

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Tierra

Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar la granulometría del material volado en la Concesión Minera Cerro Grande,
Durán

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Hugo Michael Moncayo Bermúdez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi madre Tanía Bermúdez por su estímulo, quienes han sido una fuente de inspiración para esforzarme a diario y hacerme sentir que podía con todo y que tenía la facultad de dedicarme a lo que quisiera con tal de que me hiciera feliz.

A mis hermanos Hugo, María de los Ángeles y Belén por su motivación, comprensión y fortaleza brindada durante toda mi vida y carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con amor infinito a Dios, por ser mi roca y fortaleza.

Agradezco a mi tutora y a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería en y Ciencias de la Tierra quienes me han impartido su conocimiento a lo largo mi preparación académica, quienes con su paciencia y rectitud han logrado dotarme de sus aprendizajes.

Al personal que labora en La concesión minera Cerro Grande S.A del cantón Durán, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de esta tesis.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Hugo Michael Moncayo Bermúdez y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Moncayo', with a long horizontal stroke extending to the right.

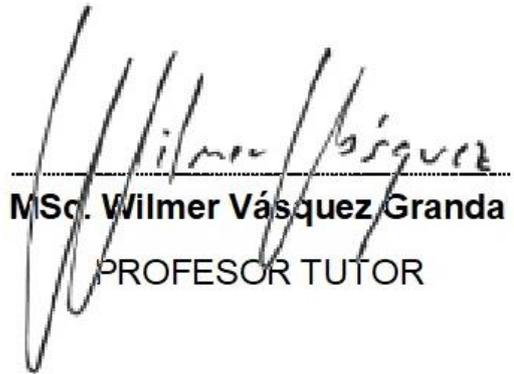
Hugo Moncayo Bermúdez

EVALUADORES



Ph.D Samantha Jiménez Oyola

PROFESOR DE LA MATERIA



MSc. Wilmer Vásquez Granda

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El proceso de perforación y voladura de las rocas se realiza con la finalidad de efectuar la apertura de huecos con la distribución y geometría adecuada dentro de los macizos rocosos, permitiendo una buena fragmentación. El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el proceso de perforación y voladura en la concesión minera Cerro Grande, ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, mediante la modificación de los parámetros geométricos de la malla de perforación, con la finalidad de mejorar la fragmentación de la roca, debido a que, en la actualidad, se está teniendo un bajo rendimiento de carga y acarreo por la presencia bloques naturales. Para este propósito, se aplicó una metodología observacional y experimental, donde se identificó y precisó los parámetros geométricos, geo-mecánicos y operativos en el proceso de voladura, lo que involucró el análisis de la malla de perforación actual. Se emplearon tres diámetros de perforación diferente, generando tres curvas granulométricas y analizando la influencia que tiene en los parámetros operacionales para establecer una nueva malla de perforación. Como resultado, se evidenció que la malla propuesta con un diámetro de 3 in y con una configuración triangular otorgó el X_{80} y X_{95} más favorable para una fragmentación más pequeña, manteniendo un consumo de explosivo constante, sin importar la variación del diámetro de perforación.

Palabras Clave: perforación, voladura, parámetros geométricos, fragmentación.

ABSTRACT

The drill and blast process is carried out with the purpose of opening holes with the appropriate distribution and geometry within the rock masses, allowing a good fragmentation. The objective of this work is to optimize the drilling and blasting process in the Cerro Grande mining concession, located in the Durán canton, Guayas province, by modifying the geometric parameters of the drilling mesh, to improve fragmentation. Of the rock, since, at present, there is a low load and haul performance due to the presence of natural blocks. For this purpose, an observational and experimental methodology was applied, where the geometric, geo-mechanical and operational parameters in the blasting process were identified and specified, which involved the analysis of the current drilling mesh. 3 different drilling diameters were used, generating 3 granulometric curves and analyzing the influence it has on the operational parameters to establish a new drilling mesh. Therefore, it is evident that the proposed mesh with a diameter of 3 in and with a triangular configuration gave the most favorable X_{80} and X_{95} for a smaller fragmentation, maintaining a constant explosive consumption regardless of the variation of the perforation diameter.

Keywords: *Drilling, blasting, geometric, fragmentation*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 1.....	9
1. Introducción.....	9
1.1 Descripción del problema.....	10
1.2 Justificación del problema.....	11
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo General.....	11
1.3.2 Objetivos Específicos.....	11
1.4 Marco teórico.....	12
1.4.1 Antecedentes.....	12
1.4.2 Generalidades del estudio.....	12
1.4.3 Métodos para determinar la distribución granulométrica.....	18
1.4.3.2 Ecuación de Kuznetsov:.....	19
1.4.4 Roc-Data.....	22
1.4.5 Modelo de López Jiménez.....	22
CAPÍTULO 2.....	24
2. Metodología.....	24
2.1 Diseño de la investigación.....	24
2.2 Flujograma del estudio.....	24
2.3 Fases de desarrollo del estudio.....	25
2.3.1 Fase I.....	25

2.3.1.2 Parámetros geométricos	29
2.3.2 Fase II	34
CAPÍTULO 3.....	39
3. Resultados Y ANÁLISIS	39
3.1 Caracterización de parámetros Geotécnicos	39
3.2 Datos geométricos de la malla de perforación actual	39
13.2 40	
3.2.1 Consumo de explosivo de malla actual.....	40
3.2.2 Diámetro de perforación (= 4in) de la malla actual	41
3.2.3 Curva granulométrica de malla actual $D_p = 4$ in.....	42
3.3 Diseño de malla de perforación de 3.5 pulgadas	43
3.3.1 Consumo de explosivo de malla 3.5 pulgadas	44
3.3.2 Diámetro de perforación (3.5in) en malla de perforación propuesta	45
3.3.3 Curva granulométrica de malla Propuesta $D_p = 3.5$ in	46
3.4 Diseño de la malla de 3 pulgadas.....	47
3.4.1 Consumo de explosivo de malla 3 pulgadas	47
3.4.2 Malla propuesta (Diámetro de perforación = 3in)	48
3.4.3 Curva granulométrica de malla propuesta $D_p = 3$ in.....	49
3.4.4 Análisis de curvas granulométricas con los 3 diámetros de perforación diferentes.	50
3.4.5 Análisis de resultados de los escenarios propuestos	52
3.4.6 Análisis de costos de los escenarios propuestos:	53
CAPÍTULO 4.....	58
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	62

ABREVIATURAS

ESPOL:	Escuela Superior Politécnica del Litoral
B:	Burden
C.A.:	Carga de Anfo
CE:	Consumo específico de explosivo
E:	Espaciamiento
h:	Altura
JPA:	Espaciamiento de fracturas o juntas planas
JPS:	Angulo del Plano de fractura
Mlp:	Metros lineales de perforación
m.e:	Masa total de explosivo
PE:	Perforación específica
RMD:	Descripción del macizo rocoso
RDI:	Influencia de la densidad de la roca
HF:	Factor de dureza de la roca

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de concesión minera Cerro Grande S.A.	13
Figura 1.2 Clima del Cantón Durán	14
Figura 1.3 Geología Regional de la zona de estudio	16
Figura 1.4 Geología Local de la zona de estudio	18
Figura 1.5 Curva Granulométrica del Modelo de Kuz Ram.....	22
Figura 2.1 Flujograma del estudio	24
Figura 2.2 Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta. Fuente: RocData ..	28
Figura 2.3 Factor de disturbancia. Fuente: RocData	28
Figura 2.4 Brocas Flats retráctil. Fuente: EPIROC (2022)	30
Figura 2.5 Vista de frente de parámetros de perforación.	31
Figura 2.6 Columna de sustancias con explosivo	33
Figura 3.1 Malla de perforación actual con un $D_p= 4$ in utilizada en la Cantera Cerro Grande.....	41
Figura 3.2 Malla de perforación actual con un $D_p= 4$ in utilizada en la Cantera Cerro Grande vista lateral.	42
Figura 3.3 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 4 in	43
Figura 3.4 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3.5$ in.	45
Figura 3.5 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3.5$, vista lateral.	45
Figura 3.6 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 3.5 in.	46
Figura 3.7 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3$ in.	48
Figura 3.8 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3$ in, vista lateral.	49
Figura 3.9 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 3 in.	50
Figura 3.10 Curvas granulométricas con los 3 diámetros de perforación diferentes	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. parámetros meteorológicos del Cantón Durán durante el año 1991-2021....	15
Tabla 2.1 Ponderaciones de los parámetros del índice de volabilidad, factor de roca o índice de Lilly.....	26
Tabla 2.2 Parámetro geo-mecánicos para el factor de roca.....	27
Tabla 2.3 Parámetros geométricos de la malla de perforación actual.....	29
Tabla 2.4 Descripción de la perforadora utilizada en el proceso de perforación y voladura.....	30
Tabla 2.5 Descripción de los parámetros de perforación.....	32
Tabla 2.6 Descripción de parámetros del explosivo ANFO.....	33
Tabla 3.1 Valoración de los parámetros geotécnicos.....	39
Tabla 3.2 Valorización de los parámetros geométricos de la malla actual.....	40
Tabla 3.3 Consumo de explosivo de la malla actual.....	41
Tabla 3.4 Valorización de los parámetros geométricos de la malla 3.5 in.....	44
Tabla 3.5 Consumo de explosivo de la malla 3.5 in.....	44
Tabla 3.6 Valorización de los parámetros geométricos de la malla de 3 in.....	47
Tabla 3.7 Consumo de explosivo de la malla para Dp de 3 in.....	48
Tabla 3.9. Costo de producción de implementación de malla de perforación.....	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Índice de Volabilidad	62
Anexo 2. Tipo de roca	62
Anexo 3. Tabla de clasificación de GSI. Fuente: RocData	63
Anexo 4. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 4 in	63
Anexo 5. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 3.5 in	64
Anexo 6. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 3 in	65
Anexo 7. Porcentaje de rendimiento de costos y fragmentación del proceso de perforación y voladura	65
Anexo 8. Toma de datos geo mecánicos	66
Anexo 9. Roca con tamaños mayores a un metro	67
Anexo 10. Roca con fragmentación con diámetros pequeños	67

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La extracción de materiales de construcción de áridos y pétreos forman una gran parte del volumen de materiales extraídos de la tierra, siendo estos los minerales mundialmente más importantes para la industria de la construcción, debido a que constituyen la materia prima en toda obra civil. Por este motivo, es de suma importancia entregar a estas industrias un material de excelente calidad. Por lo que en el presente proyecto se establecen métodos para la optimización y calidad de la fragmentación de la voladura, utilizando criterios técnicos y económicos a partir de datos obtenidos in-situ (Guzmán & Orozco, 2018).

De acuerdo con estudios efectuados por Rincón y Molina (2017), indican que la etapa de perforación y voladura en un proyecto minero es de suma importancia, debido a que una voladura bien ejecutada optimiza procesos de carga, acarreo y transporte en una cantera, teniendo en consideración en caso de tener roca consolidada se necesita efectuar un proceso discontinuo conformado por 3 fases; voladura, carga y transporte.

Sin embargo, Armstrong y Menon (2015), detallan que para diseñar una voladura se necesita establecer parámetros geométricos que ayuden a determinar la calidad de fragmentación, donde es necesario el uso de métodos como el de Kuz-Ram, el cual es un modelo de predicción de fragmentación desarrollado por Claude Cunningham (1983), basado en el modelo de Kuznetsov sobre la estimación del tamaño medio de fragmentación y la función de distribución granulométrica de Rosin Rammler (pág. 21). En efecto, en la actualidad, se lleva a cabo para el proceso de perforación y voladura del diseño de mallas de trepanación, donde se tiene el inconveniente de obtener bloque de roca menores a 30 cm, lo que dificulta el proceso de carga y acarreo para su posterior comercialización (Lituma, 2021, pág. 23).

Teniendo en consideración lo antes descrito, se establece que este trabajo de investigación se desarrollará en la concesión minera Cerro Grande, la misma que se encuentra ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, en la cual se desarrollan actividades mineras de extracción de material pétreo, lugar que tiene una superficie de 50 Ha.

Por lo tanto, el propósito de esta tesis es generar una propuesta de optimización que se basará en realizar un monitoreo de las variables involucradas en el proceso

granulométrico, las cuales serán seleccionadas con base en el modelo de Kuz Ram a partir de un posterior análisis, el cual ayudará a mejorar las operaciones que efectúa concesión minera Cerro Grande en los actuales momentos.

1.1 Descripción del problema

Dentro de la industria minera, los trabajos de perforación y voladura son aplicados con la finalidad de fragmentar y extraer rocas en terrenos que demuestren competencia, estabilidad y características aptas establecidas mediante los métodos apropiados de explotación de acuerdo con lo establecido por Villalva (2020, pág. 17), teniendo en consideración lo anteriormente expuesto, se indica que la concesión minera Cerro Grande se encuentra ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, direccionada bajo el cargo de la compañía Logimin S.A., la misma que tiene el compromiso de la extracción de Lutita.

Cabe resaltar que estudios anteriores efectuados por Guzmán y Orozco (2018), determinaron que la primera capa de la formación estuvo conformada por Lutita con alto grado de meteorización denominada cascajo ya fue extraída. Por lo que en este estudio es necesario un proceso de cambio en su método de extracción de material, implementando mallas de perforación, debido a que la roca se encuentra en una fase fresca con presencia de fracturas naturales generando grandes bloques de Lutita gris (roca poco meteorizada) en la que una vez detonada la voladura, se genera material mal dimensionado con un valor superior a los 30 cm, generado un proceso de carga que es ineficiente, presentando afectaciones en su rendimiento. Por ese motivo, se requiere trabajar en este estudio investigativo sobre los procesos de perforación y voladura donde se aplique metodologías, que estarán basadas en modelos matemáticos que ayuden a lograr una eficiencia en la fracturación de la roca, que permitirá conseguir una reducción de los costos, para lo cual se tendrá en consideración el método de Kuz-Ram que ayudará a la obtención de una mejor fragmentación del volado fundamentado mediante el respectivo análisis granulométrico.

Por lo antes expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se puede optimizar los procesos de perforación y voladura para mejorar la fragmentación de la roca en la concesión minera Cerro Grande en el Cantón Durán?

1.2 Justificación del problema

La presente investigación plantea optimizar los procesos de perforación y voladura para mejorar la fragmentación de la roca en la concesión minera Cerro Grande en el Cantón Durán, debido a que, en la actualidad, se está teniendo un bajo rendimiento de carga y acarreo por la presencia bloques naturales.

La importancia de este estudio radica en la necesidad de que existe un incumplimiento del tamaño de la fragmentación de la roca, por lo que se implementará un levantamiento de la información con el empleo de parámetros geométricos utilizados en el diseño de las mallas de perforación, a fin de poder modificar los diámetros de perforación, el mismo que se basará en el método de Kuz-Ram que permitirá estimar el tamaño promedio de la fragmentación de la roca a fin de obtener mejores resultados granulométricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de perforación y voladura en la concesión minera Cerro Grande, ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, mediante la modificación de los parámetros geométricos de la malla de perforación, con la finalidad de mejorar la fragmentación de la roca

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos geométricos de la malla de perforación actual como: burden, espaciamiento, diámetro de perforación, entre otros, mediante la visita en campo para la aplicación de métodos de predicción granulométrica.
- Modificar la malla de perforación, mediante los datos recopilados en campo para la obtención de una granulometría apropiada para la optimización del proceso de carga, aplicando el método de Kuz-Ram.
- Realizar un análisis de costos de la implementación de la malla de perforación.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

Cahuapaza (2022), en su estudio titulado “Optimización de costos en perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la unidad minera Apumayo S.A”., determinó que el empleo matemático con el reemplazo por mezcla explosiva obtiene resultados favorables para la reducción de los costos de perforación y voladura al emplear un nuevo diseño de malla obteniendo un ahorro significativo en el desarrollo de procesos.

