



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Optimización de costos en los procesos de perforación y voladura  
para un tipo de galería subterránea”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autores:**

**HERNÁN SEBASTIÁN VÁSQUEZ FISCAL**

**BRYAN ALFONSO VERDUGO PADILLA.**

**Director:**

**ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE**

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

Hernán Sebastián Vásquez Fiscal

Bryan Alfonso Verdugo Padilla

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2026

**“Optimización de costos en los procesos de perforación y voladura para  
un tipo de galería subterránea”**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado de manera especial a mis padres Hernán Vásquez Guillén, Hilada Armijos y Maribel Fiscal, que sin su ayuda y apoyo no hubiera sido posible avanzar y crecer cada día como estudiante, profesional y como persona, cabe destacar el impulso de salir adelante por mi hija Martina Vásquez pilar fundamental en mi crecimiento como padre.

No puedo dejar de mencionar a mi tío Paúl Vásquez y Diego Coronel ya que sin ellos no hubiera conocido lo que es el sector minero y mi gran pasión por esta rama de la minería

También reconozco el aporte de mis docentes, cuya orientación ha sido de gran ayuda en mi aprendizaje.

A todos ustedes, les estoy profundamente agradecida por su apoyo. Este logro no habría sido posible sin ustedes. ¡Gracias!

**Hernán Vásquez F**

Este trabajo está dedicado con todo el amor del mundo de manera especial a mi madre Germania Padilla, misma que ha sido padre y madre para mí, me ha brindado el apoyo en todo lo que me he propuesto a hacer y sin ella nada de este gran avance hubiese sido posible.

A mi abuelo Alfonso Padilla, quien siempre estuvo para mí como mi padre y su ilusión y anhelo fue verme convertido en un gran profesional.

A mi abuela Regina Vásquez, mi tía Eugenia Padilla, mi prima Dulce María Padilla, quienes toda mi vida y hasta el día de hoy han estado presentes en mi progreso como persona y profesional.

Tampoco quiero dejar atrás el apoyo fundamental de mi tío Wilson Verdugo, quien siempre me ha impulsado y aconsejado para salir adelante como una excelente persona.

Destaco también el gran y arduo trabajo de mis docentes, quienes con paciencia y sabiduría han sabido lograr que obtenga el conocimiento y aprendizaje necesario para la vida profesional.

A todos ustedes, muchas gracias por todo el apoyo brindado en este largo camino, todo lo que he conseguido no sería posible sin su gran ayuda. ¡Gracias!

**Bryan Verdugo P.**

### **AGRADECIMIENTO**

Es de mi agrado expresar mi gratitud a mi madre Maribel, que fue un pilar fundamental de motivación, y mi mami Hilda que sin su gran apoyo emocional, amor incondicional y grandes trabas que solo ella me ayudó a superar no hubiera sido esto posible, de igual manera como no a mi padre Hernán que si bien no está cuento con su presencia sé que siempre estuvo a mi lado brindándome su apoyo.

A mi querida hija Martina Vásquez que gracias a ella había un motivo diario para salir adelante y espero que a futuro este trabajo sea de ayuda e inspiración para ti, para que sigas mi ejemplo y llegues a ser mejor persona y profesional de lo que yo llegare a ser.

A mi tío Paúl Vásquez Armijos y Diego Coronel Vásquez ya que sin su ayuda y oportunidad laboral que me brindaron durante 2 años en la empresa minera Alliancegold S.A. y por la cual me incline a esta industria de la minería.

Mi agradecimiento a mis docentes y tutor de tesis, los ingenieros Fernando, Patricio, Eduardo y Leonardo, su orientación y compromiso han sido esenciales para este trabajo,

A todos ustedes, gracias por ser parte de esta etapa de mi vida por su apoyo incondicional sin esto hubiera sido imposible culminar mis estudios

**Hernán Vásquez F.**

Quiero hacer extensivo mis más sinceras muestras de agradecimiento a mi madre Germania Padilla, quien ha sido el pilar fundamental para poder salir adelante en esta gran etapa de mi vida, a mi abuela Regina Vásquez por ser como una segunda madre para mí y nunca dejarme solo en este camino, a mi tía Eugenia Padilla por su incondicional amor y apoyo ante cualquier situación que pasaba y finalmente a mi abuelo Alfonso Padilla que es quien no ha estado presente en cuerpo pero siempre en espíritu ayudándome a afrontar los desafíos que día a día he tenido que superar.

A mi tío Manuel Padilla por siempre quererme como ese hijo que no tuvo, por su apoyo moral y económico que me ha brindado en todos estos años.

A mis docentes, quienes siempre expresaron su amor por los estudiantes, ayudándonos día a día a formarnos como profesionales.

A todos ustedes, muchas gracias por todo el apoyo brindado, sin su ayuda y apoyo nada de este gran logro hubiese sido posible.

**Bryan Verdugo P.**

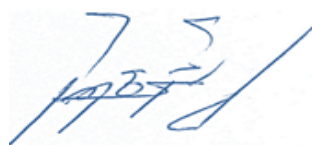
## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la mejor alternativa en cuanto a costos de perforación y voladura para una galería subterránea entre 4 diferentes explosivos de dos empresas diferentes como lo son FAMESA (Perú) y EXPLOCEN (Ecuador) mediante el uso del método sueco.

Se desarrolló el cálculo de 4 matrices en Excel, una por explosivo: EMULSEN 720, EMULSEN 5000X, EMULNOR 3000, EMULNOR 5000, en estas se mantuvieron los mismos parámetros en cuanto a dimensionamiento del túnel, siendo este de 4m por 4m con un área de  $16\text{m}^2$ , se mantuvo el segundo explosivo siendo este ANFO y por último mantuvimos un diámetro de barreno de 3.25 pulg.

El objetivo del trabajo fue encontrar el mejor explosivo para el desarrollo de la galería en cuanto a costos bajos y una perforación específica rentable. Por ende, se desarrolló la comparación de los 3 principales parámetros de cada uno de ellos: perforación específica, consumo y gasto específicos, obteniendo de esta manera el explosivo con mayor eficiencia y costos accesibles para el desarrollo de la galería y brindando datos esenciales para la optimización de costos en el desarrollo de galerías.

**Palabras clave:** Perforación, voladura, explosivos, gasto específico, galería.



---

Ing Patricio Feijoo Calle.

**Director de tesis.**

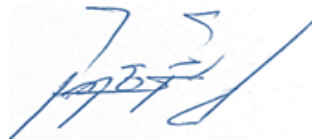
## ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the best alternative in terms of drilling and blasting costs for an underground tunnel among four different explosives from two different companies: FAMESA (Peru) and EXPLOCEN (Ecuador), using the Swedish method.

Four matrices were developed in Excel, one for each explosive: EMULSEN 720, EMULSEN 5000X, EMULNOR 3000, and ENULNOR 5000. The tunnel dimensions remained the same for all four matrices, with a total area of 16 m<sup>2</sup>. The second explosive used was ANFO, and the drill hole diameter was kept constant at 3.25 inches.

The goal of this study was to find the best explosive for tunnel development in terms of low costs and cost-effective drilling. Therefore, a comparison of the 3 main parameters of each of them was developed: specific drilling, specific consumption and specific expenditure, thus obtaining the explosive with greater efficiency and accessible costs for the development of the gallery and providing essential data for the optimization of costs in the development of galleries.

**Keywords:** Drilling, blasting, explosives, specific expenditure, tunnel.



---

Ing Patricio Feijoo Calle.

