos; si lo es la molienda, se buscará un P80 compatible con el tamaño óptimo de alimentación del molino. La metodología comparativa entre una emulsión estándar y una energética, manteniendo constante el factor de potencia y la malla, permite evaluar si cambios en VOD y microestructura se traducen en mejoras sostenidas de las métricas de planta. La realimentación desde los sistemas de control

—incluida la variación del CV y el tiempo en rango— cierra el ciclo de optimización y justifica, o no, la adopción del tratamiento a escala sostenida. (Durán et al, 2018)

3.2.4.8. Estabilidad del proceso y cuellos de botella aguas abajo. La interpretación de cualquier mejora observada debe considerar la estabilidad del proceso y la existencia de cuellos de botella que limiten la transferencia de beneficios desde la voladura hasta el producto final. Un cambio favorable en fragmentación puede verse atenuado si una correa con capacidad limitada o una criba subdimensionada no admiten el caudal incrementado, generando colas y recirculación. De igual modo, paradas no programadas, variaciones en la dureza del mineral o cambios en el modo de operación pueden ocultar o exagerar efectos. Por eso, además del promedio de throughput, se recomienda reportar el tiempo en rango, documentar eventos relevantes y, cuando sea posible, acompañar las métricas con indicadores de disponibilidad y utilización. En condiciones de control adecuado, una mejora consistente asociada a un tratamiento específico —como el uso de una emulsión energética— puede atribuirse con confianza y convertirse en argumento para cambios permanentes en la estrategia de voladura. (Durán et al, 2018)

3.2.5. Variables de control geomecánico y de proceso

3.2.5.1. Propiedades del macizo rocoso: RQD, estructuras y competencia. Las propiedades del macizo rocoso —RQD, densidad y orientación de discontinuidades, resistencia a compresión, tenacidad y presencia de zonas alteradas— determinan la facilidad de rotura, la propagación de grietas y la probabilidad de sobre-rotura en taludes. Un RQD alto indica bloques grandes y persistentes que requieren mayor energía efectiva para alcanzar tamaños compatibles con planta; a la inversa, macizos muy fracturados pueden responder con exceso de finos si la energía no se modula. La competencia del mineral, reflejada en índices como el SPI, advierte sobre la necesidad de ajustar densidad, VOD y distribución de carga para evitar sobrecargar la molienda. La caracterización previa, la sectorización por dominios y

el control de humedad o presencia de agua, constituyen insumos para que el diseño de voladura y la elección del explosivo se adapten a la realidad geomecánica y permitan interpretaciones válidas de los resultados. (Zhang, 2016)

3.2.5.2. Humedad, presencia de agua y condiciones reactivas del mineral. La humedad y el agua libre afectan el contacto columna-pared, la iniciabilidad de algunas formulaciones y el confinamiento efectivo; además, promueven segregación de finos y cambios de densidad aparente en correas. En este contexto, las emulsiones matrices con buena resistencia al agua y estabilidad a temperatura ambiente ofrecen ventajas operativas, reduciendo pérdidas por lavado y disminuyendo la variabilidad entre taladros. Cuando existen condiciones reactivas —pirita o minerales que promueven reacciones indeseadas—, los protocolos de almacenamiento y uso adquieren importancia adicional para preservar la integridad de la matriz y la seguridad del proceso. Registrar sistemáticamente estas condiciones, junto con el tipo de explosivo y su estado, permite aislar su impacto y comprender diferencias de desempeño entre tratamientos más allá de la geometría de malla. (Zhang, 2016)

3.2.5.3. Logística de carguío, transporte y trazabilidad ROM-planta. La cadena carguío–transporte–descarga puede diluir o distorsionar los efectos de una campaña de voladura si mezcla material de distintos disparos o si introduce demoras que alteran la secuencia de alimentación a planta. La trazabilidad mediante codificación de camiones o palas por campaña y la coordinación con despacho y control de planta son condiciones para que el throughput observado pueda asociarse al disparo correcto. La gestión de blending debe explicitarse: en algunos casos se busca mezclar para homogeneizar dureza; en estudios de contraste, se debe evitar cruces que confundan la lectura. El registro de tiempos de ciclo, colas en chancado y eventos logísticos relevantes complementa la interpretación técnica y evita atribuciones erróneas al tipo de explosivo. (Zhang, 2016)

3.2.5.4. Condiciones de operación de planta (disponibilidad y utilización).

Finalmente, la disponibilidad mecánica de equipos críticos, la utilización efectiva del circuito y la presencia de paradas no programadas condicionan el throughput alcanzable y la estabilidad de operación. Una campaña comparativa que no controle estas variables corre el riesgo de concluir diferencias inexistentes o de ocultar mejoras reales bajo ruido operativo. Por ello, se recomienda delimitar ventanas de estabilidad, excluir periodos con eventos mayores, y acompañar la comparación con indicadores de disponibilidad y utilización. Esta disciplina de control asegura que la eventual ventaja de una emulsión energética frente a una estándar —planteada en la ficha de diagnóstico como contraste Vertex vs. Emulgex— se evalúe en un terreno justo y representativo de las condiciones habituales de la operación. (Zhang, 2016)

3.3. Líneas de investigación del desarrollo de la investigación

- Línea de investigación: Optimización de procesos mineros

4. Presentación de la investigación

4.1. Justificación

La presente investigación se justifica por su pertinencia tecnológica, económica y científica en el contexto de las operaciones mineras del sur del Perú. El estudio parte de una problemática concreta: la limitada eficiencia de los explosivos estándar, como el Emulgex, en macizos de alta competencia, donde la fragmentación insuficiente genera cuellos de botella en chancado y molienda, afectando directamente el throughput de la planta. Frente a ello, la introducción de un explosivo energético de nueva generación (Vertex) representa una alternativa que busca mejorar la proporción de finos, optimizar la alimentación al circuito de conminución y, en consecuencia, incrementar la productividad global

4.2. Resumen de la investigación

La investigación analiza comparativamente el desempeño de dos explosivos industriales en minería de superficie: Vertex, de tipo energético, y Emulgex, de tipo estándar, con el objetivo de evaluar su impacto en el throughput de la planta de procesamiento (t/h) y en la generación de finos, manteniendo constantes el diseño de perforación y el factor de potencia. La investigación responde a la problemática de fragmentación deficiente en macizos de alta resistencia, donde los explosivos convencionales limitan la productividad, y plantea la hipótesis de que el uso de Vertex incrementará significativamente el porcentaje de finos y la capacidad de planta, reduciendo así costos unitarios y mejorando la eficiencia del proceso. Con un enfoque cuantitativo, experimental y de campo, se emplea un diseño en bloques completos aleatorizados y se recurre a mediciones de throughput vía sistemas de control de planta y análisis granulométrico mediante imágenes y tamizado, complementados con modelos estadísticos robustos. La justificación se sostiene en su relevancia productiva al mejorar la estabilidad operativa, económica al optimizar el costo por tonelada procesada, y

científica al aportar un protocolo metodológico replicable bajo condiciones reales. En conjunto, el estudio busca determinar la viabilidad técnica y económica de sustituir un explosivo estándar por uno energético para optimizar la fragmentación inicial, incrementar el rendimiento de planta y contribuir a la sostenibilidad de la actividad minera.



4.2.1. Descripción de la investigación a medio y largo plazo

- A mediano plazo, este proyecto busca validar en condiciones reales de operación minera la eficacia del explosivo energético Vertex frente al estándar Emulgex, generando evidencia técnica y económica que permita fundamentar decisiones de cambio en las estrategias de voladura. La implementación de campañas comparativas controladas permitirá establecer si el uso de Vertex se traduce en un incremento sostenido del throughput de planta y en una reducción de costos unitarios, ofreciendo a la operación una alternativa confiable y replicable.
- A largo plazo, los resultados obtenidos podrán orientar políticas de optimización del proceso mine-to-mill, favoreciendo la adopción de explosivos energéticos en unidades con macizos de alta resistencia, lo que impactaría positivamente en la productividad global del sector. Asimismo, el desarrollo de este estudio contribuirá a la sostenibilidad de las operaciones mineras al disminuir el consumo energético en etapas posteriores de chancado y molienda, optimizar el uso de recursos y reducir la huella ambiental. De esta manera, el proyecto no solo persigue resolver una problemática puntual de fragmentación, sino que se proyecta como una propuesta de innovación tecnológica aplicable a diversas unidades mineras del sur del Perú, con capacidad de generar mejoras permanentes en competitividad, eficiencia y sostenibilidad

4.2.2. Usuarios de la investigación.

El principal usuario corresponde a la entidad minera, debido a que beneficiara del conocimiento obtenido.

4.2.3. Aporte del desarrollo de la investigación

El desarrollo de esta investigación aporta a la ingeniería de minas en tres niveles fundamentales: en el plano técnico-productivo, ofrece evidencia objetiva sobre cómo la

elección del tipo de explosivo influye en la fragmentación inicial, en la generación de finos y en el throughput de planta, proporcionando insumos prácticos para optimizar el diseño de voladura en macizos de alta resistencia; en el ámbito económico, genera un marco de análisis comparativo que permite estimar con precisión el costo por tonelada procesada y proyectar ahorros derivados de una mayor eficiencia en el uso de la capacidad instalada, sirviendo como base para decisiones de inversión y planificación; y en el nivel científico-metodológico, establece un protocolo experimental replicable —con control de variables, metodología de muestreo y análisis estadístico robusto— que podrá ser transferido a otras operaciones con condiciones geomecánicas similares. En conjunto, este proyecto no solo resuelve una necesidad operativa puntual, sino que contribuye al conocimiento aplicado en la minería peruana, fortaleciendo la integración mine-to-mill y promoviendo prácticas más sostenibles y competitivas

4.2.4. Localización

La investigación se desarrolló en una unidad minera ubicada en el sur del Perú, región caracterizada por macizos rocosos de alta resistencia (alto índice SPI) que representan un reto significativo para la fragmentación mediante voladura. Esta zona se selecciona por su relevancia dentro de la actividad minera nacional y por las condiciones geomecánicas que requieren optimizar el rendimiento de los explosivos empleados. La localización resulta estratégica no solo por el volumen de producción y la importancia económica de las operaciones que allí se realizan, sino también porque permite generar resultados extrapolables a otras unidades mineras de características similares en el país. Además, el hecho de trabajar en un entorno con presencia eventual de agua y elevada competencia del mineral brinda un escenario adecuado para evaluar de manera rigurosa la diferencia de desempeño entre un explosivo estándar como Emulgex y uno energético como Vertex, aportando evidencia representativa y de alto valor práctico

4.2.5. Análisis del futuro de la investigación

El futuro de la investigación se vislumbra prometedor al considerar su potencial de escalamiento y aplicación en distintas operaciones mineras del país. Una vez validados los resultados en la unidad de estudio, se abre la posibilidad de implementar de manera progresiva el uso de explosivos energéticos como Vertex en frentes con características geomecánicas similares, generando un efecto multiplicador en productividad y reducción de costos unitarios. A mediano plazo, los hallazgos podrán integrarse a la estrategia mine-to-mill de las empresas mineras, fortaleciendo la eficiencia en la cadena de valor y consolidando prácticas de voladura más inteligentes y sostenibles. A largo plazo, este proyecto puede convertirse en un referente metodológico y técnico, contribuyendo a la innovación en el diseño de voladuras y a la optimización del consumo energético en chancado y molienda, lo que no solo elevará la competitividad del sector, sino que también alineará la actividad minera con los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental exigidos en el contexto global.

