



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Evaluación comparativa del desempeño de las emulsiones gasificables
Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca en minería de cobre a cielo
abierto**

Tesis presentada por:

Aquino Leon, Piero Martin

ORCID: 0009-0009-2794-5286

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor (a):

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 09 de Abril del 2026

Dictamen: 015785-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015785, presentado por:

2018200401 - AQUINO LEON PIERO MARTIN

Titulado:

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE LAS EMULSIONES GASIFICABLES VERTEX Y
EMULGEX EN LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN MINERÍA DE COBRE A CIELO ABIERTO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



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



**40656104 - LOPEZ CASAPERALTA DE DIAZ PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE LAS EMULSIONES GASIFICABLES VERTEX Y EMULGEX EN LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN MINERÍA DE COBRE A CIELO ABIERTO

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	4%
	Trabajo del estudiante	
2	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	<1%
	Trabajo del estudiante	
4	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.untumbes.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	tesis.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to Universidad Continental	<1%
	Trabajo del estudiante	
8	www.researchgate.net	<1%
	Fuente de Internet	
9	Submitted to Universidad Católica San Pablo	<1%
	Trabajo del estudiante	
10	docplayer.es	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, cuya fortaleza, apoyo incondicional y confianza en mis capacidades han sido fundamentales en cada etapa de mi formación profesional. A mis padres, por inculcarme la disciplina, el compromiso y el valor del esfuerzo constante. A quienes, con su ejemplo y presencia, me motivaron a perseverar frente a las dificultades y a mantener la convicción de alcanzar cada objetivo planteado. A mi madre Mónica que siempre estuvo apoyándome para lograr todos mis objetivos.

A mi padre Willian que siempre me aconsejó y ayudó mucho en mi formación; agradecerles que siempre estuvieron para mí, dándome siempre lo mejor de ellos.

A mi querida Priscila, mi compañera e inspiración. Tu amor, paciencia y comprensión han sido mi apoyo en los momentos con mayor dificultad. Gracias por motivarme a seguir siempre adelante.

Esta tesis es el reflejo del camino recorrido junto a ellos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a la universidad que me brindó la oportunidad de formarme profesionalmente y que proporcionó el entorno adecuado para el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor de tesis, por su orientación técnica, observaciones rigurosas y disposición constante para guiar el proceso investigativo con claridad y criterio profesional. Su acompañamiento fue determinante para la solidez metodológica y el enfoque técnico alcanzado en este estudio.

Agradezco también a la empresa que facilitó el acceso a información, datos y experiencias prácticas que enriquecieron significativamente la investigación.

De igual manera, reconozco a mis docentes por las enseñanzas impartidas a lo largo de la carrera, las cuales constituyen la base conceptual que sustenta este trabajo. Su compromiso académico contribuyó a formar en mí un pensamiento crítico y un enfoque responsable hacia la ingeniería.

Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, de manera directa o indirecta, apoyaron con palabras de aliento, aportes técnicos o acompañamiento durante este proceso. Cada contribución ha sido valiosa para culminar con éxito esta etapa.

RESUMEN

La fragmentación de roca en operaciones a cielo abierto es un factor decisivo en la eficiencia del ciclo minero, ya que condiciona la continuidad del carguío, transporte y chancado. Una voladura ineficiente genera roca con sobre tamaños (boulders), incrementa los tiempos de carguío, incrementa los costos de conminución y afecta negativamente la productividad global. En este contexto, la investigación tuvo como objetivo evaluar comparativamente el desempeño de las emulsiones gasificables Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca.

El estudio se desarrolló como investigación aplicada, de nivel descriptivo-comparativo y diseño cuasiexperimental. Se ejecutaron voladuras controladas en bancos seleccionados, manteniendo constantes los parámetros de diseño, variando únicamente el tipo de emulsión. La caracterización granulométrica se realizó mediante análisis digital de imágenes con Metrics Manager Pro, complementado con validación de campo, evaluando indicadores como P80, curva granulométrica acumulada, porcentaje de finos y porcentaje de boulders. Asimismo, se efectuó un análisis comparativo del impacto operativo en el chancado y una estimación de los costos asociados.

Los resultados demostraron que el explosivo Vertex presenta un P80 menor y una curva granulométrica más uniforme que Emulgex, con reducción significativa en la generación de boulders, lo cual mejora la eficiencia de carguío y conminución. Desde el punto de vista económico, aunque el Vertex posee un costo superior, la eficiencia obtenida con Vertex se traduce en ahorros indirectos relevantes en la operación.

En conclusión, el empleo de emulsión gasificable Vertex constituye una alternativa técnica más favorable para optimizar la fragmentación en la mina, generando beneficios tanto operativos como económicos.

Palabras clave: Fragmentación de roca, Vertex, Emulgex.

ABSTRACT

Rock fragmentation in open-pit operations is a decisive factor in the efficiency of the mining cycle, as it conditions the continuity of loading, hauling, and crushing. Inefficient blasting generates oversized rock (boulders), increases loading times, raises comminution costs, and negatively impacts overall productivity. In this context, the research aimed to comparatively evaluate the performance of Vertex and Emulgex gasifiable emulsions in rock fragmentation.

The study was conducted as applied research, with a descriptive-comparative level and a quasi-experimental design. Controlled blasts were executed in selected benches, keeping design parameters constant while varying only the type of emulsion. Granulometric characterization was performed via digital image analysis using Metrics Manager Pro, supplemented by field validation, evaluating indicators such as P80, cumulative particle size curve, percentage of fines, and percentage of boulders. Likewise, a comparative analysis of the operational impact on crushing and an estimation of associated costs were carried out.

The results demonstrated that the Vertex explosive presents a lower P80 and a more uniform particle size curve than Emulgex, with a significant reduction in the generation of boulders, which improves loading and comminution efficiency. From an economic perspective, although Vertex has a higher cost, the efficiency obtained with Vertex translates into relevant indirect savings in the operation.

In conclusion, the use of Vertex gasifiable emulsion constitutes a more favorable technical alternative for optimizing fragmentation in the mine, generating both operational and economic benefits.

Keywords: Rock fragmentation, Vertex, Emulgex.

Índice

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 3

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos..... 4

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN 5

1.3.1 Pregunta general 5

1.3.2 Preguntas específicas..... 6

1.4 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 6

1.5 PALABRAS CLAVE..... 6

1.6 APOORTE DEL DESARROLLO DE LA TESIS 6

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 9

2.1 ESTADO DEL ARTE..... 9

2.1.1 Evolución del conocimiento en fragmentación por voladura..... 9

2.1.2 Propiedades fisicoquímicas de los explosivos..... 10

2.1.3 Modelos de predicción de fragmentación 11

2.1.4 Métodos de medición y caracterización de fragmentación 13

2.1.5 Innovaciones tecnológicas..... 15

2.1.6 Aspectos ambientales y de seguridad 16

2.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 16

2.2.1 Antecedentes internacionales 16

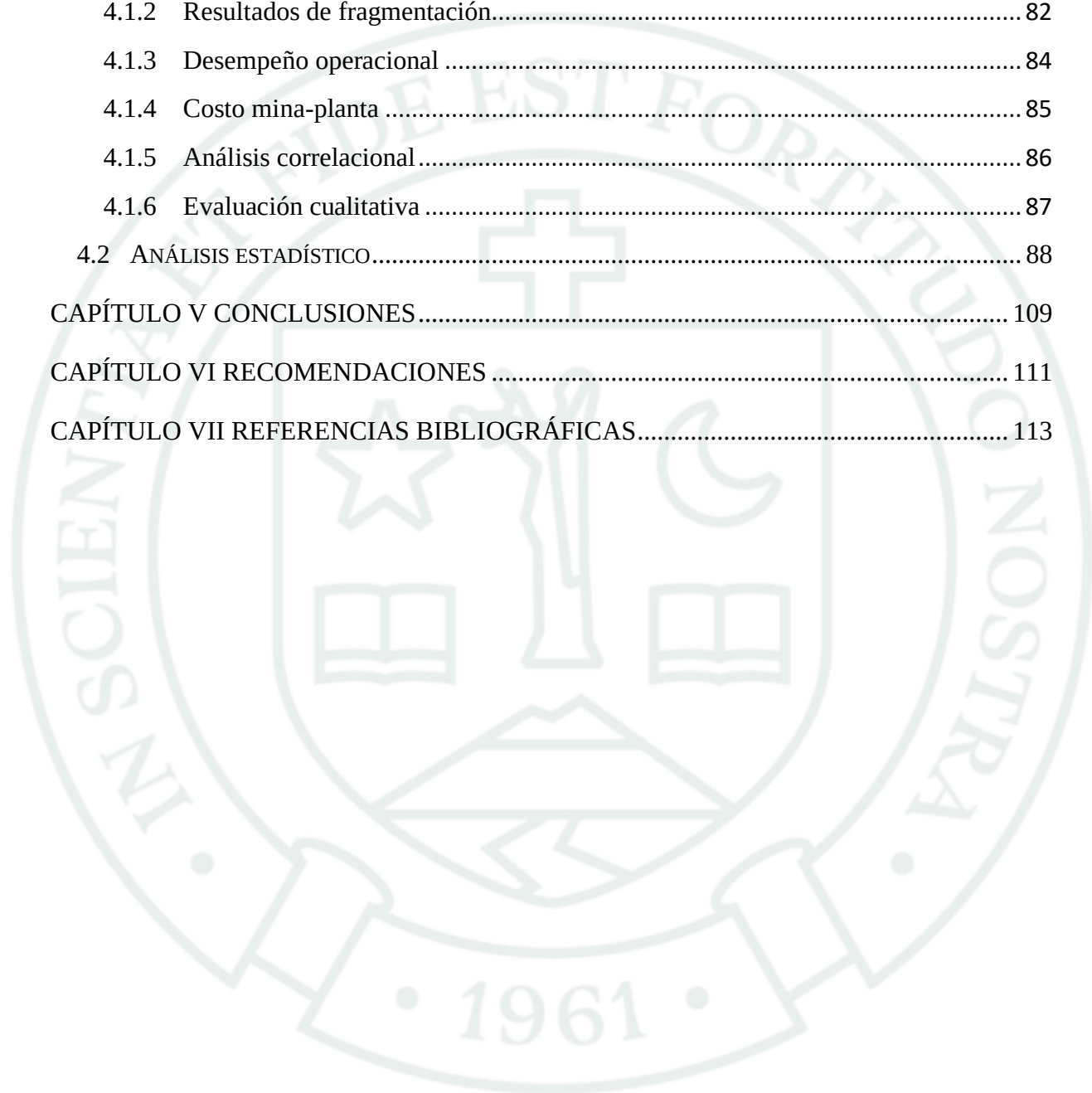
2.2.2 Antecedentes nacionales..... 18

2.2.3 Análisis crítico..... 20

2.3 BASES TEÓRICAS 21

2.3.1	Fundamentos de la voladura en minería a cielo abierto	21
2.3.2	Mecánica de la fragmentación de rocas por explosivos	22
2.3.3	Tipos de explosivos empleados en minería	23
2.3.4	Propiedades fisicoquímicas de los explosivos que condicionan la fragmentación	24
2.3.5	Diseño de malla de perforación y parámetros geométricos relevantes	25
2.3.6	Modelos de predicción de fragmentación	26
2.3.7	Medición y caracterización de la fragmentación: métodos y herramientas	26
2.3.8	Efectos de la fragmentación sobre la eficiencia mina-planta	27
2.3.9	Propiedades y diferenciación técnica entre Vertex y Emulgex	27
2.3.10	Innovaciones en control de iniciación, instrumentación y seguridad	28
2.3.11	Aspectos económicos y ambientales asociados a la voladura	29
2.4	HIPÓTESIS	30
2.5	VARIABLES	32
2.5.1	Variable independiente	32
2.5.2	Variable dependiente	32
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		34
3.1	ALCANCES Y LIMITACIONES	34
3.2	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	38
3.2.1	Tipo de investigación	38
3.2.2	Diseño de la investigación	39
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA	40
3.4	MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	43
3.4.1	Fundamentación metodológica	43
3.4.2	Métodos de recolección de datos	44
3.4.3	Seguridad y cumplimiento normativo	47
3.5	PLAN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	48
3.5.1	Validación inicial de consistencia	48
3.5.2	Preparación y depuración de datos	49
3.5.3	Análisis estadístico descriptivo	49
3.5.4	Análisis correlacional	50
3.5.5	Análisis comparativo gráfico	51

3.5.6 Herramientas estadísticas y software	52
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
4.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	53
4.1.1 Voladuras	53
4.1.2 Resultados de fragmentación.....	82
4.1.3 Desempeño operacional	84
4.1.4 Costo mina-planta	85
4.1.5 Análisis correlacional	86
4.1.6 Evaluación cualitativa	87
4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	88
CAPÍTULO V CONCLUSIONES.....	109
CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES	111
CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113



Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de propiedades de ANFO, Heavy ANFO y emulsiones gasificadas	10
Tabla 2 Comparación de modelos predictivos de fragmentación	12
Tabla 3 Métodos de medición de fragmentación	14
Tabla 4 Variable dependiente	32
Tabla 5 Variables independientes.....	32
Tabla 6 Diferencias en resultado	83
Tabla 7 Indicadores de desempeño operacional.....	84
Tabla 8 Comparación del costo mina-planta	85
Tabla 9 Estadísticos descriptivos del P80, porcentaje de finos y porcentaje de boulders según tipo de emulsión (Vertex vs Emulgex).....	88
Tabla 10 Prueba de normalidad.....	89
Tabla 11 Correlación del factor de potencia y los resultados de fragmentación.....	90
Tabla 12 Correlación entre P80 y el costo explosivo	91
Tabla 13 Correlación entre P80 y Productividad de carguío.....	92
Tabla 14 Correlación entre porcentaje de Boulders y Productividad de carguío	93
Tabla 15 Estadístico de P80 de Vertex y Emulgex	94
Tabla 16 Prueba de muestras independientes de P80 de Vertex y Emulgex.....	95
Tabla 17 Estadístico de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex.....	97
Tabla 18 Prueba de muestras independientes de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex.....	98
Tabla 19 Estadístico de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex	99
Tabla 20 Prueba de muestras independientes de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex	100
Tabla 21 Estadístico de costo explosivo de Vertex y Emulgex.....	102
Tabla 22 Estadístico de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex	103
Tabla 23 Prueba de muestras independientes de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex	104
Tabla 24 Valores obtenidos con Vertex	106
Tabla 25 Valores obtenidos con Emulgex.....	107

Índice de figuras

Figura 1 Ejemplo de reporte de fragmentación.....	46
Figura 2 Diseño con Emulgex.....	53
Figura 3 Diseño con Vertex	53
Figura 4 Diseño de malla de voladura.....	54
Figura 5 Diseño con Emulgex.....	55
Figura 6 Diseño con Vertex	55
Figura 7 Diseño de malla de voladura.....	56
Figura 8 Diseño con Emulgex.....	57
Figura 9 Diseño con Vertex	57
Figura 10 Diseño de malla de voladura.....	58
Figura 11 Diseño con Emulgex.....	59
Figura 12 Diseño con Vertex	59
Figura 13 Diseño de malla de voladura.....	60
Figura 14 Diseño con Emulgex.....	61
Figura 15 Diseño con Vertex	61
Figura 16 Diseño de malla de voladura.....	62
Figura 17 Diseño con Emulgex.....	63
Figura 18 Diseño con Vertex	63
Figura 19 Diseño de malla de voladura.....	64
Figura 20 Diseño con Emulgex.....	65
Figura 21 Diseño con Vertex	65
Figura 22 Diseño de malla de voladura.....	66
Figura 23 Diseño con Emulgex.....	67
Figura 24 Diseño con Vertex	67
Figura 25 Diseño de malla de voladura.....	68
Figura 26 Diseño con Emulgex.....	69
Figura 27 Diseño con Vertex	69
Figura 28 Diseño de malla de voladura.....	70
Figura 29 Diseño con Emulgex.....	71
Figura 30 Diseño con Vertex	71
Figura 31 Diseño de malla de voladura.....	72
Figura 32 Diseño con Emulgex.....	73

Figura 33 Diseño con Vertex	73
Figura 34 Diseño de malla de voladura.....	74
Figura 35 Diseño con Emulgex.....	75
Figura 36 Diseño con Vertex	75
Figura 37 Diseño de malla de voladura.....	76
Figura 38 Diseño con Emulgex.....	77
Figura 39 Diseño con Vertex	77
Figura 40 Diseño de malla de voladura.....	78
Figura 41 Diseño con Emulgex.....	79
Figura 42 Diseño con Vertex	79
Figura 43 Diseño de malla de voladura.....	80
Figura 44 Diseño con Emulgex.....	81
Figura 45 Diseño con Vertex	81
Figura 46 Diseño de malla de voladura.....	82
Figura 47 Estadístico de P80 de Vertex y Emulgex.....	96
Figura 48 Estadístico de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex	98
Figura 49 Estadístico de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex.....	101
Figura 50 Estadístico de costo explosivo de Vertex y Emulgex	102
Figura 51 Estadístico de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex.....	105

INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es una actividad económica estratégica en el Perú, donde la extracción de cobre tiene un rol preponderante en las exportaciones y en la generación de divisas nacionales (MINEM, 2023).

En operaciones de gran y mediana escala, la eficiencia operativa se define desde los primeros eslabones del proceso: la fragmentación de la roca condiciona la productividad del carguío, la estabilidad del suministro al chancado primario y el consumo energético en molienda (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

En consecuencia, mejoras en la fragmentación se traducen en menores tiempos de ciclo, menos retrabajos por boulders y reducción de costos en las etapas de conminución y transporte (Sanchidrián, 2009).

La voladura es un proceso crítico que combina diseño de malla, selección de explosivo y ejecución operativa; entre los factores determinantes figuran la velocidad de detonación, la densidad y la homogeneidad de la carga, la geometría de la malla (burden y espaciamiento) y las condiciones geomecánicas del macizo (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

En los últimos años las emulsiones gasificables han ganado preferencia operacional por su estabilidad frente a la humedad, su versatilidad para el bombeo y su posibilidad de ajuste energético, características que influyen directamente en la distribución de energía y en la calidad de la fragmentación (Rahimi et al., 2022; Zhang et al., 2021).

No obstante, la variabilidad en formulaciones comerciales exige evaluaciones comparativas controladas para determinar su comportamiento real en un contexto específico de banco y macizo rocoso (Chiappetta, 2020).

En el mercado existen emulsiones comerciales empleadas masivamente en la práctica operativa; entre ellas, las presentadas por fabricantes bajo denominaciones comerciales como Vertex y Emulgex. La literatura y fichas técnicas indican diferencias en parámetros como densidad, velocidad de detonación y sensibilidad que podrían condicionar la fragmentación resultante, pero la evidencia empírica comparativa en condiciones de campo controladas sigue siendo escasa o dispersa (Enaex, n.d.; Beraun Anco, 2019).

Por ello, es imperativo contrastar el desempeño efectivo de estas emulsiones mediante pruebas de voladura donde se mantengan constantes los parámetros de diseño y se varíe únicamente la carga (tipo de emulsión), evaluando indicadores granulométricos y operativos.

La presente investigación tiene como objetivo general evaluar comparativamente el desempeño de las emulsiones gasificables Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca en una mina de cobre a cielo abierto ubicada en el sur del Perú, determinando cuál de ellas produce una granulometría más adecuada para la continuidad operacional y mayor eficiencia económico-operativa. Para ello se implementó un diseño cuasiexperimental: se ejecutaron voladuras controladas en bancos seleccionados manteniendo constantes burden, espaciamiento, longitud de taco, carga de columna y factor de carga, variando únicamente el tipo de emulsión. La caracterización de la fragmentación se realizó mediante análisis digital de imágenes (software especializado) y validación de campo, obteniendo indicadores tales como P80, porcentaje de finos y frecuencia de boulders, y comparando además los resultados con estimaciones de modelos predictivos (p. ej., Kuz–Ram, Rosin–Rammler) para verificar coherencia entre predicción y observación (Cunningham, 1983; Sanchidrián, 2009).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La minería constituye uno de los pilares de la economía peruana, representando en la última década alrededor del 10 % del PBI nacional y más del 60 % del valor de las exportaciones totales, siendo el cobre el principal producto minero comercializado a nivel internacional (MINEM, 2023).

En este contexto, la minería a cielo abierto ha experimentado una expansión significativa debido a la viabilidad técnica y económica de explotar yacimientos de gran tonelaje y baja ley mediante este método (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

Dentro del ciclo de explotación, la voladura se configura como un proceso esencial que condiciona la eficiencia de las operaciones posteriores: carguío, acarreo, chancado y molienda (Konya & Walter, 2019).

Una voladura deficiente produce fragmentación inadecuada, presencia de boulders y un incremento del consumo energético en las etapas de conminución, además de mayores costos asociados al mantenimiento de equipos y a los tiempos improductivos (Sanchidrián, 2009). Por el contrario, una fragmentación óptima permite mejorar la continuidad operacional, reducir la variabilidad granulométrica y optimizar los costos unitarios de producción (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

En los últimos años, las emulsiones gasificables han desplazado progresivamente al ANFO en operaciones a cielo abierto por sus ventajas operativas, entre las que destacan: mayor densidad energética, mejor resistencia al agua y mayor seguridad de manipulación (Rahimi et al., 2022; Zhang et al., 2021).

En el Perú, el uso de emulsiones se ha masificado en operaciones de mediana y gran escala, aunque persisten brechas en la evaluación comparativa entre distintos productos comerciales, como Vertex y Emulgex, cuya selección suele basarse en criterios de disponibilidad y costo unitario inmediato más que en evidencias técnicas de desempeño (Chiappetta, 2020).

Esta situación genera un vacío de conocimiento técnico, ya que la elección del explosivo puede condicionar directamente el P80, la generación de bloques sobredimensionados y la distribución granulométrica del material. Así que no contar con evaluaciones comparativas sistemáticas limita la posibilidad de optimizar la voladura en función de criterios técnico-económicos.

Por ello, surge la necesidad de desarrollar un estudio que permita comparar de manera objetiva y controlada el desempeño de Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca en una mina de cobre a cielo abierto en el sur del Perú, contribuyendo a la mejora de la eficiencia mina-planta.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente el desempeño de las emulsiones gasificables Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca en minería a cielo abierto, sustentado en los principios de la mecánica de fragmentación y modelos predictivos como Kuz-Ram, con la finalidad de determinar su influencia en la eficiencia del proceso mina-planta.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la fragmentación de roca generada por los explosivos Vertex y Emulgex mediante la caracterización granulométrica (P80, distribución de

tamaños y porcentaje de sobredimensionados), con el propósito de evaluar la calidad de fragmentación obtenida en cada caso.

- Evaluar la eficiencia energética de la voladura, considerando el factor de carga y la energía específica de los explosivos empleados, a fin de determinar el nivel de aprovechamiento de la energía de detonación en la fragmentación del macizo rocoso.
- Determinar el impacto técnico-operativo de la fragmentación obtenida en los procesos de carguío, transporte y chancado, analizando variables como productividad, tiempos de ciclo y continuidad operativa, con el fin de establecer la relación entre la calidad de fragmentación y la eficiencia del sistema mina-planta.
- Comparar el desempeño técnico de las emulsiones gasificables Vertex y Emulgex en términos de fragmentación, eficiencia energética y comportamiento operacional, a fin de identificar la alternativa más eficiente bajo condiciones controladas de voladura.
- Evaluar el impacto económico asociado al uso de cada tipo de emulsión, considerando costos de voladura, carguío, transporte y conminución, con el propósito de determinar la eficiencia económico-operativa de cada alternativa.

1.3 Preguntas de Investigación

1.3.1 *Pregunta general*

¿Cuál es el desempeño comparativo de las emulsiones gasificables Vertex y Emulgex en la fragmentación de roca en una mina de cobre a cielo abierto del sur del

Perú, considerando tanto los parámetros granulométricos como los efectos técnico–económicos en el ciclo mina–planta?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Qué diferencias se presentan en los indicadores granulométricos (P80, porcentaje de finos y *porcentaje* de boulders) al emplear Vertex en comparación con Emulgex en voladuras controladas?
- ¿Cómo varía la energía específica de voladura y el factor de carga requerido con cada tipo de emulsión, manteniendo constantes los parámetros de malla?
- ¿Qué impacto técnico–económico genera la elección de cada emulsión en la eficiencia global del proceso mina–planta, considerando los costos de voladura, carguío, transporte y chancado primario?

1.4 Línea de investigación

La investigación está alineada a “Optimización de procesos mineros”, ya que se orienta al estudio de métodos y técnicas de voladura aplicadas a cielo abierto, con énfasis en la evaluación comparativa de emulsiones gasificables para optimizar la fragmentación de la roca.

1.5 Palabras clave

Fragmentación de roca; Vertex; Emulgex.

1.6 Aporte del desarrollo de la tesis

La presente investigación se justifica por la necesidad de contar con información técnica objetiva que permita optimizar el proceso de voladura en minería a cielo abierto, el cual constituye una de las etapas más relevantes dentro del ciclo. La calidad de la fragmentación resultante no solo condiciona la productividad del carguío y transporte,

sino también el rendimiento del chancado primario y el consumo energético en la planta de conminución (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995; Sanchidrián, 2009).

En la práctica operativa, la selección de explosivos suele realizarse en función de la disponibilidad logística o del costo unitario inmediato, sin una evaluación comparativa del desempeño real en campo. Esta situación genera un vacío de conocimiento que puede derivar en sobrecostos asociados a la manipulación de boulders, interrupciones del ciclo productivo y mayor consumo energético en chancado y molienda (Konya & Walter, 2019).

El estudio de emulsiones gasificables como Vertex y Emulgex resulta pertinente porque ambos productos han sido diseñados para optimizar la distribución de energía en la roca, pero sus diferencias en densidad, sensibilidad y velocidad de detonación pueden influir significativamente en la granulometría obtenida (Rahimi et al., 2022; Chiappetta, 2020). La comparación sistemática de su desempeño en condiciones controladas constituye un aporte científico y técnico que permitirá fundamentar decisiones operativas en la minería peruana.

Desde el punto de vista económico, incluso pequeñas mejoras en la fragmentación pueden generar ahorros sustanciales al reducir el consumo energético y los tiempos de ciclo, lo que repercute directamente en la competitividad de la operación minera. Asimismo, desde la perspectiva social y ambiental, una fragmentación más uniforme contribuye a disminuir la exposición de trabajadores a riesgos asociados a la manipulación de boulders y favorece el uso más eficiente de energía, con lo cual se reducen los impactos ambientales de la operación (Zhang et al., 2021).