Investigaciones efectuadas por Nader (2018), en su estudio titulado “Implementación de parámetros de perforación y voladura en el nivel 70, frente 1 de la cantera planta Tolú viejo de la empresa cementos Argos S.A”, indica que la implementación de mallas de perforación, da como resultado la presencia de una voladura más eficiente, considerando que en el material obtenido a partir de los parámetros empleados por burden y el espaciamiento tienden a aumentar la presencia de granos gruesos y logran disminuir la granulometría, donde se logra obtener el 75% de granos menores a los 20 cm con el empleo de mallas de 5,70m x 4m.

1.4.2 Generalidades del estudio

1.4.2.1. Ubicación

La concesión minera Cerro Grande S.A., está ubicada en la provincia del Guayas, Cantón Durán, en la Parroquia Eloy Alfaro, frente a la ciudadela el Recreo. Para ingresar por la cantera se lo debe realizar por la vía Durán-Yaguachi en Km 7.1/2 (Figura 1.1).

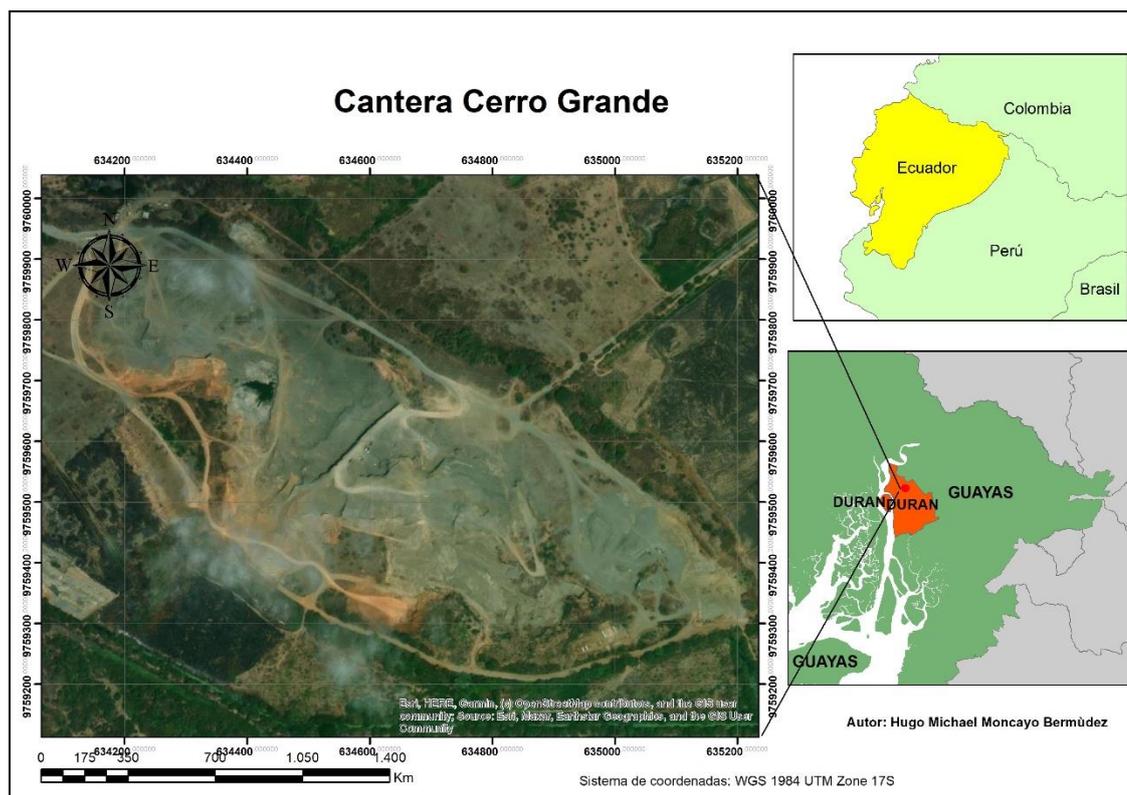


Figura 1.1 Ubicación de concesión minera Cerro Grande S.A.

1.4.2.1 Meteorología

La meteorología se asocia a las condiciones atmosféricas en un tiempo y lugar en específico, analizando temperatura en base al clima y la precipitación de un sector de estudio. La cantera se encuentra ubicada en Cantón Durán en la provincia de Guayaquil por lo tanto se realizará un análisis de los siguientes parámetros para definir la meteorología de la zona de estudio.

Clima: En el cantón Durán los climas son mega-térmico seco tropical, tropical mega-térmico sami-húmedo, lo cual va interconectado con los índices de precipitación en la zona noroccidente y norte del cantón. Lo cual es indicado por el Plan Cantonal de Desarrollo elaborado en el 2015.

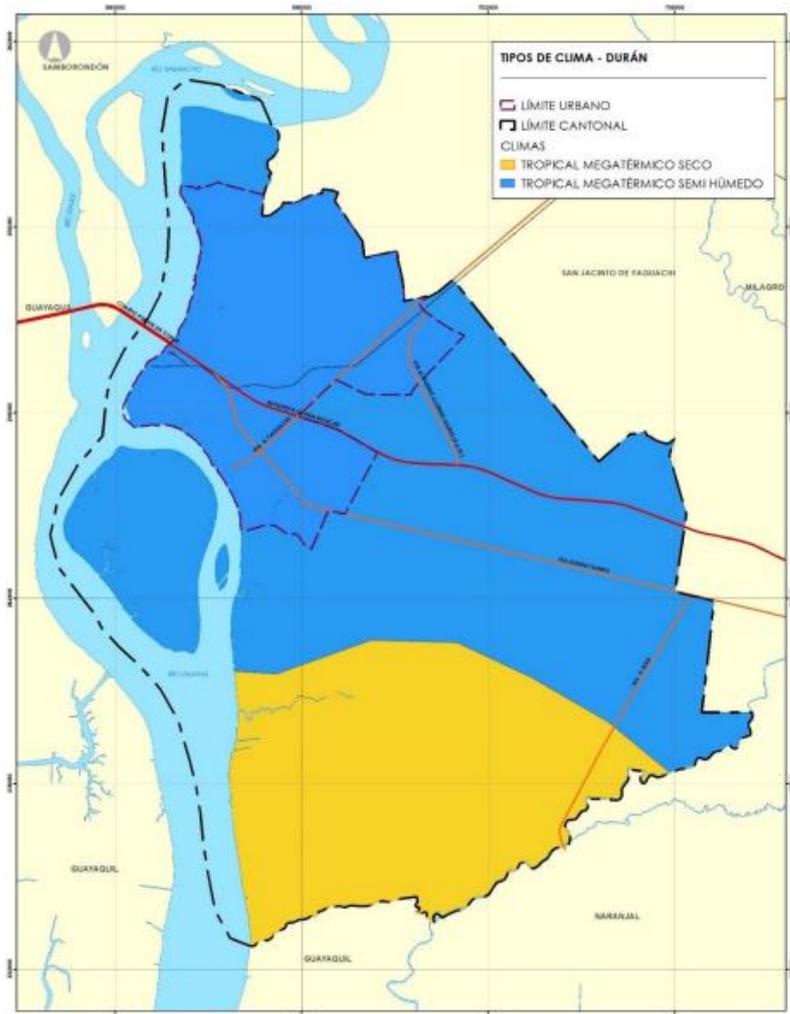


Figura 1.2 Clima del Cantón Durán

Fuente: GAD Municipio de Durán (2015)

Precipitación: La Tabla 1.1 muestra varios parámetros meteorológicos, donde se hará énfasis sobre la precipitación en el cantón Durán durante los años 1991-2021, la cual es proporcionada por “CLIMATE-DATA.ORG”, se puede observar que la mayor precipitación se da en el mes de Marzo, debido a que la época de invierno se da entre el mes de Diciembre y Mayo encontrándose en la mitad del periodo, además existe una diferencia entre la precipitación con relación al mes más seco que es Noviembre y el más lluvioso que es marzo de 371 mm. Esta información es fundamental debido a que en épocas de lluvia se debe tener un mayor cuidado con la etapa de voladura, debido a que los explosivos utilizados en la Cantera ANFO, tienen una durabilidad de 78 horas en condiciones húmedas.

Tabla 1.1. parámetros meteorológicos del Cantón Durán durante el año 1991-2021.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
T media (°C)	24.9	25.1	25.4	25.4	24.8	23.7	23.1	23.1	23.2	23.4	23.9	24.7
T máx. (°C)	23	23.2	23.4	23.4	22.8	21.6	21	20.7	20.7	21	21.3	22.4
T min (°C)	28.1	28.2	28.6	28.7	28	27	26.8	27.1	27.4	27.6	28.2	28.6
Precipitación (mm)	315	405	460	369	300	197	154	113	128	110	89	173
Humedad (%)	85	87	86	86	86	86	84	82	82	81	79	80
Días de lluvia (días)	19	19	20	19	19	18	16	14	15	14	12	15

Fuente: (CLIMATE-DATA, 2021)

1.4.2.2 Geología Regional

En la concesión Cerro Grande afloran las formaciones geológicas sedimentarias F. Cayo y F. Guayaquil, correspondientes a la edad Cretácica. En los sectores más bajos se encuentran depósitos sedimentarios Cuaternarios formados por aluviales actuales (Figura 1.1).

1.4.2.3 Formación Cayo y Guayaquil

La formación Cayo es de origen Volcánico- Clástico. Encontrándose sobre la formación Piñón e infrayaciendo sobre la formación Guayaquil, su mayor parte está constituida de areniscas que van gradando a Lutitas Silíceas, en varias ocasiones se han encontrado intercaladas. Se encuentran con un espesor de 10 cm a 60 cm para las areniscas y se pueden observar la presencia de chert y nódulos (Benitez, 2021).

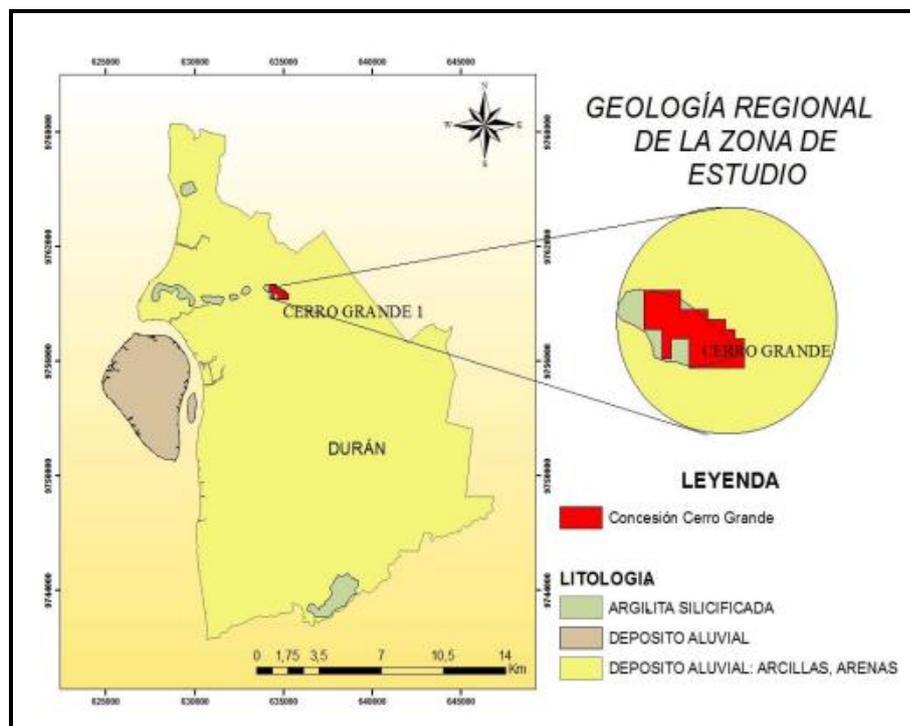


Figura 1.3 Geología Regional de la zona de estudio

Las rocas sedimentarias del sector se presentan fracturadas, los afloramientos geológicos tienen un grado alto de diaclasamiento en las Lutitas Silíceas, en cambio los estratos de areniscas se encuentran muy poco compactados en bajas profundidades, pero en están endurecidos en profundidades de 70 metros en adelante (Lorenzo, et al. 2018).

En el parte superior del sector Cayo y en el sector Sur de la concesión minera Cerro Grande se encuentran Lutitas Silíceas, con un alto grado de meteorización y de diaclasamiento. Los estratos de areniscas se encuentran poco compactos a bajas profundidades, pero a altas profundidades se encuentran endurecidos. Las Lutitas de niveles superiores tienen un color café a rojo anaranjado, en el sector Norte de la concesión Cerro Grande en profundidades mayores a los 70 metros, la roca se encuentra poco meteorizada manteniendo su color de origen que es Gris oscuro, pero existen sectores en la concesión donde se mezclan tonalidades rojizas, café y gris oscura, donde se observa intercalaciones (Lorenzo, et al. 2018). La dirección de las capas de la concesión minera Cerro Grande es de Este – Oeste con buzamiento de 20° a 30° en dirección al Sur, lo que indica que existe mayor estabilidad debido a que la pendiente natural buza, está en contra de las capas sedimentarias que se ubican en dirección Norte en contra de la pendiente Natural, por otro lado, las capas ubicadas en el Sur están en el mismo sentido de la pendiente Natural propensas a sufrir un deslizamiento por volcamiento (Basurto, 2020).

1.4.2.4 Depósitos de Aluviales Cuaternarios

Los depósitos aluviales están conformados por limos arcillas en forma de detritos no compactados, los cuales están formando las planicies de la zona Cretácica silícea en la parte baja de la concesión minera (Benítez, 2021).

1.4.2.5 Geología Local

En la geología local se encuentra la formación Cayo y la formación Guayaquil en transición, en los distintos frentes de trabajo se puede identificar Lutitas Silíceas que forman parte de la formación Cayo, en distintos estratos se pueden observar intercalaciones de Lutita no meteorizada y meteorizada donde se pueden

identificar la mezcla de colores característicos como son rojiza anaranjada para la meteorizada y gris oscuro para la roca consolidada. Finalmente se puede observar acumulaciones de detritos de limos y detritos no compactados debido a la deposición de aluviales (Figura 1.4).

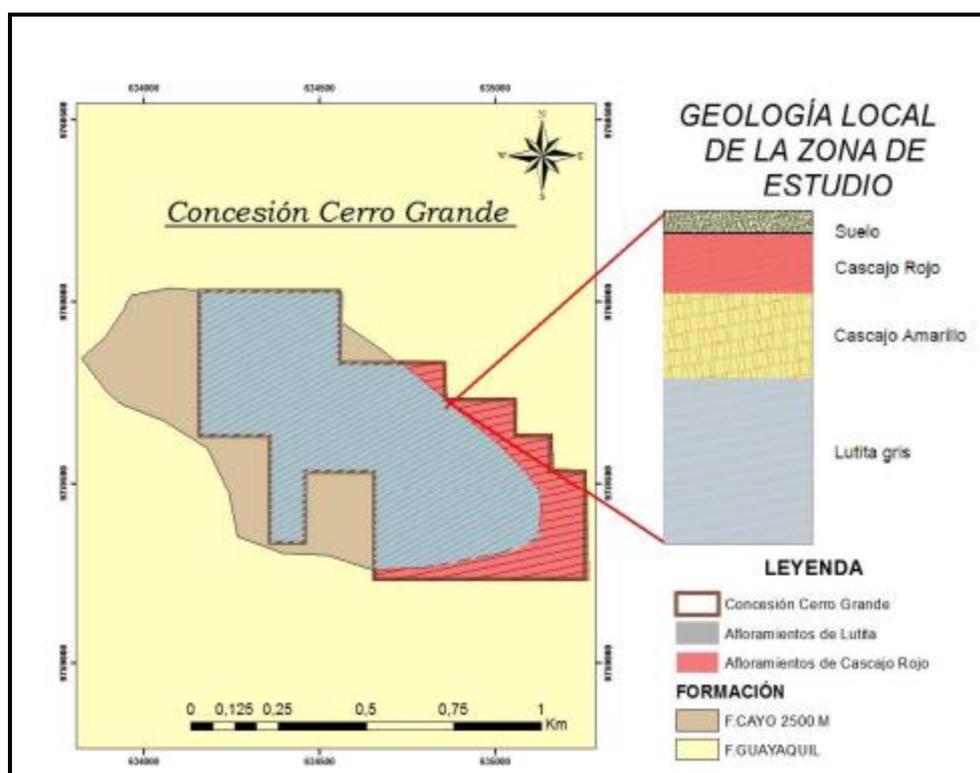


Figura 1.4 Geología Local de la zona de estudio

1.4.3 Métodos para determinar la distribución granulométrica

1.4.3.1 Método de KUZ-RAM

El método de Kuz-Ram se aplica para determinar la distribución granulométrica de una voladura, la cual nos indica el rango necesario para el diámetro de perforación a utilizar. Este método se basa en los parámetros de la roca y el explosivo a utilizar.