**Thesis supervisor.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	12
CAPÍTULO 1 .....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 __ Minería subterránea.....	13
1.2 __ Perforación y voladura .....	14
<b>1.2.1 Sistemas de perforación.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2 Sistema de perforación por rotación .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.3 Sistema de perforación por percusión .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.4 Mallas de perforación.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.5 Tipos de Perforadoras.....</b>	<b>18</b>
1.2 __ Elección del diámetro de perforación.....	19
1.3 __ Estudio económico de las voladuras .....	20
1.4 __ Explosivos .....	21
<b>1.4.1 Accesorios de voladura .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4.2 Explosivos rápidos y detonantes.....</b>	<b>22</b>
<b>1.4.3 Explosivos lentos y deflagrantes .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4.4 Características de los Explosivos .....</b>	<b>23</b>
CAPÍTULO 2.....	25
FORMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN.....	25
2.1 __ Formulación de la metodología.....	25
<b>2.1.1 Características de la galería de estudio.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.2 Parámetros de perforación .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.3 Malla de perforación .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.4 Tipos de explosivos .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.5 EMULSEN 720 (EXPLOCEN C.A).....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.6 EMULSEN 5000X (EXPLOCEN C.A).....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.7 EMULNOR 3000 .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.8 EMULNOR 5000 .....</b>	<b>28</b>
2.2 Dispositivos y materiales .....	29

<b>2.2.1 Dispositivos complementarios</b> .....	29
2.3__ Construcción de matriz de procesos.....	30
<b>2.3.1 Parámetros por mantener</b> .....	30
<b>2.3.2 Parámetros por cambiar</b> .....	31
2.4__ Procesamiento y corrección de datos. ....	33
CAPÍTULO 3.....	34
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
3.1__ Elaboración de la tabla de parámetros técnicos iniciales .....	34
<b>3.1.1 EMULSEN 720</b> .....	34
<b>3.1.2 EMULSEN 5000X</b> .....	36
<b>3.1.3 EMULNOR 3000</b> .....	38
<b>3.1.4 EMULNOR 5000</b> .....	40
3.2__ Análisis de resultados.....	42
<b>3.2.1 EMULSEN 720</b> .....	43
<b>3.2.2 EMULSEN 5000X</b> .....	43
<b>3.2.3 EMULNOR 3000</b> .....	44
<b>3.2.4 EMULNOR 5000</b> .....	45
3.3__ Comparación de resultados .....	45
<b>3.3.1 Perforación específica</b> .....	46
<b>3.3.2 Consumo específico</b> .....	46
<b>3.3.3 Gasto específico</b> .....	46
3.4__ Ventajas y desventajas de la metodología propuesta .....	47
CONCLUSIONES .....	48
RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del EMULSEN 720 .....	27
Tabla 2 Características del EMULSEN 5000X.....	28
Tabla 3 Características EMULNOR 3000 .....	28
Tabla 4 Características EMULNOR 5000 .....	29
Tabla 5 Matriz de parámetros a mantener y cambiar .....	32
Tabla 6 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 720.....	34
Tabla 7 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 5000X.....	36
Tabla 8 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 3000.....	38
Tabla 9 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 5000.....	40
Tabla 10 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULSEN 720.43	
Tabla 11 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULSEN 5000X.....	44
Tabla 12 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULNOR 3000.....	44
Tabla 13 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULNOR 5000.....	45
Tabla 14 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico de los 4 explosivos utilizados.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perforación rotativa .....	15
Figura 2 Diferentes grupos de barrenos en una voladura interior.....	17
Figura 3 Esquema de perforación de barrenos inclinados .....	17
Figura 4 Esquema de perforación de barrenos paralelos .....	18
Figura 5 Relación entre el diámetro de perforación y la altura de banco en operaciones mineras.....	20
Figura 6 Esquema de distribución de cargas y zonas de confinamiento en una labor subterránea .....	26
Figura 7 Malla de perforación.....	31

## INTRODUCCIÓN

La minería subterránea es considerada una de las principales actividades para la extracción de recursos minerales en yacimientos de gran profundidad, donde el método de cielo abierto no resulta económicamente rentable o a su vez técnicamente inviable. Dentro de este contexto, los procesos de perforación y voladura son etapas fundamentales en el desarrollo de galerías, esto permite la fragmentación del macizo rocoso para así facilitar el carguío y transporte del material para su posterior tratamiento metalúrgico.

En estos procesos, la eficiencia es una gran medida para que los mismos cuenten con parámetros adecuados de diseño tales como su diámetro de perforación, malla de perforación, tipos de explosivos y su correcta distribución en los diferentes barrenos, no tener en cuenta estos parámetros conlleva a problemas operacionales tales como una baja fragmentación o al contrario una sobreexcavación, de igual manera costos en aumento de carguío y conminación, compra excesiva de explosivos.

En este sentido, realizar un análisis técnico-económico de voladura es fundamental, debido a que no solo busca una adecuada fragmentación del macizo rocoso, sino también la optimización de los costos operacionales en relación con el proceso. Variables como la densidad y la velocidad de detonación de los diferentes explosivos influyen directamente en el consumo específico y en el gasto operativo por cada metro cúbico excavado.

La presente investigación tiene como objetivo optimizar los costos en los procesos de perforación y voladura para una galería subterránea de sección 4 x 4 m, aplicando el método sueco. Para ello se analizan y comparan cuatro diferentes tipos de explosivos comerciales del país (EMULSEN 720, EMULSEN 5000X, EMULNOR 3000 y

EMULNOR 5000), evaluando su eficiencia en función de parámetros técnicos como la perforación específica, consumo específico y gasto específico.

La metodología empleada se basa en el procesamiento de datos mediante software, manteniendo constantes variables geométricas y perforación, variando únicamente las propiedades de los explosivos. Esto permite identificar la mejor alternativa desde un punto de vista técnico y económico para el desarrollo de galerías subterráneas.

Finalmente, con los resultados obtenidos nos permite establecer criterios de selección de explosivos que contribuyan a mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos en proyectos de minería subterránea

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Minería subterránea**

La minería subterránea es el conjunto de pozos, galerías, rampas, chimeneas o coladeros, cámaras para alojamiento de servicios en infraestructuras varias, así como labores de explotación, y su destino es de extraer de manera eficiente un yacimiento a determinada profundidad y difícil acceso (Herrera Herbert, 2019)

La minería subterránea es utilizada para yacimientos de mayor profundidad, con un alto valor económico, la misma se lleva a cabo porque la extracción del mineral a cielo abierto no fue posible, debido a factores ambientales o económicos (Johnson y otros, 2017)

La minería subterránea surge debido a que los yacimientos están ubicados a grandes profundidades y el método a cielo abierto se vuelve ineficiente a estas profundidades. Una de las grandes ventajas es la disminución notoria de contaminación

en sus alrededores, al igual que lo visual, no es evidente como a cielo abierto que es un gran agujero en la tierra (Olalla y otros, 2019)

## **1.2 Perforación y voladura**

La perforación y voladura es un método que se utiliza en minería, tanto en subterránea como a cielo abierto de así requerirlo, el cual consiste en realizar orificios en el macizo rocoso generando así un vacío que permite para el carguío de diferentes tipos de explosivos según requiera el macizo rocoso, los cuales van en los huecos llamados barrenos con ello se logra la fragmentación de la roca en tamaños manejables para su transporte. (Rengifo Lopez & Bibiano Fernandez , 2018)

En minería Subterránea, la perforación se emplea tanto en los frentes de explotación como en la construcción de chimeneas y piques. Se realiza con agua para evitar la generación de partículas finas (polvo) y así reducir en gran medida riesgo de salud, limpiar el material, enfriar las barras y sellar paredes en terrenos fracturados, evitando atascos

El sistema de perforación y voladura se usa donde los medios mecánicos no son eficientes o aplicables de manera que sea rentable de esta manera se obtiene dos tecnologías una la de perforación y la segunda de diseño y ejecución de voladuras. Existe una relación proporcional entre estas que asegura que una buena perforación da como resultado una buena voladura y viceversa, de manera que es indispensable el diseño y ejecución correcta de la perforación para obtener buenos resultados con la segunda (BERNAOLA ALONSO y otros, 2013)

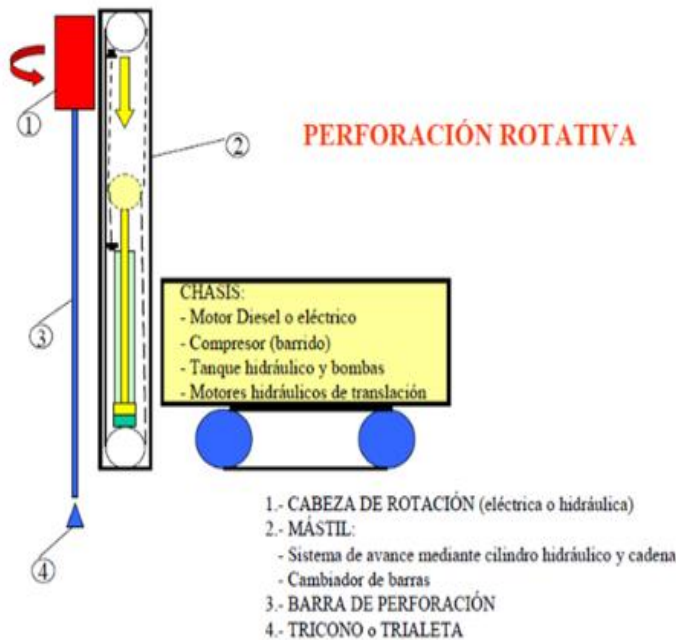
### **1.2.1 Sistemas de perforación.**

La perforación en roca ha avanzado con nuevas tecnologías, aunque algunas han quedado obsoletas por eficiencia o factores externos. Los métodos más usados son los

mecánicos basados en perforación “rotativa” y “por percusión”. Se entiende por buena perforación a la que se la realizó con método, técnicas y adecuada ejecución.