En síntesis, la importancia de la investigación radica en que aporta criterios técnicos y económicos para la optimización de procesos de voladura en minería a cielo

abierto, fortaleciendo la toma de decisiones basadas en evidencia y contribuyendo a una explotación más eficiente y sostenible de los recursos minerales.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 Evolución del conocimiento en fragmentación por voladura

El estudio de la fragmentación de roca mediante explosivos ha sido objeto de investigación continua durante más de cinco décadas. Inicialmente, el diseño de mallas de perforación y voladura se realizaba con base en la experiencia del operador y mediante procedimientos de ensayo y error. Sin embargo, la necesidad de mejorar la eficiencia global del ciclo mina-planta llevó a la generación de modelos matemáticos que permitieran predecir y optimizar el resultado de la voladura.

El primer gran avance se produjo con la ecuación de Kuznetsov (1973), quien propuso una expresión empírica para estimar el tamaño medio de fragmento x_{50} en función de la energía de voladura por volumen de roca. Posteriormente, Cunningham (1983) refinó este modelo y lo combinó con la función estadística de Rosin-Rammler, dando lugar al conocido modelo Kuz-Ram, cuya ecuación básica es:

$$x_{50} = A \cdot \left(\frac{V_0}{Q_c} \right)^{0.8} \cdot Q_c \left(\frac{115}{E} \right)^{0.633}$$

donde A representa el factor de roca, $\frac{V_0}{Q_c}$ factor de carga (m^3/kg) y E potencia en peso relativa del explosivo usado (%). Este modelo permitió por primera vez relacionar cuantitativamente los parámetros geométricos de la malla con la granulometría resultante, convirtiéndose en un estándar de la industria.

En años posteriores, se desarrollaron modelos más avanzados como Swebrec, que ofrece una representación matemática más precisa de la distribución granulométrica,

especialmente en la cola gruesa, que es crítica para predecir la presencia de boulders (Ouchterlony et al., 2019). Estos modelos han sido complementados con simulaciones numéricas mediante el método de elementos discretos, que permiten modelar la propagación de ondas de choque y la generación de fisuras en el macizo rocoso, contribuyendo a un diseño de voladura más predictivo (Sanchidrián, 2009).

2.1.2 *Propiedades fisicoquímicas de los explosivos*

El comportamiento de los explosivos en el macizo depende de sus propiedades intrínsecas. La densidad influye en la cantidad de energía por metro de taladro; la velocidad de detonación (VOD) determina la intensidad de la onda de choque; la presión de detonación controla el radio de la zona de aplastamiento y la extensión de las fisuras radiales; mientras que la resistencia al agua es crucial en tajos con presencia de humedad.

Tabla 1

Comparación de propiedades de ANFO, Heavy ANFO y emulsiones gasificadas

Propiedad	ANFO	Heavy ANFO (50/50)	Emulsión gasificada
Densidad (g/cm ³)	0.80 – 0.85	0.95 – 1.10	1.15 – 1.25
VOD (m/s)	3200 - 3500	3800 - 4200	4500 – 5500
Presión de detonación (KBar)	60 - 80	90 - 120	150 – 250
Resistencia al agua	Bajo	Medio	Medio - Bajo

Nota. Se comparan las propiedades fisicoquímicas, destacando que las emulsiones gasificadas ofrecen mayor densidad y VOD, lo que fundamenta su selección para optimizar la fragmentación frente a mezclas convencionales.

La literatura demuestra que las emulsiones, gracias a su alta densidad y su capacidad de ser bombeadas con homogeneidad, logran un mejor confinamiento y una transmisión más eficiente de energía, produciendo fragmentaciones más uniformes y reduciendo la frecuencia de boulders (Rahimi et al., 2022; Zhang et al., 2021).

2.1.3 Modelos de predicción de fragmentación

El modelo Kuz–Ram sigue siendo la referencia principal para la estimación de la granulometría producto de la voladura. Este modelo combina la ecuación de Kuznetsov (1973), que predice el tamaño medio de fragmento x_{50} , con la distribución de Rosin–Rammler, que describe la frecuencia acumulada de fragmentos:

$$P(x) = 1 - e^{-0.693\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n}$$

Donde:

- $P(x)$: Fracción del material que pasa por el tamiz de tamaño x (en decimal, ej. 0.80 para 80%).
- x : Tamaño del tamiz o malla de interés (cm).
- x_{50} : Tamaño medio calculado con la ecuación de Kuznetsov (cm).
- n : Índice de uniformidad

Aunque es ampliamente usado, su ajuste puede ser limitado para bancos con alta heterogeneidad o en casos con presencia significativa de colas gruesas.

Para superar estas limitaciones, Ouchterlony et al. (2019) propusieron el modelo Swebrec, que ofrece una mejor representación de toda la curva granulométrica,

especialmente de la fracción de fragmentos más grandes, que suelen tener un impacto crítico en la eficiencia del carguío y chancado. La ecuación de Swebrec se define como:

$$P(x) = \frac{100}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)} \right]^b}$$

Donde:

- x_{max} : Tamaño máximo del bloque (límite superior físico).
- x_{50} : Tamaño medio.
- b : Parámetro de ondulación.

Esta formulación proporciona una transición más suave en el extremo grueso de la curva, permitiendo una predicción más realista de boulders.

Tabla 2

Comparación de modelos predictivos de fragmentación

Modelo	Ventajas técnicas	Limitaciones/consideraciones
Kuz – Ram	- Amplia validación en minas a cielo abierto	- Requiere calibración local para mejorar precisión.
	- Permite estimar x_{50} con parámetros simples de malla y factor de roca	- Menos confiable en bancos muy altos o macizos heterogéneos.
	- Fácil de aplicar sin software especializado	

	- Representación estadística robusta de distribución acumulada.	- Necesita datos experimentales para calcular x_0 y m.
Rosin–		
Rammler	- Útil para análisis post-voladura cuando se tienen datos de tamizado o imágenes.	- No es predictivo por sí mismo.
	- Mejor ajuste en la cola gruesa de la curva.	- Mayor complejidad matemática.
	- Representa toda la distribución de fragmentos de manera más realista.	- Generalmente requiere software de ajuste para su correcta aplicación.
Swebrec	- Útil para estimar presencia de boulders.	

Nota. El análisis permite identificar al modelo Kuz–Ram como el más idóneo para predecir la fragmentación en este estudio, debido a su capacidad para integrar parámetros de diseño y características del macizo.

2.1.4 Métodos de medición y caracterización de fragmentación

La caracterización de la fragmentación es fundamental para validar el diseño y optimizar futuros disparos. Los métodos empleados incluyen:

- Tamizado físico: Estándar de referencia, laborioso en gran escala.
- Análisis digital de imágenes: procesamiento de miles de fragmentos a partir de fotografías de alta resolución, generando curvas granulométricas en minutos (Sanchidrián, 2009).

- Fotogrametría y drones: permiten caracterizar caras de banco y pilas grandes de material con alta cobertura espacial.

Tabla 3

Métodos de medición de fragmentación

Método	Precisión	Tiempo de ejecución	Ventajas técnicas	Limitaciones/Consideraciones
Tamizado físico	Muy alta ($\pm 2-3\%$)	Alto	- Resultados directos y exactos - Estándar de referencia para calibrar otros métodos - Permite análisis detallado de fracciones finas - Rápido y económico	- Costoso en tiempo y logística. - Dificultad para aplicar en grandes volúmenes de material. - Riesgo de sesgo si el muestreo no es representativo.
Análisis digital de imágenes	Alta ($\pm 5-10\%$)	Bajo	- Procesa miles de partículas en una sola imagen. - Permite monitoreo en tiempo casi real.	- Sesgo en fracciones finas (<10 mm) por resolución de imagen.

Fotogrametría/Drone	Alta ($\pm 5-10\%$) (En fracciones gruesas)	Bajo-Medio	- Cobertura de grandes áreas, incluyendo caras de un banco	- Dependiente de condiciones climáticas y de iluminación.
			- Permite análisis volumétrico y granulométrico simultáneo.	- Limitada para fracciones menores a 20 mm.

Nota. Se resalta la ventaja del análisis digital de imágenes (Metrics Manager Pro) por su precisión y reproducibilidad en la obtención de la curva granulométrica frente a métodos cualitativos.

Estos avances han permitido implementar programas de optimización continua de voladura, donde los resultados de cada disparo retroalimentan el diseño del siguiente, mejorando progresivamente la granulometría.

2.1.5 Innovaciones tecnológicas

La introducción de sistemas electrónicos de detonación ha revolucionado el control de secuencias de disparo. La precisión de los retardos ($\pm 0,1$ ms) permite generar patrones de iniciación diseñados para maximizar la interacción constructiva de ondas de choque y minimizar vibraciones. Chiappetta (1996) reporta mejoras del 20 % en la uniformidad de fragmentación y reducción de sobre excavación en bancos al usar detonación electrónica.

Además, la aplicación de simulaciones numéricas y de gemelos digitales en minería ha permitido evaluar previamente los efectos de cambios en burden,

espaciamiento o tipo de explosivo, reduciendo la variabilidad y mejorando la previsibilidad del resultado (Sanchidrián, 2009).

2.1.6 Aspectos ambientales y de seguridad

La transición hacia emulsiones también responde a criterios de sostenibilidad. Las emulsiones presentan menor riesgo de derrame de combustible y menor sensibilidad mecánica, lo que mejora la seguridad en transporte y manipulación (Jimeno, 1995). Asimismo, investigaciones recientes han mostrado que la correcta gasificación de emulsiones permite reducir emisiones de gases nitrosos, contribuyendo al cumplimiento de estándares ambientales (Rahimi et al., 2022).

2.2 Antecedentes de la investigación

2.2.1 Antecedentes internacionales

En la tesis titulada “Rock blasting and explosives engineering” los autores Persson, Holmberg y Lee (1994) desarrollaron un análisis exhaustivo sobre los fundamentos de la ingeniería de voladuras y su aplicación en operaciones mineras. El objetivo central fue establecer principios científicos que relacionan el diseño de malla, las propiedades del macizo rocoso y las características fisicoquímicas de los explosivos. Sus resultados demostraron que la correcta elección de burden, espaciamento, taco e iniciación condiciona de manera directa la calidad de la fragmentación obtenida y que los explosivos con mayores velocidades de detonación tienden a generar fragmentaciones más uniformes. El aporte de este antecedente a la presente investigación radica en proporcionar las bases teóricas que permiten comprender cómo diferentes emulsiones comerciales, como Vertex y Emulgex, pueden alterar la granulometría del material fragmentado en condiciones reales de mina a cielo abierto.

En la investigación realizada por Cunningham (1983), titulada “The Kuz–Ram model for prediction of fragmentation from blasting”, se planteó un modelo matemático que integra la ecuación de Kuznetsov con la función de distribución de Rosin–Rammler para estimar la granulometría producto de la voladura. Su objetivo fue proporcionar una herramienta predictiva que vincule parámetros de diseño, como el factor de carga y el espaciamiento, con el tamaño medio de fragmentación esperado. Los resultados evidenciaron que este modelo ofrece estimaciones consistentes bajo condiciones controladas, convirtiéndose en uno de los más utilizados a nivel mundial para validar resultados empíricos de voladura. El aporte de esta investigación a la presente tesis radica en constituir la base metodológica para contrastar la fragmentación medida en campo con predicciones teóricas al evaluar emulsiones Vertex y Emulgex.

En el estudio titulado “A review of the performance of digital image analysis techniques for fragmentation measurement”, Sanchidrián (2009) realizó una revisión sistemática sobre el uso de software de análisis de imágenes para medir granulometría en operaciones de voladura. El objetivo principal fue comparar las diferentes técnicas de captura y procesamiento digital de imágenes aplicadas a fragmentación, tales como Split-Desktop, WipFrag y otros sistemas basados en análisis fotográfico. Los resultados mostraron que estas técnicas, cuando se calibran correctamente con muestreos manuales, permiten obtener curvas granulométricas confiables y replicables. El aporte de este estudio para la presente investigación radica en la validación metodológica de utilizar sistemas de análisis digital como herramienta de medición de P80 y distribución granulométrica en la comparación entre emulsiones.

Por su parte, Zhang et al. (2021) en su artículo titulado “Advances in the rheology of emulsion explosives” realizaron un análisis sobre cómo la reología de las emulsiones influye en su estabilidad, densidad y desempeño en voladuras. Su objetivo fue evaluar la

relación entre la formulación de la matriz emulsiva, la incorporación de sensibilizadores y la capacidad de bombeo en taladros húmedos o secos. Los resultados evidenciaron que las emulsiones con mayor estabilidad presentan una transferencia más eficiente de energía al macizo, lo cual repercute en una fragmentación más uniforme y predecible. El aporte de este antecedente a la presente tesis consiste en proporcionar fundamentos científicos sobre cómo la composición química de Vertex y Emulgex puede condicionar su desempeño en campo.

Finalmente, Rahimi et al. (2022), en su investigación titulada “A comprehensive review of the influence of sensitizers on emulsion explosives”, realizaron una recopilación de estudios que analizaron el efecto de distintos sensibilizadores en la velocidad de detonación, la densidad y la energía específica de emulsiones. El objetivo principal fue determinar cuáles aditivos optimizan la capacidad energética del explosivo sin comprometer su estabilidad ni seguridad. Los resultados evidenciaron que la incorporación de agentes gasificantes adecuados mejora la sensibilidad del explosivo y facilita un mejor control de la fragmentación. El aporte de este trabajo a la presente tesis se centra en sustentar cómo las diferencias en sensibilización entre Vertex y Emulgex pueden influir en el resultado final de la voladura.

2.2.2 Antecedentes nacionales

En la tesis titulada “Análisis comparativo y evaluación técnico-económica de Heavy ANFO vs emulsión Fortis Advantage 100 gasificada” el autor Beraun Anco (2019) tuvo como objetivo evaluar la eficiencia técnica y económica de dos tipos de explosivos aplicados en voladuras de producción en una mina peruana. Para ello se realizaron voladuras controladas manteniendo constantes los parámetros de malla y variando el agente explosivo. Los resultados evidenciaron que la emulsión Fortis Advantage 100

generó una fragmentación más homogénea y redujo la cantidad de boulders, aunque implicó un incremento moderado en el costo unitario por tonelada fragmentada. El aporte de esta tesis a la presente investigación radica en demostrar que la selección de explosivos debe considerar simultáneamente aspectos técnicos y económicos, lo cual se aplicará en la comparación entre Vertex y Emulgex.

En la tesis titulada “Mejora del ratio de excavación de las palas de carguío mediante el uso del explosivo gasificado HA73G Emulgex en voladuras de minería superficial, Región Cusco, 2023” el autor Lazarte Machuca (2024) tuvo como objetivo demostrar cómo la sustitución de mezclas convencionales por el uso de HA73G Emulgex incrementa la eficiencia operativa de las palas de carguío. El estudio, basado en una línea base de fragmentación y productividad, aplicó voladuras controladas con mediciones de P80 y ratio de excavación. Los resultados mostraron que el uso de HA73G Emulgex redujo significativamente la presencia de sobre tamaños y mejoró la velocidad de carguío, lo cual optimizó el rendimiento de la operación. El aporte de esta tesis a la presente investigación radica en evidenciar cómo una emulsión comercial específica puede modificar de manera positiva la productividad mina-planta.

En la tesis titulada “Reemplazo de la emulsión matriz MEX 60/40 por la emulsión Fortis Advantage gasificada 65/35 para mitigar la emisión de gases nitrosos en la Unidad de Producción Lagunas Norte” desarrollada en la Universidad Nacional de Trujillo (2020), se tuvo como objetivo principal reducir las emisiones de gases nitrosos a través de la sustitución de un tipo de emulsión por otra con distinta formulación. Los resultados demostraron que la nueva emulsión no solo mitigó emisiones contaminantes, sino que también mejoró la fragmentación y la estabilidad operativa del explosivo. El aporte de este antecedente a la presente tesis es metodológico, ya que demuestra cómo una

comparación experimental entre emulsiones comerciales específicas permite evaluar simultáneamente indicadores técnicos y ambientales.

En la tesis titulada “Propuesta del uso de emulsión gasificada en el carguío de taladros para reducir costos en voladura” desarrollada en la Universidad Continental (2021), el objetivo fue implementar el uso de emulsiones gasificadas en tajos abiertos para reducir costos de operación sin sacrificar calidad de fragmentación. Los resultados mostraron que la utilización de emulsión gasificada generó ahorros económicos y al mismo tiempo mejoró la uniformidad de la granulometría. El aporte de este antecedente a la presente investigación consiste en resaltar que la elección del tipo de explosivo puede convertirse en una palanca de optimización de costos y productividad.

Finalmente, múltiples tesis de universidades nacionales como la UNDAC y la UNCP han empleado modelos matemáticos como el de Kuz–Ram y Rosin–Rammmler para relacionar variables de diseño de voladura con la fragmentación obtenida. Estos estudios han demostrado que la aplicación de modelos predictivos permite evaluar la correspondencia entre resultados teóricos y empíricos, además de estandarizar metodologías para futuras investigaciones. El aporte de estos antecedentes a la presente tesis radica en servir de base metodológica para validar experimentalmente los resultados de la comparación entre emulsiones Vertex y Emulgex.

2.2.3 Análisis crítico

De la revisión de antecedentes internacionales y nacionales se concluye que existe consenso en cuanto a la importancia de la fragmentación para la eficiencia del ciclo mina–planta y en la utilidad de los modelos predictivos como el Kuz–Ram para validar resultados empíricos. Asimismo, se observa que la formulación de emulsiones gasificables incide de manera directa en la granulometría, en los costos de operación y en

las condiciones de seguridad y medio ambiente. Sin embargo, se identifica un vacío de investigación en el ámbito nacional: hasta el momento no se han encontrado tesis ni estudios publicados que comparen de manera sistemática y controlada las emulsiones comerciales Vertex y Emulgex bajo condiciones de mina a cielo abierto en el sur del Perú.

Este vacío constituye la oportunidad de la presente investigación, la cual se propone realizar una comparación experimental entre ambas emulsiones, midiendo indicadores técnicos como la granulometría y la presencia de sobre tamaños, indicadores económicos como el costo unitario por tonelada volada, y contrastando los resultados con modelos predictivos de fragmentación. De este modo, la tesis busca aportar evidencia empírica y replicable que permita mejorar la toma de decisiones en la selección de explosivos en operaciones de minería de cobre a cielo abierto.

2.3 Bases teóricas

2.3.1 *Fundamentos de la voladura en minería a cielo abierto*

La voladura en minería a cielo abierto es el método principal para fragmentar macizos rocosos que no pueden desmontarse por medios mecánicos convencionales; su adecuada ejecución determina gran parte de la eficiencia del ciclo mina-planta, afectando el carguío, transporte, chancado y molienda (Jimeno, 1995). El diseño de una voladura tiene objetivos múltiples y simultáneos: producir una fragmentación adecuada, controlar desplazamientos y proyecciones, minimizar vibraciones y optimizar el consumo de explosivos y costos operativos (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

Desde un enfoque integral, la voladura no debe verse como un acto aislado, sino como un proceso que condiciona la productividad global y la estabilidad geomecánica del banco remanente; decisiones erróneas en diseño o selección del agente explosivo pueden desencadenar efectos adversos en todo el flujo productivo (Chiappetta, 1996). En

consecuencia, la planificación del disparo exige una consideración simultánea de las condiciones geomecánicas, el diseño geométrico de la malla y las propiedades del explosivo empleados (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Jimeno, 1995).

Este capítulo aborda, por tanto, los fundamentos que permiten comprender cómo las variables de diseño y las características fisicoquímicas de los explosivos controlan la fragmentación, con el propósito de sustentar la comparación experimental entre las emulsiones Vertex y Emulgex en una mina de cobre a cielo abierto del sur del Perú.

2.3.2 Mecánica de la fragmentación de rocas por explosivos

La fragmentación inducida por explosivos se explica por la interacción entre ondas de choque, tensiones dinámicas y expansión de gases de detonación. El proceso dinámico puede concebirse en tres etapas: acción de la onda de choque, generación y propagación de fisuras, y acción expansiva de los gases que completa la fragmentación (Konya & Walter, 1990).

En la fase inicial, la detonación genera una onda de alta presión que somete la roca a esfuerzos mayores que su resistencia a la compresión uniaxial, provocando una zona de aplastamiento alrededor del taladro. Posteriormente, la reflexión de las ondas en discontinuidades y límites induce esfuerzos de tracción que generan grietas radiales (Holmberg, 1979). Finalmente, los gases de detonación penetran en esas fisuras, actuando como cuñas que amplían y separan los fragmentos. No obstante, solamente una fracción de la energía liberada se transforma en trabajo útil; gran parte se disipa en calor, ruido y vibraciones (Sanchidrián, 2009).

Por ello, la eficiencia de la voladura se define como la proporción de la energía química del explosivo que se convierte en energía efectiva de fractura; optimizarla implica seleccionar un explosivo y un diseño de malla que maximicen la energía útil y

minimicen pérdidas por disipación (Persson, Holmberg & Lee, 1994). Investigaciones recientes muestran que emulsiones con mayor densidad y velocidad de detonación (VOD) tienden a mejorar la transmisión de energía útil al macizo, favoreciendo fragmentaciones más homogéneas (Rahimi et al., 2022; Zhang et al., 2021).

2.3.3 Tipos de explosivos empleados en minería

En la práctica minera se emplean tres familias principales de agentes: ANFO (Ammonium Nitrate–Fuel Oil), mezclas Heavy ANFO (ANFO + emulsión) y emulsiones gasificadas. Cada familia presenta ventajas y limitaciones que condicionan su uso según la litología, presencia de agua y requerimientos operativos (Chiappetta, 1996; Konya & Walter, 1990).

ANFO es económico y de fácil preparación, pero tiene baja densidad y nula resistencia al agua, limitando su uso en taladros húmedos o en macizos altamente competentes (Chiappetta, 1996). Heavy ANFO, mediante la incorporación de emulsión en proporciones variables, incrementa la densidad y mejora la resistencia al agua y el desempeño, ofreciendo un equilibrio entre costo y prestaciones (Konya & Walter, 1990).

Las emulsiones gasificadas, por su parte, presentan la mayor flexibilidad operativa: bombeabilidad, control de densidad, resistencia al agua y posibilidad de ajuste energético mediante la formulación y la gasificación (Zhang et al., 2021; Rahimi et al., 2022). Estas características las hacen idóneas cuando se busca uniformidad de fragmentación y seguridad en ambientes con presencia de agua. En términos funcionales, la elección entre ANFO, Heavy ANFO y emulsiones debe considerar el costo, la seguridad, la manejabilidad y el efecto final sobre la granulometría y la continuidad mina–planta (Chiappetta, 1996; Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.4 Propiedades fisicoquímicas de los explosivos que condicionan la fragmentación

Las propiedades que mayor impacto ejercen en la transferencia de energía y, por ende, en la fragmentación son: densidad, velocidad de detonación (VOD), presión de detonación, sensibilidad y estabilidad frente a humedad (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Rahimi et al., 2022).

2.3.4.1. Densidad (gr/cm³). Determina la energía por unidad de volumen. Una mayor densidad implica mayor masa de reactivos por metro lineal de taladro y, en general, mayor capacidad para generar presiones de ruptura en el macizo (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.4.2. Velocidad de detonación (VOD). Condiciona la naturaleza de la onda de choque y la tasa con la que la presión se desarrolla; explosivos con VOD más alta suelen producir fragmentaciones más finas y homogéneas si se combinan adecuadamente con el diseño de malla (Persson, Holmberg & Lee, 1994).

2.3.4.3. Presión de detonación. Relacionada con VOD y densidad, es un indicador de la capacidad de generación de tensiones de ruptura en la roca.

2.3.4.4. Resistencia al agua. Clave en zonas con presencia de agua; las emulsiones típicamente superan ampliamente al ANFO en esta propiedad (Zhang et al., 2021).

2.3.4.5. Sensibilidad. Determina la facilidad de iniciación y afecta la seguridad operacional; se maneja por medio de iniciadores y sistemas de detonación electrónica o eléctrica (Chiappetta, 1996).

La interacción entre estas propiedades y los parámetros geométricos de diseño determina la eficiencia energética de la voladura y, por ende, la distribución final de tamaños.

2.3.5 *Diseño de malla de perforación y parámetros geométricos relevantes*

El diseño de la malla: Burden (B), espaciamiento (S), diámetro del taladro (D), longitud de taco y sub-perforación; es la base geométrica sobre la que se calcula la carga de explosivo por taladro y el factor de carga (Jimeno, 1995).

2.3.5.1. Burden (B). Distancia perpendicular desde la cara libre hasta el taladro cargado; si es excesivo provoca grandes fragmentos, si es muy pequeño conlleva sobre fragmentación y pérdida de eficiencia (Jimeno, 1995).

2.3.5.2. Espaciamiento (S). Distancia entre centros de taladros; su ajuste busca homogeneidad en la distribución de estrés.

2.3.5.3. Diámetro del taladro (D). Condiciona el volumen de carga y la relación entre masa de explosivo y masa de roca afectada.

2.3.5.4. Taco. Longitud de material sin carga que contiene los gases y aumenta la eficiencia de la fracturación cercana a la superficie.

2.3.5.5. Factor de carga. Expresado típicamente en kg/t o kg/m³, relaciona la masa de explosivo con la masa de roca desplazada y sirve como referencia primaria para estimar la energía aplicada por unidad de masa (Jimeno, 1995; Persson, Holmberg & Lee, 1994). El ajuste óptimo del factor de carga depende de la litología, objetivos de fragmentación y características del explosivo.

2.3.6 Modelos de predicción de fragmentación

Los modelos empíricos y semi-empíricos permiten predecir la curva granulométrica y parámetros estadísticos como P50 o P80 a partir de datos de diseño y propiedades del explosivo. Entre los más utilizados está el modelo Kuz–Ram, que combina la propuesta de Kuznetsov para el tamaño medio con la función Rosin–Rammler para la distribución acumulada (Cunningham, 1983).

En términos prácticos, el modelo establece relaciones del tipo:

$$x_{50} = K \left(\frac{Q}{V} \right)^\alpha$$

y la curva acumulada con la forma Rosin-Rammler:

$$R(x) = 100[1 - e^{-(\frac{x}{x_0})^m}]$$

Donde x_0 y m son parámetros de ajuste; Q es la carga por volumen, V el factor relacionado con el diseño y K, α constantes empíricas calibradas en campo (Cunningham, 1983).

Modelos alternativos como Swebrec han sido propuestos para ajustarse mejor a colas gruesas en ciertos macizos, pero en la práctica la combinación Kuz-Ram + Rosin-Rammler sigue siendo el estándar para contrastar predicción vs. medición (Sanchidrián, 2009; Ouchterlony et al., 2019). La calibración local con voladuras piloto es imprescindible para convertir predicciones en estimaciones confiables en un contexto dado.

