



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



REDUCCIÓN DEL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO LA CARGA EXPLOSIVA EN EL DESARROLLO DE LA RAMPA 115 DE MINA LAS BRAVAS N°2 AREQUIPA

TESIS

PRESENTADA POR:

GILVER DENYS QUISPE MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO - PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**REDUCCIÓN DEL COSTO DE VOLADURA
OPTIMIZANDO LA CARGA EXPLOSIVA E
N EL DESARROLLO DE LA RAMPA 115 D
E M**

AUTOR

GILVER DENYS QUISPE MAMANI

RECuento de palabras

18851 Words

RECuento de caracteres

98935 Characters

RECuento de páginas

95 Pages

Tamaño del archivo

1.3MB

Fecha de entrega

Sep 23, 2024 11:39 PM GMT-5

Fecha del informe

Sep 23, 2024 11:40 PM GMT-5

● 5% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)



M.Sc. Amilcar G. Teraj Dianderas
CATEDRÁTICO FIM - UNA
CODIGO 2607913



Dr. Americo Arizaca Avalos
Director de la Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería de Minas

Resumen



DEDICATORIA

Con mucho amor a mis padres Santos y María por apoyarme incondicionalmente durante mis estudios e inculcarme siempre a mejorar como persona y como profesional.

Gilver.



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater Universidad Nacional del Altiplano Puno escuela profesional de Ingeniería de Minas, por darme la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas durante toda mi formación académica, de igual manera a mis queridos docentes por transmitirme sus conocimiento y valiosa experiencia.

También agradezco profundamente a mis compañeros de trabajo e ingenieros de la Mina Las Bravas N°2 - Arequipa, por su apoyo y cooperación en la ejecución de esta tesis.

Gilver.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3.1 Problema General.....	20
1.3.2 Problemas Específicos	21
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.4.1 Justificación Teórica	21
1.4.2 Justificación Práctica.....	22
1.4.3 Justificación Económica.....	22
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.5.1 Objetivo General	22
1.5.2 Objetivos Específicos.....	22
1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.6.1 Hipótesis General	23



1.6.2	Hipótesis Específicas	23
-------	-----------------------------	----

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	24
2.1.1.	Antecedentes Nacionales	24
2.1.2.	Antecedentes Internacionales	29
2.2.	MARCO TEÓRICO	30
2.2.1.	Distribución de la carga explosiva	30
2.2.1.1.	Columna explosiva	30
2.2.1.2.	Cálculos para la distribución de la carga explosiva	31
2.2.2.	Carga explosiva	33
2.2.2.1.	Factor de Carga	33
2.2.2.2.	Optimización del Factor de Carga	34
2.2.2.3.	Factor de Potencia	35
2.2.2.4.	Optimización del Factor de Potencia	36
2.2.2.5.	Factor de Carga Lineal	37
2.2.3.	Costo de Voladura	37
2.2.3.1.	Costos de Explosivos y accesorios de voladura	38
2.3.	CONCEPTOS BÁSICOS	42
2.3.1.	Optimización	42
2.3.2.	Explosivo	42
2.3.3.	Cebo	42
2.3.4.	Mecha de seguridad	42
2.3.5.	Cordón detonante	42
2.3.6.	Carmex	42



2.3.7. Taladro 43

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN 44

3.2. METODOLOGÍA DE OBJETIVOS..... 44

3.2.1. Metodología para el objetivo específico 1 44

 3.2.1.1. Materiales 44

 3.2.1.2. Métodos 45

 3.2.1.3. Justificación y Análisis 46

3.2.2. Metodología para el objetivo específico 2 46

 3.2.2.1. Materiales 46

 3.2.2.2. Métodos 46

 3.2.2.3. Justificación y Análisis 47

3.2.3. Metodología para el objetivo específico 3 48

 3.2.3.1. Materiales 48

 3.2.3.2. Métodos 48

 3.2.3.3. Justificación y Análisis 48

3.2.4. Metodología para el objetivo específico 4 49

 3.2.4.1. Materiales 49

 3.2.4.2. Métodos 49

 3.2.4.3. Justificación y Análisis 50

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN 50

3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... 50

3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO 50

3.5.1. Población 50



3.5.2. Muestra	51
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	51
3.6.1. Técnicas de recolección de datos	51
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	52
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS PARA DETERMINAR EL COSTO DE VOLADURA ACTUAL.....	53
4.1.1. Características Técnicas de los Explosivos.....	53
4.1.2. Precios Unitarios de Perforación.....	56
4.1.3. Costos Total de Perforación	58
4.1.4. Precios Unitarios de Explosivos y Accesorios.....	62
4.1.5. Costo Total de Explosivos y Accesorios.....	65
4.2. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO EL FACTOR DE CARGA.....	68
4.2.1. Resultados de voladura antes de la optimización de la carga explosiva...	77
4.3. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO EL FACTOR DE POTENCIA	79
4.4. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA FINAL	83
4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	84
V. CONCLUSIONES.....	88
VI. RECOMENDACIONES.....	89
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90



ÁREA: Ingeniería de minas

TEMA: Análisis de costos mineros y comercialización de minerales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: Jueves 26 de Septiembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factor de carga	34
Tabla 2 Explosivos y accesorios de voladura más usados en minería subterránea...	40
Tabla 3 Pesos relativos por cartucho de explosivos tipo Emulnor y Semexa.....	54
Tabla 4 Precio Unitario en soles y dólares para el Equipo de Perforación	56
Tabla 5 Precio Unitario en soles y dólares para los Accesorios de Perforación	57
Tabla 6 Precio Unitario en soles y dólares para Aceros de Perforación	57
Tabla 7 Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para el Equipo de Perforación	59
Tabla 8 Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para los Accesorios de Perforación	59
Tabla 9 Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para los Aceros de Perforación	60
Tabla 10 Tabla resumen del costo de pies perforado por frente para equipo, accesorios y aceros de perforación	60
Tabla 11 Costo total por metro lineal de avance para el equipo, accesorios y aceros de perforación	61
Tabla 12 Características técnicas de explosivos y accesorios de voladura.....	63
Tabla 13 Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura	63
Tabla 14 Costo en soles y dólares por kilogramo para explosivos y accesorios de voladura.....	63
Tabla 15 Costos de kilogramo por pie perforado en frente para explosivos y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2.....	66
Tabla 16 Costo Total de kilogramo por metro lineal de avance en frente para explosivos	



	y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2	66
Tabla 17	Distribución del número de taladros y de explosivos Emulnor antes de la optimización de la carga explosiva en frentes de avance de mina Las Bravas N°2	69
Tabla 18	Distribución del número de taladros y de explosivos Semexa 65% antes de la optimización de la carga explosiva en frentes de avance de mina Las Bravas N°2	70
Tabla 19	Total, de cartuchos utilizados por taladro para frentes de avance en mina Las Bravas N° 2 de Ica S.A.C.....	71
Tabla 20	Distribución de la secuencia de salida para taladros cargados en frentes de avance de mina Las Bravas N°2	72
Tabla 21	Datos técnicos de la roca, labor y taladros previo a la optimización de la carga explosiva	77
Tabla 22	Resumen de explosivos y accesorios utilizados previa a la optimización de la carga explosiva.....	77
Tabla 23	Resultado de parámetros de voladura previo a la optimización de carga explosiva	77
Tabla 24	Comparativa entre la cantidad de cartuchos de Emulnor 5000 vs Semexa 65% antes y después de la nueva distribución	79
Tabla 25	Comparativa entre el peso en kilogramos de Emulnor 5000 vs Semexa 65% antes y después de la nueva distribución	82
Tabla 26	Valores para los factores de carga explosiva antes y después de la optimización.....	83
Tabla 27	Comparativa entre los costos de voladura antes y después de la optimización de la carga explosiva	84



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Representación gráfica de la carga de columna.....	31
Figura 2 Esquema de taladros en arranque.....	33
Figura 3 Explosivos en forma de gelatina tipo Emulnor, de la marca Famesa	41
Figura 4 Mecha rápida de la marca Famesa	41
Figura 5 Carmex o cordón detonante de la marca Famesa.....	41
Figura 6 Variación del peso en kilogramos de cartuchos de explosivos tipo Emulnor y Semexa.	54
Figura 7 Unidades de cartuchos por caja para explosivos y accesorios de voladura .	55
Figura 8 Precio Unitario en soles y dólares de la Estructura de Costos en Perforación	58
Figura 9 Grado de participación del equipo, accesorios y aceros en el coste por pie perforado en frente de perforación.....	61
Figura 10 Incidencia en dólares por metro lineal de avance del equipo, accesorios y aceros de perforación	62
Figura 11 Tendencia de los Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura	64
Figura 12 Tendencia de los Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura	64
Figura 13 Costos en kilogramos por metro lineal para explosivos y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2	67
Figura 14 Distribución de explosivos EMULNOR 5000 por tipo de taladro	72
Figura 15 Cantidad total de cartuchos Emulnor 5000 por tipo de taladro	73
Figura 16 Peso en kilogramos de Emulnor 5000 distribuidos por tipo de taladro	74



Figura 17	Distribución de explosivos SEMEXA 65% por tipo de taladro	75
Figura 18	Cantidad total de cartuchos Semexa 65% por tipo de taladro	75
Figura 19	Distribución del peso de explosivo Semexa 65% de acuerdo al tipo de taladro en mina Las Bravas N°2	76
Figura 20	Factores de carga, lineal y potencia previa a la optimización de carga explosiva	78
Figura 21	Cantidad de explosivos Emulnor 5000, antes y después de la optimización de la distribución en taladros	81
Figura 22	Cantidad de explosivos Semexa 65%, antes y después de la optimización de la distribución en taladros	81



RESUMEN

En la mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C., se ha detectado un significativo déficit en la estructura de costos asociado al proceso de voladura en la rampa 115, este problema se debe a la falta de optimización en los factores de carga explosiva empleados, los cuales están impactando negativamente la eficiencia operativa y reduciendo los márgenes de rentabilidad de la mina. La importancia de abordar esta cuestión radica en que una adecuada optimización de los factores de carga explosiva permitirá reducir los costos de voladura, de igual forma mejorará la eficiencia operativa global del proceso minero. Debido a ello se consideró por objetivo reducir los costos de voladura en la Rampa 115 mediante la optimización de los factores de carga explosiva. Se esperó como aporte tecnológico una metodología optimizada que permita una distribución más eficiente de los explosivos, reduciendo costos sin comprometer la efectividad de la voladura. La metodología empleada es de tipo aplicada y no experimental, con un enfoque cuantitativo de corte transversal, y se desarrolló en varias etapas, por medio de la recolección de datos iniciales, optimización de factores de carga, implementación y evaluación, y análisis de resultados. Se obtuvo como resultados, la reducción del número de cartuchos de explosivo por taladro de 151 a 141, la disminución del consumo de explosivo Semexa 65% de 12.10 kg/frente a 11.30 kg/frente, el mantenimiento constante del consumo de Emulnor 5000 en 10.06 kg/frente, la reducción del factor de carga de 2.93 kg/m³ a 2.74 kg/m³, la reducción del factor de potencia de 1.09 kg/tn a 1.02 kg/tn, la reducción del factor de carga lineal de 14.77 kg/m a 13.85 kg/m, y la disminución del costo total de voladura de 1076.99 soles/frente a 1042.03 soles/frente, generando un ahorro de 34.96 soles/frente.

Palabras Clave: Optimización, Voladura, Carga explosiva, Costos de voladura.



ABSTRACT

At the Las Bravas N°2 mine in Ica S.A.C., a significant deficit has been detected in the cost structure associated with the blasting process in ramp 115, this problem is due to the lack of optimization in the explosive load factors used, which are negatively impacting the operational efficiency and reducing the profitability margins of the mine. The importance of addressing this issue lies in the fact that an adequate optimization of the blast charge factors will allow reducing blasting costs, as well as improving the overall operational efficiency of the mining process. For this reason, the objective was to reduce blasting costs in Ramp 115 by optimizing the blast charge factors. It was expected as a technological contribution an optimized methodology that allows a more efficient distribution of explosives, reducing costs without compromising the effectiveness of blasting. The methodology used is applied and non-experimental, with a cross-sectional quantitative approach, and was developed in several stages, through the collection of initial data, optimization of load factors, implementation and evaluation, and analysis of results. The results obtained were the reduction of the number of explosive cartridges per drill hole from 151 to 141, the reduction of Semexa 65% explosive consumption from 12.10 kg/head to 11.30 kg/head, the maintenance of a constant consumption of Emulnor 5000 at 10.06 kg/head, the reduction of the load factor from 2.93 kg/m³ to 2.74 kg/m³, and the reduction of the load factor from 2.93 kg/m³ to 2.74 kg/m³. 93 kg/m³ to 2.74 kg/m³, the reduction of the power factor from 1.09 kg/ton to 1.02 kg/ton, the reduction of the linear load factor from 14.77 kg/m to 13.85 kg/m, and the reduction of the total blasting cost from 1076.99 soles/front to 1042.03 soles/front, generating a saving of 34.96 soles/front.

Key words: Optimization, Blasting, Blast charge, Blasting costs.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En el entorno de las actividades de minado que tienen lugar en mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C., se reconoce un déficit en la estructura de costos de voladura relacionada al avance de la rampa 115. Este déficit se refleja en un incremento del 3.24% en los costos operativos de voladura en comparación con el presupuesto inicial, lo que se traduce en un gasto adicional de \$8.96 por frente de avance, esta labor de desarrollo permite conectar diferentes niveles de la mina, de esta manera facilita el transporte de personal, maquinaria y equipos a las labores de servicio, tajos o frentes de minado. Por ello, es necesario reconocer las variables relacionadas a la voladura que permitan generar un proceso de mejora viable y factible a la realidad económica y operativa de la empresa.

Uno de los principales desafíos presentes es la gestión eficiente de los costos de operación, destacando en ello el costo de voladura, puesto a que la voladura es uno de los procesos esenciales al ser extraídos los minerales, además comprende uno de los gastos significativos, el déficit en la estructura de costos de voladura se evidencia por la ineficiencia en la distribución y uso de los recursos explosivos, lo que resulta en gastos innecesarios y una disminución en la rentabilidad de las operaciones mineras.

El déficit tiende a manifestarse por medio de diversas formas, a través del uso excesivo de explosivos, la deficiente distribución de la carga explosiva, y la falta de optimización en los procedimientos de voladura; estos problemas en conjunto tienden a incrementar los costos directos de la voladura, perjudicando de forma indirecta a otros aspectos operacionales, como el tiempo del ciclo de producción, la seguridad de los



trabajadores, y la estabilidad de las estructuras mineras.

Uno de los factores clave en el déficit de costos es la cantidad de explosivo utilizado por taladro, dado que cargas excesivas tiende a incrementar el costo de los explosivos, de igual forma genera una fragmentación ineficaz del material rocoso, llevando a un mayor requerimiento de procesamiento y manejo del material extraído, a su vez, la presencia de cargas insuficientes resulta en voladuras incompletas, requiriendo voladuras adicionales y aumentando aún más los costos.

Otro de los aspectos críticos es el factor de carga, que comprende a la cantidad de explosivo por unidad de volumen de roca, esto debido a que un factor de carga elevado implica un uso ineficiente de los explosivos, mientras que un factor de carga optimizado asegura que la energía de la voladura se utilice de manera efectiva para fracturar la roca con el menor gasto posible de explosivos.

Por lo tanto, el propósito que se persigue en la presente investigación es el de optimizar los factores de carga explosiva para reducir los costos de voladura en el desarrollo de la rampa 115 en mina Las Bravas N°2. Para ello, se manipula las dimensiones del factor de carga, explosiva y lineal con el fin de reducir los costes de explosivos y accesorios de voladura.

El costo de los accesorios y explosivos de voladura para el avance de la rampa 115 en mina Las Bravas se mide en soles o dólares por frente de avance. El frente de avance tiene relación con el avance lineal en metros que se consigue por voladura. Para la rampa 115, el avance lineal se encuentra en 1.5 m.

Por otro lado, debido a que, la roca es de tipo IIA (roca dura), se requiere un enfoque sobre la manipulación en el diseño de los taladros de arranque, alivio y taladros de ayuda. De lo anterior se desprende que, se debe conseguir una correcta distribución de



la cantidad de explosivos por tipo de taladro, para garantizar la utilización completa de las características caloríficas de los explosivos comerciales utilizados en operación.

En el Capítulo I, se hace énfasis sobre las condiciones iniciales de la investigación y se describe el contexto, génesis, causas y consecuencias de la problemática encontrada. En el Capítulo II, se hace mención la literatura existente del tema de investigación en referencia a otros autores que ya lo han explorado con anterioridad, así mismo, se presenta el marco teórico de las variables y sus dimensiones. En el Capítulo III, se muestra el tipo y nivel de investigación, la población y muestra y el instrumento de investigación. Por último, en los capítulos IV y V, se analiza los resultados obtenidos en campo, a través de tablas y gráficos se interpreta la información disponible.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través de los años, se ha identificado que la principal causa de los altos costos se relaciona con la inadecuada distribución de la carga explosiva, este problema se agrava por variados factores interrelacionados que se incluyen al momento de ser diseñadas las mallas de perforación, el avance lineal de la rampa, los retrasos en el cronograma, y los bajos factores de carga que resultan en un deficiente aprovechamiento del poder calorífico de los explosivos (Yeom, 2022).