5. Justificación

5.1. Justificación de la investigación

5.1.1. Aspectos técnicos

La investigación se justifica técnicamente porque aborda una de las variables críticas del proceso minero: la calidad de la fragmentación inicial en voladura. Al evaluar de manera comparativa el desempeño de los explosivos Vertex y Emulgex, se busca demostrar el impacto directo sobre el porcentaje de finos y el throughput de la planta, variables que determinan la eficiencia global del sistema mine-to-mill. La aplicación de un diseño experimental controlado y el uso de herramientas estadísticas robustas garantizan que los resultados tengan validez técnica y puedan replicarse en otras operaciones con condiciones similares. De esta manera, el proyecto contribuye al desarrollo de protocolos confiables para la selección de explosivos en macizos de alta resistencia, generando un conocimiento aplicado y de utilidad inmediata en la práctica minera

5.1.2. Aspectos económicos

Desde la perspectiva económica, la investigación es relevante porque propone optimizar el costo por tonelada procesada a través de mejoras en el throughput de planta. La evaluación comparativa entre explosivos permitirá determinar si el incremento en la inversión por el uso de un producto energético como Vertex se traduce en beneficios netos, expresados en mayor productividad y reducción de costos unitarios. Este análisis, que incorpora tanto el gasto en perforación y voladura como el rendimiento de la planta, constituye una herramienta de decisión estratégica para maximizar la rentabilidad de la operación minera. En consecuencia, el proyecto se justifica como una inversión con potencial de generar retornos significativos y sostenibles en el tiempo

5.1.3. Aspectos sociales

En el plano social, la investigación aporta al fortalecimiento de la sostenibilidad de la actividad minera. La mejora en la fragmentación inicial y la reducción del consumo energético en chancado y molienda contribuyen a un uso más racional de los recursos y a la disminución de la huella ambiental, aspectos que favorecen la aceptación social de la minería. Asimismo, al optimizar la productividad de la planta y la eficiencia de los procesos, se promueve la estabilidad de las operaciones y la generación de empleo, beneficiando tanto a las comunidades cercanas como a la economía regional. De este modo, el proyecto refuerza el compromiso del sector con prácticas responsables y alineadas a estándares internacionales de sostenibilidad.

5.1.4. Recursos de la investigación

La investigación cuenta con recursos humanos, materiales y tecnológicos que garantizan su factibilidad. Entre ellos destacan un equipo técnico especializado en perforación y voladura, el acceso a sistemas de control de planta (SCADA/DCS) para la medición del throughput, así como laboratorios y herramientas de análisis granulométrico para la caracterización de finos. A ello se suma la disponibilidad de explosivos (Vertex y Emulgex) y equipos de perforación en condiciones controladas de operación. La combinación de estos recursos asegura la correcta ejecución del diseño experimental planteado y la obtención de resultados confiables, lo que refuerza la justificación del proyecto como viable y pertinente en el contexto minero actual



CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO OPERACIONAL

1. Metodología

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, aplicado y de campo, orientado a contrastar el efecto causal del tipo de explosivo sobre el throughput de planta, manteniendo constantes los parámetros de diseño de voladura. La variable complementaria fue el porcentaje de finos del material volado para respaldar la interpretación técnica. (Hernández et al, 2014)

1.1. Tipo de investigación

1.1.1. Diseño de investigación

Diseño experimental en bloques completos aleatorizados (BCA), con dos tratamientos:

T1: Emulgex (estándar).

T2: Vertex (energético).

Bloque = banco/frente o sector geológicamente homogéneo.

Aleatorización = asignación del tratamiento por disparo dentro de cada bloque.

Réplicas = ≥ 6 disparos por tratamiento (idealmente 8–10) en ≥ 3 bloques.

Variables de control: burden, espaciamiento, diámetro de taladro, altura de banco, taco, sistema de iniciación, factor de potencia objetivo. Si el factor de potencia real difiere del objetivo, se registró como covariable de ajuste.

Alternativa operativa: diseño cruzado por campañas (Campaña A: Emulgex; Campaña B: Vertex) en el mismo frente. (Hernández et al, 2014)

1.1.2. Nivel de investigación

“Explicativo–confirmatorio (causal) con alcance longitudinal (mediciones repetidas por campañas)” (Hernández et al, 2014).

1.2. Población y muestra

1.2.1. Población

Disparos de voladura en minería de superficie (roca dura y/o zonas con alto SPI) en una unidad del sur del país.

1.2.2. Muestra

Disparos ejecutados bajo el diseño descrito, en frentes geomecánicamente equivalentes.

1.2.3. Inclusión

Malla y carga ± 5 %, mismo sistema de iniciación, ventana operativa sin paradas mayores.

1.2.4. Exclusión

Agua no prevista, deslizamientos, desviaciones $>\pm 5$ % en burden/espaciamento, paradas >15 min en la ventana de medición.

1.2.5. Tamaño muestral (guía)

Se dimensionó por potencia ($\alpha=0,05$; $1-\beta=0,80$) para detectar un cambio mínimo relevante de $+5-10$ % en throughput usando desviación estándar histórica por turno/bloque.

1.3. Fuentes y métodos para la recolección de información

1.3.1. Fuentes primarias:

Throughput de planta (t/h) vía SCADA/DCS; planillas de perforación y voladura; consumo de explosivos; % de finos por análisis de imagen (correa/stockpile) con verificación por tamizado.

1.3.2. Procedimientos clave

Ventana de observación de throughput por disparo; QA/QC de datos; trazabilidad ROM-planta mediante codificación de campañas.

1.4. Procesamiento de la información recolectada

1. Depuración y alineación temporal.

Sincronización de la señal de throughput con el flujo ROM de cada disparo; exclusión de paradas y transitorios.

2. Cálculo de indicadores.

a) Throughput medio por unidad de análisis (turno o disparo):

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n T_t$$

Donde:

$\bar{T}$ = throughput promedio (t/h) en la ventana analizada.

T_t = lectura instantánea de throughput en el instante t (t/h).

n = número de lecturas válidas en la ventana.

b) Desviación estándar y coeficiente de variación:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (T_t - \bar{T})^2}$$

$$CV(\%) = \frac{s}{\bar{T}} \times 100$$

Donde:

s = desviación estándar del throughput.

CV(%) = coeficiente de variación porcentual.

c) Tiempo en rango objetivo (estabilidad operativa):

$$\tau(\%) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n b 1L \leq T_t \leq U \times 100$$

Donde:

τ (%) = porcentaje del tiempo en el rango objetivo.

$1 \cdot$ = función indicadora (vale 1 si la condición es verdadera, 0 en caso contrario).

L, U = límites inferior y superior del rango objetivo de operación (t/h).

d) Diferencia porcentual de throughput por bloque (Vertex vs. Emulgex):

$$\Delta\% \text{ Throughput} = \frac{\bar{T}\text{Vertex} - \bar{T}\text{Emulgex}}{\bar{T}\text{Emulgex}} \times 100$$

Donde:

$\bar{T}\text{Vertex}$ = throughput promedio con Vertex en el bloque considerado (t/h).

$\bar{T}\text{Emulgex}$ = throughput promedio con Emulgex en el mismo bloque (t/h).

e) Porcentaje de finos (bajo un umbral d_{fino}):

$$y = \frac{M_{<d_{\text{fino}}}}{M_{\text{total}}}$$

Donde:

y = proporción (0–1) o porcentaje (0–100 %) de finos.

$M_{<d_{\text{fino}}}$ = masa (o conteo equivalente calibrado por imagen) por debajo del umbral

d_{fino} .

M_{total} = masa total de la muestra.

d_{fino} = tamaño umbral de fino definido operativamente (p. ej., 6 mm o 10 mm).

f) Percentiles de fragmentación (P_p):

$$F(P_p) = p$$

Donde:

$F(\cdot)$ = función de distribución acumulada empírica del tamaño de partícula.

P_p = percentil tal que la fracción p de la masa está por debajo de P_p (p. ej., P_{80} , P_{50} , P_{20}).

3. Control de supuestos.

Normalidad (Shapiro–Wilk) y homocedasticidad (Levene) aplicados a promedios por unidad de análisis.

4. Tratamiento de atípicos.

Criterio robusto ($\pm 3 \times \text{MAD}$) con justificación operativa.

$$\text{MAD} = \text{mediana}|T_t - \text{mediana}(T_t)|$$

5. Exploratorio gráfico.

Boxplots por tratamiento y bloque; gráficos de control por campaña.

6. Indicadores económicos (si aplica).

Costo unitario:

$$C_{\text{USD/t}} = \frac{C_{\text{perfor}} + C_{\text{expl}} + C_{\text{conmin}} + C_{\text{oper}}}{\text{toneladas procesadas}}$$

Donde:

$C_{\text{USD/t}}$ = costo por tonelada procesada.

C_{perfor} , C_{expl} , C_{conmin} , C_{oper} = costos atribuibles a perforación, explosivo, conminución y operación (USD) en la ventana.

1.5. Modelo estadístico

Modelo principal (throughput): Modelo lineal mixto (efectos fijos y aleatorios).

$$\text{Throughput}_{ij} = \mu + \beta_1 \cdot \text{Tratamiento}_i + u_j + \gamma \cdot \text{FP_real}_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

$$u_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_u^2)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Donde:

Throughput_{ij} = throughput de la i-ésima observación en el j-ésimo bloque (t/h).

μ = intercepto global.

$\text{Tratamiento}_i \in \{0,1\}$ con 0 = Emulgex y 1 = Vertex.

β_1 = efecto fijo del tratamiento (diferencia media ajustada Vertex vs. Emulgex).

u_j = efecto aleatorio del bloque j (frente/banco/campaña).

σ_u^2 = varianza entre bloques.

FP_real_{ij} = factor de potencia real medido en la observación ij (kg/t).

γ = coeficiente de ajuste por FP real.

ε_{ij} = error aleatorio residual con varianza σ^2 .

Contraste principal:

$$H_0: \beta_1 = 0 \quad \text{vs} \quad H_1: \beta_1 \neq 0$$

Estadístico de prueba aproximado (Satterthwaite/Kenward–Roger):

$$t = \frac{\widehat{\beta}_1}{SE(\widehat{\beta}_1)}$$

Donde:

$\widehat{\beta}_1$ = estimador del efecto del tratamiento (REML).

$SE(\widehat{\beta}_1)$ = error estándar de $\widehat{\beta}_1$ según la varianza-covarianza del modelo mixto.

t se evalúa con grados de libertad aproximados (Satterthwaite o Kenward–Roger).



Tamaño del efecto (diferencia estandarizada) para reporte complementario:

$$d = \frac{\bar{X}_{\text{Vertex}} - \bar{X}_{\text{Emulgex}}}{s_p}$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_{\text{Vertex}} - 1)s_{\text{Vertex}}^2 + (n_{\text{Emulgex}} - 1)s_{\text{Emulgex}}^2}{n_{\text{Vertex}} + n_{\text{Emulgex}} - 2}}$$

Donde:

$\bar{X}_{\text{Vertex}}, \bar{X}_{\text{Emulgex}}$ = promedios de throughput por bloque/campaña (según agregación).

$s_{\text{Vertex}}^2, s_{\text{Emulgex}}^2$ = varianzas muestrales correspondientes.

$n_{\text{Vertex}}, n_{\text{Emulgex}}$ = tamaños muestrales por tratamiento.

s_p = desviación estándar combinada (pooled).

Análisis alternativo por pares apareados (bloque como “par”):

$$t_{\text{pareado}} = \frac{\bar{D}}{s_D/\sqrt{b}}$$

Donde:

$D_j = \bar{T}_{\text{Vertex},j} - \bar{T}_{\text{Emulgex},j}$ = diferencia de promedios dentro del bloque j.

$\bar{D}$ = promedio de las diferencias D_j entre b bloques.

s_D = desviación estándar de las diferencias D_j .

b = número de bloques.

Variable complementaria (% de finos): Regresión Beta con enlace logit y efecto aleatorio por bloque.

$$\text{logit}(\pi_{ij}) = \alpha + \delta_1 \cdot \text{Tratamiento}_i + v_j$$

$$v_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$$

$$\text{OR} = e^{\delta_1}$$

Donde:

π_{ij} = valor esperado del porcentaje de finos expresado como proporción (0–1) en la observación ij.

α = intercepto del modelo.

δ_1 = efecto fijo del tratamiento sobre la razón de momios de “fino”.

v_j = efecto aleatorio del bloque j en la media del logit.

σ_v^2 = varianza entre bloques para la variable de finos.

OR = odds ratio asociado a pasar de Emulgex (0) a Vertex (1).

Transformación alternativa (si se prefiere marco lineal para finos):

$$y^* = \arcsin \sqrt{y} \quad \Rightarrow \quad \hat{y} = \sin^2(y^*)$$

Donde:

y = proporción de finos (0–1).

y^* = variable transformada; $\hat{y}$ = retrotransformación a proporción.



CAPÍTULO III

RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica del empleo de un explosivo energético en las voladuras de producción, se desarrolló un análisis comparativo orientado a determinar si su aplicación podía mejorar la cominución del material, especialmente en la fracción menor a 1", la cual constituía un parámetro clave para el rendimiento del proceso. Los valores de referencia indicaban la necesidad de superar porcentajes cercanos al 47 % de finos, por lo que verificar si el explosivo energético lograba incrementar esta fracción resultaba esencial para sustentar su posible implementación. De igual manera, se consideró indispensable confirmar que no se generaran eventos significativos de gases nitrosos, dado que mantenerlos en niveles bajos representaba un criterio fundamental de seguridad y calidad en la detonación.