2.3.7 Medición y caracterización de la fragmentación: métodos y herramientas

La medición de fragmentación puede realizarse por muestreo físico (zarandeo, tamizado) o por técnicas digitales (análisis de imágenes). El uso de software especializado

(Split-Desktop, WipFrag, Metrics Manager Pro, Motion Metrics) ha sido ampliamente validado cuando se implementa con protocolos de calibración y muestreos de validación (Sanchidrián, 2009; Ouchterlony et al., 2019).

Las mediciones proporcionan curvas acumuladas, P80, P50, porcentaje de finos, distribución por clases y métricas sobre los boulders. La robustez en la adquisición (ángulo de toma, resolución, control de escala) y la validación con muestras físicas son requisitos imprescindibles para obtener resultados aplicables en evaluaciones comparativas de explosivos.

2.3.8 Efectos de la fragmentación sobre la eficiencia mina-planta

La granulometría de la alimentación al chancado tiene efectos directos sobre productividad, consumo energético y mantenimiento. Fragmentaciones subóptimas incrementan el tiempo de carguío, la ocurrencia de atascos en tolvas y el consumo de trituración secundaria, elevando costos unitarios (Workman & Eloranta, 2003). Estudios aplicados muestran reducciones en costos de conminución y mejoras en rendimiento cuando se optimiza la fragmentación primaria (Rahimi et al., 2022).

Por ello, evaluar un explosivo no es solo medir P80, sino cuantificar su impacto en el ciclo mina-planta, por ejemplo, horas de pala por tonelada, velocidad de procesamiento en chancadora y consumo energético por tonelada, para construir un análisis técnico-económico robusto.

2.3.9 Propiedades y diferenciación técnica entre Vertex y Emulgex

Las fichas técnicas y estudios sobre emulsiones comerciales señalan que, aunque la familia de emulsiones comparte principios generales (fase acuosa nitrada, fase dispersa de combustible y agentes emulsificantes), las formulaciones propietarias difieren en

densidad, sensibilidad, VOD y comportamiento reológico (Zhang et al., 2021; Rahimi et al., 2022).

Documentos y tesis nacionales que han evaluado emulsiones específicas y mezclas Heavy ANFO (por ejemplo, estudios sobre Fortis Advantage o HA73) muestran que variaciones en la formulación pueden producir diferencias relevantes en P80, percentil de finos y frecuencia de boulders, así como efectos colaterales sobre emisiones y manejo (Beraun Anco, 2019; Lazarte Machuca, 2024).

Si bien la información técnica pública sobre Vertex y Emulgex en detalle operacional puede ser limitada por confidencialidad comercial, la literatura sugiere que diferencias de densidad, sistema sensibilizante y parámetros de gasificación son los factores que más inciden en la respuesta en campo (Rahimi et al., 2022; Zhang et al., 2021). Esta tesis se apoya en esa lógica: comparar ambos productos bajo condiciones constantes de malla y procedimiento permitirá identificar efectos prácticos medibles en fragmentación y en indicadores de proceso.

2.3.10 Innovaciones en control de iniciación, instrumentación y seguridad

Los sistemas electrónicos de iniciación y retardos precisos han mejorado la capacidad de controlar la secuencia de ruptura y optimizar la transmisión de energía entre taladros, impactando positivamente en la uniformidad de fragmentación y en la reducción de vibraciones (Chiappetta, 1996). Asimismo, el control de calidad en la preparación y bombeo de emulsiones (viscosidad, densidad, grado de gasificación) es imprescindible para garantizar reproducibilidad entre disparos y evitar variabilidad atribuible al agente explosivo (Zhang et al., 2021).

En términos de seguridad, los protocolos de almacenamiento, transportes y manipulación, junto con la selección de iniciadores adecuados, minimizan riesgos y permiten una aplicación segura de emulsiones en campamentos mineros (Jimeno, 1995).

2.3.11 Aspectos económicos y ambientales asociados a la voladura

Desde la perspectiva económica, el costo de explosivos es solo uno de los componentes del costo total de perforación y voladura; sin embargo, las variaciones en fragmentación inducidas por el tipo de explosivo pueden traducirse en ahorros mayores en las etapas de carga y chancado que compensen diferencias de costo unitario (Persson, Holmberg & Lee, 1994; Beraun Anco, 2019).

En el plano ambiental, la formulación de emulsiones y la gasificación influyen en la emisión de NO_x y otros subproductos de la detonación. Estudios aplicados han demostrado que cambios en formulaciones pueden mitigar emisiones sin degradar la fragmentación, lo que añade una dimensión adicional a la evaluación técnico-económica de los explosivos (UN Trujillo, 2020).

Las hipótesis planteadas en la presente investigación se sustentan en los modelos teóricos de fragmentación por voladura, particularmente el modelo Kuz–Ram (Cunningham, 1983) y los principios de transferencia de energía en el macizo rocoso (Persson et al., 1994; Sanchidrián, 2009). Estos modelos establecen que la granulometría resultante depende directamente de las propiedades fisicoquímicas del explosivo, tales como densidad, velocidad de detonación y energía específica, así como de las condiciones geométricas de la malla de perforación.

2.4 Hipótesis

La hipótesis de la presente investigación sostiene que:

“El uso de emulsión gasificable Vertex produce una fragmentación de roca más eficiente que la emulsión Emulgex, evidenciada en un menor P80, menor porcentaje de boulders y mayor uniformidad granulométrica, debido a sus superiores propiedades fisicoquímicas como densidad y velocidad de detonación, las cuales influyen directamente en la transmisión de energía en el macizo rocoso (Persson et al., 1994; Sanchidrián, 2009; Rahimi et al., 2022).”

La fragmentación resultante de una voladura depende directamente de la cantidad de energía explosiva liberada y de la manera en que dicha energía se transfiere al macizo rocoso. Según Persson, Holmberg y Lee (1994), los parámetros determinantes son la densidad del explosivo, su velocidad de detonación (VOD), la presión generada en el frente de onda y la capacidad de resistir condiciones de humedad sin degradarse.

En este sentido, el explosivo Vertex presenta ventajas técnicas frente a Emulgex, particularmente en términos de densidad energética y velocidad de detonación, lo que permite un mayor radio de trituración y un mejor desarrollo de fracturas radiales. Estas características se traducen en una fragmentación más homogénea y en un menor número de fragmentos sobredimensionados.

La hipótesis se apoya también en el modelo Kuz–Ram (Cunningham, 1983) y en la distribución Swebrec (Ouchterlony et al., 2019), que demuestran la influencia del factor de explosivo en el tamaño medio X_{50} y en la distribución completa de la curva granulométrica. Bajo este marco, se espera que Vertex produzca valores de P80 más bajos y distribuciones con menor dispersión respecto a Emulgex, bajo condiciones de diseño de malla constantes.

Si bien el costo unitario de adquisición de Vertex podría ser mayor que el de Emulgex, la hipótesis sostiene que, en términos de costo global por tonelada procesada, Vertex resulta más rentable. Esto se debe a:

- Reducción de la necesidad de voladuras secundarias
- Menor desgaste de equipos de carguío y trituración.
- Disminución del consumo de combustible en palas y camiones.
- Ahorro energético en chancado y molienda.

De acuerdo con estudios de Beraun Anco (2019) y Rahimi et al. (2022), el uso de emulsiones de mayor rendimiento puede disminuir los costos operativos totales hasta en un 7–10 %, incluso si el precio del explosivo es superior.

Esta hipótesis está directamente alineada con el objetivo general de la investigación: evaluar comparativamente los resultados de fragmentación obtenidos con Vertex y Emulgex. Al demostrar si existe una diferencia significativa entre ambos, se aportará evidencia técnica que permitirá a la operación minera seleccionar el explosivo más eficiente en términos de fragmentación, productividad y costo-beneficio.

2.5 Variables

2.5.1 Variable independiente

Tabla 4

Variable independiente

Variable	Dimensión	Indicador
Tipo de explosivo	Características físicoquímicas	Formulación del explosivo (Vertex o Emulgex)
	Propiedades energéticas	Velocidad de detonación (VOD)
	Estabilidad operativa	Resistencia al agua/densidad

Nota. Se muestra la variable independiente con sus dimensiones técnicas, estableciendo que la manipulación del agente explosivo es la causa directa de los cambios observados en la fragmentación.

2.5.2 Variable dependiente

Tabla 5

Variables dependientes

Variable	Dimensión	Indicador
Fragmentación de roca	Granulometría	Tamaño característico P80
	Uniformidad	Curva granulométrica

Eficiencia mina - planta	Boulders	Número de fragmentos >1 m
	Productividad	Tiempo promedio de carguío por pala
	Continuidad operacional	Toneladas cargadas por hora
	Economía del proceso	Costo por tonelada fragmentada
	Costo - beneficio	
	Requerimientos adicionales	Número de voladuras secundarias

Nota. Se definen los indicadores de éxito del estudio: el P80 para la eficacia técnica, y el costo por tonelada junto con la productividad de carguío para la eficiencia económica.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Alcances y limitaciones

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del ámbito de la ingeniería de minas aplicada a la optimización de procesos de perforación y voladura, en operaciones a cielo abierto dedicadas a la extracción de minerales sulfurados de cobre. Su principal alcance consiste en evaluar de manera técnica y comparativa el desempeño de los explosivos Vertex y Emulgex, dos emulsiones gasificadas de uso común en el sector minero peruano, con el propósito de determinar cuál de ellas ofrece mejores resultados en términos de fragmentación de roca, eficiencia operativa y relación costo–beneficio.

El estudio abarca la fase de voladura de producción, la cual es un componente fundamental dentro del ciclo mina–planta, ya que la calidad de la fragmentación generada en esta etapa incide directamente en la eficiencia de las operaciones posteriores de carguío, transporte, chancado y molienda. En tal sentido, la investigación se desarrollará en una mina de cobre a cielo abierto ubicada en el sur del Perú, caracterizada por condiciones geológicas y operativas típicas de las operaciones cupríferas de la región andina.

Dentro de los alcances técnicos del estudio se contempla la evaluación granulométrica del material resultante de las voladuras realizadas con ambos explosivos, considerando parámetros como el tamaño característico, la distribución granulométrica total, la uniformidad del material y la cantidad de boulders generados. Para ello se aplicarán métodos de medición combinados: análisis digital de imágenes mediante software especializado (Metrics Manager Pro). Esta metodología permitirá garantizar la

precisión de los resultados y reducir los márgenes de error en la caracterización de la fragmentación

Asimismo, el estudio contempla la evaluación de la eficiencia operacional derivada de los resultados de fragmentación. La hipótesis plantea que un explosivo con mejor desempeño energético, como Vertex, podría reducir los tiempos de carguío, facilitar la manipulación del material fragmentado y mejorar la continuidad de la alimentación al chancado primario. Por ello, el alcance del trabajo incluye la medición de variables operativas tales como el tiempo promedio de excavación por ciclo, la productividad de las palas y cargadores frontales, y la continuidad del transporte de material hacia el chancado.

De igual modo, la investigación incorpora un análisis económico comparativo orientado a establecer la relación costo–beneficio entre los explosivos Vertex y Emulgex. Este análisis no se limitará al costo directo del explosivo por kilogramo, sino que incluirá los costos indirectos asociados a la fragmentación, como el requerimiento de voladuras secundarias, el consumo energético en chancado, el desgaste de equipos y los tiempos improductivos generados por la presencia de boulders. De esta manera, el estudio permitirá determinar si un explosivo de mayor costo unitario puede resultar más rentable a nivel operativo cuando se evalúa todo el ciclo mina–planta.

El diseño metodológico de la investigación se ejecutará bajo condiciones controladas. Para asegurar la validez de la comparación, los parámetros de perforación y voladura se mantendrán constantes, es decir, el diámetro de taladro, burden, espaciamiento, longitud de taco, profundidad de carga y secuencia de iniciación serán iguales en todas las pruebas. El único factor variable será el tipo de explosivo utilizado, lo que permitirá atribuir las diferencias observadas en la fragmentación exclusivamente a las características del agente explosivo.

Por otro lado, la investigación tiene también un alcance tecnológico y metodológico, ya que busca aportar un procedimiento sistemático de evaluación de explosivos mediante la integración de herramientas digitales y técnicas experimentales de campo. Este enfoque permitirá fortalecer la toma de decisiones en materia de selección de explosivos, contribuyendo a la mejora continua de las prácticas de voladura en la minería peruana.

No obstante, la investigación reconoce que existen limitaciones inherentes al contexto operativo, las cuales pueden influir en los resultados y deben ser consideradas al interpretar los hallazgos. Una de las principales limitaciones es la variabilidad geológica natural del macizo rocoso, que, a pesar de los esfuerzos por seleccionar zonas homogéneas, puede presentar variaciones en la resistencia uniaxial, el grado de fracturamiento o la orientación de las discontinuidades. Estos factores geotécnicos, aunque difíciles de controlar, influyen directamente en la propagación de las ondas de choque y en la eficiencia de la voladura.

Asimismo, la cantidad de voladuras de prueba estará sujeta a la planificación y disponibilidad operativa de la mina. En consecuencia, el número de disparos evaluados podría ser limitado, reduciendo el tamaño de la muestra y afectando la representatividad estadística de los resultados. Si bien se aplicarán técnicas de control de calidad y análisis comparativo, los resultados deben interpretarse dentro del contexto operativo específico de la unidad minera.

Otro factor limitante proviene de los aspectos operativos no controlables. Durante la ejecución de las pruebas, pueden presentarse desviaciones en la perforación (como desalineación de taladros), diferencias en la humedad del macizo, variaciones en la densidad de carga o errores menores durante el carguío de los explosivos. Aunque se

implementarán procedimientos de supervisión y registro detallado de cada disparo, estos factores son inevitables en la práctica y pueden generar dispersión en los datos.

La investigación también se encuentra limitada al uso exclusivo de los explosivos Vertex y Emulgex, sin incluir otras emulsiones disponibles en el mercado, como Fortis Advantage o Quantex. En ese sentido, los resultados no buscan establecer conclusiones universales sobre todas las emulsiones existentes, sino únicamente una comparación técnica entre las dos formulaciones seleccionadas bajo las condiciones específicas de la mina de estudio.

Asimismo, el estudio está restringido temporalmente al periodo de ejecución de las pruebas experimentales, que se desarrollarán durante un ciclo operativo determinado. Por tanto, los resultados obtenidos reflejarán las condiciones geomecánicas y climáticas propias de ese intervalo de tiempo, sin representar necesariamente el comportamiento a largo plazo de toda la vida útil del tajo.

Otra limitación importante está relacionada con la precisión de los métodos de medición empleados. Si bien el análisis digital de imágenes es una técnica moderna, su exactitud depende de la calidad de las fotografías, la iluminación ambiental, el ángulo de captura y la correcta calibración de escala. Estos factores pueden introducir variaciones mínimas entre las mediciones digitales.

Finalmente, los resultados económicos también pueden estar sujetos a la variabilidad de los costos de mercado. El precio de los explosivos, el combustible, la energía eléctrica y los insumos de mantenimiento puede fluctuar dependiendo del contexto económico, lo que implica que las conclusiones en términos de costo–beneficio son válidas dentro del marco temporal en que se desarrolló el estudio.

En suma, los alcances de esta investigación definen claramente el propósito técnico y operativo del estudio, orientado a mejorar la comprensión del comportamiento de diferentes emulsiones en la fragmentación de la roca, mientras que las limitaciones establecen las condiciones bajo las cuales los resultados deben ser interpretados con objetividad. Este equilibrio entre rigor técnico y reconocimiento de restricciones garantiza que los hallazgos de la investigación sean científicamente válidos, operativamente aplicables y metodológicamente reproducibles en contextos mineros similares.

3.2 Tipo y diseño de investigación

La investigación desarrollada se enmarca dentro del ámbito de la ingeniería aplicada, con énfasis en la optimización de procesos mineros vinculados a la perforación y voladura. Su propósito fundamental es evaluar de manera comparativa el desempeño de dos tipos de explosivos industriales: Vertex y Emulgex; en la fragmentación de la roca en una mina de cobre a cielo abierto al sur del Perú, determinando cuál de ellos permite obtener una fragmentación más eficiente, homogénea y económicamente favorable.

3.2.1 Tipo de investigación

De acuerdo con la naturaleza del estudio y los objetivos planteados, la presente investigación se clasifica como una investigación aplicada, de tipo explicativa y de enfoque cuantitativo.

- Aplicada, porque busca resolver un problema operativo concreto dentro de un contexto minero real: la necesidad de mejorar la fragmentación de la roca y, en consecuencia, optimizar el desempeño del ciclo mina–planta. El trabajo no se limita a la generación de conocimiento teórico, sino que pretende aplicar

principios técnicos y científicos para proponer una solución práctica y verificable en campo.

- Explicativa, porque intenta establecer relaciones de causalidad entre el tipo de explosivo empleado (variable independiente) y los resultados de fragmentación, eficiencia y costo (variables dependientes). El objetivo es determinar cómo y por qué el uso de un determinado explosivo produce variaciones en la distribución granulométrica de la roca y en los indicadores de desempeño operativo.
- Cuantitativa, debido a que la metodología de trabajo se sustenta en la obtención, medición y análisis de datos numéricos. Las variables se medirán utilizando unidades físicas estandarizadas (mm, t/h, m/s, USD/t, etc.) y los resultados se procesarán mediante métodos estadísticos y comparativos. El enfoque cuantitativo permitirá obtener resultados objetivos, replicables y estadísticamente verificables, reduciendo al mínimo la influencia de criterios subjetivos.

3.2.2 *Diseño de la investigación*

El diseño metodológico adoptado corresponde a un diseño no experimental, de corte transversal y de tipo comparativo correlacional.

- No experimental, porque las variables no serán manipuladas deliberadamente por el investigador. El estudio se desarrollará en el entorno operativo real de la mina, donde los procesos de perforación y voladura seguirán los parámetros técnicos habituales. El investigador se limitará a observar, registrar y analizar los resultados obtenidos luego de la aplicación de los diferentes tipos de explosivos, sin intervenir en la dinámica normal de la operación.

- De corte transversal, porque la recopilación de datos se realizará en un periodo de tiempo determinado, correspondiente al ciclo de ejecución de las voladuras de prueba. No se busca analizar la evolución del fenómeno a lo largo del tiempo, sino realizar una evaluación puntual y comparativa entre los resultados obtenidos con Vertex y con Emulgex dentro de un mismo intervalo operativo.
- Comparativo correlacional, ya que el propósito del estudio es comparar los efectos del tipo de explosivo sobre las variables dependientes y establecer relaciones estadísticas entre ellas. El análisis se centrará en determinar si existe una correlación significativa entre el uso de un determinado explosivo y la mejora de los indicadores de fragmentación, eficiencia operacional y costo por tonelada fragmentada.

3.3 Población y muestra

La población o universo de estudio de la presente investigación está constituida por el conjunto de voladuras de producción realizadas en los tajos de explotación de una mina de cobre a cielo abierto ubicada al sur del Perú, que utiliza sistemas de perforación y voladura convencionales con emulsiones gasificadas a granel. Estas voladuras comprenden el proceso integral de perforación, carguío, iniciación y fragmentación del macizo rocoso con el propósito de generar material fragmentado adecuado para las operaciones de carguío, transporte y chancado.

Desde el punto de vista técnico, la población se define como el total de eventos de voladura ejecutados bajo condiciones operativas estables, en bancos de características geológicas y geométricas similares, durante el periodo de estudio establecido. Cada evento de voladura representa una unidad de análisis que incluye un conjunto de taladros

perforados y cargados bajo un mismo diseño de malla y condiciones operacionales controladas.

La población total estimada, durante el periodo de ejecución del estudio, está conformada por todas las voladuras de producción realizadas en los bancos operativos seleccionados, las cuales presentan litologías representativas del yacimiento, principalmente formaciones de roca intrusiva con grados de alteración moderados. Este tipo de roca ofrece una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 80–110 MPa, lo que constituye una condición ideal para evaluar el desempeño comparativo de diferentes tipos de explosivos.

La selección del universo de estudio se sustenta en criterios geotécnicos, operacionales y logísticos, priorizando la homogeneidad del macizo rocoso, la accesibilidad de los frentes de trabajo y la posibilidad de mantener constantes los parámetros de diseño de perforación. Asimismo, se consideró la disponibilidad de equipos de perforación, sistemas de carguío de explosivos a granel (camiones fábrica) y recursos humanos para la ejecución de las pruebas experimentales.

Dado que resulta impracticable analizar la totalidad de las voladuras de producción realizadas en la operación minera, se determinó la necesidad de trabajar con una muestra representativa de la población, que permita realizar comparaciones válidas y obtener resultados extrapolables al contexto general de la mina.

La muestra estará conformada por un conjunto de voladuras seleccionadas intencionalmente bajo el criterio de similitud geotécnica y operativa, aplicando un enfoque no probabilístico y de tipo intencional o deliberado. Este tipo de muestreo se justifica porque el estudio requiere condiciones controladas que permitan aislar el efecto

del tipo de explosivo, evitando interferencias por cambios litológicos o variaciones en los parámetros de diseño.

El tamaño de la muestra estará determinado por el número de voladuras experimentales que puedan ejecutarse durante el periodo de investigación, garantizando la repetibilidad de las condiciones técnicas y la validez de la comparación. En este sentido, se prevé realizar pruebas en sectores geotécnicamente equivalentes.

Cada voladura experimental comprenderá aproximadamente entre 100 y 250 taladros de producción, con diámetros de perforación 10 5/8" y 9 7/8", burden de 5,5 m, espaciamientos de 5,5 m y longitudes promedio de 15 a 16.5 m. De esta manera, la única variable modificada entre los ensayos será el tipo de emulsión utilizada, permitiendo atribuir las diferencias de fragmentación observadas directamente a las propiedades del explosivo.

Aunque la muestra no pretende representar estadísticamente la totalidad de las voladuras ejecutadas en la mina, se considera representativa en términos técnicos y operativos, ya que las condiciones seleccionadas reflejan el comportamiento típico del macizo rocoso y del proceso de voladura en bancos de producción convencionales.

El diseño muestral está orientado a garantizar la validez interna de los resultados, es decir, que las diferencias observadas entre ambas series de voladuras puedan atribuirse directamente al tipo de explosivo y no a otros factores. La validez externa o capacidad de generalización se sustenta en la similitud de las condiciones operativas con otras minas de cobre a cielo abierto del sur del Perú, que utilizan emulsiones gasificadas de características análogas.

Finalmente, la muestra constituye el núcleo experimental del estudio, sobre el cual se realizará la comprobación empírica de la hipótesis planteada. La comparación de los

resultados permitirá determinar con base técnica y estadística si el uso del explosivo Vertex genera una fragmentación más eficiente y rentable que el explosivo Emulgex, aportando información relevante para la optimización de los procesos de voladura en minería a cielo abierto.

3.4 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 *Fundamentación metodológica*

El presente estudio adopta un enfoque metodológico de carácter aplicado, cuantitativo y observacional, con procedimientos experimentales controlados en campo, orientados a generar evidencia empírica sobre el desempeño comparativo de los explosivos Vertex y Emulgex en operaciones de voladura a cielo abierto. El objetivo metodológico consiste en obtener datos técnicos confiables, reproducibles y representativos que permitan establecer relaciones causales entre el tipo de explosivo y los resultados de fragmentación, eficiencia operacional y costo.

El método utilizado responde a una lógica secuencial y sistemática de observación, medición, registro, procesamiento y validación, bajo estándares técnicos de la ingeniería de minas. Los procedimientos se sustentan en protocolos de campo empleados comúnmente en operaciones mineras industriales, complementados con técnicas de análisis digital, fotogrametría, modelamiento volumétrico y control estadístico de datos.

La metodología se basa en el principio de triangulación técnica, que consiste en utilizar múltiples métodos de recolección para medir la misma variable (por ejemplo, fragmentación) y contrastar sus resultados, incrementando la validez interna de las observaciones. Así, los valores granulométricos obtenidos por análisis de imagen,

adicionalmente validados con la observación directa del comportamiento operacional del material fragmentado en el carguío y chancado.

3.4.2 Métodos de recolección de datos

3.4.2.1 Método observacional–comparativo. Este método se aplicará en la evaluación directa de las voladuras realizadas con ambos tipos de explosivos bajo condiciones operativas controladas. La observación técnica incluirá la identificación y registro de parámetros de perforación, carguío, secuencia de iniciación y comportamiento del frente durante el disparo.

El método comparativo permitirá analizar las diferencias en el resultado de la fragmentación y productividad entre las voladuras realizadas con Vertex y aquellas con Emulgex.

3.4.2.2 Método experimental controlado. El método experimental se centra en la aplicación sistemática de voladuras de prueba en bancos equivalentes. En todas ellas se mantendrán constantes los parámetros de diseño de malla: burden, espaciamiento, longitud de taladro, diámetro, taco y secuencia de iniciación, modificando únicamente el tipo de explosivo. Esto permitirá aislar el efecto del explosivo como variable independiente y observar su influencia directa en la fragmentación.

Cada voladura será tratada como un ensayo experimental independiente, en el que se controlarán variables geológicas (litología, resistencia, fracturamiento) y operativas (precisión de perforación y carga). Los resultados se registrarán de forma estructurada y se contrastarán estadísticamente.

3.4.2.3 Método de análisis granulométrico indirecto (análisis digital de imágenes). El análisis digital de imágenes constituye el método primario de medición de la fragmentación, debido a su eficiencia, precisión y reproducibilidad. Se utilizarán los programas que procesan fotografías de la pila volada y generan curvas granulométricas automáticas basadas en la detección de bordes y calibración de escala.

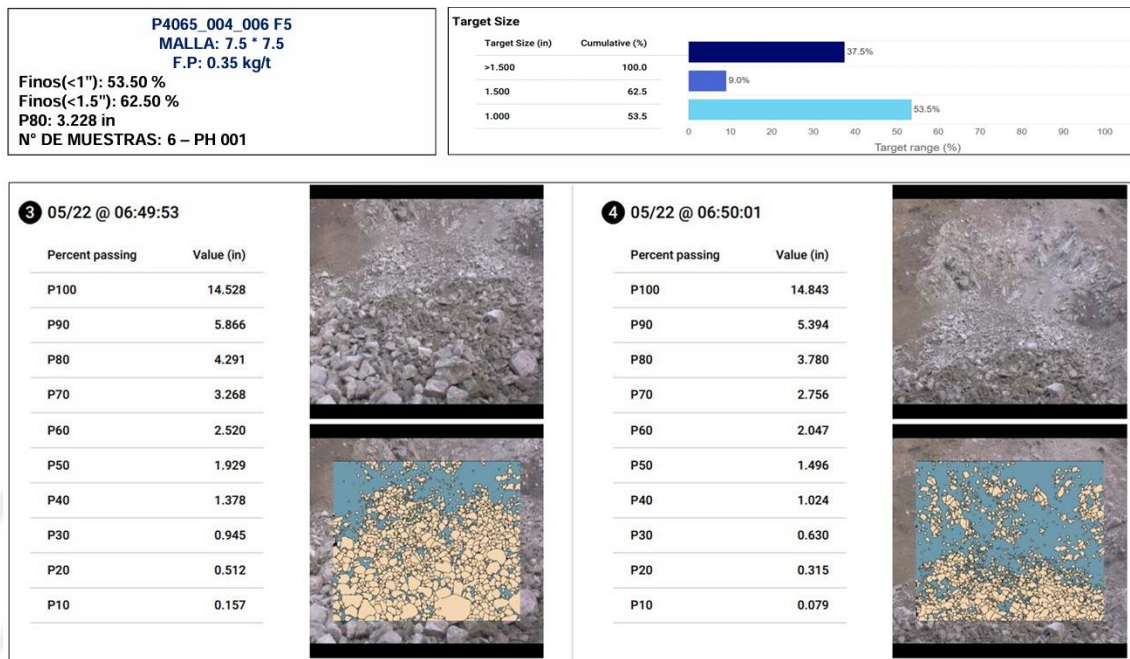
El procedimiento incluirá:

- Captura de imágenes de alta resolución mediante el equipo Portametrics.
- Corrección de iluminación, perspectiva y ángulo de visión.
- Procesamiento digital de las imágenes para delimitar los fragmentos, generar histogramas de tamaño y calcular parámetros estadísticos (P80, coeficiente de uniformidad “m”).
- Creación de reportes de fragmentación

La precisión del método digital dependerá del control de la escala, la calidad de la imagen y la calibración con muestras físicas.