Una distribución inadecuada de la carga explosiva puede llevar a una fragmentación del material rocoso que no es eficiente, resultando en la necesidad de realizar voladuras adicionales; esto puede llevar a la necesidad de realizar voladuras adicionales, lo que incrementa el uso de explosivos y, en consecuencia, eleva los costos asociados con las operaciones de voladura (Pomasoncco-Najarro et al., 2022).

Asimismo, un diseño de malla ineficiente afecta negativamente la distribución de la carga explosiva, ya que las distancias inadecuadas entre perforaciones y la profundidad



de los barrenos impactan directamente en la efectividad de la voladura; esto exige la implementación de diseños de malla más adecuados para asegurar una fragmentación óptima y evitar costos adicionales (Kinyua et al., 2022).

No obstante, el avance lineal de una rampa se ve comprometido al momento en que la voladura no es efectiva, esto debido a una mala distribución de la carga explosiva y un diseño de malla inadecuado, dando por resultado en una menor tasa de avance, lo que genera prolongaciones del tiempo necesario para ser completado el desarrollo de la rampa (Nikkhah et al., 2022).

La inadecuada distribución de la carga explosiva suele resultar en una fragmentación ineficiente del material rocoso, lo que puede llevar a un aumento en la cantidad de explosivos necesarios; esto incrementa los costos de voladura debido al uso adicional de material explosivo y a la necesidad de realizar ajustes para lograr una fragmentación adecuada (Yu et al., 2024).

De manera similar, bajos factores de carga explosiva indican que no se está utilizando la cantidad óptima de explosivos para el volumen de roca a fragmentar; esto se traduce en un aprovechamiento insuficiente del potencial de los explosivos, lo que obliga a utilizar más material para alcanzar los resultados deseados y, por ende, aumenta los costos de estos mismos (Taiwo et al., 2023).

En América Latina la problemática de los costos de voladura está sujeta a la logística interna de cada país, por ejemplo, en el Perú la mayoría de explosivos y accesorios de voladura de alta calidad tienen que ser importados, lo que conlleva tiempo y costo adicional en su adquisición. Así mismo, el acceso de carreteras en la mayoría de países de América Latina es crítica, ya que no cuentan con redes interconectadas o asfaltadas que permitan un abastecimiento normalizado de las materias primas que



demanda la industria minera.

A nivel de mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C. se prevé la oportunidad de mejora en el área de costos de voladura de la rampa 115, donde el principal problema que se identificó fueron los altos costes unitarios en accesorios y explosivos de voladura.

Una de las principales causas que originaba esta problemática, era la mala distribución de la carga explosiva en los distintos tipos de taladros que se encontraban en el diseño de la malla de perforación.

Esta realidad, condicionaba el avance lineal de la obra, es decir, la proyección del material volado no se correspondía con el presupuestado en el plan de minado, lo que ocasionaba retrasos en el cronograma del proyecto. Además, los factores de carga explosiva se encontraban en valores bajos, lo que se interpreta como un déficit en el aprovechamiento del poder calorífico de los explosivos.

Por lo tanto, se sugirió a nivel de la investigación, cambiar o modificar los valores de la carga explosiva, tanto del factor de carga, factor de potencia y factor lineal, a través de una mejor distribución material explosivo en los taladros de producción. De esta forma, se pretende generar un ahorro en el costo total de la voladura, en especial en el costo de explosivo por frente de avance.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Problema General

¿Será posible reducir el costo de voladura optimizando la carga explosiva en el desarrollo de la rampa 115 de mina Las Bravas N°2, Arequipa?



1.3.2 Problemas Específicos

- ¿Se logrará determinar el costo de voladura actual en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa?
- ¿Se podrá reducir el costo de voladura optimizando el factor de carga en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa?
- ¿Se podrá reducir el costo de voladura optimizando el factor de potencia en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa?
- ¿Se alcanzará reducir el costo de voladura final en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa?

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Justificación Teórica

La investigación se justifica a nivel teórico al abordar una brecha significativa en la literatura científica sobre la optimización de la carga explosiva en operaciones mineras (Guo et al., 2024). Aunque existen estudios previos que analizan variables relacionadas con la voladura, ninguno ha integrado de manera sistemática y comprensiva tres factores clave: el tipo de explosivo, la cantidad de explosivo y su distribución en el taladro.

Este estudio propone un enfoque innovador al considerar estos tres elementos de forma conjunta para mejorar tanto la eficiencia del proceso de voladura como para reducir los costos asociados con explosivos y accesorios; la optimización simultánea de estos factores tiene el potencial de incrementar la eficacia de la voladura, de igual forma permite una gestión más económica y eficaz de los recursos. Al abordar la carga explosiva desde una perspectiva integral



y metodológica, esta investigación amplía el cuerpo de conocimiento existente y ofrece soluciones prácticas que pueden ser aplicadas en la industria minera para mejorar el rendimiento de las operaciones de voladura.

1.4.2 Justificación Práctica

A nivel práctico, la investigación queda justificada debido a la utilidad inmediata que se le puede asignar a los resultados que de la investigación se desprenden, ya que, estos podrán ser utilizados por otros investigadores que quieran seguir una línea de investigación similar, y así mismo, con mayor preponderancia estos resultados tendrán su repercusión y proyección sobre los estados financieros de la empresa.

1.4.3 Justificación Económica

El aporte económico de la investigación es evidente, esto se explica por la naturaleza de la variable dependiente, la misma que supone la reducción de costos en voladura. Este beneficio económico podrá ser utilizado por la empresa para mejorar sus ingresos y egresos a nivel operativo, además de, generar valor añadido en el aumento de la productividad general de la unidad minera.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

Reducir el costo de voladura optimizando la carga explosiva en el desarrollo de la rampa 115 de mina Las Bravas N°2, Arequipa.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar el costo de voladura actual en el desarrollo de la rampa 115



de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.

- Reducir el costo de voladura optimizando el factor de carga en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.
- Reducir el costo de voladura optimizando el factor de potencia en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.
- Reducir el costo de voladura final en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.

1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 Hipótesis General

La optimización de la carga explosiva reduce significativa del costo de voladura en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- El costo de voladura actual es superior a lo esperado en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.
- La optimización del factor de carga reduce significativamente el costo de voladura en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.
- La optimización del factor de potencia reduce significativamente el costo de voladura en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.
- Se logrará una reducción significativa en el costo de voladura final en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2, Arequipa.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Nacionales

De La Cruz y Rodriguez (2022), en su tesis de grado denominada: “Optimización del diseño de perforación y voladura para reducir el costo en el desarrollo de la galería 5361, empresa minera Vicus”, tuvieron como objetivo optimizar el diseño de perforación y voladura para reducir el costo total en el desarrollo de la Galería 5361 de la empresa minera. La metodología consistió en analizar las galerías de preparación y aplicar ajustes en el diseño de perforación, logrando una reducción significativa en el costo total por metro lineal de avance. Para tal motivo, se valió de una población conformada por las galerías de preparación presentes en la mina, y como muestra se tomó la Galería 5631. Obteniéndose como resultados, una reducción de 168.14 soles en el costo total por metro lineal de avance. La contribución fue una notable reducción en el costo total por metro lineal de avance en la Galería 5361 al optimizar el diseño de perforación y voladura

Cabrera (2022), en su tesis de grado denominada “Optimización de estándares de perforación y voladura para mejorar el factor de avance en la mina Santander-Cia minera Travelí”, se planteó como objetivo principal, realizar la optimización de ciertos parámetros de voladura para mejorar el avance lineal de la mina. La metodología se basó en emplear un modelo matemático para optimizar los parámetros de voladura centrándose en las áreas de influencia en la voladura



y rediseñando la malla de perforación, para obtener un control más preciso de las vibraciones en las paredes de la mina. Obteniéndose como resultado, un diseño de malla de perforación acorde al modelo matemático, además de, permitir a través de este rediseño, un control en las vibraciones de las paredes de la labor minera. Se concluyó que, existe una mejora en el factor de avance y en los costos de operación. El autor contribuyó significativamente a la mejora del avance lineal y la reducción de costos operativos en la mina Santander al optimizar la malla de perforación mediante un modelo matemático

Colana (2020), en su tesis de grado denominada: “Efectos del diseño de malla de perforación y voladura en la reducción de costos de operación en el proyecto de explotación El Nuevo Sureño”, siguió como objetivo mejorar las deficiencias en el consumo de explosivos y distribución de los taladros. Su metodología implicó ajustar la cantidad de taladros y optimizar el factor de potencia, resultando en una reducción del número de taladros y en el costo por metro lineal de avance. Para ello, se valió de los datos obtenidos en campo de las operaciones unitarias de perforación y voladura. Obteniéndose los siguientes resultados: reducción de 43 a 38 taladros para la sección de labor de 2.7x2.7 y la optimización del factor de potencia de 0.88 kg/tn a 0.76 kg/tn. Concluyéndose que, el diseño de la nueva malla de perforación permitió generar un ahorro en el costo de 83.55 soles por metro lineal de avance. La contribución fue que reduciendo el número de taladros y el factor de potencia, resulta en un ahorro significativo en el costo por metro lineal de avance

Guillen (2020), en su tesis de grado denominada: “Optimización del diseño de malla de perforación para la estimación de costos operacionales en la zona de Pucaurco - Unidad minera Pachancorto”, tuvo como objetivo determinar



la influencia de la malla de perforación en los costos operacionales de la unidad minera. La metodología empleada consistió en analizar los datos de perforación de una muestra específica y ajustar el diseño de la malla, logrando un ahorro en el costo unitario por metro lineal de avance. Para ello se valió de, una población conformada por las labores de desarrollo de la unidad Pachancorto, así mismo, la muestra estuvo representada por, el cruce XC 961 Nv. 4950. Se obtuvo como resultado un ahorro del 12.49% en el costo unitario por metro lineal de avance. El autor contribuyó que al mejorar el diseño de la malla de perforación en Pucaurco, se logró una estimación más precisa de los costos operacionales

Lazo (2020), en su tesis denominada: “Optimización en las mallas de perforación y voladura para reducir los costos unitarios en la compañía Century Mining Perú S.A.C.”, siguió como objetivo el diseñar una malla de perforación y voladura para optimizar la productividad y los costos. La metodología consistió en ajustar el número de taladros y optimizar el avance por disparo, resultando en una mejora significativa en el coste de perforación y voladura. El estudio se centró sobre el BP7907W el cual es una labor de desarrollo para mejorar los accesos en la unidad minera. Se obtuvo como resultados: una reducción en 3 taladros optimizando el avance por disparo en un 94%. Se concluyó que, el nuevo diseño de malla mejora el coste de perforación y voladura en un 104.61 dólares por metro. La contribución del autor fue que se mejora la productividad y se reduce los costos en Century Mining al optimizar la malla de perforación, al ser reducido el número de taladros y un significativo ahorro en el costo de perforación y voladura

Madueño (2020), en su tesis de grado denominada: “Optimización de costos unitarios mediante el diseño de un estándar de malla de perforación y voladura en la Galería 091 en Compañía Minera La Soledad S.A.C.”, tuvo como



objetivo aplicar controles en los parámetros de perforación y voladura para reducir costos de operación. Su metodología incluyó el análisis de datos de la Galería 091W para incrementar el avance lineal por disparo y reducir el costo de explosivo, lo que condujo a una disminución del costo operativo total. La muestra de estudio estuvo representada por la GL 091W, con una sección de 2.10x2.10 m². Se obtuvo como resultados: un incremento del 37% en el avance lineal por disparo y una reducción en el costo de explosivo en 10.34 US\$ por disparo. Se concluyó que, el control de parámetros disminuye los costos de perforación y voladura en un 24%, representando una disminución del costo operativo total de 12%, el mismo que supone una reducción de 74,979.216 US\$ anuales. La contribución fue que la reducción en los costos operacionales al diseñar un estándar de malla de perforación incrementa el avance lineal por disparo y reduce el costo del explosivo, generando un ahorro anual considerable.

Gamarra (2019), en su tesis de grado denominado: “Método de Holmberg para optimizar perforación y voladura en la galería 539 de la unidad minera Agromin La Bonita S.A.C.”, tuvo como objetivo implementar el diseño de una malla de perforación y voladura para eliminar la incidencia de tiros cortados, tiros anillados, tiros soplados y sobre excavaciones. La metodología permitió reducir los costos de perforación y voladura, así como mejorar la calidad del mineral roto al eliminar incidencias de tiros defectuosos. Para cumplir con tal objetivo, se determinó implementar el diseño de malla de perforación según el modelo matemático de Holmberg. Los resultados que obtuvo fueron, una reducción de 32.4 usd/ disparo en los costes de perforación y voladura, una reducción de 18.87 usd/disparo en la mano de obra. Concluyéndose que, se logró optimizar en un 15.4% el mineral roto. La contribución fue que eliminando problemas como tiros



cortados y sobre excavaciones, se reduce los costos de perforación y mejora la eficiencia del mineral roto.

Morales (2019), en su tesis de grado denominada: “Reducción de costes unitarios mediante la optimización de la malla de perforación y voladura en el inclinado-180 Galería norte de la empresa Minera Vicus”, tuvo como objetivo principal aumentar las reservas en la veta Valeria de la unidad minera. La metodología resultó en un aumento en el avance lineal, una reducción del factor de carga y una disminución del costo por metro lineal de avance. Para ello, tomo como muestra el inclinado del nivel 180, con una sección 2.20x2.20m, en un tipo de roca dura Se obtuvo como resultado un avance promedio de 1.70m/disparo. Concluyéndose en, que a través de diseño de una malla de perforación y voladura con el modelo matemático de Holmberg se logra aumentar en un 23.97% el avance lineal, la disminución del factor de carga en 1.32 kg/m³ y una disminución del 30.03% en el costo de perforación y voladura por metro lineal de avance. La contribución fue que, mediante un diseño optimizado de malla de perforación con el modelo de Holmberg, se logra una disminución del factor de carga y un ahorro en el costo por metro lineal de avance

Ocampo (2018), en su tesis de grado denominada: “Optimización de malla de perforación doble espiral para túnel y reducir costos de perforación y voladura en el proyecto Chavimochic La Libertad, 2017”; tuvo como objetivo reducir los costos de perforación y voladura a través de uso de un tipo de arranque en doble espiral con la aplicación del método de Holmberg. La metodología resultó en una reducción significativa de los costos unitarios y del número de taladros, además de estabilizar la eficiencia de la voladura por encima del 95%. El estudio se centró sobre las actividades de perforación y voladura del proyecto



Chavimochic. Obteniéndose como resultado, una reducción del costo unitario para tipo de roca II de 14.3 \$/m³ a 11.6 \$/m³, y de 12.4 \$/m³ a 10.1 \$/m³ para tipo de roca III, se redujo los taladros de 110 a 100 taladros para tipo de roca II y de 98 a 94 taladros para tipo de roca III. Se concluyó que, la eficiencia de la voladura se estabiliza por encima del 95% sin alterar sus indicadores. La contribución fue que al optimizar la malla de perforación doble espiral, se logra una eficiencia superior en la voladura y una reducción en el número de taladros.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Ortega et al. (2016), en su publicación para el Boletín de ciencias de la tierra de la Universidad Nacional de Colombia, tuvieron a bien publicar un estudio denominado: “Modificación de las mallas de perforación de voladura a partir del índice del esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia”, donde persiguieron como objetivo principal, la creación de una tabla geomecánica para diseñar correctamente las mallas de perforación de acuerdo a los tipos de roca. La metodología se basó en modificar las mallas de perforación basándose en el GSI para optimizar la distribución de los agujeros y la carga explosiva, alcanzando mejoras en la eficiencia de la voladura. Para ello, la población y muestra estuvo representada por mallas de perforación con espaciamientos de 60x60cm y de 80x80cm. Se obtuvo como resultados, una granulometría de 30cm del material volado y una reducción del 24.6% en los costos de voladura. Se concluye que, este aporte contribuyó a mejorar los ciclos de producción y consumo de explosivos en las voladuras. La contribución fue que al diseñar una tabla geomecánica basada en el índice de esfuerzo geológico conlleva a la reducción de costos de voladura

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Distribución de la carga explosiva

2.2.1.1. Columna explosiva

De acuerdo al manual práctico de voladura **EXSA (2021)**, la columna explosiva se define como la sección activa del taladro, donde el término "activo" se refiere a la región en la que se producen las reacciones termodinámicas del explosivo. La columna explosiva puede conceptualizarse como un cilindro lleno de explosivo en su interior. Este cilindro, a su vez, se encuentra rodeado por las paredes del taladro, y es en estas paredes donde se registran las presiones generadas por la reacción explosiva.