El modelo de Kuz-Ram fue elaborado por Cunningham en el año 1983. El nombre de este método se basó en 2 modelos, los cuales son: Kuznetsov y el de Rosin Rammler, siendo esta una metodología que se aplica actualmente alrededor de todo el mundo en el ámbito minero, la misma que se basó en publicaciones rusas antiguas donde desarrollaron una relación simple entre los

parámetros geométricos de la etapa de voladura y el tamaño medio de fragmentación, como un modelo de predicción con sustento matemático. El trabajo ruso fue muy bien acogido en el continente occidental por motivo que tenía una estrecha relación con el Modelo de fragmentación basado en la teoría del Crecimiento de Grietas (Rojas, 2018).

1.4.3.2 Ecuación de Kuznetsov:

Esta ecuación ayuda a determinar el tamaño medio por donde pasa el 50% de la roca luego del proceso de voladura.

$$X_{50} = A * \left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0.8} * Q^{\frac{1}{6}} \quad (1.1)$$

Parámetros:

X_{50} = Tamaño medio de fragmentación

A = Factor de roca, proporcionado por (Lilly)

V_0 = Volumen de roca quebrada por hoyo

Q = Masa de explosivo por cada hoyo

Se puede deducir que la formula Kuznetsov depende de los parámetros de la roca y el explosivo utilizado. El término de la ecuación $\left(\frac{V_0}{Q}\right)$ representa el inverso de la carga equivalente. La ecuación indica que el tamaño medio de la fragmentación disminuye linealmente con el aumento del factor de carga. Luego con estudios posteriores se ajustó la ecuación Kuznetsov para incluir la potencia en función del peso de Anfo:

$$X_{50} = A * \left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0.8} * Q^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{115}{E}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (1.2)$$

Donde el parámetro faltante E se representa como la potencia en peso relativo del explosivo utilizado.

1.4.3.3 Ecuación para el cálculo de Factor de roca (A) o Blastability index:

Es conocido como el índice de volubilidad de Lilly (1986), depende de 4 parámetros geomecánicos, los cuales indican qué tan fácil o difícil será una voladura, la misma que se adaptó al modelo de Cunningham en 1987, dándole mayor importancia a la dureza de la roca, basándose en el tipo de roca a fragmentar y la dirección de la voladura, siendo representada por la siguiente ecuación:

$$A = 0.06 * (RMD + JF + RDI + HF) \quad (1.3)$$

Parámetros:

RMD = Describe el macizo rocoso.

JF = Espaciamiento de juntas verticales.

RDI = Índice de densidad de roca.

HF = Factor de dureza.

A = Factor de carga o índice de Lilly.

1.4.3.4 Ecuación Exponente de Uniformidad de Rosin Rambler:

Es parte del modelo de Kuz-Ram para poder obtener tamaño característico de la roca, esta ecuación se basa en el modelo de Rosin Rambler.

$$n = \left(2.2 - 14 * \frac{B}{d}\right) * \left(1 - \frac{W}{B}\right) * \left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right) * 1^{0.1} * \frac{LC}{H} * P \quad (1.4)$$

Parámetros:

n = Exponente de Uniformidad

B = Burden.

d = Dímetro de perforación.

S = Espaciamiento.

W = Desviación de la perforación.

S = Espaciamiento.

CL = Longitud de carga de columna.

LC = Largo total.

H = Altura de banco.

P = Valor dependiente del tipo de malla.

1.4.3.5 Ecuación de tamaño característico " X_c ":

Esta ecuación se emplea en la representación el tamaño característico " X_c " basado en la ecuación de Rosin Rammler, la misma que ayuda a identificar un factor de escala, donde se la conoce como el tamaño de zaranda del cual pasa el 80 % de las partículas

$$X_c = \left(\frac{X_{50}}{0.693^{\frac{1}{n}}} \right) \quad (1.5)$$

Parámetros:

X_c = Tamaño característico.

X_{50} = Tamaño medio de fragmentación.

n = Exponente de Uniformidad.

1.4.3.6 Ecuación del porcentaje pasante:

La presente ecuación, es también conocida como la de Rosin Rammler, ayuda a determinar el porcentaje de pasante de material en una abertura X_{50} y X_c tamaño característico.

$$R = e^{-\left(\frac{x_{50}}{x_c}\right)^n} \quad (1.6)$$

Parámetros:

R = Porcentaje de pasante.

X_c = Tamaño característico.

X_{50} = Tamaño medio de fragmentación.

n = Exponente de Uniformidad.

Finalmente, el método de Kuz-Ram arrojará una curva granulométrica en función de cada uno de los parámetros obtenidos, para la representación gráfica de las

proporciones de material fragmentado según el tamaño de partícula que lo componen.

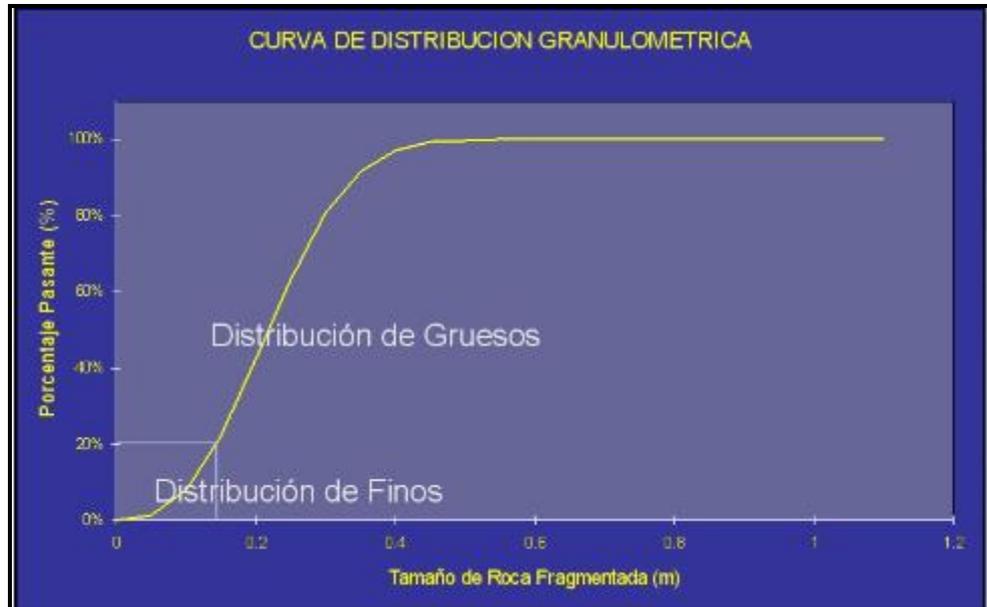


Figura 1.5 Curva Granulométrica del Modelo de Kuz-Ram.

Fuente: Barrantes (2019)

1.4.4 Roc-Data

Es un software diseñado para el análisis mecánico de los macizos rocosos, empleado cuando existe la falta de datos sobre propiedades del suelo y roca, a fin de establecer el modelado numérico de estructuras geotécnicas y excavaciones. La utilidad que tiene el programa es elaborar modelos constitutivos y potentes programas de análisis numéricos con datos recolectados en campo, el mismo que se realiza con una caracterización básica y la selección de datos pre-recolectados por geólogos y almacenados en la base de datos del programa.

1.4.5 Modelo de López Jiménez

Es un método desarrollado para el cálculo de banco en voladuras con diámetros pequeños. Este método fue desarrollado en el año (1980) únicamente para el cálculo del Burden con la siguiente fórmula:

Para Diámetros de perforación > 165 mm

$$B = (0.76 * Dp * F)$$

Para Diámetros de perforación < 165 mm

$$B = 0.90 * (0.76 * Dp * F)$$

Parámetros:

B= Burden.

Dp= Diámetro de perforación.

F = Factor de corrección.

Luego el modelo de López Jimeno fue actualizado en el año (1994) simplificando las fórmulas y ampliando el marco de cálculo para todos los parámetros geométricos de la malla de perforación en base a la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso. El método de López Jimeno en su nueva actualización era válido para diámetros comprendidos entre 65mm y 165mm.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de la investigación

En el presente proyecto se aplicó una metodología observacional y experimental, debido a que se identificó y precisó los parámetros geométricos, geomecánicos y operativos en el proceso de voladura, lo que involucró el análisis de la malla de perforación actual como objetivo de estudio.

Se aplicó una metodología experimental, debido a que se manejó variables geométricas, para poder describir la influencia que tiene la obtención de una fragmentación característica en la voladura, las mismas que fueron ejecutadas por la experimentación con 3 diferentes diámetros de perforación generando 3 curvas granulométricas y analizando la influencia que tiene en los parámetros operacionales para generar una nueva malla de perforación.

2.2 Flujograma del estudio

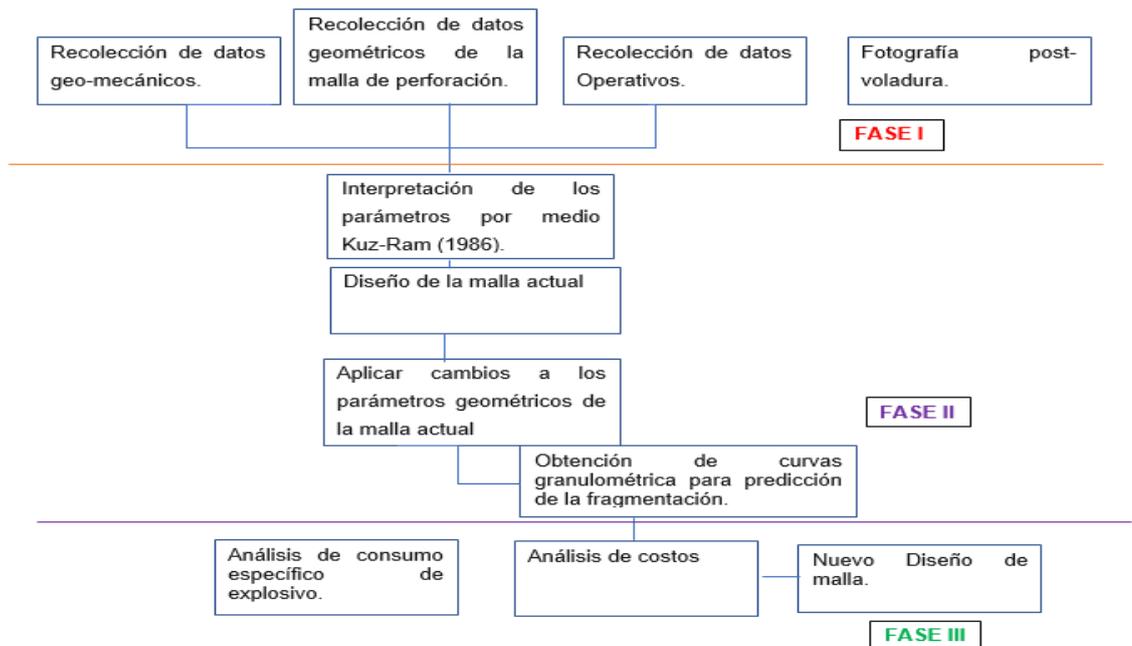


Figura 2.1 Flujograma del estudio

2.3 Fases de desarrollo del estudio

2.3.1 Fase I.

La fase I se inició con la revisión bibliográfica de información de la cantera Cerro grande y modelos de predicción granulométrica, la misma que fue unificada con la información recolectada en campo. La información recolectada fue la geomecánica del macizo rocos, la geométrica de los parámetros de la malla de perforación actual y los parámetros operacionales empleados en la perforación. Adicionalmente, en esta fase se realizó la toma de evidencia del material fragmentado luego del proceso de voladura para su posterior análisis en el programa KuzRam 1986.

Para efectuar la medición de los parámetros geométricos que fueron empleados en la malla de perforación actual entre los que se encontraban el diámetro de perforación, espaciamiento, burden, Longitud de carga de columna y altura del banco, fueron medidos in situ en los frentes de trabajos cuando se culminó el proceso de perforación.

Para la obtención de los parámetros geomecánicos se procedió a ir al campo, donde se efectuó la caracterización de la Lutita Gris presente en los frentes de trabajo, esto se realizó en base a los factores de ponderación de los parámetros contenidos en la ecuación 1.3 conocido como el índice de volubilidad. Donde se efectuó la caracterización del espaciamiento de las juntas planares, orientación de las juntas, dureza de la roca, gravedad específica de la roca y resistencia a la comprensión simple. Para lo cual se empleó los estándares establecidos en estudios efectuados por Lily (1986-1992) donde las rocas blandas y duras fueron definidas por una ponderación para cada parámetro, como se expone en la Tabla 2.1 (Anexo 1).

Tabla 2.1 Ponderaciones de los parámetros del índice de volabilidad, factor de roca o índice de Lilly

Parámetros Geo-mecánicos	Ponderación
Descripción del macizó rocoso (RMD)	
Poco consolidado	10
Desclasamiento en bloques	20
Poco masivo	50
Espaciamiento entre planos de Juntas (JPS)	
Pequeño ($X < 0.1$ m)	10
Medio (0.1m a 1m)	20
Grande ($X > 1$ m)	50
Orientación de los planos de cada Junta (JPO)	
Horizontal	10
Buz. Normal al frente	20
Dirc. Normal al frente	30
Buz. Coincidente con el frente.	40
Influencia del peso específico: (SGI)	SGI = 25*SG-
SG es considerado el peso específico de roca (t/m3)	50

Para el último parámetro de la ecuación 2.1 denominado dureza de la roca se empleó la siguiente formula:

$$RSI = 0.05 * RC \tag{2.1}$$

Parámetros:

RSI = Dureza de la roca.

RC = Resistencia a la compresión simple (Mpa)

Finalmente, los últimos datos recolectados en campo fueron los parámetros operativos que involucraron volumen de roca quebrada por hoyo, masa de explosivo por cada hoyo y la potencia en peso relativo del explosivo utilizado.

2.3.1.1 Características de la roca

Los trabajos de perforación que se llevaron a cabo en los frentes de la Cantera Cerro Grande presentaron una transición entre cascajo amarillo y lutita gris, donde las características geomecánicas de la roca, influyeron directamente en el factor de roca o índice de Lilly (1986).

Tabla 2.2 Parámetro geo-mecánicos para el factor de roca.

Figura.	Parámetros	Significado
	JPS	Espaciamiento de fracturas o juntas planas
	JPA	Angulo del Plano de fractura
	RMD	Descripción del macizo rocoso
	RDI	Influencia de la densidad de la roca
	HF	Factor de dureza de la roca

Para la obtención de los parámetros mecánicos de la roca se realizó una visita en campo donde se empezó con el cálculo del espaciamiento entre fracturas donde se midió y se obtuvo un valor de 0.255 m.