Figura 1

Ejemplo de reporte de fragmentación



Nota: Ejemplo de los parámetros y la curva granulométrica generados por el sistema de análisis digital.

3.4.2.4 Método de registro de parámetros de perforación y voladura. Este método incluye la recopilación de información técnica detallada de cada voladura, incluyendo:

- Diámetro de perforación real, profundidad y desviación del taladro.
- Carga total de explosivo por taladro (kg), densidad del producto y longitud del taco.
- Condiciones de humedad del frente.

Estos datos se obtendrán mediante fichas de registro estandarizadas y reportes operativos del área de perforación y voladura.

3.4.2.5 Método de medición de indicadores operativos. La medición de la eficiencia mina-planta se realizará mediante la recopilación de información de los sistemas de control y monitoreo de flota. Se registrarán los siguientes indicadores:

- Tiempo promedio de carguío por ciclo (min/ciclo).
- Toneladas cargadas por hora por pala o cargador frontal (t/h).

Cada indicador será calculado a partir de los registros digitales y verificado mediante observación directa. Se analizará la correlación entre la fragmentación obtenida y los tiempos de operación.

3.4.2.6 Método de análisis económico comparativo. Finalmente, se recopilarán datos de costos directos e indirectos para ambos explosivos, incluyendo:

- Costo unitario del explosivo (USD/tn).
- Consumo promedio por tonelada fragmentada.
- Consumo energético del chancado primario (kWh/t).
- Tiempos improductivos.

Estos datos permitirán calcular un índice de costo por tonelada útil, con el cual se evaluará la rentabilidad técnica de cada explosivo.

3.4.3 Seguridad y cumplimiento normativo

Dado que la investigación involucra el manejo de explosivos industriales y actividades de campo en una operación minera, todas las tareas se ejecutarán bajo estricto cumplimiento de las normas nacionales de seguridad minera (D.S. N.º 024-2016-EM) y los protocolos internos de la empresa operadora.

El personal participante en la toma de datos estará debidamente acreditado y contará con capacitación en manipulación segura de explosivos y en procedimientos de voladura. No se realizarán pruebas experimentales que alteren las condiciones normales de seguridad del tajo.

Las mediciones, capturas de imágenes y recolección de muestras se realizarán únicamente después de la autorización formal del área de seguridad y voladura, garantizando que el frente esté libre de gases y material inestable.

3.5 Plan de análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos constituye una etapa esencial en la validación técnica de esta investigación, ya que permite convertir los resultados obtenidos en campo en información estructurada, objetiva y cuantificable. El propósito de este plan es evaluar, describir y comparar cuantitativamente el comportamiento de las variables estudiadas para determinar el efecto del tipo de explosivo (Vertex o Emulgex) sobre los parámetros de fragmentación, eficiencia operacional y costo mina-planta.

A diferencia de un enfoque inferencial o de modelamiento, este plan adopta una metodología descriptiva-correlacional, centrada en el análisis de la tendencia central, dispersión, variabilidad y relaciones funcionales entre las principales variables medidas, sin aplicar pruebas de significancia ni regresión matemática, pero asegurando rigor estadístico en la representación y comparación de los datos.

3.5.1 Validación inicial de consistencia

Se revisará cada ficha técnica y registro electrónico para comprobar que los datos sean coherentes con las condiciones de la voladura. Los valores inconsistentes o faltantes se eliminarán o se documentarán como observaciones no válidas.

3.5.2 Preparación y depuración de datos

Los datos obtenidos durante las mediciones de campo; fragmentación, tiempos de carguío, número de boulders, productividad y costos. Serán organizados, verificados y depurados siguiendo un protocolo técnico de aseguramiento de calidad (QA/QC).

3.5.2.1 Depuración.

- Se eliminarán registros incompletos, duplicados o inconsistentes.
- Se verificará la coherencia entre variables dependientes, especialmente en los valores extremos de P80, boulders y productividad.
- Los datos que se aparten ± 3 desviaciones estándar de la media se considerarán outliers y serán analizados individualmente antes de decidir su exclusión.

3.5.2.2 Estandarización. Todas las variables serán expresadas en unidades físicas normalizadas (mm, t/h, USD/t) para asegurar consistencia entre mediciones.

3.5.3 Análisis estadístico descriptivo

El análisis descriptivo permitirá obtener una visión general del comportamiento de las variables bajo estudio. Se calcularán medidas de tendencia central y de dispersión, así como representaciones gráficas de los resultados obtenidos para cada tipo de explosivo.

a. Parámetros estadísticos

Para cada variable (P80, número de boulders, costo), se calcularán los siguientes indicadores:

- Media aritmética
- Mediana

- Moda
- Varianza
- Desviación Estándar
- Coeficiente de variación
- Mínimo y máximo

b. Representación grafica

Los resultados descriptivos se representarán mediante:

- Diagramas comparativos entre los dos tipos de explosivos.

3.5.4 *Análisis correlacional*

Con el fin de determinar la relación entre las variables dependientes, se aplicará un análisis de correlación de Pearson, que permite evaluar la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

La fórmula del coeficiente de correlación r es:

$$r = \frac{\sum (xi - x)(yi - y)}{\sqrt{\sum (xi - x)^2 \sum (yi - y)^2}}$$

Los valores de r se interpretarán así:

- $r > 0.7$: Correlación fuerte positiva.
- $0.4 < r < 0.7$: Correlación moderada.
- $r < 0.4$: Correlación débil o nula.

Se aplicará esta técnica principalmente entre las siguientes variables:

- P80 y productividad del carguío.

- P80 y costo por tonelada.
- Número de boulders y productividad.

La existencia de correlaciones significativas permitirá demostrar cuantitativamente la influencia de la fragmentación sobre la eficiencia mina-planta.

3.5.5 *Análisis comparativo gráfico*

Para reforzar la interpretación, se elaborarán gráficos comparativos entre los explosivos basados en los valores promedio obtenidos.

3.5.5.1 Comparativo granulométrico

- Curvas acumuladas de P80 entre Vertex y Emulgex.
- Representación semilogarítmica para visualizar diferencias en distribución fina y gruesa.

3.5.5.2 Comparativo de productividad

- Gráfico de barras que muestre las toneladas por hora obtenidas con cada explosivo.
- Línea de tendencia para evidenciar mejora del ciclo mina-planta.

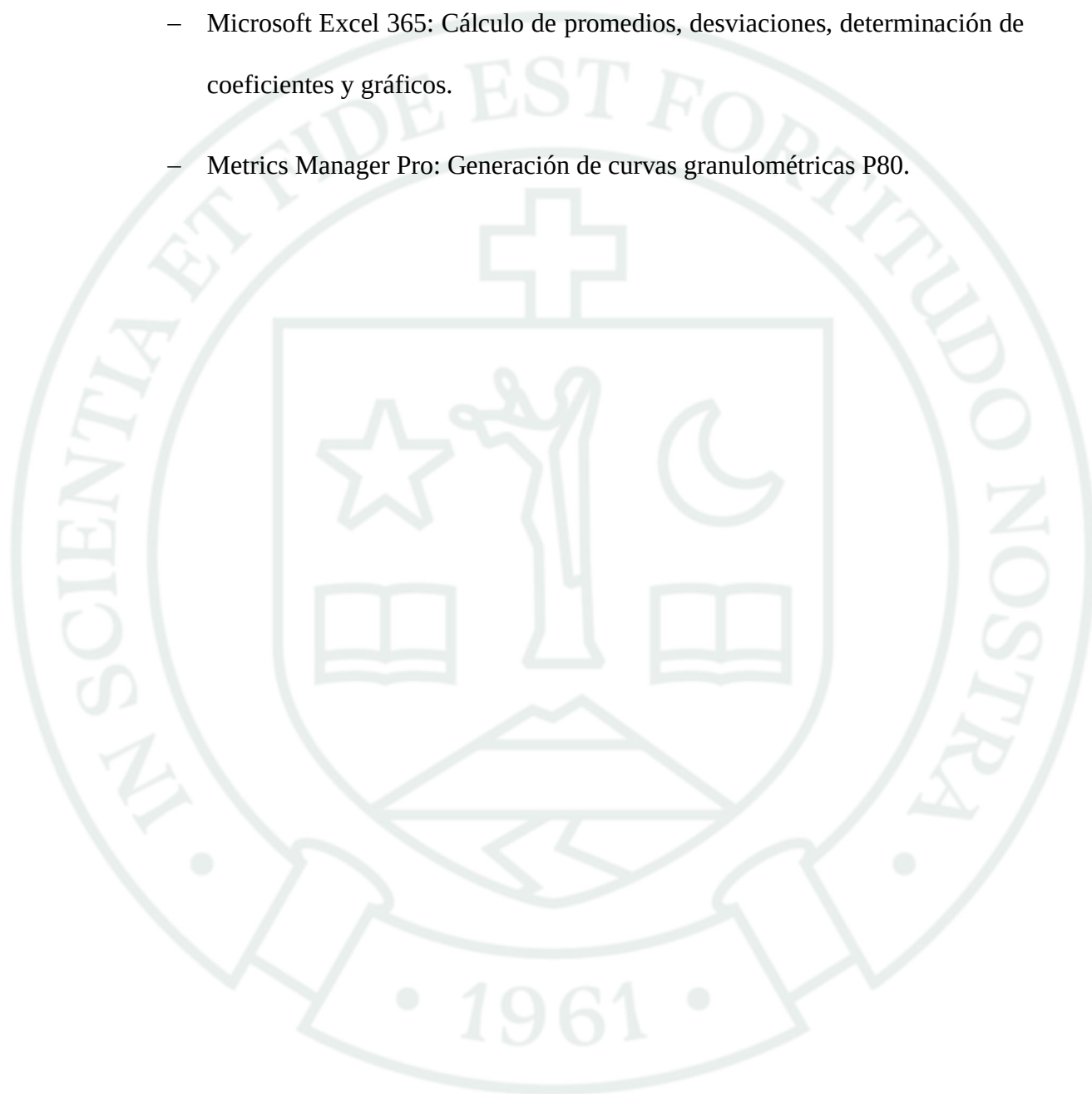
3.5.5.3 Comparativo de costos:

- Gráfico de dispersión entre P80 y costo (USD/t).
- Relación visual que demuestre si una fragmentación más fina reduce los costos operativos.

3.5.6 Herramientas estadísticas y software

Para el procesamiento, organización y visualización de los datos se emplearán los siguientes programas:

- Microsoft Excel 365: Cálculo de promedios, desviaciones, determinación de coeficientes y gráficos.
- Metrics Manager Pro: Generación de curvas granulométricas P80.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis e interpretación de resultados

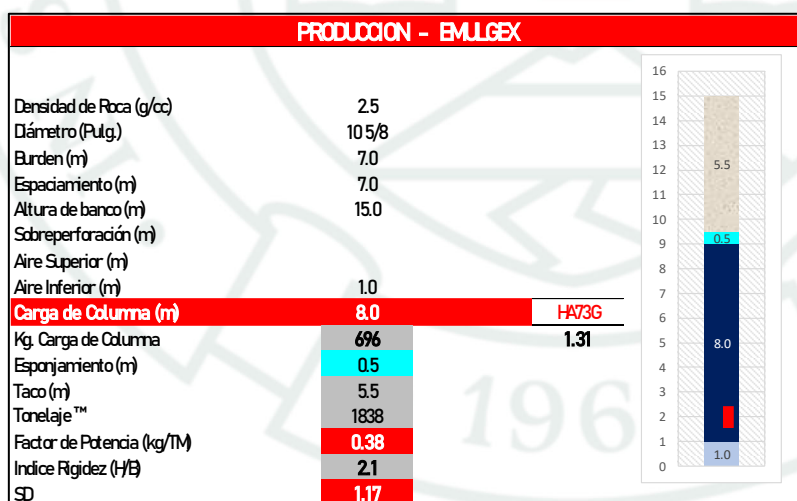
Se efectuaron 15 voladuras en diferentes días en los cuales se tuvo un diseño con ambas emulsiones (Emulgex y Vertex), en las cuales se realizó el seguimiento de sus resultados para analizar su fragmentación.

4.1.1 Voladuras

4.1.1.1 Voladura P4170_003. En la primera voladura analizada se volaron 194 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 7m x 7m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.38 Kg/Tm.

Figura 2

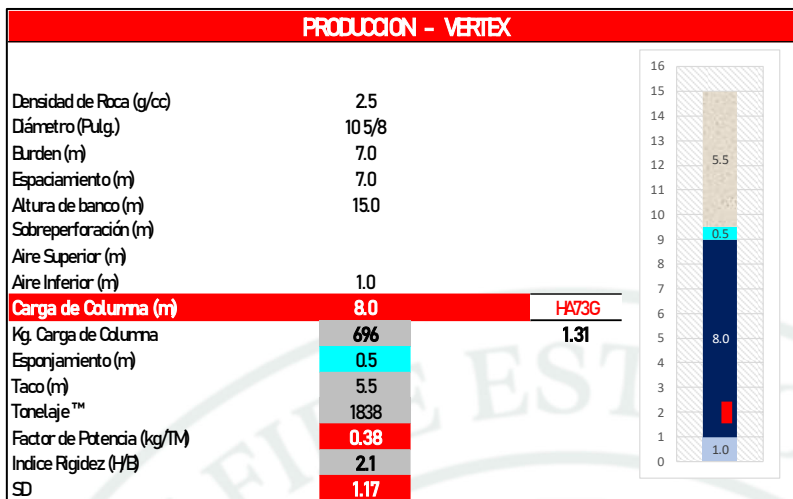
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, octubre 2024.

Figura 3

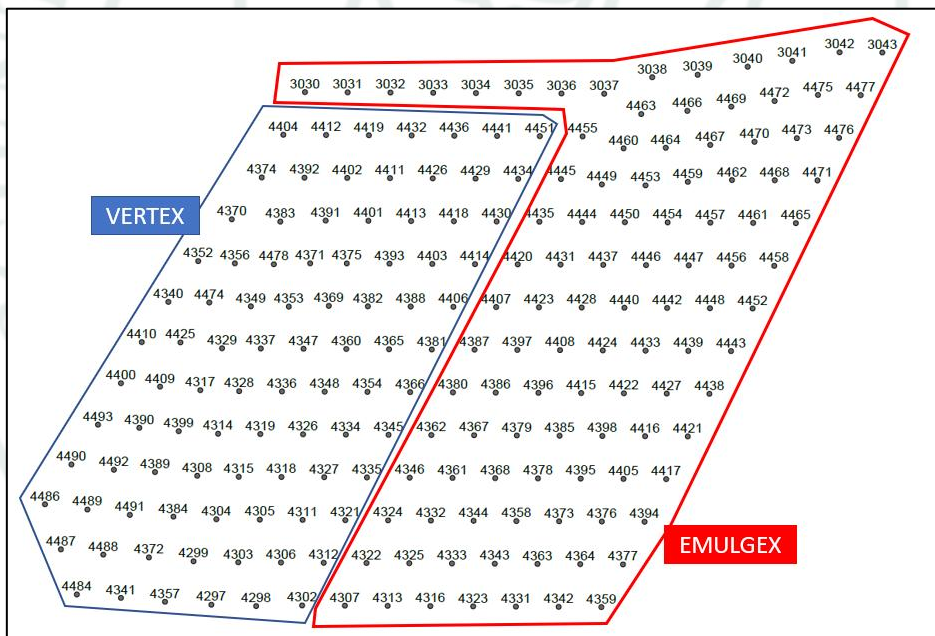
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, octubre 2024.

Figura 4

Diseño de malla de voladura

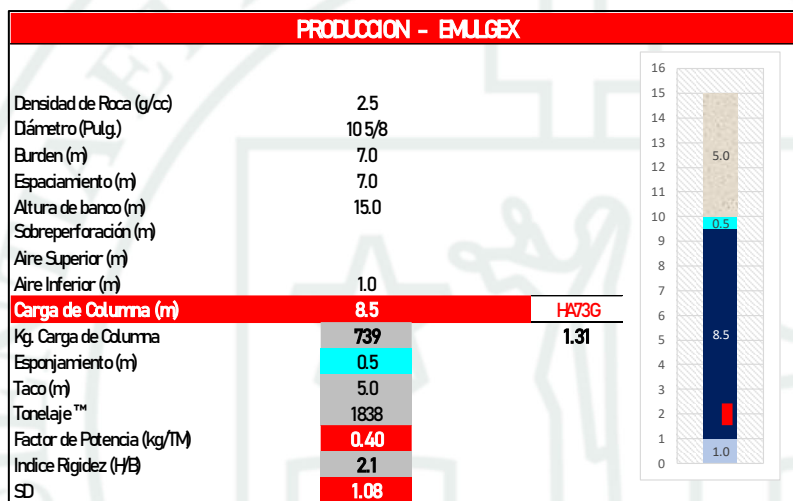


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, octubre 2024.

4.1.1.2 Voladura P4125_051. En la segunda voladura analizada se volaron 119 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 5.5m x 5.5m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, con sobre perforación de 1 m y un factor de potencia de 0.40 Kg/Tm.

Figura 5

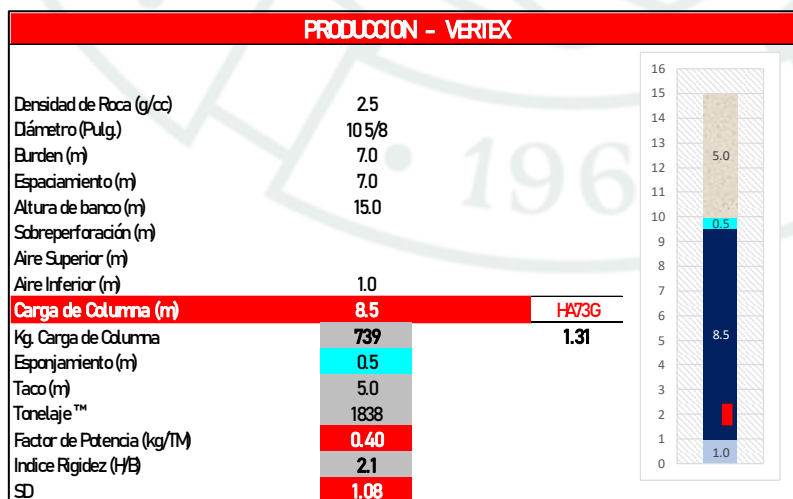
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, octubre 2024.

Figura 6

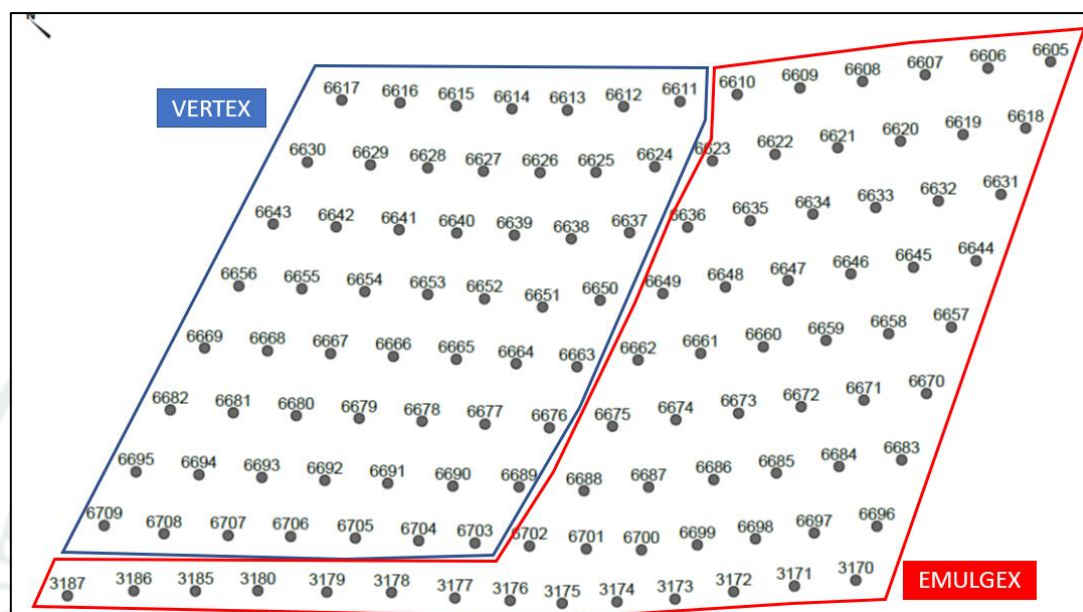
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, octubre 2024.

Figura 7

Diseño de malla de voladura

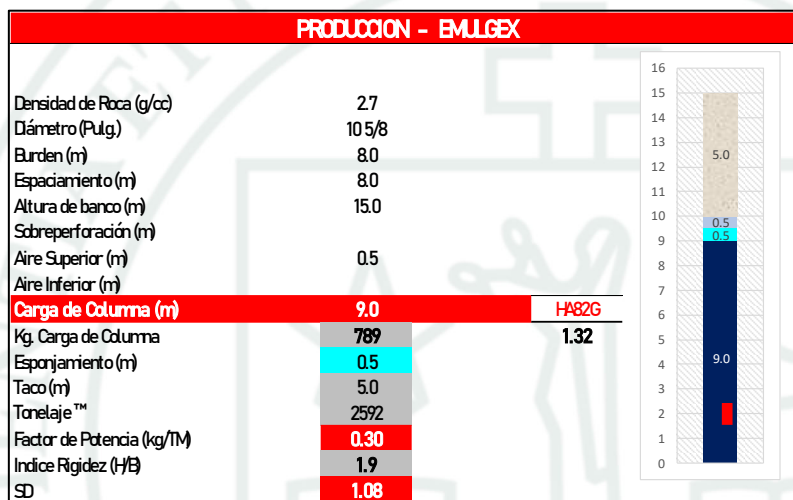


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, octubre 2024.

4.1.1.3 Voladura P4050_01_02. En la tercera voladura analizada se volaron 306 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 8m x 8m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA82G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.30 Kg/Tm.

Figura 8

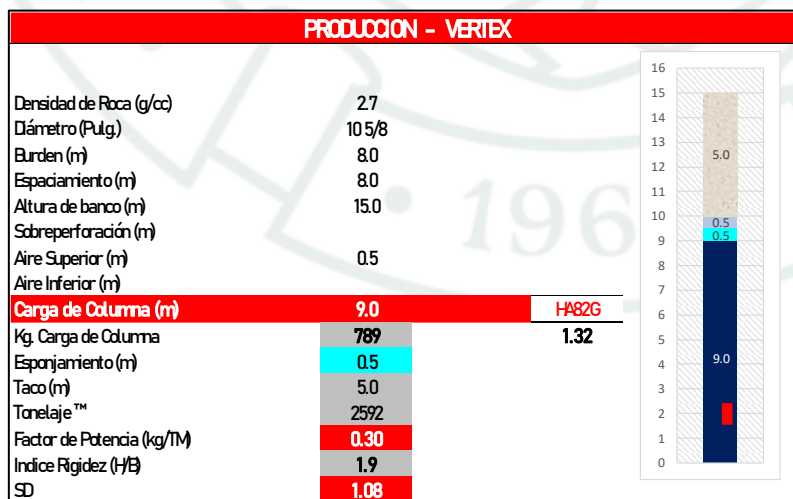
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, octubre 2024.

Figura 9

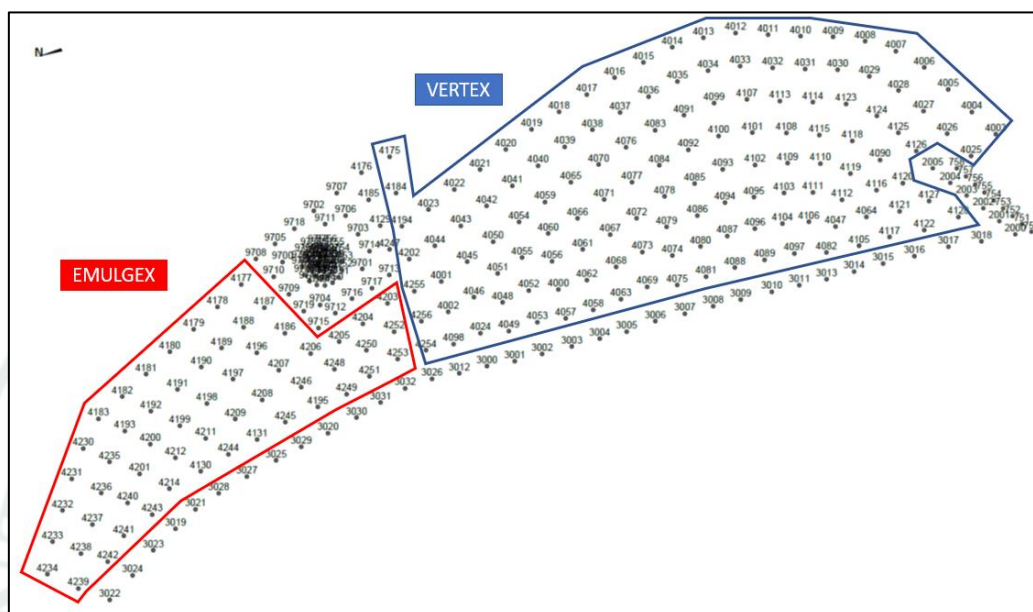
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, octubre 2024.