### 1.2.2 Sistema de perforación por rotación

Figura 1 Perforación rotativa



Fuente: *Perforación y voladura de rocas en minería*” (p. 171), por J. Herbert et al., 2013.

Universidad Politécnica de Madrid

Se entiende a perforación por rotación a las que están bajo el concepto de fragmentación del macizo rocoso que se produzca por corte y compresión o las dos combinadas, esta produce una fuerza que supera la resistencia a la compresión de la roca, realiza dos acciones una que consiste en un empuje y un giro

En los sistemas de perforación por rotación podemos encontrar algunas variantes con las que podemos ir trabajando y son

- Perforación con corte

- Perforación rotativa con tricono
- Perforación con corona de diamante

### **1.2.3 Sistema de perforación por percusión**

Los sistemas de rotación por percusión consisten en la fragmentación del macizo rocoso por una fuerza de impacto con un útil más o menos filoso, un ejemplo claro es en la perforación de pozos de agua, constituido por una broca con la punta un tanto afilada que se deja caer sobre el fondo del pozo rompiendo así la roca. Los sistemas a abordar en este trabajo serán de rotopercusión

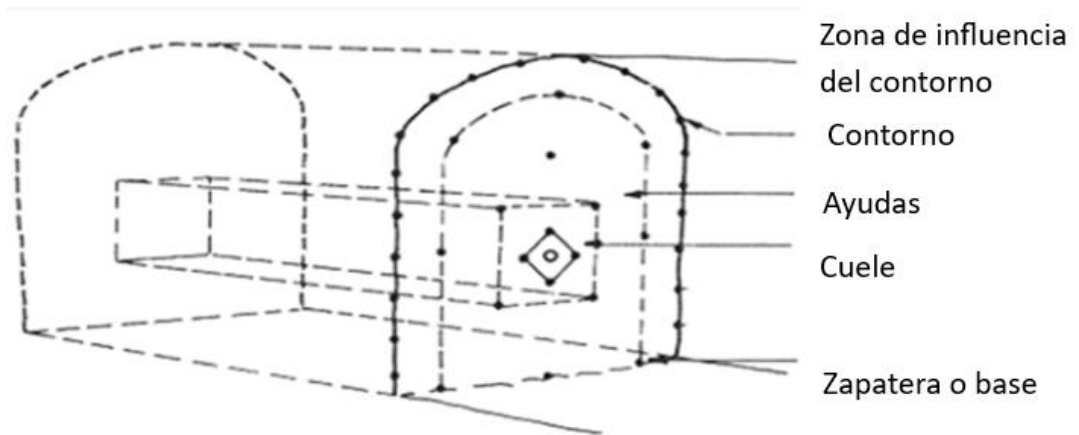
- Perforación neumática
- Perforación hidráulica

### **1.2.4 Mallas de perforación.**

Las voladuras en subterráneo son más complejas que en cielo abierto debido a que solo se tiene una cara libre, la distribución de cargas debe ser lo más homogénea posible. Por ello es que las voladuras en subterránea son un tanto más costosas que las de cielo abierto. (BERNAOLA ALONSO y otros, 2013)

En voladura subterránea cada barrenos tiene su nombre para diferenciarlo, esto va en base a su posición y se los llama de la siguiente manera (cuele, contracuele, destroza, contorno, zapateras)

Figura 2 Diferentes grupos de barrenos en una voladura interior

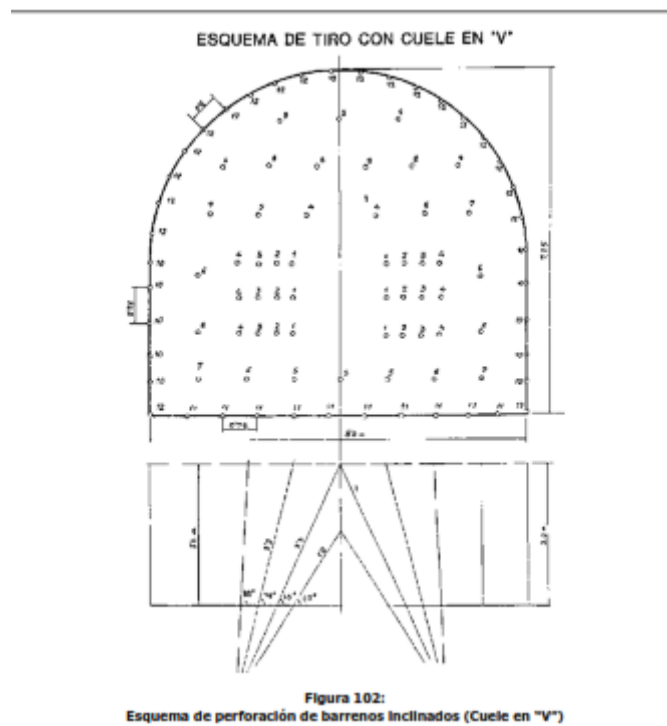


Fuente: *Perforación y voladura de rocas en minería* (p. 171), por J. Herbert et al., 2013.

Universidad Politécnica de Madrid

Esquema de tiro con barrenos centrados una de las ventajas de esta malla es una menor perforación específica y un menor consumo de explosivos, pero en la práctica su perforación es complicada y los avances suelen ser alrededor de la mitad de la anchura del túnel.

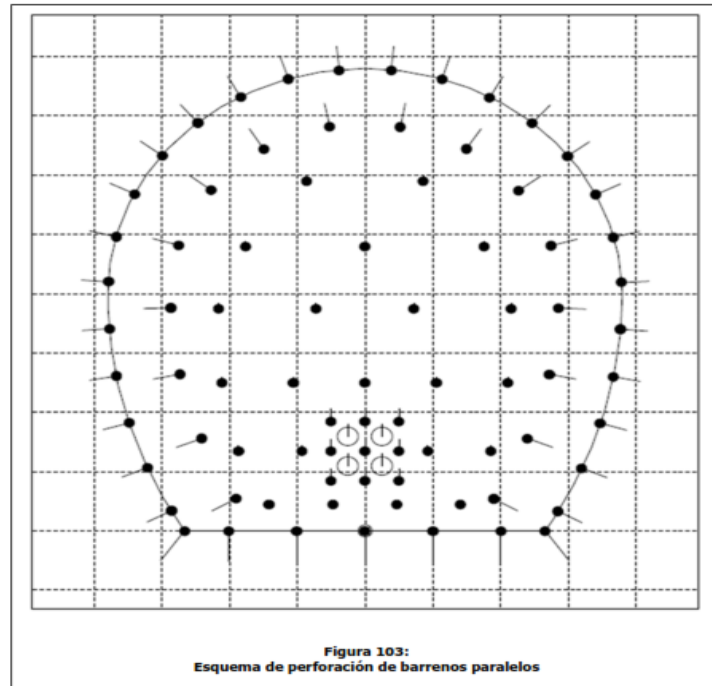
Figura 3 Esquema de perforación de barrenos inclinados



Fuente: adaptado de “Perforación y voladura de rocas en minería” (p. 173), por J. Herbert et al., 2013. Universidad Politécnica de Madrid

Cuele de barrenos paralelos consiste en una serie de barrenos muy próximos entre sí, que se sitúan alrededor de dos barrenos vacíos, pero con un mayor diámetro de perforación

*Figura 4 Esquema de perforación de barrenos paralelos*



Fuente: adaptado de "Perforación y voladura de rocas en minería" (p. 174), por J. Herbert et al., 2013. Universidad Politécnica de Madrid

### 1.2.5 Tipos de Perforadoras

En minería subterránea, las perforadoras son fundamentales para el avance y construcción de galerías y túneles, ya que permiten el acceso a las zonas de extracción y mejoran la ventilación y transporte de minerales. El tipo de perforadora dependerá de las características del yacimiento, las condiciones del terreno, necesidades y disponibilidad del proyecto. Los tipos son:

- Jumbos de perforación (Drill, Jumbo)
- Perforadoras de patas (Jackleg Drills)
- Perforadoras de taladro largas (Longhole Drills)

La voladura es una herramienta fundamental en la extracción de mineral de interés, con su objetivo único y específico de fragmentar el macizo rocoso en partes mucho más pequeñas para facilitar su transporte (Paytan Capani & Quispe Ramos, 2022)

La voladura implica el uso de explosivos, por lo que quienes los manipulen deben contar obligatoriamente con una licencia vigente de manipulador de explosivos otorgada por la autoridad competente (Ministerio de minería de Chile, 2014)