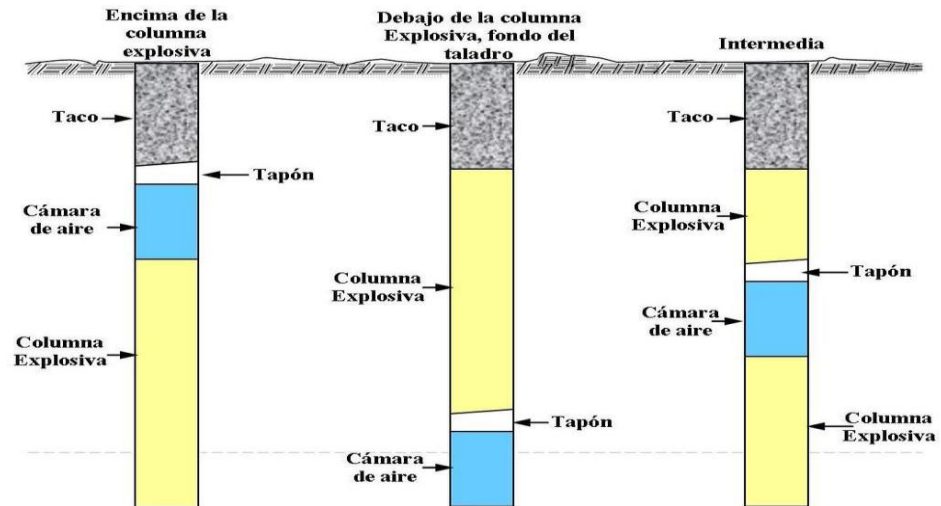
La distribución del explosivo dentro del taladro es un factor crucial que influye directamente en la eficacia de la voladura. Según el manual de **EXSA (2021)**, esta distribución puede variar, siendo común una proporción de $1/2$ o $1/3$ del diámetro total del taladro. Este aspecto de la distribución es fundamental para asegurar que la voladura alcance los resultados deseados.

En el caso de rocas duras, **EXSA (2021)** recomienda complementar la carga de columna con una carga de fondo. Esta recomendación tiene como objetivo incrementar la presión inicial aplicada sobre las paredes del taladro confinado. La carga de fondo ayuda a mejorar la fragmentación y facilita el proceso de voladura al proporcionar una presión adicional que contribuye a la ruptura eficiente del material rocoso.

Por otro lado, para tipo de rocas duras se recomienda acompañar a la carga de columna con una carga de fondo, con el fin de aumentar la presión inicial sobre las paredes del taladro confinado.

Figura 1

Representación gráfica de la carga de columna



Nota: Tomado de "Método de voladura tensional" (2010).

2.2.1.2. Cálculos para la distribución de la carga explosiva

En el manual de EXSA (2021), se presentan una serie de fórmulas fundamentales para la distribución efectiva de la carga explosiva en operaciones mineras. Siendo estas las siguiente en mención:

a) Tonelaje roto

$$TR = V * \rho \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

V = volumen de roca

V = Sección de la labor (m²) * long. del taladro



$\rho = \text{densidad de la roca } \left(\frac{\text{tn}}{\text{m}^3}\right)$

b) Cantidad de carga

$$(Qt) = V *$$

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

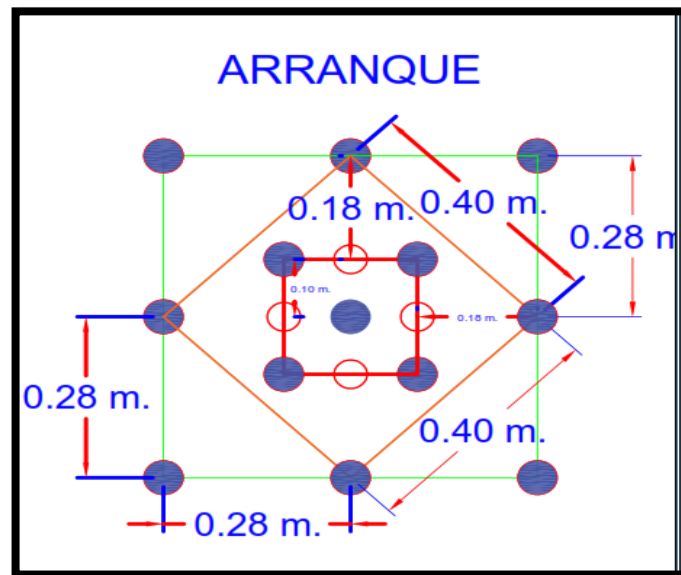
V=volumen de roca

c) Carga promedio por taladro

De acuerdo a **Colana (2020)**, la forma correcta de optimizar la distribución de la carga explosiva es a través del refuerzo de la cantidad de explosivo en los taladros de arranque, disminuyendo la cantidad de explosivos en los taladros hastiales, corona o arrastre. Con esto se consigue un efecto de “cavidad” en el centro de la labor, originando que la roca del contorno se proyecte con facilidad hasta esa cavidad. Se recomienda aumentar entre 1.3 a 1.6 veces la carga promedio para los taladros de arranque.

Figura 2

Esquema de taladros en arranque



Nota: La figura muestra el esquema de distribución de los taladros de arranque y primeras ayudas.

2.2.2. Carga explosiva

Según **EXSA (2021)**, la carga explosiva puede definirse en dos dimensiones: el factor de carga y el factor de potencia.

2.2.2.1. Factor de Carga

Es la relación de proporción entre el peso de explosivo en kilogramos y el volumen de material roto en metros cúbicos.

$$FC = \frac{KG \text{ DE EXPLOSIVO}}{m^3 \text{ material roto}} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \dots\dots\dots(3)$$

Por otro lado, según **Pino (2019)**, los factores de carga guardan una relación con la dureza de la roca, de esta forma se presenta la tabla 1, donde se muestran algunos valores relativos al área de la sección o labor con su correspondencia en el factor de carga.

Tabla 1

Factor de carga

Área	Factor de carga
1 a 5 m ²	2,2 a 1,8 kg/m ³
5 a 10 m ²	1,8 a 1,4 kg/m ³
10 a 20 m ²	1,4 a 1,0 kg/m ³
20 a 40 m ²	1,0 a 0,8 kg/m ³

Nota: La tabla muestra factores de carga aproximados al área de la sección del túnel o labor minera. Tomado de Pino (2019).

2.2.2.2. Optimización del Factor de Carga

El Factor de Carga es una medida clave en la voladura que indica la cantidad de explosivo necesario para fragmentar un metro cúbico de roca; este factor se expresa en kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca, y un valor más bajo del Factor de Carga sugiere que se requiere menos explosivo para romper una determinada cantidad de material rocoso, lo que implica una mayor eficiencia en el uso del explosivo (Klyuev et al., 2020).

La cantidad de explosivo aplicada tiene una influencia directa en la fragmentación de la roca; la fragmentación óptima de la roca se logra cuando se utiliza una carga de explosivo adecuada que maximiza la eficiencia del proceso; esto significa que, al ajustar la cantidad de explosivo, se puede mejorar significativamente la calidad de la fragmentación, reduciendo así la necesidad de operaciones de remoción adicional y mejorando la eficiencia general del proceso de voladura (Ding



et al., 2022).

La cantidad de explosivo afecta la fragmentación de la roca, evidenciando que la eficiencia de la fragmentación mejora con una carga óptima de explosivo; por otro lado, ajustando la cantidad de explosivo para obtener la mejor relación entre el volumen de material roto y la cantidad de explosivo utilizada, se involucra experimentos y simulaciones para encontrar el equilibrio ideal que maximice la eficiencia (Guo et al., 2024).

- **Estrategias para optimizar el Factor de Carga:**

Diseño de Voladuras: Ajustar el diseño de las voladuras, incluyendo la disposición y cantidad de explosivo, para reducir el Factor de Carga, esto puede implicar el uso de técnicas avanzadas como la detonación secuencial y la optimización de patrones de perforación (Valença & Soofastaei, 2022).

Monitoreo y Evaluación: Recopilar datos sobre las voladuras y analizar el rendimiento para ajustar la cantidad de explosivo utilizada; la evaluación continua ayuda a mejorar las técnicas y reducir el Factor de Carga a lo largo del tiempo (Zhang et al., 2021).

2.2.2.3. Factor de Potencia

El factor de potencia se define como los kilogramos de explosivo entre el tonelaje roto por voladura.

$$FP = \frac{KG \text{ DE EXPLOSIVO}}{\text{tonelaje roto}} \left(\frac{kg}{tn} \right) \dots\dots\dots(4)$$



2.2.2.4. Optimización del Factor de Potencia

El Factor de Potencia es una métrica crucial para evaluar la eficiencia en el uso de explosivos en operaciones mineras; este factor se refiere a la cantidad de explosivo necesario para romper una tonelada de roca; un Factor de Potencia bajo indica que se está empleando una menor cantidad de explosivo para lograr la fragmentación deseada, lo que a menudo resulta en una operación más económica y eficiente. En términos prácticos, esto significa que se está logrando una mayor eficacia en la utilización del explosivo, lo cual puede traducirse en una reducción de costos y un mejor rendimiento de la voladura (Maregedze et al., 2022)..

La eficiencia del Factor de Potencia se basa en la conversión de la energía del explosivo en energía mecánica capaz de fracturar la roca; para una cantidad específica de explosivo, una menor cantidad necesaria por tonelada de roca indica que la energía del explosivo se está utilizando de manera más efectiva para romper el material; es decir, se está logrando una mayor fragmentación con menos explosivo, lo que refleja una mejor optimización de la energía liberada (Zhang et al., 2021).

Optimizar el Factor de Potencia es fundamental para maximizar la eficiencia de la voladura; al reducir el Factor de Potencia, se asegura que la energía del explosivo se convierte de manera más efectiva en fragmentación de la roca, minimizando el desperdicio y mejorando la rentabilidad del proceso; esto se logra mediante una planificación cuidadosa y un ajuste preciso de la cantidad de explosivo utilizado, teniendo en cuenta las características específicas de la roca y las

condiciones del taladro (Guo et al., 2024).

- **Estrategias para optimizar el Factor de Potencia:**

Diseño de Voladuras: Optimizar el diseño de las voladuras para distribuir el explosivo de manera más efectiva y reducir el Factor de Potencia. Esto incluye el uso de tecnologías avanzadas y técnicas de perforación (Gao et al., 2021).

Análisis de Datos: Evaluar el rendimiento de las voladuras a través de la recopilación de datos para ajustar las cantidades de explosivo utilizadas y mejorar la eficiencia (Zhou et al., 2020).

2.2.2.5. Factor de Carga Lineal

El factor de carga lineal se define como la cantidad de kilogramos utilizados por metro lineal de avance.

$$FCL = \frac{\text{kg de explosivo}}{\text{metro lineal de avance}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right) \dots \dots \dots (5)$$

2.2.3. Costo de Voladura

Para los fines de esta investigación, el costo de voladura se descompone en dos componentes principales, cada uno de los cuales impacta de manera significativa en el costo total de las operaciones de voladura; el primer componente es el costo de los explosivos, que se refiere al gasto asociado con la cantidad de explosivo necesario para realizar la voladura. Este costo se mide en términos de kilogramos de explosivo utilizados por frente de avance, y puede variar dependiendo del tipo de explosivo empleado, así como de la cantidad



requerida para lograr una fragmentación efectiva del material rocoso (Guo et al., 2024).

El segundo componente es el costo de los accesorios de voladura, que incluye los gastos relacionados con los materiales y equipos adicionales necesarios para llevar a cabo la voladura; entre estos accesorios se encuentran la mecha rápida y el cordón detonante, entre otros elementos. La mecha rápida se utiliza para iniciar la explosión en un momento preciso, mientras que el cordón detonante sirve para transmitir la detonación a los explosivos ubicados en el taladro; estos accesorios son esenciales para asegurar que la voladura se realice de manera segura y efectiva (Maregedze et al., 2022).

Desglosar el costo de voladura en estos dos componentes permite una evaluación más detallada de los gastos asociados y facilita la identificación de áreas en las que se puede lograr una optimización. Al analizar tanto el costo de los explosivos como el de los accesorios, se puede obtener una visión más completa de los factores que contribuyen al costo total de la voladura y, en consecuencia, desarrollar estrategias para reducir estos costos sin comprometer la eficacia de las operaciones (Ding et al., 2022).

2.2.3.1. Costos de Explosivos y accesorios de voladura

En la Tabla 2 se presentan algunos de los explosivos y accesorios de voladura más comúnmente utilizados en la minería subterránea. Esta tabla proporciona una visión detallada de las opciones disponibles en el mercado, permitiendo a los profesionales de la minería seleccionar los materiales adecuados para sus operaciones específicas. Entre los explosivos y accesorios listados se incluyen una variedad de productos



diseñados para optimizar la fragmentación de roca y mejorar la eficiencia de las voladuras en entornos subterráneos (Klyuev et al., 2020).

Por otro lado, los costos asociados a los explosivos se clasifican como costes operativos en la industria minera; estos costos tienen un impacto directo en la operación de minado, ya que los explosivos son elementos esenciales para la fragmentación de roca y, por ende, para el avance en las excavaciones. Dado que el uso de explosivos es indispensable para la realización efectiva de las voladuras, su optimización se convierte en una prioridad para la gestión de costos (Maregedze et al., 2022).

La optimización de los costos de explosivos depende en gran medida de su distribución estratégica entre los diferentes taladros disponibles en el frente de avance; una distribución adecuada no solo asegura un uso eficiente del explosivo, sino que también puede contribuir a la reducción de los costos operativos generales y mejorar los resultados de la voladura (Yu et al., 2024).



Tabla 2

Explosivos y accesorios de voladura más usados en minería subterránea

Explosivos y Accesorios	
Iniciador (cebo)	Emulex 80% (1 1/2"x12"), Emulex 65%
Carga de columna (tal seco)	Anfo
Carga de columna (tal con agua)	Exagel 65%
Iniciador no eléctrico	Excel 18m
Cordón detonante	Pentacord 5p
Mecha rápida	0.6m
Carmex	2.7m

Nota: La tabla muestra algunos tipos de accesorios y explosivos de voladura más usados en minería subterránea. Tomado de Cabrera (2022).

Para efectos del cálculo del coste de explosivos, se inicia con el precio unitario de explosivo por caja, mismo que se obtiene de la división entre el costo de explosivo por caja entre el número de unidades por caja, este valor se multiplica por la cantidad en kilogramos que explosivo que serán necesarios según la distribución de carga por taladro, obteniendo el valor del costo de explosivo por frente. A este último valor se le divide entre el avance lineal en metros y obtenemos finalmente el costo por metro.

Figura 3

Explosivos en forma de gelatina tipo Elmulnor, de la marca Famesa



Nota: Tomado de “Ficha técnica de Famesa”, (2021)

Figura 4

Mecha rápida de la marca Famesa



Nota: Tomado de “Mecha Rápida”, Famesa (2021).

Figura 5

Carmex o cordón detonante de la marca Famesa



Nota: Tomado de “CARMEX-Detonador ensamblado”, [Fotografía] FAMESA (2024)



2.3. CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1. Optimización

Proceso por el cual un método, herramienta o sistema pasa por una serie de cambios radicales en su composición para lograr su evolución o mejora.

2.3.2. Explosivo

Compuesto químico que activado correctamente puede llegar a desprender grandes cantidades de energía calorífica almacenada.

2.3.3. Cebo

Término popular para denominar a los explosivos de carga de fondo que sirven como iniciadores de la voladura.

2.3.4. Mecha de seguridad

También denominado mecha rápida por su rápida ignición y consumación en el tiempo, se utiliza generalmente en minería subterránea para garantizar el retraso necesario en la detonación de un taladro y su uso va acompañado, en la mayoría de los casos, por un cordón detonante.

2.3.5. Cordón detonante

Es considerado como explosivo y está compuesto esencialmente de pentrita o PETN. Posee una elevada sensibilidad al contacto y registra una velocidad de detonación de alrededor de 7000 metros por segundo.

2.3.6. Carmex

Accesorio de voladura compuesto por una mecha lenta y un fulminante



n°8.

2.3.7. Taladro

Dispositivo cilíndrico que se perfora en la roca para alojar explosivos de diferente tipo. Su largo dependerá de la longitud del barreno con el que se perfore.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

El área de estudio está en la Empresa minera Las Bravas, ubicada en el distrito de Chaparra Provincia de Caravelí del departamento de Arequipa con coordenada Norte 8259209 y Este 627593 a una altitud de 2080 m.s.n.m.

3.2. METODOLOGÍA DE OBJETIVOS

3.2.1. Metodología para el objetivo específico 1

Para lograr el objetivo específico 1, que consiste en optimizar el factor de carga explosiva con el fin de reducir el costo de voladura por frente de avance en el desarrollo de la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2 en Arequipa, se ha diseñado una metodología integral que abarca varios pasos fundamentales.

3.2.1.1. Materiales

Explosivos Emulnor 5000 y Semexa 65%: Estos explosivos han sido seleccionados para ajustar la carga explosiva de acuerdo con las nuevas especificaciones del factor de carga. El Emulnor 5000 y el Semexa 65% son conocidos por sus propiedades específicas que afectan la fragmentación y el rendimiento de la voladura, lo que los hace adecuados para la optimización del factor de carga.

Instrumentos de Medición: Se utilizaron diversos equipos de medición para asegurar la precisión en la cantidad de explosivo aplicado y para calcular el factor de carga. Estos instrumentos incluyen básculas de alta precisión para medir el peso exacto de los explosivos y dispositivos



para registrar la cantidad y distribución en los taladros.

Excel: Se empleó el software Excel para el análisis de datos recopilados durante las pruebas y simulaciones. Excel permitió la modelización y ajuste de los parámetros del factor de carga, facilitando la evaluación de los resultados y la optimización de la carga explosiva

3.2.1.2. Métodos

Evaluación del Factor de Carga Actual: Inicialmente, se realizó un análisis exhaustivo del factor de carga explosiva antes de llevar a cabo cualquier optimización. Este análisis incluyó la medición precisa de los kilogramos de explosivo utilizados por metro cúbico de roca y el costo asociado a esta carga. Esta evaluación proporcionó una línea base esencial para identificar áreas de mejora.