Asimismo, el análisis incorporó la revisión del comportamiento vibracional asociado a la mayor energía disponible en la formulación energética. Esta revisión fue necesaria porque cualquier variación en las variables de atenuación o en la frecuencia de vibración podía influir en el control operacional de las voladuras y en la interacción con estructuras o zonas sensibles del entorno. Por ello, el estudio se centró en comparar los resultados obtenidos con el explosivo estándar y aquellos registrados con el explosivo energético bajo condiciones similares, considerando indicadores verificables como la fracción de finos, el P80, la velocidad de detonación, la presión de detonación, la formación de gases y las vibraciones medidas en campo.

La comparación entre ambas formulaciones permitió caracterizar de manera objetiva las diferencias en su comportamiento, utilizando únicamente la información observada durante las pruebas y manteniéndose estrictamente dentro de los límites de los datos disponibles. Este enfoque garantizó que las conclusiones derivadas reflejaran únicamente los resultados efectivamente registrados, sin extender el análisis más allá de lo que fue posible comprobar en la práctica operativa.

Con el fin de contextualizar las diferencias técnicas entre ambas formulaciones explosivas evaluadas, se realizó una comparación directa de sus propiedades físico-químicas más relevantes. Este contraste permitió identificar variaciones en parámetros como la densidad, viscosidad, energía específica, resistencia relativa y volumen de gases, los cuales influyeron posteriormente en la fragmentación obtenida, la velocidad de detonación y otros indicadores operativos. A partir de esta revisión, se resume en la siguiente tabla las características principales observadas para cada tipo de explosivo durante las pruebas realizadas.



Tabla 2*Parámetros de los explosivos*

PARÁMETROS	EMULGEX	VERTEX
Densidad(g/cm ³)	1.32-1.36	1.32-1.40
Viscosidad(cP)	22,000- 35,000	20,000- 40,000
Energía(KJ/Kg)	2.618	2.802(+7%)
RWS	0.93	1.01(+8.6%)
RBS	1.34	1.64(+22.4%)
Volumen de gases(L/Kg)	1,113	999.8(- 10.2%)
Balance de oxígeno(%)	-9.63	-8.58(+1.1%)
Duración máxima de almacenamiento	60 días	60 días

Nota. Enaex, 2022

1. Datos generales

Se decidió aplicar un diseño de malla ampliada de 8.0 m × 8.0 m con el objetivo de analizar su desempeño en términos de fragmentación y su efecto posterior en el rendimiento de planta. Este diseño fue contrastado con la malla estándar de 6.5 m × 6.5 m, tradicionalmente empleada con un explosivo de características convencionales. La comparación permitió evaluar si la ampliación de espaciamientos podía generar beneficios operativos sin comprometer el throughput ni la distribución granulométrica del material fragmentado.

El enfoque principal de este análisis consistió en identificar si la reducción del consumo energético por tonelada —producto del incremento en el burden y el espaciamiento— mantenía condiciones adecuadas de fragmentación y alimentabilidad en planta. Este contraste entre mallas permitió valorar de manera directa la respuesta del macizo frente a ambos diseños y determinar si la modificación estructural en la voladura era técnicamente viable bajo las características geomecánicas del sector estudiado.

Figura 1

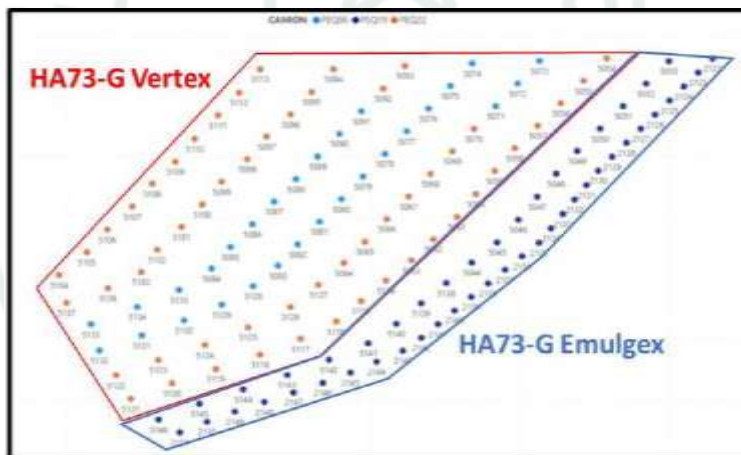
Proyecto de voladura P4095_013F5



Nota. Miranda et al, 2023

Figura 2

Sector cargado con HA73-G Vertex fue la zona de producción



Nota. Blessing, 2024

Con el fin de garantizar la validez de la evaluación, se coordinó la ejecución de la perforación y se programó un periodo de minado exclusivo del sector seleccionado durante aproximadamente cuatro horas. Esta medida permitió analizar de manera aislada el comportamiento del explosivo energético bajo condiciones reales de operación, evitando la mezcla con material proveniente de otros frentes y asegurando que los resultados en planta

estuvieran directamente asociados a la voladura evaluada. La aplicación de este procedimiento facilitó la obtención de datos confiables tanto de fragmentación como de rendimiento en planta (Throughput), los cuales se presentan y analizan en las secciones siguientes de este informe, constituyendo la base para la comparación técnica con los parámetros del diseño estándar.

Tabla 3

Diseño estándar y diseño propuesto en fase 05

	Diseño Estándar	Diseño Propuesto
Litología	MP01	
Fase	5	
Tajo	Constancia	
SPI	71	
Mezcla explosiva	HA73-G Emulgex	HA73-G Vertex
Burden (m)	6.5	8.0
Espaciamiento (m)	6.5	8.0
Factor de Potencia (kg/t)	0.44	0.34

Nota. Vasquez, 2025

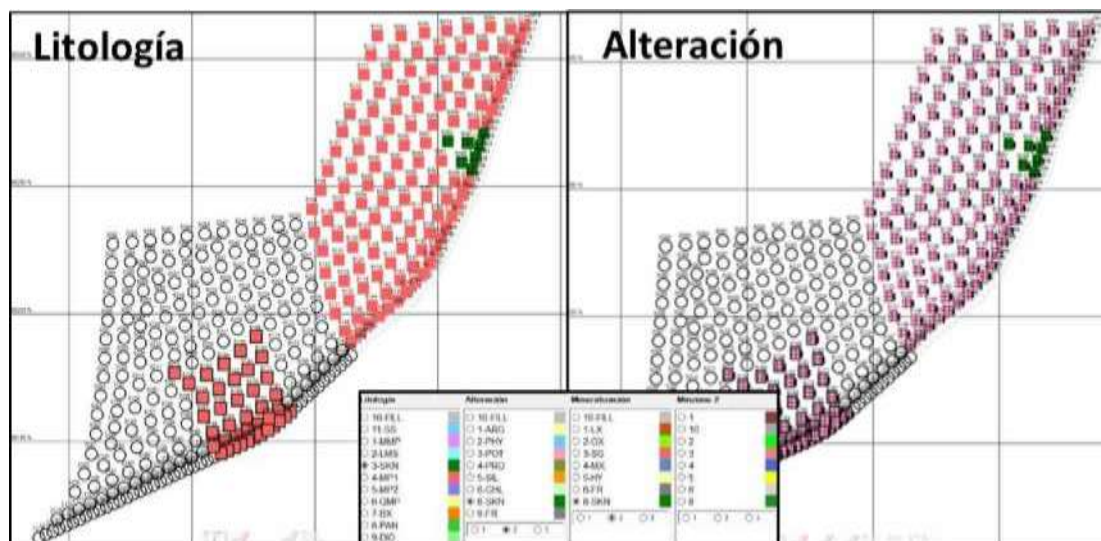
2. Litología

La zona en la que se aplicó la ampliación de malla correspondió a la litología MP01, un tipo de material caracterizado por la presencia de alteración potásica y mineralización hipógena, rasgos que influyen directamente en la respuesta del macizo frente a los esfuerzos generados durante la voladura. Estas condiciones geológicas se complementaron con una Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) de 39 MPa, lo que situó al material dentro de un rango de competencia moderada.

Esta combinación de características estructurales y mineralógicas proporcionó un contexto adecuado para evaluar el desempeño del diseño de malla ampliada, ya que permitió observar con claridad la interacción entre el explosivo energético utilizado y un macizo lo suficientemente consistente como para evidenciar variaciones en la fragmentación, el tamaño característico del material y el rendimiento posterior en planta.

Figura 3

Litología MP01 (Izquierda) y Alteración Potásica (Derecha)



Nota. Townley, 2020

Figura 4

Mineralización hipógena



Nota. Townley, 2020

3. Etapas de la ejecución de la ampliación de malla en 1.5 metros y minado exclusivo para el análisis de resultados en planta

En el siguiente esquema se describen las etapas consideradas para la implementación del diseño de malla ampliada de 8.0 m × 8.0 m, lo que representó un incremento de 1.5 metros respecto al espaciamiento convencional. Este proceso se desarrolló de manera secuencial con el fin de asegurar la correcta ejecución del diseño y la validez de los resultados obtenidos durante la evaluación.

La implementación comprendió inicialmente una evaluación preliminar, en la que se analizaron las condiciones geológicas y geometalúrgicas del sector, verificando que los parámetros del macizo (SPI y UCS) fueran compatibles con la aplicación del diseño ampliado. Posteriormente, se definió y documentó la propuesta técnica de voladura, estableciendo los parámetros de perforación, el tipo de explosivo a emplear y las condiciones operativas para su ejecución.

Una vez aprobada la propuesta, se procedió al carguío y ejecución de la voladura, siguiendo estrictamente el diseño definido para garantizar la representatividad del ensayo. Finalizada la voladura, se realizó la toma de datos en campo, registrando la fragmentación generada, los indicadores operativos y cualquier observación relevante para la evaluación.

Finalmente, se llevó a cabo un minado exclusivo del material fragmentado durante un periodo continuo, de modo que los resultados obtenidos en planta —particularmente el throughput y el porcentaje de finos— pudieran asociarse directamente a la aplicación del diseño ampliado. Con esta información, se realizó un análisis técnico destinado a comparar el desempeño del nuevo diseño con el de la malla estándar, evaluando su impacto tanto en la eficiencia de la voladura como en el procesamiento posterior.

Figura 5

Proceso del proyecto



Nota. Toapanta et al, 2025

Nota: El diagrama organiza el proceso en seis fases principales, las cuales reflejan la metodología completa desde la evaluación preliminar hasta el análisis final de resultados en planta.

1. Evaluación inicial:

Se analizaron los resultados previos obtenidos con el explosivo energético bajo una malla ligeramente ampliada, en sectores con valores de SPI entre 50 y 70. Esta revisión permitió determinar la pertinencia de avanzar hacia un espaciamiento mayor.

2. Propuesta de aplicación de la nueva malla:

Se elaboró y presentó la propuesta técnica para implementar una malla de **8.0 m × 8.0 m**, con el fin de validar su comportamiento bajo condiciones reales de operación.

3. Ejecución del carguío y voladura:

Se llevó a cabo el carguío y posterior detonación del sector definido, utilizando la mezcla explosiva correspondiente al diseño evaluado. Esta fase permitió aplicar en terreno los parámetros de perforación y voladura previamente establecidos.

4. Monitoreo postvoladura:

Se realizó el seguimiento inmediato a la detonación, registrando indicadores clave como **vibraciones y gases NO_x**, con el objetivo de verificar que la voladura se ejecutara dentro de los límites operativos y ambientales establecidos.

5. Medición de la fragmentación en el frente de minado:

Se evaluó la fragmentación real obtenida en la voladura, registrando el comportamiento del material en términos de distribución granulométrica y porcentaje de finos.

6. Análisis de resultados en planta:

Finalmente, el material fragmentado fue procesado en planta para medir el **Throughput** y el **porcentaje de finos**, permitiendo determinar el impacto real del diseño de malla ampliada en el rendimiento global del proceso.