Para determinar el ángulo del plano de fracturas JPA se tomó un guijarro y se arrojó en un plano representativo de falla, donde se pudo identificar que el frente que se trabajó fue en buza hacia dentro del talud. Se visualizó también que el macizo rocoso se encontraba desclasado, el mismo que estaba compuesto por roca Lutita poco meteorizada, el mismo que contaba con una densidad de 2.2 ton/m³.

Para el cálculo de dureza se procedió a emplear el software RocData en el cual se empleó el criterio de Hooke Brown.

Finalmente, se calculó el (SIGCI) el que caracterizó la compresión a la resistencia uniaxial en la roca intacta, para lo cual se colocó el rango entre 25-50 establecido para Lutita, como se muestra en la Figura 2.2 (Anexo 2).

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (MPa)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>250
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	100-250
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	50-100
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	25-50
Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rock salt, potash.	5-25
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1-5
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1

Figura 2.2 Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta. Fuente: RocData

El segundo parámetro que se identificó fue el GSI, también conocido como el índice de resistencia geológica, el cual estuvo basado en la estructura de la roca y las condiciones como se muestra en el Anexo 3, donde se observó la estructura very block y Surface conditions fair, obteniendo un valor de GSI igual 45.

El otro parámetro que se caracterizó fue el valor de disturbancia D que fue aplicado a taludes o Slopes, con un Poor blasting de D=1 (Figura 2.3).

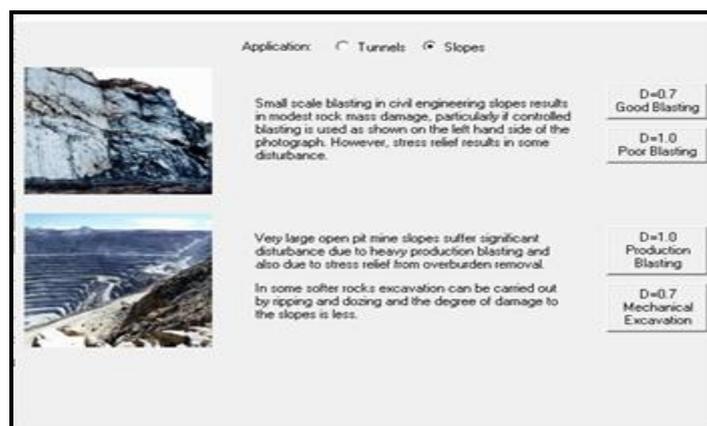


Figura 2.3 Factor de disturbancia. Fuente: RocData

Posteriormente, se implementó el valor del módulo de elasticidad de la roca intacta, la cual se efectuó en base a estudios realizados por los creadores del Software, donde solo se seleccionó la roca Lutita gris. Se pudo obtener el módulo de Young del macizo rocoso con un valor de 0.72 GPa.

2.3.1.2 Parámetros geométricos

La recolección de datos de parámetros geométricos se basó en el diseño de la malla actual, a fin de poder obtener el espaciamiento, burden, altura y el tipo de malla, para lo cual se tomó datos en campo con un flexómetro entre la distancia de 2 perforaciones para obtener el burden. Se utilizó una malla cuadrada de 4mx4m, por lo tanto, espaciamiento = burden y la altura de la malla fue de 4 metros, lo que permitió obtener los parámetros geométricos de la malla actual los mismo que se especifican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Parámetros geométricos de la malla de perforación actual

Malla Actual	Parámetros	Significado	Valorización	Unidad
	B	Burden	4	m
	E	Espaciamiento	4	m
	Malla	cuadrada	4x4	m ²
	h	altura	12	m

2.3.1.3 Equipo empleado en la perforación y voladura.

La maquinaria empleada para el proceso de perforación y voladura en la cantera Cerro Grande, fue 1 perforadora ECM- 590 con barras de T-45, la cual fue usada 1 vez cada semana para realizar la voladura, por lo que en la Tabla 2.4 se describen las especificaciones de este equipo.

Tabla 2.4 Descripción de la perforadora utilizada en el proceso de perforación y voladura

Equipo	Nombre	Fabricante	Descripción
	perforadora ECM- 590	ATLAS COPCO ECM 590	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de rotación: 0-200 rpm. • Presión hidráulica: 2130 psi / 150 kg / cm². • velocidad de operación: 2350 rpm. • Horas de vida: 5,279. • Capacidad de combustible 100 U.S Gal / 378 L. • Movimiento máximo de boom (brazo) vertical: 51° para arriba / 15° para abajo. • Oscilación máxima de boom (brazo) horizontal: 30° a la derecha / 34.6 a la izquierda.

2.3.1.4 Tipo de broca y diámetro utilizado

La empresa Cerro grande empleó brocas Flats de 4 in, marca Epiroc para perforadoras de martillo de rotopercusión DTH, con punta de carburo para ladrillos y piedras, las mismas que poseen una eficiencia de perforación del 80% frente a rocas bien consolidadas como es la lutita gris.



Figura 2.4 Brocas Flats retráctil. Fuente: EPIROC (2022).

2.3.1.5 Descripción de la perforación (taladro)

El proceso de perforación es una etapa muy importante para la obtención del mineral o roca de interés, en la Cantera Cerro Grande se realizó esta etapa con una perforadora Atlas Copco ECM- 590 con brocas flat de 4 in con un mecanismo de rotopercusión.

El mecanismo se basó en combinar la percusión, la cual ocurre en el momento que el varillaje comienza a realizar golpeteos en la cara del frente de trabajo por medio del pistón produciendo ondas de choque que se van transmitiendo desde la broca hasta el varillaje denominado como martillo en cabeza.

La distribución del proceso de perforación se establece en la Figura 2.5, con el empleo de los parámetros detallados en la Tabla 2.5.

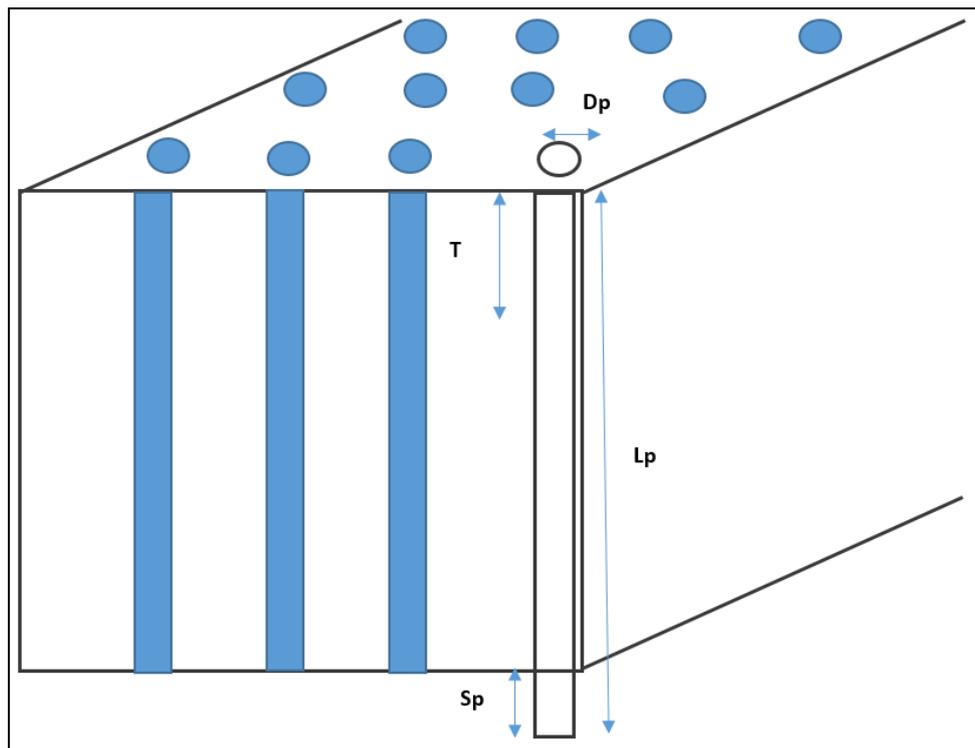


Figura 2.5 Vista de frente de parámetros de perforación.

Tabla 2.5 Descripción de los parámetros de perforación

Parámetros	Significado	Unidades
Dp	Diámetro de perforación	in
T	Taco	m
Lp	Longitud de perforación	m
Sp	Sobre-perforación	m

2.3.1.6 Descripción de explosivo

Para la etapa de carga en el proceso de voladura, la concesión minera Cerro Grande tuvo como objetivo la fragmentación del macizo rocoso con una alta eficiencia, por medio de la liberación de energía química contenida en el explosivo utilizado en este caso Anfo, donde la energía liberada superó el cizallamiento y la tracción de la roca.

El explosivo utilizado fue uno de tipo mecánico, debido a que la energía se genera a través de la vaporización repentina de materiales de interés, producto de la introducción de un material a muy alta temperatura.

El ANFO en ocasiones llega a cristalizarse, lo que genera un endurecimiento del producto y liberación de menor energía, por lo que este problema en esta región, la única dificultad se da en época de invierno. Es importante mencionar que el ANFO es un explosivo que disminuye su resistencia en presencia de agua debido a que tiende a ser muy higroscópica.

La composición química que se utilizó para la elaboración del ANFO fue:



Como se puede observar en la ecuación la mezcla estuvo conformada por Nitrato de amonio en forma de Prill y diésel, es importante mencionar que una mezcla inadecuada de nitrato de amonio y petróleo puede producir menor energía de detonación y mayor cantidad de gases tóxicos.

El ANFO es un explosivo que se recristaliza a $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a $32.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ se hace más denso con partículas finas lo que promueve a la atracción de aire. En la Tabla 2.6 se mencionan algunas características del ANFO utilizado en la empresa:

Tabla 2.6 Descripción de parámetros del explosivo ANFO

Figura	Parámetros	Significado	Valorización	Unidades
	ρ	Densidad	0.8	g/cm ³
	E	Energía	3857	Kj/Kg
	RWS	Potencia relativa por peso	107	%
	VD	Vida útil (seco)	6	años
	VD	Vida útil (mojado)	72	horas

El proceso de carga en la columna de explosivo fue fundamental para lograr la fragmentación adecuada, además es un factor muy importante al momento de detallar costos totales del proceso de voladura.

Es importante mencionar, que el explosivo y accesorios de voladura no fueron alterados, solo en el instante de hacer cambios de diámetro de perforación, se vio alterada la cantidad de consumo específico de explosivo. A continuación, en la Figura 2.6 se detalla la distribución de explosivo dentro de las perforaciones.

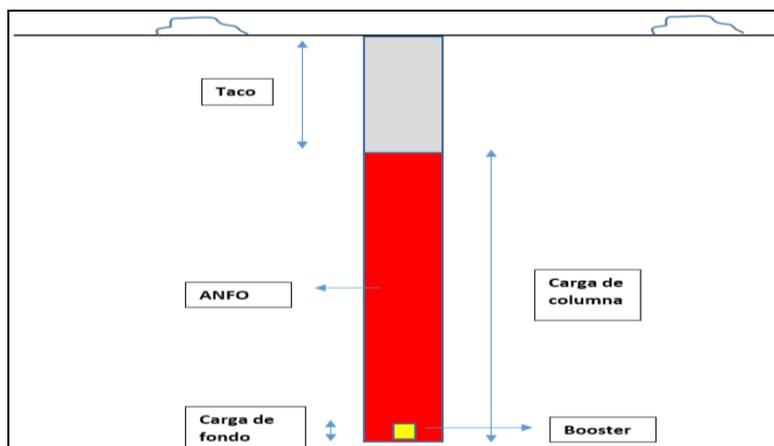


Figura 2.6 Columna de sustancias con explosivo

Taco: Por lo general es 1/4 de la columna de explosivo, se encuentra en la parte más externa y esta compuesta por detritos provenientes de la perforación, tiene la finalidad de no dejar escapar los gases provenientes de la voladura para que no exista desperdicio de energía en el momento de la detonación.

Carga de columna: Por lo general son las 3/4 partes de la columna de explosivo, siendo la gran mayoría, por lo tanto la cantidad de ANFO utilizado depende de la longitud del barreno empleada.

Carga de fondo: Forma parte de las 3/4 partes de la columna de explosivo, la carga de fondo contiene Booster, esto varia dependiendo de la longitud de la barrenación, este accesorio sirvió para intencificar la liberacion de energia, creando una explosion mas eficiente.

2.3.2 Fase II.

En esta etapa se empezó con la interpretación y el proceso de datos obtenidos en campo obtenidos en la primera fase. Se desarrollaron cada una de las ecuaciones del modelo Kuz-Ram en la aplicación creada por Víctor Hugo Paredes Cedeño llamada (Kuz-Ram 1986), que se basó en introducir parámetros geomecánicos de la roca en base al índice de Lilly de la ecuación 1.3, parámetros geométricos de la malla de perforación, parámetros de perforación y características del explosivo, para una posterior gráfica de la granulometría del material después de la voladura, lo que permitió determinar el tamaño medio por donde pasa el 50% de la roca luego del proceso de voladura; además, se puede establecer qué tipo de malla fue recomendable utilizar, si la cuadrada o triangular, dentro de esta ecuación se tuvo el factor de roca o índice de volabilidad.

Luego de obtener la curva de fragmentación por medio de los cálculos del modelo de Kuz-Ram se procedió a elaborar la malla de perforación actual para tener una base del modelo empleado. A partir de la malla actual se realizaron los cambios de los parámetros geométricos, sin alterar parámetros operativos es decir el tipo de explosivo utilizado, maquinaria, operadores y el tipo de malla.

Se obtuvieron tres gráficas de curvas granulométrica para predicción la fragmentación, debido a que se emplearon 3 diferentes diámetros de perforación:

- d perforación = 3 in
- d perforación = 3.5 in
- d perforación = 4 in

Para la obtención de las 3 curvas granulométricas se sacaron los parámetros geométricos de diseño de la malla actual de perforación y para la obtención se utilizó el modelo de López Jimeno elaborado en el año (1980), el cual tiene validez

con un diámetro de perforación $D_p < 165$ mm, los diámetros que la empresa implementó fueron de 101.6 mm a 76.2 mm.

Se procedió a emplear la ecuación 1.7 para la obtención del parámetro principal de la malla de perforación que es el Burden, se desarrolló el factor de corrección, es importante mencionar que se realizó la obtención de los parámetros con un diámetro de 3 in que en milímetros es 76.2 y en metros es 0.0762.

Para el parámetro F factor de corrección, la cual está en función de la clase de roca y tipo de explosivo, se emplearon las siguientes formulas:

La ecuación 2.2 que permitió obtener el parámetro de la ecuación y la fórmula 1.7 que midió la clase de roca en el macizo rocoso intacto.

Parámetros:

p_r = Densidad de la roca (gr/cm³)

V_C = Velocidad sísmica del macizo rocoso (m/s)

$$f_r = \left(\frac{2.7 * 3500}{p_r * V_C} \right) \quad (2.2)$$

$$f_r = \left(\frac{2.7 * 3500}{2.2 * 2600} \right)$$

$$f_r = 1.652$$

La ecuación 2.3 permitió medir la clase de explosivo utilizado en el proceso de voladura.