Figura 10

Diseño de malla de voladura

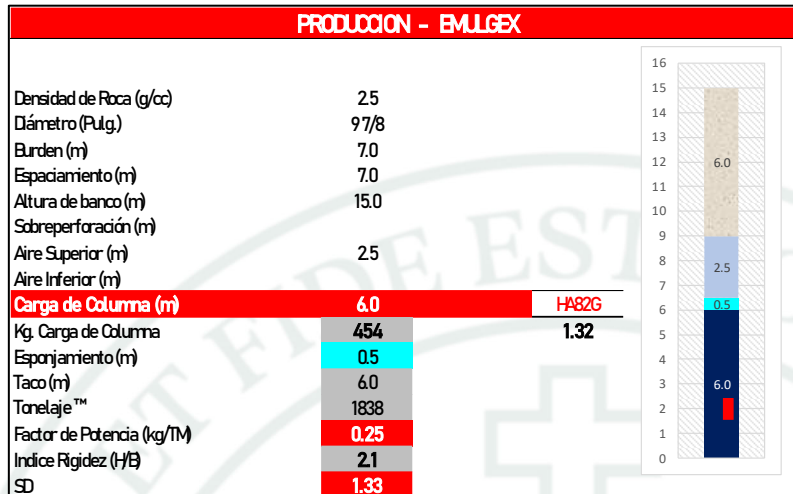


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, octubre 2024.

4.1.1.4 Voladura P4170_002. En la cuarta voladura analizada se volaron 217 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 7m x 7m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA82G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.30 Kg/Tm.

Figura 11

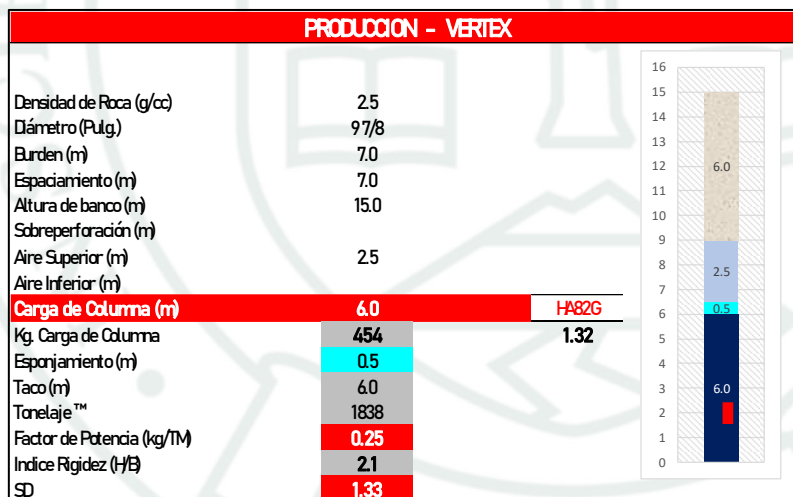
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, octubre 2024.

Figura 12

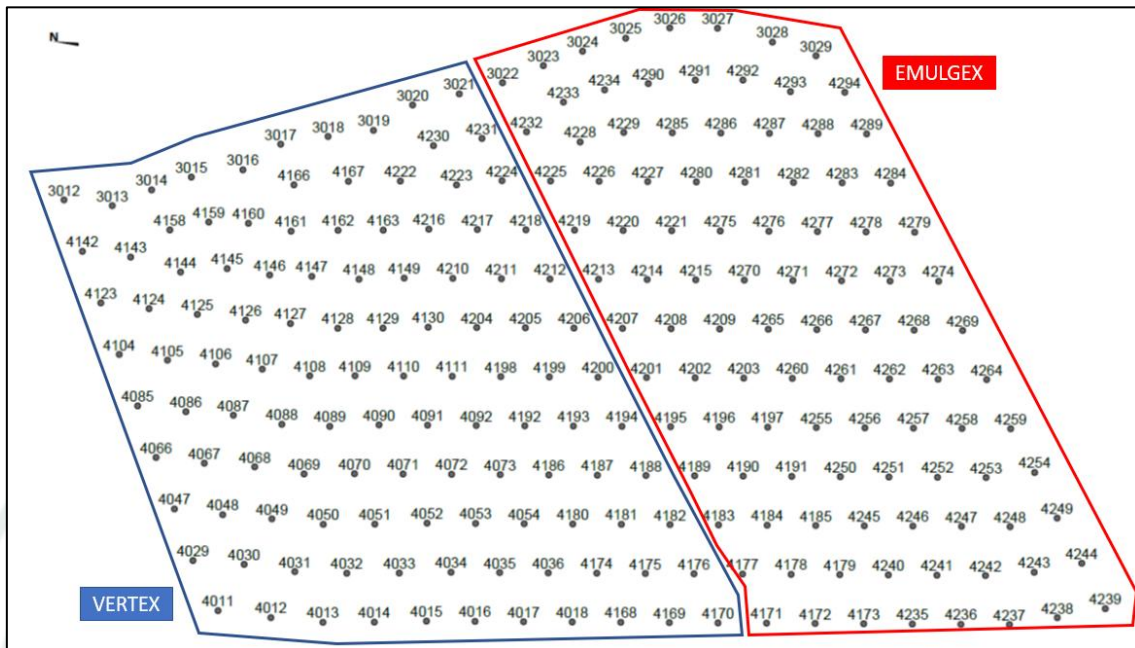
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, octubre 2024.

Figura 13

Diseño de malla de voladura

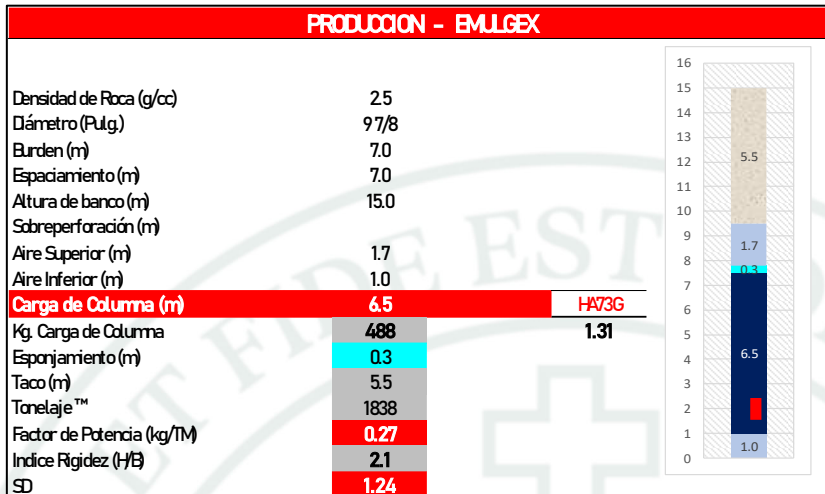


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, octubre 2024.

4.1.1.5 Voladura P4185_004. En la quinta voladura analizada se volaron 139 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 7m x 7m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.27 Kg/Tm.

Figura 14

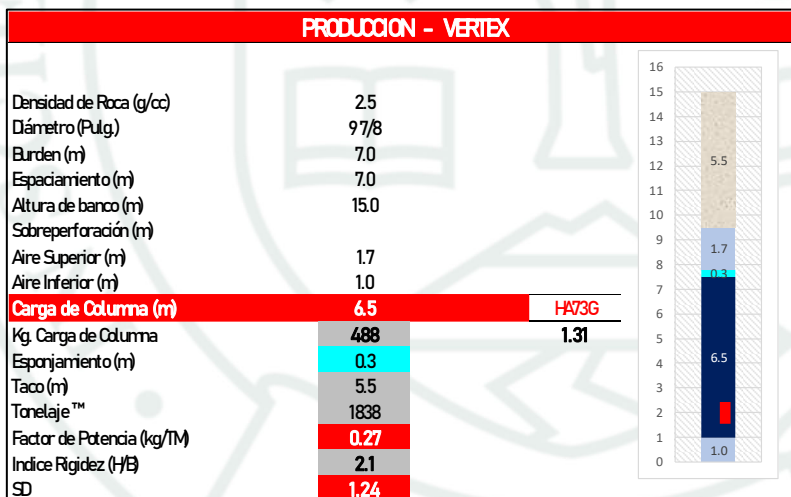
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, octubre 2024.

Figura 15

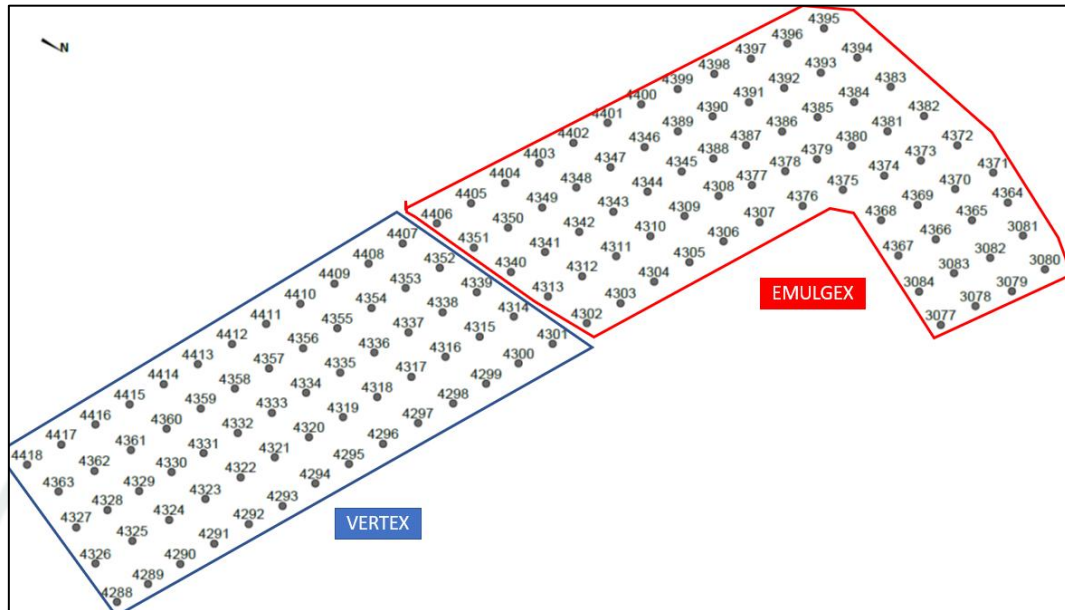
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, octubre 2024.

Figura 16

Diseño de malla de voladura

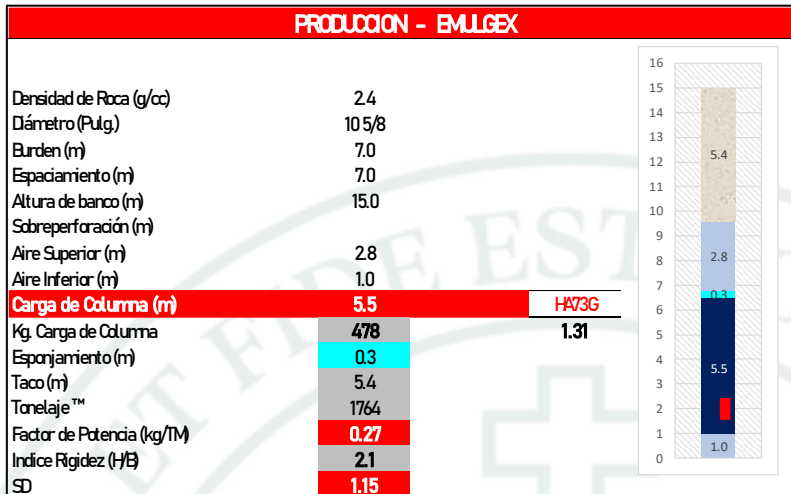


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, octubre 2024.

4.1.1.6 Voladura P4110_05. En la sexta voladura analizada se volaron 173 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 7m x 7m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.27 Kg/Tm.

Figura 17

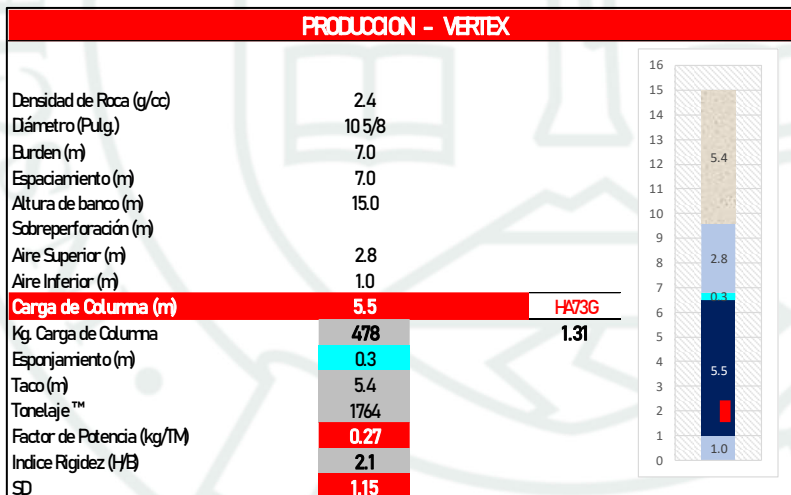
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024.

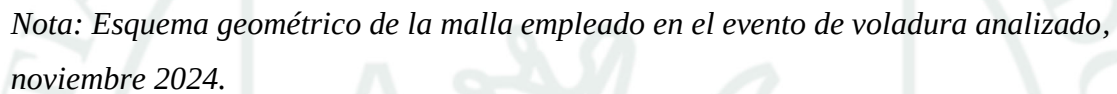
Figura 18

Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024.

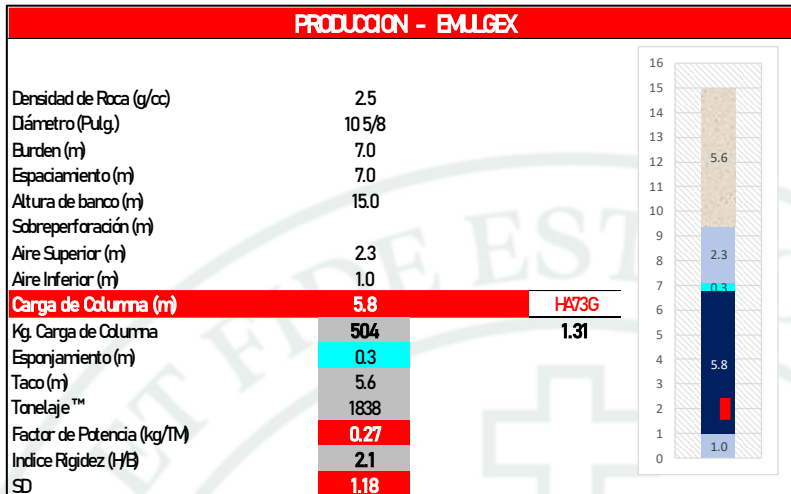
Diseño de malla de voladura



64

Figura 20

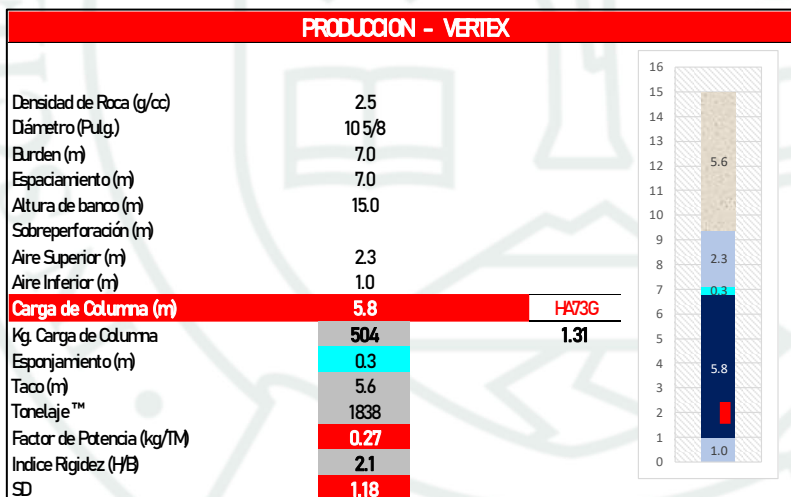
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024.

Figura 21

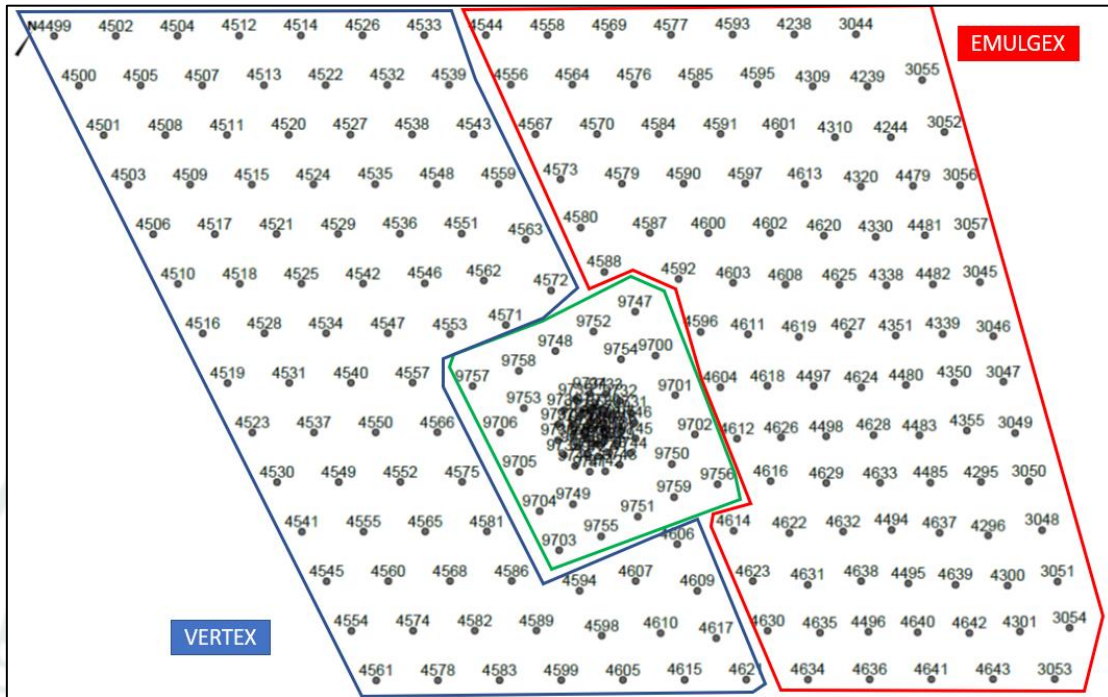
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024.

Figura 22

Diseño de malla de voladura

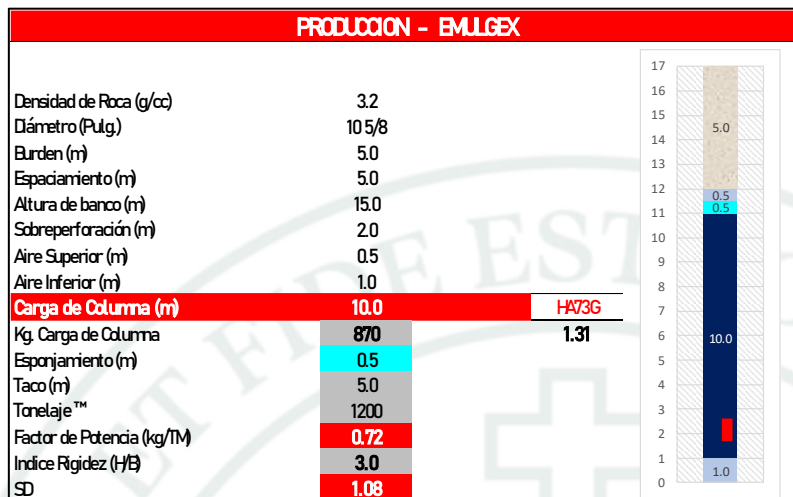


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, noviembre 2024.

4.1.1.8 Voladura P4140_025. En la octava voladura analizada se volaron 195 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 5m x 5m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, con sobre perforación de 2 m y un factor de potencia de 0.72 Kg/Tm.

Figura 23

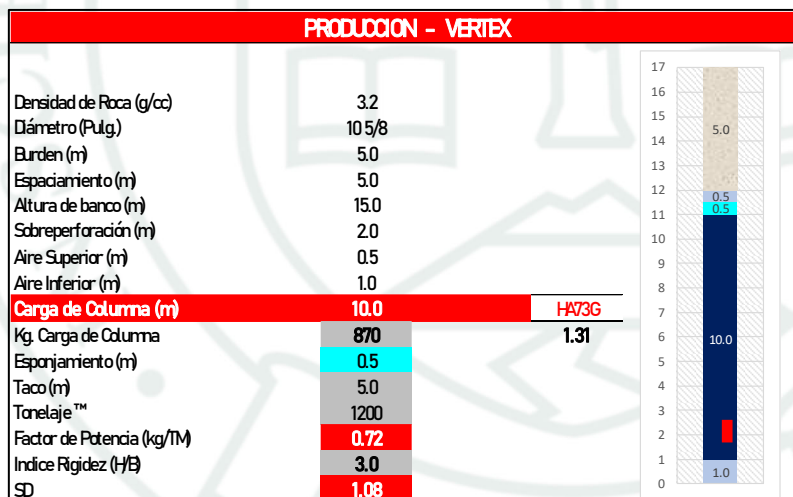
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024.

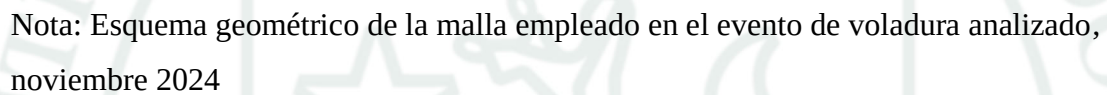
Figura 24

Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024.

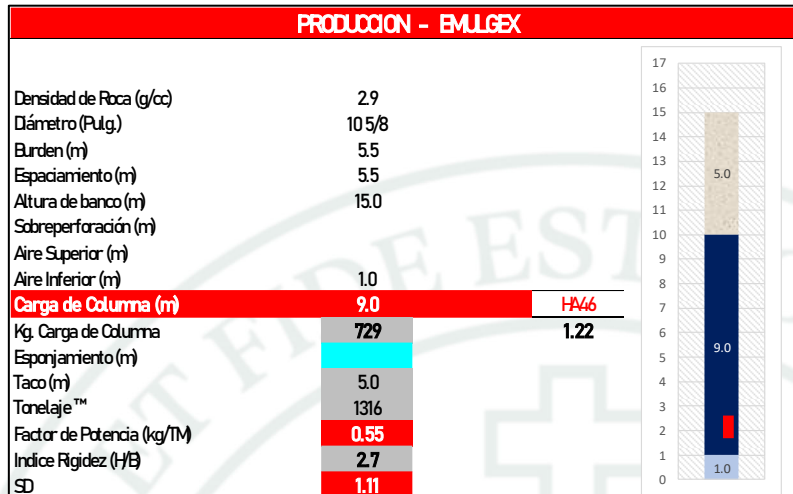
Diseño de malla de voladura



68

Figura 26

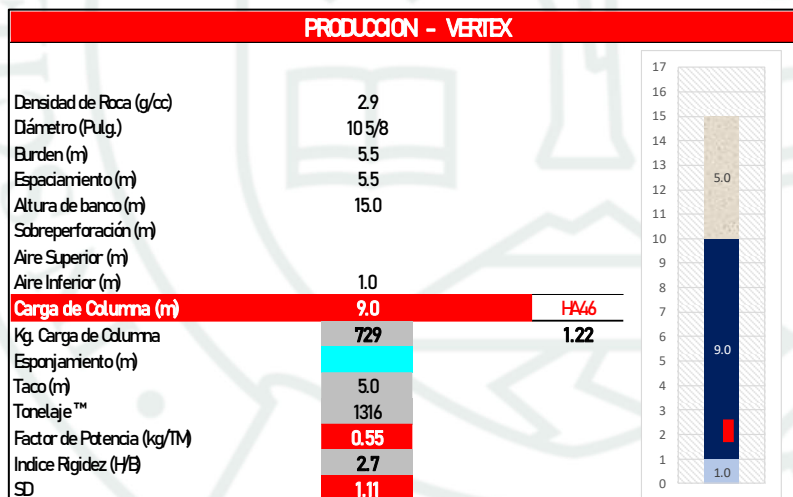
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024.

Figura 27

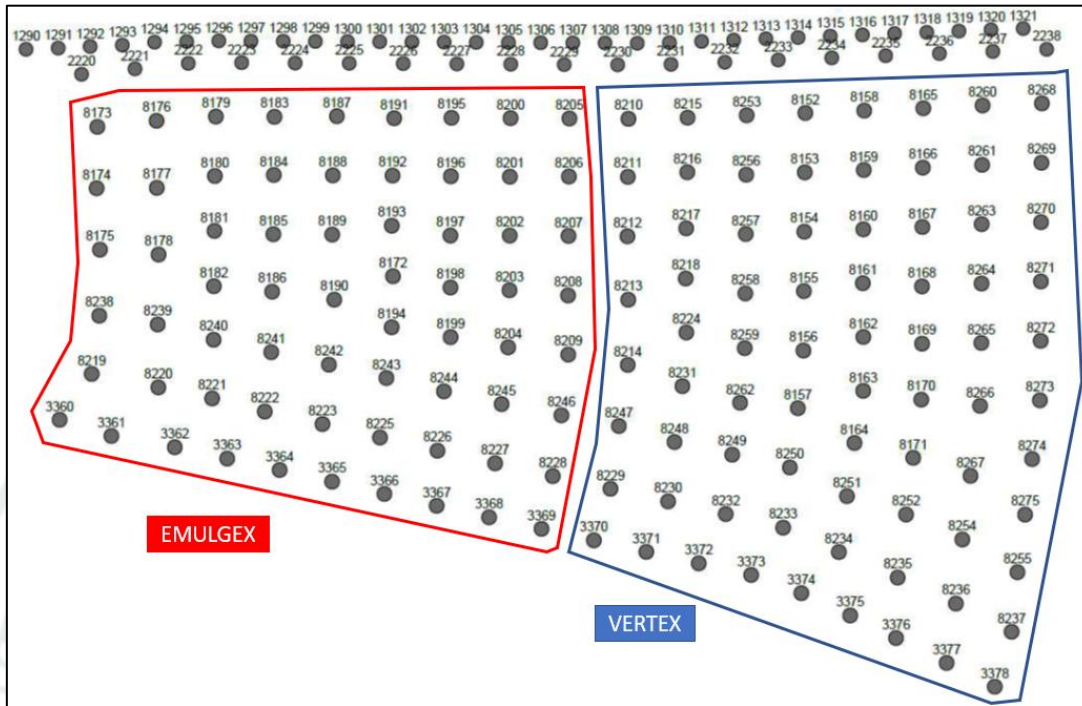
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024.

