



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA  
MEDIANTE EL REDISEÑO DE MALLA Y EL FACTOR DE  
CARGA EXPLOSIVA EN LA GALERÍA SANTA MÓNICA DE LA  
UNIDAD MINERA ESPERANZA – AREQUIPA.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. JHONATAN RENE FLORES RAMOS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2020**



## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre Laura Ramos Ponce, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones.

A mi padre Rene Flores Talavera, por ser mi apoyo y guía durante el transcurso de mis estudios.

A mis hermanas Sayda, Selene, Mayte, Sinthia y Madelen por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A Elena Samata, porque te amo infinitamente y a mi hija Nicolle por ser el rayo de luz que ilumina mi vida y ser mi motor para seguir andando por el sendero de la vida.

**Bach. Jhonatan Rene Flores Ramos**



## AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por darme vida y salud para continuar mis estudios superiores y ser Ingeniero de minas.

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno por brindarme la formación académica y la oportunidad de desarrollarme plenamente y apoyarme con sus servicios.

A la Facultad de Ingeniería de Minas, a todos los docentes por la transferencia del conocimiento científico y académico, en especial al Ing. Jorge Durant Broden, director de nuestro proyecto de investigación, quien nos orientó con paciencia y honestidad como líder. por mi formación profesional como ingeniero de minas.

Mi agradecimiento y especial agradecimiento a la Unidad Minera Esperanza – Arequipa por su apoyo y la oportunidad de realizar este estudio de investigación.

**Bach. Jhonatan Rene Flores Ramos**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ANEXOS**

**RESUMEN ..... 10**

**ABSTRACT..... 11**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 12**

**1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 12**

1.2.1 Pregunta general..... 12

1.2.2 Preguntas específicas ..... 13

**1.3 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS..... 13**

1.3.1 Hipótesis general..... 13

1.3.2 Hipótesis específicas ..... 13

**1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 13**

1.4.1 Objetivo general ..... 13

1.4.2 Objetivos específicos ..... 13

**1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ..... 14**

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 15**



<b>2.2 BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Perforación y voladura .....	17
2.2.2 Perforación neumática.....	18
2.2.3 Fundamentos sobre explosivos y la teoría de la detonación .....	18
2.2.4 Propiedades y características de los explosivos.....	19
2.2.5 Diseño de la malla de perforación.....	25
2.2.6 Mecánica de rotura de rocas.....	26
2.2.7 Teoría de costos .....	33
<b>2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES .....</b>	<b>36</b>

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

<b>3.1 DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2 POBLACIÓN .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 MUESTRA .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 Instrumentos de recolección de datos .....	42

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

<b>4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 PERFORACIÓN EN GALERÍA SANTA MÓNICA.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....</b>	<b>43</b>
4.3.1 Resultados de costos de perforación en galería Santa Mónica .....	43
4.3.2 Resultados comparativos de voladura.....	48
4.3.3 Resultados comparativos de costos de voladura .....	53



<b>4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA ...</b>	<b>53</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>55</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>59</b>

**Área** : Ingeniería de Minas

**Línea** : Análisis de costos mineros

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 14 de enero del 2020



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Constante del tipo de roca "K" .....	26
Tabla 2	Instrumentación de variables .....	41
Tabla 3	Mano De Obra.....	44
Tabla 4	Máquina Perforadora .....	44
Tabla 5	Materiales de perforación .....	44
Tabla 6	Otros.....	44
Tabla 7	Herramientas .....	45
Tabla 8	Implementos de seguridad .....	45
Tabla 9	Mano de obra optimizada.....	46
Tabla 10	Maquina perforadora optimizada.....	46
Tabla 11	Materiales de perforación optimizada.....	46
Tabla 12	Otros.....	46
Tabla 13	Herramientas optimizadas.....	47
Tabla 14	Implementos de seguridad Optimizados .....	47
Tabla 15	Consumo de explosivos anterior.....	48
Tabla 16	Resultados voladura anterior.....	50
Tabla 17	Consumo de explosivos optimizados.....	50
Tabla 18	Resultados voladura optimizada .....	52
Tabla 19	Materiales de voladura .....	53
Tabla 20	Materiales de voladura optimizada .....	53
Tabla 21	Resumen comparativo perforación y voladura .....	54



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Malla de perforación anterior.....	50
Figura 2	Malla de perforación Optimizada .....	52



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Malla anterior.....	60
Anexo 2	Malla Optimizada.....	60



## RESUMEN

La Unidad Minera Esperanza – Arequipa, se encuentra ubicado en el Distrito de Atico, Provincia Caravelí, Región Arequipa. Al presente está en desarrollo la Galería Santa Mónica con una sección transversal de 3.00 m. x 2.80 m. y una extensión planeada de 380 m. Por medio de una evaluación ejecutada durante las operaciones de perforación y voladura se identificó un problema de altos costos de perforación y voladura en un frente de desarrollo de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza. El propósito de esta investigación es optimizar los costos de perforación y voladura, por medio de la reestructuración de la malla de perforación y el factor de carga explosiva en el frente de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa. El objetivo de este estudio es optimizar los costos de perforación y voladura en un 15%. De seguir el problema, afectaría el presupuesto de aplicación de la empresa minera. La metodología de desarrollo de esta investigación se forma en su primera fase a partir de la evaluación de todos los procesos de perforación y voladura anteriores, donde se analizó la construcción y cantidad de las redes de perforación y la cantidad de explosivos utilizados. En la una investigación posterior se diseña una nueva malla de perforación, la cual tiene en cuenta el número de taladros perforados, distancia, burden, factor de carga explosiva, tiempo de perforación, finalmente se hace un análisis de costos de la perforación y voladura anterior y actual, que extrae las siguientes conclusiones. Al reestructurar la malla de perforación y el factor de carga explosiva, se optimizan los costos de perforación y voladura de 253,19 USD/m a 223,60 USD/m con una diferencia de 29,59 USD/m.

Palabras claves: Optimización, costos, diseño, factor de carga, perforación y voladura



## ABSTRACT

The Esperanza – Arequipa Mining Unit is located in the Atico District, Caravelí Province, Arequipa Region. At present, the Santa Monica Gallery is under development with a cross section of 3.00 m. x 2.80 m. and a planned extension of 380 m. Through an evaluation carried out during drilling and blasting operations, a problem of high drilling and blasting costs was identified in a development front of the Santa Mónica Gallery of the Esperanza Mining Unit. The purpose of this research is to optimize the costs of drilling and blasting, through the restructuring of the drilling mesh and the explosive load factor in the front of the Santa Mónica Gallery of the Esperanza Mining Unit - Arequipa. The objective of this study is to optimize drilling and blasting costs by 15%. If the problem continues, it would affect the application budget of the mining company. The development methodology of this research is formed in its first phase from the evaluation of all the previous drilling and blasting processes, where the construction and quantity of the drilling networks and the quantity of explosives used were analyzed. In a subsequent investigation, a new drilling grid is designed, which takes into account the number of drilled holes, distance, burden, explosive load factor, drilling time, finally an analysis of the costs of the previous drilling and blasting is made. and current, which draws the following conclusions. By restructuring the drilling mesh and blast loading factor, drilling and blasting costs are optimized from \$253.19/m to \$223.60/m with a difference of \$29.59/m.

Keywords: Optimization, costs, design, load factor, drilling and blasting



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Unidad Minera Esperanza – Arequipa, está explotando el yacimiento aurífero filoneano mediante el método de Corte y Relleno Ascendente Convencional, utilizando las labores subterráneas verticales y horizontales.

Mediante una evaluación realizada en las operaciones de perforación y voladura se han encontrado problemas de elevados costos de perforación y voladura debido a la mala distribución de taladros, excesivo consumo de explosivos y accesorios de voladura, los cuales afectan al presupuesto de la Empresa y para resolver este problema se ha planteado el rediseño de la malla de perforación y la determinación del factor de carga explosiva necesaria para un avance óptimo reduciendo por ende los costos de perforación y voladura en la Galería Santa Mónica de La Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

En el desarrollo de las operaciones unitarias de perforación y voladura es de mucha importancia el diseño de la malla de perforación y la selección del tipo de explosivo y el factor de carga explosiva, por tanto, los cálculos se deben realizar según las características de la roca encajonante.

### 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.2.1 Pregunta general

¿Cómo optimizar los costos de perforación y voladura mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva adecuada en el desarrollo de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa?



### **1.2.2 Preguntas específicas**

- a) ¿Cómo optimizamos los costos de perforación rediseñando la malla en el frente de desarrollo de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa?
- b) ¿Cómo optimizamos los costos de voladura con el factor de carga explosiva adecuada en el frente de desarrollo de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa?