## **1.2 Elección del diámetro de perforación**

El diámetro utilizado en la perforación influye de forma significativa en el resultado final de una voladura en banco. Además de afectar la planificación de equipos y maquinaria, la selección del diámetro adecuado depende de los siguientes aspectos:

- Factor económico de la voladura
- Nivel de fragmentación obtenido
- Probabilidad de proyecciones
- Aparición de grietas en los bordes
- Frecuencia con la que se generan bloques grandes

En proyectos de voladura de gran escala, la determinación del diámetro de perforación cobra una relevancia crucial (ver Sección 5.8 sobre el estudio económico de voladuras). Cuando el diámetro es considerable respecto a la altura del banco, puede ocasionar una reducción desfavorable en el espaciamiento entre barrenos. Desde el punto de vista técnico, si se busca utilizar el mayor diámetro posible para labores en banco, la altura mínima del banco debería ser, como regla, de al menos  $2 \times V_{max}$ . A continuación, se muestran valores orientativos para distintos diámetros:

Figura 5 Relación entre el diámetro de perforación y la altura de banco en operaciones mineras

Diámetro perf. mm.	Altura mínima de banco m.	Altura aconse- jable de banco m.
Barrenas serie 11 34—26	0—3,0	0—4,0
35	3,2	3,2—5,0
Barrenas serie 12 40—28	3,5	3,5—5,0
38	3,5	3,5—5,0
41	3,7	3,7—8,0
45	4,0	4,0—8,0
51	4,6	4,6—10,0
64	5,8	5,8—12,0
75	6,7	6,7—15,0
100	9,0	9,0—20,0

Fuente: adaptado de "TÉCNICA SUECA DE VOLADURAS" (p. 107), por Rune Gustafsson.,

1977. Nora Boktryckeri AB

La fragmentación tiende a ser menor cuando se incrementa el diámetro de los barrenos. Por ello, la elección de este parámetro se vuelve crucial en voladuras destinadas, por ejemplo, al abastecimiento de una planta de trituración, ya que un tamaño inadecuado del material puede ocasionar atascos inadmisibles en el proceso.

El riesgo de proyección también aumenta conforme se incrementa el diámetro de perforación. Por esta razón, como se mencionó, este aspecto debe analizarse con extrema precaución especialmente cuando las voladuras se realizan en áreas cercanas a estructuras o zonas habitadas.

### 1.3 Estudio económico de las voladuras

El análisis económico de las voladuras es un tema complejo y con múltiples dimensiones, por lo que no puede abordarse aquí con profundidad. Existen diversos métodos para estimar los costos de las voladuras en banco, los cuales constituyen una

práctica familiar para los ingenieros especializados en este campo y para la cual se han creado distintos procedimientos.

Los costos están siempre condicionados por las características básicas del lugar donde se realizan los cálculos. La distinción entre costos fijos y variables puede modificarse considerablemente según el sitio.

En esta parte se examinan los elementos que influyen en el aspecto financiero de las operaciones de voladura en banco.

Es fundamental considerar todos los factores y no únicamente el desprendimiento inicial de la roca mediante explosivos: una voladura con barrenos muy separados y con una carga específica baja podría ser económica, pero los gastos de taqueo, carga y trituración de los fragmentos podrían incrementarse notablemente en términos comparativos.

Para estimar los costos deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- Coste de perforación.
- Coste de los explosivos.
- Coste de la carga de los barrenos y de la voladura.
- Tratamiento de los bloques.
- Coste del desescombros.
- Coste del machaqueo. (Gustafsson , TECNICA SUECA DE VALADURAS , 1977)

#### **1.4 Explosivos**

Los explosivos deben presentar ciertas condiciones para su explosión eficaz, puesto que están sometidos a varias circunstancias difíciles como la falta de presencia de

oxígeno, sumergidos en agua, entre otros (Gustafsson , TECNICA SUECA DE VALADURAS , 1977)

#### **1.4.1 Accesorios de voladura**

Los diferentes tipos de explosivos utilizados en voladura son:

- Fulminante ordinario N° 8
- EMULSEN 720
- EMULSEN 5000X
- EMULGREL 3000
- EMULSEN 1000X
- ANEMUL 20/80
- Mecha de seguridad
- ANFOS (normal, aluminizado)
- Cordón detonante

En el Ecuador los explosivos son fabricados por “EXPLOCEN” la única empresa autorizada a la elaboración y comercio (EXPLOCEN, [explocen.com.ec](http://explocen.com.ec), 2025)

#### **1.4.2 Explosivos rápidos y detonantes**

Estos explosivos poseen velocidades de detonación que oscilan entre 2000 y 7000 m/s y se dividen en primarios y secundarios según la función que cumplen. Los explosivos primarios, debido a su elevada sensibilidad y potencia, se utilizan como iniciadores capaces de activar a los secundarios; por su parte, los secundarios se emplean para fracturar y desprender las rocas. Aunque presentan menor sensibilidad que los primarios, son los que realizan el trabajo útil principal (Sánchez Villareal, 2012)

### **1.4.3 Explosivos lentos y deflagrantes**

Presentan velocidades inferiores a 2000 m/s e incluyen pólvoras, materiales pirotécnicos y mezclas utilizadas como propulsores en artillería y cohetes. No se emplean en trabajos de minería ni en ingeniería civil; sin embargo, la única excepción es el uso de la pólvora que sirve como componente central en la mecha de seguridad (Sánchez Villareal, 2012)

### **1.4.4 Características de los Explosivos**

La atención a las características que se detallan a continuación es crucial para el manejo y la elección apropiada de los explosivos.

#### **1.4.4.1 Potencia**

La potencia se entiende como la energía liberada o las acciones mecánicas que generan los explosivos al detonar. Asimismo, se indica que, pese a que se han desarrollado varios procedimientos para cuantificarla, ninguno ofrece resultados plenamente confiables. En consecuencia, esta propiedad no permite relacionar de manera precisa el grado de fragmentación obtenido en la roca con la clase de explosivo empleado. (Sánchez Villareal, 2012)

#### **1.4.4.2 Velocidad de detonación**

La velocidad de detonación corresponde al ritmo con el que la onda detonante se desplaza por el material explosivo, ya sea en su parte externa o a lo largo de toda la columna, tanto cuando está expuesto al aire como cuando permanece contenido dentro de un taladro de voladura.

Esta característica controla la velocidad con que el explosivo libera su energía, la cual se expresa en forma de ruido, calor y gases dentro de un intervalo de tiempo

determinado, contribuyendo así al proceso de fractura del macizo rocoso. (Vilela Sangay, 2015)

También resulta relevante destacar que varios elementos pueden modificar la velocidad de detonación, como la densidad del explosivo, el tamaño de su diámetro, el grado de confinamiento, el tipo de iniciación empleado y el deterioro que presente el material con el tiempo. (López Jimeno y otros, 2003)

#### **1.4.4.3 Densidad**

La densidad de los explosivos puede oscilar entre 0,8 y 1,6 g/cm<sup>3</sup>, y a medida que esta aumenta, también se incrementa la capacidad de fractura que el explosivo es capaz de generar (Vilela Sangay, 2015)

#### **1.4.4.4 Estabilidad**

La densidad del explosivo es un aspecto determinante, pues cuando esta es demasiado baja, el material puede reaccionar con facilidad al contacto del cordón detonante y activarse antes de que el booster provoque la detonación principal. Por el contrario, si la densidad es excesivamente alta, el explosivo puede volverse poco sensible y no detonar adecuadamente (López Jimeno y otros, 2003)

Por ello, la densidad debe incluirse como un parámetro fundamental al momento de calcular la cantidad de explosivo requerida para la operación de voladura.

#### **1.4.4.5 Resistencia al agua**

Los explosivos deben conservarse en ambientes adecuados y constantes, evitando cualquier alteración o degradación física o química; sin embargo, estas características pueden modificarse dependiendo del tiempo transcurrido y del sitio donde se mantengan almacenados (EXPLOCEN, [explocen.com.ec](http://explocen.com.ec), 2025)

#### **1.4.4.6 Transmisión de detonación**

Corresponde a la capacidad que tiene un explosivo para responder ante la acción de otro, llegando a activarse cuando ambos están próximos; una adecuada transmisión entre los barrenos asegura que las columnas de explosivo detonen de manera total (López Jimeno y otros, 2003)

#### **1.4.4.7 Presión de detonación**

Se relaciona directamente con la densidad del explosivo y con el valor obtenido al elevar al cuadrado su velocidad de detonación (EXPLOCEN, [explocen.com.ec](http://explocen.com.ec), 2025)

## **CAPÍTULO 2**

### **FORMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN**

#### **2.1 Formulación de la metodología.**

Según el método sueco, en el diseño de voladuras, la correcta selección de los parámetros de perforación y carga explosiva es fundamental para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso. Factores como el diámetro y la profundidad del barreno, así como la distancia entre barrenos y la piedra (burden), influyen directamente en la forma en que la energía del explosivo se transmite a la roca. Cuando estos parámetros se establecen de manera adecuada, la energía liberada se distribuye de forma más uniforme, lo que permite obtener una fragmentación adecuada del material, reducir la presencia de bloques sobredimensionados y evitar problemas operativos como sobreexcavación o vibraciones excesivas durante la voladura. Asimismo, el diseño de la carga explosiva dentro del barreno también cumple un papel importante en la eficiencia del proceso. (Gustafsson , TECNICA SUECA DE VALADURAS , 1977).