Figura 28

Diseño de malla de voladura

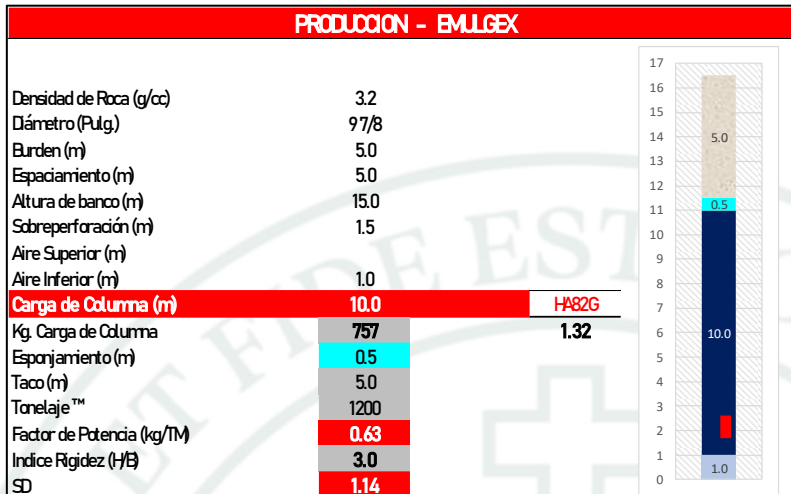


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, noviembre 2024

4.1.1.10 Voladura P4125_009. En la décima voladura analizada se volaron 226 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgey y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 5m x 5m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA82G; teniendo una altura de banco de 15 m, con sobre perforación de 1.5m y un factor de potencia de 0.63 Kg/Tm.

Figura 29

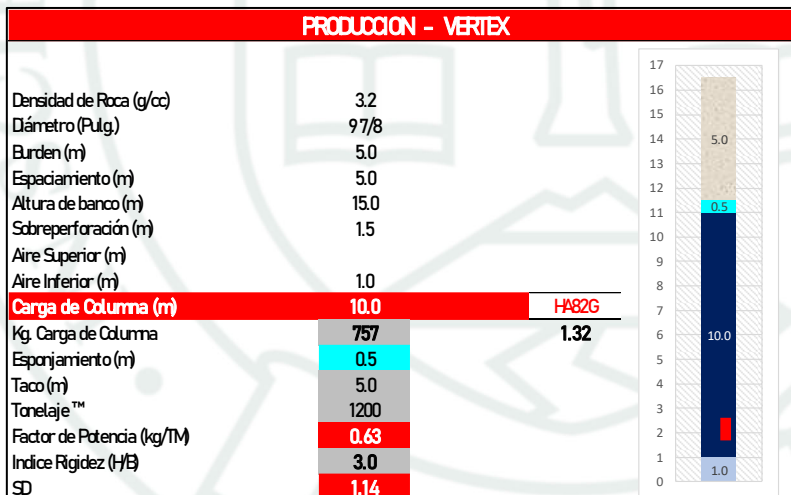
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024.

Figura 30

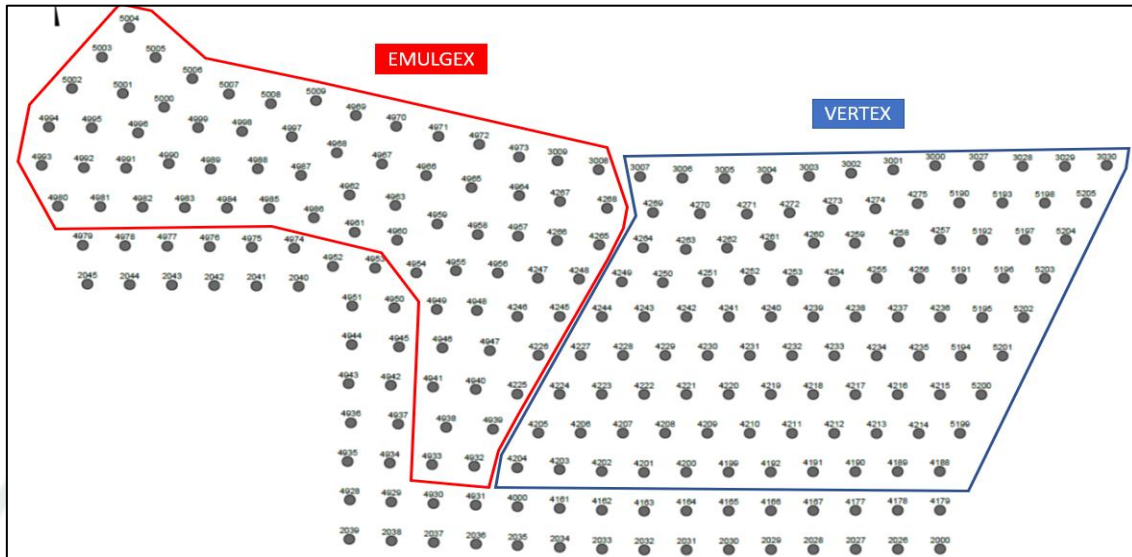
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024.

Figura 31

Diseño de malla de voladura



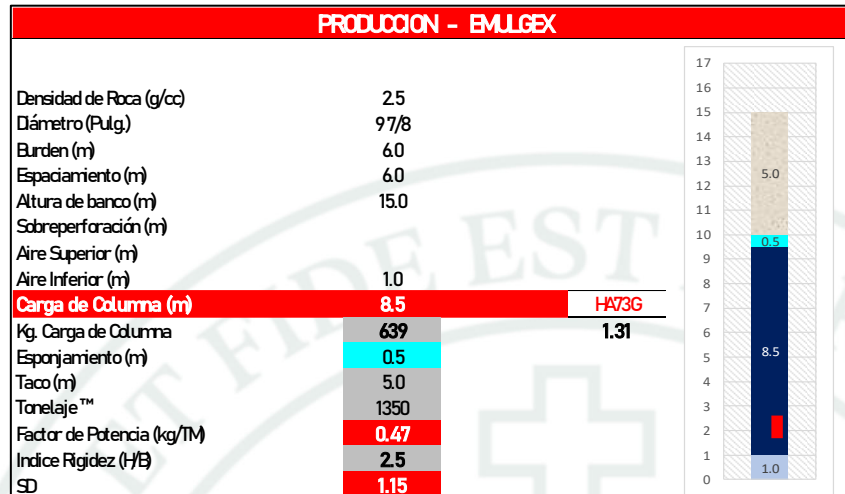
Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, noviembre 2024

4.1.1.11 Voladura P4170_004_005.

En la onceava voladura analizada se volaron 173 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 6m x 6m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.47 Kg/Tm.

Figura 32

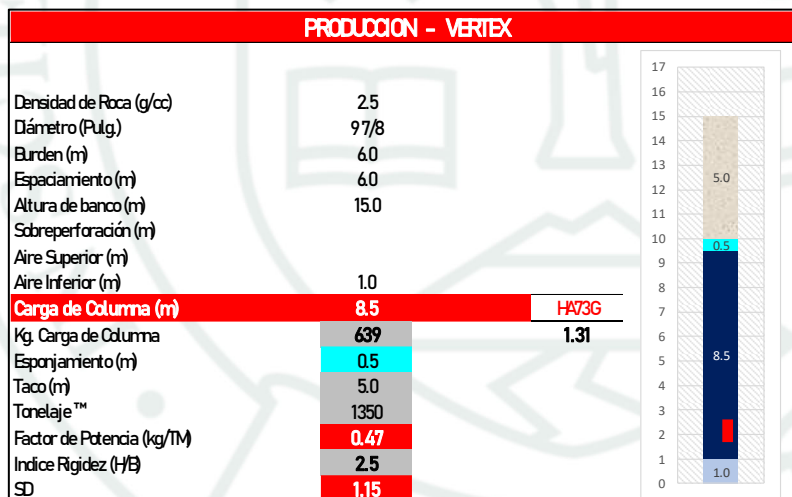
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, noviembre 2024

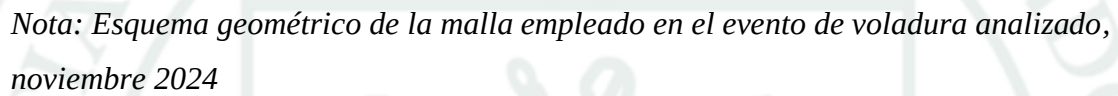
Figura 33

Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, noviembre 2024

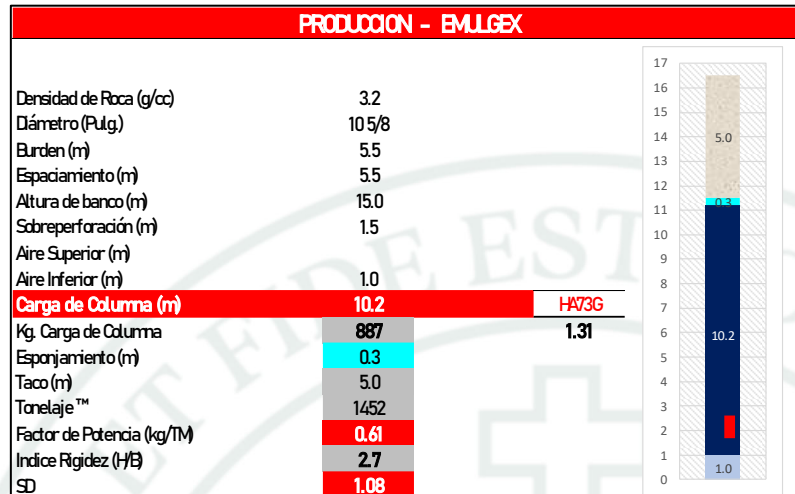
Diseño de malla de voladura



74

Figura 35

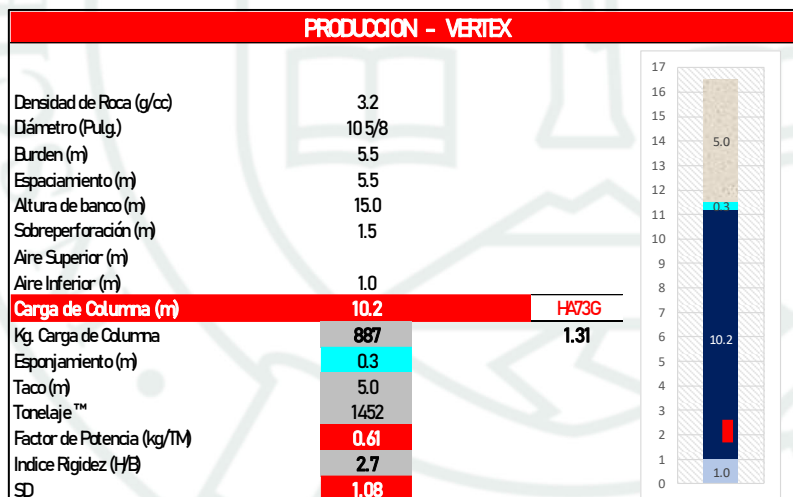
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, diciembre 2024

Figura 36

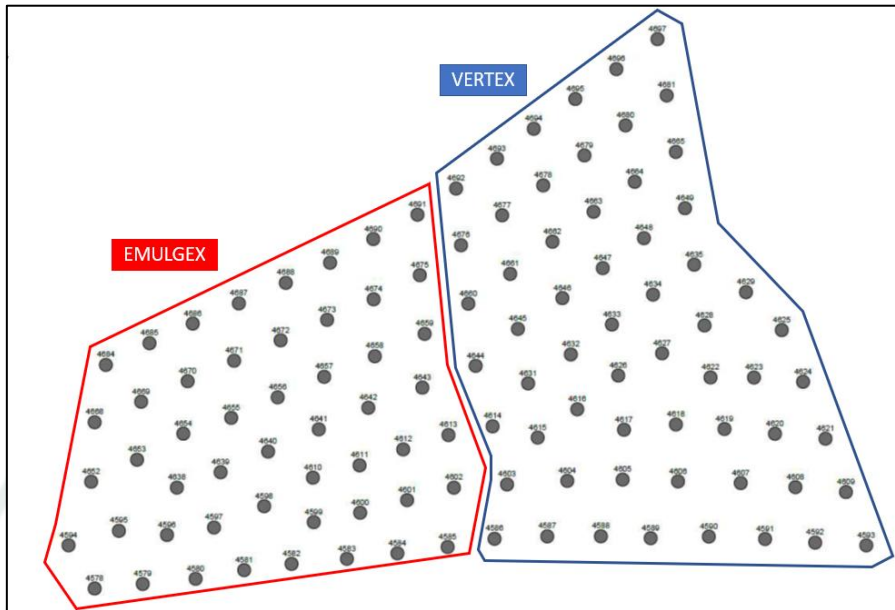
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, diciembre 2024

Figura 37

Diseño de malla de voladura



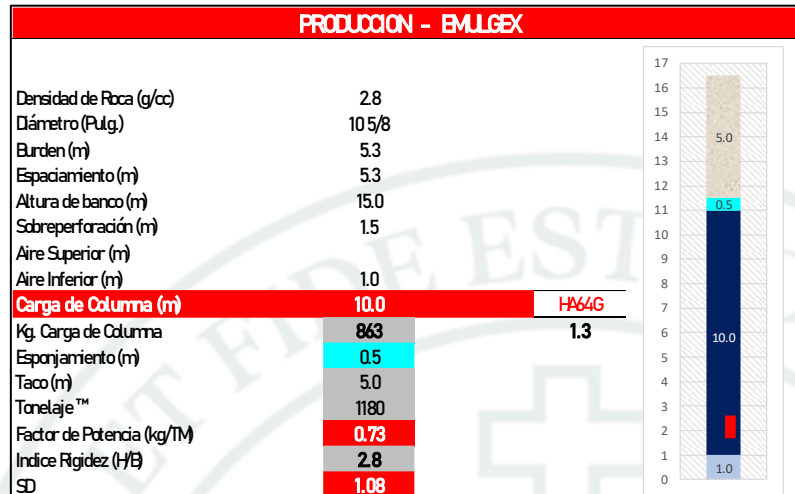
Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, diciembre 2024

4.1.1.13 Voladura P4110_014B_016B_017_019.

En la treceava voladura analizada se volaron 199 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 5.3m x 5.3m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA64G; teniendo una altura de banco de 15 m, con sobre perforación de 1.5m y un factor de potencia de 0.73 Kg/Tm.

Figura 38

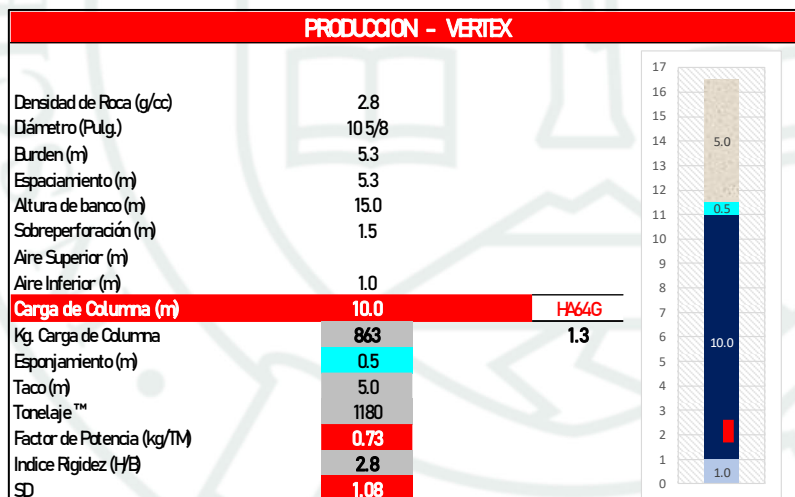
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, diciembre 2024

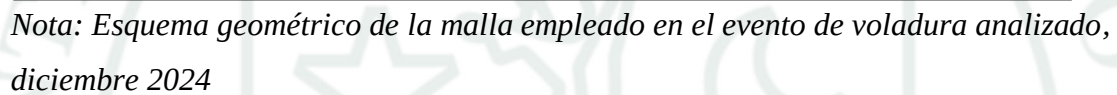
Figura 39

Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, diciembre 2024

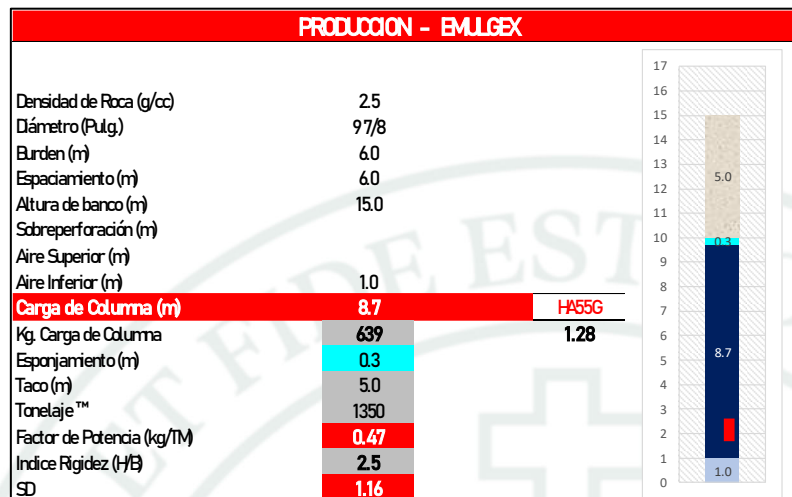
Diseño de malla de voladura



78

Figura 41

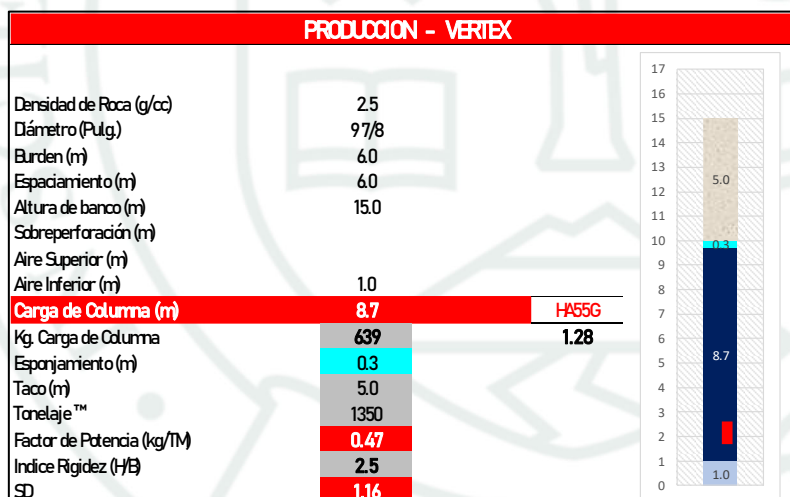
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, diciembre 2024

Figura 42

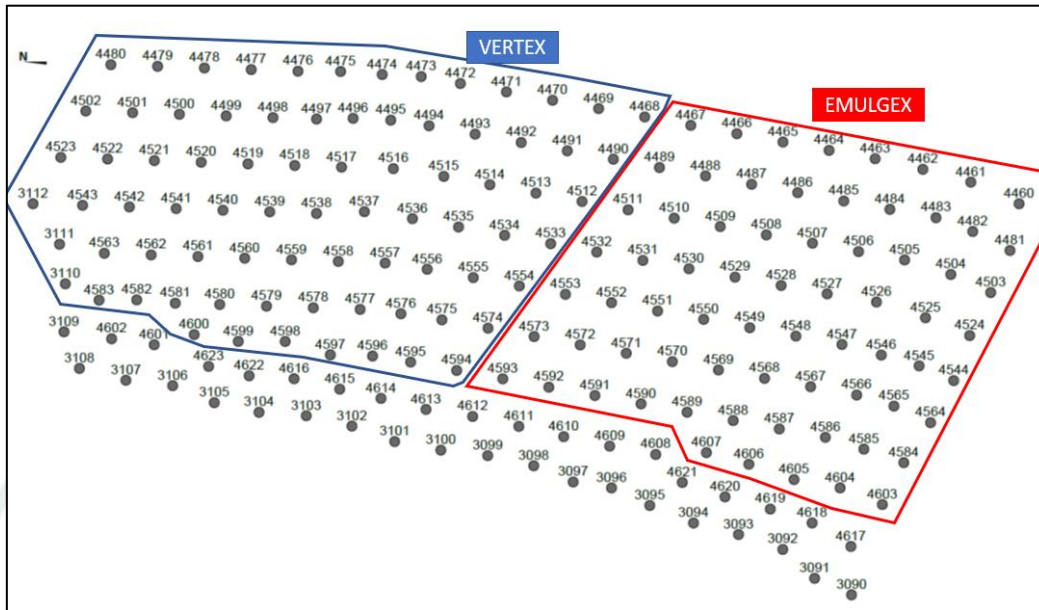
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, diciembre 2024

Figura 43

Diseño de malla de voladura

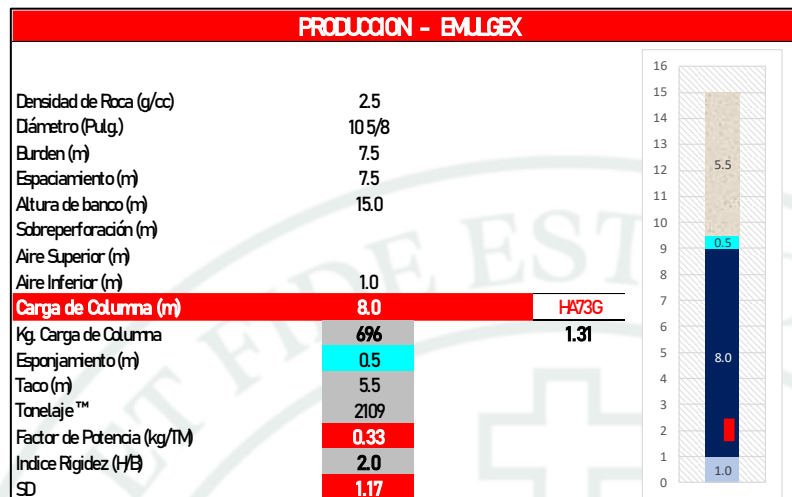


Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, diciembre 2024

4.1.1.15 Voladura 4065_09_10. En la quinceava voladura analizada se volaron 285 taladros, teniendo el uso de las dos emulsiones estudiadas (Emulgex y Vertex). Se utilizó una malla de perforación de 7.5m x 7.5m en taladros de producción, usando la mezcla del explosivo HA73G; teniendo una altura de banco de 15 m, sin sobre perforación y un factor de potencia de 0.33 Kg/Tm.

Figura 44

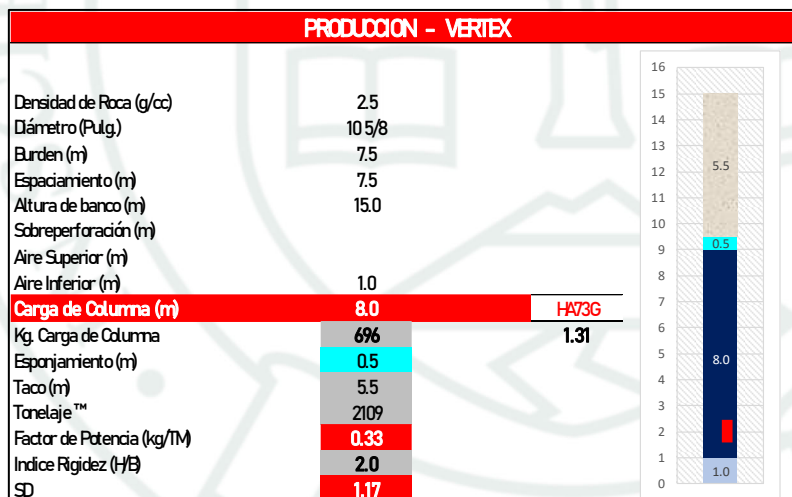
Diseño con Emulgex



Nota: Representación gráfica de la distribución de carga y parámetros específicos utilizando la emulsión gasificable Emulgex, diciembre 2024

Figura 45

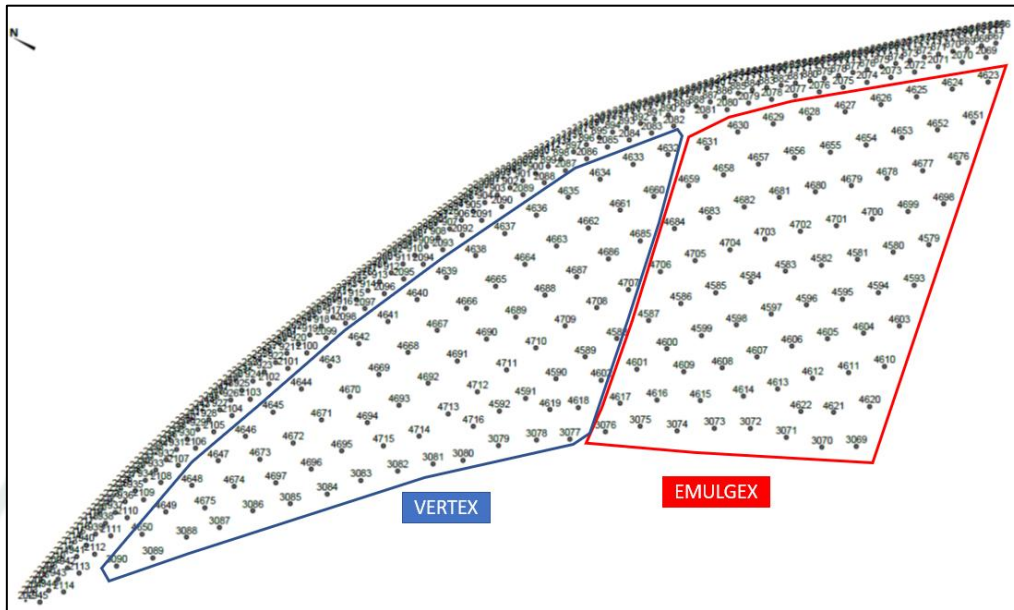
Diseño con Vertex



Nota: Configuración del diseño de carga con la emulsión Vertex para mejorar la fragmentación, diciembre 2024

Figura 46

Diseño de malla de voladura



Nota: Esquema geométrico de la malla empleado en el evento de voladura analizado, diciembre 2024

4.1.2 Resultados de fragmentación

La fragmentación constituye uno de los indicadores más sensibles del desempeño de la voladura. En esta investigación, se evaluó mediante análisis digital de imágenes procesadas con el software Metrics Manager Pro.

El parámetro principal considerado fue el P80 y el porcentaje de finos.

Tabla 6*Diferencias en resultado*

Parámetro	Vertex	Emulgex	Diferencia (%)
P80(pulg.)	3.93	5.17	31.55
% Boulders (>1m.)	4.8	7.8	38.46
% Finos (<1 pulg.)	45	34.2	24

Nota: Resumen comparativo de los resultados de fragmentación obtenidos en campo, donde se consolida la superioridad de Vertex, evidenciando una fragmentación más eficiente que la obtenida con Emulgex.

