

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



**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE  
FRENTE APLICANDO EL MODELO MATEMÁTICO DE ROGER HOLMBERG.**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**GONZALO BARRIOS QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS.**

**PUNO – PERÚ**

**2019**



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

**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y  
VOLADURA DE FRENTE APLICANDO EL MODELO  
MATEMÁTICO DE ROGER HOLMBERG.**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**GONZALO BARRIOS QUISPE**

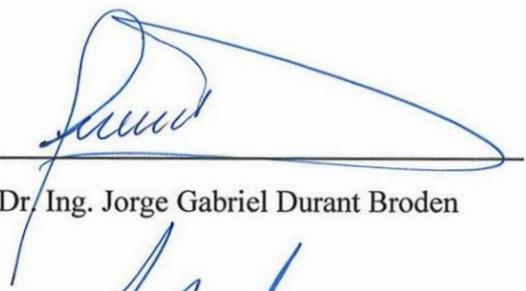
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS.**

**APROBADO POR:**

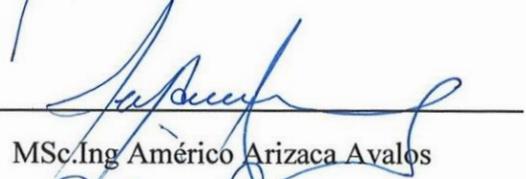
**PRESIDENTE**

:

  
Dr. Ing. Jorge Gabriel Durant Broden

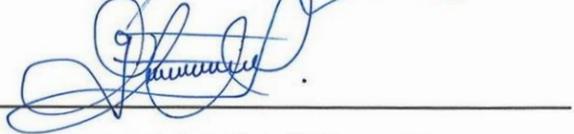
**PRIMER MIEMBRO**

:

  
MSc. Ing. Américo Arizaca Avalos

**SEGUNDO MIEMBRO**

:

  
Ing. Gabriela Mistral Riveros Mendoza

TEMA: Análisis de costos.

ÁREA: Ingeniería de minas.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 14 de noviembre del 2019.

## **DEDICATORIA.**

A mis padres Román y María por su apoyo incondicional.

A todos mis familiares más cercanos.

A todos ustedes es una gran satisfacción dedicarles este trabajo, con mucho amor y sobre todo mucha alegría que es el reflejo de mi esfuerzo de muchas horas de investigación, este trabajo es la evidencia de la muestra de mi amor y cariño hacia ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano por haberme dado cobijo todos estos años e hizo posible mi formación académica.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de Minas de la universidad Nacional del Altiplano y sus docentes, por el apoyo en este proceso de titulación.

Al ingeniero Armando Valeriano Valeriano, gerente general de la empresa CIMAFEJ S.A.C., por las facilidades brindadas para la ejecución del presente trabajo.

Al ingeniero Mamani Quispe Mauro Lelis, por compartirme sus experiencias, conocimientos y sobre todo por ser mi mentor.

A mis padres por su apoyo incondicional.

**ÍNDICE GENERAL****DEDICATORIA****AGRADECIMIENTOS**

<b>TÍTULO.....</b>	<b>9</b>
<b>AUTORES, AFILIACIÓN Y DIRECCIÓN INSTITUCIONAL.....</b>	<b>9</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>20</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>22</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sección de un túnel de acuerdo Holmberg.....	<b>14</b>
<b>Figura 2:</b> Esquema del primer Sección de un túnel de acuerdo Holmberg., segundo y tercer cuadrante para el cálculo de la carga explosiva.....	<b>15</b>
<b>Figura 3:</b> Malla de perforación optimizada para frente de 3.5 x 2.5 metros.....	<b>18</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resumen de ecuaciones de cálculo de la malla.....	<b>15</b>
<b>Tabla 2:</b> Coeficiente o factor de la roca.....	<b>16</b>
<b>Tabla 3:</b> Parámetros usados en la perforación y voladura.....	<b>17</b>
<b>Tabla 4:</b> Burden y espaciamiento optimizados mediante las fórmulas de Holmberg	<b>17</b>
<b>Tabla 5:</b> Distribución de taladros en la malla de perforación y voladura.....	<b>18</b>
<b>Tabla 6:</b> Cuadro comparativo de la distribución de la carga en las mallas anterior y la propuesta.....	<b>19</b>
<b>Tabla 7:</b> Datos de voladura.....	<b>19</b>
<b>Tabla 8:</b> Datos, factores de perforación y voladura.....	<b>19</b>
<b>Tabla 9:</b> Resumen de costos, comparando la malla anterior y la propuesta.....	<b>20</b>

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

<b>Au</b>	Oro
<b>Cu</b>	Cobre
<b>GSI</b>	Índice De Resistencia Geológica
<b>Hr</b>	Horas
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Km</b>	Kilometro
<b>M</b>	Metro
<b>M3</b>	Metro Cubico
<b>NW</b>	Noroeste
<b>O</b>	Oeste
<b>RQD</b>	Rock Quality Designation
<b>RMR</b>	Rock Mass Rating
<b>S</b>	Sur
<b>Tal.</b>	Taladros
<b>TM</b>	Tonelada métrica
<b>US\$</b>	Dólares

**Optimización del diseño de malla de perforación y voladura de frentes  
aplicando el modelo matemático de Roger Holmberg.**