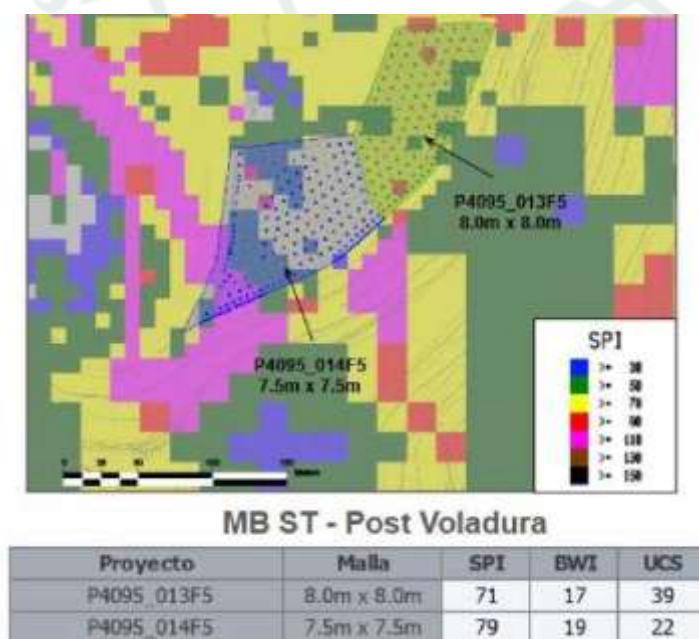
4. Análisis técnico de la ampliación de malla

A partir de los resultados obtenidos previamente con el uso del explosivo energético en la Fase 05, se definió la implementación de un diseño de malla ampliada de 8.0 m × 8.0 m en este sector. Esta decisión se tomó luego de realizar el cálculo de los parámetros de voladura y el correspondiente análisis técnico, considerando las características geológicas y geometalúrgicas del macizo, así como la experiencia previa con el explosivo aplicado en mallas más cerradas.

El propósito principal fue evaluar el desempeño de esta configuración ampliada tanto en la fragmentación generada como en el rendimiento en planta (Throughput), contrastando estos resultados con los obtenidos previamente bajo la malla estándar de 6.5 m × 6.5 m, utilizada con un explosivo de formulación convencional. El análisis permitió establecer si el incremento en el espaciamiento podía mantenerse dentro de rangos técnicamente aceptables sin comprometer la conminución posterior ni la estabilidad operativa del proceso productivo.

Figura 6

Sector de SPI donde se realizó la ampliación de malla a 8.0 m x 8.0 m – Sectpr con SPI de 71



Nota. Toapanta et al, 2025

4.1. Aplicación de modelos matemáticos para estimar los parámetros de burden y espaciamiento

Para definir los parámetros iniciales del diseño ampliado, se recurrió a diversos modelos matemáticos utilizados comúnmente en la estimación de burden y espaciamiento en voladuras de producción. En la siguiente tabla se presentan los modelos empleados para calcular los valores referenciales asociados al uso de un explosivo energético, considerando la información geológica, geotécnica y las propiedades propias del explosivo seleccionado. Estos valores constituyeron únicamente una **estimación preliminar**, debido a que fueron obtenidos a partir de información general del macizo rocoso y no incorporaron aún la fragmentación real generada en terreno. Por esta razón, los parámetros resultantes fueron utilizados como punto de partida para la implementación del diseño, dejándose establecido que el burden óptimo sería determinado posteriormente mediante **un modelo de fragmentación**, el cual permitiría ajustar con mayor precisión las dimensiones del diseño en función del comportamiento observado durante la voladura y la respuesta mecánica efectiva del material. Esta metodología aseguró que el diseño inicial se fundamentara en criterios técnicos válidos, pero mantuviera la flexibilidad necesaria para ser optimizado conforme a los resultados reales obtenidos en campo. (Bernaola et al, 2013)

Tabla 4*Cálculo de burden y espaciamiento referencial en base a modelos matemáticos*

<i>Formulas</i>	<i>Burden (m)</i>	<i>Espaciamiento (m)</i>
<i>ASH</i>	8.4	8.4
<i>ASH Modificado</i>	9.3	9.3
<i>Konya (1976)</i>	8.4	9.2
<i>Konya (1985)</i>	8.4	9.2

Nota. Bernaola et al, 2013

4.1.1. Estimación de la malla óptima mediante el modelo de fragmentación Swebrec-KCO

Con el cálculo referencial del burden y con el propósito de correlacionar estos valores con la fragmentación realmente obtenida, se empleó el modelo de fragmentación **Swebrec-KCO**. Este modelo permitió proyectar la distribución granulométrica esperada a partir de los parámetros preliminares del diseño y de las condiciones geotécnicas del sector.

El modelo fue previamente calibrado utilizando resultados reales de fragmentación registrados en zonas con características similares, tanto en términos de litología como de condiciones de campo, y bajo el uso de la misma mezcla explosiva. Esta calibración constituyó un paso fundamental para asegurar que las estimaciones fueran representativas del comportamiento real del macizo rocoso frente a la energía aplicada.

A partir de esta simulación, fue posible estimar la **malla óptima** de perforación —en términos de burden y espaciamiento— que permitiría alcanzar un **porcentaje de finos superior al 50 %**, valor considerado adecuado para mantener una buena alimentabilidad hacia planta y un desempeño estable en la etapa de conminución. De esta manera, el modelo Swebrec-KCO funcionó como herramienta de validación y ajuste, permitiendo integrar los parámetros teóricos con la respuesta práctica observada en voladuras anteriores.

Tabla 5

Características del sector donde se realizó la ampliación de malla de 6.5 m x 6.5 m a 8.0 m x 8.0 m

	Diseño Estándar	Diseño Propuesto
Litología	MP01	
Fase	5	
Tajo	Constancia	
SPI	71	
Mezcla explosiva	HA73-G	HA73-G
	Emulgex	Vertex
Burden (m)	6.5	8.0
Espaciamiento (m)	6.5	8.0
Factor de Potencia (kg/t)	0.44	0.34

Nota. Bernaola et al, 2013

El modelo proyectó una malla de **8.0 m × 8.0 m**, asociada a un **factor de potencia (F.P.) de 0.34 kg/t**, valor considerado adecuado para las características del sector evaluado. Esta configuración se ajustó a la litología **MP01**, la cual presentó un **SPI de 71** y una **resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de 39 MPa**, parámetros que influyeron directamente en la selección del espaciamiento y en la energía requerida para obtener una fragmentación eficiente.

Dado que el modelo había sido previamente calibrado con datos representativos del entorno geotécnico y operativo, los resultados obtenidos se aproximaron de manera más fiel al comportamiento real del macizo rocoso. Esta concordancia permitió sustentar su uso como herramienta de apoyo en la presente evaluación, ya que proporcionó una base técnica confiable para la definición del diseño de malla ampliada y su posterior validación en campo.

4.2. Propuesta de diseño de carga

A continuación, se presenta el diseño de carga aplicado en el sector de producción correspondiente a la malla evaluada. En este caso, se definió el uso de una mezcla explosiva tipo **HA73-G**, operando con un **factor de potencia (F.P.) de 0.34 kg/t** dentro de una configuración de **8.0 m × 8.0 m**. Esta combinación permitió adecuar la energía de la voladura a las condiciones geotécnicas del macizo y al espaciamiento ampliado utilizado en el diseño. El **Scale Depth of Burial (SDOB)** calculado fue de **1.05**, valor que se encontró dentro del rango recomendado para una voladura controlada, el cual suele ubicarse entre **0.92 y 1.40**. Este parámetro confirmó que la profundidad relativa de la carga fue apropiada para asegurar una liberación eficiente de energía, controlando al mismo tiempo los efectos secundarios asociados a la voladura y manteniendo la estabilidad operativa del proceso. (Bernaola et al, 2013).

Figura 7

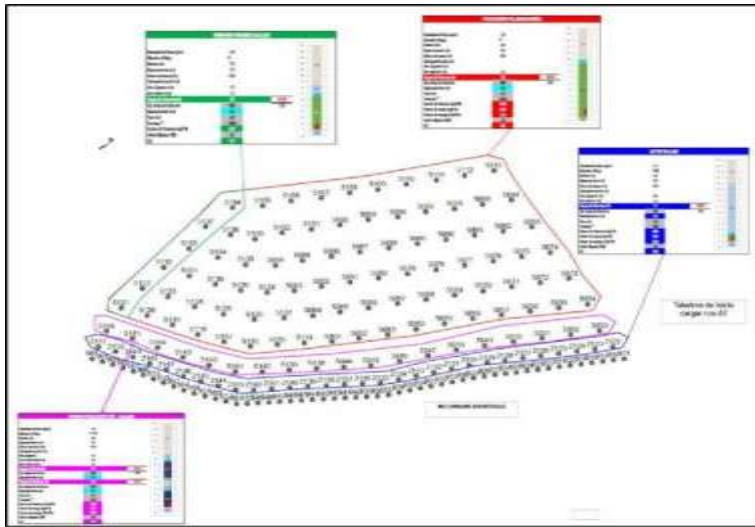
Diseño de carga por taladro SPI:71 – Malla 8.0 m x 8.0 m



Nota. Carrasco, 2015

Figura 8

Diseño de carga en malla 4095_013F5 SPI:71 – Malla 8.0 m x 8.0 m



Nota. Carrasco, 2015

4.3. Simulación de halos de vibración en campo cercano

Con base en el modelo de vibraciones de campo cercano utilizado en la operación y siguiendo los criterios establecidos para la estimación del comportamiento dinámico de la voladura, se realizó una simulación destinada a evaluar la distribución e interacción de los halos de vibración generados por los taladros. Esta simulación permitió analizar la propagación de los esfuerzos inducidos y su correspondencia con el diseño implementado.

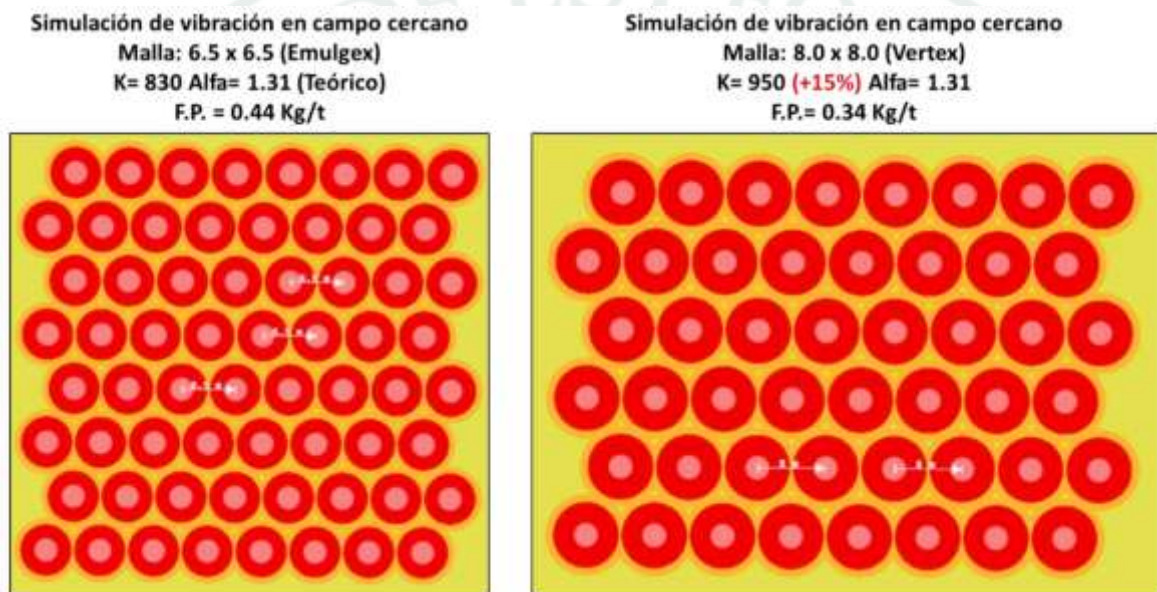
Los resultados mostraron una **distribución similar de las vibraciones** tanto en la vista en planta como en la vista en perfil, lo que indicó una propagación uniforme de los esfuerzos en el macizo rocoso. Esta homogeneidad evidenció que el diseño aplicado mantuvo un comportamiento controlado en el entorno cercano, sin concentraciones de energía que pudieran comprometer la estabilidad del piso o las condiciones del tajo.