El análisis muestra que el uso del explosivo Vertex genera una fragmentación más fina y uniforme.

La reducción del tamaño P80 en un 31.55% y la disminución del número de boulders en 38.46% representan una mejora sustancial en la calidad del material fragmentado.

Asimismo, el incremento del parámetro de uniformidad n confirma una distribución granulométrica más homogénea.

Desde el punto de vista operativo, esta diferencia se traduce en un material de mayor fluidez, menor resistencia al carguío y mayor eficiencia del ciclo mina-planta.

En términos técnicos, la mejora obtenida puede atribuirse a la mayor sensibilidad y energía efectiva del explosivo Vertex, cuya velocidad de detonación ($VOD \approx 5,900$ m/s) y presión de detonación aseguran una propagación más uniforme de la onda de choque y una mejor gasificación dentro del taladro.

Durante la inspección visual posterior a las voladuras, los frentes detonados con Vertex presentaron una superficie limpia y un esparcimiento homogéneo, con ausencia de zonas masivas sin fracturar. En contraste, las voladuras con Emulgex mostraron

acumulaciones de sobrebloques en la zona central del banco, indicio de una distribución irregular de energía.

Estos resultados corroboran lo señalado por Puma y Llerena (2021) y Maza y Nivicela (2024), quienes demostraron que una emulsión con mejor capacidad de gasificación y control de energía genera una reducción significativa del tamaño P80 y un incremento en la uniformidad de la fragmentación.

En síntesis, la fragmentación lograda con Vertex cumple con los parámetros óptimos exigidos para el transporte y chancado primario, lo que permite afirmar que el explosivo produce una fragmentación técnica y económicamente eficiente.

4.1.3 Desempeño operacional

La fragmentación de la roca tiene una influencia directa sobre la productividad de las operaciones de carguío y transporte. Por ello, se realizó un seguimiento detallado de los tiempos de ciclo, productividad horaria y consumo de combustible de la maquinaria principal, manteniendo los mismos equipos y condiciones de trabajo.

Tabla 7

Indicadores de desempeño operacional.

Indicador	Vertex	Emulgex	Variación (%)
Tiempo de carguío (seg/ciclo)	31	45	-31.11
Productividad (t/h)	7,507	6,394	+17.41

Nota: Evaluación de los indicadores de rendimiento en las etapas de carguío y transporte, donde la fragmentación se traduce en beneficios operativos directos.

El comportamiento operativo refleja claramente el impacto de la fragmentación en la eficiencia del ciclo de producción; la reducción del tiempo promedio de carguío en

31.11 % implica un aumento sustancial en la tasa de rotación de camiones, lo que se traduce en mayor productividad y menor consumo energético por tonelada cargada.

En términos técnicos, los resultados confirman que la fragmentación más fina obtenida con Vertex reduce el esfuerzo operativo y aumenta la eficiencia energética global del proceso de carguío. Ello está en línea con el principio de que una buena voladura no solo mejora el avance o la fragmentación, sino también el rendimiento mecánico y el consumo de recursos durante la excavación y el transporte.

4.1.4 Costo mina-planta

La evaluación económica del ciclo mina-planta constituye un indicador integral de eficiencia; en este estudio se consideraron los costos directos de perforación, voladura, carguío, transporte y chancado, a fin de determinar el efecto global del tipo de explosivo sobre la rentabilidad operativa.

Tabla 8

Comparación del costo mina-planta

Componente	Vertex (USD/t)	Emulgex (USD/t)	Diferencia (%)
Perforación	0.94	0.94	-
Voladura	0.72	0.69	+4.3
Carguío	0.61	0.70	-12.9
Chancado primario	0.48	0.56	-14.3
Costo total mina-planta	2.75	2.89	-5.09

Nota: Análisis económico del impacto de la fragmentación en el costo total de la operación, resultando en un costo menor con el uso de la emulsión gasificada Vertex.

A pesar de que el costo directo de voladura con Vertex es ligeramente superior, la mejora lograda en los procesos subsiguientes (carguío y chancado) genera una reducción global del 5.09% en el costo mina-planta. En operaciones de gran escala, esta diferencia se traduce en un ahorro económico relevante.

Además, la disminución del costo por tonelada chancada refleja una reducción en el consumo energético de los equipos de conminución, al ingresar un material con P80 menor y mayor uniformidad.

Desde un punto de vista técnico-económico, este comportamiento confirma el principio de compensación operativa: una voladura más eficiente puede tener un costo unitario ligeramente mayor, pero su efecto acumulativo reduce el costo total del sistema productivo.

Estos resultados están alineados con la tendencia moderna de gestión mina-planta, que considera la voladura como una etapa estratégica dentro del sistema global de optimización.

4.1.5 *Análisis correlacional*

Para establecer la relación lineal entre las variables técnicas de diseño de la voladura y los indicadores operativos, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r), considerando variables cuantitativas continuas y presentan un comportamiento lineal.

Los resultados más relevantes muestran una correlación negativa fuerte entre P80 y productividad (-0.93), indicando, que, a menor tamaño de fragmento, mayor rendimiento de carguío.

Del mismo modo, se observó una correlación positiva (+0.95) entre P80 y el costo mina-planta, lo que demuestra que una fragmentación deficiente incrementa los costos operativos.

Estos resultados reflejan un comportamiento coherente con los fundamentos de la mecánica de rocas aplicada a la minería a cielo abierto: una energía de voladura correctamente distribuida mejora la fragmentación y optimiza los procesos posteriores.

La existencia de correlaciones altas y consistentes refuerza la validez de la hipótesis de investigación y demuestra que las variaciones observadas no son producto del azar, sino consecuencia directa del tipo de explosivo utilizado.

4.1.6 Evaluación cualitativa

Durante el proceso experimental se registraron observaciones cualitativas que complementan el análisis estadístico.

Los operadores reportaron que el material proveniente de las voladuras con Vertex presentaba mayor fluidez y menor resistencia a la penetración del cucharón, reduciendo la necesidad de maniobras adicionales.

Asimismo, se constató una menor compactación del material, lo que facilitó la carga y minimizó los atascamientos en tolvas y chancadoras.

Estas percepciones de campo coinciden con los resultados cuantitativos, confirmando que el Vertex permite una operación más estable, segura y eficiente, tanto en el aspecto técnico como en el humano.

4.2 Análisis estadístico

Tabla 9

Estadísticos descriptivos del P80, porcentaje de finos y porcentaje de boulders según tipo de emulsión (Vertex vs Emulgex).

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
P80	Vertex	15	3.9300	0.22681	0.05856
	Emulgex	15	5.1707	0.19927	0.05145
Porcentaje de fino	Vertex	15	45.00	3.703	0.956
	Emulgex	15	34.20	2.859	0.738
Porcentaje de Boulders	Vertex	15	4.8000	0.22361	0.05774
	Emulgex	15	7.8000	0.32950	0.08508
Productividad de carguío	Vertex	15	7507.33	148.376	38.311
	Emulgex	15	6394.40	213.824	55.209

Nota: Se observa que el explosivo Vertex alcanza un P80 y porcentaje de boulders menor; mientras que el porcentaje de fino y productividad de carguío es mayor en comparación con Emulgex, lo que demuestra una fragmentación más fina bajo las mismas condiciones de diseño.

Los estadísticos descriptivos evidencian diferencias marcadas en los indicadores de fragmentación y desempeño operativo según el tipo de emulsión empleada. En relación con el tamaño característico P80, la emulsión Vertex presentó una media de 3.93, con una desviación estándar de 0.23, mientras que Emulgex registró una media significativamente mayor de 5.17 (DE = 0.20), lo que indica que Vertex generó una fragmentación más fina y homogénea. De manera complementaria, el porcentaje de finos fue considerablemente superior en Vertex (45.00%) en comparación con Emulgex (34.20%), lo que refuerza la evidencia de una mayor eficiencia en la distribución granulométrica. Asimismo, la generación de boulders fue notablemente menor en Vertex (4.80%) frente a Emulgex (7.80%), lo cual sugiere una reducción de fragmentos sobredimensionados que podrían afectar la continuidad operacional. Estas diferencias en la calidad de fragmentación se reflejan directamente en la productividad de carguío, donde Vertex alcanzó un promedio

de 7507.33 (ton/hor) frente a 6394.40 (ton/hor) registradas con Emulgex, evidenciando un incremento sustancial en el rendimiento operativo.

Tabla 10

Prueba de normalidad

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.
P80	0.877	30	0.236
Porcentaje de fino	0.964	30	0.395
Porcentaje de Boulders	0.784	30	0.452
Costo Explosivo	0.638	30	0.138
Productividad de carguío	0.863	30	0.115

Nota: Los valores de significancia ($p > 0.05$) confirman que los datos de fragmentación y productividad provienen de una distribución normal, validando el uso posterior de pruebas estadísticas paramétricas.

Los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk indican que todas las variables analizadas presentan una distribución compatible con la normalidad estadística ($p > 0.05$). En el caso del P80 ($W = 0.877$; $p = 0.236$), porcentaje de finos ($W = 0.964$; $p = 0.395$) y porcentaje de boulders ($W = 0.784$; $p = 0.452$), los valores de significancia superan ampliamente el nivel crítico $\alpha = 0.05$, lo que permite asumir que los datos no difieren significativamente de una distribución normal. De igual manera, la variable costo explosivo ($W = 0.638$; $p = 0.138$) y la productividad de carguío ($W = 0.863$; $p = 0.115$) también cumplen con el supuesto de normalidad.

En consecuencia, se justifica el empleo de pruebas estadísticas paramétricas, específicamente la prueba t de Student para muestras independientes y el coeficiente de correlación de Pearson, en el análisis comparativo y correlacional posterior. Este cumplimiento de los supuestos fortalece la validez inferencial de los resultados y permite

una interpretación estadística robusta en la evaluación comparativa entre las emulsiones Vertex y Emulgex.

Tabla 11

Correlación del factor de potencia y los resultados de fragmentación

		Factor de Potencia
Factor de Potencia	Correlación de Pearson	1.00
	Sig. (bilateral)	
	N	30.00
P80	Correlación de Pearson	-0.06
	Sig. (bilateral)	0.75
	N	30.00
Porcentaje de fino	Correlación de Pearson	0.21
	Sig. (bilateral)	0.26
	N	30.00
Porcentaje de Boulders	Correlación de Pearson	-0.02
	Sig. (bilateral)	0.92
	N	30.00
Costo Explosivo	Correlación de Pearson	0.00
	Sig. (bilateral)	1.00
	N	30.00
Productividad de carguío	Correlación de Pearson	0.03
	Sig. (bilateral)	0.89
	N	30.00

Nota: El resultado indica que las varianzas entre los grupos Vertex y Emulgex son iguales, lo que garantiza que la comparación de medias mediante la prueba T sea estadísticamente confiable.

Los resultados del análisis de correlación de Pearson evidencian que el factor de potencia no presenta una relación estadísticamente significativa con los indicadores de fragmentación ni con las variables operativas evaluadas ($p > 0.05$ en todos los casos). En particular, la correlación entre el factor de potencia y el P80 fue muy débil y negativa ($r = -0.06$; $p = 0.75$), indicando que las variaciones en la energía aplicada no explican

cambios relevantes en el tamaño característico de fragmentación. De manera similar, la relación con el porcentaje de finos mostró una correlación positiva baja ($r = 0.21$; $p = 0.26$), mientras que con el porcentaje de boulders fue prácticamente nula ($r = -0.02$; $p = 0.92$). Asimismo, no se observaron asociaciones significativas entre el factor de potencia y la productividad de carguío ($r = 0.03$; $p = 0.89$), ni con el costo del explosivo ($r = 0.00$; $p = 1.00$).

Estos resultados sugieren que, dentro del rango de variación del factor de potencia considerado en las voladuras analizadas, la energía específica no constituye un factor determinante en la calidad de fragmentación ni en el desempeño operativo. En consecuencia, las diferencias observadas previamente en los indicadores granulométricos y productivos estarían más asociadas al tipo de emulsión empleada que a la variación del factor de potencia.

Tabla 12

Correlación entre P80 y el costo explosivo

		P80	Costo Explosivo
P80	Correlación de Pearson	1	,949**
	Sig. (bilateral)		0.000
	N	30	30
Costo Explosivo	Correlación de Pearson	,949**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	
	N	30	30

Nota: Al obtener un p-valor menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, confirmando con un 95% de confianza que el tipo de explosivo influye de manera determinante en el tamaño de la fragmentación.

El análisis de correlación de Pearson muestra una relación positiva muy alta y estadísticamente significativa entre el P80 y el costo del explosivo ($r = 0.949$; $p < 0.001$).

Este coeficiente indica una asociación casi perfecta, lo que implica que a mayores valores de P80 —es decir, fragmentación más gruesa— se asocian mayores costos unitarios del explosivo en las voladuras analizadas. Sin embargo, esta fuerte correlación debe interpretarse con cautela desde el punto de vista metodológico, ya que el costo del explosivo es constante dentro de cada tipo de emulsión (Vertex y Emulgex), por lo que la relación observada refleja principalmente la diferencia estructural entre ambos tipos y no necesariamente una relación causal directa entre fragmentación y costo. En términos prácticos, el resultado confirma que la emulsión de menor costo (Emulgex) es la que presenta valores más altos de P80, mientras que Vertex, con mayor costo unitario, genera fragmentación más fina.

Tabla 13

Correlación entre P80 y Productividad de carguío

		P80	Productividad de carguío
P80	Correlación de Pearson	1	-,930**
	Sig. (bilateral)		0.000
	N	30	30
Productividad de carguío	Correlación de Pearson	-,930**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	
	N	30	30

Nota: La correlación negativa muy alta ($r = -0.93$) resalta que a medida que disminuye el tamaño del fragmento (P80), aumenta la productividad de las palas, optimizando el ciclo de carguío y acarreo.

El análisis de correlación de Pearson evidencia una relación negativa muy alta y estadísticamente significativa entre el P80 y la productividad de carguío ($r = -0.930$; $p < 0.001$). Este resultado indica que a medida que el tamaño característico de fragmentación (P80) disminuye, la productividad de carguío aumenta de manera considerable. En términos prácticos, una fragmentación más fina y uniforme facilita el trabajo de los

equipos de carguío, reduciendo tiempos de excavación y mejorando el rendimiento operativo. La magnitud del coeficiente ($|r| > 0.90$) refleja una asociación muy fuerte, lo que sugiere que el tamaño de fragmento constituye un factor determinante en la eficiencia del proceso mina-planta.

Desde el punto de vista técnico, este hallazgo confirma que la mejora en la calidad de fragmentación obtenida con la emulsión Vertex no solo impacta en parámetros granulométricos, sino que se traduce directamente en un incremento significativo de la productividad, reforzando la hipótesis de que la optimización del P80 es clave para maximizar el desempeño operativo en minería a cielo abierto.

Tabla 14

Correlación entre porcentaje de Boulders y Productividad de carguío

		Porcentaje de Boulders	Productividad de carguío
Porcentaje de Boulders	Correlación de Pearson	1	-,933**
	Sig. (bilateral)		0.000
	N	30	30
Productividad de carguío	Correlación de Pearson	-,933**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	
	N	30	30

Nota: Se evidencia una correlación negativa fuerte, lo que confirma operativamente que la minimización de boulders es crítica para maximizar el rendimiento de los equipos de carguío.

El análisis de correlación de Pearson revela una relación negativa muy fuerte y estadísticamente significativa entre el porcentaje de boulders y la productividad de carguío ($r = -0.933$; $p < 0.001$). Este coeficiente indica que a medida que aumenta la proporción de fragmentos sobredimensionados, la productividad disminuye de forma considerable.

Desde el punto de vista operativo, la presencia de boulders implica mayores tiempos de excavación, posibles interrupciones en el flujo de material y, en algunos casos, la necesidad de voladuras secundarias, lo cual afecta directamente la eficiencia del ciclo mina-planta. La magnitud del coeficiente ($|r| > 0.90$) confirma que el control de los fragmentos gruesos es un factor crítico en el rendimiento de los equipos de carguío. En consecuencia, los resultados respaldan la importancia de emplear emulsiones que minimicen la generación de boulders, como se observó con Vertex en los análisis descriptivos previos, reforzando la relación directa entre calidad de fragmentación y desempeño productivo en minería a cielo abierto.

Tabla 15

Estadístico de P80 de Vertex y Emulgex

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
P80	Vertex	15	3.93 pulg.	0.23	0.06
	Emulgex	15	5.17 pulg.	0.20	0.05

Nota: El análisis descriptivo específico del P80 confirma que Vertex genera un tamaño promedio menor frente a Emulgex, con una baja dispersión que asegura la consistencia de los resultados.

Los resultados estadísticos del P80 evidencian una diferencia clara en el desempeño granulométrico entre las emulsiones evaluadas. La emulsión Vertex registró un tamaño característico promedio de 3.93 (DE = 0.23), mientras que Emulgex presentó un valor significativamente mayor de 5.17 (DE = 0.20). Esta diferencia indica que Vertex genera una fragmentación más fina y uniforme en comparación con Emulgex. Además, la baja dispersión observada en ambos grupos (desviaciones estándar menores a 0.25)

sugiere consistencia en los resultados de cada tipo de explosivo, lo que fortalece la confiabilidad de la comparación.

Desde el punto de vista técnico-operativo, un menor P80 implica menor tamaño promedio de fragmentos, lo que favorece la eficiencia del carguío, reduce la presencia de sobre tamaños y optimiza la alimentación al chancado primario. En consecuencia, los resultados descriptivos del P80 constituyen evidencia preliminar que respalda un mejor desempeño de la emulsión Vertex en términos de calidad de fragmentación.

Tabla 16

Prueba de muestras independientes de P80 de Vertex y Emulgex

		Prueba de Levene		prueba t para la igualdad de medias					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Inferior	Superior
P80	Se asumen varianzas iguales	0.459	0.503	-15.92	28.00	0.00	-1.24	0.08	-1.40	-1.08
	No se asumen varianzas iguales			-15.92	27.54	0.00	-1.24	0.08	-1.40	-1.08

Nota: El valor de significancia ($p < 0.001$) en la prueba T permite rechazar la igualdad de medias, confirmando estadísticamente que la reducción del tamaño característico (P80) lograda con Vertex no es producto del azar.

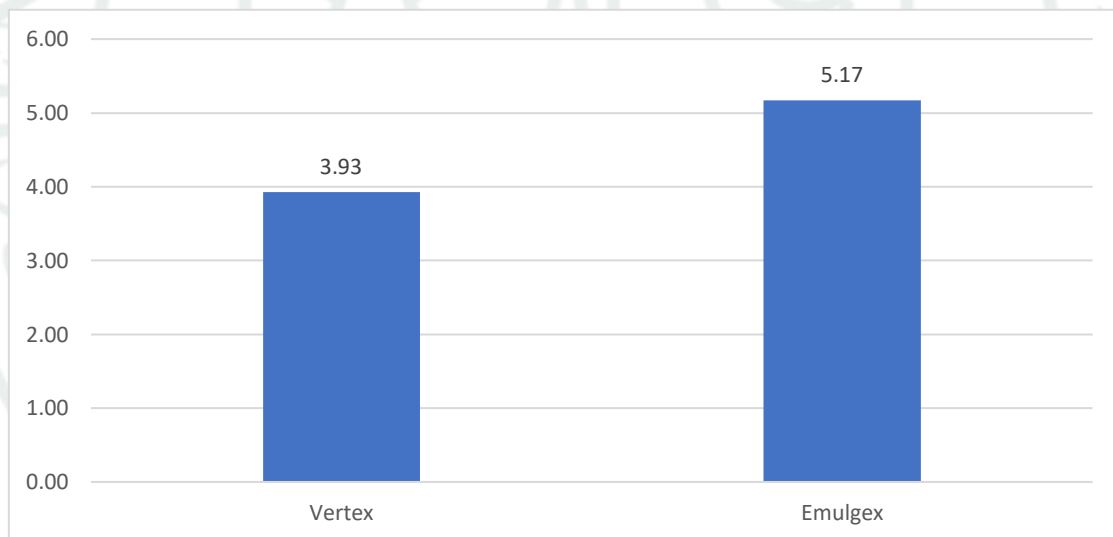
La prueba t para muestras independientes confirma que existe una diferencia estadísticamente significativa en el P80 entre las emulsiones Vertex y Emulgex. En primer lugar, la prueba de Levene indicó que no se rechaza la igualdad de varianzas ($F = 0.459$; $p = 0.504$), por lo que se asume homogeneidad de varianzas y se interpreta la primera fila del análisis t. El estadístico t obtenido fue -15.92 con 28 grados de libertad,

alcanzando un nivel de significancia bilateral $p < 0.001$, lo que evidencia una diferencia altamente significativa entre ambos grupos. La diferencia de medias fue de -1.24, con un intervalo de confianza del 95% que oscila entre -1.40 y -1.08, confirmando que el P80 de Vertex es consistentemente menor que el de Emulgex.

Desde el punto de vista técnico, esta reducción significativa del tamaño característico implica una fragmentación más fina y uniforme con Vertex, lo que favorece la eficiencia del carguío y del proceso de conminución. En consecuencia, los resultados inferenciales respaldan con solidez estadística la superioridad granulométrica de la emulsión Vertex en las condiciones operativas evaluadas.

Figura 47

Estadístico de P80 de Vertex y Emulgex



Nota: Comparación visual de la distribución del tamaño característico P80 entre ambos explosivos.

Tabla 17*Estadístico de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex*

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Porcentaje de fino	Vertex	15	45.00	3.70	0.96
	Emulgex	15	34.20	2.86	0.74

Nota: Vertex generó una cantidad superior de material fino frente al Emulgex, lo que representa una distribución granulométrica más favorable para las posteriores etapas de conminución.

Los estadísticos descriptivos del porcentaje de finos muestran una diferencia notable entre las emulsiones evaluadas. La emulsión Vertex registró una media de 45.00% (DE = 3.70), mientras que Emulgex presentó un promedio considerablemente menor de 34.20% (DE = 2.86). Esta diferencia de aproximadamente 10.8 puntos porcentuales evidencia que Vertex genera una mayor proporción de fragmentos finos en comparación con Emulgex. Asimismo, las desviaciones estándar relativamente bajas en ambos grupos indican consistencia en los resultados obtenidos en cada conjunto de voladuras, lo que refuerza la estabilidad del desempeño de cada emulsión.

Desde el punto de vista técnico, una mayor generación de finos está asociada a una fragmentación más eficiente y a una mejor distribución granulométrica del material, favoreciendo el carguío y la alimentación al sistema de chancado primario. En consecuencia, los resultados descriptivos sugieren que la emulsión Vertex presenta un comportamiento más favorable en términos de producción de finos bajo las condiciones operativas evaluadas.

Tabla 18

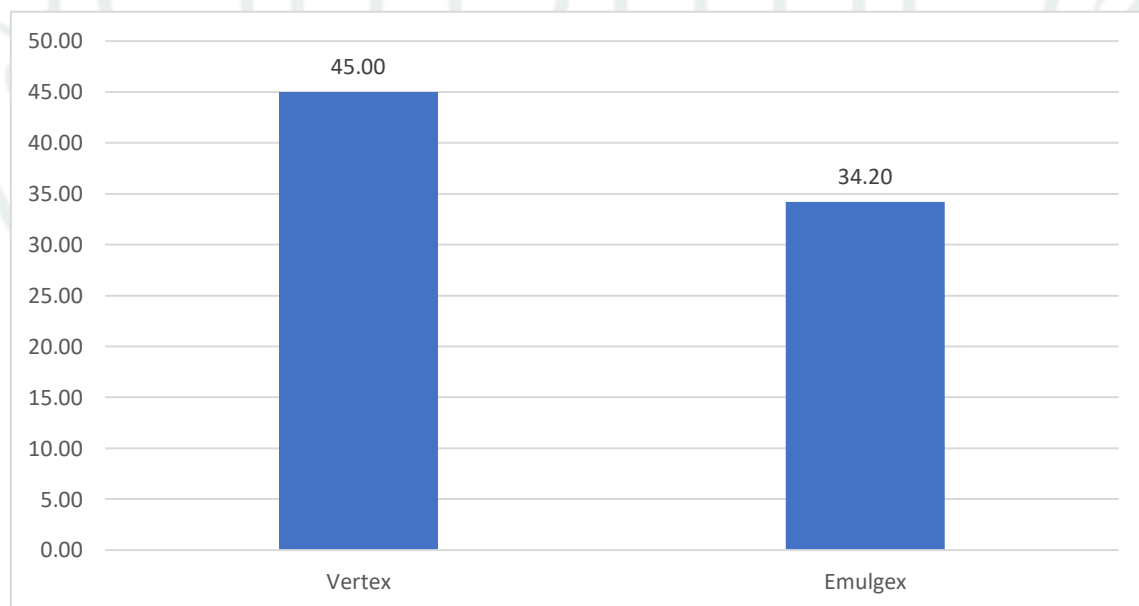
Prueba de muestras independientes de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex

		Prueba de Levene		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Porcentaje de fino	Se asumen varianzas iguales	0.627	0.435	8.94	28.00	0.00	10.80	1.21	8.33	13.27
	No se asumen varianzas iguales			8.94	26.31	0.00	10.80	1.21	8.32	13.28

Nota: La prueba inferencial valida que la diferencia de 10.8 puntos porcentuales a favor de Vertex en la generación de finos es estadísticamente significativa ($p < 0.001$) y constante.

Figura 48

Estadístico de porcentaje de fino de Vertex y Emulgex



Nota: Representación de la generación de material fino lograda por Vertex frente a Emulgex.

La prueba t para muestras independientes evidencia diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de finos generado por las emulsiones Vertex y Emulgex. La prueba de Levene indicó que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas ($F = 0.627$; $p = 0.435$), por lo que se interpreta la fila correspondiente a varianzas iguales. El estadístico t obtenido fue 8.94 con 28 grados de libertad, alcanzando un nivel de significancia bilateral $p < 0.001$, lo que confirma una diferencia altamente significativa entre ambos tipos de explosivo. La diferencia de medias fue de 10.80 puntos porcentuales, con un intervalo de confianza del 95% comprendido entre 8.33 y 13.27, lo que indica que la emulsión Vertex produce una proporción considerablemente mayor de finos en comparación con Emulgex.

Desde una perspectiva técnica, un mayor porcentaje de finos está asociado a una fragmentación más eficiente y homogénea, favoreciendo la continuidad operacional y el desempeño del proceso de carguío y chancado. En consecuencia, los resultados inferenciales respaldan de manera consistente la superioridad granulométrica de Vertex respecto a Emulgex en términos de generación de finos.

Tabla 19

Estadístico de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Porcentaje de Boulders	Vertex	15	4.8	0.22	0.06
	Emulgex	15	7.8	0.33	0.09

Nota: Los datos descriptivos indican que Emulgex produce casi el doble de fragmentos sobredimensionados en comparación con Vertex, lo que impacta negativamente en la continuidad operativa.