**Optimization of the design of drilling mesh and blasting of fronts applying the  
mathematical model of Roger Holmberg.**

*Bach. Gonzalo, Barrios-Quispe*

**barriosgonzalo147@gmail.com, 930666163.**

**Facultad de Ingeniería de Minas, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Universidad  
Nacional del altiplano – Puno.**

**Av. Sesquicentenario N°1051**

**RESUMEN:**

El presente trabajo de investigación presenta un análisis sobre la optimización de costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg. Se hizo en la empresa CIMAFEJ S.A.C. - Corporación Minera Ananea S.A.”, la investigación fue realizada en el periodo de setiembre-octubre del 2019. Tiene como objetivo evaluar la factibilidad de aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg, para la optimización de los costos operativos de la perforación y voladura en la empresa CIMAFEJ S.A.C. El método empleado para la obtención de datos y resultados fue mediante la toma de información de los parámetros de perforación y varadura anterior, luego se procede a realizar los cálculos del modelo matemático para su aplicación, finalmente se realiza una comparación entre la malla de perforación anterior y la propuesta con la finalidad de determinar el porcentaje de mejora al aplicar el modelo matemático. En los resultados se logró reducir el costo total de 225.06 a 197.47 US\$/m, por la simplicidad de los cálculos de datos necesarios para el cálculo, se llegó a la conclusión de que si es factible la implementación de la malla de perforación propuesta.

**Palabras clave:** Costos, reducción, tiempos, utilidades, rendimiento.

**ABSTRACT**

This research paper presents an analysis on the optimization of drilling and blasting costs through the application of Roger Holmberg's mathematical model. It was made in the company CIMAFEJ S.A.C. - Corporación Minera Ananea SA”, the investigation was carried out during the September-October period of 2019. It aims to evaluate the feasibility of applying Roger Holmberg's mathematical model, for the optimization of the drilling and blasting operating costs in the company CIMAFEJ SAC The method used to obtain data and results was by taking data from the previous drilling and vapping parameters, then proceeding to perform the calculations of the mathematical model for its application, finally a comparison is made between the previous drilling mesh and the proposal with the purpose of determining the percentage of improvement when applying the mathematical model. In the results it was possible to reduce the total cost from 225.06 to 197.47 US \$ / m, due to the simplicity of the data calculations necessary for the calculation, it was concluded that if the implementation of the proposed drilling mesh is feasible.

**Keywords:** Costs, reduction, times, profits, performance.

## 1. INTRODUCCIÓN:

Actualmente el avance de la tecnología, la implementación de nuevas leyes y nuevos estándares nos demanda la ejecución de una minería moderna y responsable, con técnicas y procesos de vanguardia como nuevos algoritmos y modelos matemáticos para la optimización de las operaciones unitarias de perforación y voladura, La implementación y aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg, brinda la posibilidad de la estandarización de las mallas de perforación y voladura, y como resultado la reducción de costos operativos de la operación.

Actualmente en muchas unidades mineras en el Perú, no estandarizan sus procesos por ejemplo, la Compañía Buenaventura, unidad Mina Socorro – Uchucchacua no cuenta con una malla de perforación estandarizada por lo tanto generalmente este diseño es realizado en base al criterio y experiencia del maestro perforista (Correa-Namoc & Iparraguirre-Tandaypan, 2016)

No contar con estandarización de mallas acarrea muchos problemas, Correa-Namoc & Iparraguirre-Tandaypan, (2016) menciona que estos problemas son: “Incumplimiento del avance, programado, deficiencias en la perforación, inadecuada columna explosiva, sobrerotura de sección, costos.

Actualmente muchas unidades mineras aun utilizan métodos empíricos para el cálculo de número de taladros, el espaciamiento y burden

son realizados de acuerdo al criterio y la experiencia del perforista.(Vidal-Martínez & Correa-Ayala, 2017)

Muchos investigadores experimentan con nuevos modelos matemáticos para poder optimizar la perforación y voladura mediante cálculos, algunos ya propuestos son: Roger Holmberg, Langefors, la teoría de la cominución, etc.

Los modelos matemáticos son una alternativa matemática para la optimización y estandarización de procesos. La aplicación de estos modelos se materializa en mejores resultados.

Gago-Orma, (2018) dice que “la disminución del número de taladros en las nuevas mallas de perforación influye positivamente en la reducción de costos, ya que al tener menos taladros se realiza menos perforación, se emplea menos explosivos y por lo tanto menos horas hombre tanto en perforación como a la hora del carguío.

Una inadecuada perforación y voladura da como resultado una mala granulométrica, sobreperforación y daño a las cajas, esto acarrea al aumento de los costos en carguío, acarreo, molienda y sostenimiento.

### 1.1. Antecedentes

Respecto a los estudios realizados en el tema de diseño de malla de perforación mediante la aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg, se presentan los siguientes:

De La Cruz-Graus, (2018), buscó el desarrollo del mejoramiento de la malla de voladura aplicando el modelo de Holmberg. El método usado fue de recolección de datos y aplicación del modelo matemático. Concluye que el diseño de malla propuesto, tiene una mayor eficiencia por disparo de 1.51 m. a 1.59 m. por lo cual el rendimiento es mucho mayor.