Parámetros:

p_e = densidad de la carga explosiva (g/cm³)

V_D = Velocidad de detonación del explosivo (m/s)

$$f_e = \left(\frac{p_e * V_D^2}{1.3 * 3660^2} \right) \quad (2.3)$$

$$f_e = \left(\frac{0.8 * 4000^2}{1.3 * 3660^2} \right)$$

$$f_e = 0.735$$

Con los valores obtenidos en función del macizo rocoso y características del explosivo se reemplazó en la ecuación 2.4 para la obtención del factor de corrección:

Parámetros:

f_e = constante que mide clase de explosivo

f_r = constante que mide clase tipo de roca en macizo rocoso.

$$F = f_e * f_r \tag{2.4}$$

$$F = 0.735 * 1.625$$

$$F = 1.194$$

Obtenido el factor de corrección de López Jimeno (1994), se empleó la ecuación 1.7 para la obtención del Burden.

$$B = (0.76 * 3 * (1.194))$$

$$B = (0.76 * 76.2 * (1.194))$$

$$B = (0.76 * 3 * (1.194))$$

$$B = 2.971 \text{ m}$$

Para la obtención del espaciamiento se basó en los criterios utilizados por la empresa Logimin S.A. donde se especifica $B=E$. A continuación, se presenta el cálculo del Espaciamiento:

$$E = B \tag{2.5}$$

$$E = 3 \text{ m}$$

Para obtención del retacado T se empleo la ecuacion 2.6 descrita a continuación

$$T = B - (0.3 * B) \tag{2.6}$$

$$T = 3 - (0.3 * 3)$$

$$T = 2.25 \text{ m}$$

Para obtención de la sobreperforación se utilizó la ecuación 2.7:

$$J = 0.3 * B \tag{2.7}$$

$$J = 0.3 * (3)$$

$$J = 0.9 \text{ m}$$

Para obtención de la longitud de carga de fondo se empleó la ecuación 2.8:

$$lf = ((Dp * 2.54 * 0,5) * (Dp * 2,354 * 0,5) * 3.14) * ((H + Sp - T) * 100) \quad (2.8)$$

$$lf = ((3 * 2.54 * 0,5) * (3 * 2,354 * 0,5) * 3.14) * ((12 + 0.9 - 2.25) * 100)$$

$$lf = 44988.54 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo de perforación específica, se empleó la ecuación 2.9 que se presenta a continuación:

$$PE = \frac{1 + \left(\frac{Sp}{H + Sp}\right)}{B * E} \quad (2.9)$$

$$PE = \frac{1 + \left(\frac{0.9}{12 + 0.9}\right)}{3 * 3}$$

$$PE = 0.119 \text{ mlp/m}^3$$

Para la obtención de los metros lineales de perforación se multiplicó la perforación específica PE por el volumen necesario de extracción que son 5800 m³, obteniendo un valor de 696.6 mlp. totales.

Para el consumo específico de explosivo se utilizó la ecuación 2.10 que se presenta a continuación:

$$CE = \frac{M_{exp.}}{V_{ext}} \quad (2.10)$$

$$CE = \frac{5229.91}{10\ 000}$$

$$CE = 0,52 \text{ Kg/m}^3$$

2.3.3 Fase III.

Esta última etapa se desarrolló en base a las ecuaciones de Kuz-Ram planteadas en la Fase I, con la obtención las curvas granulométricas, para lo cual se realizaron tres ensayos con 3 diámetros diferentes para poder definir la geometría de malla, y para la obtención de una fragmentación óptima.

Se diseñó una nueva malla de perforación en base a los parámetros geométricos óptimos que fueron seleccionados luego de haber realizado la experimentación e interpretación, únicamente variando Burden, espaciamiento y diámetro de perforación.

Se realizó un pequeño análisis de costos sobre el consumo específico de explosivo debido a que en la malla actual se emplea el mismo consumo de explosivo sin importar el número de perforaciones en comparación a la malla que se propone implementar.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el cumplimiento del trabajo de investigación propuesto se efectuó la respectiva evaluación geomecánica, la misma que permitió el rediseño de las mallas de perforación y voladura de acuerdo con la calidad de la roca.

Según las exigencias de los clientes de la empresa, se requiere tener un menor valor del dimensionamiento de fragmentación post-voladura que permita reducir costos y tiempo.

3.1 Caracterización de parámetros Geotécnicos

Para esta caracterización de parámetros geotécnicos se efectuó la interpretación y cálculos, los mismos que fueron llevados a cabo mediante la caracterización del macizo rocoso en los frentes de trabajo, los cuales fueron obtenidos mediante la caracterización desarrollada por el software RocData, cuyos valores se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valoración de los parámetros geotécnicos

Parámetros	Valorización	Unidades
JPS	0.1-0.3	m
JPA	Buza hacia la cara	n/a
RMD	Diaclasado	n/a
RDI	2.2	tn/m ³
HF	0.72	Gpa
Factor de volabilidad	7.51	n/a

Los parámetros operativos fueron proporcionados por la empresa donde destaca la descripción del explosivo utilizado.

3.2 Datos geométricos de la malla de perforación actual

El diseño de la malla de perforación actual se efectuó en base a los parámetros geométricos obtenidos en campo, entre los que se encuentran el diámetro de perforación actual con un valor de 4 in de perforación, que ayudó a determinar la perforación

realizada con un valor de 1.2 m, siendo la más alta entre los 3 escenarios planteados. El diámetro de perforación actual permitió determinar que el valor de la longitud de perforación es de 13.2 m, siendo el valor más alto entre los 3 escenarios propuestos, para la obtención de un volumen de 5800 m³ de material. Para la extracción de esta cantidad de material fue necesario realizar 30 huecos, siendo esta la menor cantidad entre los 3 escenarios lo que genera poca mano de obra y poco desgaste de maquinaria en comparación al tiempo de uso de los otros 2 escenarios. En la Tabla 3.2 se detalla los valores de la malla actual.

Tabla 3.2 Valorización de los parámetros geométricos de la malla actual

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
Dp	Diámetro de perforación	4	in
B	Burden	4	in
E	Espaciamiento	4	in
Hb	Altura de banco	12	
Vn	Volumen necesario de extracción	5800	m ³
T	Taco	3	m
Sp	Sobre-perforación	1.2	m
#N perf.	Número de perforaciones	30	N/A
Lp	Longitud de perforación	13.2	m

3.2.1 Consumo de explosivo de malla actual

En base a la geometría de la malla de perforación actual con un diámetro de 4 in se pudo obtener la perforación específica de 0.068 de metro lineal perforado por m³, lo que indicó que la perforación lineal en comparación con otros 2 escenarios planteados es la menor y representó la menor cantidad mlp, para un volumen de 5800 m³ lo que a su vez generó la menor cantidad de huecos. La carga de anfo utilizado para cada hueco fue de 66.12 Kg, lo que nos indicó que en comparación con los otros escenarios se consumió la mayor cantidad de carga de anfo por motivo del tamaño del diámetro de perforación y a su vez se consumió la mayor cantidad de explosivo con un valor 1983.7 Kg. El valor de consumo específico de explosivo está relacionado con la densidad de explosivo utilizado en la actualidad que según

Logimin S.A. es de 0.8 Kg/m³, donde se generó un consumo de 0.35 Kg/m³, el mismo que a continuación se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Consumo de explosivo de la malla actual

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
PE	Perforación específica	0,068	mlp/m ³
mlp(total)	Metros lineales de perforación	396	mlp
C.A.	Carga de Anfo	66,12	Kg
m.e(total)	Masa total de explosivo utilizado	1983,7	Kg
CE	Consumo específico de explosivo	0,35	Kg/m ³

3.2.2 Diámetro de perforación (= 4in) de la malla actual

La malla obtenida con un diámetro de 4 in, fue simulada con forma cuadrada como se lleva actualmente y una forma triangular o también conocida como pata de gallina que se diferencia en la forma de distribución de las perforaciones, pero se implementa el mismo espaciamiento y burden.

Entre los 3 escenarios con respecto a los 3 diámetros de perforación. La malla propuesta en la Figura 3.1 nos otorgó el X₈₀ menos favorable con la fragmentación más baja para el X₅₀ que es el valor medio de fragmentación en toda la voladura sin importar si la malla es cuadrada o triangular.

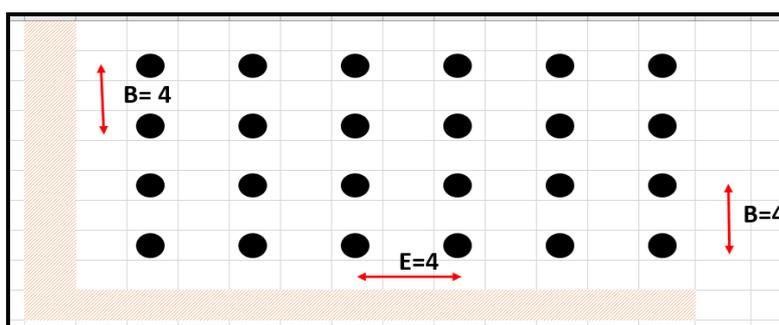


Figura 3.1 Malla de perforación actual con un Dp= 4 in utilizada en la Cantera Cerro Grande

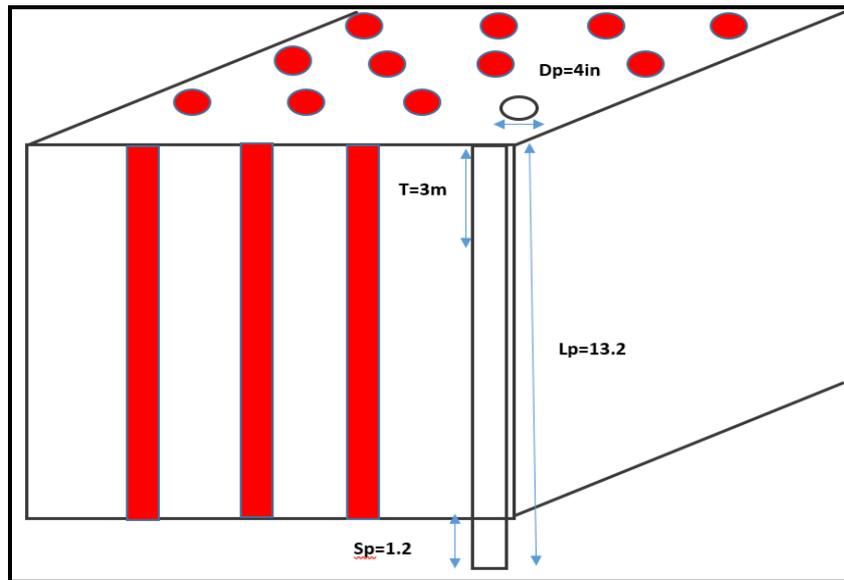


Figura 3.2 Malla de perforación actual con un $D_p = 4$ in utilizada en la Cantera Cerro Grande vista lateral.

3.2.3 Curva granulométrica de malla actual $D_p = 4$ in

Mediante el modelo de Kuz Ram 1986 se obtuvo la curva granulométrica para un diámetro de perforación de 4 in la misma que permitió la observación de 2 curvas. La serie 2 representa una malla de perforación cuadrada y la curva con nombre serie 3 representa una malla triangular o pata de gallina, se puede observar que para el porcentaje de pasante acumulado del 50% en ambas curvas interceptan con un valor de 370 mm de diámetro, lo que indicó que a pesar de cambiar la distribución de las perforaciones se obtendrá X_{50} constante.

Se pudo identificar que el 80% de material fragmentado para la curva serie 2 tiene un valor mayor de tamaño de partícula con 66.4 cm en comparación con la curva serie 3 con un valor 67.2 mm con una diferencia de 35 mm lo que indica que solo cambiando la distribución de las perforaciones, sin alterar el espaciado y burden se obtendrá una disminución al aplicar la malla triangular.

En la serie 3 se pudo identificar que el porcentaje de pasante acumulado del 95% representa la mayoría de la voladura. Se representa con un tamaño de partícula de aproximadamente 95 cm a diferencia de la serie 2 con un valor de $X_{95} = 1043$ mm, que es lo que está sucediendo en la actualidad, se puede identificar que solo

haciendo una variación de la distribución de las perforaciones se obtiene una diferencia de 93 mm como se aprecia en la Figura 3.3.

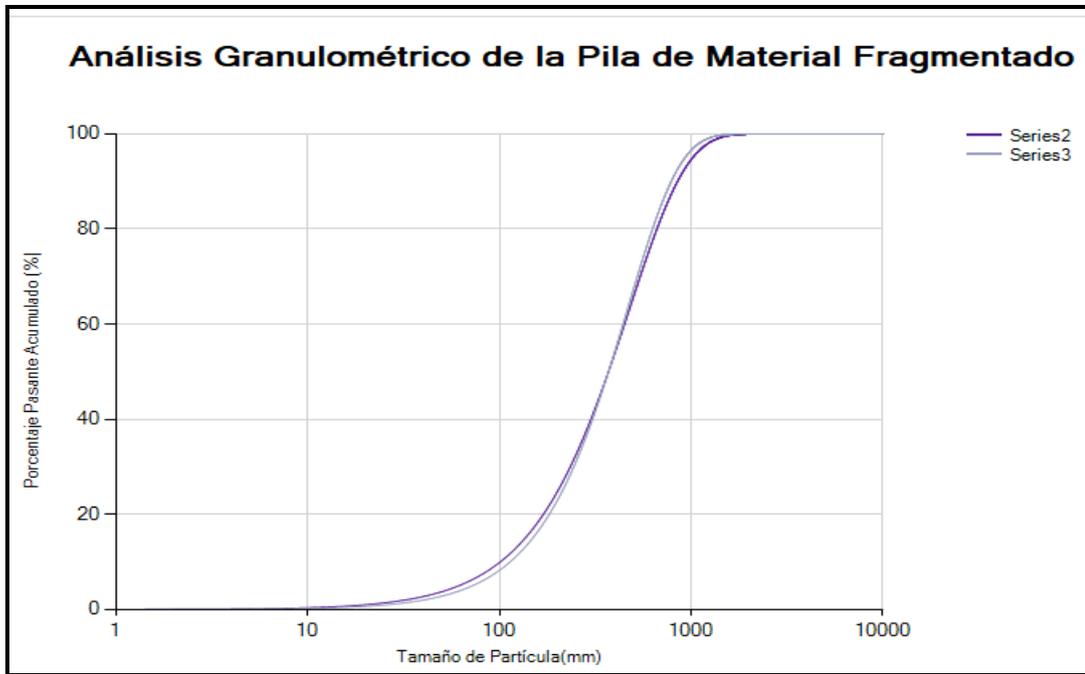


Figura 3.3 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 4 in

3.3 Diseño de malla de perforación de 3.5 pulgadas

Para la ejecución de la modificación se diseñó la malla de 3.5 pulgadas, donde se desarrolló el cálculo de los parámetros geométricos y consumo de explosivo en base a la malla utilizada.

Se evidenció que a partir de un diámetro de perforación de 3.5 in se obtiene una sobre perforación de 1.05 m encontrándose en la media, a su vez tiene el valor medio de longitud de perforación con un valor de 13.05 m, dando como resultado un valor medio de perforaciones en comparación con los otros 2 escenarios de 40 huecos, este representaría en comparación con el uso de los diámetros de 3 in y 4 in un valor equilibrado o intermedio con relación al tiempo y mano de obra, como se detalla en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valorización de los parámetros geométricos de la malla 3.5 in

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
Dp	Diámetro de perforación	3.5	in
B	Burden	3.5	in
E	Espaciamiento	3.5	in
Hb	Altura de banco	12	
Vn	Volumen necesario de extracción	5800	m ³
T	Taco	2.65	m
Sp	Sobre-perforación	1.05	m
#N perf.	Número de perforaciones	40	N/A
Lp	Longitud de perforación	13.05	m

3.3.1 Consumo de explosivo de malla 3.5 pulgadas

En base a la geometría de la malla de perforación con un diámetro de 3.5 in se pudo obtener la perforación específica de 0.088 m lineales perforado por m³, esto indicó que la perforación lineal con este diámetro difiere con un valor de 0.02 mlp con respecto al valor de la malla actual, lo que a su vez generó la cantidad de 40 huecos, siendo un valor intermedio entre los 2 escenarios propuestos. La cantidad de carga de anfo utilizado por cada hueco fue de 51.62 Kg, generando el consumo de masa total de 2064.7 Kg para un valor de 5800 m³ de material que se tenían que extraer.