La distribución entre carga de fondo, carga de columna y el retacado debe calcularse de acuerdo con las características del frente de trabajo y las propiedades de la roca. De esta manera, se logra aprovechar de forma óptima la energía del explosivo,

favoreciendo el esponjamiento del material y garantizando un avance adecuado en labores mineras o excavaciones subterráneas, al mismo tiempo que se mantienen condiciones seguras de operación (Gustafsson , TECNICA SUECA DE VALADURAS , 1977).

Para esta metodología se consideraron dos variables principales: la velocidad de detonación y la densidad del explosivo, las cuales son características únicas de los diferentes tipos de explosivos que nosotros utilizamos como referencia para la comparación y valoración económica de los mismos en la creación de la galería.

### **2.1.1 Características de la galería de estudio**

Para el desarrollo del presente estudio se considera una galería subterránea de 4m x 4m, la perforación se realiza mediante equipos de rotopercusión, utilizando barrenos distribuidos en una malla de avance convencional compuesta por cuele, contracuele, destroza, contorno y zapateras

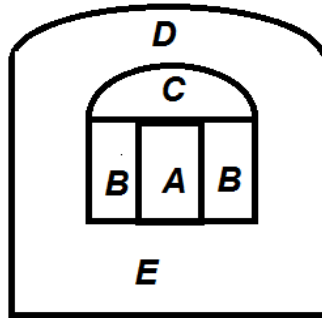
### **2.1.2 Parámetros de perforación**

Los barrenos utilizados presentan un diámetro de perforación de 3 ¼ pulg, distribuidos de acuerdo con la geometría de dicha malla diseñada para una sección de 4m x 4m.

### **2.1.3 Malla de perforación**

Teniendo un túnel de 4m x 4m, la malla más adecuada viene dada por las siguientes medidas. En el cuele (zona A) va a quedar de 3m obteniendo así 1 m Sobrante para la zona B y 1m para zona E y C respectivamente

*Figura 6 Esquema de distribución de cargas y zonas de confinamiento en una labor subterránea*



Fuente: *Elaboración propia.*

#### 2.1.4 Tipos de explosivos

Para el siguiente trabajo se van a usar 4 diferentes tipos de explosivos, cada uno con características diferentes tanto en su densidad, velocidad de detonación y en algunos de diferentes casas comerciales (EXPLOCEN, FAMESA) ambas empresas situadas en Ecuador. Entre ellos tenemos:

#### 2.1.5 EMULSEN 720 (EXPLOCEN C.A)

Este tipo de explosivo es muy utilizado tanto en minería subterránea como en cielo abierto como carga de fondo y en columna, a su vez puede ser ocupado en presencia de agua con un fulminante No 8 de (EXPLOCEN C.A), con un costo de 4\$ a 6\$ por kg. Utilizados en rocas semidura y duras. En cuanto a sus características técnicas se muestra en la siguiente tabla

*Tabla 1 Características del EMULSEN 720*

Parámetros	Unidad	Especificación
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1120
Velocidad de detonación	m/s	5600

Fuente: *adaptado de ficha técnica EMULSEN 720, EXPLOCEN C.A.*

### 2.1.6 EMULSEN 5000X (EXPLOCEN C.A)

Emulsen 5000X nos ofrece una gran resistencia al agua con aditivos que le brindan alta viscosidad, de igual forma se ocupa como carga de fondo y columna, es usado en rocas intermedias a duras debido a su mayor densidad, se ocupa el mismo fulminante No 8 de (EXPLOCEN C.A). Cuenta un costo de 5.60\$ por kg, sus características técnicas se pueden ver en la siguiente tabla.

*Tabla 2 Características del EMULSEN 5000X*

Parámetros	Unidad	Especificación
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1140
Velocidad de detonación	m/s	5400

Fuente: *adaptado de ficha técnica EMULSEN 5000X, EXPLOCEN C.A.*

### 2.1.7 EMULNOR 3000

Pasando con el siguiente distribuidor FAMES, este explosivo al igual que los anteriores es una emulsión encartuchada en una envoltura plástica, nos ayuda para rocas intermedias a duras, y una buena calidad de gases de voladura, permitiendo menor tiempo de reingreso a interior mina, cuenta con un precio 8.50\$ por kg. Su ficha técnica viene dada por la siguiente tabla.

*Tabla 3 Características EMULNOR 3000*

Parámetros	Unidad	Especificación
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1140
Velocidad de detonación	m/s	5700

Fuente: *adaptado de ficha técnica EMULNOR 3000, FAMESA.*

### 2.1.8 EMULNOR 5000

Su uso está orientado a cualquier tipo de trabajo de minería subterránea o cielo abierto, proviene de la misma casa que el 3000 (FAMESA), varía muy poco en cuanto al ya mencionado, teniendo una diferencia en su velocidad de detonación y su densidad, y un costo de 10.50\$ por kg. Sus características técnicas se las puede ver en la siguiente tabla.

*Tabla 4 Características EMULNOR 5000*

Parámetros	Unidad	Especificación
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1160
Velocidad de detonación	m/s	5500

Fuente: *adaptado de ficha técnica EMULNOR 3000, FAMESA.*

## 2.2 Dispositivos y materiales

Los equipos y materiales usados en este proyecto y que ayudaron a su desarrollo se detallan a continuación:

- **Fichas técnicas:** En estas fichas encontramos todas las características que presentan los diferentes tipos de explosivos utilizados, esta ficha es creada por la empresa fabricante, aquí encontramos los datos más importantes para nuestros cálculos como lo es la densidad de los explosivos y su velocidad de detonación.
- **Tablas de Excel:** Utilizamos las tablas con las diferentes fórmulas estructuradas para calcular la voladura según el método sueco, aquí analizamos y valoramos si es o no conveniente este tipo de explosivo para la galería que vamos a desarrollar.

### 2.2.1 Dispositivos complementarios

- **AutoCAD:** Utilizamos la herramienta de AutoCAD para la creación de las mallas de perforación que haremos para el desarrollo de nuestra galería en este caso una malla de perforación de 4x4 en un túnel de 4m x 4m.
- **Computadora:** La computadora se utilizó para investigar la información de los diferentes explosivos y empresas que los fabrican, así como también para el desarrollo de las tablas de cálculos en Excel de los mismos explosivos.

### 2.3 Construcción de matriz de procesos.

Una vez realizado los diferentes cálculos con los 4 explosivos elegidos, hemos desarrollado la siguiente matriz, misma que representa los parámetros que varían y se mantienen para el desarrollo del proyecto.