## **1.3 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

### **1.3.1 Hipótesis general**

Mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva adecuada se optimizará los costos de perforación y voladura en el frente de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

### **1.3.2 Hipótesis específicas**

- a) Por medio del rediseño de la malla, se optimizará los costos de perforación en el frente de la Galería Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.
- b) Por medio del factor de carga explosiva adecuada se optimizará los costos de voladura en el frente de la Galería Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

Optimizar los costos de perforación y voladura mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva adecuada en el frente de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- a) Optimizar los costos de perforación rediseñando la malla, en el frente de la Galería



Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

- b) Optimizar los costos de voladura mediante el factor de carga explosiva adecuada en el frente de la Galería Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La Unidad Minera Esperanza – Arequipa, según los estudios de cubicación de reservas de mineral tiene 484 639 Tm de mineral probado y 242 320 Tm de mineral probable, con una ley promedio de 7,5 g Au/Tm.

Actualmente la Empresa Minera viene desarrollando la Galería Santa Mónica de una longitud proyectada de 380 metros lineales y una sección de 3.00 m x 2.80 m y al realizar la evaluación a una distancia de 60 metros de avance lineal, se encontró problemas de elevados costos de perforación y voladura, utilizando un costo promedio de 219 \$/m y un factor de carga 2,17 kg/m<sup>3</sup>, para superar este problema se ha planteado como objetivo optimizar los costos de perforación y voladura, mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva adecuada en el frente de la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

La Galería Santa Mónica por ser una labor de desarrollo es necesaria para recuperar el mineral económico interceptando a la veta principal de la Unidad Minera Esperanza.

El presente estudio de investigación ha sido de mucha importancia para la Empresa Minera, porque al desarrollar esta labor subterránea se ha optimizado los costos de perforación y voladura en el frente de la Galería Santa Mónica, y ha generado mejores beneficios económicos y mayor rentabilidad para la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Cháhuares, (2012), en su tesis: *Nuevo diseño de la malla para mejorar la perforación y voladura en proyectos de explotación y desarrollo*, Mina EL COFRE. Concluye que con el nuevo diseño de malla de perforación se ha reducido el número de taladros, de 41 taladros a 36 taladros, siendo la profundidad del taladro de 1,45 metros y en la voladura el consumo de explosivos se ha reducido de 12,41 Kg/m a 7,94 Kg/m y los costos de explosivos se ha reducido de 39,92 US\$/m a 34,55 US\$/m.

Jáuregui, (2010), en su tesis *Reducción de costos operativos en mina mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de perforación y voladura*, Pontificia Universidad Católica del Perú, indica que la reducción de costos operativos en una empresa minera, los estándares óptimos se logran con un sistema de control y medición exhaustiva de las operaciones y se sintetizan en la supervisión y capacitación continua.

La reducción de costos de perforación y voladura en un tajeo de producción, se obtiene reduciendo el número de taladros y el uso del explosivo adecuado. Los costos de perforación y voladura se calculan en US\$/TM.

Mamani, P. N. (2015), en su tesis *Optimización de Costos de perforación y voladura en la mina Maribel de Oro A-Ananea*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno, indica que, con la aplicación de la nueva malla de perforación, los costos de perforación y voladura se ha reducido de 9.88 US\$/TM a 8,38 US\$/TM.

Rodríguez, (2011), en su tesis: *Mejoramiento de Operaciones Unitarias en Labores de Desarrollo en Minería Subterránea Convencional - Unidad Minera el Cofre;*



Universidad Nacional del Altiplano, concluye que se ha reducido el número de taladros empleados en el diseño de malla de perforación, la mina EL Cofre anteriormente venía realizando el diseño de malla de perforación con 33 taladros, de los cuales 30 son taladros cargados y 03 de alivio, empleando un barreno de 5 pies y 1 1/2" de diámetro, con un avance lineal de 1.00 m. reduciendo a 25 taladros de los cuales 22 son taladros cargados y 03 son de alivio, siendo la profundidad del taladro de 1.40 m y un avance lineal efectivo por disparo de 1.33 m.

Suasaca, (2014), en su tesis *Análisis de costos operativos para optimizar la Perforación y Voladura en la Unidad Minera EL COFRE*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno, indica los costos en voladura se han reducido de 3.99US\$/TM a 2.76 US\$/TM.

La metodología utilizada para optimizar la perforación y voladura ha sido el diseño de la nueva malla de perforación en el Tajeo de explotación con lo que se ha reducido el número de taladros y el consumo de explosivos.

Tapia, (2015), en su tesis *Optimización de la producción y avance mediante diseño de perforación y voladura en rampa 650 en la Empresa Especializada IESA S.A. CIA Minera ARES S.A.C.*, universidad Nacional del Altiplano-Puno, indica que, con la nueva malla de perforación y voladura, el número total de taladros se han reducido 45 a 41 taladros cargados, lo que reduce la carga explosiva. Los costos de perforación y voladura se han reducido de 10,25 US\$/TM a 9,46 US\$/TM.

La metodología utilizada para optimizar la perforación y voladura ha sido el diseño de la nueva malla de perforación, reduciendo el número de taladros y el consumo de explosivos.



## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 Perforación y voladura

La perforación y voladura es una técnica aplicable a la extracción de roca en terrenos competentes, donde los medios mecánicos no son aplicables de una manera rentable. Así, partiendo de esta definición, este método es aplicable a cualquier método de explotación, bien en minería, bien en obra civil, donde sea necesario un movimiento de tierras.

La técnica de perforación y voladura se basa en la ejecución de perforaciones en la roca, donde posteriormente se colocarán explosivos que, mediante su detonación, transmiten la energía necesaria para la fragmentación del macizo rocoso a explotar.

De esta forma, se tienen dos tecnologías claramente diferenciadas: la tecnología de la perforación y la tecnología de diseño y ejecución de voladuras.

Las técnicas de perforación, además de la aplicación a la ejecución de perforaciones para voladuras, se emplean para multitud de aplicaciones, como puede ser la exploración, drenajes, sostenimiento.

La perforación en roca ha evolucionado con el tiempo con la incorporación y empleo de diferentes tecnologías, bien por la eficiencia conseguida, o bien por otros condicionantes externos. Las más empleadas y desarrolladas se basan en sistemas de perforación mecánicos, conocidos como sistemas de perforación *a* rotación y *a* percusión. Son estos métodos, cuya eficacia se enmarca en energías específicas por debajo de los  $1.000 \text{ J/cm}^3$ , los que serán más ampliamente descritos y desarrollados.

Existe una relación intrínseca entre la perforación y la voladura, ya que puede afirmarse categóricamente que una buena perforación posibilita una buena voladura, pero una mala perforación asegura una mala voladura. Se entiende por buena perforación aquella que se ha hecho con los medios y técnicas más adecuadas y que además se ha



ejecutado de forma correcta. Asimismo, una buena voladura será aquella que cumple con el objetivo que fue diseñada.

### **2.2.2 Perforación neumática**

El aire comprimido se usa como energía para hacer agujeros de pequeño diámetro con taladros integrales que tienen una punta achaflanada (cincel) que rompe la roca dentro del taladro. A cada golpe que da el taladro al hoyo, y por rotación automática, rompe la piedra en un círculo correspondiente a su diámetro; creando así un agujero (Instituto de seguridad Minera, 2017).

Hay dos posibilidades:

- a) que el impacto se produzca fuera del taladro y se transmita a la hoja a través de la varilla (cabeza del martillo).
- b) El martillo se coloca en el fondo del agujero de modo que el pistón golpee directamente la hoja (martillo quita agujeros).

### **2.2.3 Fundamentos sobre explosivos y la teoría de la detonación**

Los explosivos son sustancias químicas con un cierto grado de inestabilidad en los enlaces atómicos de sus moléculas que, ante determinadas circunstancias o impulsos externos, propicia una reacción rápida de disociación y nuevo reagrupamiento de los átomos en formas más estables. Esta reacción, de tipo oxidación-reducción, es inducida térmicamente por los llamados “puntos calientes”, se conoce con el nombre de detonación y origina gases a muy alta presión y temperatura, los cuales generan a su vez una onda de compresión que recorre el medio circundante.

De esta forma, la energía química contenida en el explosivo se transforma en la energía mecánica de esa onda de compresión. Cabe señalar que en contra de lo que



podiera imaginarse, no es cuantitativamente importante (por ejemplo, un kilogramo de explosivo contiene aproximadamente una décima parte de la energía contenida en un litro de gasolina). La clave que le proporciona su singular poder expansivo es su capacidad de liberarla en un corto espacio de tiempo.

La onda de compresión se genera por el aumento de volumen que sufren los productos de reacción en forma gaseosa, de manera que se dispone de energía mecánica suficiente y aplicable a la fragmentación de rocas, convirtiéndose en un elemento clave en minería y en todo tipo de excavaciones en roca.

#### **2.2.4 Propiedades y características de los explosivos**

La selección del explosivo más idóneo para un fin determinado, supone conocer las características de cada explosivo y, a partir de ellas, elegir el más adecuado al tipo de aplicación que se precise.

Las características de carácter práctico que son básicas de un explosivo son las que se señalan a continuación:

- Potencia explosiva.
- Resistencia al agua.
- Calidad de humos.
- Velocidad de detonación.
- Densidad de encartuchado.
- Poder rompedor
- Sensibilidad.
- Estabilidad química.