El consumo específico de explosivo fue de 0.35 Kg/m³ para el diámetro de 3.5 in, que en comparación con el consumo específico de explosivo de la malla actual que fue de 0.35 Kg/l, no existió variación. (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Consumo de explosivo de la malla 3.5 in

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
PE	Perforación específica	0.088	mlp/m ³
mlp(total)	Metros lineales de perforación	522	mlp
C.A.	Carga de Anfo	51.62	Kg
m.e.(total)	Masa total de explosivo utilizado	2064.7	Kg
CE	Consumo específico de explosivo	0.35	Kg/m ³

3.3.2 Diámetro de perforación (3.5in) en malla de perforación propuesta

Para obtener la malla de perforación se realizaron 2 tipos; una malla cuadrada y una malla triangular o pata de gallina, la misma que se diferencia en la forma de distribución de las perforaciones, pero se implementó el mismo espaciamiento y burden. La malla que se muestra en la Figura 3.4 presenta la opción óptima debido a que generó para el X_{80} un valor más reducido de la fragmentación pos-voladura.

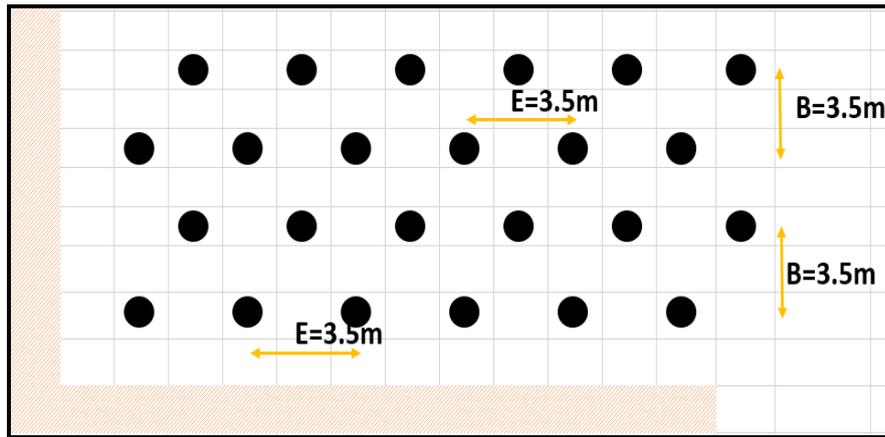


Figura 3.4 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3.5$ in.

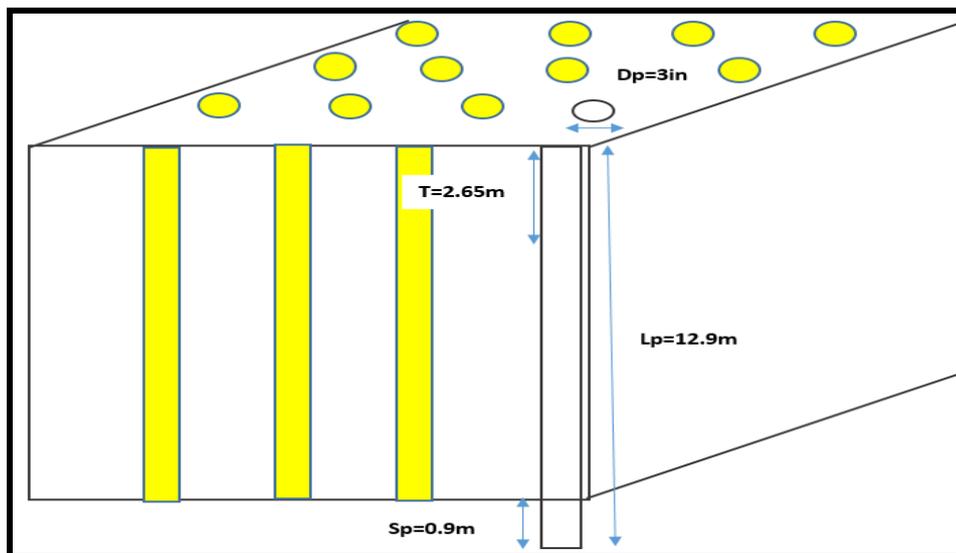


Figura 3.5 Malla de perforación propuesta con un $D_p= 3.5$, vista lateral.

3.3.3 Curva granulométrica de malla Propuesta $D_p= 3.5$ in

El modelo de Kuz Ram 1986 proporcionó la curva granulométrica para un diámetro de perforación de 3.5 in, donde se pudo observar 2 curvas. La serie 2 con color verde representa una malla de perforación cuadrada y la curva con nombre serie 3 con color morado representa una malla triangular. Se puede observar que para el porcentaje de pasante acumulado del 50% en ambas curvas interceptan con un valor de 348 mm de tamaño de partícula, lo que nos indica que a pesar de cambiar la distribución de las perforaciones se obtendrá X_{50} constante.

Adicionalmente, se pudo identificar que el 80% de material fragmentado para la curva serie 2, presentó mayor tamaño de partícula con 620 mm en comparación con la curva serie 3 con un valor 588 mm, determinando una diferencia de 32 mm lo que nos indica que solo cambiando la distribución de las perforaciones, sin alterar el espaciamiento y burden se obtuvo una disminución al aplicar la malla triangular.

En la serie 3 se identificó que el porcentaje de pasante acumulado del 95 % que representa la mayoría de la voladura se encuentra con un tamaño de partícula de aproximadamente 866 mm a diferencia de la serie 2 con un valor de $X_{95}= 949$ mm, por lo que, se pudo identificar que solo haciendo una variación de la distribución de las perforaciones se obtuvo una diferencia de 83 mm.

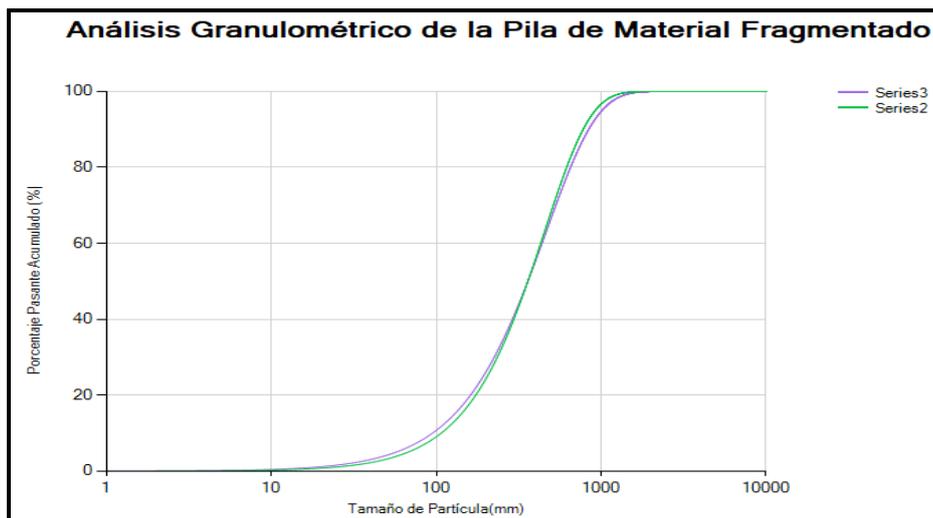


Figura 3.6 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 3.5 in.

3.4 Diseño de la malla de 3 pulgadas

El diseño de la malla de 3 pulgadas se efectuó en base a la valorización de los parámetros geométricos que se exponen en la tabla 3.6, la misma que evidenció como resultado la perforación más pequeña de todas las empleadas en este estudio, con un valor de 0.9 m de sobre-perforación y longitud de perforación de 12.9 m, dando como resultado la mayor cantidad de perforaciones con un valor de 54 huecos. Pero habiendo obtenido la mejor fragmentación entre 3 escenarios.

Tabla 3.6 Valorización de los parámetros geométricos de la malla de 3 in.

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
Dp	Diámetro de perforación	3	in
B	Burden	3	in
E	Espaciamiento	3	in
Hb	Altura de banco	12	m
Vn	Volumen necesario de extracción	5800	m ³
T	Taco	2.25	m
Sp	Sobre-perforación	0.90	m
#N perf.	Número de perforaciones	54	N/A
Lp	Longitud de perforación	12.90	m

3.4.1 Consumo de explosivo de malla 3 pulgadas

En base a la geometría obtenida con un diámetro de 3 in se pudo obtener la perforación específica de 0.119 de metro lineal perforado por m³, lo que indica que disminuir el diámetro de perforación permite la mayor perforación lineal en comparación con los otros 2 escenarios planteados y a su vez, se establece la máxima cantidad mlp para un volumen de 5800 m³ lo que generó la mayor cantidad de huecos.

La carga de anfo utilizada por cada hueco fue de 38.83 kg, lo que nos indica que en comparación con los otros escenarios se consumió menos cantidad de carga de anfo y menor cantidad de explosivo, siendo el valor de consumo específico de explosivo de 0.35 kg/m³; en comparación con el diámetro de perforación de 3.5

pulgadas tienen un valor de 0.35 Kg/m^3 y con respecto al escenario de 4 pulgadas se mantiene en 0.35 Kg/m^3 . En términos generales el consumo específico se mantiene constante a pesar de variar el diámetro de perforación (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Consumo de explosivo de la malla para D_p de 3 in

Parámetros	significado	Valorización	Unidades
PE	Perforación específica	0,119	mlp/m3
mlp(total)	Metros lineales de perforación	696,60	mlp
C.A.	Carga de Anfo	38,83	Kg
m.e.(total)	Masa total de explosivo utilizado	2097,07	Kg
CE	Consumo específico de explosivo	0,35	Kg/m3

3.4.2 Malla propuesta (Diámetro de perforación = 3in)

La malla obtenida con un diámetro de 3 in fueron 2; una malla cuadrada y una malla triangular. La malla triangular descrita en la Figura 3.7 es la óptima entre los 3 escenarios con respecto a los 3 diámetros de perforación.

La malla propuesta en la Figura 3.8 otorgó el X_{80} más favorable para una fragmentación más pequeña, manteniendo constante el X_{50} que es determinado como el valor medio de fragmentación en toda la voladura sin importar si la malla es cuadrada o triangular.

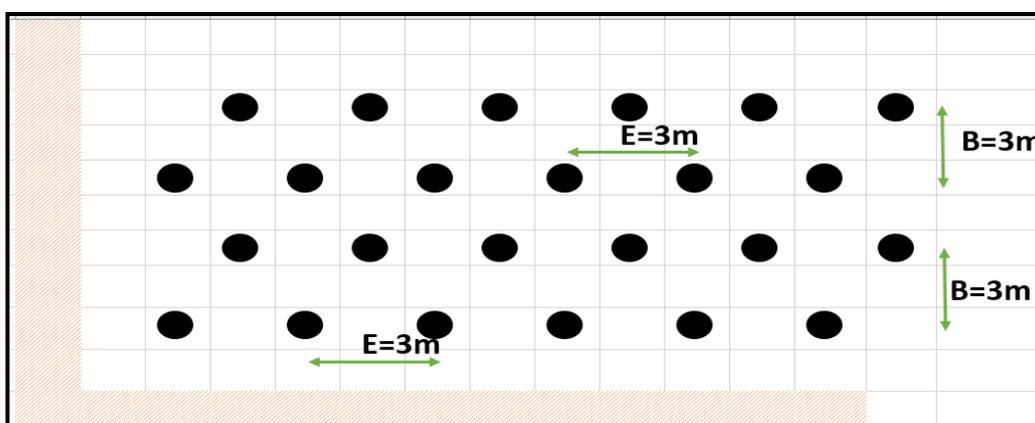


Figura 3.7 Malla de perforación propuesta con un $D_p = 3 \text{ in}$.

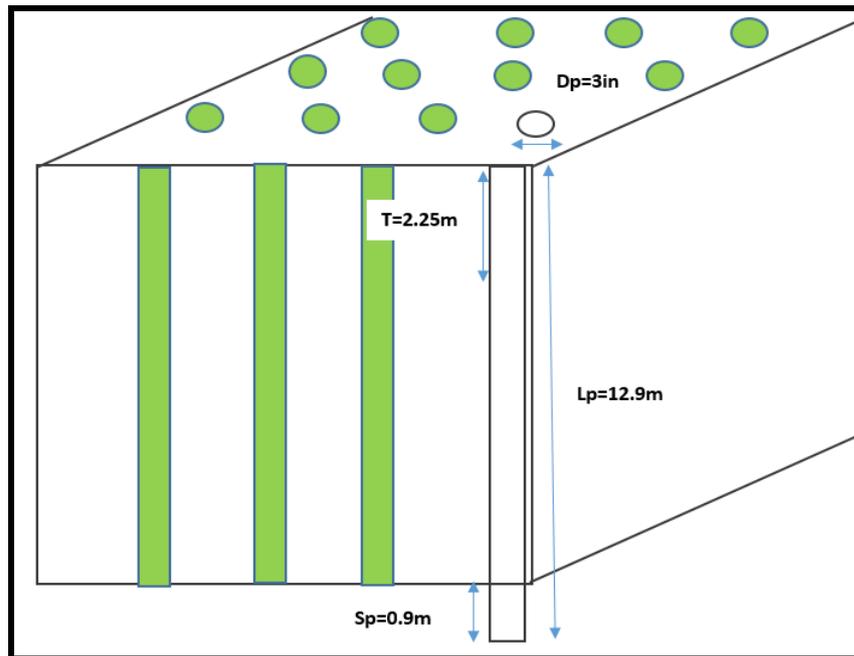


Figura 3.8 Malla de perforación propuesta con un $D_p = 3$ in, vista lateral.

3.4.3 Curva granulométrica de malla propuesta $D_p = 3$ in

El modelo de Kuz Ram 1986 proporcionó la curva granulométrica para un diámetro de perforación de 3 in, donde se pudo observar 2 curvas. La serie 2 con color morado representa una malla de perforación cuadrada y la curva con nombre serie 3 con color rojo representa una malla triangular.

Se puede observar que para el porcentaje de pasante acumulado del 50% en ambas curvas, se interceptan con un valor de 327 mm de tamaño de partícula, lo que nos indica que a pesar de cambiar la distribución de las perforaciones se obtendrá X_{50} constante.

Adicionalmente, se pudo identificar que el 80% de material fragmentado para la curva serie 2 tiene un valor mayor de tamaño de partícula con 580 mm en comparación con la curva serie 3 con un valor 550 mm con una diferencia de 30 mm lo que indica que solo cambiando la distribución de las perforaciones, sin alterar el espaciamiento y burden, obtenemos una disminución al aplicar la malla triangular.

En la serie 3 se identificó que el porcentaje de pasante acumulado del 95 % que representa la mayoría de la voladura se encuentra con un tamaño de partícula de

aproximadamente 883 mm a diferencia de la serie 2 con un valor de $X_{95} = 807$ mm, además se pudo observar que solo haciendo una variación de la distribución de las perforaciones se obtiene una diferencia de 76 mm (Figura 3.9).

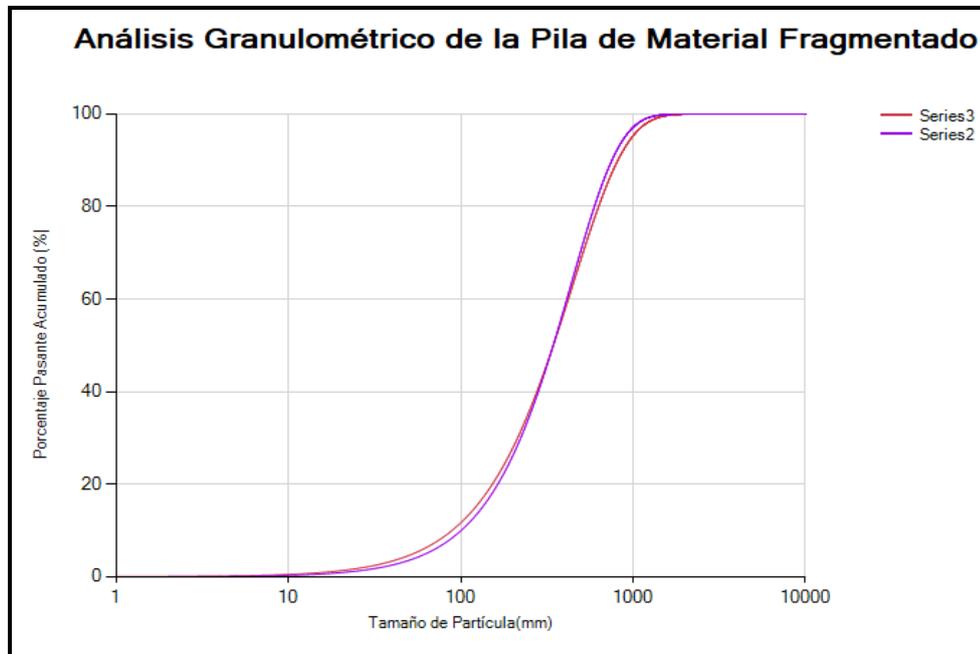


Figura 3.9 Curvas granulométricas para un diámetro de perforación de 3 in.