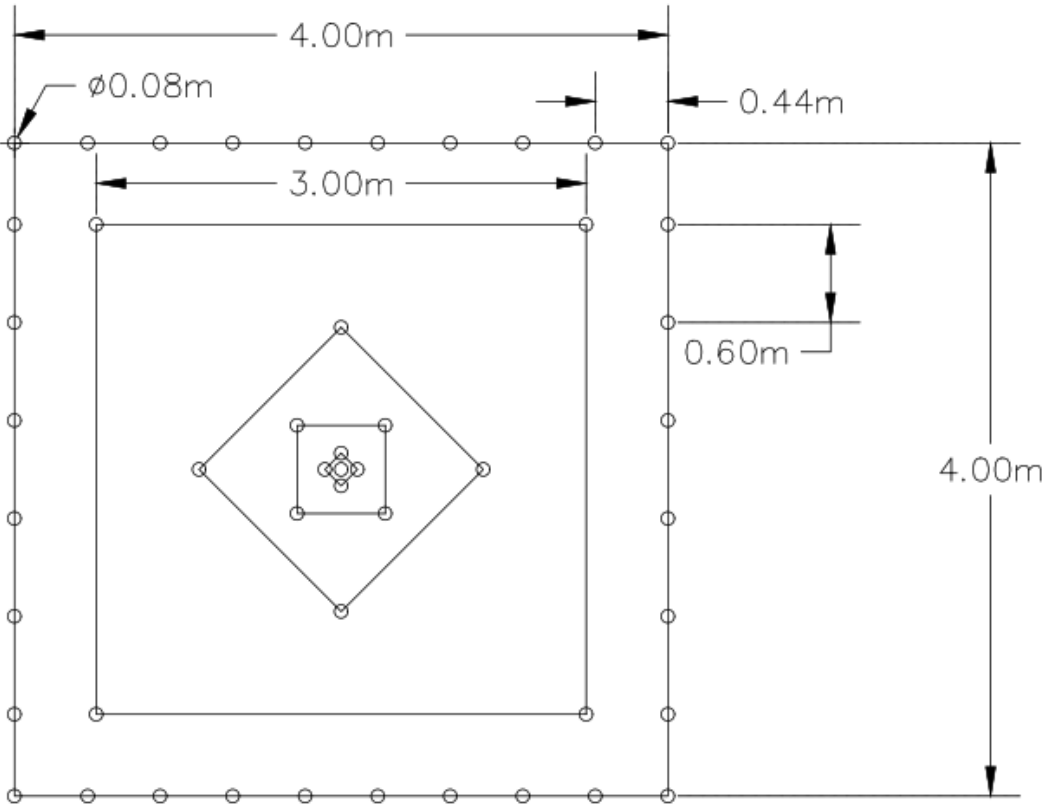
#### 2.3.1 Parámetros por mantener

- **Explosivo 1:** Para este proyecto hemos tomado como explosivo 1 el ANFO normal, comercializado por la empresa ecuatoriana EXPLOCEN, el ANFO normal se obtiene al mezclar nitrato de amonio con un hidrocarburo en proporciones apropiadas, permitiendo su utilización como carga de columna en trabajos de voladura. (EXPLOCEN, [explocen.com.ec](http://explocen.com.ec), 2025)
- **Diámetro de barrenos:** Hemos delimitado un diámetro de barrenos para todos los explosivos utilizados, siendo este de 3<sup>1/4"</sup>.
- **Numero de barrenos:** El número de barrenos a utilizar con todos los explosivos se mantienen para los respectivos cálculos.
- **Geometría del túnel:** Por último, se ha establecido la geometría del túnel, misma que se mantiene en los 4 explosivos a analizar, siendo este de una dimensión de 4m x 4m.

### 2.3.2 Parámetros por cambiar

- **Explosivo 2:** Hace referencia a los 4 diferentes tipos de explosivos a utilizar para el desarrollo del proyecto, los cuales son: EMULSEN 720, EMULSEN 5000X, EMULNOR 5000, EMULNOR 3000.
- **Cuadros:** Se presentan los 4 cuadros a desarrollar dentro del marco real del túnel, cuadro 1, cuadro 2, cuadro 3, cuadro 4, estos varían dependiendo de los valores que se otorgue a cada uno para la obtención del cuadro final, el cual tendrá el valor de sus lados que se ha deseado en la malla de perforación final.
- **Piedra (V):** Es el espacio sobrante entre el último cuadro de la malla de perforación y el sobrante hacia el límite de la geometría del túnel, el mismo varía según la medida que se escoja para el último cuadro de la malla de perforación.
- **Espaciamiento (E):** Hace referencia a la distancia que existe entre cada barreno en línea recta, los barrenos aparte de estar presentes en la malla de perforación, más conocida como zona A, también están presentes en las zonas B, C y D respectivamente. Esta distancia varía según el número de barrenos que estén presentes en cada zona.

*Figura 7 Malla de perforación*



Fuente: *Elaboración propia*

*Tabla 5 Matriz de parámetros a mantener y cambiar*

Fuente: *Elaboración propia.*

Parámetros por mantener		Parámetros por cambiar
Velocidad de detonación 1 Densidad del explosivo 1		Velocidad de detonación 2 Densidad del explosivo 2
Diámetro de barrenos Numero de barrenos Geometría del túnel		Cuadro 1 Cuadro 2 Cuadro 3 Cuadro 4 Piedra (V) Espaciamiento (E)

#### **2.4 Procesamiento y corrección de datos.**

El procesamiento de datos se realizó mediante el uso de hojas de cálculo en EXCEL, donde se organizaron y analizaron los parámetros para una voladura en subterránea, donde se utilizó el método sueco variando únicamente los datos ya mencionados como los explosivos tanto en su densidad y velocidad de detonación, manteniendo así la misma malla y diámetro de perforación.

Los datos fueron organizados en tablas para facilitar su análisis y comparación. Posteriormente, se aplicaron fórmulas del método indicado en Excel para calcular los parámetros de diseño de la voladura, así como el consumo de explosivos. Esto permitió evaluar los diferentes explosivos con el objetivo de identificar la alternativa más económica para el diseño de la voladura.

Para comprobar datos se realizó una verificación de las fórmulas empleadas en la hoja de cálculo de EXCEL, revisando la coherencia de los resultados obtenidos. Asimismo, se efectuó una revisión de posibles errores de digitación o inconsistencias en las unidades utilizadas, con el fin de garantizar la confiabilidad de los cálculos.

Finalmente, los resultados procesados fueron utilizados para comparar los diferentes explosivos ocupados. lo que permitió determinar la configuración de parámetros que optimiza el uso de explosivos y reduce los costos operativos en el proceso de perforación y voladura.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Elaboración de la tabla de parámetros técnicos iniciales

##### 3.1.1 EMULSEN 720

En el siguiente cuadro se presentan todos los parámetros obtenidos al utilizar el presente explosivo:

*Tabla 6 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 720*

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Velocidad de detonación 1 ANFO	m/s	1700
Velocidad de detonación 2 EMULSEN 720	m/s	5600
Densidad explosiva 1	kg/m <sup>3</sup>	800
Densidad explosivo 2	kg/m <sup>3</sup>	1120
Diámetro de los barrenos	pulg	3 ¼
Desviación	m/m	0.02
Barrenos al centro	m	0.12
Avance teórico	m	3.59
Avance real	m	3.05
Lcmax	kg/m	4.28
Lfmax	kg/m	5.99

s		4.6
c		0.4
Cuadro 1	m	1.15
V1	m	0.13
l1	m	0.09
V1'	m	0.07
B1	m	0.1
Q1	m	0.28
Cuadro 2	m	2
V2'	m	0.21
l2	m	0.4
V2'	m	0.14
B2	m	0.28
Q2	m	1.21
Cuadro 3	m	2
V3'	m	0.55
l3	m	1.07
V3'	m	0.49
B3	m	0.89
Q3	m	3.26
Cuadro 4	m	2
V4'	m	1.78
l4	m	3.44
V4'	m	1.72
B4	m	3.05
Q4	m	10.48
Zona B		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.6
c		0.54
lf		0.06
lc		0.03
lt		0.09
hf		0.65
hc		1.57
QB		0.09
Zona E		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.44
c		0.54
lf		0.05
lc		0.03
lt		0.08
hf		0.65
hc		1.57
QE		0.08
Zona C		
V	m	0.5

f	m	1.2
E	m	0.44
c	m	0.54
lf		0.04
lc		0.02
lt		0.06
hf		0.665
hc		1.57
QC		0.05
Numero de barrenos		
A1		4
A2		4
A3		4
A4		4
B		12
E		10
C		10
Área 1	m <sup>2</sup>	16
Área 2	m <sup>2</sup>	0
Área Túnel	m <sup>2</sup>	16
Volumen de extracción	m <sup>3</sup>	48.8
Consumo específico	kg/m <sup>3</sup>	1.3
Pt	m	172.09
pe	m/m <sup>3</sup>	3.5

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.1.2 EMULSEN 5000X

En el siguiente cuadro se presentan todos los parámetros obtenidos al utilizar el presente explosivo:

*Tabla 7 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 5000X*

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Velocidad de detonación 1 ANFO	m/s	1700
Velocidad de detonación 2 EMULSEN		
720	m/s	5600
Densidad explosiva 1	kg/m <sup>3</sup>	800
Densidad explosivo 2	kg/m <sup>3</sup>	1140
Diámetro de los barrenos	pulg	3 ¼
Desviación	m/m	0.02
Barrenos al centro	m	0.12
Avance teórico	m	3.59
Avance real	m	3.05
Lcmax	kg/m	4.28

Lfmax		6.1
s		4.5
c		0.4
Cuadro 1		1.143
V1		0.13
l1		0.09
V1'		0.07
B1		0.1
Q1		0.28
Cuadro 2		2
V2'		0.2
l2		0.4
V2'		0.14
B2		0.27
Q2		1.22
Cuadro 3		2
V3'		0.54
l3		1.07
V3'		0.48
B3		0.87
Q3		3.27
Cuadro 4		2
V4'		1.75
l4		3.45
V4'		1.69
B4		3
Q4		10.51
Zona B		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.6
c		0.54
lf		0.06
lc		0.03
lt		0.1
hf		0.65
hc		1.57
QB		0.09
Zona E		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.44
c		0.54
lf		0.05
lc		0.03
lt		0.08
hf		0.65
hc		1.57
QE		0.08
Zona C		