Rediseño del Factor de Carga: Basándose en los resultados obtenidos durante la evaluación inicial, se procedió a ajustar el factor de carga explosiva. Este rediseño implicó la modificación de la cantidad y tipo de explosivo utilizado, buscando mejorar la relación entre el volumen de material roto y la cantidad de explosivo. El ajuste se realizó considerando las especificaciones técnicas y los costos asociados, con el objetivo de optimizar el uso del explosivo.

Pruebas y Validación: Se realizaron voladuras de prueba utilizando la nueva configuración de carga explosiva para validar que los ajustes en el factor de carga efectivamente redujeran los costos sin comprometer la eficacia de la voladura. Estas pruebas permitieron evaluar el impacto de los cambios en condiciones reales y asegurar que la optimización no



afectara negativamente la fragmentación de la roca.

3.2.1.3. Justificación y Análisis

La utilización de diferentes tipos de explosivos permitió un ajuste preciso en la carga explosiva, asegurando que los cambios en el factor de carga fueran efectivos. La metodología de prueba y ajuste garantizó que la reducción de costos no comprometiera el rendimiento de la voladura. El análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas validó la eficacia de los cambios implementados y confirmó que se lograron mejoras en la eficiencia de los costos sin sacrificar la calidad de la fragmentación.

3.2.2. Metodología para el objetivo específico 2

Para el objetivo 2: Disminuir el número de cartuchos de explosivos utilizados por frente de avance en el desarrollo de la rampa 115 de minas Las Bravas N°2, Arequipa.

3.2.2.1. Materiales

Cartuchos de Explosivos: Emulnor 5000 y Semexa 65% en diferentes cantidades para pruebas.

Registros de perforación: Datos previos sobre el número de cartuchos utilizados.

3.2.2.2. Métodos

Análisis del Número de Cartuchos Inicial: La primera etapa del proceso consistió en la revisión exhaustiva de los registros históricos de voladuras para determinar el número promedio de cartuchos utilizados por



frente de avance. Este análisis permitió establecer una línea base sobre el uso actual de cartuchos en las operaciones mineras. La información recopilada incluía datos sobre el tipo de roca, las dimensiones de los frentes de avance, y el número de cartuchos empleados en diferentes condiciones.

Optimización de la Malla de Perforación: Con base en los datos obtenidos del análisis inicial, se procedió a rediseñar la malla de perforación para reducir el número de cartuchos necesarios. El rediseño de la malla se realizó teniendo en cuenta el nuevo factor de carga explosiva, con el objetivo de optimizar la distribución de los explosivos y mejorar la eficiencia del proceso de voladura. La nueva malla de perforación se diseñó para ajustar los patrones de perforación y la disposición de los cartuchos, de manera que se maximice la eficacia de cada cartucho utilizado y se minimice la necesidad de cartuchos adicionales.

Implementación y Monitoreo: Una vez rediseñada la malla de perforación, se llevaron a cabo voladuras utilizando el nuevo diseño para observar el impacto en el número de cartuchos requeridos. Durante esta fase, se realizó un monitoreo detallado de los resultados de las voladuras, incluyendo la evaluación de la fragmentación de la roca, la distribución del explosivo, y el número de cartuchos utilizados. El objetivo fue evaluar la efectividad del nuevo diseño en la reducción del número de cartuchos y en la mejora de los resultados de la voladura.

3.2.2.3. Justificación y Análisis

La reducción en el número de cartuchos fue alcanzada al mejorar



el diseño de perforación, lo que permitió una distribución más eficiente del explosivo, este enfoque en conjunto disminuyó el uso de cartuchos, de igual forma ayudó a mantener la eficiencia operativa.

3.2.3. Metodología para el objetivo específico 3

Para el objetivo 3: Ajustar la cantidad de explosivos en el desarrollo de la rampa 115 de mina Las Bravas N°2, Arequipa.

3.2.3.1. Materiales

Explosivos Emulnor 5000 y Semexa 65%: Cantidades ajustadas para optimizar la carga explosiva.

Equipos de medición y control: Para verificar y ajustar las cantidades de explosivos.

3.2.3.2. Métodos

Evaluación de Cantidades Actuales: Revisión de los datos de consumo de explosivos previos para establecer un punto de partida.

Ajuste de Cantidades: Modificación de las cantidades de explosivos utilizadas según las nuevas especificaciones.

Pruebas y Ajustes: Ejecución de voladuras con las nuevas cantidades para asegurar que los ajustes mejoren la eficiencia sin aumentar los costos.

3.2.3.1. Justificación y Análisis

El ajuste de las cantidades de explosivos se basó en un análisis



detallado de la carga y el consumo, optimizando el uso de cada tipo de explosivo, este enfoque permitió mantener la eficacia de la voladura mientras se redujeron los costos.

3.2.4. Metodología para el objetivo específico 4

Para el objetivo 4: Mejorar la eficiencia de la voladura en el desarrollo de la rampa 115 de minas Las Bravas N°2, Arequipa.

3.2.4.1. Materiales

Instrumentos de Medición de Eficiencia: Equipos para evaluar la fragmentación y la calidad de las voladuras.

Datos Históricos de Eficiencia: Datos previos sobre la eficiencia de voladura para comparación.

3.2.4.2. Métodos

Evaluación de la Eficiencia Inicial: Análisis de la eficiencia de voladura antes de la optimización para establecer un punto de referencia.

Implementación de Mejoras: Aplicación de cambios en el diseño de la malla de perforación y en la cantidad de explosivos para mejorar la eficiencia.

Medición Post-Implementación: Evaluación de la eficiencia después de los ajustes para medir mejoras en la fragmentación y reducción de residuos.



3.2.4.3. Justificación y Análisis

Mejorar la eficiencia de la voladura fue logrado mediante una revisión detallada y ajuste de la malla de perforación y las cantidades de explosivos, la medición de la eficiencia antes y después de los cambios permitió validar las mejoras y asegurar que los objetivos de optimización se cumplieran eficazmente.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo Aplicada, ya que según Hernández et al. (2018), las investigaciones de tipo aplicada son aquellas que manipulan una variable para mejorar la otra variables. En ese escenario, hablamos de las variables independiente y dependiente respectivamente. Para el estudio en particular, se maneja la variable independiente: “Optimización de la carga explosiva”, misma que se utilizará para mejorar la variable dependiente: “Costos de voladura”.

3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es no Experimental, ya que según Hernández et al. (2018), el método no experimental se caracteriza por no manipular la variable independiente para llegar a obtener resultados. En la investigación se cumplen esta característica y su metodología se encuentra descrita en la matriz de operacionalización de variables adjuntada en anexos.

3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO

3.5.1. Población

La población estuvo conformada por el conjunto de frentes de minado que



se encuentran operativos en la unidad minera Las Bravas N°2 de Ica S.A.C., Arequipa.

3.5.2. Muestra

La muestra estuvo representada por el frente de avance seleccionada para el estudio de optimización de la carga explosiva en la rampa 115 de la mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C., Arequipa siendo representativa de la población total de frentes en la rampa.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos en esta investigación se llevó a cabo utilizando principalmente dos técnicas complementarias: la observación directa y el análisis documental. La observación directa implicó una inspección in situ de las condiciones y procesos relevantes para la investigación. Esta técnica permitió un examen detallado y empírico de las prácticas actuales, el estado de los materiales, y las condiciones operativas en el campo, proporcionando una comprensión profunda de cómo se están llevando a cabo las actividades relacionadas con la voladura y el uso de explosivos. La observación permitió recopilar datos sobre variables dinámicas y contextuales que podrían no estar disponibles en la literatura existente.

Paralelamente, se realizó un análisis documental exhaustivo que incluyó la revisión de bibliografía especializada en las variables involucradas en la optimización del factor de carga explosiva. Esta técnica consistió en consultar y analizar estudios previos, manuales técnicos, informes de investigación, y otras



fuentes relevantes que ofrecieran información teórica y empírica sobre el tema. La combinación de estas técnicas proporcionó una base sólida para el entendimiento de los principios, métodos y prácticas asociados con el factor de carga explosiva, y facilitó la contextualización de los datos observados

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se emplearon dos instrumentos principales: la guía de análisis documental y la guía de observación.

Guía de Análisis Documental: Este instrumento fue utilizado para sistematizar la revisión y el análisis de la bibliografía y documentación relevante. La guía de análisis documental incluyó un conjunto de criterios y preguntas que dirigieron la búsqueda y evaluación de la información contenida en los documentos revisados. Este instrumento permitió una recolección estructurada de datos teóricos y prácticos sobre el factor de carga explosiva y otros aspectos relacionados, asegurando que la información relevante fuera identificada y analizada de manera exhaustiva.

Guía de Observación: La guía de observación fue utilizada para registrar y analizar las condiciones y prácticas observadas directamente en el sitio de la investigación. Este instrumento incluyó una serie de pautas y categorías de observación diseñadas para capturar información detallada sobre las variables operativas y contextuales. La guía de observación facilitó la documentación sistemática de los aspectos críticos del proceso de voladura, como la distribución de explosivos, las técnicas utilizadas, y el estado de los materiales y equipos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS PARA DETERMINAR EL COSTO DE VOLADURA ACTUAL

Se presentan los resultados previos a la optimización de la carga explosiva. La carga explosiva se medirá a través de la manipulación de los factores de carga y potencia. Los datos han sido obtenidos directamente de campo, en el interior de las labores de minado que tienen lugar en el desarrollo de la rampa 115 de mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C.

Se comienza con la presentación de inputs relativos a las características técnicas de los explosivos comerciales utilizados en situ, entre las que destacan marcas como Emulnor y Semexa.

4.1.1. Características Técnicas de los Explosivos

En la tabla 3 se muestra los pesos relativos en kilogramos por cartucho de los principales explosivos comerciales utilizados en labores de desarrollo y producción en mina Las Bravas n° 2 de Ica S.A.C.

Tabla 3

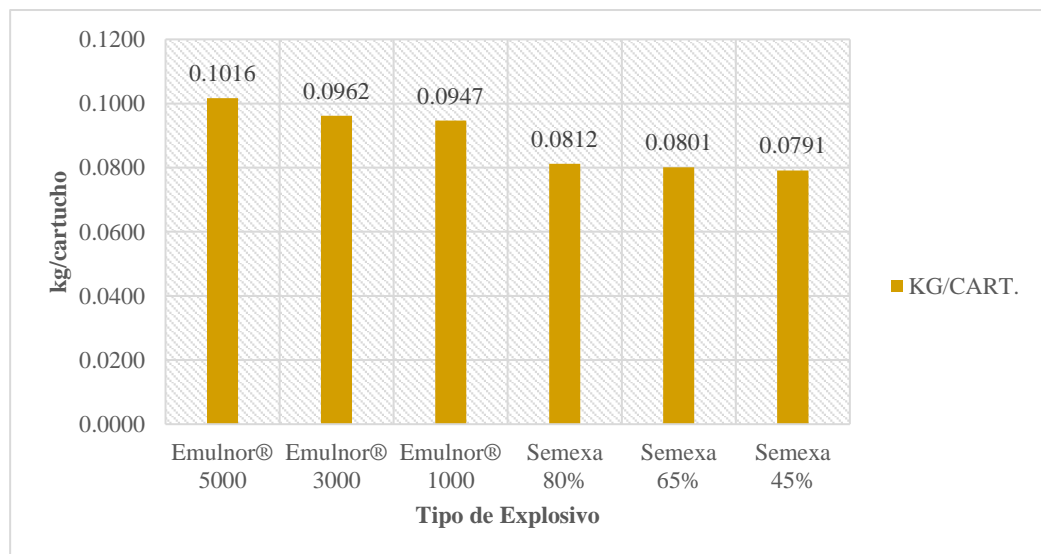
Pesos relativos por cartucho de explosivos tipo Emulnor y Semexa.

Explosivos			
Tipo	Kg/cart.	Und/caja	s/ cartucho
Emulnor® 5000	0.1016	246.00	
Emulnor® 3000	0.0962	260.00	
Emulnor® 1000	0.0947	264.00	
Semexa 80%	0.0812	308.00	
Semexa 65%	0.0801	312.00	
Semexa 45%	0.0791	316.00	
carmex		300.00	
mecha rapida		150.00	
Cordon Detonante			

Nota: La tabla muestra los valores relativos a los pesos por cartucho y por caja de los explosivos y accesorios de voladura.

Figura 6

Variación del peso en kilogramos de cartuchos de explosivos tipo Emulnor y Semexa.



Nota: La figura muestra los kilogramos por cartucho de cada una de las variedades de explosivo utilizado en los frentes de minado de mina Las Bravas N°2.

El explosivo tipo Emulnor son cartuchos en forma de gelatina que se utilizan como iniciadores o cebo de la columna explosiva, luego se apilan los cartuchos de semexa hasta taponear el taladro con un taco.

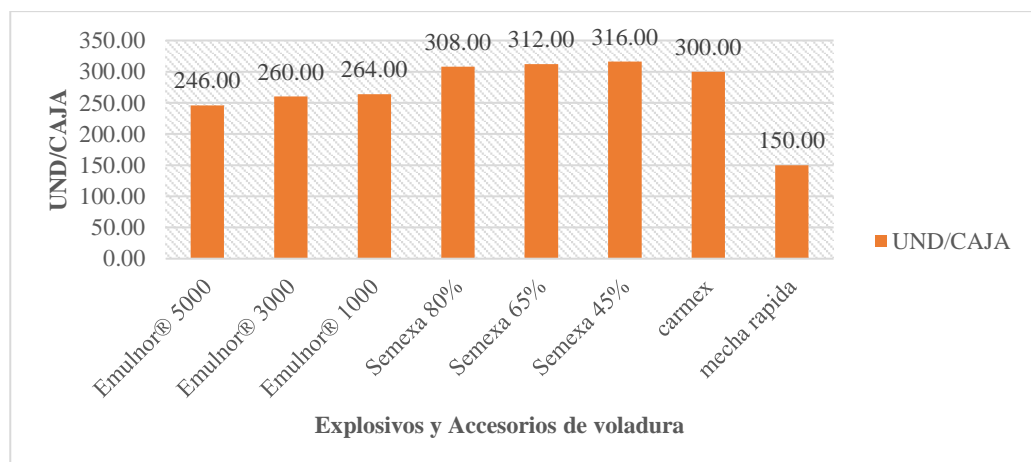
Como se observa en la figura 6 las variedades de Emulnor van desde los 5 000, 3 000 y 1000, los cuales remiten al tiempo en segundos en que reaccionan al contacto con la chispa del cordón detonante.

Por otro lado, las variedades de semexa van desde 80%, 65% y 45%, los cuales son porcentajes en donde se evalúa la concentración del cartucho en proporción a su potencia explosiva.

Por último, se observa a nivel estadístico que las variedades del explosivo semexa no presentan mucha variabilidad en su peso relativo, en general oscilan entre los 0.7 y 0.8 kilogramos por cartucho. Por el contrario, los explosivos tipo Emulnor presenta una mayor varianza, siendo el Emulnor 5000 el explosivo con mayor peso relativo en kilogramos.

Figura 7

Unidades de cartuchos por caja para explosivos y accesorios de voladura



Nota: La tabla muestra la distribución de las unidades por caja para los distintos tipos de explosivo y accesorios de voladura.

En la figura 7, se presenta la tendencia de los valores en unidades de explosivos que se comercializan por caja, tanto para iniciadores Emulnor como para explosivos de carga Semexa. Es importante reconocer estos valores para realizar una correcta programación de los accesorios de voladura necesarios para cumplir con el plan de minado mensual.

4.1.2. Precios Unitarios de Perforación

La estructura de costos de perforación está definida por las siguientes dimensiones:

- Costos del Equipo de Perforación
- Costos de Accesorios de Perforación
- Costos de Aceros de Perforación

En las tablas 4, 5 y 6 se muestra los precios unitarios para cada dimensión descrita.

Tabla 4

Precio Unitario en soles y dólares para el Equipo de Perforación

Equipo de perforación	UNID.	V. Útil		P.U.S S/.	P.U.S \$	S/. PIE PERF.	\$/PIE
Maquina Perforadora Neumatica Rn-250x	Pies	100,000	Pies	17,720.12	4,543.62	0.18	0.045
Mantenimiento Y Repuestos	100%	100,000	Pies	17,720.12	4,543.62	0.18	0.045
Total						0.35	0.091

Nota: La tabla muestra los precios unitarios y por pie perforadora para la maquinaria de perforación utilizada en los frentes de minado de mina Las Bravas N°2.

Tabla 5

Precio Unitario en soles y dólares para los Accesorios de Perforación

Accesorio De Perforación	Unid.	Vida Útil		P.U.S S/.	P.U.S \$	S/. Dia	\$. Dia
Manguera De 1/2" Para Agua	Mts.	90	Días	31.20	8	0.35	0.1
Manguera De 1" Para Aire	Mts.	90	Días	60.45	15.5	0.67	0.2
Aceite De Perforacion	Gln.	4	Perf.	53.55	13.73	13.39	3.4

Nota: La tabla muestra los precios unitarios y costo en soles y dólares por día para los accesorios de perforación utilizados en los frentes de minado de mina Las Bravas N°2.