### a) **Potencia explosiva**

Se puede definir la potencia explosiva como la capacidad que posee el explosivo para quebrantar y proyectar la roca. En realidad, se trata de la energía del mismo aprovechado en la voladura. Esta característica depende fundamentalmente de la composición de explosivo, pudiendo optimizarse con la adecuada técnica de voladura. Existen diferentes métodos para valorar la potencia de un explosivo, siendo los más empleados los siguientes:

- Péndulo Balístico.
- Energía Relativa por unidad de peso y de volumen.

El Péndulo Balístico (también conocido como mortero balístico por su nombre en inglés, “ballistic mortar”) es un método que permite medir la potencia de un explosivo por comparación en forma de tanto por ciento en relación a la “goma pura” (que es una mezcla de NG y NC en determinada proporción) y que se utiliza como patrón y a la que se asigna el valor 100%. Este ensayo es solo práctico para explosivos sensibles al detonador y que sean de pequeño diámetro crítico.

La Energía Relativa por unidad de peso y de volumen es un procedimiento teórico, basado en el valor energético químico del explosivo y especialmente indicado para aquellos que son insensibles al detonador. En este caso la potencia se puede expresar con los siguientes parámetros:

- AWS: Energía absoluta por unidad de peso (cal/g)
- ABS: Energía absoluta por unidad de volumen (cal/cm<sup>3</sup>)

### b) **Poder rompedor**

Bernaola Alonso et al., (2013) afirma que “Es una propiedad de un explosivo que indica la capacidad de romper rocas debido únicamente a la onda de choque, no a la secuencia de las ondas de choque más la presión del gas (que es una medida de la



potencia). El poder explosivo es un parámetro muy importante para los explosivos destinados a un uso libre o independiente, cuyos gases no pueden ejercer alta presión. Esto se aplica a cargas huecas y cargas para taqueo. Su caracterización se realiza mediante el método de Hess, en el que se determina la reducción de altura que provoca la detonación de una cantidad de explosivo definida en un cilindro de plomo. También es un método más adecuado para explosivos sensibles al detonador y de diámetro crítico pequeño. Si bien es un ensayo desarrollado hace mucho tiempo y que los explosivos han evolucionado desde su desarrollo, sigue ofreciendo resultados satisfactorios a pesar de que hay corrientes de pensamiento que desaconsejan su uso. (pág. 75)

### c) **Velocidad de detonación**

“La detonación de una columna continua de explosivo provocará la transformación del explosivo en un gran volumen de gases a elevada temperatura y presión. La velocidad a la que se produce esta transformación se denomina velocidad de detonación, siendo su unidad de medida metros por segundo (m/s). Es importante distinguir entre la velocidad de detonación (de la reacción química) y de la onda de choque (transmisión física).

La velocidad de detonación es una característica a tener en cuenta en la elección del explosivo. Se optará por explosivos que detonan lentamente, dando lugar a que su energía se desarrolle de forma progresiva, cuando se vuelen rocas blandas o se requiera una fragmentación gruesa, mientras que se debe escoger explosivos dotados de elevada velocidad de detonación cuando se pretendan fragmentaciones más intensas en rocas duras.

Existen multitud de métodos de medida de la velocidad de detonación, pudiendo diferenciarse principalmente por el objeto de cada uno de ellos. Así, se pueden tener mediciones realizadas en laboratorio y medidas realizadas en campo. Si bien, los



resultados deberían ser análogos, las mediciones realizadas en campo permiten comprobar la evolución de la velocidad de detonación a lo largo del barreno, permitiendo ver la relación entre el comportamiento del explosivo en condiciones reales de aplicación” (Bernaola Alonso et al., 2013, pág. 77).

**d) Densidad**

La densidad es una característica muy importante de los explosivos industriales. Depende del tipo de componentes empleados en su fabricación, ya que cuanto mayor es la densidad del explosivo, mayor es la concentración de carga para un diámetro de barreno determinado.

La densidad relativa de los explosivos está comprendida normalmente entre 0,8 y 1,5. Existen algunos explosivos de menor densidad con aplicaciones muy determinadas y cuyo uso implica una baja energía por unidad de volumen con aplicación en voladuras de recorte o bien en algunas aplicaciones muy concretas en voladuras de escollera.

La densidad es también un parámetro a tener en cuenta en la carga de barrenos con agua en su interior. La carga de explosivos de densidad inferior a 1,1 g/cm<sup>3</sup> en barrenos con agua resulta muy laboriosa, ya que se hace muy difícil llenar completamente los barrenos dado que los cartuchos tienden a flotar (Bernaola Alonso et al., 2013).

**e) Resistencia al agua**

La resistencia al agua se refiere a la propiedad por la cual un explosivo conserva sus propiedades sin cambios durante algún tiempo después del contacto con el agua. Las dinamitas de gelatina, los hidrogeles y las emulsiones se mantienen perfectamente cuando se cargan en pozos con agua, lo que permite su uso en pozos donde hay agua. Sin embargo, los productos en polvo y Anfos no pueden soportar el agua debido a la solubilidad del nitrato de amonio.



Castilla Alonso, (2013) sustenta que la resistencia al agua depende del estado de agregación de cada elemento del explosivo. Por ejemplo, el nitrato de amonio no es muy resistente al agua porque se disuelve fácilmente en ella; Sin embargo, bajo ciertas condiciones y en forma de emulsión o solución saturada, es el componente principal de algunos explosivos caracterizados por su buena resistencia al agua.

En caso de que la aplicación del explosivo deba realizarse durante una explosión submarina, se debe tener en cuenta que el explosivo utilizado no sólo debe resistir la presencia de agua sin disolverse, sino también mantener su ignición. susceptibilidad y propagación en estas condiciones. En estos casos se deberán utilizar explosivos especialmente diseñados para este fin.

Finalmente, si los barrenos son simplemente húmedos, se puede utilizar casi cualquier tipo de explosivo, siempre que el tiempo residual del explosivo en el barreno sea corto, o para explosivos a granel ocultos como Anfo. Para paliar este efecto se han desarrollado productos especiales, como Anfo impermeable, que contiene aditivos que recubren los gránulos de nitrato de amonio para que no se disuelva en agua durante un tiempo determinado (pág. 81).

#### **f) Dinamita**

Estos tipos de explosivos reciben su nombre por su consistencia gelatinosa y se fabrican mezclando nitroglicerina/nitroglicol (NG) con nitrocelulosa. Esta mezcla es incluso más energética que el propio NG. El elemento dominante en su composición es el nitrato de amonio, además de combustibles y otras pequeñas impurezas. La familia de la dinamita se puede distinguir en dos tipos diferentes, gelatinosa y pulverulenta, según su composición (Herrera Herbert et al., 2013).



### **g) Dinamita pulverulenta**

La dinamita en polvo consiste esencialmente en nitrato de amonio, un combustible que fija su exceso de oxígeno, y una pequeña cantidad (generalmente alrededor del 10%) de un agente sensibilizante, que puede ser nitroglicerina, trinitrotolueno o una mezcla de ambos. Todas ellas, debido a su contenido en nitrato amónico presentan las características siguientes:

- Baja potencia
- Densidad media/baja (de 1,0 a 1,2)
- Regular o mala resistencia al agua
- Velocidad de detonación de 2.000 a 4.000 m/s
- Poca sensibilidad al choque o a la fricción.

Por todo ello son explosivos recomendables en rocas de dureza media-baja sin presencia de agua (Bernaola Alonso et al., 2013).

### **h) Dinamita gelatinosa**

Según Castilla Gomez, (2013) dice que una forma de mejorar la escasa resistencia al agua de las dinamitas en polvo aumentando su eficacia es aumentar su contenido en nitroglicerina (o nitroglicol) y añadir una cierta cantidad de nitrocelulosa, que actúa como agente gelificante para formar una pasta gelatinosa. Hay diversas modalidades en función de su contenido de Nitroglicerina (o Nitroglicol), pero todas ellas se caracterizan por:

- Elevada potencia
- Alta densidad (de 1,4 a 1,5)
- Buena o excelente resistencia al agua.
- Alta velocidad de detonación (de 4.000 a 7.000 m/s)
- Cierta sensibilidad al choque o a la fricción



Por todo ello son explosivos recomendables en rocas de dureza alta incluso con presencia de agua. (pág. 98)

### 2.2.5 Diseño de la malla de perforación

- **Avance del disparo.** Está limitado por el diámetro del taladro vacío y la desviación de los taladros de carga que debe mantenerse por debajo del 2% los avances promedios y deben llegar al 95% de la profundidad del taladro L. También para el diseño de la malla de perforación se ha considerado el tipo de roca y su respectiva constante. (EXSA, 2001).

$$L = 0.15 + 34.1 * D_2 - 39.4 * D_2^2$$

$$D_2 = 0.95 * L$$

Donde:

L = Profundidad del taladro (metros)

D<sub>2</sub> = Diámetro del taladro de alivio (metros)

Cuando se utilizan arranques con varios taladros vacíos en lugar de uno solo entonces la ecuación anterior sigue siendo válida si:

$$D_2 = \sqrt{n} * D_1$$

Donde:

D<sub>2</sub> = Diámetro de taladro de alivio equivalente

n = Número de taladros vacíos en el arranque

D<sub>1</sub> = Diámetro del taladro a cargar

- **Avance de la voladura al 95 %**

ALGORITMO DE HOLMBERG

$$I = 0.95 * H$$

Donde:



I = Avance de la voladura (metros)

H = Profundidad de los taladros a perforarse (metros)

**Tabla 1 Constante del tipo de roca "K"**

TIPO DE ROCA	CONSTANTE K
Roca muy dura	1
Roca dura	1.5
Roca intermedia	2
Roca suave	2.5
Roca muy suave	3

*Nota.* Fuente: Manual práctico de voladura EXSA- 2001

## 2.2.6 Mecánica de rotura de rocas

### A. Proceso de fracturamiento

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de iteración (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S.A, 2009).