Quezada-Jacobo, (2017), da a conocer que en su operación el rendimiento por disparo es bajo esto porque se registran gran cantidad de disparos fallados. El método que aplica es el modelo matemático de Roger Holmberg. Concluye que: Que la aplicación del modelo en el diseño de malla de perforación permite optimizar el factor de potencia a 0.83 Kg/Tn por disparo debido a la disminución de la cantidad de taladros y cantidad de explosivo usados.

Santana-Orellana, (2014), realiza una integración de dos modelos matemáticos el de Roger Holmberg y el cuadro de parámetros geomecánicos de LILLY con parámetros geomecánicos del RMR. Para a optimización de la malla de perforación. Concluye que: Con la aplicación del modelo matemático se logró reducir el factor de carga de un 3.54 kg/m<sup>3</sup> a un 3.36 kg/m<sup>3</sup>, además menciona que el ahorro es de 99.52 US\$/disparo.

Gago-Orna, (2019), menciona que cuenta con estándares establecidos en lo que respecta a perforación y voladura, y a pesar de ello, se tienen problemas latentes en costos de voladura y en deficiencia de avances, por lo tanto,

optimiza estas mediante cálculos. Concluye que: se consiguió disminuir el factor de carga de 2.21 a 2.00 kg/m<sup>3</sup>, además de reducir el costo por metro avanzado de 232.68 a 218.88 US\$/m. y reducir los tiempos de ejecución de 3.09 a 2.90 hr/frente.

Quispe-Cáceres,(2018), menciona que en el frente se tenía deficiencias en perforación y voladura obteniéndose mayor tiempo de perforación, una longitud de carga inadecuada y mayor consumo de explosivos para ello calcula un nuevo diseño de malla de perforación mediante algoritmos y modelos matemáticos. Concluye que: Se redujo el costo total por disparo de 491.80 a 464.82 US\$/ml.

Vidal-Martínez & Correa-Ayala, (2017), tiene como objetivo la aplicación del modelo matemático de Holmberg para mejorar la perforación y voladura. Concluye que: El uso del modelo Matemático permitió mejorar el factor de avance que inicialmente era de 24.83 a 22.55 Kg/m. una buena eficiencia de voladura.

Choque-Velarde, (2017), tiene como objetivo reducir las incidencias de voladuras deficientes, evitar tiempos muertos en el ciclo de minado. Para ello usa un conjunto de fórmulas y reglas practicas facilitados por Exsa soluciones. Concluye que: Con el nuevo diseño de perforación se logró reducir las estadísticas en incidentes de voladuras deficientes de: 61 a 4 reportes/mes en promedio, Se optimiza la

eficiencia de voladura de 2.33 a de 2.97 m/disparo.

Luciano-Lazaro, (2019), tiene por objetivo realizar el diseño de la malla de perforación y voladura, aplicando el método Holmberg, para optimizar costos en la construcción. Para ello realiza una recolección de datos de campo para luego aplicarlos en el modelo matemático. Concluye que: Al aplicar el modelo matemático demostró que si se puede involucrar la variable geomecánica (RMR, GSI O RQD) en las ecuaciones de diseño de mallas de perforación y voladura. Además, se redujo el costo operativo de 232,80 US\$/hora a 225.32 US\$/hora.

Correa-Namoc & Iparraguirre-Tandaypan, (2016), tiene como objetivo probar que es factible reducir costos operativos, a través de la estandarización de malla de perforación y voladura. Para ello se buscó los antecedentes de estas labores, como reportes diarios de perforación, vales de pedido de explosivos, entre otros. Luego hizo una comparación entre todas. Concluye que: Con la estandarización de las mallas de perforación se logró reducir los costos anuales de 927.2 a 290 260.8 \$/año.

Rivera-Huirse, (2019), tiene como su objetivo principal optimizar las operaciones de perforación y voladura, Para la optimización uso el modelo matemático de Holmberg. Concluye que: Con el nuevo diseño de malla de perforación y voladura implementado en el proyecto hidroeléctrico se logra reducir el

factor de carga explosiva de 3.47 Kg/m<sup>3</sup> a 2.52 Kg/m<sup>3</sup>, obteniendo una voladura controlada.

## 1.2. Importancia de la investigación

La importancia de la investigación radica en que después del seguimiento y análisis de datos de la perforación y voladura se concluyó que se están teniendo pérdidas en consumo de aceros y explosivos, bajo rendimiento, sobre rotura y una alta incidencia en disparos fallados, por lo tanto se propone un nuevo diseño de malla de perforación y voladura diseñada mediante el modelo matemático de Roger Holmberg, además que en muchas empresas mineras aún se realizan empíricamente en base al criterio y experiencia del perforista.

## 1.3.Hipótesis general

Es factible la aplicación e implementación del modelo matemático de Holmberg a la perforación y voladura para la optimización de los costos, tiempos y rendimiento de las operaciones unitarias en la empresa CIMAFEJ S.A.C.

## 1.4.Hipótesis específicas

Se reduce el número de taladros de la malla de perforación mediante la aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg.

Se reduce los tiempos de la perforación mediante la aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg.