3.4.4 Análisis de curvas granulométricas con los 3 diámetros de perforación diferentes.

Para efectuar el análisis de curvas granulométricas, se obtuvo una gráfica donde se puede apreciar los 3 diámetros diferentes con una distribución de malla cuadrada y triangular, donde se observó el comportamiento de cada uno.

La curva serie 2 representa un diámetro de perforación de 4 in y malla cuadrada, la curva serie 3 representa un diámetro de 4 in pero con una malla triangular. La curva serie 4 representa un diámetro de perforación de 3.5 in y malla cuadrada, la curva serie 5 representa un diámetro de 3.5 in pero con una malla triangular, la curva serie 6 representa un diámetro de perforación de 3 in y malla cuadrada, la curva serie 7 representa un diámetro de 3 in pero con una malla triangular.

Se pudo analizar que a medida que se disminuye el diámetro de perforación, la granulometría X_{50} , X_{80} y X_{95} disminuyen; además, se puede observar que cuando se cambia a una malla con una distribución triangular, donde se disminuye aun

más el valor de la fragmentación en valores de X_{95} y X_{80} pero no existe variación en el valor de X_{50} que representa el tamaño característico de la mitad del material fragmentado como se puede observar para el diámetro implementado de 4 in y con la malla cuadrada se obtuvo un X_{50} igual 370 mm y con una malla triangular se obtuvo un valor de X_{50} igual 370 mm sin variaciones.

Sin embargo, para X_{85} en malla cuadrada se obtuvo 672 mm y en malla triangular se obtuvo un valor de X_{85} de 637 mm. Para el X_{95} con malla cuadrada se obtuvo un valor de 1043 mm y para una malla triangular se obtuvo un valor 950 mm.

Cuando se efectúa una comparación con el diámetro de perforación utilizado actualmente en la cantera Cerro Grande con un valor de 4 in, se obtuvo para un X_{95} un valor de 1043 y la propuesta de 3.5 in con una distribución triangular un valor 866 mm, mejorando la fragmentación, pero no fue la más óptima entre los escenarios propuestos. La diferencia con respecto a la malla utilizada en la actualidad es de X_{95} de 177 mm.

Posteriormente, se pudo comparar la malla cuadrada utilizada en la actualidad con un diámetro de perforación de 4 in y la malla triangular de 3 in la que proporcionó la fragmentación mas pequeña entre los 3 escenarios presentes se obtuvo un valor de fragmentación promedio X_{50} reduciendolo en 43 mm.

Se determinó que al realizar la variación a los parametros de diámetro 3 in y una malla triangular se obtuvo que para el porcentaje de pasante acumulado del 80% se redujo en 172 mm. La última comparación que se realizó fue para la fragmentación mayor al 95% que representa casi toda la voladura, al realizar los cambios con un diámetro de 3 in y malla triangular se pudo obtener una diferencia

con respecto a la malla utilizada en la actualidad de 236 mm, siendo la mejor opción al momento de optimizar la fragmentación (Figura 3.10).

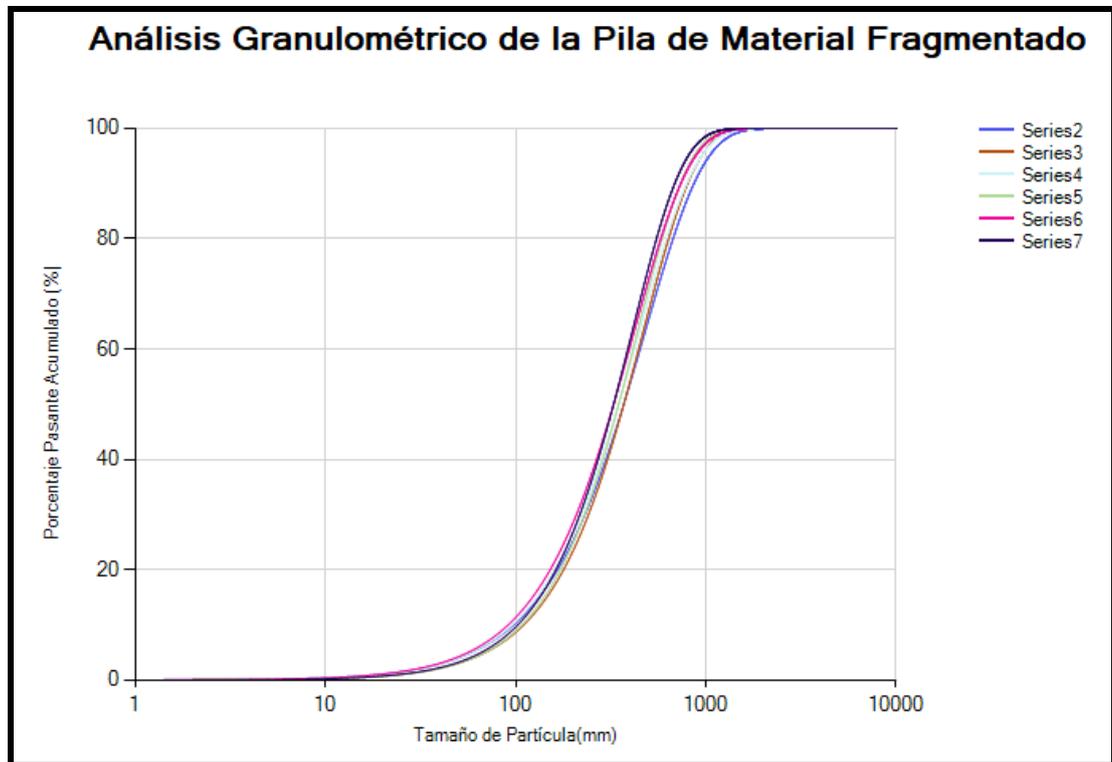


Figura 3.10 Curvas granulométricas con los 3 diámetros de perforación diferentes

3.4.5 Análisis de resultados de los escenarios propuestos

Los resultados obtenidos en los escenarios propuestos se pueden visualizar en la tabla 3.8 donde se presentan todas las características del modelo de Kuz-Ram aplicados en el programa Kuz-Ram 1986, con un diámetro de 4 in convertidos en milímetros 101.6 mm, el mismo que determinó un valor de 3 m de taco, se obtuvo un valor de 4 de esparcimiento y 4 de burden. Se trabajó con una altura de 12 metros de banco, no se realizaron variaciones en el explosivo utilizado, se trabajó con una densidad de explosivo de 0.8 g/cm^3 y potencia relativa por peso de explosivo con un valor de 107%. Se determinó el exponente de uniformidad con un valor de n igual 1.47 mediante la ecuación 1.4 de Rosin Rammler todos estos parámetros son de la malla que se tiene en la actualidad implementada.

Además, se puede observar que para un diámetro de 3.5 in convertidos en milímetros 88.6 mm, se determinó un valor 2.65 m de taco y se obtuvo un valor de 3.5 de espaciamento, 3.5 de burden sin alterar los parámetros operativos y

condiciones y características del explosivo, donde se estableció el exponente de uniformidad con un valor de n igual 1.61 mediante la ecuación 1.4 de Rosin Rammler, los resultados obtenidos fueron a partir de la geometría propuesta y se obtuvo una mejora de la fragmentación en 6% para X_{50} , donde el porcentaje de pasante acumulado del 80% se determinó con una mejora del 13% y para el porcentaje de pasante acumulado del 95% que representa casi todo el material, mejoró un 17%.

Finalmente, se pudo visualizar que cuando se aplica un diámetro de 3 in convertidos en milímetros 76.2 mm se determinó un valor 2.25 m de taco y se obtuvo un valor de 3 de espaciamiento, 3 de burden sin alterar los parámetros operativos, condiciones y características del explosivo. Además, se determinó el exponente de uniformidad con un valor de n igual 1.62, los resultados obtenidos fueron a partir de la geometría propuesta y tiene una mejora de la fragmentación de 11.62% para X_{50} , el porcentaje de pasante acumulado del 80% mejoró un 18.15% y para el porcentaje de pasante acumulado del 95% tuvo una mejora del 22.63% de fragmentación.

Tabla 3.8 Resultados del análisis granulométrico de 3 escenarios diferentes

	Esp (m)	Bur (m)	Sp (m)	T (m)	Dp (mm)	n	X_{50}(mm)	X_{80} (mm)	X^{95} (mm)	Malla
Serie 2	4	4	1,2	3	101,6	1,41	370	672	1043	C
Serie 3	4	4	1,2	3	101,6	1,55	370	637	950	T
Serie 4	3,5	3,5	1,05	2,65	88,6	1,46	348	620	949	C
Serie 5	3,5	3,5	1,05	2,65	88,6	1,61	348	588	866	T
Serie 6	3	3	0,9	2,25	76,2	1,47	327	580	883	C
Serie 7	3	3	0,9	2,25	76,2	1,62	327	550	807	T

3.4.6 Análisis de costos de los escenarios propuestos:

La empresa para efectuar sus trabajos requiere alquilar un martillo hidráulico, para disminuir las rocas con un valor X_{95} mayor a 1 metro de diámetro, lo que genera un tiempo adicional de 19.4 horas, lo que equivale a un costo de perforación de \$3872 dólares; cuando se alquila el martillo hidráulico tiene un costo de \$13.33 m³ elevando un valor de \$1.94 por m³ en el costo total, lo que conlleva a un aumento de 37.4 horas, donde el costo final con el aumento del alquiler de la perforadora generó un costo de \$7112.

Por lo que se determina que la mejor opción dentro de este estudio sería la malla triangular de 3 in de diámetro, debido a que permite ahorrar \$0.15 centavos por m³ y disminuyendo 5.7 horas. Lo que permitió que la fragmentación para X₉₅ genere una mejora del 22.63% y para un X₈₀ mejoró 18.15%.

Se obtuvo los costos del proceso de perforación y voladura para los diámetros de 3 in, 3.5 in y 4 in donde se puede observar que el costo final del proceso por cada m³ extraído sin alterar los parámetros de maquinaria utilizada, el valor con mayor costo por metro cúbico es el del diámetro de 3 in con un aumento del 39.06%. Cuando se implementó una perforadora hidráulica para la fragmentación de las rocas con diámetros mayores a 1 metro, se encontraba en el escenario de perforadoras con diámetro de 4 in, se adicionó un valor de 200 \$/hora de alquiler donde se utilizó 19.4 horas adicionándoles, generando un costo de \$43872 al monto en condiciones estándares aumentado el valor a \$1.22 por m³.

Se pudo observar que el consumo de explosivo para la voladura realizada con diámetros de 4 in fue de 1983.66 Kg lo que costó en explosivo \$3.649,94 en comparación con el de diámetro de 3.5 in donde se obtuvo un consumo de explosivo 2064.67 Kg y tuvo un costo de explosivo \$3.799,04, donde se obtuvo una diferencia de 81 Kg que representa 4% de lo empleado en comparación con un diámetro más reducido que generó una mejor fragmentación y en términos de costo de explosivo, represento un valor más elevado, con una diferencia de \$ 149.10 que represento un aumento del 4%. Es importante mencionar que estos costos no incluyen el valor de emplear una perforado de martillo para reducir los bloques de roca iguales o mayores a un metro que se obtienen para un X₉₅ en diámetros de 4 in.

Se pudo observar que al disminuir el diámetro de perforación a 3.5 in se tuvo que emplear mayor cantidad de accesorios como se observa en el Anexo 3 y 4 donde se empleo mayor cantidad de Booster y Fanel Dual, con una cantidad de 40 en comparación con la empleada para un diámetro de 4 in que fue de 30. Además, se pudo analizar que, para la obtención de una mejor fragmentación, el uso de explosivo no tiene mayor incidencia en la variación de costos.

Se analizó el proceso de perforación para el diámetro de 3.5 in y el uso de una perforadora ECM-590 la cual tiene un rendimiento de velocidad de perforación de 22 mlp/hora incluido la experticia del operador y rendimiento del varillaje.

Adicionalmente, se tomó como referencia para el cálculo de costo de perforación por hora, el valor en el mercado promedio de 180 \$/mlp. Para el diámetro de perforación de 4 in se obtuvo la cantidad de 30 perforaciones con un total de 369 metros lineales perforados, empleando 18 horas de perforación para el volumen establecido, obteniendo un gasto de \$3240.00 en total y un costo por m³ de \$0.56. Sin embargo, para el diámetro de perforación de 3.5 in se obtuvo la cantidad de 40 perforaciones, aumentando la cantidad de mlp con un total de 522, empleando 23.7 horas de perforación para el volumen establecido, obteniendo un gasto de \$4270.91 en total y un costo por metro cúbico de \$0.76.

Se puede visualizar que el costo aumentó en \$1030.91, representando un 31.82% y para costo por m³ se obtuvo una diferencia de \$0.20 que representa 26.31% del valor empleado para un diámetro de 4 in, el generador de bloques mayores de 1 metro sin considerar el uso de martillo para la fragmentación de bloques sobredimensionados.

Se pudo analizar que para la obtención de una mejor fragmentación en el análisis de costos de perforación existe un aumento del 31 % con respecto al valor actual. Para el costo de perforación y voladura, se obtuvo para el diámetro de 4 in un valor a pagar de \$1.29 por m³ y para un diámetro de perforación de 3.5 in un valor de \$1.48 por m³, representando una diferencia de \$ 0.19 en aumento por cada m³, esto representa un valor actual de 14.72%.

Se pudo evidenciar que el consumo de explosivo para la voladura realizada con diámetros de 4 in fue de 1983.66 Kg lo que equivale a un costo en explosivo de \$3.649,94 en comparación con el de diámetro de 3.5 in donde el consumo de explosivo fue de 2064.67 Kg y un costo de explosivo de \$3.799,04, donde se obtuvo una diferencia de 81 Kg que representa 4% de lo empleado en comparación con un diámetro más reducido que generó una mejor fragmentación y en términos de costos de explosivos, aumento \$149.10.

Se pudo observar que al disminuir el diámetro de perforación a 3.5 in se tuvo que emplear mayor cantidad de accesorios como se observa en el Anexo 4 y 5 donde se empleó mayor cantidad de Booster y Fanel Dual, con una cantidad de 40 en comparación con la empleada para un diámetro de 4 in que fue de 30.

También se pudo observar que el consumo de explosivo para la voladura realizada con diámetros de 3 in, fue de 2097.07 Kg lo que costo en explosivo es \$38558.61. En relación con el diámetro utilizado en la actualidad, se obtuvo una diferencia de

113.41 Kg que representa 4% de lo empleado en comparación con un diámetro más reducido que generó una mejor fragmentación y en términos de costo de explosivo un aumento de \$149.10 que representa un 5.71%.