Una explicación sencilla, comúnmente aceptada estima que el proceso ocurre en varias etapas o fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, de pocos milisegundos, durante el cual ocurre la completa detonación de una carga confinada, comprendiendo desde el inicio de la fragmentación hasta el total desplazamiento del material volado (Centro Tecnológico de Voladura EXSA S.A, 2009).

Estas etapas son:

- Detonación del explosivo y generación de la onda de choque.



- Transferencia de la onda de choque a la masa de la roca iniciando su agrietamiento.
- Generación y expansión de gases a alta presión y temperatura que provocan el fracturamiento y movimiento de la roca
- Desplazamiento de la masa de roca triturada para formar la pila de escombros o detritos.

## **B. Fragmentación de la roca**

Este mecanismo aún no está totalmente definido, existen varias teorías que intentan explicarlo, entre ellas se mencionan:

1. Teoría de reflexión (ondas de tensión reflejadas en una cara libre).
2. Teoría de expansión de gases.
3. Teoría de ruptura flexural (por expansión de gases).
4. Teoría de torque (torsión) o de cizallamiento.
5. Teoría de craterización.
6. Teoría de energía de los frentes de onda de compresión y tensión.
7. Teoría de liberación súbita de cargas.
8. Teoría de nucleación de fracturas en fallas y discontinuidades.

Una explicación sencilla, comúnmente aceptada, que resume varios de los conceptos considerados en estas teorías, estima que el proceso ocurre en varias etapas o fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, de pocos milisegundos, durante el cual ocurre la completa detonación de una carga confinada, comprendiendo desde la fragmentación hasta el total desplazamiento del material fracturado (Llanqui Mamani, 2019).

Estas etapas son:

- Detonación del explosivo y generación de la onda de choque.



- Transferencia de la onda de choque a la masa de la roca iniciando su agrietamiento.
- Generación y expansión de gases a alta presión y temperatura que provocan la fracturación y movimiento de la roca.
- Desplazamiento de la masa de roca triturada para formar la pila de escombros o detritos.

### C. Dimensionamiento de la voladura

#### a) Volumen total (V) = (L x A x H)

Donde:

V = Volumen m<sup>3</sup>

L = Largo, en m.

H = Altura, en m

A = Potencia, en m.

Si se desea expresarlo en toneladas de material in situ se multiplica por la densidad promedio de la roca o el material que se pretende volarse.

$$TM = V \times \rho$$

Donde:

TM = Tonelada métrica

$\rho$  = Densidad de roca.

V = Volumen.

#### b) Cantidad de carga

$$Qt = V \times \text{kg/m}^3$$

#### c) Espaciamiento (E)

Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila.



Se calcula en relación con la longitud del Burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros. Al igual que con el Burden, espaciamientos muy pequeños producen exceso de trituración y craterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del Burden. Por otro lado, espaciamientos excesivos producen fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular. En la práctica, normalmente es igual al Burden para malla de perforación cuadrada  $E = B$  y de  $E = 1,3$  a  $1,5 B$  para malla rectangular o alterna.

Para las cargas de pre corte (Smooth blasting) el espaciamiento en la última fila de la voladura generalmente es menor:  $E = 0,5$  a  $0,8 B$  cuando se pretende disminuir el efecto de impacto hacia atrás.

Si el criterio a emplear para determinarlo es la secuencia de salidas, para una voladura instantánea de una sola fila, el espaciado es normalmente de  $E = 1,8 B$ , ejemplo para un Burden de  $1,5$  m ( $5'$ ) el espaciado será de  $2,9$  m ( $9'$ ) (Pérez Rodríguez, 2010).

Para voladuras de filas múltiples simultáneas (igual retardo en las que el radio longitud de taladro a Burden ( $L/B$ ) es menor que 4 el espaciado puede determinarse por la fórmula:

$$E = \sqrt{(B \times L)}$$

Donde:

$B =$  Burden, en pies.

$L =$  Longitud de taladros, en pies.

#### **d) Cálculo y distribución de la carga explosiva**

##### **1. Columna explosiva**



Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes del taladro.

Es importante la distribución de explosivo a lo largo del taladro, según las circunstancias o condiciones de la roca. Usualmente comprende de 1/2 a 2/3 de la longitud total y puede ser continua o segmentada.

Así pueden emplearse cargas sólo al fondo, cargas hasta media columna, cargas a columna completa o cargas segmentadas (espaciadas o alternadas) según los requerimientos incluso de cada taladro de una voladura. La columna continua normalmente empleada para rocas frágiles o poco competentes suele ser del mismo tipo de explosivo, mientras que para rocas duras, tenaces y competentes se divide en dos partes: La carga de fondo (CF) y la carga de columna (CC).

## 2. Carga de fondo (CF)

Pérez Rodríguez, (2010) Afirma que la carga explosiva de mayor densidad y potencia requerida al fondo del taladro para romper la parte más confinada y garantizar la rotura al piso, para, junto con la sobre perforación, mantener la rasante, evitando la formación de resaltos o lomos y también limitar la fragmentación gruesa con presencia de bolones.

Su longitud es normalmente equivalente a la del Burden más la sobre perforación:  $B + 0,3 B$ ; luego:

$$CF = (1,3 \times B)$$

No debe ser menor de  $0,6 B$  para que su tope superior esté al menos al nivel del piso del banco. Se expresa en kg/m o lb/pie de explosivo. Si se toma en consideración la resistencia de la roca y el diámetro de la carga, la longitud de la carga de fondo variará entre  $30 \varnothing$  para roca fácil a  $45 \varnothing$  para muy dura.



### 3. Carga de columna (CC)

Se ubica sobre la carga de fondo y puede ser de menos densidad, potencia o concentración ya que el confinamiento de la roca en este sector del taladro es menor.

Pesado en relaciones de 10/90 a 20/80. La altura de la carga de columna se calcula por la diferencia entre la longitud del taladro y la suma la carga de fondo más el taco (Llanqui Mamani, 2019).

$$CC = L - (CF + T)$$

Usualmente  $CC = 2,3 \times B$

#### a) Estimación de cargas

Volumen a romper por taladro = Malla por altura de taladro.

$$V = (B \times E \times H) = m^3 \text{ por taladro}$$

Tonelaje = Volumen por densidad de la roca o mineral.

#### b) Volumen de explosivo

Diámetro de taladro multiplicado por la suma de las cargas segmentadas o por longitud de la columna explosiva (columna continua)

$$V_e = (\emptyset \times C_e), \text{ en } m^3$$

#### c) Factor de carga (FC)

Determina la cantidad de explosivo utilizado por cada metro cúbico o tonelada de roca fragmentada.

$$FC = (W_e/V)$$

#### d) Tonelaje roto

El tonelaje triturado es igual al volumen de material triturado multiplicado por la densidad de dicho material.

$$\text{Tonelaje} = (V \times \delta_r)$$



### e) Perforación específica

Este es el número de metros o pies que se deben perforar por cada metro cúbico volado.

$$\frac{(L/H)}{B \times E}$$

Donde:

L = Profundidad del taladro { altura de banco (H) – 0,3 B }.

H = Altura de banco.

B = Burden.

E = Espaciamiento.

### f) Cálculo general para carga de taladro

$$(0,34 \times \emptyset^2 \times \rho_e), \text{ en lb/pie}$$

Donde:

0,34: Factor.

$\emptyset$ : Diámetro del taladro (en pulgadas).

$\rho_e$ : Densidad del explosivo a usar, (en  $\text{g/cm}^3$ )

### g) Densidad de carga (Dc)

$$Dc = 0,57 \times \rho_e \times \emptyset^2 \times (L - T)$$

Donde:

Dc = Densidad de carga, en kg/tal.

0,57 = Factor.

$\emptyset$  = Diámetro del taladro, (en pulgadas).

$\rho_e$  = Densidad del explosivo a usar.

L = Longitud de perforación.

T = Taco.