### 1.5. Objetivo

Evaluar la factibilidad de aplicación del modelo matemático de Roger Holmberg, para la optimización de los costos operativos de la perforación y voladura en la empresa CIMAFEJ S.A.C.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación

La empresa CIMAFEJ.S.A.C. está ubicado en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno. Se encuentra en estas coordenadas 14°37'54"S 69°26'47"O.

#### Concesión.

Datos Generales

- Código : 13006374x01.
- Nombre : Ana María Nivel 01.
- Fecha de Formulación: 18/12/1972.
- Situación : Vigente.
- Tipo : Denuncio
- Has. Formuladas : 152.00.
- Sustancia : Metálica.
- Ubicación : Región puno desde  
el 11/04/2008.

### 2.2. Acceso.

El medio de transporte más usado para poder acceder a la mina es por vía terrestre.

Una distancia de 209 km de Puno – Ananea.

### 2.3. Geografía

Dentro de las concesiones y minas de la corporación se encuentran los siguientes grupos geológicos:

- Formación Sandía
- Formación Ananea
- Formación Arco Aja

### 2.4. Geología local.

Las operaciones mineras de la Corporación Minera Ananea, están emplazadas en estructuras de vetas de cuarzo mineralizadas en forma de mantos, los mantos son de cuarzo ahumado grisáceo con presencia de pirita, arsenopirita, pirrotita, galena sulfuros de Cu y fundamentalmente Oro en diferentes tamaños (microscópicos y en forma de “charpas”), estos mantos están encajados en pizarras intercaladas con cuarcitas silificadas, la potencia promedio de los mantos es de 4 cm. Presentándose en fajas delgadas, y en algunos tramos milimétricos, con una mineralización discontinua.

Los mantos son de origen hidrotermal, habiendo sido guía las cuarcitas durante el ascenso de los flujos mineralizantes, (Quispe-Cáceres, 2018).

### 2.5. Metodología del estudio

La presente investigación es del tipo cuasi experimental. Porque se aplicará el modelo matemático de Holmberg, para la optimización de la malla de perforación y voladura.

### 2.6. Diseño Metodológico

Población y Muestra

- a) **Población** : Frentes de preparación de la Empresa CIMAFEJ S.A.C.

- b) **Muestra** : Frente crucero 8550  
NW 3.5 m. x 2.50 m.

## 2.7. Técnicas y procedimientos de recolección de datos

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos, tesis y otros, sobre la aplicación del modelo matemático de Holmberg en diferentes unidades mineras.

Revisión de los catálogos de fabricantes de explosivos nacionales y extranjeros.

Se realizó una toma de datos de campo para detallar los parámetros actuales de la perforación y voladura.

Los datos técnicos de los equipos y explosivos fueron proporcionados por la empresa.

## 2.8. Materiales y equipos a utilizar

Laptop, repositorios virtuales, software office, software Mendeley, cámaras fotográficas y otros

## 2.9. Modelo Matemático de Roger Holmberg

Al aplicar las fórmulas correspondientes del modelo matemático de obtendrá resultados como el burden practico, espaciamiento entre taladros, numero de taladros c/s carga, densidad de carga lineal y masa explosiva por taladro.

Roger Holmberg en su modelo matemático, para facilitar el cálculo de la malla de perforación, divide el frente en 5 secciones, (Quispe-Cáceres, 2018).

Estas son las siguientes:

- A. sección de corte (cut)
- B. sección de tajeo (stopping section)
- C. sección de "alza" (stopping)
- D. sección de contorno (contour)
- E. sección de arrastre (lifters)

Sección de un túnel de acuerdo Holmberg.

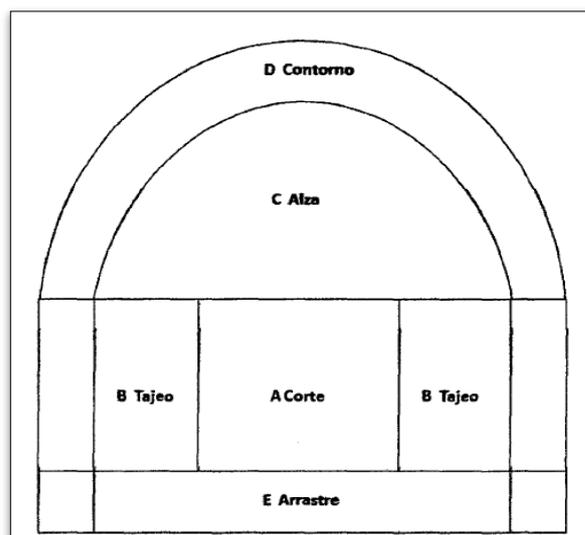


Figura 1: Sección de un túnel de acuerdo Holmberg.

Fuente: manual práctico EXSA

Para que una voladura resulte correctamente lo primero y más importante es crear una cara libre adecuada.

Los cálculos de carga explosiva en base al modelo, se llevan a cabo mediante el siguiente algoritmo:

- Cálculo para determinar el avance
- Cálculo del cut o corte.
  - Primer cuadrante.
  - Segundo cuadrante.
  - Tercer cuadrante
- Cálculo de arrastres.
- Cálculo de taladros de contorno (piso).
- Cálculo de taladros de contorno (paredes).

- Cálculo de zonas de tajeo (stopping).

Esquema del primer, segundo y tercer cuadrante para el cálculo de la carga explosiva.