Es importante mencionar que estos costos son en condiciones y escenarios iguales, sin tener en cuenta, el valor de emplear una perforadora de martillo para reducir los bloques de roca iguales o mayores a un metro que se obtienen para un X₉₅ para diámetro de 4 in. Adicionalmente, se evidenció que al disminuir el diámetro de perforación a 3 in se tuvo que emplear mayor cantidad de accesorios como se observa en el anexo 5 donde se utilizó mayor cantidad de Booster y Fanel Dual, con una cantidad de 54 en comparación con la empleada para un diámetro de 4 in que fue de 30.

Finalmente, se analizó el proceso de perforación para el diámetro de 3 in, donde se implementaron los mismos parámetros de perforación, se consideró los mismos valores de rendimiento de maquinaria y valores promedios en el mercado. Para este diámetro de perforación se obtuvo la cantidad de 54 perforaciones, aumentando la cantidad de mlp con un total de 669.60, empleando 31.7 horas de perforación para el volumen establecido, obteniendo un gasto de \$ 5699.45 en total y un costo de voladura por m³ de \$0.97.

Se puede visualizar con respecto al diámetro de 4 in, que se obtuvo un aumento para la perforación total de \$2459.45 que representa un 75.9 % y para el costo por m³ se obtuvo una diferencia de \$0.41 lo que representa 73.21% del valor empleado, para un diámetro de 4 in más el generador de bloques mayores de 1 metro sin considerar el uso de martillo hidráulico para los bloques antes mencionados.

Se pudo analizar que para la obtención de una mejor fragmentación en el análisis de costos de perforación existe un aumento del 75.9 % con respecto al valor actual.

En relación al costo de perforación y voladura se estableció que para el diámetro de 4 in se debe pagar un valor de \$1.28 por m³ y para un diámetro de perforación de 3 se debe pagar \$1.78 por m³, se logró una diferencia de \$ 0.50 de aumento por cada m³, esto representa un aumento al valor actual de 39.06%, sin considerar el alquiler del martillo hidráulico (Tabla 3.9).

Tabla 3.8. Costo de producción de implementación de malla de perforación

	Consumo de explosivo (ANFO)	Costo de Consumo ANFO	Costo Voladura	Número de perf.	Número horas perf.	Costo de perforación total	Costo de voladura m³	Costo de perforación m³	Costo vol.+ Perf. m³
Dp= 4in	1983,66 Kg	\$3.649,94	\$4.169,46	30,00	18,0 horas	\$ 3.240,00	\$ 0,72	\$0,56	\$1,28
Dp= 4in + alquiler PM	1983,66 Kg	\$3.649,94	\$4.169,46	30,00	37,4 horas	\$ 7112,00	\$ 0,72	\$1,22	\$1,94
Dp=3.5 in	2064.67 Kg	\$3.799,04	\$4.481,26	40,00	23,7 horas	\$ 4.270,91	\$ 0,76	\$0,72	\$1,48
Dp=3 in	2097.07 Kg	\$3.858,61	\$4.768,61	54,00	31,7 horas	\$ 5.699,45	\$ 0,81	\$0,97	\$1,78

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se optimizó el proceso de perforación y voladura en la concesión minera Cerro Grande, ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, mediante la modificación de los parámetros geométricos de la malla de perforación, identificando que la mejor opción es una malla 3x3 metros generando una optimización en la fragmentación del 22.63% para el pasante acumulado del 95%.

A partir de la malla actual de 4 x 4m se pudo obtener una malla 3.5 x 3.5 m y de 3 x 3 m donde el parámetro de entrada de la malla de perforación más conveniente tiene sobreperforación de 0.9 m, taco de 2.65 m, diámetro de perforación de 76.2 mm, y un exponente de Rosin Rambler de 1.62. El pasante acumulado para el 80% de material que es el valor característico de la voladura con 327 mm, el pasante acumulado para el 95% donde existía rocas con tamaño mayores a un metro se redujo a 807 mm en una malla con distribución triangular.

Se puede concluir que a pesar de que se cambie la malla de perforación y aumentando el número de huecos, para un volumen constante de material, el consumo de específico de explosivo no varía manteniéndose en un valor de 0.35.

Se determinó que el uso de una malla de perforación 4 x 4 metros más el adicional de un martillo hidráulico para la disminución de las rocas con diámetros mayores a 1 metro generaban un tiempo de 37.4 horas, mientras la malla más favorable 3 x 3 m lo realiza en 31.7 horas, obteniendo una mejora con respecto al tiempo de 15.4%.

Finalmente, se identificó que para reducir los costos de perforación y voladura en la cantera Cerro Grande se debe implementar una malla 3x3 m debido a que el valor por m³ de extracción le costaría a la empresa \$1.78, en comparación con el uso de una malla 4x4 más el martillo hidráulico que generan un costo de \$1.94. En este sentido, la propuesta planteada significa una optimización del costo en 8.25% y un ahorro por m³ de \$0.16.

Recomendaciones

Con los resultados obtenidos en este estudio se recomienda a la en la concesión minera Cerro Grande, ubicada en el cantón Durán, provincia del Guayas, desarrollar el uso de la nueva malla de perforación y voladura, siguiendo como base esta investigación efectuada, a fin de lograr mejores rendimientos y aumento en sus ingresos

Capacitar al personal que labora en la concesión minera Cerro Grande, en metodologías adecuadas de operaciones de perforación y voladuras efectuadas de acuerdo con el nuevo diseño de malla de perforación desarrollado en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Armstrong, J. R., & Menon, R. (2015). Enciclopedia de salud y Seguridad en el Trabajo. 200. Valencia, España: INSST. Obtenido de https://baudi.com.ar/estudiantes/wp-content/uploads/2022/01/Enciclopedia-de-salud-y-seguridad-en-el-trabajo-OT_compressed-1-2000.pdf
- Barrantes, R. (2019). Reducción de costos mediante la optimización de las variables del diseño de perforación y voladura. 85. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Basurto, V. (2020). *Facies volcanoclásticas y procesos deposicionales de la formación Cayo (Cretácico) al sureste del cerro azul, Guayaquil - Ecuador*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. Obtenido de TESIS_VANESSA_BASURTO_2020.pdf
- Benitez, S. (2021). *Evolución geodinámica de la costa sur ecuatorina desde el cretácico superior al terciario*. Université Joseph Fourier. Obtenido de EVOLUCINGEODINMICADELACOSTASURECUATORIANADESDEELCRETICOCOSUPERIORALTERCIARIO-TESSBA-PRIMERAEDICIONESPAOL2021.pdf
- Cahuapaza, W. (2022). *Optimización de costos en perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la unidad minera Apumayo S.A.* Perú: Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/18092/Cahuapaza_Saavedra_William.pdf?sequence=1
- DATAMINE. (1981). *DATAMINE*. Obtenido de www.dataminesoftware.com
- Guzmán, P., & Orozco, C. (2018). Optimización del diseño de explotación de la cantera. 146. Guayaquil: ESPOL. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/48807/DCD70392.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lituma, I. (2021). Caracterización Geomecánica de los aflojamientos ubicados en la cantera Cerro Grande, Cantón Durán. 121. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/53641>
- Lorenzo, E., Roca, W., Martínez, M., Morato, A., & Escandón, P. (2018). Correlación geoquímica entre crudos y rocas del sistema petrolero de la península de Santa

Elena y el golfo de Guayaquil. *Revista Boletín de Geología*, 40(1), 31 -42. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/3496/349654901003/html/>

Meteorcomm. (2022). *Software Wipfrag*. Obtenido de <http://www.meteorcomm.com.ar/productos.php>

Nader, N. (2018). *Implementación de parámetros de perforación y voladura en el nivel 70, frente 1 de la cantera planta Tolú viejo de la empresa cementos Argos S.A.* Valledupar: Fundación Universitaria del Área Andina. Obtenido de <https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/931/Implementaci%C3%B3n%20de%20par%C3%A1metro%20de%20perforaci%C3%B3n%20y%20voladura%20en%20el%20nivel%207.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rincón, J., & Molina, J. (2017). Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada. *Mejoramiento del arranque mediante el control de las desviaciones de perforación, caso mina "El Roble", Colombia*(42), 45 - 54. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1695/169552036004/html/>

Rojas, E. (2018). Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. *Revista Industrial Data*, 21(1), 17 - 26. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/816/81658059003/html/>

Villalba, M. (2020). *Optimización granulométrica del material volado a partir de la mejora de estándares en las operaciones unitarias de perforación y voladura en la Unidad Minera Hércules - Compañía Minera Lincuna*. Huancayo: Universidad Continental. Obtenido de [IV_FIN_110_TE_Villalba_Cardenas_2020](#)

ANEXOS

Anexo 1. Índice de Volabilidad

Índice de Volabilidad (Segun Lilly 1986)

Espaciamiento de Fracturas(JPS) 20			
<input type="radio"/> <0.1m	<input checked="" type="radio"/> 0.1- 0.3m	<input type="radio"/> 0.3-0.95m	<input type="radio"/> >0.95m
Angulo del Plano de Fracturas(JPA 40)			
<input type="radio"/> Horizontal	<input type="radio"/> Buza Fuera de la Cara		
<input checked="" type="radio"/> Buza hacia la Cara	<input type="radio"/> Rumbo Perpendicular a la cara		
Descripcion del Macizo Rocoso(RMD 60)			
<input type="radio"/> Pulverulento/Quebradizo	<input checked="" type="radio"/> Diaclasado	<input type="radio"/> Masivo	
Influencia de la Densidad(RDI) 5			
Densidad(tn/m3):	<input type="text" value="2.2"/>		
Factor de Dureza(HF) 0,24 <input checked="" type="radio"/> E< 50 GPa <input type="radio"/> E> 50 GPa			
Módulo de Young	<input type="text" value="0.72"/>		

Anexo 2. Tipo de roca

Tipo de Roca Factor de Roca A	
Muy Suave	4.1 - 5
Suave	5 - 6
Tenacidad Media	6 - 7.5
Media - Tenaz	7.5 - 9
Tenaz	9 - 11
Muy Tenaz	11 - 15

Factor A : 7,51

Anexo 3. Tabla de clasificación de GSI. Fuente: RocData

Rock Type: <input type="text" value="General"/>	SURFACE CONDITIONS					
GSI Selection: <input type="text" value="45"/> <input type="button" value="OK"/>	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR	
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →					
	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	90			N/A	N/A
		80				
		70				
		60				
		50				
		40				
30						
20						
10						
		N/A	N/A			10

Anexo 4. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 4 in

VOLADURA										
MALLA (mxm)	<input type="text" value="4"/>	X	<input type="text" value="4"/>	Volumen (m³)	<input type="text" value="5808,00"/>	LT ARRIBA	<input type="text"/>	m		
Diámetro (pulg)	<input type="text" value="4"/>	pulg		Volumen (ton)	12777,60 ton	LT ABAJO	<input type="text"/>	m		
Inclinación (°)				P.E. (mlp/m²)	0,0682 mlp/m²	TACO	<input type="text" value="3"/>	m		
δ CC (Kg)	<input type="text" value="0,8"/>	Kg		C.E. (Kg/m²)	<input type="text" value="0,3415"/>	U	<input type="text" value="1,2"/>	m		
δ CF (Kg)	<input type="text" value="0,8"/>	Kg		C.E. (Kg/ton)	<input type="text" value="0,1552"/>					
#	Profnd (m)	Taco (m)	Cfondo (m)	Ccolm (m)	CF (Kg)	CC (Kg)	Booster 240 gr	Taponex ABAJO	Taponex ARRIBA	Taponex MEDIO
Total	396,00			306		1983,7	30			
costo explosivo										
	UNIDAD	COSTO	CONSUMO	TOTAL						
	ANFO	Kg	1,84	1983,66571	3649,94491					
	BOOSTER	Unid	4,56	30	136,8					
	FANEL DUAL	Unid	11,71	30	351,3					
	CONECTOR	Unid	9,54	3	28,62					
	MECHA LENTA	m	0,6	3	1,8					
	FULMINANTE #8	Unid	0,5	2	1					
				total	4.169,46 \$					
	Costo m³				0,72 \$					
velocidad perforación		Costo hora	numero horas	total						
	perforadora ECM-590	22	180	18	3.240,00 \$					
	Costo m³				0,56 \$					
	Costo total				1,29 \$					

Anexo 5. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 3.5 in

VOLADURA									
MALLA (mxm)	3,5	X	3,5	Volumen (m³)	5918,31	LT ARRIBA		m	
Diámetro (pulg)	3,5	pulg		Volumen (ton)	13020,29 ton	LT ABAJO		m	
Inclinación (°)		°		P.E. (mlp/m³)	0,0882 mlp/m³	TACO	2,65	m	
δ CC (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/m³)	0,3489 Kg/m³	U	1,05	m	
δ CF (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/ton)	0,1586 Kg/ton				

#	Profnd (m)	Taco (m)	Cfondo (m)	Ccolm (m)	CF (Kg)	CC (Kg)	Booster 240 gr	Taponex ABAJO	Taponex ARRIBA	Taponex MEDIO
		costo explosivo								
		UNIDAD	COSTO	CONSUMO	TOTAL					
		Kg	1,84	2064,697806	3799,044					
		Unid	4,56	40	182,4					
		Unid	11,71	40	468,4					
		Unid	9,54	3	28,62					
		m	0,6	3	1,8					
		Unid	0,5	2	1					
				total	4481,264					
				Costo m³	0,757186					
		velocidad perforación	Costo hora	numero horas	total					
		perforadora ECM-590	22 mlp/hora	180	23,72727273	4270,909				
				Costo m³	0,721643					

Anexo 6. Cálculo de consumo de explosivo y perforación para diámetros de 3 in

VOLADURA											
MALLA (mxm)	3	X	3	Volumen (m³)	5860,53	LT ARRIBA		m			
Diámetro (pulg)	3	pulg		Volumen (ton)	12893,16 ton	LT ABAJO		m			
Inclinación (°)	10	°		P.E. (mlp/m²)	0,1189 mlp/m²	TACO	2,25	m			
Ø CC (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/m³)	0,3578 Kg/m³	U	0,9	m			
Ø CF (Kg)	0,8	Kg		C.E. (Kg/ton)	0,1626 Kg/ton						
#	Profnd (m)	Taco (m)	Cfondo (m)	Ccolm (m)	CF (Kg)	CC (Kg)	Booster 450 gr	Taponex ABAJO	Taponex ARRIBA	Taponex MEDIO	Carga explosiva
Total	696,60			575,1		2097,1	54				2097,07

costo explosivo			
	UNIDAD	COSTO	TOTAL
ANFO	Kg	\$ 1,84	2097,0701 \$ 3.858,61
BOOSTER	Unid	\$ 4,56	54 \$ 246,24
FANEL DUAL	Unid	\$ 11,71	54 \$ 632,34
CONECTOR	Unid	\$ 9,54	3 \$ 28,62
MECHA LENTA	m	\$ 0,60	3 \$ 1,80
FULMINANTE #8	Unid	\$ 0,50	2 \$ 1,00
total			\$ 4.768,61
		Costo m³	\$ 0,81

velocidad perforación			
	Costo hora	numero hora	total
perforadora ECM-590 22 mlp/hora	180 \$/hora	31,7 horas	\$ 5.699,45
		Costo m³	\$ 0,97

Anexo 7. Porcentaje de rendimiento de costos y fragmentación del proceso de perforación y voladura

Malla	Tipo	Fragmentación X50 (%)	Fragmentación X80 (%)	Fragmentación X95 (%)	C.E	Costos de perf. (%)	t perf. (%)	Costo Perf.+ Vol. por m3 (%)
3.5 x 3.5	C	6%	7,74%	9%	0,35	39%	36%	23%
3.5 x 3.5	T	6%	13%	17%				
3 x 3	C	11,62%	13,70%	15,34%	0,35	19.86%	15.24%	8.25%
3 x 3	T	11,62%	18,15%	22,63%				

Anexo 8. Toma de datos geo mecánicos



Anexo 9. Roca con tamaños mayores a un metro



Anexo 10. Roca con fragmentación con diámetros pequeños