Los estadísticos descriptivos del porcentaje de boulders evidencian una diferencia sustancial entre las emulsiones evaluadas. La emulsión Vertex presentó un promedio de

4.8% (DE = 0.22), mientras que Emulgex registró un valor significativamente mayor de 7.8% (DE = 0.33). Esta diferencia de aproximadamente 3 puntos porcentuales indica que Emulgex genera una mayor proporción de fragmentos sobredimensionados en comparación con Vertex. Además, las desviaciones estándar reducidas en ambos grupos reflejan baja variabilidad interna y consistencia en el comportamiento de cada tipo de explosivo.

Desde el punto de vista técnico-operativo, un menor porcentaje de boulders implica menor necesidad de voladuras secundarias, menor riesgo de interrupciones en el carguío y mayor eficiencia en el transporte y chancado primario. En consecuencia, los resultados descriptivos refuerzan la evidencia de que la emulsión Vertex produce una fragmentación más controlada y operativamente favorable bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 20

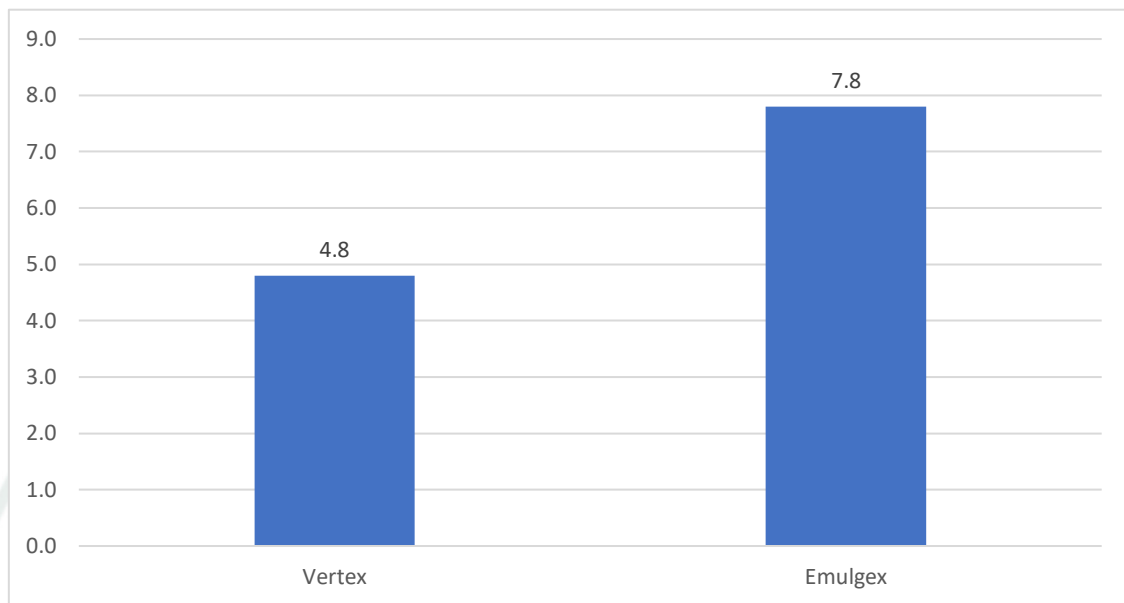
Prueba de muestras independientes de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex

		Prueba de Levene		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Porcentaje de Boulders	Se asumen varianzas iguales	4.027	0.055	-29.1	28.00	0.00	-3.00	0.10	-3.21	-2.79
	No se asumen varianzas iguales			-29.1	24.64	0.00	-3.00	0.10	-3.21	-2.79

Nota: La significancia estadística ($p < 0.001$) confirma que el uso de Vertex garantiza una reducción consistente en la generación de boulders, minimizando la necesidad de voladuras secundarias.

Figura 49

Estadístico de Porcentaje de Boulders de Vertex y Emulgex



Nota: Frecuencia de fragmentos sobredimensionados que afectan la productividad del carguío.

La prueba t para muestras independientes confirma la existencia de diferencias altamente significativas en el porcentaje de boulders entre las emulsiones Vertex y Emulgex. La prueba de Levene mostró un valor $F = 4.027$ con $p = 0.055$, resultado ligeramente superior al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo que permite asumir homogeneidad de varianzas y utilizar la fila correspondiente a varianzas iguales. El estadístico t obtenido fue -29.18 con 28 grados de libertad, alcanzando un nivel de significancia bilateral $p < 0.001$, evidenciando una diferencia estadísticamente muy significativa entre ambos grupos. La diferencia de medias fue de -3.00 puntos porcentuales, con un intervalo de confianza del 95% comprendido entre -3.21 y -2.79 , lo que confirma que Vertex genera consistentemente menor porcentaje de fragmentos sobredimensionados en comparación con Emulgex.

Desde una perspectiva técnica, esta reducción significativa en la generación de boulders implica menor necesidad de intervenciones correctivas, mayor fluidez en el

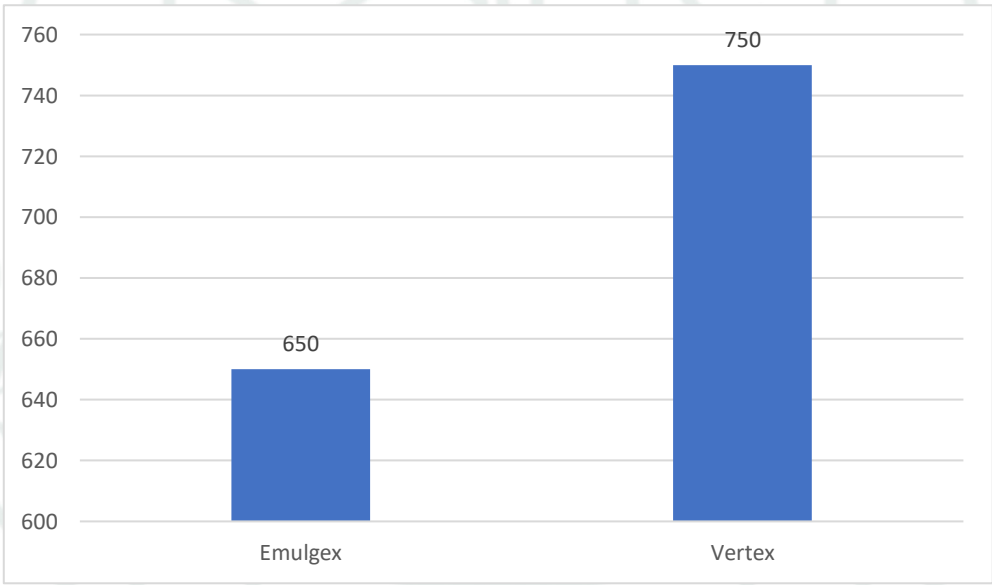
proceso de carguío y reducción de interrupciones operativas. En consecuencia, los resultados inferenciales consolidan la evidencia de un desempeño superior de la emulsión Vertex en términos de control de fragmentación gruesa.

Tabla 21
Estadístico de costo explosivo de Vertex y Emulgex

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Costo Explosivo	Emulgex	15	650	,000 ^a	0.00
	Vertex	15	750	,000 ^a	0.00

Nota: Comparativa de los estadísticos de costo por tonelada asociados al uso de cada tipo de emulsión gasificable.

Figura 50
Estadístico de costo explosivo de Vertex y Emulgex



Nota: Análisis comparativo del costo directo del explosivo consumido en las pruebas.

Los estadísticos descriptivos del costo del explosivo muestran que la emulsión Vertex presenta un costo promedio de 750 unidades monetarias, mientras que Emulgex registra un valor de 650, evidenciando una diferencia directa de 100 unidades entre ambos productos. La desviación estándar igual a cero en ambos casos indica que el costo fue constante dentro de cada tipo de emulsión, sin variabilidad entre las voladuras evaluadas.

Desde el punto de vista metodológico, esta ausencia de dispersión implica que no es posible realizar pruebas estadísticas inferenciales sobre esta variable, dado que no existe variabilidad interna en los grupos.

En términos técnicos, el resultado confirma que Emulgex posee un mayor costo unitario respecto a Vertex; sin embargo, el análisis económico no debe limitarse al precio directo del explosivo, sino que debe considerar el impacto integral sobre la productividad y el ciclo mina-planta. Por tanto, la evaluación costo-beneficio debe basarse en indicadores derivados que integren desempeño operativo y eficiencia de fragmentación.

Tabla 22

Estadístico de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex

Tipo		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Productividad de carguío	Vertex	15	7,507.33	148.38	38.31
	Emulgex	15	6,394.40	213.82	55.21

Nota: Se destaca un incremento de la productividad horaria al usar Vertex, lo que se traduce en una mayor utilización de los activos mineros y una reducción de los costos fijos operativos.

Los estadísticos descriptivos de la productividad de carguío evidencian una diferencia sustancial en el desempeño operativo según el tipo de emulsión empleada. La emulsión Vertex alcanzó una productividad promedio de 7,507.33 ton/hor, con una desviación estándar de 148.38, mientras que Emulgex registró un promedio significativamente menor de 6,394.40 ton/hor, con mayor dispersión (DE = 213.82). Esta diferencia aproximada de 1,113 unidades refleja un incremento considerable en la eficiencia de carguío cuando se utiliza Vertex. Asimismo, la menor desviación estándar observada en Vertex sugiere mayor estabilidad y consistencia en el rendimiento operativo de las voladuras realizadas con esta emulsión.

Desde una perspectiva técnico-operacional, una mayor productividad está directamente asociada a una fragmentación más adecuada, menor presencia de fragmentos sobredimensionados y reducción de tiempos improductivos en el ciclo mina-planta. En consecuencia, los resultados descriptivos indican que la emulsión Vertex no solo mejora los parámetros granulométricos, sino que también genera un impacto positivo y medible en la eficiencia del proceso de carguío.

Tabla 23

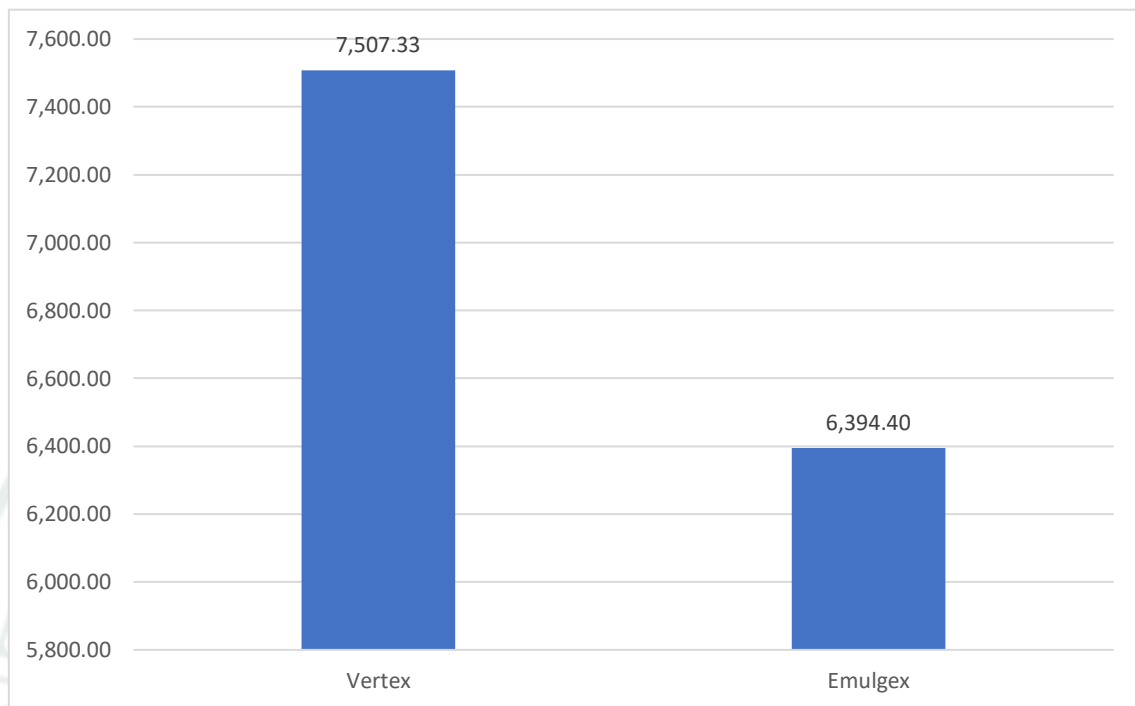
Prueba de muestras independientes de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex

		Prueba de Levene		prueba t para la igualdad de medias					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Inferior	Superior
Productividad de carguío	Se asumen varianzas iguales	4.301	0.047	16.56	28.00	0.00	1,112.93	67.20	975.28	1,250.58
	No se asumen varianzas iguales			16.56	24.94	0.00	1,112.93	67.20	974.52	1,251.35

Nota: El análisis estadístico mediante la prueba T arroja una significancia de $p < 0.001$, lo que permite confirmar que el incremento en la productividad horaria obtenido con Vertex es estadísticamente significativo y superior al desempeño de Emulgex.

Figura 51

Estadístico de Productividad de carguío de Vertex y Emulgex



Nota: Impacto de la calidad de fragmentación en el rendimiento de tonelaje de los equipos de carguío.

La prueba t para muestras independientes confirma la existencia de una diferencia altamente significativa en la productividad de carguío entre las emulsiones Vertex y Emulgex. En primer lugar, la prueba de Levene arrojó un valor $F = 4.301$ con $p = 0.047$, lo que indica que no se cumple el supuesto de igualdad de varianzas ($p < 0.05$); por tanto, se debe interpretar la fila correspondiente a “No se asumen varianzas iguales”. El estadístico t obtenido fue 16.56, con 24.94 grados de libertad, alcanzando un nivel de significancia bilateral $p < 0.001$, evidenciando una diferencia estadísticamente muy significativa entre ambos tipos de explosivo. La diferencia de medias fue de 1,112.93 unidades, con un intervalo de confianza del 95% que oscila entre 974.52 y 1,251.35, lo que confirma que la productividad lograda con Vertex es consistentemente superior a la obtenida con Emulgex.

Desde el punto de vista técnico-operativo, esta diferencia representa un incremento sustancial en el rendimiento del carguío, lo cual puede traducirse en menores tiempos de ciclo, mayor continuidad operacional y optimización del proceso mina-planta. En consecuencia, los resultados inferenciales respaldan de manera contundente la superioridad de la emulsión Vertex en términos de desempeño productivo bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 24

Valores obtenidos con Vertex

	P80	Porcentaje de fino	Porcentaje de Boulders	Costo Explosivo	Productividad de carguío
Media	3.9300	45.00	4.8000	750.00	7507.33
Mediana	3.9400	45.00	4.8000	750.00	7520.00
Varianza	0.051	13.714	0.050	0.000	22015.524
Desv. Desviación	0.22681	3.703	0.22361	0.000	148.376
Mínimo	3.50	40	4.40	750	7254
Máximo	4.21	52	5.20	750	7713

Nota: *Síntesis de los valores finales y eficiencia alcanzada en las pruebas experimentales con Vertex.*

Los valores descriptivos correspondientes a las voladuras ejecutadas con la emulsión Vertex evidencian un comportamiento estable y consistente en los indicadores técnicos evaluados. El P80 presentó una media de 3.93 y una mediana de 3.94, con una baja desviación estándar (0.23), lo que indica una fragmentación fina y homogénea, con escasa dispersión entre voladuras. El porcentaje de finos alcanzó un promedio de 45.00%, con una variabilidad moderada (DE = 3.70), mientras que el porcentaje de boulders fue reducido (media = 4.80%; DE = 0.22), confirmando un control adecuado de fragmentos sobredimensionados. El rango observado para el P80 (3.50 a 4.21) demuestra consistencia en los resultados de fragmentación bajo diferentes condiciones de operación. En cuanto

a la productividad de carguío, se registró un promedio de 7,507.33, con una desviación estándar de 148.38, reflejando estabilidad operativa y rendimiento elevado.

Desde el punto de vista técnico, estos resultados confirman que Vertex genera una fragmentación eficiente y uniforme, con impacto positivo directo en la productividad del proceso mina-planta, manteniendo además un comportamiento predecible y controlado en todas las voladuras evaluadas.

Tabla 25

Valores obtenidos con Emulgex

	P80	Porcentaje de fino	Porcentaje de Boulders	Costo Explosivo	Productividad de carguío
Media	5.1707	34.20	7.8000	650.00	6394.40
Mediana	5.1800	34.00	7.8000	650.00	6439.00
Varianza	0.040	8.171	0.109	0.000	45720.543
Desv. Desviación	0.19927	2.859	0.32950	0.000	213.824
Mínimo	4.71	29	7.30	650	6078
Máximo	5.45	39	8.30	650	6748

Nota: Consolidado de los resultados operativos y técnicos derivados de la aplicación de Emulgex.

Los resultados descriptivos correspondientes a las voladuras ejecutadas con la emulsión Emulgex muestran un comportamiento diferenciado respecto a Vertex en términos de fragmentación y desempeño operativo. El P80 presentó una media de 5.17 y una mediana de 5.18, con una desviación estándar de 0.20, lo que indica una fragmentación más gruesa en comparación con Vertex, aunque con baja dispersión interna. El porcentaje de finos fue considerablemente menor (media = 34.20%; DE = 2.86), mientras que el porcentaje de boulders fue significativamente mayor (media = 7.80%; DE = 0.33), reflejando una mayor generación de fragmentos sobredimensionados.

El rango del P80 (4.71 a 5.45) confirma la consistencia de esta tendencia hacia fragmentación más gruesa en todas las voladuras evaluadas. En cuanto a la productividad de carguío, el promedio alcanzó 6,394.40 con una desviación estándar de 213.82, evidenciando menor rendimiento operativo y mayor variabilidad respecto a Vertex.

Desde una perspectiva técnico-operacional, estos resultados indican que Emulgex produce una fragmentación menos favorable para la continuidad del proceso mina-planta, lo que se traduce en una reducción significativa de la productividad bajo las condiciones analizadas.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Se concluye que la emulsión gasificable Vertex presenta un desempeño técnico y económico superior al de la emulsión Emulgex en la fragmentación de roca en minería a cielo abierto. Los resultados muestran que Vertex alcanza valores promedio de P80 menores en 31.6%, así como una reducción del porcentaje de boulders en el orden de 38.5%, lo que se traduce en una fragmentación más uniforme. Esta mejora impacta directamente en la eficiencia del sistema mina-planta, evidenciándose en incrementos de productividad de carguío superiores al 15% y reducción de costos operativos indirectos, este ahorro valida los modelos de eficiencia de Sanchidrián y Ouchterlony (2017), demostrando que el uso de explosivos de alta energía específica optimiza el valor global de la operación minera a pesar de tener un costo directo de adquisición ligeramente mayor.
- Se determinó que la implementación de Vertex logró reducir el tamaño de fragmento P80 de 5.17 pulgadas a 3.93 pulgadas y una curva granulométrica más uniforme; asimismo, el porcentaje de boulders se reduce aproximadamente de 7.8 a 4.8, lo que representa una mejora técnica del 38.46% en la calidad de la fragmentación. Este dato sustenta el modelo de Rosin-Rammler (Spathis, 2004), confirmando que una mayor presión de detonación genera una fracturación del macizo rocoso más efectiva.
- La investigación demostró que el explosivo Vertex incrementó la generación de material fino, alcanzando un 45.0% frente al 34.2% obtenido por Emulgex. Vertex presenta mayor eficiencia energética, evidenciada en un mejor aprovechamiento del factor de carga y una mayor transmisión de energía al macizo rocoso; esto se sustenta en sus propiedades fisicoquímicas, como una mayor densidad y velocidad de detonación+, en comparación con Emulgex.

- Se concluye que la mejora en la fragmentación obtenida con Vertex tiene un impacto directo en la operación, reflejado en un incremento de la productividad de carguío del 17.41%, así como en la reducción de tiempos de ciclo y menor necesidad de manipulación secundaria de boulders. Esto permite una mayor continuidad operativa en el chancado primario y una disminución de interrupciones en el flujo mina-planta.
- Se concluye que la emulsión gasificable Vertex presenta un desempeño técnico superior al de Emulgex en todos los indicadores evaluados, evidenciado en un menor P80, menor porcentaje de boulders, mayor uniformidad granulométrica y una mejor respuesta operacional. Esta mejora en la calidad de la fragmentación se traduce directamente en un incremento significativo en la productividad de los equipos de carguío, elevándose de 6,394.40 t/h a 7,507.33 t/h, lo que representa un aumento neto de 1,112.93 t/h. Estos resultados son estadísticamente consistentes y validan los planteamientos teóricos de Cunningham (1983), que establecen la influencia directa de la granulometría sobre el rendimiento de los activos mineros, confirmando que la selección del tipo de explosivo constituye un factor determinante en la eficiencia global de la voladura.
- Desde el punto de vista económico, se concluye que, aunque la emulsión gasificable Vertex presenta un mayor costo unitario por tonelada de explosivo, este se compensa ampliamente con la reducción de costos indirectos en el proceso mina-planta. Se observa una disminución en los costos asociados a carguío, transporte y conminución del 5%, atribuida a la mejora en la fragmentación obtenida. En conjunto, estos resultados validan la eficiencia económico-operativa global del uso de Vertex bajo condiciones controladas de voladura.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Implementar de manera progresiva el uso del explosivo Vertex en las voladuras de producción, priorizando los sectores geotécnicamente homogéneos y con mayor presencia de mineral; los resultados de esta investigación evidencian una fragmentación más uniforme y un impacto positivo en la productividad del ciclo mina-planta; por tanto, su adopción controlada permitirá validar los beneficios observados a mayor escala operativa y ajustar parámetros de diseño en función de la respuesta del macizo rocoso.
- Es necesario rediseñar la longitud del taco y la carga de columna específicamente para Vertex, aprovechando su VOD. Se recomienda realizar pruebas de expansión de malla (incremento gradual de burden y espaciamiento) manteniendo el factor de carga de 0.46 kg/t, con el fin de determinar si es posible mantener la calidad de fragmentación actual reduciendo el costo por tonelada volada.
- Se recomienda al área de Planeamiento y Costos abandonar la evaluación de explosivos basada únicamente en el precio unitario del producto. La gestión debe basarse en el ahorro global del 5.09% identificado en este estudio, integrando los indicadores de productividad de carguío (7,507.33 ton/h) y la reducción del 31.11% en los tiempos de ciclo como variables críticas de decisión.
- Incorporar criterios de sostenibilidad y seguridad en la gestión de voladuras, aprovechando las ventajas del Vertex, que presenta una combustión más limpia y menor generación de gases residuales. Esto contribuye al cumplimiento de los estándares ambientales y de salud ocupacional, además de mejorar las condiciones de trabajo en el frente de voladura, reduciendo riesgos de exposición a gases nitrosos.

- Ampliar la investigación hacia diferentes litologías y condiciones geomecánicas, a fin de evaluar la respuesta del Vertex en macizos más competentes o heterogéneos, esto permitirá generar modelos de comportamiento del explosivo más completos y definir su rango óptimo de aplicación, fortaleciendo el criterio técnico en la selección de emulsiones gasificables.



CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, J. (2020). *Evaluación de la influencia del tipo de explosivo en la fragmentación de roca en operaciones a tajo abierto*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Arancibia, C., & Toro, R. (2019). *Optimización de la fragmentación mediante el ajuste del diseño de voladura en minería a cielo abierto*. Revista de Ingeniería de Minas del Perú, 32(2), 45–58.
- Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*. CRC Press.
- Cunningham, C. V. B. (1983). *The Kuz–Ram model for prediction of fragmentation from blasting*. Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå University of Technology, Sweden.
- Cunningham, C. V. B. (2005). *The Kuz–Ram fragmentation model—20 years on*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Brisbane, Australia.
- Dowding, C. (1985). *Blast vibration monitoring and control*. Prentice Hall.
- Enaex S.A. (2022). *Catálogo técnico de explosivos industriales: Vertex y Emulgex*. Santiago de Chile: Departamento Técnico Enaex.
- Gama, R., & Jara, F. (2020). *Optimización del proceso de voladura en la mina Candelaria mediante emulsiones gasificables*. Universidad de Atacama.
- Ghasemi, E., & Sari, M. (2016). *A new model for prediction of rock fragmentation by blasting*. Engineering Geology, 208, 146–155.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.011>

- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*. Pergamon.
- Jiménez, D., & Herrera, L. (2018). *Influencia del diseño de voladura en la fragmentación y costos operativos en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Surface blast design*. Prentice Hall.
- Lazarte Machuca, A. (2020). *Análisis del desempeño de emulsiones gasificables en la fragmentación de roca en operaciones a cielo abierto*. Universidad Católica de Santa María.
- Maza, M., & Nivicela, J. (2024). *Diseño de la malla de perforación para voladura de rocas en el frente Corta Veta de la mina Compuerta Uno, Zaruma–El Oro*. Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- Morales, J., & Cordero, E. (2017). *Evaluación del efecto de la fragmentación en el rendimiento del chancado primario en minería de cobre*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Nath, S. K., & Pal Roy, P. (2002). *Fragmentation control and blast design optimization using numerical modelling techniques*. Mining Technology, 111(2), 77–84.
- Nielsen, K., & Kristiansen, J. (1996). *Fragmentation in rock blasting*. Taylor & Francis.
- Pérez, R., & Loayza, J. (2019). *Relación entre la fragmentación de roca y la productividad en el carguío y transporte en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Moquegua.

- Puma, J., & Llerena, J. (2021). *Optimización del proceso de perforación y voladura en una mina metálica a pequeña escala en la comunidad La Fortuna, Ponce Enríquez*. Universidad Nacional de Loja, Ecuador.
- Sanchidrián, J. A., & Ouchterlony, F. (2017). *Fragmentation models for rock blasting: A review*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(3), 659–703.
<https://doi.org/10.1007/s00603-016-1135-8>
- Singh, P. K., & Narendrula, R. (2010). *Rock fragmentation by blasting: Design and analysis*. Indian Institute of Technology (IIT) Kharagpur.
- Spathis, A. T. (2004). *Optimization of fragmentation in bench blasting*. *Mining Technology*, 113(3), 161–168.
- Tavera, H., & Cárdenas, F. (2019). *Comparación del efecto de emulsiones gasificables en la fragmentación del macizo rocoso en operaciones a cielo abierto*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Torres, D., & Quispe, V. (2020). *Evaluación comparativa de explosivos en la fragmentación del macizo rocoso y su influencia en el rendimiento mina–planta*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Velásquez, P., & Ortega, R. (2018). *Modelamiento matemático de curvas granulométricas de voladura aplicando los modelos Kuz–Ram y Rosin–Rammler*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- WipFrag Technologies. (2020). *User manual for fragmentation analysis software Split–Desktop and WipFrag 4.0*. Ontario, Canada: WipWare Inc.