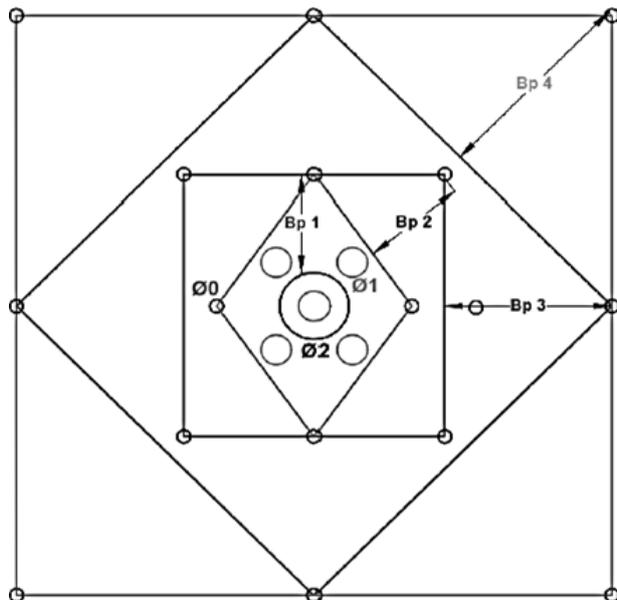


Figura 2: Esquema del primer, segundo y tercer cuadrante para el cálculo de la carga explosiva.

Fuente: manual práctico EXSA

**2.9.1. Fórmulas a usa para el cálculo.**

Algunas de estas fórmulas están propuestas por Roger Holmberg, se usará algunas reglas prácticas para el cálculo.

- El cálculo del diámetro equivalente se realiza con la ecuación

$$\phi_2 = \phi_1 * \sqrt{N}$$

$\phi_2$  : Diámetro equivalente

$\phi_1$  : Diámetro de los taladros de alivio

N : Número de taladros de alivio

El diámetro equivalente es aquel que se genera al fusionar todos los taladros de alivio y se considera como si fuera un solo taladro de alivio.

- Longitud de taladro, según diámetro equivalente " $\phi_2$ ".

$$L = 0.15 + 34.1\phi_2 - 39.4(\phi_2)^2$$

Donde:

L : Longitud de taladro con respecto al diámetro equivalente

$\phi_2$  : Diámetro equivalente

A este resultado se tiene que castigar con solo el 95% de eficiencia de perforación según Roger Holmberg.

- Cálculo longitud de avance requerido por disparo "L".

$$L = 0.95 * H_{\text{Longitud de barra efectiva}}$$

Donde:

L : Longitud de taladro requerido

H : Longitud de barra efectiva

- Cálculo del burden y espaciamiento.

Se usaron las siguientes formulas:

Tabla 1: Resumen de ecuaciones de cálculo de la malla

Sección	Burden (b)	Espaciamiento(s)
Primer cuadrante	$B_1 = 2.5 * \phi_e$	$X_1 = \sqrt{2} * B_1$
Segundo cuadrante	$B_2 = \frac{\sqrt{2} * B_1 + 2 * x_1}{2}$	$X_2 = \sqrt{2} * B_2 * 1.5$
Cuadradores	$B_c = 0.012 \left[ \frac{2\rho_c}{P_r} + 0.5 \right] \phi_c - e$	$E_c = 2.9 * b_c$
Techo	$B_t = 0.012 \left[ \frac{2\rho_c}{P_r} + 1.25 \right] \phi_c - e$	$E_t = 1.25 * b_t$
Paredes	$B_p = 0.012 \left[ \frac{2\rho_c}{P_r} + 1.13 \right] \phi_c - e$	$E_p = 1 * b_p$
Piso	$B_s = 0.012 \left[ \frac{2\rho_c}{P_r} + 0.85 \right] \phi_c - e$	$E_s = 1.1 * b_s$

Fuente: Manual práctico EXSA

- Número de taladros

$$N^{\circ} Tal = \left( \frac{P}{dt} \right) + (k * s)$$

$$P = 4\sqrt{s}$$

Dónde:

N° Tal.: Número de taladros.

P : Perímetro de la sección de la galería, en m.

dt : Distancia entre los taladros.

k : Coeficiente o factor de la roca.

s : Sección de la galería, en m<sup>2</sup>.

Tabla 2: Coeficiente o factor de la roca

Tipo de roca	dt	k
Blanda	0.7	1
Semi dura	0.6	1.5
Dura	0.5	2

Fuente: Manual práctico EXSA

• **Número de cartuchos por taladro**

$$N^{\circ} \text{ Cartuchos} = \frac{2/3 * L}{Le * 0.8}$$

Dónde:

Nc : Total de cartuchos por taladro (unidad)

L : Longitud del taladro perforado (m)

Le : Longitud de explosivo o cartucho (m)

• **Densidad**

$$D = \frac{m}{V}$$

Dónde:

M : Masa, en g.

V : Volumen, en cc.

• **Movimiento de roca.**

$$Volumen (V) = S * L$$

Dónde:

V : Volumen de la roca

S : Dimensión de la sección, en m<sup>2</sup>

L : Longitud de taladros, en m.