## 2.2.7 Teoría de costos

### A) Estimación de los costos de operación

Según Llanqui Mamani, (2019) “El costo de operación depende del sistema de explotación, tamaño de yacimiento, su forma, grado de irregularidad, resistencia del mineral, resistencia de las cajas, carga de los terrenos, método de acceso y de preparación, tamaño de la producción y también el nivel de salarios. El sistema de explotación influye mucho sobre los trabajos de tajeo y de preparación y parcialmente sobre el transporte del mineral. Se debe buscar un compromiso entre los siguientes valores: precio de costo, factor de recuperación, factor de dilución.

Los índices de consumo de mano de obra, materiales y energía dependen de las propiedades de las rocas, de la mecanización de los trabajos y de la escala de producción. El consumo de explosivo en tajeo y preparación aumenta en roca dura. La carga de los terrenos es un factor de inseguridad de mantenimiento elevado y rendimiento mediocre” (pág. 38).

El valor del costo también depende de la depreciación de las inversiones, cuya tasa se determina en relación con el tamaño y vida útil de la mina, así como de los gastos generales, cuyo valor absoluto está determinado principalmente por la cantidad de producción, su estructura y condiciones naturales.

Estas dificultades radican en encontrar relaciones aceptables entre costos y prácticas. Debido a la amplia gama de componentes del costo operativo total y las características específicas de cada operación minera, las estimadoras de costos enfrentan desafíos importantes para determinarlos. Sin embargo, se pueden usar los siguientes métodos:

- Método de proyecto similar
- Método de relación de capacidad de costo



- Método de componente de costo
- Método de costo detallado

**a) Método de proyecto similar**

Esto supone que el proyecto, proceso u objeto de investigación es similar a otro proyecto existente con costos conocidos. Si bien se cuenta con información detallada, las condiciones y circunstancias como la geología local, los equipos utilizados y la estrategia corporativa distan mucho del proyecto en estudio. Por lo tanto, se utiliza otro sistema que utiliza parte de la información disponible, como los costos personales, y estima el costo total en función de las relaciones conocidas entre los diversos componentes.

**b) Método de relación de capacidad de costo**

Este método se basa en el uso de diagramas o fórmulas en las que se correlacionan los costos con la capacidad de producción de diferentes explotaciones. Este es esencialmente el mismo método utilizado para estimar el costo de capital. La base estadística en la que se basa no es homogénea y puede dar lugar a errores con este procedimiento de estimación. Los datos utilizados para determinar tales ratios deben referirse a un método de aplicación específico con condiciones geográficas y geológicas similares. La extrapolación de costos a partir de los costos correspondientes a la capacidad de producción conocida se realiza mediante fórmulas de costos de capital. Sin embargo, las fluctuaciones en los costos operativos son más complejas que las fluctuaciones en los costos de capital y requieren su asignación.

**c) Método de los componentes del costo**

Cuando el proyecto ha progresado hasta el punto en que se conoce la plantilla de personal, las obras de infraestructura, los consumos de materiales, los



equipos necesarios, es posible desarrollar un sistema de estimación de costos basado en los gastos unitarios o elementales tales como:

- dólares/metro
- dólares/tonelada

#### **d) Método del costo detallado**

Finalmente, los costos de operación deben deducirse a partir de los costos principales. Para ello es necesario conocer índices tales como consumo de combustible por hora de operación, vida de los útiles de perforación, consumos específicos de explosivo, accesorios de voladura y otros. En primer lugar, se fijan los criterios básicos de organización relativos a días de trabajo año, relevos al día y horas de trabajo por relevo. Seguidamente para los niveles de producción previstos se establecen los coeficientes de disponibilidad y eficiencia con los cuales se determinan la capacidad de los equipos necesarios y el número de estos. Por último para cada grupo de máquinas se elabora una tabla detallada indicando las distintas partidas que engloba el costo horario de funcionamiento: personal, materiales, consumos, desgastes, mantenimiento y servicios. Conociendo el número de horas necesarias para una determinada producción el costo horario de la máquina que intervienen en dicho proceso se obtiene de manera inmediata el costo de operación.

Este procedimiento constituye el único método seguro para estimar los costos de operación de un proyecto. En la estimación de los costos horario de los equipos los conceptos que se deben tener en cuenta son:

#### **1. Costos directos**

##### **a. Consumos**

- Energía eléctrica
- Combustibles



- Lubricantes
  - b. Reparaciones
  - c. Neumáticos
  - d. Elementos de desgaste
  - e. Operador
- 2. Costos indirectos**
- a. Amortización
  - b. Intereses del capital
  - c. Seguros
  - d. Impuestos

El porcentaje de imprevistos se aplica sobre los costos de operación (directos, indirectos y generales) para tener en cuenta alguna eventualidad durante el periodo de trabajo. Estos problemas son debidos a condiciones climatológicas adversas, colapsos de terrenos, inundaciones. Las cifras que se utilizan varían entre el 10 a 25%, dependiendo del nivel de detalle de estimación de los costos.

Para el análisis de costos se utilizará los siguientes costos:

- Costos unitarios
- Costos directos
- Costos indirectos
- Costos totales

### **2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES**

#### **a) Perforación**

Es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos o blast hole.



La perforación se basa en concentrar una cantidad de energía en una pequeña superficie, para vencer la resistencia de la roca, aprovechando el comportamiento a la deformación de elástico - frágil que ellas presentan.

**b) Malla de perforación**

Es la forma en la que se distribuyen los taladros de una voladura, considerando básicamente a la relación de Burden y espaciamiento y su dirección con la profundidad de taladros.

**c) Explosivos**

Son productos químicos que encierran un enorme potencial de energía, que bajo la acción de un fulminante u otro estímulo externo reaccionan instantáneamente con gran violencia.

**d) Voladura**

Es un fenómeno físico químico de la mezcla exclusiva que al explosionar rompe un trozo de roca o mineral.

**e) Explotación**

Es el trabajo realizado para extraer el mineral de las labores mineras. Las explotaciones mineras pueden clasificarse genéricamente en dos grandes grupos: subterráneas y a cielo abierto. Existen casos intermedios en los que se combinan o coexisten técnicas propias de cada uno de los grupos y se dice que son explotaciones mixtas.

**f) 6. Subterráneo**

Es la excavación natural o artificial hechas por el hombre debajo de la superficie de la tierra.



**g) 7. Frente**

Es un lugar donde se sitúa el personal y la máquina perforadora para realizar una labor, crucero o galería mediante perforación y voladura.

**h) Parámetros**

Se denomina así a los diversos rangos obtenidos en la práctica, a través de la observación en el lugar de trabajo (param.).

**i) Burden**

Distancia desde el barrenado al frente libre de la roca, medida perpendicular al eje del taladro.

También denominado piedra, o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura.

**j) Arranque**

Son taladros perforados y cargados; además de ser los primeros en ser volados para generar una cara libre.

**k) Factor de carga**

Se dice a la cantidad de explosivo usada para volar un  $m^3$  de roca.

**l) Sensibilidad**

La capacidad del explosivo para moverse a través de la columna explosiva también controla el diámetro crítico en el que el explosivo funcionará correctamente.

**m) Macizo rocoso**

Es una secuencia de bloques y discontinuidades en la matriz de la roca.

**n) Costos de producción mina**



Los costos de operación se definen como aquellos generados en forma continua durante el funcionamiento de una operación minera y están directamente ligados a la producción, pudiéndose categorizarse en costos directos e indirectos.

**o) Costos directos**

Conocidos como costos variables, son los costos primarios en una operación minera en los procesos productivos de perforación, voladura, carguío y acarreo y actividades auxiliares de mina, definiéndose esto en los costos de personal de producción, materiales e insumos, equipos.

**p) Costos indirectos**

Conocidos como costos fijos, son gastos que se consideran independiente de la producción. Este tipo de costos puede variar en función del nivel de producción proyectado, pero no directamente con la producción obtenida.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DISEÑO METODOLÓGICO

Según las características del estudio de investigación es de tipo descriptivo, se refiere a la minimización de costos de perforación y voladura en Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa

La metodología para desarrollar el presente estudio de investigación ha consistido en su primera etapa en realizar la evaluación de todo el proceso de perforación y voladura anterior, en donde se ha analizado la malla de perforación considerando el Burden, espaciamiento, número de taladros, tipo de roca, equipos y la carga explosiva utilizada. Los datos se han recopilado en sus respectivas fichas de control.

El tiempo de muestreo se ha realizado en un período de 12 días, equivalente a 24 guardias. En el estudio de investigación se ha planteado el rediseño de la malla de perforación según las características de la roca, estas pruebas se han realizado durante 12 días, equivalente a 24 guardias, en dicho periodo se ha evaluado el número de taladros, espaciamiento, burden, tipo de roca y la cantidad de explosivos a utilizar.

Para alcanzar los resultados requeridos se ha realizado el análisis de los costos de perforación y voladura anterior y actual en Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

#### 3.2 POBLACIÓN

La población para el presente estudio de investigación está constituida por las Galerías Santa Eulalia y Santa Mónica, desarrollados en roca semidura de una densidad promedio de  $2,65 \text{ TM/m}^3$ , en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

### 3.3 MUESTRA

La muestra consta de la galería Santa Mónica con una sección transversal de 3,00 metros. x 2,80 metros y una longitud proyectada de 380 m desarrollados en la unidad minera Esperanza de Arequipa en roca semidura con una densidad promedio de 2,65 TM/m<sup>3</sup>.