V	m	0.5
f	m	1.2
E	m	0.44
c		0.54
lf		0.04
lc		0.02
lt		0.06
hf		0.65
hc		1.57
QC		0.06
Numero de barrenos		
A1		4
A2		4
A3		4
A4		4
B		12
E		10
C		10
Area 1	m <sup>2</sup>	16
Area 2	m <sup>2</sup>	0
Area Túnel	m <sup>2</sup>	16
Volumen de extracción	m <sup>3</sup>	48.8
Consumo específico	kg/m <sup>3</sup>	1.31
Pt	m	172.09
pe	m/	3.5

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.1.3 EMULNOR 3000

En el siguiente cuadro se presenta los parámetros obtenidos al utilizar estos explosivos

*Tabla 8 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 3000*

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Vel. de detonación 1 ANFO	m/s	1700
Vel. de detonación 2 EMULNOR 3000	m/s	5700
Densidad explosiva 1	kg/m <sup>3</sup>	800
Densidad explosivo 2	kg/m <sup>3</sup>	1140
Diámetro de los barrenos	pulg	3 ¼
Desviación	m/m	0.02
Barrenos al centro	m	0.12
Avance teórico	m	3.59
Avance real	m	3.05
Lcmax	kg/m	4.28

Lfmax	kg/m	6.10
s		4.8
c		0.4
Cuadro 1	m	1.143
V1	m	0.13
l1	m	0.09
V1'	m	0.07
B1	m	0.10
Q1	m	0.26
Cuadro 2	m	2
V2'	m	0.20
l2	m	0.38
V2'	m	0.14
B2	m	0.27
Q2	m	1.16
Cuadro 3	m	2
V3'	m	0.54
l3	m	1.02
V3'	m	0.48
B3	m	0.87
Q3	m	3.10
Cuadro 4	m	2
V4'	m	1.75
l4	m	3.27
V4'	m	1.69
B4	m	3.00
Q4	m	9.96
Zona B		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.60
c		0.54
lf		0.06
lc		0.03
lt		0.09
hf		0.65
hc		1.57
QB		0.09
Zona E		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.44
c		0.54
lf		0.04
lc		0.03
lt		0.08
hf		0.65
hc		1.57

QE		0.08
Zona C		
V	m	0.5
f	m	1.2
E	m	0.44
c	m	0.54
lf		0.04
lc		0.02
lt		0.06
hf		0.65
hc		1.57
QC		0.05
Numero de barrenos		
A1		4
A2		4
A3		4
A4		4
B		12
E		10
C		10
Área 1	m <sup>2</sup>	16
Área 2	m <sup>2</sup>	0
Área Túnel	m <sup>2</sup>	16
Volumen de extracción	m <sup>3</sup>	48.8
Consumo específico	kg/m <sup>3</sup>	1.24
Pt	m	172.09
pe	m/m <sup>3</sup>	3.5

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.1.4 EMULNOR 5000

En el siguiente cuadro se presenta los parámetros obtenidos al utilizar estos explosivos

*Tabla 9 Todos los parámetros obtenidos del explosivo EMULSEN 5000*

PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Vel. de detonación 1 ANFO	m/s	1700
Vel. de detonación 2 EMULNOR 5000	m/s	5500
Densidad explosiva 1	kg/m <sup>3</sup>	800
Densidad explosivo 2	kg/m <sup>3</sup>	1160
Diámetro de los barrenos	pulg	3 ¼
Desviación	m/m	0.02

Barrenos al centro	m	0.12
Avance teórico	m	3.59
Avance real	m	3.05
Lcmax	kg/m	4.28
Lfmax	kg/m	6.21
s		4.7
c		0.4
Cuadro 1	m	1.143
V1	m	0.13
l1	m	0.09
V1'	m	0.07
B1	m	0.10
Q1	m	0.27
Cuadro 2	m	2
V2'	m	0.20
l2	m	0.39
V2'	m	0.14
B2	m	0.27
Q2	m	1.18
Cuadro 3	m	2
V3'	m	0.54
l3	m	1.04
V3'	m	0.48
B3	m	0.87
Q3	m	3.16
Cuadro 4	m	2
V4'	m	1.75
l4	m	3.33
V4'	m	1.69
B4	m	3.00
Q4	m	10.14
Zona B		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.60
c		0.54
lf		0.06
lc		0.03
lt		0.09
hf		0.65
hc		1.57
QB		0.09
Zona E		
V	m	0.5
f	m	1.45
E	m	0.44
c		0.54
lf		0.05

lc		0.03
lt		0.08
hf		0.65
hc		1.57
QE		0.08
Zona C		
V	m	0.5
f	m	1.2
E	m	0.44
c	m	0.54
lf		0.04
lc		0.02
lt		0.06
hf		0.65
hc		1.57
QC		0.05
Numero de barrenos		
A1		4
A2		4
A3		4
A4		4
B		12
E		10
C		10
Área 1		
Área 1	m <sup>2</sup>	16
Área 2	m <sup>2</sup>	0
Área Túnel	m <sup>2</sup>	16
Volumen de extracción	m <sup>3</sup>	48.8
Consumo específico	kg/m <sup>3</sup>	1.26
Pt	m	172.09
Pe	m/m <sup>3</sup>	3.5

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.2 Análisis de resultados

Al desarrollar el cálculo con los 4 explosivos diferentes, dos de ellos de una empresa nacional (EXPLOCEN) y dos de una internacional (FAMESA), hemos obtenido los siguientes resultados.

### 3.2.1 EMULSEN 720

Para este cálculo se utilizó el explosivo EMULSEN 720 de la empresa ecuatoriana EXPLOCEN el cual tiene una medida de 3 pulg de diámetro por 16 pulgadas de largo, en conjunto con un segundo explosivo conocido con el nombre de ANFO, también de la misma empresa ecuatoriana, se aplicaron todos los datos y características de los mismos a la tabla de Excel y se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 10 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULSEN 720.*

<b>Parámetros</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Perforación específica (pe)	3.5	m/m <sup>3</sup>
Consumo específico (qe)	1.30	kg/m <sup>3</sup>
Gasto específico (ge)	6.50	\$/m <sup>3</sup>

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.2.2 EMULSEN 5000X

Para este cálculo se utilizó el explosivo EMULSEN 5000X de la empresa ecuatoriana EXPLOCEN el cual tiene una medida de 2.5 pulg de diámetro por 16 pulgadas de largo, en conjunto con un segundo explosivo conocido con el nombre de ANFO, también de la misma empresa ecuatoriana, se aplicaron todos los datos

y características de los mismos a la tabla de Excel y se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 11 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULSEN 5000X.*

<b>Parámetros</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Perforación específica (pe)	3.5	m/m <sup>3</sup>
Consumo específico (qe)	1.31	kg/m <sup>3</sup>
Gasto específico (ge)	7.30	\$/m <sup>3</sup>

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.2.3 EMULNOR 3000

Este explosivo es de FAMESA empresa peruana con presencia en Ecuador mediante sus distribuidores, el mismo que se ocupó para el cálculo, se tomó el explosivo con medidas 1 pulg de diámetro y 7 in de largo, acompañado con ANFO, obteniéndose así los siguientes resultados:

*Tabla 12 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULNOR 3000.*

<b>Parámetros</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
Perforación específica (pe)	3.5	m/m <sup>3</sup>

Consumo específico (qe)	1.24	kg/m <sup>3</sup>
Gasto específico (ge)	10.51	\$/m <sup>3</sup>

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.2.4 EMULNOR 5000

EMULNOR 5000 al igual que el anterior es de la empresa FAMESA (peruana) ocupándose así para el cálculo siendo el cuarto y último explosivo para analizar, sus medidas son 1 pulg de diámetro y 7 in de largo, al igual que los anteriores es combinado con ANFO, obteniendo así los siguientes resultados:

*Tabla 13 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico del EMULNOR 5000.*

Parámetros	Magnitud	Unidades
Perforación específica (pe)	3.5	m/m <sup>3</sup>
Consumo específico (qe)	1.26	kg/m <sup>3</sup>
Gasto específico (ge)	13.22	\$/m <sup>3</sup>

Fuente: *Elaboración propia.*

### 3.3 Comparación de resultados

Se ha desarrollado la comparación de los 4 explosivos en cuanto a estos parámetros:

- Perforación específica (pe)
- Consumo específico (qe)
- Gasto específico (ge)

*Tabla 14 Tabla comparativa de perforación, consumo y gasto específico de los 4 explosivos utilizados.*