En el caso del diseño de malla de **8.0 m × 8.0 m**, no se consideró cámara hacia el piso, con el objetivo de fragmentar adecuadamente el material de base y evitar la formación de superficies irregulares después de la voladura. Asimismo, se observó una **reducción en el factor de potencia**, pasando de **0.44 kg/t a 0.34 kg/t**, lo cual constituyó un ajuste relevante

dentro del diseño ampliado. Esta disminución en la energía aplicada por tonelada se alineó con el objetivo de optimizar el consumo explosivo sin perjudicar la fragmentación ni el comportamiento vibracional del macizo rocoso.

Figura 9

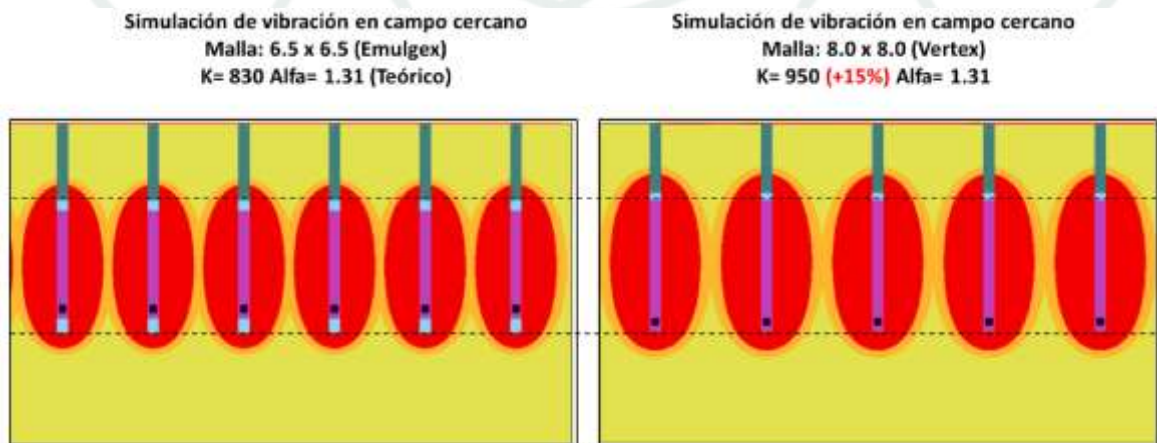
Análisis de Vibraciones en campo cercano. HA73-G Emulgex (6.5 x 6.5 m) y HA73-G Vertex (8.0 m x 8.0 m) – Vista de planta



Nota. Carrasco, 2015

Figura 10

Análisis de Vibraciones en campo cercano. HA73-G Emulgex (6.5 x 6.5 m) y HA73-G-Vertex (8.0 m x 8.0 m)- Vista de Perfil



Nota. Carrasco, 2015

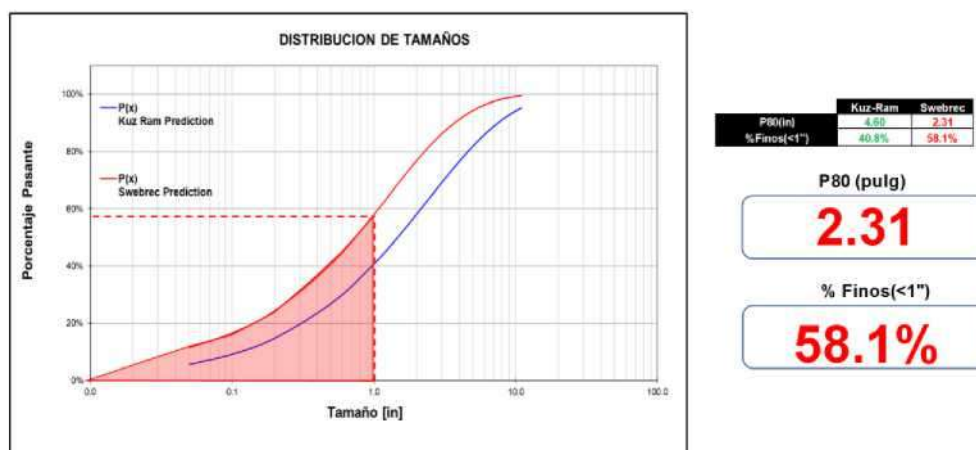
4.4. Simulación de fragmentación

Como se mencionó previamente, la estimación de la malla óptima se realizó empleando el modelo de fragmentación KCO-Swebrec, el cual se calibró utilizando resultados reales de fragmentación provenientes de sectores con condiciones geotécnicas similares y bajo el uso de la misma mezcla explosiva. Esta calibración permitió proyectar una distribución granulométrica representativa del comportamiento esperado del macizo rocoso frente al diseño de voladura propuesto.

La simulación indicó que, al aplicar una malla de $8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ con un factor de potencia (F.P.) de 0.34 kg/t , era posible alcanzar un porcentaje de finos superior al 50 % en la litología MP01, caracterizada por un SPI de 71 y una UCS de 39 MPa. Este resultado confirmó que la energía específica asignada al diseño ampliado se encontraba dentro de un rango adecuado para asegurar una fragmentación favorable, manteniendo la eficiencia del proceso de conminución posterior sin necesidad de aumentar el consumo explosivo.

Figura 11

Estimación de fragmentación en base la simulación KCO-Swebrec – Malla 8.0×8.0 - HA73-G Vertex



Nota. Carrasco, 2015

4.5. Simulación de proyección roca

La proyección de roca fue estimada mediante un modelo probabilístico desarrollado en un software especializado, el cual incorporó variables como el diseño de carga, la longitud de taco, el burden y las propiedades del explosivo utilizado. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento del material expulsado tras la detonación y determinar el nivel de riesgo asociado a la voladura.

Según los resultados obtenidos, la probabilidad de que una proyección de roca superara los 220 metros, distancia correspondiente al radio establecido para la evacuación de equipos durante la operación, fue de 1 evento por cada 520 simulaciones, lo que representó una probabilidad aproximada de 0.19 %. Este valor indicó que el diseño evaluado se mantuvo dentro de rangos de seguridad adecuados, sin evidenciar condiciones que incrementaran significativamente el riesgo de proyecciones fuera de los límites operativos establecidos.

Figura 12

Simulación de proyección de roca

Simulador de Flyrock

Configuración: Seguridad

Clearance: 500 Metres

Safety Factor: 1.5

Min. Radius: 10 Metres

Propiedades: Pozos

Diameter: 280 Milímetros

Length: 15 Metres

Spacing: 5 Metres

Air: 6.5 Metres

☒ Indicar Cámara de Aire

Propiedades de Carga

Charge Length: 0.5 Metres

Density: 1.19 g/cc

Charge Vol.: 455 Kilograms

Collar Depth: 1.104

Loaded Burden: 3.431

Predicciones de Flyrock

Algoritmo: Frost Toppled

Color Range: 322 Metres

Face Range: 61 Metres

Maximum Height: 218 Metres

Min. Safe Distance: 480 Metres

Ajuste: Diferencia en Elevación

Elevation Difference: 0 Metres

Collar Range Adj.: 0 Metres

Face Range Adj.: 0 Metres

Probabilidad: Proyección Mayor

Exposed Distance: 220 Metres

Probability From Collar: 1 in 520

En Complemento

Crear Rayos de Carga

Nota. Elaboración propia.

5. Ejecución del carguío del proyecto de voladura

El carguío correspondiente al diseño de voladura definido para la malla ampliada se ejecutó conforme a los parámetros establecidos previamente, empleando la mezcla explosiva tipo HA73-G según lo programado en el diseño de carga. Durante esta etapa, se realizaron controles sistemáticos de la densidad en terreno, así como verificaciones del cumplimiento de los parámetros operativos definidos para la perforación y el carguío.

La supervisión técnica estuvo centrada en asegurar que cada componente del diseño fuese aplicado con precisión, desde la disposición y protección del taco hasta la longitud de columna explosiva y la correcta distribución del explosivo en el taladro. Estas acciones permitieron garantizar la adecuada implementación del diseño y la consistencia necesaria para la posterior evaluación técnica.

La ejecución del carguío se desarrolló sin contratiempos y cumplió con los estándares establecidos para la operación, lo cual quedó reflejado en los registros visuales obtenidos en campo, donde se aprecia la correcta aplicación del diseño de voladura.

Figura 13

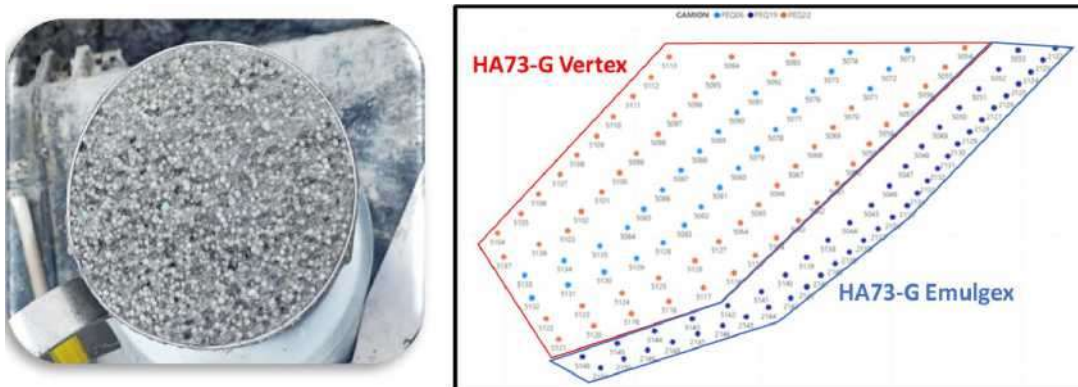
Proyecto de voladura P4095_013F5



Nota. Miranda et al, 2023

Figura 14

Mezcla explosiva HA73-G Vertex y ruta de los camiones PEQ06 y PEQ19

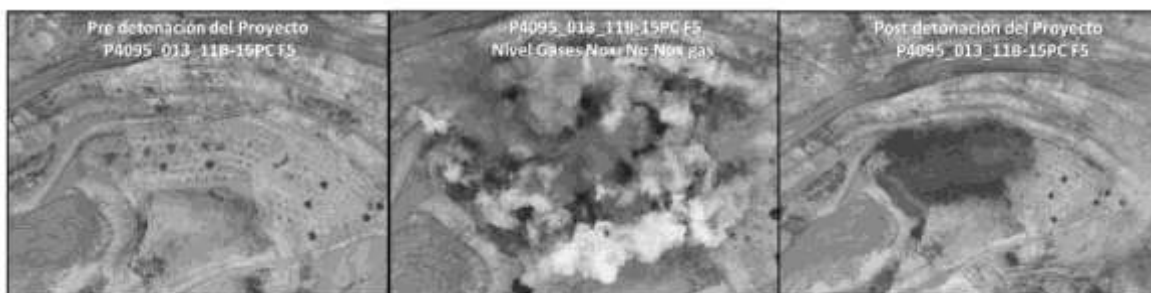


Nota. Miranda et al, 2023

En la siguiente imagen se aprecia el proceso de detonación correspondiente al diseño de malla ampliada. Durante la ejecución se observó una **proyección de roca controlada**, dentro de los límites operativos establecidos, sin evidenciar desplazamientos fuera del rango esperado para este tipo de configuración. Asimismo, la voladura se desarrolló **sin generación de gases NOx**, lo que indicó una combustión adecuada del explosivo y un comportamiento estable del diseño en términos de seguridad operacional y calidad de detonación.

Figura 15

Ejecución del proyecto P4095_013f5.



Nota. Miranda et al, 2023

6. Medición de los resultados post voladura

6.1. Medición de resultados de gases NOx

Durante la evaluación posterior a la detonación, se registró un nivel de gases NOx igual a cero, lo que indicó la ausencia de manifestaciones visibles de este tipo de emisiones. Este comportamiento evidenció una combustión adecuada de la mezcla explosiva y una detonación eficiente, sin generar residuos gaseosos que pudieran comprometer la seguridad operativa o las condiciones ambientales del entorno inmediato.

El resultado fue consistente con una reacción completa del explosivo energético y se encuentra ilustrado en la imagen inferior, donde no se aprecia presencia de penachos o tonalidades características de gases nitrosos.

Figura 16

Resultados de gases NOx – P4095_013F5.