### 3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.4.1 Variable independiente

Rediseño de malla de perforación y factor de carga explosiva en la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa

#### 3.4.2 Variable dependiente

Costos de perforación y voladura en la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

**Tabla 2 Instrumentación de variables**

VARIABLES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
<b>Variable independiente:</b>		
Rediseño de malla de perforación y factor de carga explosiva en la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza - Arequipa.	• “Tipo de roca	• Dura, semidura, suave
	• N° de taladros	• Ft/perforados
	• Espaciamiento	• m
	• Burden	• m
	• Factor de carga” <sup>a</sup>	• Kg/Tm
<b>Variable dependiente</b>		
Costos de perforación y voladura en la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa	• Costos de brocas	• US\$/Tm
	• Costo de barrenos	• US\$/Tm
	• Costo de herramientas	• US\$/Tm
	• Costo de explosivos	• US\$/Tm
	• Costo de accesorios	• US\$/Tm

*Nota.* Fuente: <sup>a</sup> Ramos Turpo, (2018)



### **3.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Es muy importante determinar que técnicas se utilizarán para la recolección de datos, en este caso el análisis estadístico y porcentual, la observación del disparo y el grado de fragmentación, y el método de explotación utilizado en la mina.

#### **3.5.1 Instrumentos de recolección de datos**

Las herramientas utilizadas para los estudios de investigación son las liquidaciones mensuales, los informes de trabajo diarios, los informes de trabajo mensuales y las fotografías de las evaluaciones de perforación y voladura.

##### **1. Reporte diario de operación.**

- Avances lineales
- Consumo de explosivos
- Accesorios de voladura
- Granulometría(Ramos Turpo, 2018)
- Número de taladros disparados

##### **2. Reporte mensual de operación.**

- Labor disparada.
- Consumo de total explosivos
- Número de taladros perforados
- Accesorios de voladura
- Número de horas operadas de los equipos.

##### **3. Técnicas para el procesamiento de la información.**

Se aplicarán instrumentos y procedimientos de acuerdo a lo siguiente.

- Cuadros estadísticos.
- Revisión de los datos recopilados
- Control de la eficiencia de perforación y voladura.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La optimización de perforación y voladura se ha realizado en la Galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa. Para el diseño de la malla de perforación se han considerado los siguientes parámetros:

Clasificación de roca	: Semidura
Densidad de roca	: 2.65 t/m <sup>3</sup>
Equipo de perforación	: Stopper RNP
Diámetro del taladro	: 39 mm
Longitud de barreno	: 1.52 m.
Explosivo Semexsa	: 65 %

#### 4.2 PERFORACIÓN EN GALERÍA SANTA MÓNICA.

Para la perforación del frente de la Galería Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza - Arequipa se ha determinado el corte quemado de 06 taladros paralelos, de los cuales 03 taladros son de alivio que constituyen las caras libres para facilitar la voladura.

La perforación se ha realizado con taladros de 5 pies en roca semidura.

#### 4.3 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

##### HIPÓTESIS I

Por medio del rediseño de malla, se optimizará los costos de perforación en la galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

##### 4.3.1 Resultados de costos de perforación en galería Santa Mónica

###### a) Costos de perforación anterior

1) MANO DE OBRA

1US\$ = S/.3.35

**Tabla 3 Mano De Obra**

Mano de obra directa	Número de personal	Jornal en Soles	Costo US\$/disparo
Capataz de mina	01	70	20,89
Perforista	01	70	20,89
Ayudante perforista	01	60	17,91
Bodeguero	01	60	17,91
<b>Sub total</b>			<b>77,60</b>
Leyes sociales	60%		<b>46,56</b>
<b>Total</b>			<b>124,16</b>

Nota. Elaboración Propia

## 2) MÁQUINA PERFORADORA

**Tabla 4 Máquina Perforadora**

Equipo	Costo US \$	Vida útil Pies/perforados	US \$/pie	Pies perforados	US \$/disparo
Máquina Perforadora	5165	120,000	0.043	348	14.96

Nota. Elaboración Propia

## 3) MATERIALES DE PERFORACIÓN

**Tabla 5 Materiales de perforación**

Accesorios	Cantidad	Costo US \$/unidad	Vida útil pp	Pies Perforados	US \$/pie Perforado	US \$/disparo
Barra cónica	1	98	1200	348	0.08	27.84
Broca de 38mm	1	47	400	348	0.12	38.28
<b>TOTAL</b>						<b>66.12</b>

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 6 Otros**

Mangueras y Accesorios	Cantidad	Costo US \$/m	Vida útil (pp)	Pies perforados	US \$/pie Perforado	US \$/disparo
Manguera de ½ pulg.	40 m	1,60	1 100	348	0.05	17.40
Manguera de 1 pulg.	40 m	2,95	1 100	348	0.10	34.80



Aceite de perforación	0.25gal	14,5 \$/gal	1	3,88
<b>TOTAL</b>				<b>55,32</b>

Nota. Elaboración Propia

#### 4) HERRAMIENTAS Y OTROS MATERIALES

**Tabla 7 Herramientas**

Descripción	Medida	Cantidad	Costo US \$/	Vida Útil día	Costo US \$/disp.
Barrerillas	Unidad	1	11,43	70	0,16
Lampas	Unidad	1	13,55	120	0,11
Picos	Unidad	1	13,55	120	0,11
Alambre	kg.	0.25	1.65	1	0,41
Llave stilson N°14	Unidad	1	17,40	360	0.05
Atacador de madera	Unidad	1	2,.80	60	0.05
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>0,89</b>

Nota. Elaboración Propia

#### 5) IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

**Tabla 8 Implementos de seguridad**

Descripción	Medida	Cantidad	Costo US \$/	Vida Útil	Costo US \$/disp.
Protector	Pza	4	13.6	300	0.20
Guantes de cuero	Pza	4	4.75	25	0.76
Correas porta lámpara	Pza	4	5.48	300	0.08
Botas de jebe	Pza	4	21.15	180	0.48
Mamelucos	Pza	4	23.5	180	0.56
Respiradora	Pza	4	22.6	180	0.52
Filtro de respiradores	Pza	4	5.7	15	1,52
Tapón de oídos	Pza	4	2.5	120	0.12
Ropa de jebe	Pza	4	31.85	120	1,08
Lentes de seguridad	Pza	4	10.45	120	0,36
Lámpara de batería	Pza	4	116.2	120	3,88
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>9,72</b>

Nota. Elaboración Propia

$$\text{COSTO TOTAL POR DISPARO} = 1 + 2 + 3 + 4 + 5$$

$$\text{COSTO TOTAL POR DISPARO} = 191,80 \text{ US\$/m}$$

#### b) Costos de perforación optimizada.

##### 1. MANO DE OBRA

$$1\text{US\$} = \text{S}/3.35$$

**Tabla 9 Mano de obra optimizada**

Mano de obra directa	Número de personal	Jornal en Soles	Costo US \$/disparo
Capataz de mina	01	65	19.40
Perforista	01	65	19.40
Ayudante perforista	01	55	16.42
Bodeguero	01	50	14.93
<b>Sub total</b>			<b>70.15</b>
Leyes sociales	60%		<b>42.09</b>
<b>Total</b>			<b>112.24</b>

*Nota.* Elaboración Propia

## 2. MÁQUINA PERFORADORA

**Tabla 10 Maquina perforadora optimizada**

Equipo	Costo US \$	Vida útil Pies/perforados	US \$/pie	Pies perforados	US \$/disparo
Máquina Perforadora	5 120	120,000	0.043	372	15.99

*Nota.* Elaboración Propia

## 3. MATERIALES DE PERFORACIÓN

**Tabla 11 Materiales de perforación optimizada**

Accesorios	Cantidad	Costo US \$/unidad	Vida útil pp	Pies Perforados	US \$/pie Perforados	US \$/disparo
Barra cónica	1	95	1200	372	0.08	29.76
Broca de 38mm	1	45	400	372	0.11	40.92
<b>TOTAL</b>						<b>70.68</b>

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 12 Otros**

Mangueras y Accesorios	Cantidad	Costo US \$/m	Vida útil (pp)	Pies perforados	US \$/pie Perforados	US \$/disparo
Manguera de ½ pulg.	40 m	1.50	1 100	372	0.05	18.60
Manguera de 1 pulg.	40 m	2.85	1 100	372	0.10	37.20
Aceite de perforación	0.25gal	12.5 \$/gal	1			3.12
<b>TOTAL</b>						<b>58.92</b>

*Nota.* Elaboración Propia



#### 4. HERRAMIENTAS Y OTROS MATERIALES

**Tabla 13 herramientas optimizadas**

Descripción	Medida	Cantidad	Costo US \$/	Vida Útil día	Costo US \$/disp.
Barrerillas	Unidad	1	10.35	60	0.17
Lampas	Unidad	1	14.60	120	0.12
Picos	Unidad	1	14.70	120	0.12
Alambre	kg.	0.25	1.50	1	1.60
Llave stilson N°14	Unidad	1	16.60	360	0.05
Atacador de madera	Unidad	1	2.50	60	0.04
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>2.11</b>