• **Cantidad de carga**

$$Q_T = V * \frac{kg}{m^2}$$

Dónde:

V : Volumen estimado, en m<sup>3</sup>

Kg/m<sup>2</sup> : Carga por m<sup>2</sup>

• **Carga promedio por taladro.**

$$Q_t = N^{\circ} \text{ Tal}$$

Dónde:

Qt : Carga total de explosivo, en kg

N° Tal : Número de taladros

• **Distribución de la carga por taladros.**

Normalmente la longitud de la columna explosiva varía de 1/2 a 2/3 de la longitud total del taladro (1,20 a 1,60 m en este caso), con la carga concentrada al fondo.

Para asegurar el corte de arranque es recomendable cargar los taladros de arranque 1,3 a 1,6 veces el promedio calculado, las ayudas 1,1 vez y disminuir proporcionalmente la carga en el resto de taladros.

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para mostrar los resultados de la aplicación del modelo matemático primeramente se muestra los datos de campo y parámetros usados en la perforación y voladura anterior.

La zona en la cual se realizó el estudio se encuentra en el Nivel 4970 (cortada), el macizo

rocoso es de una calidad tipo III (RMR =41-60) medio, las rocas presentes son metamórficas: pizarra y cuarcita.

Primeramente, se procedió a la toma de datos donde se define los parámetros usados en la perforación y voladura.

Tabla 3: Parámetros usados en la perforación y voladura.

Parámetros de malla anterior	Datos	Unidad
Longitud barreno	5	pies
Diámetro de Broca	38	mm
Ancho del frente	3.5	m
Alto del frente	2.5	m
Nº de taladros cargados	44	tal.
Nº de taladros alivio	2	tal.
Avance esperado/disparo	1.52	m
Avance real/disparo	1.30	m
Eficiencia de perforación	90.00	%
Eficiencia de voladura	85.53	%
Densidad de la roca	2.6	Tm/m3

Luego de la toma de datos se procedió al cálculo haciendo uso de las fórmulas mencionadas.

• **Diámetro equivalente**

$$\phi_2 = \phi_1 * \sqrt{N}$$

$$\phi_2 = 0.053$$

• **Longitud de taladro, según diámetro equivalente  $\phi_2$ .**

$$H = 0.15 + 34.12 * \phi - 39.4\phi^2$$

$$H = 1.84 \text{ m}$$

• **Cálculo longitud de avance requerido por disparo "L".**

$$I = 0.95 * H$$

$$L = 1.75 \text{ m}$$

Como se observa el diámetro equivalente de dos taladros de alivio es más que suficiente para barras de 5 pies = 1.52 metros.

• **Resumen cálculo del burden y espaciamiento del arranque de cuatro secciones.**

Luego de la aplicación de las fórmulas planteadas se muestran los resultados obtenidos en la tabla 4. Los espaciamientos y burdenes optimizados.

Tabla 4: Burden y espaciamiento optimizados mediante las fórmulas de Holmberg.

Descripción	Burden	Espaciamiento
Arranque	B1 0.08	E1 0.12
1ra ayuda	B2 0.12	E2 0.26
2da ayuda	B3 0.26	E3 0.56
Subcuadradores	B4 0.56	E4 0.56
Cuadradores	B5 0.65	E5 0.63
Alzas	B6 0.35	E6 0.76
Arrastre	B7 0.41	E7 1.15

Luego de la optimización del burden y el espaciamiento, se graficó la nueva malla de perforación con la nueva distribución de taladros como se muestra en la figura 2.

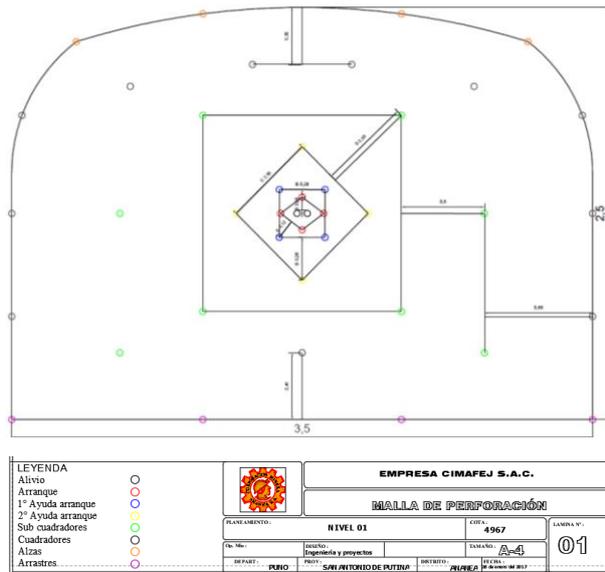


Figura 3: Malla de perforación optimizada para frente de 3.5 x 2.5 metros.

Descripción	Anterior	Propuesta
Alivio	2	2
Arranque	4	4
1° Ayuda arranque	4	4
2° Ayuda arranque	4	4
Sub cuadradores	8	8
Cuadradores	10	11
Sub alzas	3	-
Sub arrastres	4	-
Alzas	3	-
Arrastres	4	-
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>41</b>

- **Número de cartuchos por taladro**

$$N^{\circ} \text{ Cartuchos} = \frac{2/3 * L}{Le * 0.8}$$

Nº cartuchos/taladro = 5.27

Peso del cartucho es 0.081 kg.

- **Distribución de taladros de la malla de perforación.**

Luego de tener datos anteriores y los resultados de la nueva malla de perforación se procede a comparar los parámetros de estas.

Tabla 5: Distribución de taladros en la malla de perforación y voladura.

Como se observa en la tabla 5 existe una diferencia notable en el número de taladros, por lo tanto, los metros a perforar será menor, al contar con una barra de 5 pies o 1.52 metros, los metros perforados por malla será de 62.9 metros a 54.7 metros perforados por disparo.

- **Distribución de la carga explosiva de la malla anterior.**

Los datos mostrados en la tabla 6, son resultado de la toma de datos.

Tabla 6: Cuadro comparativo de la distribución de la carga en las mallas anterior y la propuesta.

Taladros	N° de tal.	Cart./ tal.	Peso de explosivo
Alivio	2	0	0
Arranque	4	7	2.24
1° Ayuda arranque	4	5	1.6
2° Ayuda arranque	4	5	1.6
Sub Cuadradores	8	4	2.56
Cuadradores	10	4	3.2
Sub alzas	4	4	1.28
Sub arrastre	3	4	0.96
Alza	4	4	1.28
Arrastres	3	5	1.2
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>41</b>	<b>15.92</b>

- Distribución de la carga explosiva para la malla propuesta***

Para determinar la diferencia en la distribución de la carga explosiva entre la malla de perforación anterior y propuesta se muestra los resultados en la tabla 7, donde se usa la regla práctica propuesta por el manual de Exsa que consiste en:

Taladros de arranque 1,3 a 1,6 veces el promedio calculado, las ayudas 1,1 vez y disminuir proporcionalmente la carga en el resto de taladros.

*Tabla 7: Datos de voladura.*

Taladros	N° de tal.	Cart./ tal.	Peso explosivo
Alivio	2	0	0
Arranque	4	7	2.22
1° ayuda arranque	4	6	1.88
2° ayuda arranque	4	5	1.71
Sub cuadradores	8	4	2.56
Cuadradores	11	3	3.03
Alzas	4	3	1.02
Arrastre	4	3	1.02
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>32</b>	<b>13.44</b>

- Comparación de parámetros de perforación y voladura.***

*Tabla 8: Datos, factores de perforación y voladura.*

Descripción	Anterior	Propuesta	Unidad
Explosivo por disparo	15.92	13.44	kg
Volumen	11.81	12.43	m3
Avance	1.30	1.42	TM
Factor de carga	1.35	1.08	kg/m3
Factor de potencia	0.52	0.42	kg/TM
Factor de carga lineal	11.8	9.46	kg/ml
Fulminante #° 8	44	39	Unid.
Guía de seguridad	80.46	71.50	m

Los resultados obtenidos con la malla de perforación propuesta en la distribución de

carga son muy buenos, además se observó que en la anterior malla se tenía una sobrerotura del 8 al 10% en promedio y como resultado un aumento considerable del tiempo para la carguío y acarreo. Con la nueva malla de perforación se eliminó la sobrerotura que era muy frecuente en los frentes.

- ***Costos de la malla anterior vs la malla propuesta.***

Luego del análisis de los resultados obtenidos se procede a analizar los costos, para determinar si la mejora es significativa para ser factible la aplicación del modelo matemático.

*Tabla 9: Resumen de costos, comparando la malla anterior y la propuesta.*

<b>Ítem</b>	<b>Anterior</b>	<b>Propuesta</b>	<b>Unidad</b>
Dinamita	94.34	79.64	US\$/m
Fulminante	15.4	13.65	US\$/m
Mecha lenta	30.49	27.17	US\$/m
Máquina perforadora	12.3	11.04	US\$/m
Aire comprimido	33.94	32.48	US\$/m
Barreno	14.66	13.17	US\$/m
Broca	6.43	5.77	US\$/m
Lubricante	1.00	1.00	US\$/m
Mano de obra	16.5	13.54	US\$/m
<b>Total</b>	<b>225.06</b>	<b>197.47</b>	<b>US\$/m</b>

### **3.1. Discusión:**

A partir de los hallazgos encontrados, se confirma la hipótesis planteada.

En otras investigaciones los resultados que obtuvieron:

El tesista Gago-Orna, (2019), “Diseño de malla de perforación y voladura en frentes de avance para reducción de costos y optimización de tiempos en la Compañía Minera San Ignacio de Morococha S.A.A-Unidad San Vicente, Vitoc Junín, 2018”. En una malla estándar de 4.0 m. x 4.0 m. utilizada; logro disminuir la cantidad de taladros de 43 a 38 y el factor de carga de 2.21 kg/m<sup>3</sup> a 2.00 kg/m<sup>3</sup>, se consigue reducir el costo por metro avanzado de 232.68 US\$/m a 218.88 US\$/m. Al reducir el número de taladros se reduce también los tiempos de ejecución ahora es necesario 2.90 hr/frente para ejecutar un frente completo, a diferencia de los 3.09 hr/frente de la malla anterior

El tesista Correa-Namoc & Iparraguirre-Tandaypan, (2016), “Reducción de costos operativos mediante la estandarización de malla de perforación - voladura, para labores horizontales: sección 4.0 m. X 4.0 m., Mina Socorro - Uchucchacua.”. Obtuvo como resultados que el costo total por metro de avance con el diseño anterior era 340 927.2 \$/año; con el diseño propuesto el costo total por metro de avance es de 290 260.8 \$/año.