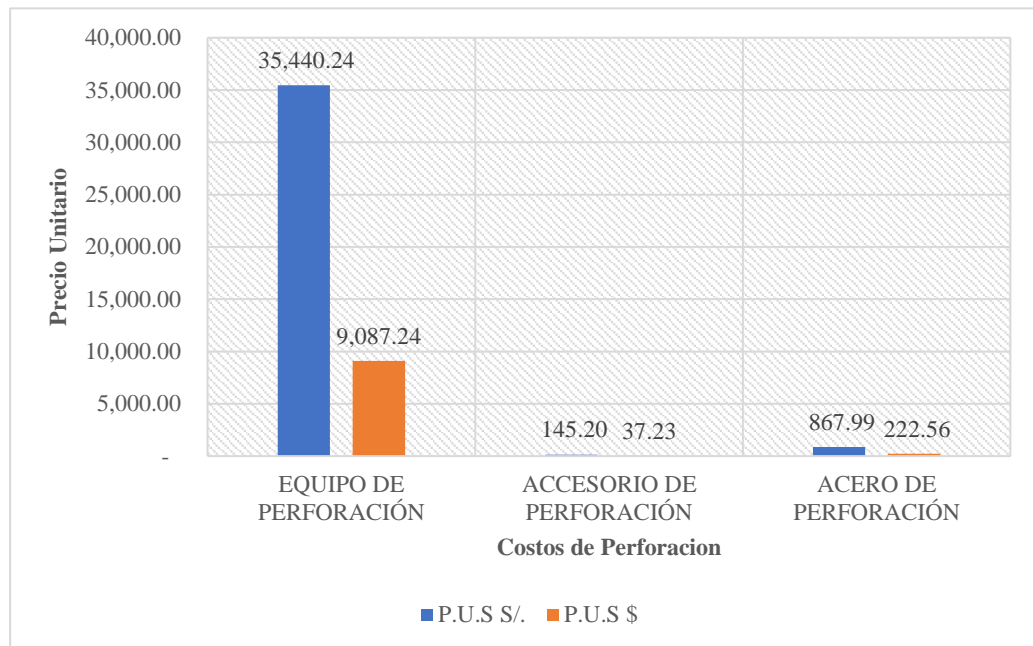
Tabla 6

Precio Unitario en soles y dólares para Aceros de Perforación

Acero De Perforación	Unid.	Vida Útil		P.U.S S/.	P.U.S \$	S/. Perf.	Pie \$/Pie
Barra Conica De 2'	Pza.	1200	Pies	92.54	23.73	0.08	0.02
Barra Conica De 4'	Pza.	1200	Pies	104.48	26.79	0.09	0.02
Barra Conica De 6'	Pza.	1200	Pies	167.16	42.86	0.14	0.04
Barra Conica De 8'	Pza.	800	Pies	380.00	97.44	0.48	0.12
Broca De 36 Mm	Pza	300	Pies	85.00	21.79	0.28	0.07
Broca De 38 Mm	Pza	250	Pies	38.81	9.95	0.16	0.04

Figura 8

Precio Unitario en soles y dólares de la Estructura de Costos en Perforación



Nota: La figura muestra la estructura de precios unitarios para el equipo, accesorios y aceros de perforación.

La figura 3 resalta la importancia de la dimensión del equipo de perforación en la estructura de costes general, en especial representa una gran parte del precio unitario total. Comparativamente, las dimensiones de Accesorios y Aceros de Perforación representan una parte muy pequeña del sistema de precios unitarios.

4.1.3. Costos Total de Perforación

El coste total para la perforación se mide en términos de dólares o soles por metro lineal de avance. Para ello se inicia extrayendo los costos obtenidos en el apartado de precios unitarios, los costos por pie perforado para el equipo y aceros, y costos por día para los accesorios de perforación. Con la data anterior se procede a unificar los costos en función de los pies perforados por frente (Frente

de galería), para culminar con un costo relativo al avance lineal por frente, este mismo es el resultado de la división entre el costo de pie perforado por frente y el avance lineal en metros. En las tablas 7, 8 y 9 se muestran la evidencia empírica recogida en campo de cada uno de los ítems mencionados.

Tabla 7

Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para el Equipo de Perforación

Equipo De Perforación	Unid.	S/. Pie Perf.	\$/Pie	Pie/Perfor	S/. Pie Perf./ Frente	\$ Pie/Frente
Máquina Perforadora Neumática Rn-250x	Pies	0.18	0.045	264	46.78	12.00
Mantenimiento Y Repuestos	100%	0.18	0.045	264	46.78	12.00

Nota: La tabla muestra el costo en soles por pie perforado en frente de avance del equipo de perforación.

Tabla 8

Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para los Accesorios de Perforación

Accesorio De Perforación	Unid.	S/. Dia	\$. Dia	Cant		
Manguera De 1/2" Para Agua	Mts.	0.35	0.1	30	10.40	2.67
Manguera De 1" Para Aire	Mts.	0.67	0.2	30	20.15	5.17
Aceite De Perforación	Gln.	13.39	3.4	0.3	4.02	1.03

Nota: La tabla muestra los costes por día para los accesorios de voladura utilizados en mina Las Bravas N°2.

Tabla 9

Costo en soles y dólares por pie perforado en frente para los Aceros de Perforación

Acero De Perforación	Unid.	S/. Pie Perf.	\$/Pie	Pie/Perfor	S/. Pie Perf./ Frente	\$ Pie/Frente
Barra Cónica De 4'	Pies	0.09	0.02	176	15.32	3.93
Barra Cónica De 6'	Pies	0.14	0.04	88	12.26	3.14
Broca De 36 Mm	Pies	0.28	0.07	88	24.93	6.39
Broca De 38 Mm	Pies	0.16	0.04	176	27.32	7.01

Nota: La tabla muestra los costos por pie perforado y por frente de avance para los aceros de perforación utilizados en mina Las Bravas N°2.

En la tabla 10 se realiza un resumen del costo total relativo a pies por frente perforado de cada uno de los componentes de la estructura de costos de perforación: Equipo de perforación, accesorios de perforación y aceros de perforación.

Tabla 10

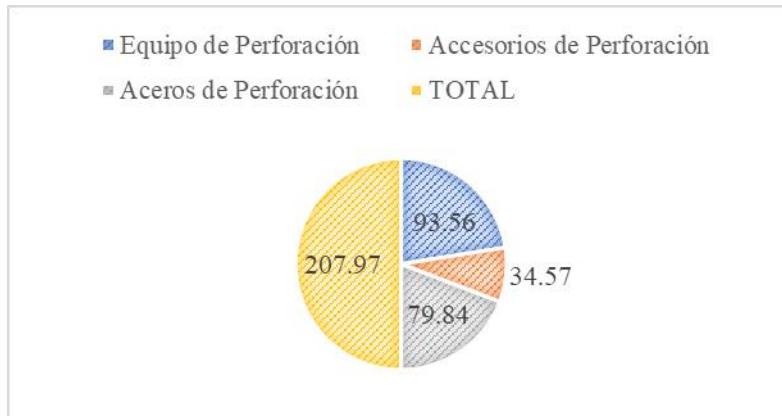
Tabla resumen del costo de pies perforado por frente para equipo, accesorios y aceros de perforación

Costo Total Por Pie/Frente Perf.	S/. Pie Perf./ Frente	\$ Pie/Frente
<i>Equipo De Perforación</i>	93.56	23.99
<i>Accesorios De Perforación</i>	34.57	8.86
<i>Aceros De Perforación</i>	79.84	20.47
Total	207.97	53.32

Nota: La tabla muestra el costo en soles y dólares de pies perforados por frente de avance para cada ítem de perforación.

Figura 9

Grado de participación del equipo, accesorios y aceros en el coste por pie perforado en frente de perforación



En la tabla 11 se presenta el costo total por metro lineal de avance, producto de dividir el coste total por pie perforado en frente entre el avance lineal en metros registrado en operación en situ.

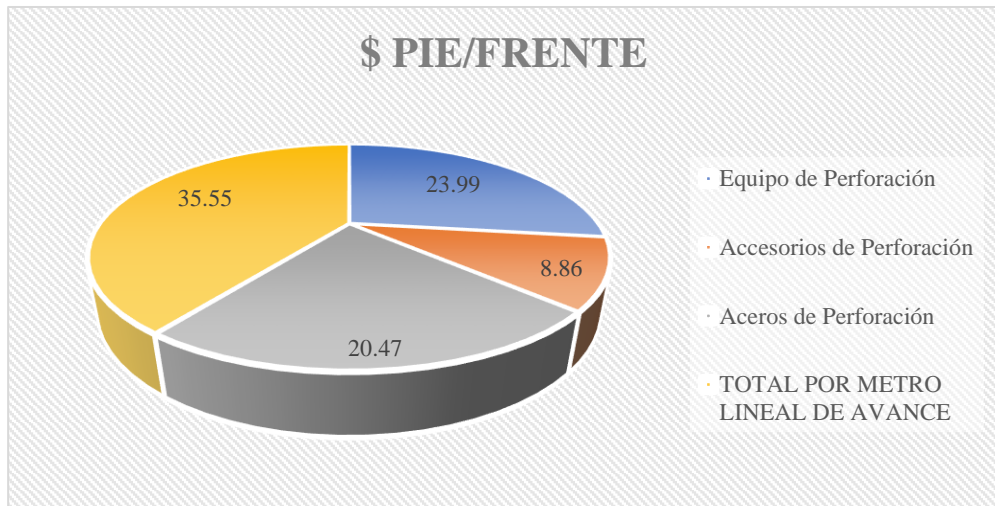
Tabla 11

Costo total por metro lineal de avance para el equipo, accesorios y aceros de perforación

Costo total por pie/frente perf.	S/. PIE PERF./ FRENTE	\$ PIE/FRENTE
Equipo de Perforación	128.13	32.85
Accesorios de Perforación	207.97	53.32
Aceros de Perforación	0.00	0.00
TOTAL	336.09	86.18
TOTAL, POR METRO LINEAL DE AVANCE	138.64	35.55

Figura 10

Incidencia en dólares por metro lineal de avance del equipo, accesorios y aceros de perforación



4.1.4. Precios Unitarios de Explosivos y Accesorios

La estructura de costos para explosivos y accesorios está determinada por las siguientes dimensiones:

- Emulnor de 1 000 y 5 000
- Dinamita 65%
- Carmex 7 pies
- Mecha rápida

En las tablas 12, 13 y 14 se muestra los datos empíricos para los precios unitarios relativos a los explosivos y accesorios comerciales utilizados en las operaciones de minado de mina Las Bravas N°2 de Ica S.A.C.



Tabla 12

Características técnicas de explosivos y accesorios de voladura

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIO	UNID.	CANTIDAD	DENSIDAD
EMULNOR 1000 (Cja x 25 kg.)	Unid	264	0.095
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	Unid	246	0.102
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	Unid	312	0.080
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	Unid	300	
MECHA RAPIDA (150 m)	Metros	150	

Tabla 13

Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIOS	P.U.S S/.(Cja)	P.U.S \$(Cja)
EMULNOR 1000 (Cja x 25 kg.)	489.06	125.4
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	597.03	153.08
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	1093.48	280.38
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	1937.95	496.91
MECHA RAPIDA (150 m)	555.75	142.5

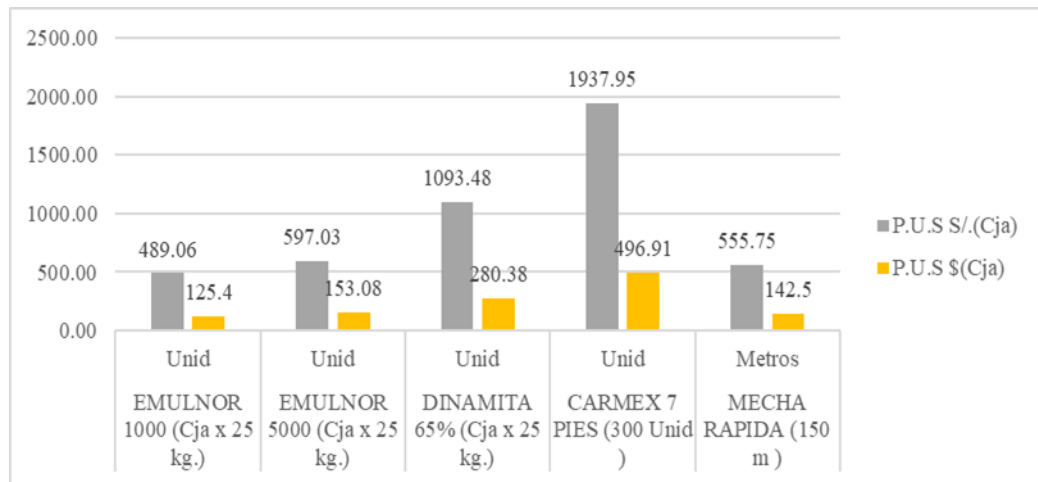
Tabla 14

Costo en soles y dólares por kilogramo para explosivos y accesorios de voladura

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIO	S/. Kg	\$. Kg
EMULNOR 1000 (Cja x 25 kg.)	19.56	5.02
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	23.88	6.12
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	43.74	11.2152
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	6.46	1.66
MECHA RAPIDA (150 m)	3.71	0.95

Figura 11

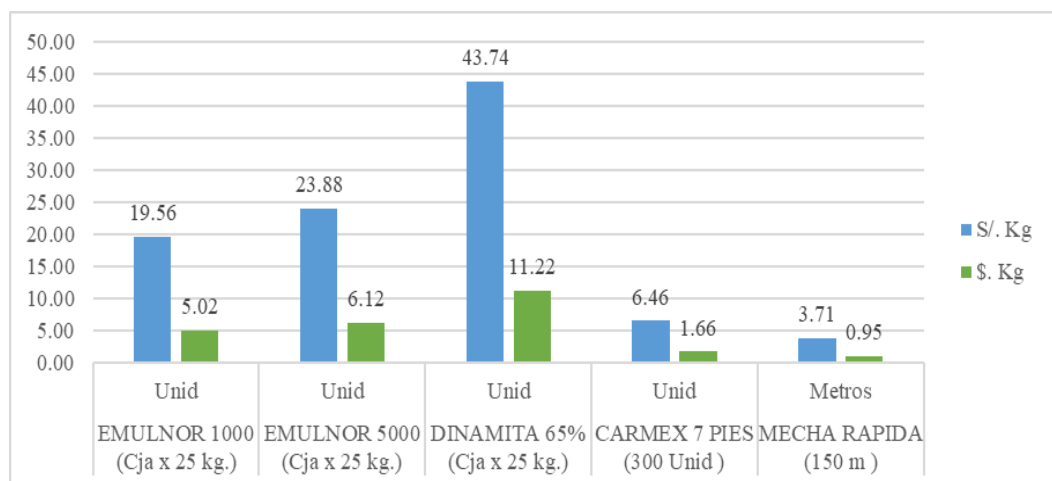
Tendencia de los Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura



De acuerdo a la figura 11, la Dinamita 65% y el Carmex de 7 pies son aquellos componentes de la voladura que tienen mayor precio unitario y su incidencia en los costes totales de explosivos es alta, con valores de 280.38 y 496.91 dólares por caja respectivamente.

Figura 12

Tendencia de los Precios Unitarios para explosivos y accesorios de voladura



De acuerdo a la figura 12, la Dinamita 65% y el Emulnor 5 000 son los componentes con mayor incidencia en la estructura de costos por kilogramo de



explosivo, con valores de 11.22 y 6.12 dólares por kilogramo respectivamente. En ese sentido, son aquellas aristas donde se debe centrar el enfoque para una posible propuesta de reducción de costes en voladura.

4.1.5. Costo Total de Explosivos y Accesorios

Los costos totales de explosivos y accesorios se miden en términos de soles o dólares consumidos por frente de avance. Se inicia con la recolección de los datos obtenidos del apartado de precios unitarios de explosivos y accesorios, para continuar con el cálculo para los pies perforados por frente que permite cumplir con el plan de minado mensual.

En La tabla 15 y 16 se muestra valores correspondientes a los costos de explosivo y accesorios en kilogramos por pies perforados en frente de avance, así mismo, se presenta el total de la suma parcial de cada uno de los componentes en soles y en dólares.