P4095_013_118-15PC F5
Nivel Gases Nox: No Nox gas

Level	Typical Appearance
Level 0 No NOx gas	
Level 1 Light NOx gas	
1A Localized	
1B Moderate	
1C Extensive	
Level 2 Minor yellow/orange gas	
2A Localized	
2B Moderate	
2C Extensive	
Level 3 Orange gas	
3A Localized	
3B Moderate	
3C Extensive	
Level 4 Orange/red gas	
4A Localized	
4B Moderate	
4C Extensive	
Level 5 Red/purple gas	
5A Localized	
5B Moderate	
5C Extensive	

Nota. Miranda et al, 2023

6.2. Medición de resultados de vibración

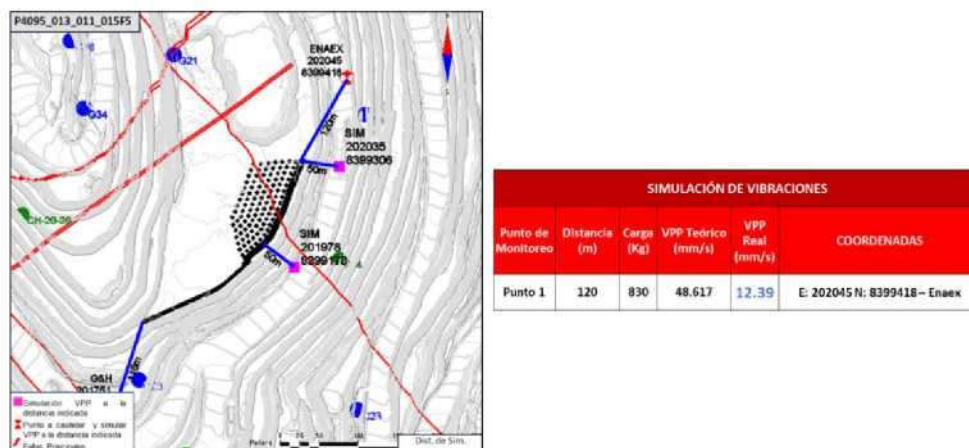
Se registró un valor de vibración de 12.39 mm/s, el cual se ubicó por debajo del valor pico de partícula (VPP) teórico establecido para el sector evaluado. La medición se realizó en

el punto previamente definido como zona a cautelar, garantizando que el control se efectuara en la ubicación más sensible desde el punto de vista geotécnico.

Para el adecuado manejo de las vibraciones, se aplicaron tiempos de retardo de 25 ms entre taladros y 187 ms entre filas, configuración que permitió distribuir la energía de la voladura de manera controlada y evitar superposiciones que pudieran generar aumentos indeseados en la amplitud vibratoria. Los resultados obtenidos confirmaron que el diseño implementado mantuvo un comportamiento seguro y dentro de los límites aceptables para la operación.

Figura 17

Resultados de vibración P4095_013F5.



Nota. Miranda et al, 2023

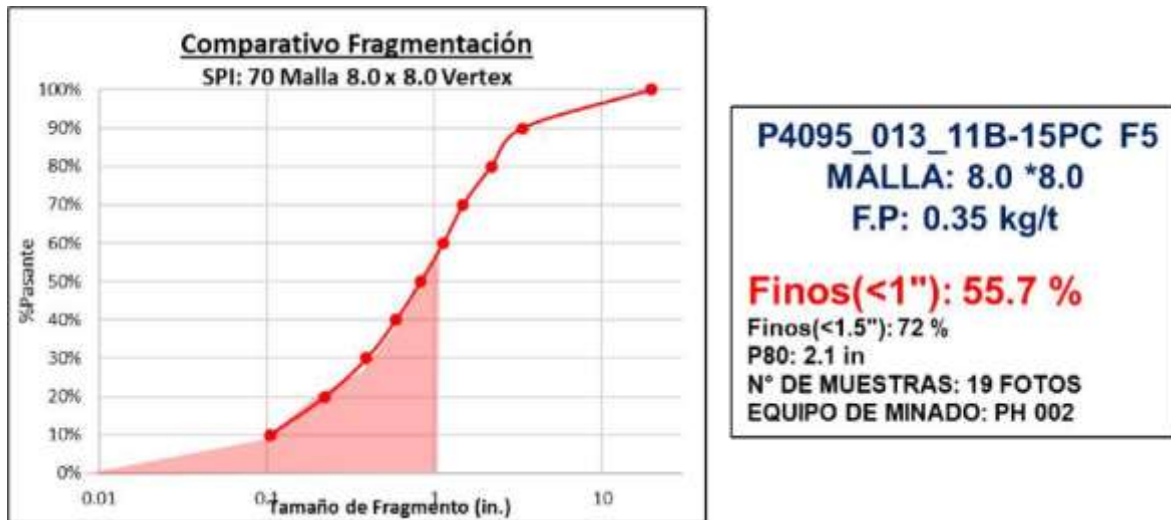
7. Resultados de fragmentación en el frente de minado

La medición de la fragmentación en el frente de minado se realizó durante los días en que se ejecutaron las operaciones de carga, específicamente el 05, 06 y 07 de abril. Los resultados obtenidos mostraron una fragmentación consistente con lo proyectado en la simulación previa, alcanzando un **porcentaje de finos (<1 pulgada) superior al 50 %** y un **P80 de 2.1 pulgadas**.

Estos valores se lograron utilizando un **factor de potencia (F.P.) de 0.34 kg/t**, lo que confirmó que el diseño de malla ampliada y la energía aplicada fueron adecuados para las condiciones geotécnicas del sector. La coherencia entre la simulación y la fragmentación real respaldó la validez del modelo de estimación empleado y su utilidad para la definición de parámetros de diseño en voladuras de características similares.

Figura 18

Resultados de fragmentación promedio obtenido en el frente de minado del P4095_013F5



Nota. Miranda et al, 2023

8. Análisis de los resultados de planta: Throughput y porcentaje de finos

8.1. Resultado de Throughput y porcentaje de finos – Minado exclusivo

El minado exclusivo se llevó a cabo el día 04 de abril, dentro del rango horario comprendido entre las 11:20 a.m. y las 03:40 p.m., destinando todo el mineral extraído durante ese periodo directamente al procesamiento en planta. Esta estrategia permitió evaluar de manera aislada el comportamiento del material proveniente de la voladura con malla ampliada, evitando interferencias ocasionadas por la mezcla con mineral procedente de otros frentes. El objetivo principal de esta operación fue analizar el desempeño del material tanto en las etapas iniciales de la planta como en procesos posteriores, particularmente en molienda, a fin de identificar la influencia del diseño de voladura en indicadores clave como el throughput y el porcentaje de finos. Esta condición de alimentación exclusiva permitió obtener resultados representativos, directamente asociados a la configuración de voladura evaluada.

Figura 19

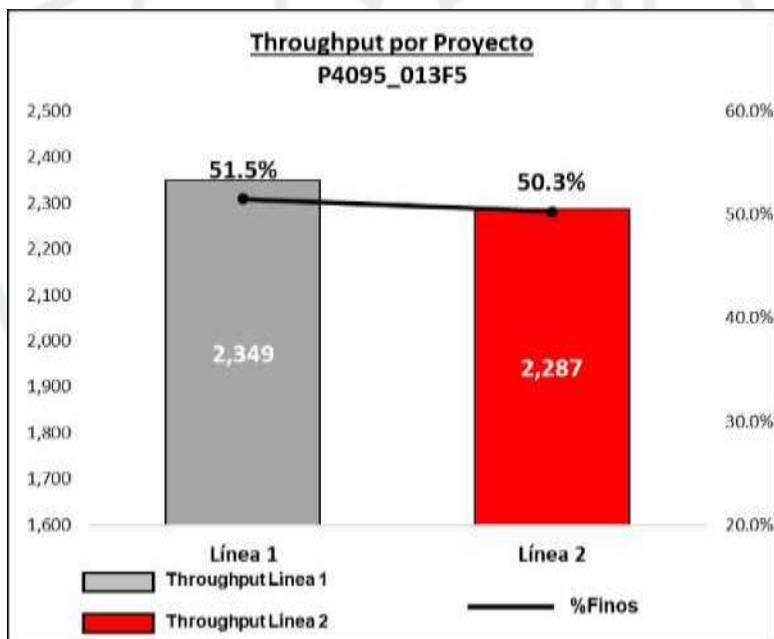
Seguimiento al Minado del Proyecto P4095_013F5



Nota. Miranda et al, 2023

Figura 20

Resultados de Throughput asociados al porcentaje de Finos obtenido en ambas líneas de Planta.



Nota. Miranda et al, 2023

La imagen siguiente muestra la relación entre el **Throughput** registrado en ambas líneas de planta y el **porcentaje de finos** obtenido a partir del material proveniente del minado exclusivo. Los valores alcanzados validaron la aplicación del diseño de malla

ampliada de **8.0 m × 8.0 m** en sectores con un **SPI de 71**, demostrando que es posible mantener un rendimiento en planta superior a **2,000 t/h** empleando una emulsión energética de tipo HA73-G. Para el cálculo del Throughput promedio se consideraron los valores representativos por hora en ambas líneas de procesamiento, asegurando que la evaluación reflejara el comportamiento real del material alimentado a planta. Los resultados evidenciaron que la fragmentación obtenida —particularmente el porcentaje de finos mayor al 50 %— favoreció la continuidad del proceso y mantuvo un flujo estable hacia las etapas de conminución.

8.2. Resultado de Throughput y porcentaje de finos – Minado total del proyecto

Se realizó también un análisis del Throughput asociado al minado total del sector intervenido, el cual fue volado utilizando la malla ampliada de 8.0 m × 8.0 m, con la mezcla explosiva HA73-G y un factor de potencia de 0.34 kg/t. Como resultado, se obtuvieron valores de 2,049 t/h en la Línea 1 y 2,057 t/h en la Línea 2.

Es importante señalar que este minado fue ejecutado en simultáneo con otros frentes operativos, por lo que los valores de Throughput registrados en esta condición deben considerarse referenciales. La mezcla de material con diferentes zonas geometalúrgicas puede influir en el rendimiento global observado.

Por esta razón, el análisis específico del impacto del diseño de malla ampliada se presentó por separado en la sección correspondiente al minado exclusivo, donde el mineral procesado fue alimentado directamente a planta sin interferencia de otros frentes. Esta diferenciación permitió evaluar de manera precisa el desempeño real del diseño aplicado y su influencia en el Throughput y en la generación de finos.

Figura 21

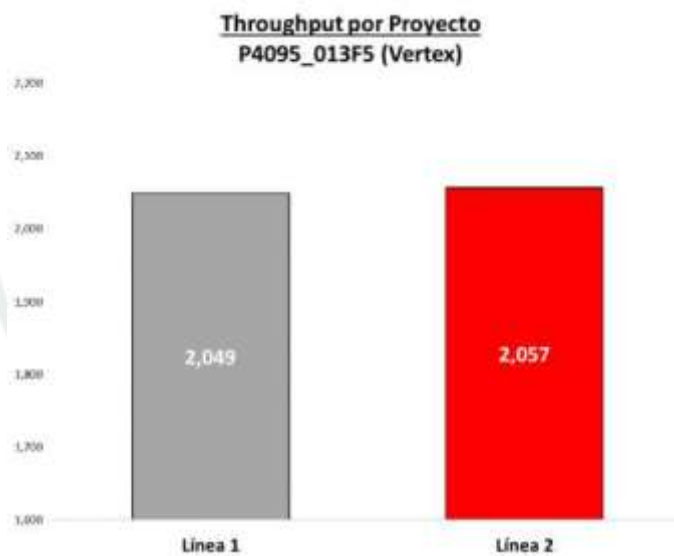
Polígono 05-27-023-ORE_H asociado al proyecto P4095_013F5



Nota. Miranda et al, 2023

Figura 22

Throughput del minado completo del Proyecto P4095_013F5 ejecutado con Vertex



Nota. Durán et al, 2018

8.3. Resultados de planta en comparación con el banco superior

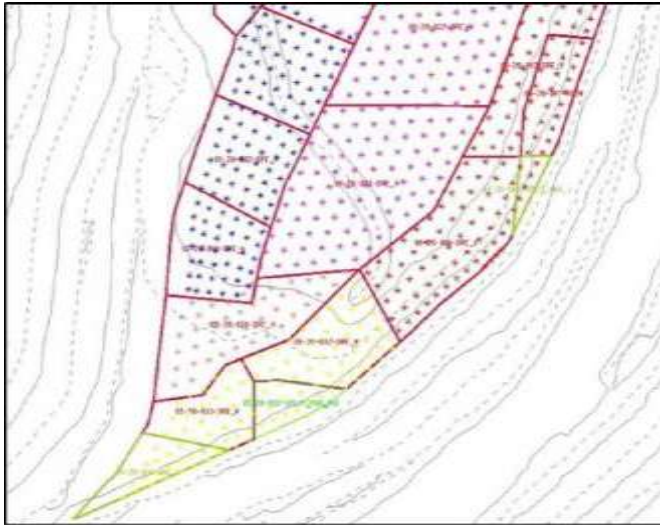
Se realizó el análisis del Throughput obtenido en el banco superior, correspondiente al sector inmediatamente ubicado por encima del área evaluada con la malla ampliada. En este banco se empleó un diseño de voladura con un factor de potencia real de 0.43 kg/t, el cual representó la configuración previa al ajuste de espaciamientos.