<b>EXPLOSIVO</b>	<b>Perforación específica (pe) m/m<sup>3</sup></b>	<b>Consumo específico (qe) kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Gasto específico (ge) \$/m<sup>3</sup></b>
EMULSEN 720	3.5	1.30	6.50
EMEULSEN 5000X	3.5	1.31	7.30
EMULNOR 3000	3.5	1.24	10.51
EMULNOR 5000	3.5	1.26	13.22

Fuente: *Elaboración propia.*

### **3.3.1 Perforación específica**

Al analizar la perforación específica en los 4 explosivos utilizados, se ha llegado a la conclusión de que todos presentan la misma perforación específica, siendo esta de 3.5 m/m<sup>3</sup>

### **3.3.2 Consumo específico**

Finalizado el análisis del consumo específico, se ha definido que el menor consumo específico presenta el explosivo EMULNOR 3000 con un valor de 1.24 kg/m<sup>3</sup>, mientras que el mayor consumo específico presenta el explosivo EMULSEN 5000X con un valor de 1.31 kg/m<sup>3</sup>

### **3.3.3 Gasto específico**

Concluido el análisis de los diferentes gastos específicos de cada explosivo, se los ha obtenido que el menor gasto específico presenta el explosivo EMULNOR 3000 con un valor de 6.50 \$/m<sup>3</sup>, mientras que el mayor gasto específico presenta el explosivo EMULSEN 5000X con un valor de 13.22 \$/m<sup>3</sup>.

### **3.4 Ventajas y desventajas de la metodología propuesta**

Considerando que las cuatro alternativas poseen una perforación específica igual a 3.5 m/m<sup>3</sup>, la diferenciación técnica se establece principalmente mediante el consumo específico de explosivo (kg/m<sup>3</sup>) y el gasto específico (\$/m<sup>3</sup>).

En el caso de EMULSEN 720, su principal ventaja es presentar el menor gasto específico, con un valor de 6.50 \$/m<sup>3</sup>, lo que la convierte en la alternativa más favorable desde el punto de vista económico. Esta condición permite reducir los costos globales de voladura, especialmente en operaciones de gran escala. No obstante, su consumo específico es de 1.30 kg/m<sup>3</sup>, superior al de otras opciones como EMULNOR 3000, por lo que requiere mayor cantidad de explosivo para remover el mismo volumen de material.

Con relación a EMEULSEN 5000X, mantiene la misma perforación específica que las demás alternativas, asegurando condiciones similares de diseño. Sin embargo, registra el mayor consumo específico, con 1.31 kg/m<sup>3</sup>, lo que evidencia menor eficiencia en el uso del explosivo. Además, su gasto específico de 7.30 \$/m<sup>3</sup> es superior al de EMULSEN 720, sin mostrar beneficios operativos significativos, lo que reduce su competitividad.

En cuanto a EMULNOR 3000, sobresale por presentar el menor consumo específico, con 1.24 kg/m<sup>3</sup>, siendo la opción técnicamente más eficiente. Esto implica un menor requerimiento de explosivo para fracturar igual volumen de macizo rocoso y un mejor aprovechamiento energético. No obstante, su gasto específico asciende a 10.51 \$/m<sup>3</sup>, valor superior al de las alternativas más económicas, lo que puede limitar su selección cuando se prioriza la reducción de costos.

Finalmente, EMULNOR 5000 registra un consumo específico de 1.26 kg/m<sup>3</sup>, posicionándose como la segunda mejor alternativa en eficiencia técnica. Esto indica que necesita menos explosivo que EMULSEN 720 y EMEULSEN 5000X para remover el mismo volumen de material. Sin embargo, presenta el mayor gasto específico de todas las opciones analizadas, con 13.22 \$/m<sup>3</sup>, situación que disminuye su conveniencia económica en operaciones continuas.

### CONCLUSIONES

- El análisis comparativo evidencia que EMULSEN 720 constituye la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico, al registrar un gasto de 6.50 \$/m<sup>3</sup>, el menor entre las opciones evaluadas.
- En términos de desempeño técnico, EMULNOR 3000 presenta los mejores resultados al alcanzar el menor consumo específico, con 1.24 kg/m<sup>3</sup>.
- EMULSEN 5000X muestra un desempeño menos favorable dentro del conjunto analizado ya que su consumo específico de 1.31 kg/m<sup>3</sup>, el más alto de la comparación.
- EMULNOR 5000 presenta un consumo específico competitivo de 1.26 kg/m<sup>3</sup>, su elevado gasto de 13.22 \$/m<sup>3</sup> reduce su atractivo económico.
- Una vez analizado los 4 explosivos, se ha llegado a la conclusión de que EMULNOR 300 es la mejor opción debido a que su mayor eficiencia técnica permite un proceso de voladura más controlado y una mejor fragmentación de la roca. Estos aspectos generan beneficios operativos a largo plazo, ya que pueden mejorar las etapas posteriores del minado, superando el ahorro inicial que podría ofrecer un explosivo de menor costo, pero con menor rendimiento energético.

### RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar la evaluación técnica mediante análisis granulométricos posteriores a la voladura, utilizando herramientas como fotogrametría digital, al comparar el desempeño de EMULSEN 720 y EMULNOR 3000. Si ambos explosivos generan resultados similares en

tamaño de fragmentación, la selección final debería orientarse principalmente al criterio económico.

- Se sugiere priorizar el uso de EMULSEN 720 en macizos rocosos de baja a media dureza, donde las condiciones de fragmentación sean favorables. En estos casos, su menor costo operativo compensa adecuadamente el ligero incremento en el consumo específico, convirtiéndolo en una alternativa rentable para la operación.
- El uso de EMULNOR 3000 debería destinarse a zonas críticas de trabajo, especialmente en sectores con roca de alta resistencia o presencia considerable de agua. Bajo estas condiciones, su mayor eficiencia energética puede contribuir a asegurar un mejor avance y una fragmentación más efectiva, justificando así su mayor costo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BERNAOLA ALONSO, J., CASTILLA GÓMEZ, J., & HERRERA HERBERT, J. (2013). *PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS EN MINERÍA*. MADRID: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.
- EXPLOCEN. (2025, Septiembre 23). *explocen.com.ec*. Retrieved Septiembre 23, 2025.
- EXPLOCEN. (2026). FICHA TÉCNICA EMULSEN 5000X.
- EXPLOCEN. (2026). FICHA TÉCNICA EMULSEN 720.
- FAMESA. (2026). Ficha técnica EMULNOR 3000.
- FAMESA. (2026). Ficha técnica EMULNOR 5000.
- Gustafsson , R. (1977). *TECNICA SUECA DE VALADURAS* . Nora : SPI.
- Gustafsson, R. (1977). *TECNICA SUECA DE VOLADURAS*. Nora: Nora Boktryckeri AB.
- Herrera Herbert, J. (2019). *Introducción a la minería subterránea* . Madrid : UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID .
- Johnson, C., Affolter, M., Inkenbarandt, P., & Mosher, C. (2017). *An introduction to Geology*. Salt Lake City: Salt Lake Community College.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., Pernia LLera, J. M., & Ortiz de Urbina, F. P. (2003). *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. Madrid: ETIMSA.
- Ministerio de minería de Chile. (2014, Mayo). Guia de Perforación para la pequeña minería. *Perforacion y Tronadura*. Santiago de Chile: Ministerio de Minería.
- Olalla, C., Morilla, I., & Jurado , C. (2019, 01 18). *INGEOexpert*.  
<https://ingeoexpert.com/2019/01/18/la-mineria-subterranea-en-que-consiste/?srsltid=AfmBOooNk7pb5QmCnb4Nv8x1LA4JWqbdMPhW1qAsI5bfCny90mbuT-Se>
- Paytan Capani, I., & Quispe Ramos, S. E. (2022). Aplicación de voladura controlada para optimizar costos en la U.P Santa María - Compañía Minera Poderosa S.A.- La Libertad - 2022. *Universidad Nacional DE HUANCAMELICA* , 30-31.
- Rengifo Lopez, S. E., & Bibiano Fernandez , E. C. (2018). EVALUACIÓN DE PERFORACIÓN Y VOLADURA PARA LA MEJORA DE PRODUCCIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA . *Universidad Privada del Norte*, 12.
- Sánchez Villareal, Y. V. (2012, Junio). OPTIMIZACIÓN EN LOS PROCESOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN EL AVANCE DE LA RAMPA EN LA MINA BETHZABETH. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Vilela Sangay, W. P. (2015, Mayo 26). Análisis de factibilidad para el uso de anfo pesado a base de emulsión gasificable en minera Yanacocha. Lima: Perú.