Tabla 15

Costos de kilogramo por pie perforado en frente para explosivos y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIO	UNID.	CANT	S/. Kg	\$. Kg	S/. Kg/*FRENTE	\$. Kg/FRENTE
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	Unid	10.06	23.88	6.12	240.27	61.61
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	Unid	12.10	43.74	11.22	529.22	135.70
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	Unid	39	6.46	1.66	251.93	64.60
MECHA RAPIDA (150 m)	Metros	15	3.71	0.95	55.58	14.25
TOTAL					1076.99	276.15

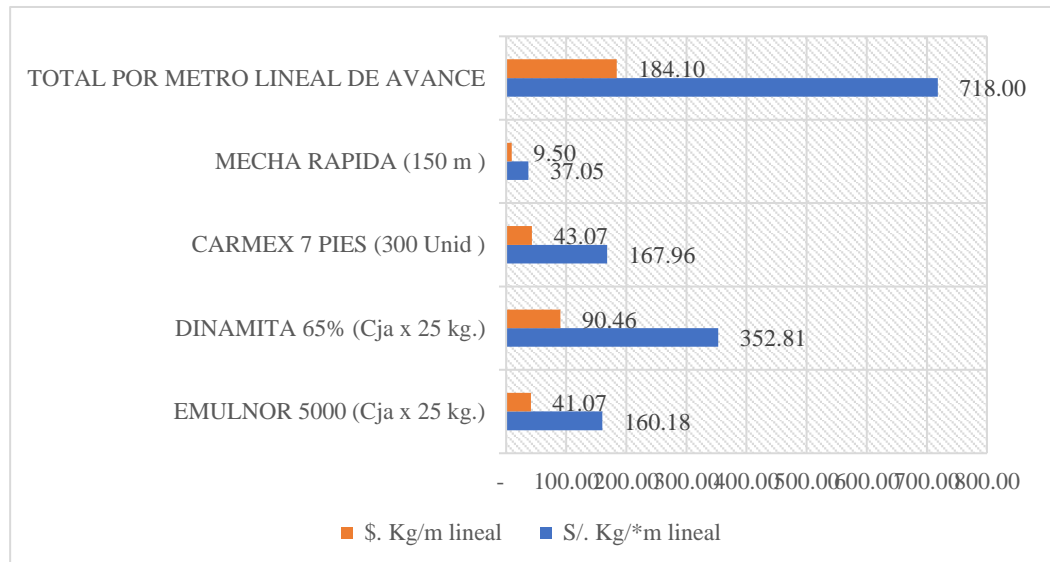
Tabla 16

Costo Total de kilogramo por metro lineal de avance en frente para explosivos y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIO	S/. Kg*m lineal	\$. Kg/m lineal
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	160.18	41.07
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	352.81	90.46
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	167.96	43.07
MECHA RAPIDA (150 m)	37.05	9.50
TOTAL POR METRO LINEAL DE AVANCE	718.00	184.10

Figura 13

Costos en kilogramos por metro lineal para explosivos y accesorios de voladura en mina Las Bravas N°2



A partir de la figura 13, se puede interpretar que, la Dinamita 65% representa el componente con mayor incidencia en la estructura de costes relativo a kilogramos por metro lineal de avance, seguido del carmex y Emulnor. Con valores en dólares de 90.46; 43.07 y 41.07 respectivamente. En ese sentido, el valor total para la voladura en dólares por metro lineal se posiciona en unos 184.10. Este último valor será el comparativo principal que se analizará en resultados posteriores a la optimización de los valores de la carga explosiva.



4.2. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO EL FACTOR DE CARGA

La optimización de la carga explosiva se mide a través de dos factores:

- Factor de Carga
- Factor de Potencia

Estos dos factores pertenecen al conjunto de parámetros de voladura que se evalúan en situ, y su registro depende de las condiciones del material volado al término de cada frente de avance.

Para efectos de la modificación de los factores de la carga explosiva, se inicia con la identificación primaria de las condiciones iniciales de la distribución de la malla de perforación y de los resultados de algunos parámetros de voladura como:

- Volumen roto
- Tonelaje roto
- Factor de carga
- Factor de potencia
- Factor de carga lineal
- Eficiencia

Se culmina con la manipulación efectiva de la distribución y cargado de taladros para lograr aumentar los factores de carga explosiva y reducir los costos de explosivos y accesorios de voladura.

En la tabla 17 se muestra la distribución de los taladros para la malla de perforación inicial.

Tabla 17

Distribución del número de taladros y de explosivos Emulnor antes de la optimización de la carga explosiva en frentes de avance de mina

Las Bravas N°2

TIPO DE ROCA	II A	EMULNOR DE 5000	TOTAL DE CARTUCHOS (Und) DE 5000	TOTAL DE CARTUCHOS (KG)
Longitud de perforación	1.50			
emulnor de 5000 1 x 7 (kg)	0.102			
dinamita de 65 % (kg)	0.080128205			0.101626016
Número de taladros cargados				
Tipo de taladro				
Alivios	5			
Arranque	4	6	27	2.74
1° Ayuda (I C)	4	3	12	1.22
2° Ayuda (II C)	4	2	8	0.81
3° Ayuda (III C)	4	1	4	0.41
Cuadradores	4	1	4	0.41
Ayuda de Hastiales	0		0	0.00
Ayuda de Corona	5	1	5	0.51
Ayuda de Arrastre	0		0	0.00
Hastiales	4	1	4	0.41
Corona	5	1	5	0.51
Arrastres	5	6	30	3.05
TOTAL DE TALADROS CARGADOS	44	22	99	10.06097561

Tabla 18

Distribución del número de taladros y de explosivos Semexa 65% antes de la optimización de la carga explosiva en frentes de avance de

mina Las Bravas N°2

TIPO DE ROCA	II A	DINAMITA DE 65% (Und)	DINAMITA DE 65% (kg)
Longitud de perforación	1.50		
emulnor de 5000 l x 7 (kg)	0.102		
dinamita de 65 % (kg)	0.080128205		0.08012821
Tipo de taladro	Número de taladros cargados	Número de taladros cargados	
Alivios	5		
Arranque	4	0	0.00
1° Ayuda (I C)	4	4	1.28
2° Ayuda (II C)	4	5	1.60
3° Ayuda (III C)	4	5	1.60
cuadradores	4	5	1.60
Ayuda de Hastiales	0	0	0.00
Ayuda de Corona	5	5	2.00
Ayuda de Arrastre	0	0	0.00
Hastiales	4	5	1.60
Corona	5	5	2.00
Arrastres	5	1	0.40
TOTAL DE TALADROS CARGADOS	44	35	12.10

Tabla 19

Total, de cartuchos utilizados por taladro para frentes de avance en mina Las Bravas N° 2 de Ica S.A.C.

EMULN OR DE 5000	TOTAL DE CARTUCH OS (Und) DE 5000	TOTAL DE CARTUCHO S (KG)	DINAMITA DE 65%	DINAMITA DE 65% (Und)	DINAMITA DE 65% (kg)	TOTAL DE CARTUCHOS	LONG. DE CARGUIO (m)	LONG DE TACO
		0.101626016			0.08012821			
Número de taladros cargados								
6	27	2.74	0	0	0.00	0	0	0.25
3	12	1.22	4	16	1.28	27	1.45	0.4
2	8	0.81	5	20	1.60	28	1.3	0.4
1	4	0.41	5	20	1.60	28	1.3	0.4
1	4	0.41	5	20	1.60	24	1.3	0.4
1	4	0.41	5	20	1.60	24	1.3	0.4
1	0	0.00		0	0.00	0	1.3	0.4
1	5	0.51	5	25	2.00	30	1.3	0.4
1	0	0.00		0	0.00	0	1.3	0.4
1	4	0.41	5	20	1.60	24	1.3	0.4
1	5	0.51	5	25	2.00	24	1.3	0.4
6	30	3.05	1	5	0.40	35	1.45	0.25
22	99	10.06097561	35	151	12.10			

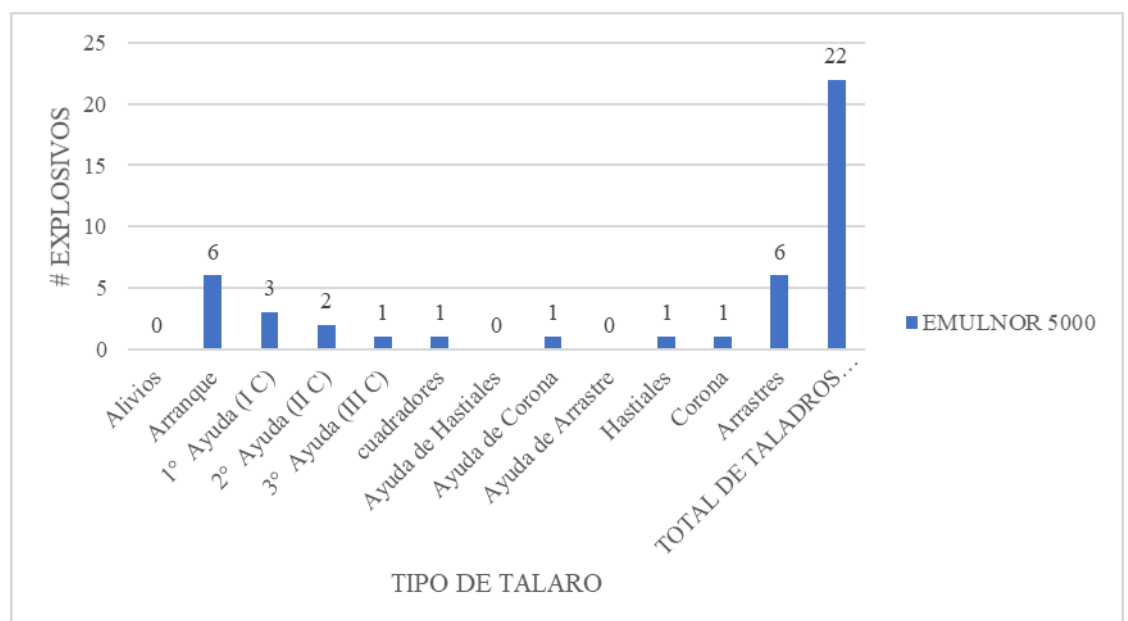
Tabla 20

Distribución de la secuencia de salida para taladros cargados en frentes de avance de mina Las Bravas N°2

Secuencia de salida	Distribución	Burden Practico (m)	Ancho de la Abertura (m.)	Espaciamiento o Ah (m)
1	Alivios			
2	Arranque	0.10	0.19	
3	1° Ayuda (I C)	0.19	0.45	
4	2° Ayuda (II C)	0.31	0.76	
5	3° Ayuda (III C)	0.33	1.00	
6	4° Ayuda (IV C)	0.39	1.26	
7	Ayuda de Hastiales	0.27	0.73	-0.50
8	Ayuda de Corona	0.37	1.37	0.46
9	Ayuda de Arrastre	0.25	1.51	0.50
10	Hastiales	0.29	0.82	0.27
11	Corona	0.61		0.57
12	Arrastres	0.67		0.57 & 0.48

Figura 14

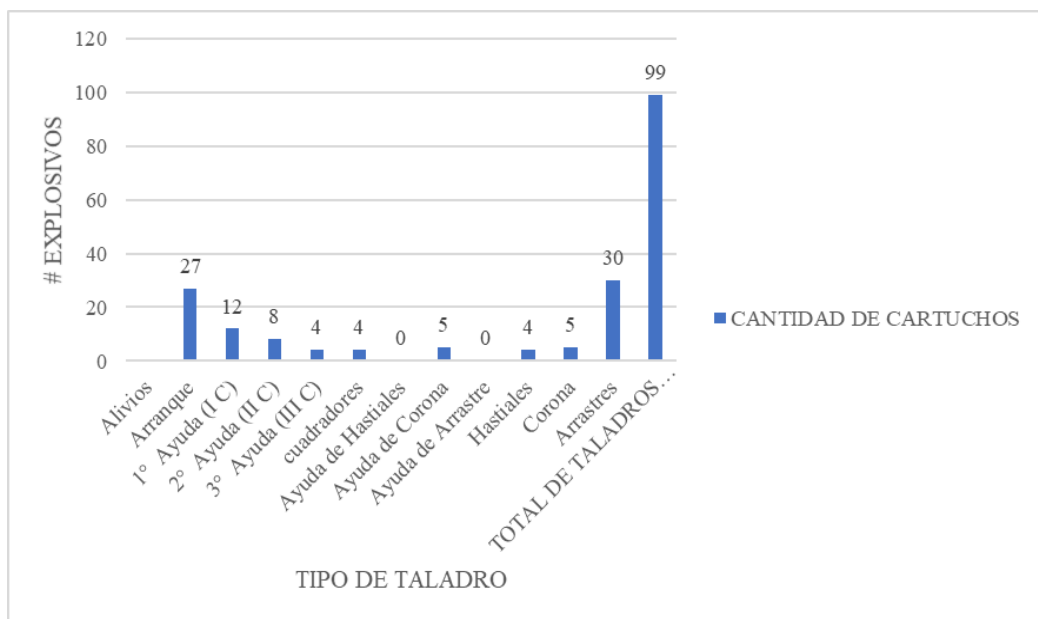
Distribución de explosivos EMULNOR 5000 por tipo de taladro



Como se observa en la figura 14, los taladros de arranque contienen un mayor número de explosivos tipo Emulnor 5000, con una cantidad de 6 explosivos por taladro, se remarca el enfoque sobre la importancia de ponderar la máxima carga explosiva sobre el inicio de la voladura, esto debido a que se cuenta con una roca dura tipo IIA. No se considera explosivos en la parte inferior de los taladros de ayuda de arrastre y se prevé la cantidad de sólo un taladro para el resto de taladros. Esta distribución del explosivo Emulnor, condiciona su uso como un explosivo iniciador o cebo a nivel de la columna explosiva.

Figura 15

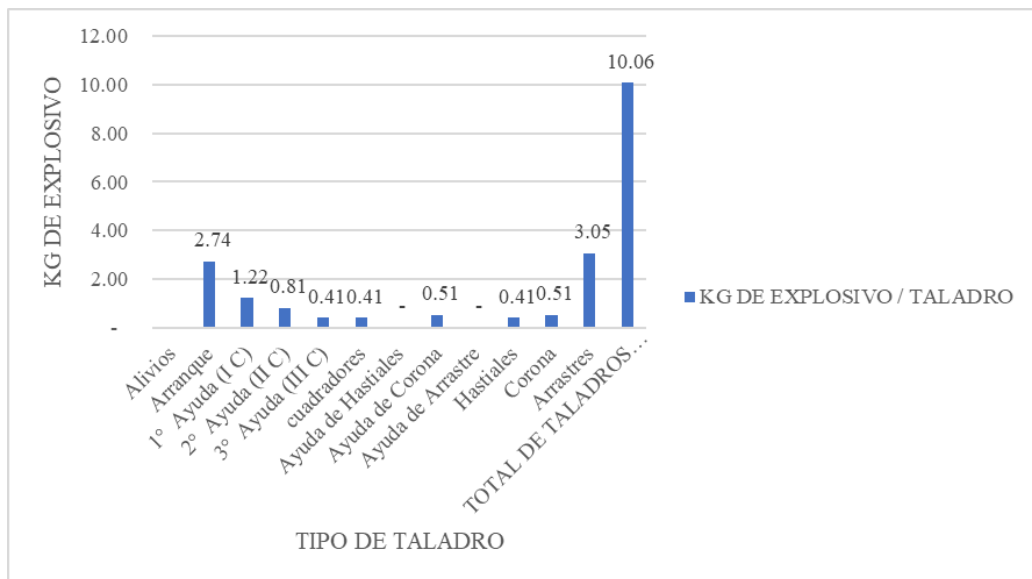
Cantidad total de cartuchos Emulnor 5000 por tipo de taladro



La figura 15, muestra la cantidad total de cartuchos de Emulnor 5000 necesarios por tipo de taladro. Se resalta la incidencia mayor sobre los taladros de arranque y arrastre, con un número de 27 y 30 de taladros cargados respectivamente. Así mismo, se registra un total de 99 explosivos para el cargado total de taladros programados.

Figura 16

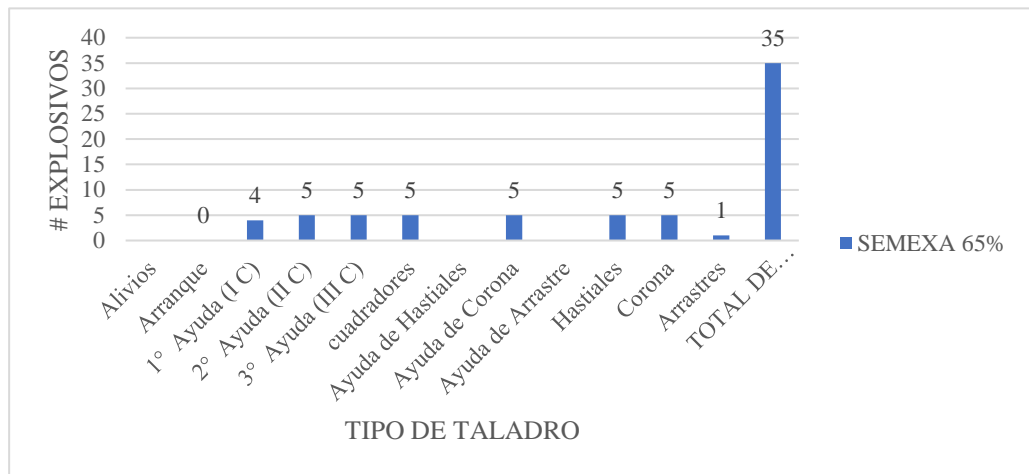
Peso en kilogramos de Emulnor 5000 distribuidos por tipo de taladro



De la figura 16, se deduce que, la mayor proporción de peso en kilogramos está concentrada sobre los taladros de arranque y arrastre, mismos que registran el mayor volumen de carga registrados en las figuras 14 y 15. Por otro lado, se conoce la cantidad total de kilogramos de explosivo cargados por frente de avance, con una cantidad 10.06kg de explosivo por frente.