Los resultados obtenidos en este sector permitieron establecer una base comparativa directa frente al desempeño del diseño aplicado en el banco inferior, especialmente en términos de rendimiento en planta y generación de finos. Esta comparación resultó relevante porque ambos bancos compartían condiciones geotécnicas similares, lo que permitió identificar de manera más precisa el efecto atribuible al cambio en el patrón de perforación y al factor de potencia empleado.

El análisis del banco superior sirvió, por tanto, como referencia para evaluar la eficiencia del diseño ampliado, permitiendo contrastar los valores de Throughput y confirmar si la reducción del consumo energético por tonelada —asociada al espaciamiento de 8.0 m × 8.0 m— mantenía o mejoraba el desempeño observado en la operación previa.

Figura 23

Polígonos del Banco Superior (4110)



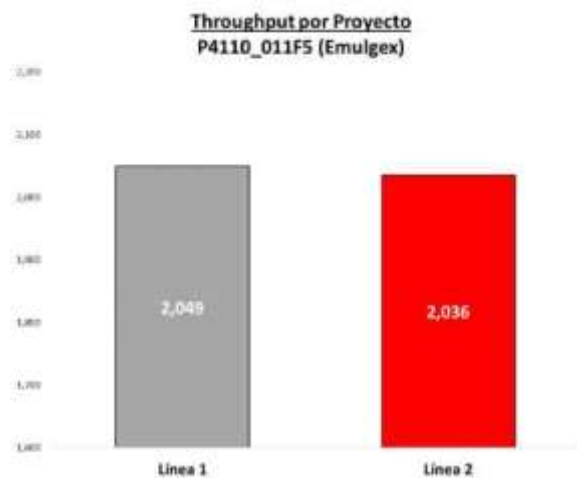
Nota. Durán et al, 2018

Como parte del minado global del sector evaluado, y de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis tipo Mine to Mill, se registró un Throughput de 2,049 t/h en la Línea 1 y 2,036 t/h en la Línea 2. Estos valores reflejaron el comportamiento promedio del material procesado en planta bajo la configuración operativa previa al diseño de malla ampliada.

Asimismo, el sector presentó un SPI conciliado de 80, parámetro que permitió contextualizar el nivel de competencia del mineral y su influencia en el rendimiento observado. Este valor constituyó un punto de referencia importante para contrastar posteriormente el desempeño del banco inferior intervenido con la malla de 8.0 m × 8.0 m y el factor de potencia reducido.

Figura 24

Resultados de Throughput del Proyecto P4110_011F5 ejecutado con Emulgex



Nota. Durán et al, 2018

En la imagen siguiente se presenta la comparación de los resultados de planta para dos configuraciones de voladura: una malla estándar de **6.5 m × 6.5 m** y una **malla ampliada de 8.0 m × 8.0 m**. Cada diseño fue ejecutado con mezclas explosivas de la misma familia, pero con formulaciones distintas según los requerimientos del sector y el factor de potencia aplicado.

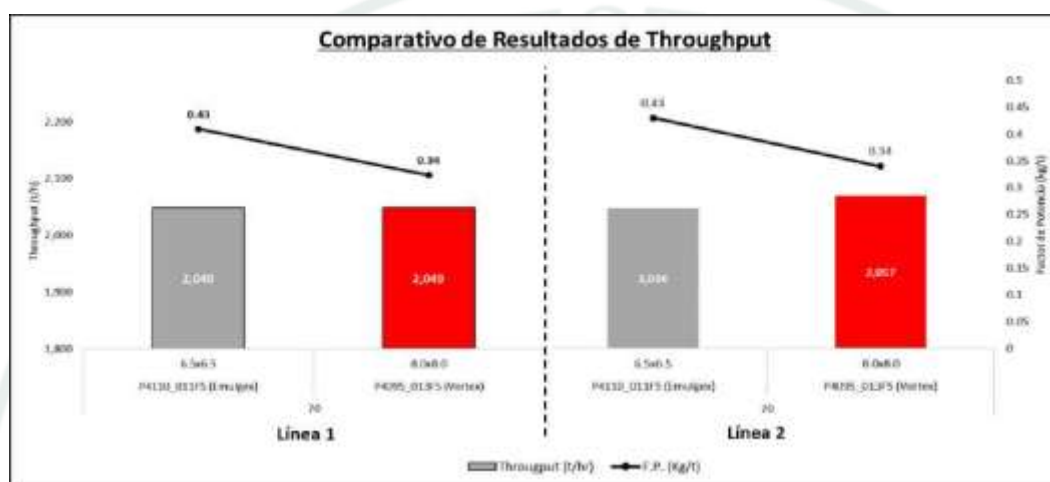
Los valores de Throughput obtenidos fueron similares en ambos casos, lo que indicó que la ampliación de malla no generó un impacto negativo en el rendimiento de la planta. Este comportamiento confirmó que el incremento en el espaciamiento —junto con la reducción del factor de potencia— mantuvo la eficiencia operativa del proceso, permitiendo procesar el mineral sin restricciones en las etapas de conminución y sin afectar el comportamiento global del circuito.

La estrategia implementada permitió conservar la continuidad y estabilidad del procesamiento, reduciendo al mismo tiempo los costos asociados a Perforación y Voladura y aumentando el volumen de material roto producto del espaciamiento mayor. Aunque los datos corresponden al periodo activo de minado de cada sector y parte del material procesado

provenía también de otros frentes, la comparación se realizó bajo condiciones equivalentes, lo que permitió evaluar de manera justa el desempeño de ambos diseños.

Figura 25

Comparativo de resultados de Throughput del Proyecto P4110_011F5 ejecutado con Emulgex (F.P. de 0.43 kg/t) y el Proyecto P4095_013F5 ejecutado con Vertex (F.P. de 0.34 kg/t)



Nota. Durán et al, 2018

9. Análisis de costos de perforación y voladura

Se realizó el cálculo del ahorro asociado a la ampliación de malla implementada en la litología evaluada, aplicando un diseño de voladura con una configuración de 8.0 m × 8.0 m, lo que representó un incremento de 1.5 m respecto al diseño estándar. Tal como se muestra en el cuadro correspondiente, esta optimización generó una serie de beneficios operativos y económicos directamente vinculados a la reducción de la cantidad de taladros y al uso más eficiente de la energía de voladura.

En cuanto a los aspectos operativos, se obtuvo una reducción del 34 % en el índice de perforación, disminuyendo los metros perforados por tonelada de material extraído. Este ajuste se tradujo, a su vez, en una disminución del 41 % en el costo de perforación, derivada principalmente del menor número de taladros necesarios para cubrir el mismo volumen de material.

Respecto al consumo de explosivo, el factor de potencia se redujo en 19 %, reflejando un uso más eficiente de la energía aplicada. Este cambio produjo además una disminución del 10 % en el costo asociado a la mezcla explosiva, contribuyendo al ahorro total del proceso.

En relación con los accesorios de voladura, se obtuvo una reducción del 34 % en su costo, coherente con la disminución del número de taladros y del material complementario requerido para su ejecución.

Como resultado global, el análisis mostró un impacto económico total equivalente a 0.061 USD/t, lo que representó una reducción del 17 % en el costo total de perforación y voladura. Este resultado evidenció una mejora significativa en la eficiencia económica del proceso, demostrando que la ampliación de malla permitió optimizar los recursos sin afectar el desempeño operacional ni el rendimiento en planta.

Tabla 6

Cálculo de ahorro por ampliación de malla en sector con SPI de 71. Ampliación de malla de 6.5 m x 6.5 m a 8.0 m x 8.0 m

Ampliación de Malla a 8.0 m x 8.0 m

PROYECTO DE VOLADURA	HA73G Emulgex 6.5 x 6.5 (Diseño Previo)	HA73G Vertex 8.0 m x 8.0 m (Ejecutado)	Unidades	Variación
Diámetro de Perforación	10 5/8	11	pulg.	
Burden	6.5	<u>8</u>	m	
Espaciamiento	6.5	<u>8</u>	m	
Altura de banco	15	15	m	
Sobre perforación	0	<u>0</u>	m	
Total Drilling Cost (TDC)	6.77	<u>6.05</u>	USD/m	
Densidad de la roca	2.5	2.5	g/cc	
Tonelaje roto por taladro	1,584.4	<u>2,400.0</u>	t/tal	51%
índice de perforación por tonelada rota	0.0095	0.0063	m/t	-34%
Costo unitario de perforación	0.064	<u>0.038</u>	USD/t	-41%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7*Costo de Mezcla Explosiva*

	Emulgex	Vertex	Unidades
Carga por taladro	690.0	850.0	Kg
Costo de Explosivo	637.6	703.0	USD/t
HA73-G			
Factor de potencia (kg/t)	0.44	<u>0.35</u>	Kg/t -19%
Costo unitario de mezcla explosiva	0.278	0.249	USD/t -10%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8*Costo de Accesorios de Voladura*

	Emulgex	Vertex	Unidades
Costo de accesorio por taladro	30.05	30.05	USD/tal
Costo unitario de accesorios	0.019	0.013	USD/t -34%
Costo total de Perforación	0.361	0.299	USD/t
Ahorro Generado		0.061	USD/t -17%

Nota. Elaboración propia.

La evaluación del proyecto de voladura demuestra un impacto económico significativo asociado a la ampliación del patrón de malla de perforación. En el diseño previo, se utilizaba una cuadrícula de 6.5 metros por 6.5 metros, mientras que en la versión ejecutada se optó por una ampliación a 8.0 metros por 8.0 metros. Esta decisión permitió un aumento sustancial en la eficiencia del proceso de fragmentación de roca. El tonelaje roto por taladro se incrementó

en un 51 %, lo que indica una mayor productividad por cada perforación realizada, permitiendo trabajar un mayor volumen de roca con menos intervenciones.

Desde el punto de vista del costo de perforación, se observa una mejora considerable. El índice de perforación por tonelada rota disminuyó en un 34 %, pasando de 0.0095 m/t a 0.0063 m/t. Esto se traduce directamente en una reducción del costo unitario de perforación, que bajó de 0.064 a 0.038 USD por tonelada, es decir, una reducción del 41 %. Este ahorro es atribuible tanto al menor número de taladros requeridos como a una mejor distribución de la energía en la malla expandida.

En cuanto a la mezcla explosiva, aunque la carga por taladro aumentó de 690 a 850 kg, el factor de potencia (kg/t) se redujo de 0.44 a 0.35. Esto refleja un uso más eficiente del explosivo, ya que se necesita menos cantidad por tonelada fragmentada. Consecuentemente, el costo unitario de la mezcla explosiva disminuyó en un 10 %, consolidando una mejora en el rendimiento energético por unidad de masa de roca.

Además, se reporta una optimización en el uso de los accesorios de voladura. El costo unitario de estos elementos por tonelada bajó un 34 %, al mantenerse constante el costo por taladro pero disminuir el número de taladros requeridos. Esta disminución es coherente con la lógica de ampliar la malla: menos puntos de perforación implican menos detonadores, conectores y demás componentes por tonelada fragmentada.

Finalmente, al integrar todos los costos involucrados, el costo total de perforación y voladura por tonelada pasó de 0.361 a 0.299 USD. Esta diferencia representa un ahorro directo de 0.061 USD/t, equivalente a una reducción del 17 % en el costo total. Este resultado valida la decisión técnica de ampliar la malla en un entorno geomecánicamente favorable (SPI de 71), confirmando que es posible lograr un equilibrio entre eficiencia operativa y control de costos sin comprometer la calidad del proceso de fragmentación.