*Nota.* Elaboración Propia

#### 5. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

**Tabla 14 Implementos de seguridad Optimizados**

Descripción	Medida	Cantidad	Costo US \$/	Vida Útil	Costo US \$/disp.
Protector	Pza	1	12.9	300	0.05
Guantes de cuero	Pza	1	4.75	25	0.19
Correas porta lámpara	Pza	1	3.7	300	0.03
Botas de jebe	Pza	1	21.15	180	0.12
Mamelucos	Pza	1	23.5	180	0.14
Respiradora	Pza	1	22.6	180	0.15
Filtro de respiradores	Pza	1	5.7	15	0.38
Tapón de oídos	Pza	1	2.5	120	0.03
Ropa de jebe	Pza	1	31.65	120	0.28
Lentes de seguridad	Pza	1	10.45	120	0.09
Lámpara de batería	Pza	1	116.2	120	0.97
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>2.43</b>

**COSTO TOTAL POR DISPARO** = 1 + 2 + 3+ 4+ 5

**COSTO TOTAL POR DISPARO** = 187,41 US\$/m

#### HIPÓTESIS II

Mediante el factor de carga explosiva adecuada se optimizará los costos de voladura en el frente de la Galería Santa Mónica en la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

### 4.3.2 Resultados comparativos de voladura

#### a) Voladura anterior

Los explosivos previamente volados se realizaron sin tener en cuenta el comportamiento del macizo rocoso y el tipo de roca a perforar, utilizándose en mayor proporción los explosivos de Semexsa 65%.

**Tabla 15 Consumo de explosivos anterior**

DESCRIPCIÓN	N° TALADROS	N° DE CART. / TALADROS	TOTAL CARTUCHOS	PESO DEL CARTUCHO	PESO TOTAL KG
ALIVIO	3	0	0		
ARRANQUE	4	6	24	0.081	1.94
1° AYUDA	4	5	20	0.081	1.62
2° AYUDA	4	5	20	0.081	1.62
3° AYUDA	4	5	20	0.081	1.62
AYUDA CUADRADOS	4	5	20	0.081	1.62
CUADRADOS	4	4	16	0.081	1.29
CORONA	7	6	42	0.081	3.40
ARRASTRE	7	6	42	0.081	3.40
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>		<b>204</b>		<b>16.52</b>

*Nota.* Elaboración Propia

#### a) VOLUMEN ROTO

$$V = b \times h \times Lp$$

Donde:

V = Volumen roto (m<sup>3</sup>)

b = Ancho (m)

h = Altura (m)

Lp = Longitud (m)

$$V = 3.0 \times 2.8 \times 1.32$$

$$V = 14.28 \text{ m}^3$$



## b) TONELAJE ROTO

$$TM = V \times dr$$

Donde:

TM = Tonelada métrica de material roto

V = Volumen roto

dr = Densidad de roca

$$TM = 14.28 \times 2.65$$

$$TM = 37.84 \text{ Tm}$$

## c) FACTOR DE CARGA

$$Fc = \frac{Kg\text{-explosivo}}{Volumen\ roto}$$

$$Fc = \frac{16.116 \text{ Kg}}{14.28 \text{ m}^3}$$

$$Fc = 1.13 \text{ kg/m}^3$$

$$Fc = \frac{Kg\text{-explosivo}}{\text{metro lineal}}$$

$$Fc = \frac{16.116}{1.7}$$

$$Fc = 9.48 \text{ KG/M}$$

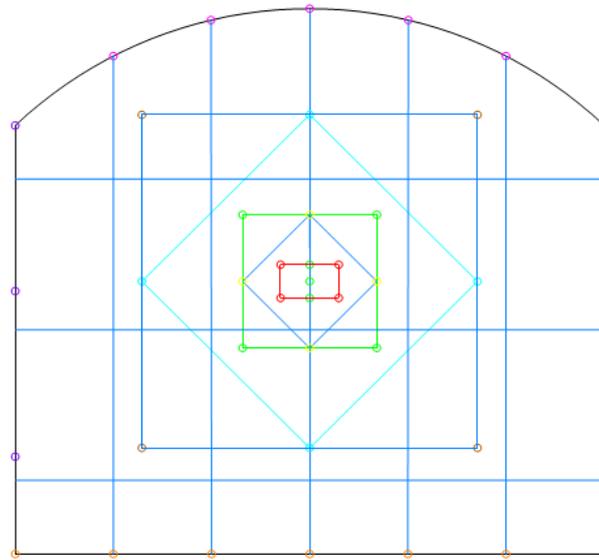
## d) FACTOR DE POTENCIA

$$Fp = \frac{Kg\text{-explosivo}}{Tonelaje\ roto}$$

$$Fp = \frac{16.116 \text{ Kg}}{37.84 \text{ Tm}}$$

$$Fp = 0.425 \text{ kg/Tm}$$

**Figura 1 Malla de perforación anterior**



**Tabla 16 Resultados voladura anterior**

PARÁMETROS	DINAMITA SEMEXSA 65%
KG	16.524
VOLUMEN	14.28
TONELADAS	37.84
FACTOR DE CARGA	1.13
FACTOR DE CARGA LINEAL	9.48

*Nota.* Elaboración Propia

**b) Voladura optimizada en la galería Santa Mónica**

Los explosivos optimizados para voladuras se realizaron de acuerdo a las características del macizo rocoso y tipo de roca de perforación, utilizando un explosivo Semexsa 65%, que fue en una proporción baja calculada.

**Tabla 17 Consumo de explosivos optimizados**

DESCRIPCIÓN	N° TALADROS	N° DE CART. / TALADRO	TOTAL CARTUCHOS	PESO DEL CARTUCHO	PESO TOTAL KG
ALIVIO	3	0	0		
ARRANQUE	3	6	18	0.081	1.45
1° AYUDA	4	5	20	0.081	1.62
2° AYUDA	4	5	20	0.081	1.62
3° AYUDA	4	4	16	0.081	1.29



AYUDA					
CUADRADORES	4	4	16	0.081	1.29
CUADRADORES	6	4	24	0.081	1.94
CORONA	5	5	25	0.081	2.02
ARRASTRE	5	5	25	0.081	2.02
<b>TOTAL</b>	<b>38</b>		<b>164</b>		<b>13.28</b>

Nota. Elaboración Propia

### 1. VOLUMEN ROTO

$$V = b \times h \times Lp$$

Donde:

V = Volumen roto (m<sup>3</sup>)

b = Ancho del tajeo (m)

h = Altura del tajeo(m)

Lp = Longitud del block del tajeo (m)

$$V = 3.0 \times 2.8 \times 1.40$$

$$V = 14.28 \text{ m}^3$$

### 2. TONELAJE ROTO

$$TM = V \times dr$$

Donde:

TM = Tonelada métrica de material roto

V = Volumen roto

dr = Densidad de roca

$$TM = 14.28 \times 2.65$$

$$TM = 37.84 \text{ Tm}$$

### 3. FACTOR DE CARGA

$$Fc = \frac{Kg\text{-explosivo}}{\text{Volumen roto}}$$

$$Fc = \frac{12.95 \text{ Kg}}{14.28 \text{ m}^3}$$

$$F_c = 0.906 \text{ kg/m}^3$$

$$F_c = \frac{\text{Kg-explosivo}}{\text{metro lineal}}$$

$$F_c = \frac{12.95}{1.7}$$

$$F_c = 7.617 \text{ KG/M}$$

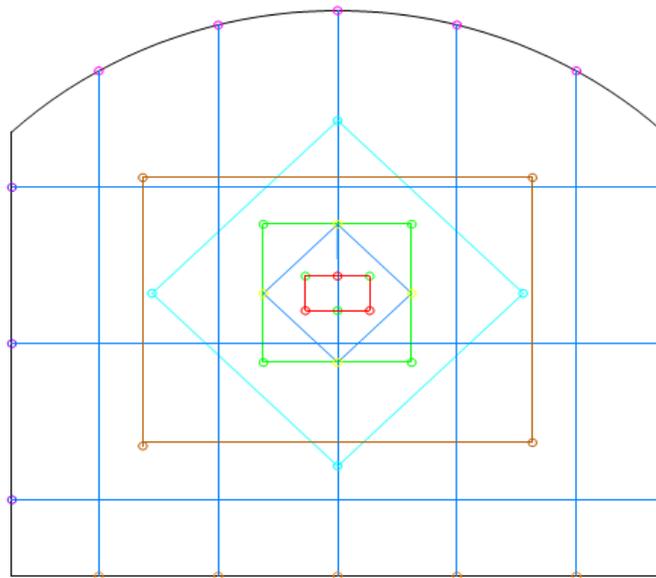
#### 4. FACTOR DE POTENCIA

$$F_p = \frac{\text{Kg-explosivo}}{\text{Tonelaje roto}}$$

$$F_p = \frac{12.95 \text{ Kg}}{37.84 \text{ Tn}}$$

$$F_p = 0.34 \text{ kg/TM}$$

**Figura 2 Malla de perforación Optimizada**



*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 18 Resultados voladura optimizada**