Figura 17

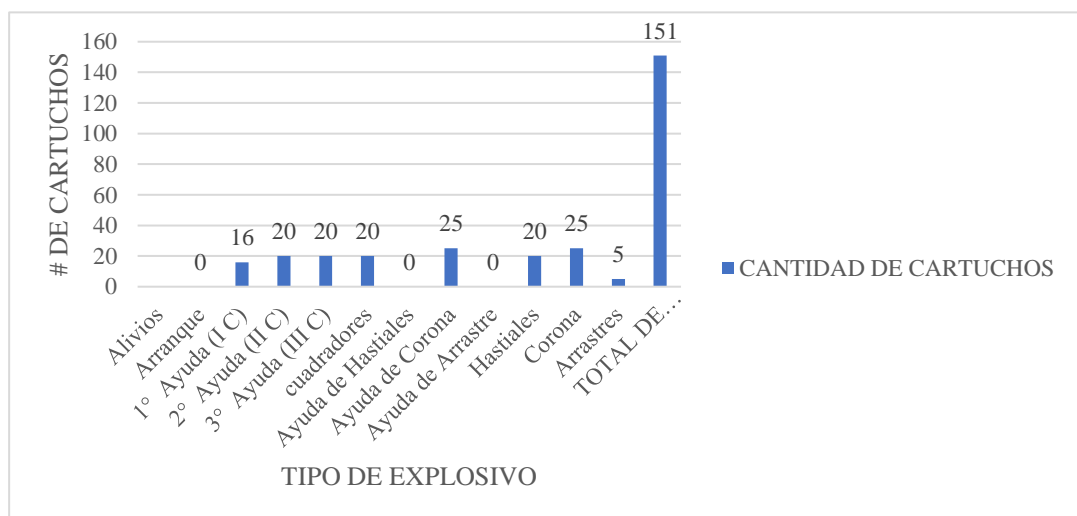
Distribución de explosivos SEMEXA 65% por tipo de taladro



Se observa en la figura 17, que para el explosivo Semexa 65% se registra una tendencia horizontal y constante en cuanto al número de explosivos cargados por tipo de taladro. No se presenta una varianza abrupta como en el caso del Emulnor 5000, en ese sentido, se visualiza que, el total de explosivos cargados por tipo de taladro asciende a 35 taladros.

Figura 18

Cantidad total de cartuchos Semexa 65% por tipo de taladro

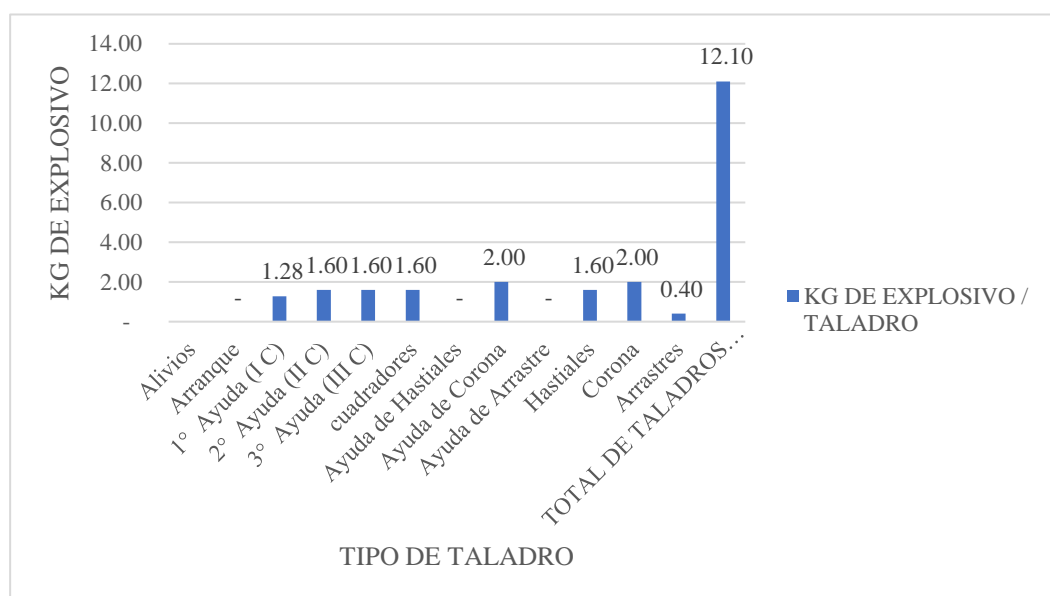


Se deduce de la figura 18, que la cantidad de cartuchos de utilizados de

Semexa presenta una tendencia uniforme en la distribución por tipo de taladro, esto condiciona que la mejora del factor de carga y potencia converja en límites muy limitados. Por lo que el campo de acción para realizar el proceso de mejora se reduce.

Figura 19

Distribución del peso de explosivo Semexa 65% de acuerdo al tipo de taladro en mina Las Bravas N°2



De la figura 19, se interpreta que, la cantidad total de kilogramos de explosivo tipo semexa 65% utilizado por frente, es menor que los kilogramos utilizados de Emulnor. De este escenario descrito, puede provenir el proceso de mejora relativos a la reducción de los factores de carga explosiva, y, por lo tanto, lograr reducir los costes de explosivo y accesorios, cumpliendo con el objetivo planteado en la investigación. Se observa así mismo que, los taladros de arranque no son cargados con este tipo de explosivo y la variabilidad en el resto de taladros es mínima.

4.2.1. Resultados de voladura antes de la optimización de la carga explosiva

Tabla 21

Datos técnicos de la roca, labor y taladros previo a la optimización de la carga explosiva

DATOS TECNICOS		
Densidad de Roca	2.7	tn/m ³
Seccion de Labor	2.1 x 2.4	
N de taladros cargados	39	taladros
N de taladros de alivio	4	taladros
N de taladros	43	taladros
Diametro de taladro	38	mm
Longitud promedio de taladro	1.70	metros

Tabla 22

Resumen de explosivos y accesorios utilizados previa a la optimización de la carga explosiva

EXPLOSIVOS	CANTIDAD	UND
EMULNOR 5000	99	und
DINAMITA 65%	151	und
CARMEX	44	und
Mecha rápida	15	m

Tabla 23

Resultado de parámetros de voladura previo a la optimización de carga explosiva

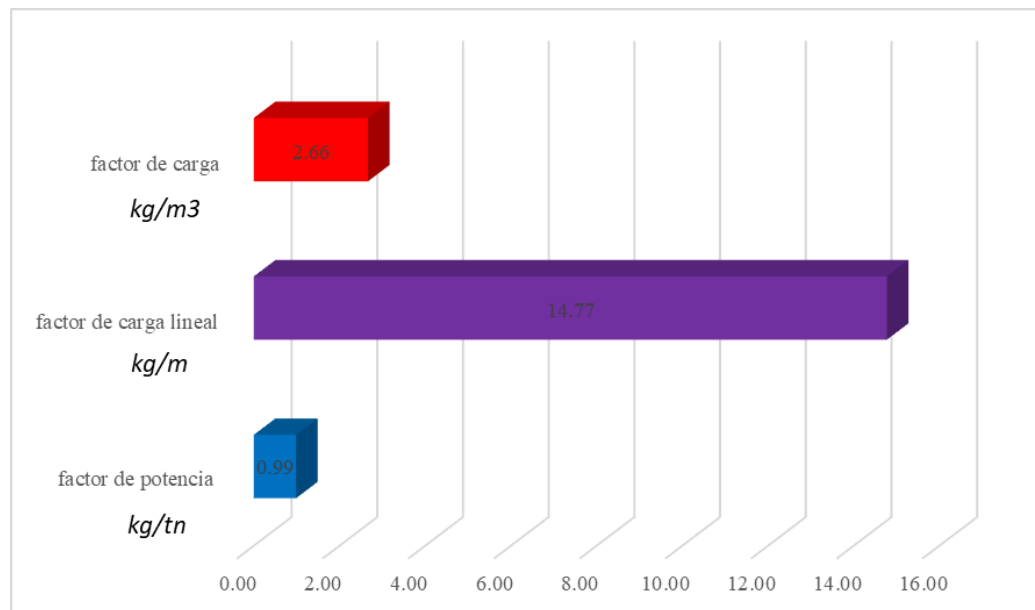
RESULTADOS		
longitud de avance	1.5	m
volumen roto	8.316	m ³
tonelaje roto	22.4532	Tn
factor de carga	2.66	kg/m ³
factor de potencia	0.99	kg/tn
factor de carga lineal	14.77	kg/m
eficiencia	88.24%	

Se centra el análisis sobre los parámetros de la carga explosiva, los cuales son:

- Factor de carga
- Factor de potencia

Figura 20

Factores de carga, lineal y potencia previa a la optimización de carga explosiva



En la figura 20, se registra los valores para los factores de carga explosiva previo a la optimización de la misma, encontrándose los siguientes resultados: factor de carga= 2.66 kg/m³, factor de potencia=0.99 kg/tn y factor lineal=kg/m. Así mismo, se evidencia un margen de mejora en los factores de carga y potencia que permita disminuir el factor de carga lineal. Por lo tanto, si se aumentase los factores de carga y explosiva, se podrá optimizar el uso de explosivo por cantidad de roca volada, de esta manera, se podrá conseguir repercusiones en la estructura de costes final.



4.3. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO EL FACTOR DE POTENCIA

Se procede a realizar el proceso de mejora en los parámetros o factores de la carga explosiva, para ello se evaluará la distribución de los taladros en función de la cantidad de explosivo en kilogramos que están siendo utilizados por frente de avance.

Se realiza, por lo tanto, el análisis comparativo para proceder a validar los resultados.

Tabla 24

Comparativa entre la cantidad de cartuchos de Emulnor 5000 vs Semexa 65% antes y después de la nueva distribución

TIPO DE TALADRO	ANTES		POST	
	Cantidad de cartuchos Emulnor 5000	Cantidad de cartuchos Semexa 65%	Cantidad de cartuchos Emulnor 5000	Cantidad de cartuchos Semexa 65%
TAL. ARRANQUE	27	0	31	
ROMPE BOCA	12	16	0	
TAL. ALIVIO	8	20		
TAL. AYUDA I	4	20	12	11
TAL. AYUDAS II	4	20	4	20
TAL. DE AYUDA III	0	0	4	20
TAL. CUADRADORES	5	25	4	20
TAL. HASTIALES	0	0	4	20
TAL. CORONA	4	20	5	25
TAL. AYUDA CORONA	5	25	5	25
TAL. ARRASTRE	30	5	30	
TOTAL TALADROS	99	151	99	141

Interpretación:

A partir de la tabla 24, se puede afirmar que, por un lado, la cantidad de explosivos Emulnor 5000 se mantiene inalterado, es decir, no cambia antes ni después en la



distribución por tipo de taladro, sin embargo, si cambia la distribución de este explosivo en cada taladro. Por ejemplo, en los taladros de arranque aumenta la cantidad de cartuchos Emulnor desde 27 hasta 31 (ver figura 21), esto debido a, que se necesita una mayor potencia de arranque en los taladros iniciales para aumentar la efectividad en la volabilidad de la roca dura tipo IIA.

Así mismo, se omite la carga de explosivo Emulnor en taladros tipo rompeboca y alivio, sin embargo, se centra la carga en los taladros de ayuda y hastiales.

Por otra parte, los explosivos de carga de columna tipo Semexa 65% sufren un cambio en la cantidad distribuida por taladro, pasando desde 151 hasta 141 cartuchos de explosivo (ver figura 22), con una disminución de 10 cartuchos, los cuales supondrán una disminución en los costes reales de explosivo. Esta varianza en la cantidad de cartuchos se justifica porque para tipos de roca dura se recomienda enfocar la máxima potencia en los taladros primarios de arranque y ayudas, ya que, según la experiencia recogida, esta área es crítica en los momentos iniciales de la voladura. Para garantizar una correcta voladura en roca dura se tiene que prever una cavidad correcta de cara libre para que el resto de taladros de corona, hastiales, y arrastre puedan proyectarse de la mejor manera, logrando un contorno ideal de la labor.

Figura 21

Cantidad de explosivos Emulnor 5000, antes y después de la optimización de la distribución en taladros

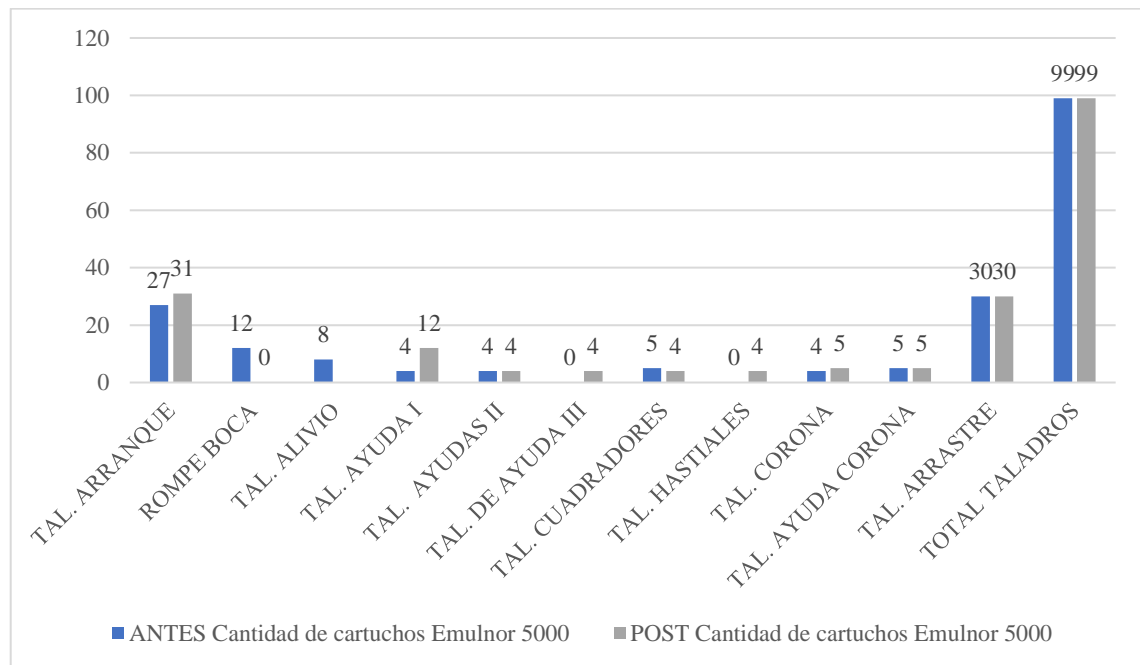


Figura 22

Cantidad de explosivos Semexa 65%, antes y después de la optimización de la distribución en taladros

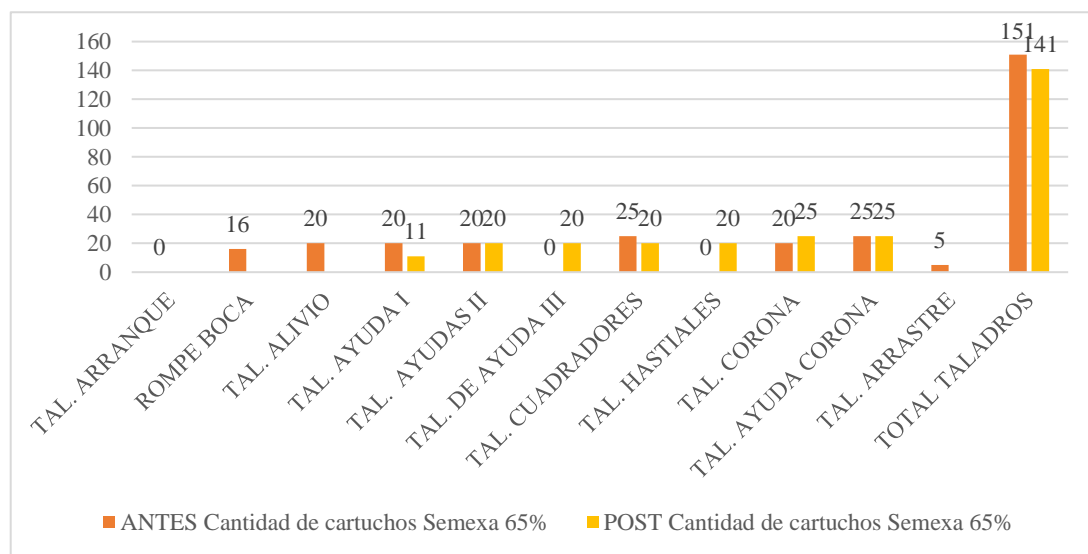


Tabla 25

Comparativa entre el peso en kilogramos de Emulnor 5000 vs Semexa 65% antes y después de la nueva distribución

TIPO DE TALADRO	ANTES		POST	
	Kilogramos de cartuchos Emulnor 5000	Kilogramos de cartuchos Semexa 65%	Kilogramos de cartuchos Emulnor 5000	Kilogramos de cartuchos Semexa 65%
TAL. ARRANQUE	2.74	-	3.15	-
ROMPE BOCA	1.22	1.28	-	-
TAL. ALIVIO	0.81	1.60		
TAL. AYUDA I	0.41	1.60	1.22	0.88
TAL. AYUDAS II	0.41	1.60	0.41	1.60
TAL. DE AYUDA III	-	-	0.41	1.60
TAL. CUADRADORES	0.51	2.00	0.41	1.60
TAL. HASTIALES	-	-	0.41	1.60
TAL. CORONA	0.41	1.60	0.51	2.00
TAL. AYUDA CORONA	0.51	2.00	0.51	2.00
TAL. ARRASTRE	3.05	0.40	3.05	
TOTAL TALADROS	10.06	12.10	10.06	11.30

Interpretación:

A partir de la tabla 25, se puede desprender el cambio en kilogramos que ha experimentado el explosivo tipo Semexa 65%, desde un valor de 12.10 kg/frente hasta los 11.30 kg/frente. Este escenario condiciona una reducción en los costos relativos al explosivo. De esta manera, con una mejor distribución de la cantidad y del peso de explosivos en los taladros, se prevé un aumento de los factores de carga en el proceso de voladura de mina Las Bravas N°2.