### **CONCLUSIONES**

Se concluye que, si es factible la aplicación del modelo matemático para la optimización de los costos, Luego de aplicar el modelo matemático de Roger Holmberg se logra reducir el costo total de 225.06 US\$/m a 197.47 US\$/m, se

mejoró la eficiencia de voladura, de 1.30 a 1.42 m/disparo o 85 a 93 % y el porcentaje de sobrerotura fue disminuido considerablemente.

Para futuras investigaciones sobre la aplicación del modelo matemático se recomienda tomar más variables como datos geomecánicas, agregar factores de corrección y compararlos con otros modelos matemáticos para tener el mejor resultado posible.

#### 4. REFERENCIAS

- Choque-Velarde, E. (2017). *Diseño de perforación y voladura por el método Roger Holmberg para reducir las incidencias de voladuras deficientes en CÍA Minera Ares S.A.C. – U.O. Arcata.* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/4654/Choque\\_Velarde\\_Emerson.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/4654/Choque_Velarde_Emerson.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Correa-Namoc, L. J., & Iparraguirre-Tandaypan, L. A. (2016). *Reducción de costos operativos mediante la estandarización de malla de perforación - voladura, para labores horizontales: sección 4.0 m. X 4.0 m., Mina Socorro - Uchucchacua.* (Universidad Nacional de Trujillo sede - Huamachuco). Retrieved from [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5337/CORREA\\_NAMOC%2C\\_LUIS\\_JHONATAN\\_IPARRAGUIRRE\\_TANDAYPAN%2C\\_LUIS\\_ARMANDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/5337/CORREA_NAMOC%2C_LUIS_JHONATAN_IPARRAGUIRRE_TANDAYPAN%2C_LUIS_ARMANDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- De La Cruz-Graus, O. (2018). *Optimización de costos en perforación y voladura estandarizando malla para sección 2.40m x 2.40m en la Empresa Cancer E.I.R.L. – Marsa.* (Universidad Nacional De Trujillo Facultad De Ingeniería). Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3850/MIchmaj056.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gago-Orna, G. W. (2019). *Diseño de malla de perforación y voladura en frentes de avance para reducción de costos y optimización de tiempos en la Compañía Minera San Ignacio de Morococha S.A.A-Unidad San Vicente, Vitoc Junín, 2018* (Universidad Continental). Retrieved from [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6142/2/IV\\_FIN\\_110\\_TE\\_Gago\\_Orna\\_2019.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/6142/2/IV_FIN_110_TE_Gago_Orna_2019.pdf)
- Luciano-Lazaro, C. A. (2019). *Diseño de la malla de perforación y voladura, aplicando el método Holmberg para optimizar costos en la construcción de la rampa (+) 995 de la CIA. Ac. Agregados S.A.C. - 2018* (Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo). Retrieved from [http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/3360/T033\\_70925449\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/3360/T033_70925449_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Quezada-Jacobo, W. U. (2017). *Optimización de perforación y voladura aplicando el modelo matemático de Roger Holmberg en frentes de 3.5m\*3m en roca tipo II veta Papagayo. Mina Poderosa. 2017.* (Universidad Nacional de Trujillo). Retrieved from [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10556/Rivera\\_Huirse\\_Harry\\_Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10556/Rivera_Huirse_Harry_Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Quispe-Cáceres, H. T. (2018). *Reducción de costos de perforación y voladura con nuevo diseño de la malla en el frente cruce 340 nw de la Empresa Minera Yansur S.A.C. - Rinconada* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7666/Quispe\\_Cáceres\\_Hernán\\_Toribio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7666/Quispe_Cáceres_Hernán_Toribio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rivera-Huirse, H. A. (2019). *Optimización de perforación y voladura aplicando el modelo matemático de Roger Holmberg en el proyecto central hidroeléctrica san Gabán iii* (Universidad Nacional Del Altiplano). Retrieved from [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10556/Rivera\\_Huirse\\_Harry\\_Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10556/Rivera_Huirse_Harry_Alex.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Santana-Orellana, L. E. (2014). *Diseño de malla para perforación y voladura de frentes utilizando Modelo Matemático De Holmberg e Índice de Volabilidad de Lylli* (Universidad Nacional Del Centro Del Perú). Retrieved from [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1340/TESIS\\_DISEÑO\\_DE\\_MALLA\\_PARA\\_PERFORACIÓN\\_Y\\_VOLADURA\\_DE\\_FRENTES\\_UTILIZANDO\\_MODELO\\_MATEMÁTICO\\_DE\\_HOLM.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/1340/TESIS_DISEÑO_DE_MALLA_PARA_PERFORACIÓN_Y_VOLADURA_DE_FRENTES_UTILIZANDO_MODELO_MATEMÁTICO_DE_HOLM.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vidal-Martínez, C. P., & Correa-Ayala, I. G. (2017). *Modelo matemático de Holmberg para mejorar la perforación y voladura en la zona alta de la Compañía Minera Lincuna s.a – 2017* (Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo). Retrieved from [http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2137/T033\\_46138891\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2137/T033_46138891_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)