PARÁMETROS	DINAMITA SEMEXSA 65%
KG	12.956
VOLUMEN	14.28
TONELADAS	37.84
FACTOR DE CARGA	1.13
FACTOR DE CARGA LINEAL	9.48

*Nota.* Elaboración Propia



### 4.3.3 Resultados comparativos de costos de voladura

#### a) Costos de voladura anterior

**Tabla 19 Materiales de voladura**

Insumos	Unidad	Precio US \$	Cantidad por disparo	US \$/disparo
Dinamita 65%	Cartucho	0.52	41	21.32
Fulminante N° 8	Cápsula	0.43	10	4.3
Mecha de seguridad	Metros	0.45	50	22.5
<b>COSTO TOTAL</b>				48.1

*Nota.* Elaboración Propia

**COSTO TOTAL POR DISPARO** = 48.1 US\$

**COSTO TOTAL POR METRO** = 36,44 US\$/m

#### b) Costos de voladura optimizada

**Tabla 20 materiales de voladura optimizada**

Insumos	Unidad	Precio US \$	Cantidad por disparo	US \$/disparo
Dinamita 65%	Cartucho	0.52	38	19.76
Fulminante N° 8	Cápsula	0.43	10	4.3
Mecha de seguridad	Metros	0.45	50	22.5
<b>COSTO TOTAL</b>				46.56

*Nota.* Elaboración Propia

**COSTO TOTAL POR DISPARO** = 46.56 US\$

**COSTO TOTAL POR METRO** = 33,25 US\$

## 4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

De acuerdo con el análisis de los resultados de perforación y voladura antes y después de la optimización, es claro que existen diferencias en los parámetros y costos de perforación y voladura en el área de la mina Esperanza, la galería de Santa Mónica en Arequipa.



**Tabla 21 Resumen comparativo perforación y voladura**

<b>Descripción</b>	<b>Antes</b>	<b>Después</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Unidad medida</b>
Taladros perforados	41	38	3	N° de Tal.
Taladros cargados	38	35	3	N° de Tal.
Semexsa 65%	16.524	13.284	3.24	kg
Cordón detonante	40	38	2	m
Fanel	347	312	35	Unidad
Factor de carga	1.17	1.02	0.26	kg/m <sup>3</sup>
Factor de potencia	0.45	0.39	0.06	kg/TM

*Nota.* Elaboración Propia



## V. CONCLUSIONES

Por medio del rediseño de malla, los costos de perforación se han optimizado de 191,80 US \$/m a 187,41 US \$/m, con una diferencia de 4,39 US\$/m, en el frente de la galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.

Mediante el factor de carga explosiva adecuada, los costos de voladura se han optimizado de 36,44 US \$/m a 33,25 US \$/m, con una diferencia de 3,19 US\$/m, en el frente de la galería Santa Mónica de la Unidad Minera Esperanza – Arequipa.



## VI. RECOMENDACIONES

Para optimizar los costos de perforación y voladura de la galería Santa Mónica en la unidad minera Esperanza en Arequipa, se deben cumplir los parámetros del nuevo diseño de la grilla de perforación.

Para realizar voladuras en la Galería Santa Mónica de la unidad minera Esperanza en Arequipa, la voladura debe estar bien delimitada.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS EN MINERÍA*.
- Centro Tecnológico de Voladura EXSA S.A. (2009). *Manual Práctico de Voladura*.
- Instituto de seguridad Minera. (2017, octubre 19). *Perforación minera*.  
<https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/perforacion-minera-tipos-clases-de-maquinaria-y-ubicacion-de-taladros/>
- Llanqui Mamani, S. A. (2019).  
*REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL PROCESO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA MEDIANTE UN NUEVO DISEÑO DE MALLA EN LA MINA CAPITANA DE LA COMPAÑÍA MINERA CARAVELI S.A.C. -AREQUIPA*.  
[UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO].  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12336>
- Pérez Rodríguez, A. G. (2010). *Análisis Comparativo de la Reducción de Vibraciones en la Cantera de Cerro Blanco, durante Voladuras; Utilizando Carga Tradicional de Explosivo y el Uso de Taponex*. ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.
- Ramos Turpo, U. H. (2018). *MINIMIZACIÓN DE COSTOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA MEDIANTE EL REDISEÑO DE MALLA EN EL FRENTE DE LAS CHIMENEAS 905 y 965 EN LABORES CIEGAS DE LA UNIDAD MINERA ESPERANZA-AREQUIPA*. UNA PUNO.
- Cámac T., Alfredo (2005), *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. FIM-UNA. Puno.
- Chambi Flores, Alan (2011), *Optimización de Perforación y Voladura en la Ejecución de la Rampa 740 – Unidad Vincos – Volcán S.A.C.*
- Chahuares Sairitupa, F. (2012), *Nuevo Diseño de Malla para Mejorar la Perforación y Voladura en Proyectos de Explotación y Desarrollo Mina EL COFRE*.
- EXSA (2001), *Manual Práctico de Voladura, Edición Especial*, Perú.
- Frisancho Triveño, Giovanni (2006), *Diseño de Mallas de Perforación en*



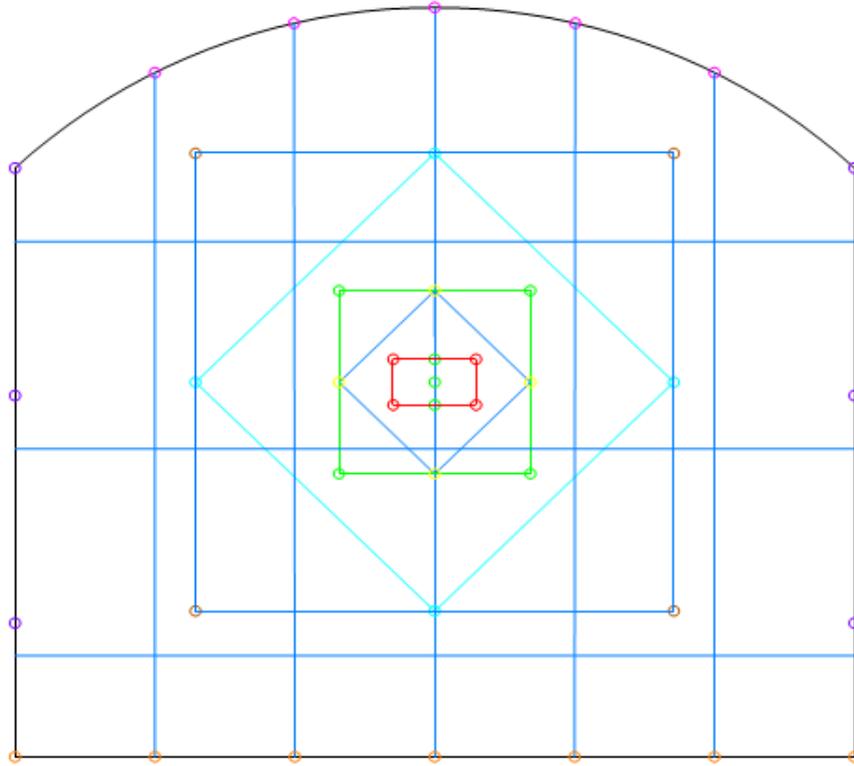
*Minería Subterránea”*

- Famesa Explosivos, (2008, *Seguridad asociada a la manipulación y uso de explosivos en mina subterránea.*
- Jáuregui Aquino, Alberto (2009), Tesis, *Reducción de costos operativos en mina mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de Perforación y Voladura”*. Presentada a la Facultad de Ciencias Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Laricano Flores, Ernesto (1995), *Optimización de Costos en las Labores de Desarrollo Minera Pachapaqui S.A.*
- López Jimeno C., (1994), *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*, Instituto Geológico y Minero España. Edición 1994.
- López Jimeno, Carlos (1997), *Manuel de Túneles y Obras Subterráneas Madrid*, Gráficas Arias Montano.
- Lupaca Marca, J. (2009), *Costos en Operaciones Mineras Unitarias Subterráneas.*
- Mamani Pacoricona, Nilthon (2015), en su tesis *Optimización de Costos de perforación y voladura en la mina Maribel de Oro A-Ananea*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno.
- Mendoza Juan (2006), *Perforación y voladura*, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Rodríguez Velásquez, Roger Hernán (2011), *Mejoramiento de Operaciones Unitarias en Labores de Desarrollo en Minería Subterránea Unidad Minera EL COFRE.*
- Suasaca Grande, Yubert (2014), en su tesis *Análisis de costos operativos para optimizar la Perforación y Voladura en la Unidad Minera EL COFRE*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno.



## ANEXOS

### ANEXO 1: Malla anterior



### ANEXO 2: Malla Optimizada