CONCLUSIONES

PRIMERO: El análisis comparativo entre Emulgex y Vertex permitió determinar que la aplicación de un explosivo energético con malla ampliada (8.0 m × 8.0 m) es técnicamente viable. La fragmentación obtenida y el rendimiento en planta (Throughput superior a 2,000 t/h) demostraron que la sustitución del explosivo estándar no compromete el desempeño operativo, confirmando la posibilidad de optimizar la eficiencia de voladura sin afectar la producción.

SEGUNDO: El minado en el banco superior con Emulgex (malla de 6.5 m × 6.5 m y factor de potencia 0.43 kg/t) alcanzó un Throughput promedio de 2,049 t/h en la Línea 1 y 2,036 t/h en la Línea 2. Estos valores sirvieron como línea base para comparar el impacto del explosivo energético y del diseño de malla ampliada.

TERCERO: El minado exclusivo con Vertex (malla 8.0 m × 8.0 m y factor de potencia 0.34 kg/t) mostró un Throughput de 2,049 t/h en la Línea 1 y 2,057 t/h en la Línea 2. Esto confirma que, pese a la reducción del factor de potencia, el rendimiento en planta se mantiene estable o ligeramente superior al registrado con Emulgex.

CUARTO: Comparando ambos escenarios, se observa que el Throughput permanece prácticamente igual o ligeramente superior al usar Vertex, evidenciando que el cambio de explosivo y el espaciamiento mayor no afectan negativamente la eficiencia operativa.

QUINTO: El uso de Vertex permitió alcanzar un porcentaje de finos superior al 50 % (<1 pulgada), mientras que el valor de referencia con Emulgex era cercano al 47 %. Esto indica que el explosivo energético mejora la fragmentación, favoreciendo la alimentabilidad de planta y reduciendo cuellos de botella en la conminución.

SEXTO: La ampliación de malla y el uso de Vertex generaron una reducción del 34 % en el índice de perforación, disminución del 41 % en el costo de perforación, 10 % de ahorro en mezcla explosiva y 34 % en accesorios de voladura, resultando en un ahorro total de 0.061 USD/t, equivalente a un 17 % de reducción en el costo total de perforación y voladura.



RECOMENDACIONES

1. Optimización del diseño de voladura

- Mantener la malla ampliada de 8.0 m $\times$ 8.0 m para la litología MP01, ya que permite un desempeño estable en planta con throughput superior a 2,000 t/h.
- Ajustar el factor de potencia de 0.34 kg/t según las condiciones geomecánicas específicas del macizo, garantizando fragmentación adecuada sin incrementar el consumo explosivo.

2. Selección de explosivo

- Implementar el uso del explosivo energético Vertex en sectores con características geológicas similares a MP01, dado que incrementa el porcentaje de finos (>50 %) y mejora la alimentabilidad hacia planta.
- Continuar monitorizando la generación de gases NO_x y vibraciones, asegurando que permanezcan dentro de límites seguros (gases NO_x = 0, vibraciones $\leq$ 12.39 mm/s).

3. Control y seguimiento en planta

- Mantener un programa de minado exclusivo cuando se evalúen cambios en el diseño de voladura para asegurar que los datos de throughput y finos reflejen el comportamiento real del diseño.
- Registrar y analizar periódicamente la relación entre porcentaje de finos y throughput para ajustar parámetros de carga o espaciamiento según la respuesta observada.

4. Evaluación económica y operacional

- Continuar aplicando la ampliación de malla para reducir costos de perforación (41 %), accesorios (34 %) y mezcla explosiva (10 %), logrando ahorro total estimado de 0.061 USD/t.
- Incorporar análisis comparativos periódicos entre diferentes diseños y explosivos para validar mejoras de eficiencia y justificar decisiones de inversión.

5. Capacitación y seguridad

- Capacitar al personal en la correcta ejecución de la malla ampliada y manejo del explosivo energético, enfatizando control de factores de potencia y tiempos de retardo.
- Mantener protocolos de seguridad estrictos en la ejecución de voladuras, considerando la proyección de roca y la propagación de vibraciones, minimizando riesgos operativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, H., & Mishra, A. (2018). A Study on Influence of Density and Viscosity of Emulsion Explosive on Its Detonation Velocity. *Modelling Measurement and Control C*, 78(3), 316-336.
- Angulo, J. (2020). *Optimización de alimentación a planta: facilitación del incremento del Throughput en procesos planta*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Barriga, C., & Salas, J. (2021). Rendimiento en la fragmentación de roca por emulsiones encartuchadas en actividades mineras. *Revista Ciencia Nor@ndina*, 4(2), 77--84. Obtenido de <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2021v4n2p77>
- Bernaola et al. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*.
- Biessikirski et al. (2024). Impacto del aditivo nitrometano en el desempeño del ANFO. *Scientific Reports*, 14, 27882. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79524-7>
- Blessing, T. (2024). *Geometry of Benches and Blast Patterns in Mining: A Detailed Overview and guide to continuous Blast Improvement*.
- Calculos para voladura. (2022). *Propiedades de la masa que influyen en la voladura de rocas*.
- Canchanya, J., & Guillen, M. (2019). *Propuesta de implementación del cambio de explosivo Emulex (80 65 y 45) a emulsión Quantex Sub para la reducción de costos de la voladura en la rampa NV175 Nancy de la Unidad Minera Animón de Empresa Administradora Chungar S.A.C*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Carrasco, P. (2015). *Aplicación del método Holmberg para optimizar la malla de perforación y voladura en la unidad Parcoy - Cía. Consorcio Minero Horizonte S.A*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Ccatamayo et al. (2025). Optimizing Productive Time in Mining Cycles by Changing Explosives: A Value Stream Mapping Study in Horizontal Excavations. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 12(2), 589--600. Obtenido de <https://doi.org/10.18280/mmep.120222>

- Chen et al. (2022). Efecto de la presión de almacenamiento de hidrógeno en las características de detonación de explosivos emulsionados sensibilizados por microesferas de vidrio. *Defence Technology*, 18(5), 747--754. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.021>
- Díaz et al. (2012). Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada. *Boletín de Ciencias de la Tierra*.
- Dotto, M., & Pourrahimian, Y. (2025). The Effect of Initiation Time Delay and Sequencing on Rock Damage in Multi-Hole Blasting. *Mining*, 5(2), 22.
- Durán et al. (2018). *Priorización de Activos Físicos centrado en el Rendimiento Global (Throughput) en una Planta de Chancado*.
- Dyno Nobel. (2010). *Blasting and Explosives Quick Reference Guide 2010*.
- Empírica. (2020). *Tópico 2: Clasificación por tamaños*.
- Enaex. (2022). *Fichas técnicas de emulsiones y agentes de voladura*.
- Enaex. (2025). *Explosivos a Granel*. Obtenido de http://enaex.com/pe/es/emulgex-g1/?utm_source=chatgpt.com
- Gheibie et al. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967-973.
- Hernández et al. (2014). *Metodología de la Investigación*.
- Huaroc et al. (2024). *Incremento de productividad y reducción de costos en mina de tajo abierto con la aplicación de explosivos de alta energía*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. <https://doi.org/Enaex Lima>
- Jones et al. (1999). Parameters affecting the thermal behaviour of emulsion explosives. *Thermochimica Acta*, 331(1).
- Kramarczyk et al. (2022). Explosivos de emulsión: una revisión didáctica y un resumen de los avances recientes. *Materials*, 15(4). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/ma15144952>
- Kramarczyk, B., & Mertuszka, P. (2021). (2021). Estudio de la influencia del contenido de sensibilizador en la densidad de un explosivo de emulsión a granel utilizado en

- operaciones subterráneas. *Central European Journal of Energetic Materials*, 18(4), 429--447.
- López et al. (2023). Análisis de imagen y modelaje matemático para la determinación de distribuciones de partículas. *Epistemos (Sonora)*, 7(35), 26-33.
- Mertuszka et al. (2022). Implementación y verificación de la eficacia de un explosivo de emulsión a granel con parámetros energéticos mejorados en un entorno subterráneo. *Energies*, 15(17), 6424.
- Miranda et al. (2023). *Blast Pattern Expansion*.
- Mutinda et al. (2021). Predicción de la fragmentación de roca usando el modelo Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(3), 107--112.
- Paredes, C., & Calderón, E. (2024). Relación consumo específico/avance en operaciones de minería subterránea MAPE caso de estudio Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 17(1), 43--58.
- Quaresma et al. (2016). Hot spots sensitization and optical detonation measurements of emulsion explosives. *En Proceedings of the 47th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT*.
- Silva et al. (2017). Development of a predictive model of fragmentation using drilling and blasting data in open pit mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(11), 1089-1094.
- Škrlec et al. (2024). Efecto de la voladura utilizando explosivos emulsionados de baja densidad. *Journal of Sustainable Mining*, 23(1). Obtenido de <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1401>
- Toapanta et al. (2025). Fragmentación de Roca por Voladura en Minería a Cielo Abierto: Predicción con IA. *Revista Tecnológica*, 37(E1), 38-54.
- Torres, M. (2025). *Evaluación técnica del explosivo Emulgex y San-G Apu para optimizar la fragmentación de la roca en Minera La Zanja Cajamarca*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Townley, B. (2020). *Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos*.

Vasquez, R. (2025). *Optimización del factor de carga para mejorar el rendimiento de la voladura en la Cr San Lorenzo, Nv 3240 de La U.M. San Julián*". [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].

Zhang et al. (2022). Reducción del tamaño de fragmentos desde la minería hasta el procesamiento mineral. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(1), 747--778.

Zhang, L. (2016). Determination and applications of rock quality designation (RQD). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3).





Anexos

Anexo 1

Análisis estadístico de la comparación de explosivos

Datos empleados para el análisis de throughput

El siguiente cuadro organiza las observaciones de throughput consideradas para comparar el desempeño de los explosivos Emulgex y Vertex. Los tres primeros registros corresponden a la Línea 1 de planta, mientras que los tres últimos corresponden a la Línea 2.

Tabla 9

Datos empleados para el análisis de throughput

Disparo	Línea asociada	Emulgex (t/h)	Vertex (t/h)
1	Línea 1	2,048	2,048
2	Línea 1	2,049	2,049
3	Línea 1	2,050	2,050
4	Línea 2	2,035	2,056
5	Línea 2	2,036	2,057
6	Línea 2	2,037	2,058

Se muestra los registros de throughput por cada tratamiento. En la Línea 1, ambos explosivos presentan valores equivalentes alrededor de 2,049 t/h. En la Línea 2, Vertex registra valores superiores a Emulgex, lo que anticipa una diferencia favorable en el promedio general del tratamiento energético.

Tabla 10

Cálculo de promedios

Línea de planta	Emulgex	Cálculo	Vertex	Cálculo
Línea 1	2,049 t/h	$(2,048 + 2,049 + 2,050) / 3$	2,049 t/h	$(2,048 + 2,049 + 2,050) / 3$
Línea 2	2,036 t/h	$(2,035 + 2,036 + 2,037) / 3$	2,057 t/h	$(2,056 + 2,057 + 2,058) / 3$

Estadísticos descriptivos

El cuadro siguiente resume los estadísticos descriptivos empleados para comparar ambos tratamientos. Se presenta el número de observaciones, la media del throughput y la

desviación estándar, que permite apreciar la dispersión de los valores respecto de su promedio.

Tabla 11

Cálculo de promedios generales

Tratamiento	n	Media	Desviación estándar
Emulgex	6	2,042.50 t/h	7.18
Vertex	6	2,053.00 t/h	4.47

Emulgex presenta una media de 2,042.50 t/h, mientras que Vertex alcanza 2,053.00 t/h. La diferencia descriptiva es de 10.50 t/h a favor de Vertex. Asimismo, la desviación estándar de Vertex es menor, lo que indica una dispersión más reducida de los valores dentro del conjunto considerado.

Prueba t de Student

Se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes, considerando seis observaciones por tratamiento y asumiendo igualdad de varianzas.

Tabla 12

Prueba t de Student

Comparación	Media Emulgex	Media Vertex	Diferencia de medias	t	gl	p
Emulgex vs. Vertex	2,042.50	2,053.00	10.50	-3.042	10	0.012

Dado que el valor de significancia bilateral fue $p = 0.012$, inferior al nivel de referencia de 0.05, se identifica una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de throughput comparados. La media correspondiente a Vertex fue superior a la de Emulgex, con una diferencia de 10.50 t/h.