Por lo tanto, el análisis comparativo para los factores de carga explosiva se presenta a continuación.

Tabla 26

Valores para los factores de carga explosiva antes y después de la optimización

	FACTOR DE CARGA	FACTOR DE POTENCIA	FACTOR DE CARGA LINEAL
ANTES	2.93 kg/m ³	1.09 kg/tn	14.77 kg/m
POST	2.74 kg/m ³	1.02 kg/tn	13.85 kg/m

En la tabla 26, se visualiza una disminución en los factores de carga y potencia, con una variación desde los 2.93 kg/m³ hasta los 2.74 kg/m³ y desde los 10.9 kg/tn hasta los 1.02 kg/tn respectivamente. Esta varianza se traduce en un mayor efecto en la capacidad energética disponible para lograr romper la roca, aumentando de esta manera el porcentaje de eficiencia en la voladura.

Por otro lado, la disminución en el factor de carga lineal se traduce el ahorro de explosivo utilizado por metro lineal de avance, es decir, se utiliza menos cantidad de explosivo para avanzar un metro de frente de minado.

4.4. RESULTADOS PARA REDUCIR EL COSTO DE VOLADURA FINAL

A partir de un reordenamiento adecuado en la distribución de la carga explosiva por taladro y de la cantidad de cartuchos por taladro, se consiguió una disminución en los kilogramos de semexa 65% utilizados para el minado en frentes de avance en la rampa 115, este ahorro en la cantidad de explosivo tendrá su efecto sobre la estructura de costes relacionados a los explosivos y accesorios de voladura.

Por lo tanto, se presentan los nuevos resultados obtenidos:

Tabla 27

Comparativa entre los costos de voladura antes y después de la optimización de la carga explosiva

COSTO DE EXPLOSIVO Y ACCESORIO	ANTES		DESPUÉS	
	S/.	\$.	S/.	\$.
	Kg/*FRENTE	Kg/FRENTE	Kg/*FRENTE	Kg/FRENTE
EMULNOR 5000 (Cja x 25 kg.)	240.27	61.61	240.27	61.61
DINAMITA 65% (Cja x 25 kg.)	529.22	135.70	494.25	126.73
CARMEX 7 PIES (300 Unid)	251.93	64.60	251.93	64.60
MECHA RAPIDA (150 m)	55.58	14.25	55.58	14.25
COSTO TOTAL DE VOLADURA	1,076.99	276.15	1,042.03	267.19

Interpretación:

De la tabla 27, se visualiza un ahorro en el costo total de voladura, a partir de una mejor distribución de la carga explosiva y de la optimización de los factores de carga, potencia y lineal. El ahorro asciende a 8.96 dólares por frente de avance.

4.5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La presente investigación tuvo por finalidad determinar de qué manera se reduce el costo de voladura optimizando la carga explosiva en el desarrollo de la rampa 115 de mina Las Bravas N°2, Arequipa, obteniendo como resultados que el factor de carga explosiva antes de la optimización era de 2.93 kg/m³. Tras la optimización, el factor de carga se redujo a 2.74 kg/m³, esta reducción en el factor de carga permitió una disminución en el costo de voladura por frente de avance, dado que antes de la optimización, el costo de voladura era de 276.15 US\$/frente de avance, donde después de la optimización, el costo de voladura se redujo a 267.19 US\$/frente de avance. En este sentido concuerda con **De La Cruz y Rodriguez (2022)**, quienes en su tesis tuvieron



como objetivo optimizar el diseño de perforación y voladura para reducir el costo total en el desarrollo de la Galería 5361 de la empresa minera, obteniendo como resultados, una reducción de 168.14 soles en el costo total por metro lineal de avance. La contribución fue una notable reducción en el costo total por metro lineal de avance en la Galería 5361 al optimizar el diseño de perforación y voladura. Del mismo modo concuerda con **Colana (2020)**, quien en su tesis tuvo como objetivo mejorar las deficiencias en el consumo de explosivos y distribución de los taladros, obteniendo como resultados una reducción de 43 a 38 taladros para la sección de labor de 2.7x2.7 y la optimización del factor de potencia de 0.88 kg/tn a 0.76 kg/tn, de esta manera, el diseño de la nueva malla de perforación permitió generar un ahorro en el costo de 83.55 soles por metro lineal de avance. También se concuerda con **Guillen (2020)**, quien en su tesis tuvo como objetivo determinar la influencia de la malla de perforación en los costos operacionales de la unidad minera. Se obtuvo como resultado un ahorro del 12.49% en el costo unitario por metro lineal de avance. Contribuyendo con que al mejorar el diseño de la malla de perforación en Pucaurco, se logró una estimación más precisa de los costos operacionales. Por último concuerda con **Madueño (2020)**, quien en su tesis tuvo como objetivo aplicar controles en los parámetros de perforación y voladura para reducir costos de operación. obteniendo como resultados: un incremento del 37% en el avance lineal por disparo y una reducción en el costo de explosivo en 10.34 US\$ por disparo. Se concluyó que, el control de parámetros disminuye los costos de perforación y voladura en un 24%, representando una disminución del costo operativo total de 12%, el mismo que supone una reducción de 74,979.216 US\$ anuales.

Dentro de los resultados obtenidos en la presente tesis, se pudo identificar que anteriormente, se utilizaban 151 cartuchos de explosivos por frente de avance, después de la optimización, el número de cartuchos disminuyó a 141 cartuchos por frente, esta



disminución en la cantidad de cartuchos contribuyó a la reducción del costo total de la voladura. En este sentido se concuerda con **Lazo (2020)**, quien en su tesis tuvo como objetivo el diseñar una malla de perforación y voladura para optimizar la productividad y los costos. La metodología consistió en ajustar el número de taladros y optimizar el avance por disparo, resultando en una mejora significativa en el coste de perforación y voladura. Este autor obtuvo como resultados: una reducción en 3 taladros optimizando el avance por disparo en un 94%. Se concluyó que, el nuevo diseño de malla mejora el coste de perforación y voladura en un 104.61 dólares por metro. La contribución del autor fue que se mejora la productividad y se reduce los costos en Century Mining al optimizar la malla de perforación.

Gamarra (2019), en su tesis de grado denominado: “Método de Holmberg para optimizar perforación y voladura en la galería 539 de la unidad minera Agromin La Bonita S.A.C.”, tuvo como objetivo implementar el diseño de una malla de perforación y voladura para eliminar la incidencia de tiros cortados, tiros anillados, tiros soplados y sobre excavaciones. La metodología permitió reducir los costos de perforación y voladura, así como mejorar la calidad del mineral roto al eliminar incidencias de tiros defectuosos. Para cumplir con tal objetivo, se determinó implementar el diseño de malla de perforación según el modelo matemático de Holmberg. Los resultados que obtuvo fueron, una reducción de 32.4 usd/ disparo en los costes de perforación y voladura, una reducción de 18.87 usd/disparo en la mano de obra. Concluyéndose que, se logró optimizar en un 15.4% el mineral roto. La contribución fue que, eliminando problemas como tiros cortados y sobre excavaciones, se reduce los costos de perforación y mejora la eficiencia del mineral roto. Del mismo modo, concuerda con **Morales (2019)**, quien en su tesis de tuvo como objetivo principal aumentar las reservas en la veta Valeria de la unidad minera. La metodología resultó en un aumento en el avance lineal, una reducción



del factor de carga y una disminución del costo por metro lineal de avance. Obteniendo como resultado un avance promedio de 1.70m/disparo. Concluyéndose en, que a través de diseño de una malla de perforación y voladura con el modelo matemático de Holmberg se logra aumentar en un 23.97% el avance lineal, la disminución del factor de carga en 1.32 kg/m³ y una disminución del 30.03% en el costo de perforación y voladura por metro lineal de avance.



V. CONCLUSIONES

- Antes de la optimización, el factor de carga explosiva era de 2.93 kg/m^3 . Tras la optimización, el factor de carga se redujo a 2.74 kg/m^3 , esta reducción en el factor de carga permitió una disminución en el costo de voladura por frente de avance, dado que antes de la optimización, el costo de voladura era de $276.15 \text{ US\$/frente de avance}$, donde después de la optimización, el costo de voladura se redujo a $267.19 \text{ US\$/frente de avance}$.
- Inicialmente, se utilizaban 151 cartuchos de explosivos por frente de avance, después de la optimización, el número de cartuchos disminuyó a 141 cartuchos por frente, esta disminución en la cantidad de cartuchos contribuyó a la reducción del costo total de la voladura.
- Los kilogramos de explosivo tipo Emulnor 5000 consumidos se mantuvieron en 10.06 kg/frente antes y después de la optimización, lo que indica que la cantidad de este explosivo no varió; sin embargo, la cantidad de explosivo tipo Semexa 65% se redujo de 12.10 kg/frente a 11.30 kg/frente , contribuyendo a una mayor eficiencia y reducción en el costo de la voladura.
- La eficiencia de la voladura mejoró de 88.24% a 94.12% después de la optimización, además, el factor de potencia se redujo de 1.09 kg/tn a 1.02 kg/tn , indicando una mayor eficiencia en el uso de explosivos para fragmentar una tonelada de material, reflejando una mejor utilización de los explosivos y una optimización en el rendimiento general del proceso de voladura.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda explorar nuevas tecnologías y métodos de voladura que permitan un mejor control de la fragmentación del material y la reducción de vibraciones, optimizando el uso de explosivos.
- Se sugiere investigar otros tipos de explosivos que podrían ser más eficientes en términos de costo-beneficio, considerando las características geológicas del área.
- Para continuar con las mejoras en el costo de voladura, se recomienda realizar investigaciones en el diseño de patrones de perforación y voladura. Esto podría incluir estudios de geometría de los pozos y distancias entre barrenos para optimizar la eficiencia de la carga explosiva.
- Se recomienda implementar estudios más avanzados de monitoreo en tiempo real para evaluar la fragmentación del material post-voladura. Estas investigaciones podrían ayudar a ajustar el factor de carga y potencia en tiempo real, mejorando continuamente el proceso.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cabrera, M. (2022). Optimización de estándares de perforación y voladura para mejorar el factor de avance en la mina Santander - Cía. Minera Trevali Perú S.A.C. [Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga]. In *UNSCH - Institucional*. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2210>
- Colana, J. (2020). Efecto del diseño de malla de perforación y voladura en la reducción de costos de operación en el proyecto de explotación el nuevo sureño [Universidad Nacional de Moquegua]. In *Universidad Continental, Facultad de ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas Tesis*. <http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/182>
- De La Cruz, N. y Rodriguez, M. (2022). Optimización del diseño de perforación y voladura para reducir el costo en el desarrollo de la galería 5361, empresa minera Vicus S. A. C. [Universidad Continental]. In *Universidad Continental*. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12408>
- Díaz, J., Guarín, M. y Jiménez, J. (2012). Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada. *Revista de Ciencias de La Tierra*, 32, 15–22.
- Ding, Y., Zhang, X., Shi, Y., & Zhang, H. (2022). Prediction of far-field blast loads from large TNT-equivalent explosives on gabled frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107120>
- EXSA. (2021). *Manual practico de voladura (5°)*.
- Gamarra, F. (2019). *Método de Holmberg para optimizar perforación y voladura en la galería 539 de la Unidad Minera Agromin La Bonita S.A.C* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6001>
- Gao, M., Xie, J., Gao, Y., Wang, W., Li, C., Yang, B., . . . Xie, H. (2021). Mechanical behavior of coal under different mining rates: A case study from laboratory experiments to field testing. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(5), 825-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.06.007>
- Guillen, W. (2020). *Optimización del diseño de malla de perforación para la estimación*



- de costos operacionales en la zona de Pucaurco - Unidad Minera Pachancoto - Minas de Pachancoto S. A. 2019* [Universidad Continental].
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/8425>
- Guo, J., Zhao, Z., Zhao, P., & Chen, J. (2024). Prediction and Optimization of Open-Pit Mine Blasting Based on Intelligent Algorithms. *Applied Sciences*, 14(13), 5609.
<https://doi.org/10.3390/app14135609>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). *Metodología de la Investigación*.
- Kinyua, E., Jianhua, Z., Kasomo, R., Mauti, D., & Mwangangi, J. (2022). A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*, 186, 107743.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107743>
- Klyuev, R., Bosikov, I., Tavasiev, V., & Gobeev, M. (2020). Improving the energy efficiency of transport equipment in ore mining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 918, 012124. 10.1088/1757-899X/918/1/012124
- Lazo, R. (2020). *Optimización En Las Mallas De Perforación Y Voladura Para Reducir Los Costos Unitarios En La Compañía Century Mining Perú S.a.C.* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6666>
- Madueño Clemente, D. (2020). Optimización De Costos Unitarios Mediante El Diseño De Un Estándar De Malla De Perforación Y Voladura En La Galería 091 En La Compañía Minera La Soledad S. A. C. [Universidad Nacional del Centro del Perú]. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/7203>
- Maregedze, L., Chingosho, H., & Madiye, L. (2022). Use and cost optimization for underground mines electrical energy: A case of a mine in Zvishavane. *Energy*, 247, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123374>
- Morales, K. (2019). Reducción de costos unitarios mediante la optimización de la malla de perforación y voladura en el inclinado -180 valeria norte de la Empresa Minera Vicus SAC [Universidad Nacional del Centro del Perú]. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4942>



- Nikkhah, A., Vakylabad, A., Hassanzadeh, A., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2022). An Evaluation on the Impact of Ore Fragmented by Blasting on Mining Performance. *Minerals*, 12(2), 258. <https://doi.org/10.3390/min12020258>
- Ocampo, K. (2018). Optimización De Malla De Perforación Doble Espiral Para Túnel Y Reducir Costos De Perforación Y Voladura En El Proyecto Chavimochic – La Libertad, 2017 [Universidad Nacional de Trujillo]. In *UNITRU-Tesis* (Issue None). <https://doi.org/oai:dSPACE.unitru.edu.pe:20.500.14414/11035>
- Ortega, C., Jaramillo, A. y Molina, J. (2016). Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 0(40), 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rbct.n40.52199>
- Pino, R. (2019). *Optimización de avance lineal con nuevo diseño de malla en el frente de la galería san jorge en la minera aurífera cuatro de ENERO S.A.* Universidad Nacional del Altiplano.
- Pomasoncco-Najarro, A., Trujillo-Valerio, C., Arauzo-Gallardo, L., Raymundo, C., Quispe, G., & Dominguez, F. (2022). Pre-split blasting design to reduce costs and improve safety in underground mining. *Energy Reports*, 8(9), 1208-1225. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.109>
- Rebollo, P., & Ábalos, E. (2022). *Metodología de la Investigación/Recopilación*. Editorial Autores de Argentina. <https://bitly.cx/MMVk>
- Reyes, E. (2022). *Metodologia de la Investigacion Cientifica*. Page Publishing, Incorporated. <https://bitly.cx/CcJOy>
- Taiwo, B., Fissaha, Y., Palangio, T., Palangio, A., Ikeda, H., Cheepurupalli, N., . . . Kawamura, Y. (2023). Assessment of Charge Initiation Techniques Effect on Blast Fragmentation and Environmental Safety: An Application of WipFrag Software. *Mining*, 3(3), 532-551. <https://doi.org/10.3390/mining3030030>
- Valença, J., & Soofastaei, A. (2022). Advanced Analytics for Rock Blasting and Explosives Engineering in Mining. *Advanced Analytics in Mining Engineering*, 363–477. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91589-6_13



- Yeom, G.-S. (2022). Numerical Simulation of Conical and Linear-Shaped Charges Using an Eulerian Elasto-Plastic Multi-Material Multi-Phase Flow Model with Detonation. *Materials*, 15(5), 1700. <https://doi.org/10.3390/ma15051700>
- Yu, K., Lin, P., Chitombo, G., Ma, L., & Peng, C. (2024). Study on the optimization of blasting parameters and blastholes charging structure for broken orebody. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 152, 105948. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105948>
- Zapata Larico, M. (2019). Optimizaciòn de perforaciòn y voladura mediante el diseño de malla y carga explosiva en la Mina Pomasi [Universidad Nacional Del Altiplano]. In *UNAP-Institucional*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12933>
- Zhang, H., Zhang, F., Song, J., Tan, M., Kung, H.-t., & Johnson, V. (2021). Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China. *Environmental Research*, 202, 111702. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111702>
- Zhou, J., Asteris, P., Armaghani, D., & Pham, B. (2020). Prediction of ground vibration induced by blasting operations through the use of the Bayesian Network and random forest models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106390. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106390>



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo GILVER DENYS QUISPE MAMANI,
identificado con DNI 70791464 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA DE MINAS

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"REDUCCIÓN DEL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO LA

CARGA EXPLOSIVA EN EL DESARROLLO DE LA RAMPA

115 DE MINA LAS BRAVAS N° 2 AREQUIPA"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de SEPTIEMBRE del 2024



FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo SILVER DENYS QUISPE MAMANI
identificado con DNI 70791464 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA DE MINAS

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" REDUCCIÓN DEL COSTO DE VOLADURA OPTIMIZANDO LA
CARGA EXPLOSIVA EN EL DESARROLLO DE LA RAMPA
115 DE MINA LAS BRAVAS N° 2 AREQUIPA "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de SEPTIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella