

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**DETERMINACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN FUNCIÓN AL
MODELO KUZ – RAM DE LA CALERA BENDICIÓN DE DIOS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS**

**AUTOR:
BACH. SÁNCHEZ BALCÁZAR, HILTON GYANCARLOS**

**ASESOR:
M.Cs. Ing. GONZALES YANA, ROBERTO SEVERINO**

CAJAMARCA-PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** SÁNCHEZ BALCÁZAR HILTON GYANCARLOS
DNI: 77287102
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
- Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**
DETERMINACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN FUNCIÓN AL MODELO KUZ – RAM DE LA CALERA BENDICIÓN DE DIOS
Fecha de evaluación: 26/06/2025
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 7%
- Código Documento:** Oide:3117:470010360
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 26/06/2025

		Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 26/06/2025 18:01:17-0500
<hr/> FIRMA DEL ASESOR Roberto Severino Gonzales Yana	<hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI	



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *DETERMINACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN FUNCIÓN AL MODELO KUZ - RAM DE LA CALERA BENDICIÓN DE DIOS*

ASESOR : *M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0474-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 12 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **quince días del mes de agosto de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

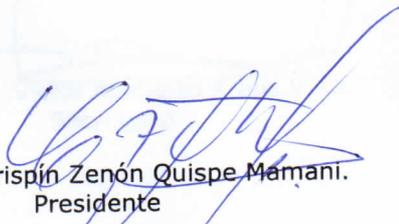
Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

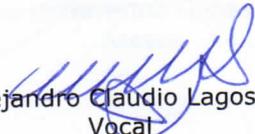
Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *DETERMINACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN FUNCIÓN AL MODELO KUZ - RAM DE LA CALERA BENDICIÓN DE DIOS*, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Minas *HILTON GYANCARLOS SÁNCHEZ BALCÁZAR*, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : *04* PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : *11* PTS.
EVALUACIÓN FINAL : *15* PTS *QUINCES* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *APROBADO* con el calificativo de *QUINCES* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *12:00 p.m.* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Presidente


Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal


M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario


M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A Dios Padre Todopoderoso, por guiarme por el buen camino.

A la Universidad Nacional de Cajamarca, alma mater la cual me inculcó para mi carrera profesional a través de su plana docente que se esfuerce cada día en apoyarnos a ser profesionales de éxito.

A mi familia por el apoyo brindado en este camino de mi profesionalidad.

A mi asesor, el ingeniero Roberto Gonzales Yana que me apoyó asesorándome para la elaboración de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres Elmo y María Eresvita, con profundo amor dedico este trabajo a ustedes. Su amor y sacrificio han sido la fuerza que me impulsa para lograr mis objetivos.

A mis hermanos, quienes han sido ejemplo de humildad y superación.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1. Antecedentes internacionales	3
2.1.2. Antecedentes nacionales	4
2.1.3. Antecedentes locales	4
2.2. BASES TEÓRICAS	5
2.2.1. Perforación y voladura	5
2.2.1.1. Macizo rocoso	5
2.2.1.2. Propiedades físicas	6
2.2.1.3. Resistencia dinámica de las rocas	6
2.2.1.4. Condiciones geológicas	6
2.2.1.5. Perforación	6
2.2.1.6. Voladura	7
2.2.2. Malla de perforación	8
2.2.3. Fragmentación de la roca	9
2.2.3.1. Kuz Ram (1987)	10
2.2.3.2. Teoría de rotura	10
2.2.3.3. Teoría de distribución de tamaño	11

	Pág.
2.2.3.4. Correlación del diseño de voladura	12
2.2.3.5. Teoría de la detonación del explosivo	13
2.2.3.6. Teoría de correlación por el tipo de roca.....	14
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	14

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación	16
3.1.1. Ubicación Política	16
3.1.2. Ubicación geográfica	16
3.2. Accesibilidad	17
3.3. Reseña histórica	20
3.4. Metodología de la investigación	20
3.4.1. Tipo de investigación	20
3.4.2. Nivel de investigación	20
3.4.3. Diseño de la investigación	20
3.4.4. Método de investigación.....	20
3.4.5. Población de estudio	20
3.4.6. Muestra.....	20
3.4.7. Unidad de análisis.....	20
3.4.8. Variables	21
3.4.9. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	21
3.4.10. Procedimiento	21
3.5. Geología Local	22
3.5.1. Formación Cajamarca	23
3.5.2. Formación Celendín	23

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

4.1. Proceso de explotación	25
4.2. Predicción de la fragmentación de la roca	26

	Pág.
4.2.1. Índice de Volabilidad (A)	26
4.2.2. Fuerza de peso relativo (SANFO).....	28
4.2.3. Exponente de uniformidad (n)	28
4.2.4. Distribución de tamaño.....	32
4.2.5. Análisis comparativo	33

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	40
5.2. Recomendaciones.....	40

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
----------------------------------	----

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Accesibilidad a Calera Bendición de Dios.	17
Tabla 2: Parámetros de Lilly para el índice de volabilidad.	27
Tabla 3: Cálculo de longitud de carga sobre el pie de banco (Lp).	29
Tabla 4: Cálculo del contenido de explosivo Q_e	29
Tabla 5: Cálculo del factor de potencia (K).	30
Tabla 6: Cálculo del volumen de roca (V_o).	30
Tabla 7: Burden y Espaciado en función del diámetro del taladro o su proporción (S/B=1,2).	31
Tabla 8: Cálculo del exponente de uniformidad.	32
Tabla 9: Porcentaje de retención en las mallas de 5 – 100 cm para el exponente de uniformidad “n”.	32
Tabla 10: Porcentaje de retención en las mallas de 5 – 100 cm para el exponente de uniformidad “n ² ”.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación política de la calera Bendición de Dios	16
Figura 2. Ubicación Geográfica De La Calera Bendición De Dios.....	17
Figura 3: Accesibilidad, Ruta Cajamarca – Calera Bendición de Dios.	18
Figura 4: Accesibilidad, ruta Bambamarca-calera Bendición de Dios.....	19
Figura 5: Zona de acopio y selección de la roca caliza por medio de un tamizado de la calera Bendición de Dios.....	22
Figura 6: Calizas de la Formación Cajamarca.....	23
Figura 7: Estratificación de roca caliza perteneciente a la Formación Celendín.....	24
Figura 8: Frente de explotación - Calera Bendición de Dios, Bambamarca.	25
Figura 9: Llenado de los hornos para la calcinación de la roca caliza según estándares, rango de 15 a 30 centímetros, en la calera “Bendición de Dios”.	26
Figura 10: Análisis comparativo entre los exponentes de uniformidad.....	33
Figura 11: Contenido pasante en la malla de 5 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.....	34
Figura 12: Contenido pasante en la malla de 15 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	35
Figura 13: Contenido pasante en la malla de 20 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	35
Figura 14: Contenido pasante en la malla de 25 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	36
Figura 15: Contenido pasante en la malla de 30 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	36
Figura 16: Contenido pasante en la malla de 45 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	37
Figura 17: Contenido pasante en la malla de 60 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”.	37

	Pág.
Figura 18: Contenido pasante en la malla de 75 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”	38
Figura 19: Contenido pasante en la malla de 90 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”	38
Figura 20: Contenido pasante en la malla de 100 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n ₂ ”	39
Figura 21: Zona de acopio de la Calera Bendición de Dios, Bambamarca	48
Figura 22: Barrenos de perforación de 4 y 6 pies de la mina Bendición de Dios, Bambamarca	48
Figura 23: Zona de acopio de fragmentos óptimos para la calcinación de la mina Bendición de Dios.....	49
Figura 24: Toma de rumbo y buzamiento de la mina Bendición de Dios, Bambamarca	49

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	:	Celsius
Ø	:	Diámetro del taladro, en pulgadas
ρ	:	Densidad
A	:	Factor de roca (Índice de volabilidad)
ANFO	:	Nitrato de amonio
B	:	Burden
cm	:	Centímetros
D	:	Diámetro del taladro
e	:	Neperiano
in	:	Pulgadas
H	:	Altura de banco
HF	:	Factor de fuerza.
JF_S	:	Espaciamiento entre planos de juntas.
JF_O	:	Orientación en planos de juntas.
K	:	Carga específica
Kg	:	kilogramos
Km	:	kilometros.
L	:	Longitud de taladro, en pies
Lb	:	Longitud de carga de fondo (m).
Ln	:	Logaritmo natural
Lt	:	Longitud de carga de encima (m).
M	:	Metros
min	:	minutos
n	:	Coefficiente de uniformidad.
P	:	Factor de diseño de malla.
Q_e	:	Masa de explosivo utilizado por kilogramo
QT	:	Energía equivalente de la carga explosiva en cada taladro
R	:	Porcentaje de material mayor que el tamaño x
RDI	:	Índice de densidad de roca.
RMD	:	Descripción del macizo rocoso.
RWS	:	Peso relativo del ANFO (%).

S_{ANFO}	:	Fuerza relativa por peso del explosivo
S	:	Espaciamiento
T	:	Taco
TM	:	Toneladas métricas
v	:	Volumen
VOD_e	:	Velocidad de detonación efectiva en campo
VOD_n	:	Velocidad de detonación nominal máxima
X	:	Tamaño del material
X_{av}	:	Tamaño medio de los fragmentos
X_c	:	Tamaño característico
Z	:	Desviación estándar del error de perforación

RESUMEN

La empresa minera Bendición de Dios, dedicada a la producción de cal, requiere para la producción de esta, la extracción de piedra caliza la cual debe fragmentar entre un rango de tamaños debido a que una vez fragmentada deberá pasar por el proceso de calcinación y para una calcinación uniforme se tiene un parámetro de tamaño para que esta no se requeme o quede sin calcinar completamente. Ello es el punto de partida para este estudio, pues se busca un estudio para el proceso de perforación y voladura para generar una fragmentación óptima para la calera. Para esto lo que se requiere es evaluar sus condiciones geológicas, las dimensiones de sus taladros para perforación, las características del explosivo a usar y el tamaño deseado por la empresa minera. Teniendo cada uno de estos datos, a través del modelo de Kuz – Ram, buscaremos identificar las dimensiones necesarias para poder obtener una fragmentación que se adecúe a lo solicitado por la empresa minera; sin embargo dentro de estas variables, un factor importante será las dimensiones a las que está sujeta los valores del burden y espaciamiento, las cuales en esta investigación se optó trabajarlos en función del diámetro del taladro y otra en función a la proporción usada en otras empresas mineras, $S/B = 1,2$. Trabajar con estas dos opciones para la determinación de estos valores, ayudará a tener más opciones en la selección, este análisis se mostrará con las gráficas realizadas y a su vez servirá para concluir cual es la más óptima. También se procederá a realizar varias gráficas de retención por mallas para evaluar el contenido que pasa por cada malla y determinar cuál de estas favorecerá para la obtención del parámetro solicitado por la empresa minera. A partir de ahí, los valores obtenidos se deberán probar en campo y comparar con los datos teóricos obtenidos.

Palabras clave: fragmentación, perforación, taladro, modelo Kuz-Ram

ABSTRACT

The Bendición de Dios mining company, dedicated to the production of lime, requires the extraction of limestone for its production, which must be fragmented between a range of sizes because once fragmented, it must go through the calcination process. For uniform calcination, a size parameter is required so that it is not overburned or left completely uncalcined. This is the starting point for this study, since a study of the drilling and blasting process is sought to generate optimal fragmentation for the lime kiln. For this, what is required is to evaluate its geological conditions, the dimensions of its drilling holes, the characteristics of the explosive to be used, and the size desired by the mining company. With each of these data, through the Kuz-Ram model, we will seek to identify the necessary dimensions to obtain a fragmentation that suits the mining company's requests. However, within these variables, an important factor will be the dimensions to which the burden and spacing values are subject, which in this research were chosen to work based on the diameter of the drill and another based on the proportion used in other mining companies, $S / B = 1.2$. Working with these two options for determining these values will help have more options in the selection; this analysis will be shown with the graphs made and will also serve to conclude which is the most optimal. Several retention graphs will also be made by meshes to evaluate the content that passes through each mesh and determine which of these will favor obtaining the parameter requested by the mining company. From there, the values obtained must be tested in the field and compared with the theoretical data obtained

Keywords: fragmentation, drilling, drill, Kuz-Ram model

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

En nuestro sector minero, la minería no metálica es una de las actividades después de la minería metálica que genera mayor cantidad de divisas en la economía local, regional y nacional; siendo de vital importancia tanto en la generación de empleos como en el aporte al desarrollo de la industria nacional. Dentro de las diferentes actividades desarrolladas para extraer volumen de mineral no metálico, está la perforación y la voladura, tomando mucha relevancia a consecuencia de ser la actividad donde se fragmentará la roca; y, en caso de no obtener el dimensionamiento adecuado para la calcinación, se requerirá realizar voladuras secundarias anexando al proceso de chancado previo, con lo cual producirá a la empresa que tenga un costo mayor. Esta problemática se observa en la Calera Bendición de Dios, para lo cual se necesita evaluar la fragmentación de roca durante el proceso de voladura con el fin de minimizar gastos buscando reducir el chancado y acarreo hasta llegar al proceso de calcinación de la caliza, esto se realizará a través de la identificación de los parámetros de fragmentación buscando que la fragmentación obtenida es la óptima todo esto en función al modelo de Kuz – Ram sea igual a las obtenidas empíricamente, las cuales deben cumplir con las especificaciones de la empresa calera Bendición de Dios.

Por consiguiente, nos formulamos: ¿Cuál es la fragmentación de roca óptima para la Calera Bendición de Dios, en función al modelo Kuz - Ram?

Como hipótesis decimos que, es posible obtener un tamaño de fragmentación óptimo de roca para la Calera Bendición de Dios, de acuerdo el modelo Kuz – Ram con la fragmentación indicada para el proceso de calcinación.

La justificación de la investigación es a consecuencia que, la Calera Bendición de Dios, requiere evaluar la fragmentación de sus voladuras, con lo cual plantea realizar una evaluación en función a los parámetros requeridos para el modelo Kuz – Ram, cuyos valores serán recopilados de manera empírica. Además, ello servirá como antecedente para futuras investigaciones relacionados al tema.

La zona de investigación, se desarrolla en el Caserío de Maygasbamba, distrito Bambamarca, provincia de Hualgayoc y región de Cajamarca. Con una extensión aproximada de una Hectárea.

El objetivo general es determinar la relación entre la fragmentación de roca en función al modelo Kuz – Ram y la fragmentación solicitada por la empresa para el proceso de la calcinación, dando como objetivos específicos, describir los parámetros de fragmentación de dicho modelo, así mismo, identificar el tamaño de fragmentación adecuada destinada al proceso de calcinación y determinar a través del modelo Kuz – Ram dicha fragmentación.

La presente investigación se desarrollará en estos cinco capítulos; el Capítulo I se presenta la introducción que incluye la problemática de la empresa como la hipótesis y objetivos que se formula para identificar una solución a esta; el Capítulo II, desarrolla el marco teórico considerando algunos antecedentes de investigación entre ellos internacionales, nacionales y locales referentes al tema investigado, así como también la definición de términos básicos que son utilizados en la investigación; el Capítulo III describe las generalidades del proyecto, la metodología para la recopilación de información de campo, análisis bibliográfico en gabinete, los materiales y métodos; en el Capítulo IV se procedió con el análisis y discusión de los resultados de acuerdo al orden de los objetivos planteados y en el Capítulo V se dan a conocer las conclusiones a las cuales se han llegado así como las recomendaciones y referencias bibliográficas usadas en el proyecto de investigación.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes internacionales

Según Báez, (2021) en su proyecto de tesis “Modelamiento De La Granulometría Obtenida De Operaciones De Tronadura Frente A Cambios En El Burden, El Espaciamiento Y Tipo De Explosivo: Aplicación A Fases 7 Y 10 En Minera Los Pelambres” publicado por la Universidad de Chile. El objetivo del presente trabajo es estudiar la variación del burden y espaciamiento y su impacto en la granulometría resultante del proceso de tronadura en las Fases 7 y 10. La metodología recopila datos de mediciones granulométrica, después se ajusta el parámetro A, que corresponde al factor de roca del modelo de Kuz-Ram, en las zonas que conforman las fases en cuestión. Se concluye que el modelo es útil para evaluar el impacto del burden y espaciamiento en la granulometría para mallas de 5 [m] x 11 [m] y 7 [m] x 8 [m], en la Fase 7, y para la Fase 10 se proponen mallas de 12 [m] x 16 [m], 13 [m] x 15 [m] y 13 [m] x 16 [m]. Finalmente, se realiza la evaluación de un cambio de explosivo sobre la granulometría en las mallas actuales, primero se considera un explosivo de mayor RWS y similar densidad, el cual muestra una reducción de los tamaños obtenidos para ambas fases. Por otro lado, el cambio de explosivo a uno de menor densidad y similar RWS, muestra una granulometría más gruesa para los sectores estudiados.

Según Barrera, (2017). En su proyecto de tesis “Validación Del Modelo Kuz – Ram Para Optimizar La Fragmentación De Roca Por Voladura”, cuyo trabajo de investigación fue publicado por la Universidad Nacional Autónoma de México – Facultad de Ingeniería. Su estudio consiste en brindar el uso de explosivos en voladuras en función a su predicción y evaluación para cielo abierto de acuerdo a la aplicación del modelo Kuz – Ram. Para lo cual, considera descripción de explosivos, procesos de fragmentación, y los parámetros para realizar dicha operación, de esta manera realizar el desarrollo de las herramientas y dispositivos que se ejecutaran en minería de manera interactiva.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Según Arispe & Sosa (2022). En su proyecto de tesis “Propuesta De Ajuste Al Modelo Predictivo Kuz-Ram Empleando Análisis Granulométrico De Imágenes Para Mejorar La Estimación De La Fragmentación De Roca Volada En Un Yacimiento Hidrotermal De Alta Sulfuración Del Perú”. Plantean mejorar la fragmentación de roca por voladura en minería a tajo abierto, con lo que se plantea realizar una reestructuración al modelo tradicional Kuz – Ram. De esta forma, fija una función al método iterativo de Newton – Raphson, aplicando el programa Matlab. Con lo que concluyeron que se logró disminuir el coeficiente de tierra en función a la fragmentación de un 40% a 8%.

Según Ccahuana (2022). En su tesis “Control Granulométrico Utilizando El Modelo De Predicción De Kuz Ram Para Reducir La Fragmentación Y Los Costos Operativos En La Compañía Minera Minsur U.M San Rafael-Puno”. Esta investigación comprende un análisis de las diferentes variables presentes en la operación que conduzcan a la aplicación del modelo de predicción de Kuz Ram. Se aplicaron nuevos diseños de brocas retractiles, grasa magnolia para los aceros de perforación y con ello reducir el porcentaje de desviación en la perforación; esto permitió posteriormente realizar un diseño para lograr tener una fragmentación de 6 in con una uniformidad constante (P80-6 in), Evitando así irregularidad en nuestra granulometría, reducir la sobre rotura que causa dilución, eliminando la inestabilidad del tajo y reducción de los costos operativos.

2.1.3. Antecedentes locales

Según Quispialaya & Mesias (2022). En su proyecto de tesis “Aplicación Del Modelo Kuz - Ram Para Predecir La Fragmentación En Base A La Velocidad De Perforación En Una Mina A Cielo Abierto, La Libertad”. Nos mencionan que aplican el modelo Kuz – Ram y buscan una relación con la velocidad de perforación, con lo que concluyeron que la predicción del P_{80} según la velocidad de perforación y modelo matemático clásico dan como resultado del P_{80} para roca su débil de 4”, roca media de 4.2”, roca dura de 6.8” y muy dura de 7.4”; tomando como base dos tipos de diseño de carga para roca débil y mediana de 153.45 kg/tal y para roca dura y muy dura de 183.10 kg/tal.

Según Portal (2021). En su proyecto de tesis “Análisis Técnico Económico En El Proceso De Perforación Y Voladura En El Tajo Quecher Main – Cajamarca”. Menciona que, al realizar el nuevo diseño de malla y de carga, para un burden y espaciado de 8.5m x 9.5m

respectivamente, se obtuvo resultados positivos como el de mantener el nivel de vibraciones para el límite que se permite, una velocidad de excavación de 589.93 tn/hr mayor al target, menor cantidad de explosivo al de la malla inicial (10,220.00 kg) y un ahorro de aproximadamente 14.1% con referencia a la malla anterior lo que significa un (\$13,765.42)

Según Becerra & Torres (2018) En su proyecto de tesis “Influencia Del Plan De Minado En La Rentabilidad De La Concesión Victoria, Frutillo Alto – Bambamarca, 2018”. Nos menciona que, al realizar un diseño de malla de perforación con apoyo del Modelo predictivo de fragmentación. Esto dio como resultado una fragmentación promedio de 18.45 cm a través de una malla rectangular 6 taladros, un espaciamiento de 0.43 m, Burden de 0.22 m, longitud de taladro 0.84 m, altura de banco 0.76 m, usando 0.23 kg de ANFO/ Taladro, 1 fulminante N° 8/ Taladro, 1.04 m de mecha lenta/ Taladro, 1 m de mecha rápida por malla, 6 conectores por malla; produciendo mensualmente 459.42 TM.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Perforación y voladura

Son operaciones continuas, las cuales inician con la perforación de la roca de acuerdo al diseño geométrico planificado donde posteriormente se pondrá el explosivo con la finalidad que se pueda ejecutar una voladura, el cual transmitirá energía necesaria que fragmentará al macizo rocoso de acuerdo a las especificaciones que son solicitadas. (Bernaola Alonso, et. al., 2013). Se tiene como regla que, “una buena perforación posibilita una buena voladura, pero una mala perforación asegura una mala voladura”. (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2013)

2.2.1.1. Macizo rocoso

Nombre el cual define la forma de las rocas en su entorno natural; lo hace considerándolo como un conglomerado soldado de bloques irregulares divididos geológicamente mediante discontinuidades como fracturas o fallas obteniendo diversas propiedades físicas como mecánicas (Barreda de la Cruz, 2022).

2.2.1.2. Propiedades físicas.

- Dureza: Fuerza requerida para poder ejercer cambio en la roca.
- Densidad: Peso de una muestra cuando ocupa completamente un metro cúbico.

$$\rho = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \text{ (g/cm}^3\text{)} ; \quad \rho: \text{Densidad}$$

- Porosidad: Proporción de poros u oquedades y su capacidad de captar agua.

2.2.1.3. Resistencia dinámica de las rocas

- Frecuencia sísmica: Velocidad con la cual las ondas durante la detonación atravesarán las rocas.
- Fricción interna: Fuerza normal que resiste cualquier esfuerzo que se ejecute a la roca.
- Módulo de Young: Capacidad de la roca en resistir el esfuerzo ejercido desde el momento de deformación hasta el grado de fractura.

2.2.1.4. Condiciones geológicas

- Estructura: Forma de presentación natural de la roca (macizo, estrato, etc.).
- Grado de fisuramiento: Indica la intensidad y amplitud del fracturamiento natural de las rocas, son importantes la orientación (rumbo y buzamiento) de los sistemas de fisuras y el espaciamiento entre ellos, así como la apertura y los tipos de relleno en las discontinuidades.
- Presencia de agua: Flujo de agua que circula por el macizo rocoso.

2.2.1.5. Perforación

Se trata de la elaboración de huecos cilíndricos largos los cuales serán posteriormente llenados con explosivos y sus accesorios para poder generar una voladura controlada, buscándose la perforación óptima para cumplir con el objetivo de fragmentar la roca según lo solicitado. (EXSA, 2019). Para poder generar se debe tener en cuenta:

- Diámetro: De acuerdo a la dimensión que tiene el taladro, se tiene como consideración que el “menor diámetro factible” es el más adecuado y económico.

- Longitud: Dimensión generado por la longitud del taladro perforador. De acuerdo al tamaño se puede definir el avance por taladro.
- Rectitud: Influye el tipo de roca, método de perforación y las características del macizo rocoso como la capacidad del operador.

2.2.1.6. Voladura

Explosivos: Son sustancias químicas que tiene cierto grado de inestabilidad lo que lleva a que por medio de una excitación del compuesto esta libere rápidamente su energía la cual puede fragmentar cualquier tipo de roca (EXSA, 2019).

- Velocidad de detonación: Mide cuanto de la reacción de la detonación procede por la columna del explosivo. Se tiene como base que la VOD variará entre 3000 m/s para ANFO en pozos de tronadura de diámetros pequeños y 6000 m/s para emulsión en pozos de tronadura de diámetros más grandes (EXSA, 2019).
- Densidad: es la unidad más requerida para el diseño de malla ya que esta contribuye a saber cuántos explosivos se requiere, mide los kilogramos de explosivos por unidad de volumen en g/cc.
- Fuerza o potencia: Se considera como la capacidad de trabajo útil de un explosivo.

Accesorios: Para que todo explosivo pueda detonar, es necesario tener que iniciarlo, para lo cual se requiere del uso de accesorios para la voladura.

- Mecha lenta: Consiste en un cordón compuesto por un núcleo de pólvora negra, con tiempo de combustión conocido, cubierto por una serie de tejidos y una capa de plástico (ENAEX, 2015); estos pueden ser de plástico, para ambiente secos, o plastec, ambientes húmedos con tiempo de combustión de 140 a 160 segundos/metro.
- Cordón detonante: El cordón detonante es relativamente insensible y requiere un detonador de fuerza para iniciar, su velocidad de detonación es cercana a 7.400 m/s, y la reacción es extremadamente violenta. Su mayor desventaja en superficies, es el alto nivel de ruido y su reacción violenta (ENAEX, 2015).
- Detonador a fuego: Se caracterizan por emitir una onda de choque de baja velocidad (aproximadamente 2000 m/s) que se propaga a través de un tubo de plástico en cuyo interior contiene una película delgada de explosivo de 20 mg/m, la cual es transmitida

hacia el detonador. La reacción no es violenta, es relativamente silenciosa y no causa interrupción ni al explosivo ni al taco (ENAEEX, 2015).

2.2.2. Malla de perforación

Para poder obtener una buena voladura controlada, se debe considerar el diseño de una malla geométrica, esta se realizará en función a las dimensiones solicitadas en cada voladura, con la cual posteriormente se evaluará el modelo matemático según los datos que se tienen para la realización de esta.

- **Bancos:** Es un corte escalonado que tiene dos caras descubiertas, una cara superior horizontal y una vertical lateral, esta sección es seleccionada un bloque el cual se ejecutará el diseño de voladura tomando en cuenta una forma cubica.
- **Diámetro del taladro:** El máximo diámetro para adoptar depende de la profundidad a la que puede ser perforado un taladro, la mínima profundidad a la que puede ser perforado un taladro depende del diámetro (EXSA, 2019).

$$L = 2\emptyset$$

- **Longitud o profundidad del taladro (L):** Distancia del taladro utilizado para la perforación.
- **Sobreperforación (SP):** Es la distancia que se perfora por encima del nivel del piso del banco (Palacios Luis, 2019). Si la Sobreperforación es muy corta podemos tener lomos, pero si es excesiva se producirá incremento de vibraciones y elevando los costos de perforación. Debemos tener en cuenta el tipo de roca:

Blanda a media de 10 a 11 \emptyset .

Dura o muy dura 12 \emptyset .

- **Taco (T):** Es el relleno de la parte superior del taladro con material estéril. Su misión es la de retener los gases producto de la explosión. En la práctica la longitud es de 1/3 de largo total del taladro. Sin embargo, en otros casos este puede variar en función del Burden de acuerdo al siguiente esquema.

Para material muy competente $T=0.7*B$.

Para material incompetente con fisuras y fracturas abiertas $T= B$.

También podemos tener en cuenta la relación con el diámetro.

Rocas blanda o intermedia: $T=33 \text{ } \emptyset$ a $35 \text{ } \emptyset$.

Roca dura a muy dura: $T = 30 \text{ } \emptyset$ a $32 \text{ } \emptyset$.

- **Burden (B):** El Burden depende del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear. Se determina en razón del grado de fragmentación y al desplazamiento del material colado que se quiere conseguir (EXSA, 2019). Aunque el cálculo del Burden tiene diversos tipos de métodos para calcularlo, se considerará la fórmula de Andersen debido a que este no requiere de muchos datos para sus cálculos.

Fórmula de Andersen.

$$B = \sqrt{L * \emptyset}$$

Donde:

B: Burden.

\emptyset : Diámetro del taladro, en pulgadas.

L: Longitud de taladro, en pies.

- **Espaciamiento (S):** Es la distancia entre taladros con carga explosiva localizados de una misma fila que se dispara con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila (EXSA, 2019).
- **Columna explosiva:** Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes del taladro (EXSA, 2019). Usualmente comprende de $\frac{1}{2}$ a $\frac{2}{3}$ de la longitud total y puede ser continua o segmentada. Así pueden emplearse cargas sólo al fondo, cargas hasta media columna, cargas a columna completa o cargas segmentadas según los requerimientos incluso de cada taladro de una voladura.

2.2.3. Fragmentación de la roca

Para minimizar, temas relacionados a la voladura; se realizan una serie de fórmulas de manera empírica, y adoptar modelos físicos y matemáticos; lo que nos brinda parámetros de fragmentación de roca. De lo cual, las fórmulas que son consideradas como clásicas; por

ello se debe tener conocimiento de acuerdo a los datos, ya que en la mayoría no es de correcta exactitud. Para determinar, las características de las rocas por medio de barrenos, se establece parámetros para el tipo de roca (Barrera, 2017). Por lo que a continuación se presenta las siguientes fórmulas:

2.2.3.1.Kuz Ram (1987)

Dicho modelo fue realizado por Clade Cunningham en 1983, siendo muy utilizado. Toma en cuenta, antiguas publicaciones rusas, que se desarrollaron de acuerdo a los parámetros de voladura y el tamaño medio de fragmentación, generando una alta confiabilidad por la similitud con los modelos de fragmentación.

Este modelo clásico, permite la estimación de tamaño de roca el cual es fragmentado en la voladura. (Cunningham, 1983), combina cinco ecuaciones con lo cual permite una variedad de combinaciones para los aspectos: roca, propiedades del explosivo y diseño de voladura; para determinar la granulometría de una voladura, siendo el más indicado para determinar diseños de perforación en función a una breve descripción de los parámetros de voladura (Leiva, 2007).

2.2.3.2.Teoría de rotura

Fue desarrollado por Kuznetsov pero modificada, para explosivos ANFO. Se relaciona entre tamaño medio de fragmentación y la energía aplicada a la voladura por unidad de volumen de la roca (Kuznetsov, 1973). Se calcula, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$X_{av} = A \left[\frac{V_0}{Q_T} \right]^{0.8} Q_T^{1/6}$$

Dónde:

- X_{av} : Tamaño medio de los fragmentos (cm).
- A : Factor de roca (Índice de volabilidad), varía entre 7, 10 y 13 para rocas duras, altamente fracturadas y débilmente fracturadas respectivamente.
- V : Volumen de roca m^3 , se calcula con el burden x espaciamiento x altura de banco.
- Q_T : Energía equivalente de la carga explosiva en cada taladro.

La ecuación basada en ANFO (ANFO = 100) es 115, en lugar de TNT, se puede calcular y escribir de la siguiente forma:

$$X_{av} = A \left[\frac{V_0}{Q_T} \right]^{0.8} Q_e^{1/6} \left[\frac{S_{ANFO}}{115} \right]^{-\frac{19}{30}}$$

Dónde:

- Q_e : Masa de explosivo utilizado por kilogramo (kilogramo/taladro).
- S_{ANFO} : Fuerza relativa por peso del explosivo ANFO (ANFO = 100).

Además:

$$\frac{V_0}{Q_e} = \frac{1}{K}$$

Dónde:

- K : Carga específica (kg / m^3).

De la ecuación anterior.

$$X_{av} = A [K]^{0.8} Q_e^{1/6} \left[\frac{S_{ANFO}}{115} \right]^{-\frac{19}{30}}$$

Dónde:

- X_{av} : Tamaño promedio del material (cm).
- A : Índice de volabilidad.
- Q_e : Peso de carga de explosivo utilizado por kilogramo (kilogramo/taladro).
- S_{ANFO} : Fuerza relativa del explosivo (%).
- K : Factor de potencia.

Con ello, para el cálculo de la fragmentación media para cualquier factor triturante dado, se obtiene la siguiente ecuación para K :

$$K = \left[\frac{A}{X_{av}} Q_e^{1/6} \left[\frac{115}{S_{ANFO}} \right]^{\frac{19}{30}} \right]^{1.25}$$

2.2.3.3. Teoría de distribución de tamaño

La distribución de tamaño de partículas para la roca fragmentada, se puede determinar del tamaño promedio, si la rotura es conocida. (Rosin & Rammler, 1933).

La ecuación está dada por la siguiente forma:

$$R = e^{-\left(\frac{X}{X_C}\right)^n}$$

Dónde:

- R: Porcentaje de material mayor que el tamaño x (%).

Además, la ecuación anterior puede ser escrita de la siguiente forma:

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X_C}\right)^n}$$

Dónde:

- R: Porcentaje de material mayor que el tamaño x (%).
- X: Tamaño del material (m).
- X_C : Tamaño característico (m).
- n: Coeficiente de uniformidad.

Esta ecuación puede ser reformulada con lo que se genera la siguiente expresión:

$$X_C = \frac{X}{\left[\ln \frac{1}{R}\right]^{1/n}}$$

Con la presente fórmula de Kuznetsov, nos permite hallar el tamaño del material X_{av} con lo que el 50 % ($R=0.5$), del material tiene que pasar, con lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$X_C = \frac{X_{av}}{[0.693]^{1/n}}$$

Dónde:

- X_C : Tamaño característico (m).
- X_{av} : Tamaño promedio del material de la ecuación de Kuznetsov.

2.2.3.4. Correlación del diseño de voladura

El exponente de uniformidad es calculado por la ecuación desarrollada por (Cunningham, 1983), ya que existe una correlación entre la rotura y la configuración de voladura.

La ecuación está expresada de la siguiente forma:

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right]^{0.5} \left(1 - \frac{Z}{B}\right) \left[\frac{\text{abs}(Lb-Lt)}{L} + 0.1\right]^{0.1} \left(\frac{L}{H}\right) (P)$$

Dónde:

- n: Exponente de uniformidad.
- B: Burden (m).
- D: Diámetro del taladro (mm).
- S: Espaciamiento (m).
- Z: Desviación estándar del error de perforación (m).
- Lb: Longitud de carga de fondo (m).
- Lt: Longitud de carga de encima (m).
- H: Altura de banco (m).
- P: Factor de diseño de malla.
- L: Longitud de carga (m).

Al calcular el valor de “n”, podemos hallar la forma de curva de Rosin-Rammler.

Valores de “n”. - Cunningham ha sugerido lo siguiente: El rango normal de "n" para la fragmentación de la voladura en un terreno competente es de 0.75 a 1.5, siendo el promedio alrededor 1.0. Valores de “n” debajo de 0.75 representan una situación de “finos y de rocas grandes”, cuando esto ocurre indica que las condiciones de la roca no permiten el control de la fragmentación.

2.2.3.5. Teoría de la detonación del explosivo

Esta teoría está determinada por Tidman, la cual indica que se refiere a la cantidad de energía que libera un explosivo al momento de la detonación: Se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$S_{ANFO} = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right)^2 (RWS)$$

Dónde:

- S_{ANFO} : Fuerza de peso relativo (%).
- VOD_e : Velocidad de detonación efectiva en campo (m/s).
- VOD_n : Velocidad de detonación nominal máxima (m/s).
- RWS: Peso relativo del ANFO (%).

2.2.3.6. Teoría de correlación por el tipo de roca

Se trabaja en función al índice de volabilidad (A), el cual se halla a través de la suma de cinco parámetros e implica las evaluaciones de Burden, espaciamiento en el diseño de la malla y la fragmentación de acuerdo a su predicción.

La ecuación será descrita de la siguiente forma:

$$A = 0.06 \times (RMD + JF_S + JF_O + RDI + HF)$$

Dónde:

- *RMD: Descripción del macizo rocoso.*
- *JF_S: Espaciamiento entre planos de juntas.*
- *JF_O: Orientación en planos de juntas.*
- *RDI: Índice de densidad de roca.*
- *HF: Factor de fuerza.*

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

ANFO: El ANFO es un explosivo de alta potencia que consiste en una mezcla de nitrato de amonio y combustible derivado del petróleo. Estas mezclas son muy utilizadas, principalmente por las empresas mineras y de demolición (Beraun, 2018).

Cantera: Las canteras son espacios que presentan la posibilidad de explotación de recursos de rocas y minerales diversos, vinculados con distintos procedimientos técnicos empleados por las personas para extraer materias primas necesarias para la subsistencia, construcción, metalurgia, orfebrería (Herrera, 2017).

Diámetro: Longitud de la circunferencia que presenta los taladros, largo de una línea recta que se extiende desde un extremo de un tumor u otro objeto hasta el otro extremo, pasando por su centro (Wabo, 2019).

Fragmentación de la roca: El proceso de fragmentación de un macizo rocoso es una respuesta a la interacción de las propiedades mecánicas de las rocas controladas por la geología del material, tales como su resistencia, y la aplicación de esfuerzos mediante, por ejemplo, la carga de explosivos (Nicolas, 2020).

Minería no metálica: Se extraen materiales útiles para la construcción, la joyería y otros usos, de naturaleza no metálica, como son la arcilla, mármol, granito, esmeraldas, diamantes, mica (Häberer, 2017).

Taladro: El taladrado es una operación de mecanizado por arranque de viruta, que se realiza para obtener agujeros de forma cilíndrica, sobre una pieza determinada utilizando para ello una herramienta llamada broca. Para el correcto desarrollo de esta operación la broca debe estar animada de dos movimientos, comunicados a ésta por medio de máquinas denominadas taladradoras (Bavaresco, 2019).

Tonelaje: Esta palabra es utilizada en el contexto del entrenamiento de la fuerza para referirse a la cantidad de peso movilizado por sesión, microciclo, mesociclo o ciclo anual de entrenamiento (Heredia, 2012).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

3.1.1. Ubicación Política

La cantera “Bendición de Dios” se encuentra ubicada dentro del caserío de Maygasbamba, distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, región Cajamarca. Anexo 1 – Mapa de Ubicación Política (UTM WGS-84).

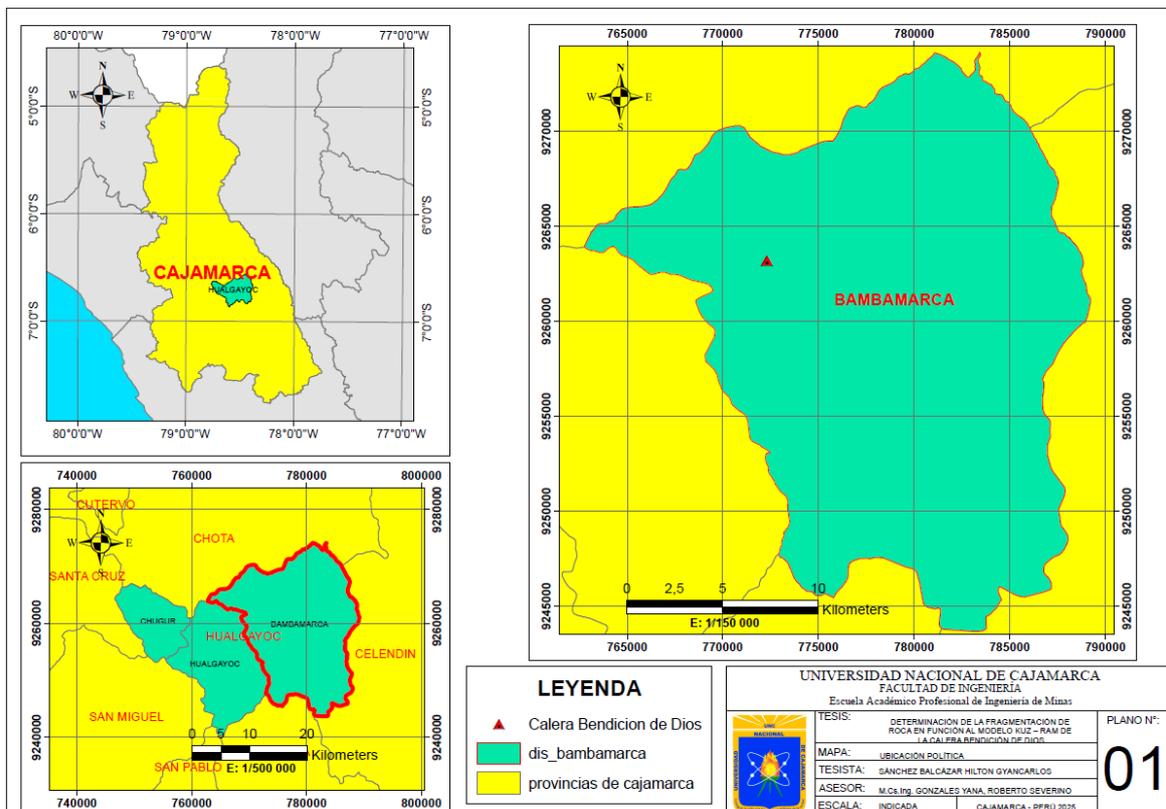


Figura 1. Ubicación política de la calera Bendición de Dios

3.1.2. Ubicación geográfica

La cantera “Bendición de Dios” se encuentra al NW del distrito de Bambamarca. Anexo 2 – Mapa de Ubicación Geográfica (UTM WGS-84).

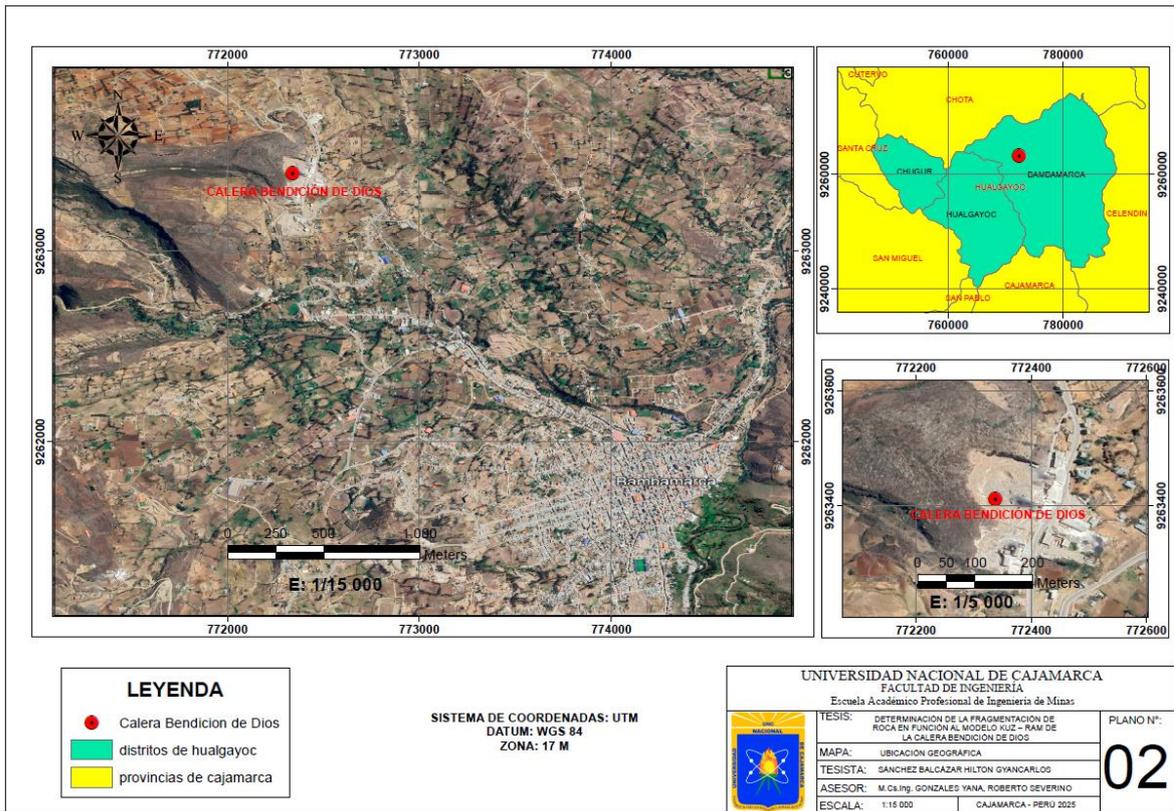


Figura 2. Ubicación Geográfica De La Calera Bendición De Dios

3.2. Accesibilidad

Para acceder a la calera “Bendición de Dios” desde Cajamarca, se deberá ir primeramente hacia Bambamarca para posteriormente poder llegar a esta.

Tabla 1:Accesibilidad a Calera Bendición de Dios.

Ruta	Tipo de vía	Distancia	Tiempo	Transporte
Cajamarca – Bambamarca	Asfaltada por tramos	119 km	2h 40 min	Automóvil
Bambamarca – Calera Bendición de Dios	Asfaltada	4 km	15 min	Automóvil

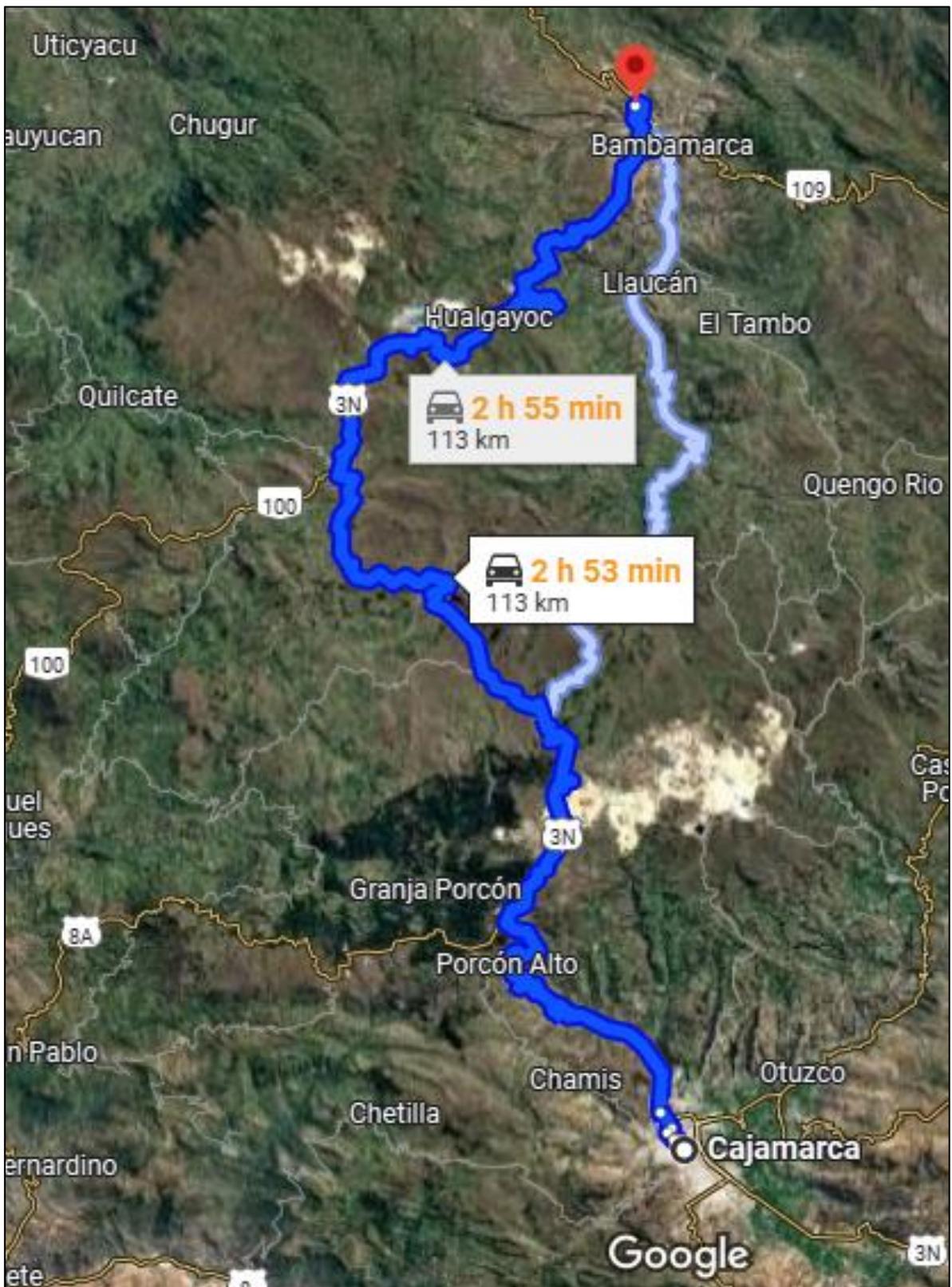


Figura 3: Accesibilidad, Ruta Cajamarca – Calera Bendición de Dios.
Fuente: Google Maps

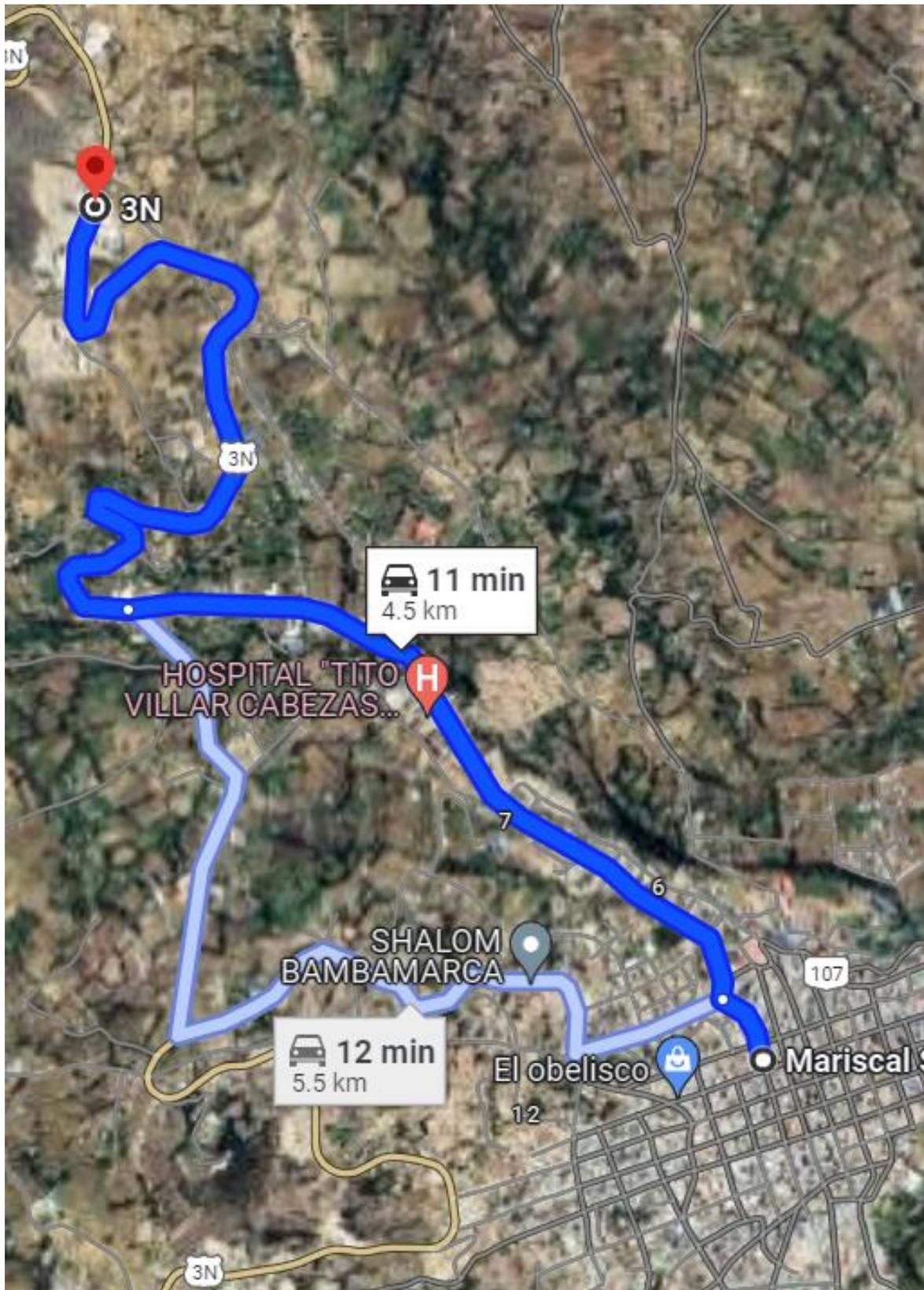


Figura 4: Accesibilidad, ruta Bambamarca-calera Bendición de Dios.

Fuente: Google Maps

3.3. Reseña histórica

La Empresa Individual Responsabilidad Limitada “Calera Bendición de Dios”, utiliza roca caliza (CaCO_3) como materia prima para la producción de cal y ésta se extrae del yacimiento de caliza ubicado en el Distrito de Bambamarca, Provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca. Durante el año 2014 – 2015, se planteó una producción diaria de 80 TM de cal diaria, con lo que se hizo un requerimiento de 2000 TM mensuales de cal, siendo uno de los mejores años de producción de la calera.

3.4. Metodología de la investigación

3.4.1. Tipo de investigación

Es una investigación del tipo Descriptivo a razón de que se detallará todas las condiciones de la ejecución e interpretación del estudio.

3.4.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es correlacional porque se realizará una relación entre las variables independientes para poder fundamentar la variable dependiente.

3.4.3. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es no experimental debido a que se verá cómo se ejecutarán los procesos para después analizarlos.

3.4.4. Método de investigación

El método por utilizar es el Método cuantitativo-cualitativo a razón de que se realizará a la recolección de datos numéricos. un análisis estadístico para probar la hipótesis.

3.4.5. Población de estudio

Fragmentación de la roca en la Calera “Bendición de Dios”.

3.4.6. Muestra

Fragmentación de la roca en la Calera “Bendición de Dios” de la segunda semana del mes agosto de 2023.

3.4.7. Unidad de análisis

Parámetros de fragmentación, fragmentación de la roca.

3.4.8. Variables

Variable independiente

- Parámetros de fragmentación.

Variable dependiente

- Tamaño de fragmentación.

3.4.9. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Para la toma de datos se tomará en cuenta múltiples instrumentos y técnicas las cuales se detallarán a continuación.

Instrumentos

Reporte operacional

- Descripción de los equipos de perforación.
- Explosivos y accesorios.
- Tiempos de operación: perforación por guardia, avance por voladura.
- Cantidad de personal.

Equipos de recolección de datos

- GPS.
- Mallas.
- Fichas técnicas.

Técnicas

- Basado en los modelos matemáticos de perforación y voladura.
- Modelo de Kuz -Ram para el análisis de la fragmentación de la roca.
- Análisis de gráficas por medio de Excel.

3.4.10. Procedimiento

a) Etapa de campo

A través de cada visita se realizará un análisis de la zona donde se evaluará la perforación y voladura donde se obtendrá los datos del macizo rocoso, así mismo de las dimensiones para este proceso (longitud del barreno, contenido de explosivo, diámetro del taladro). A su vez, luego de realizar la voladura, se tomará por medio de una malla las

dimensiones de fragmentos de roca los cuales servirá para obtener un análisis de la granulometría y obtener su fragmentación (X_c).



Figura 5: Zona de acopio y selección de la roca caliza por medio de un tamizado de la calera Bendición de Dios.

b) Etapa de gabinete

Con la recopilación de datos, se realizará el tipeo en los programas adecuados con el fin de generar un análisis e interpretación de este, los cuales se tendrá en consideración los posibles errores que se pueden generar a la hora de recolectar los datos (una mala calibración o error humano); sin embargo, al ser múltiples voladuras que trabajarán con las mismas condiciones se evaluará con un promedio de este con el fin de eliminar ese margen de error.

3.5. Geología Local

El área donde se ha realizado la investigación se encuentra formada por rocas calcáreas de la formación Cajamarca y formación Celendín. Anexo 3 – mapa geológico local.

3.5.1. Formación Cajamarca

Está compuesta por rocas calcáreas del Cretáceo Superior, generalmente se muestran en gruesos bancos formados por calizas gris oscuras, con delgadas capas de lutitas y margas de similares colores.



Figura 6: Calizas de la Formación Cajamarca.

3.5.2. Formación Celendín

Está compuesta por rocas calcáreas del Cretáceo Superior, se caracteriza por formar bancos gruesos y compactos, con una estratificación regular y uniforme de tonalidad gris. La caliza presenta una capa intermedia de color azul puro que, debido a su alta pureza, tiende a intemperizarse, adquiriendo tonos grises más claros.



Figura 7: Estratificación de roca caliza perteneciente a la Formación Celendín.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

4.1. Proceso de explotación

La cantera “Bendición de Dios” se dedica a la extracción de roca caliza para su posterior proceso de calcinación y extracción, por ello, para poder realizar una extracción segura y adecuada, se realiza un análisis de las condiciones que presenta.



Figura 8: Frente de explotación - Calera Bendición de Dios, Bambamarca.

Para su proceso de calcinación, el estándar de la empresa es el uso de rocas con una dimensión inferior a los 30 centímetros, ello debido a que de esta manera se pueden ver afectadas por el calor del horno y se calcine totalmente. Cuando las rocas tienen una mayor dimensión a esta, según su tamaño se evaluará por el proceso que pasará, combas o con martillo hidráulico. Asimismo, se busca que también las rocas tengan una dimensión superior a los 5 centímetros debido a que, al entrar al horno, por el tiempo que se calcina, estas se podrán requemar conllevando a que estas no tengan valor en la producción.



Figura 9: Llenado de los hornos para la calcinación de la roca caliza según estándares, rango de 15 a 30 centímetros, en la calera “Bendición de Dios”.

4.2. Predicción de la fragmentación de la roca

4.2.1. Índice de Volabilidad (A)

Para poder calcular el valor del índice de volabilidad (A), requerimos los valores para la formula, la cual se llenará en función a la tabla desarrollada por Peter A. Lilly (1986), el cual considera ciertos valores de acuerdo a las condiciones físicas como mecánicas que presenta el macizo rocoso.

$$A = 0.06 \times (RMD + JF_S + JF_O + RDI + HF)$$

Las características físicas del macizo rocoso que presenta la calera “Bendición de Dios”, fueron tomadas de acuerdo a lo visto en campo, mientras que la condición de la gravedad específica será netamente por parte teórica basada en los antecedentes de estudios de la caliza de la formación Celendín.

Tabla 2: Parámetros de Lilly para el índice de volabilidad.

PARÁMETRO	RATING
Descripción de la masa rocosa (RMD)	
Quebradizo/Desmenuzable	10
Se fractura en bloques	20
Totalmente masivo	50
ESPACIAMIENTO DE LOS PLANES DE DIACLASAS (JFS)	
Cercano (menor a 0.1 m)	10
Intermedio (0.1 a 1 m)	20
Amplio (mayor a 1 m)	50
ORIENTACIÓN DE LOS PLANOS DE DIACLASAS (JFO)	
Horizontal	10
Inclinación hacia fuera de la cara	20
Rumbo normal a la cara	30
Inclinación hacia dentro de la cara del banco	40
Influencia de la Gravedad Especifica	RDI = 25*SG -50 SG es la densidad en ton/m ³
Dureza (HF=0.05*RC)	1-10

Fuente: (Salazar, 2013).

Se tiene como valor de la densidad 2.7 t/m³, además como valor de la resistencia a la compresión de 175 Mpa, lo cual al reemplazar en los valores obtenemos lo siguiente:

$$A = 0.06 \times (RMD + JF_S + JF_O + RDI + HF)$$

$$A = 0.06 \times (20 + 20 + 20 + 17.5 + 8.75)$$

$$A = 5.175$$

4.2.2. Fuerza de peso relativo (S_{ANFO})

Para poder calcular este valor, se tomará en cuenta los datos de la ficha técnica que presenta el explosivo usado por la calera “Bendición de Dios”, ANFO. (los datos tanto de la velocidad de detonación como la potencia relativa al peso son tomadas de la ficha técnica)

$$S_{ANFO} = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 \text{ (RWS)}$$

$$S_{ANFO} = \left(\frac{2700}{3000} \right)^2 \text{ (115)}$$

$$S_{ANFO} = 93.15$$

4.2.3. Exponente de uniformidad (n)

Si bien la formula requiere de datos como Burden y Espaciamiento, para la operación de este valor primero se planteará trabajar en base a los valores de Q_e y V_o , valores que son dependientes de la altura del banco (H) y la longitud de perforación (L). Estos valores son los que modificaremos debido a que se buscará las dimensiones adecuadas para la fragmentación. Con esto, se plantea lo siguiente:

- Altura del banco (H): 4 – 8 pies.
- Longitud de perforación (L): $0.9 * H$.

La altura del banco dependerá del barreno con el que se trabajará. En la cantera “Bendición de Dios”, se usa barrenos de 4, 6 y 8 pies de longitud.

La longitud de perforación es una variable dependiente de la Altura del banco. Además, se buscará trabajar con una fragmentación ideal de 25 cm, con lo cual $X_c = 25 \text{ cm}$; mientras que el valor del diámetro del taladro se mantendrá fijo siendo estas 2 pulgadas (50.8 mm). Con todo esto se procederá a realizar los siguientes cálculos para poder determinar el exponente de uniformidad.

– Longitud de carga sobre el pie de banco (L_p)

Dimensión donde se depositará la carga explosiva, para determinarla se requiere del diámetro de perforación como la altura del banco.

$$L_p = H - 20 * \emptyset$$

Debido a que la altura del banco será un dato que variaremos para comparar y evaluar cual es el más adecuado para las características de fragmentación, se tiene en el siguiente cuadro los posibles valores obtenidos.

Tabla 3: Cálculo de longitud de carga sobre el pie de banco (Lp).

H (altura de banco, m)	D (mm)	Lp (m)
1.219	50.800	0.203
1.372	50.800	0.356
1.524	50.800	0.508
1.829	50.800	0.813
2.134	50.800	1.118
2.438	50.800	1.422

– **Cantidad de explosivo (Qe)**

A través de la ficha técnica, mediante la búsqueda de su peso del explosivo por sus dimensiones, obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 4: Cálculo del contenido de explosivo Qe.

H (altura de banco, m)	D (mm)	Lp (m)	Qe (Kg/taladro)
1.219	50.800	0.203	0.182
1.372	50.800	0.356	0.319
1.524	50.800	0.508	0.455
1.829	50.800	0.813	0.729
2.134	50.800	1.118	1.002
2.438	50.800	1.422	1.275

– **Factor de potencia (K)**

De acuerdo a la formula:

$$K = \left[\frac{A}{\bar{X}_{av}} Q_e^{1/6} \left[\frac{115}{S_{ANFO}} \right]^{\frac{19}{30}} \right]^{1.25}$$

Identificaremos primero este valor para poder asociarlo con la relación existente entre el factor de potencia y la proporción de V_o con Q_e , con ello al obtener el V_o , se identificará las dimensiones para el Burden (B) y el espaciamiento (S).

Tabla 5: Cálculo del factor de potencia (K).

H (altura de banco, m)	D (mm)	Lp (m)	Qe (Kg/tal.)	K (Kg/m)
1.219	50.800	0.203	0.182	0,116
1.372	50.800	0.356	0.319	0,130
1.524	50.800	0.508	0.455	0,140
1.829	50.800	0.813	0.729	0,154
2.134	50.800	1.118	1.002	0,165
2.438	50.800	1.422	1.275	0,174

– **Volumen de roca (V_o)**

Partiendo de la fórmula:

$$\frac{V_o}{Q_e} = \frac{1}{K}$$

Con esta relación obtendremos el volumen de roca para los casos que realizaremos. Además, se obtendrá el Burden y espaciamiento puesto que es igual el producto de estos más la longitud de taladro nos darán el valor de Volumen de roca.

Tabla 6: Cálculo del volumen de roca (V_o).

Qe (Kg/taladro)	K (Kg/m)	V_o (L*B*S)
0.182	0,116	1,574
0.319	0,130	2,452
0.455	0,140	3,252
0.729	0,154	4,717
1.002	0,165	6,070
1.275	0,174	7,347

– **Burden y Espaciamiento**

De acuerdo a la teoría establecida, para la determinación del valor del Burden, se puede obtener en función al diámetro del taladro, con lo cual al despejar podemos obtener el valor del espaciamiento; sin embargo, también se optó por una búsqueda proporcional de estos con lo que se busca también analizar con la siguiente proporción, $S/B = 1,2$.

$$B = \sqrt{L * \phi} \quad ; \quad B = \left(\frac{B * S}{1.2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$B * S = \frac{V_0}{L}$$

Tabla 7: Burden y Espaciado en función del diámetro del taladro o su proporción ($S/B=1,2$).

Vo	B*S	En función al diámetro de taladro		Proporción S: B = 1,2	
		B	S	B ₂	S ₂
1,574	1,519	2,607	0,583	1,125	1,350
2,452	2,103	2,766	0,760	1,324	1,589
3,252	2,510	2,915	0,861	1,446	1,736
4,717	3,035	3,193	0,950	1,590	1,908
6,070	3,347	3,449	0,970	1,670	2,004
7,347	3,545	3,687	0,961	1,719	2,062

Con los datos ya obtenidos, determinaremos el valor del exponente de uniformidad, el cual se realizará para ambos casos, B y S; B₂ y S₂, para poder tener una mayor variedad de opciones. Para el valor de error en perforación se considerará de 21 cm.

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D} \right) \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right]^{0.5} \left(1 - \frac{Z}{B} \right) \left[\frac{\text{abs}(Lb - Lt)}{L} + 0.1 \right]^{0.1} \left(\frac{L}{H} \right) (P)$$

Tabla 8: Cálculo del exponente de uniformidad.

Vo	B*S	En función al diámetro de taladro			Proporción S*B / 1.2		
		B	S	n	B ₂	S ₂	n ₂
1,574	1,519	2,607	0,583	0,906	1,125	1,350	1,370
2,452	2,103	2,766	0,760	0,902	1,324	1,589	1,377
3,252	2,510	2,915	0,861	0,887	1,446	1,736	1,373
4,717	3,035	3,193	0,950	0,844	1,590	1,908	1,363
6,070	3,347	3,449	0,970	0,798	1,670	2,004	1,356
7,347	3,545	3,687	0,961	0,753	1,719	2,062	1,351

4.2.4. Distribución de tamaño

De acuerdo a los posibles valores obtenidos del exponente de uniformidad, se identificará que porcentaje pasará por medio de distintas mallas con distinta dimensión (se trabajará con valores desde los 5 centímetros a 100 centímetros).

$$R = e^{-\left|\frac{X}{X_C}\right|^n}$$

Tabla 9: Porcentaje de retención en las mallas de 5 – 100 cm para el exponente de uniformidad “n”.

n (Exponente de uniformidad)	R									
	5	15	20	25	30	45	60	75	90	100
0,906	0,7923	0,5328	0,4417	0,3679	0,3074	0,1822	0,1098	0,0669	0,0412	0,0299
0,902	0,7911	0,5321	0,4414	0,3679	0,3077	0,1829	0,1106	0,0677	0,0418	0,0305
0,887	0,7866	0,5295	0,4402	0,3679	0,3087	0,1856	0,1138	0,0708	0,0445	0,0328
0,844	0,7734	0,5222	0,4368	0,3679	0,3115	0,1935	0,1232	0,0798	0,0524	0,0398
0,798	0,7583	0,5142	0,4331	0,3679	0,3145	0,2021	0,1338	0,0904	0,0620	0,0486
0,753	0,7427	0,5063	0,4294	0,3679	0,3175	0,2107	0,1446	0,1015	0,0724	0,0583

Tabla 10: Porcentaje de retención en las mallas de 5 – 100 cm para el exponente de uniformidad “n2”.

n ₂ (Exponente uniformidad)	R2									
	5	15	20	25	30	45	60	75	90	100
1,370	0,8957	0,6086	0,4788	0,3679	0,2770	0,1067	0,0362	0,0110	0,0031	0,0013
1,377	0,8966	0,6096	0,4792	0,3679	0,2766	0,1058	0,0355	0,0107	0,0029	0,0012
1,373	0,8960	0,6090	0,4790	0,3679	0,2768	0,1064	0,0359	0,0109	0,0030	0,0012
1,363	0,8945	0,6075	0,4782	0,3679	0,2774	0,1077	0,0369	0,0114	0,0032	0,0013
1,356	0,8933	0,6064	0,4776	0,3679	0,2779	0,1087	0,0377	0,0118	0,0034	0,0014
1,351	0,8925	0,6056	0,4772	0,3679	0,2782	0,1094	0,0383	0,0121	0,0035	0,0015

4.2.5. Análisis comparativo

Para el análisis de los resultados obtenidos, se evaluó en función a la media de cada cuadro debido a que su valor de cada uno varía en milésimas, por lo cual se realizó una única grafica comparativa y esta determinará primeramente el tipo de dimensión que deberá tener el Burden y el Espaciamiento.

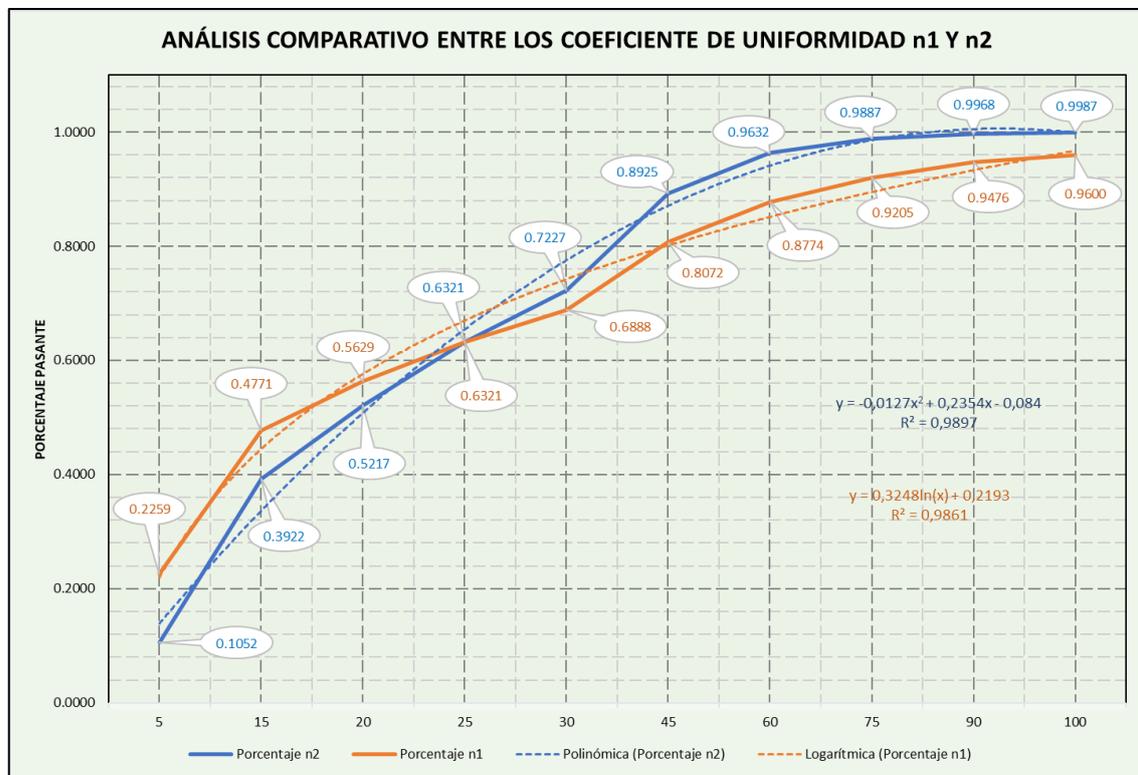


Figura 10: Análisis comparativo entre los exponentes de uniformidad.

Se adecuó la gráfica, según la mejor tendencia que generaban los coeficientes de uniformidad, siendo para n_1 y n_2 una tendencia logarítmica y polinómica respectivamente. Esta gráfica determinará cuál de las opciones de Burden y Espaciamiento, es la más adecuada según el contenido que pasará hasta llegar a una malla de 100 μ m.

Con respecto a las mallas que retienen dimensiones menores a 25 centímetros, estas deben de retener lo menos posible debido a que al llevarse al proceso de calcinación, estas se terminarían quemando y se volvería en un material no usable. A partir de la malla 30 hacia delante entre más se retenga será más óptimo debido a que disminuirá los tiempos de fragmentación de estas rocas ya que no son adecuadas para el proceso de calcinado.

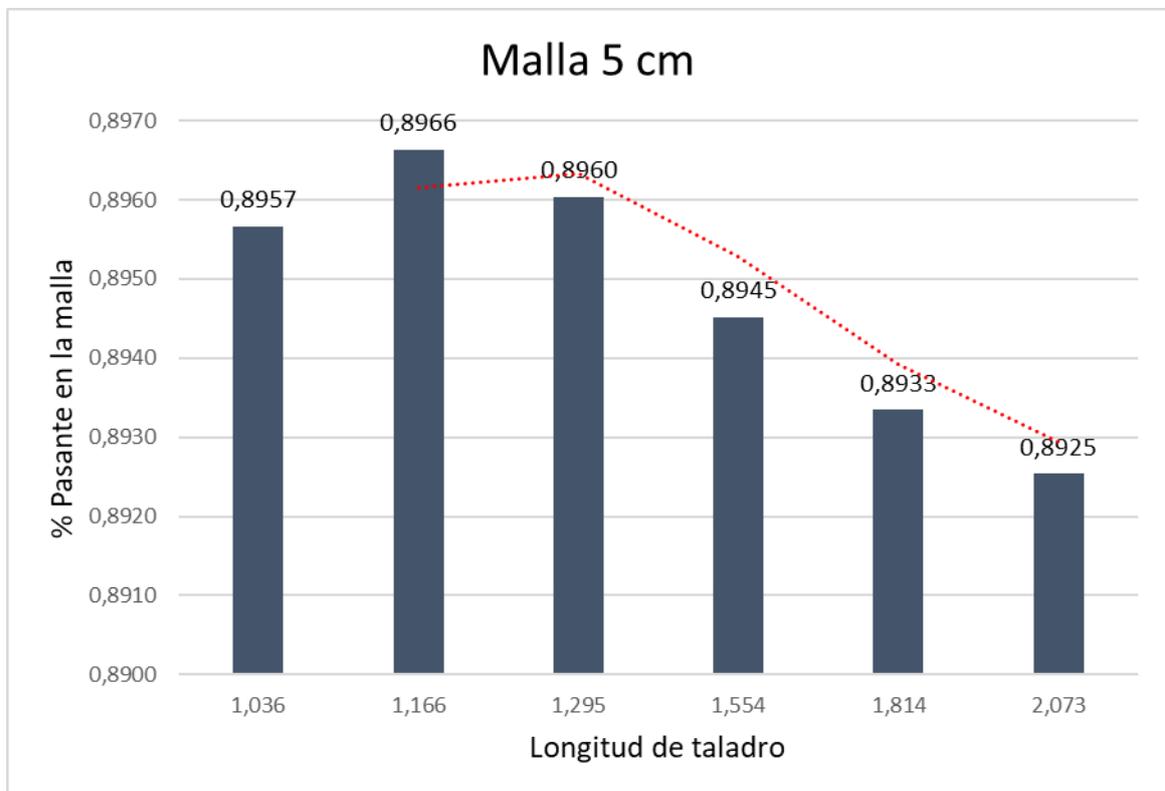


Figura 11: Contenido pasante en la malla de 5 μ m para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “ n_2 ”.

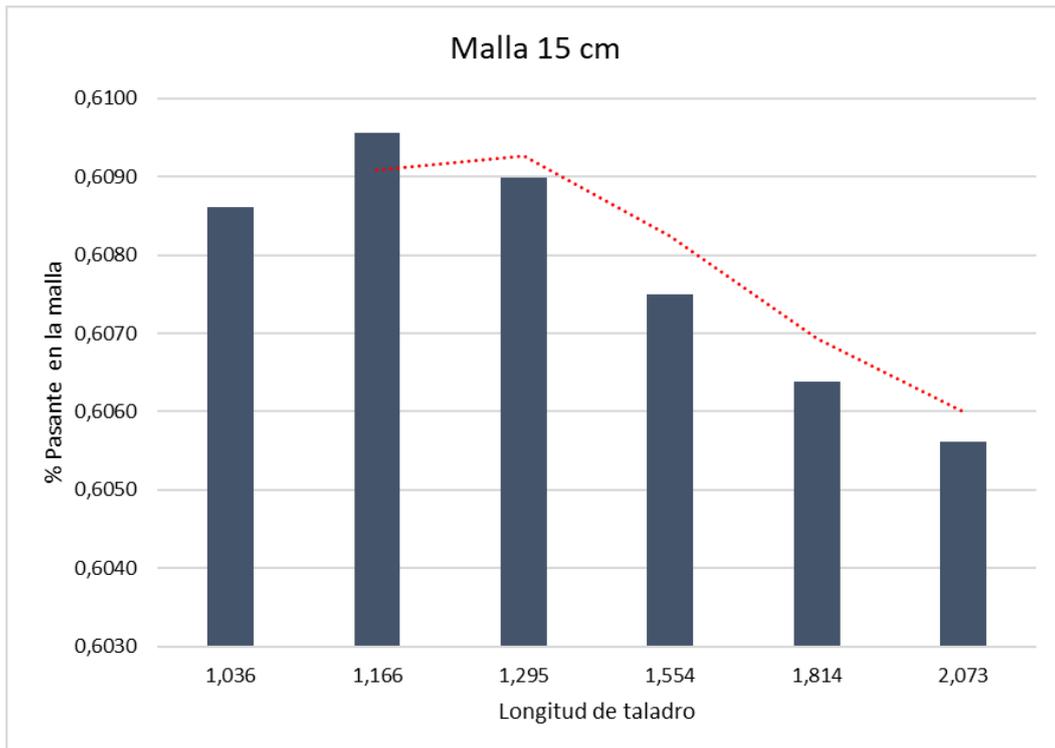


Figura 12: Contenido pasante en la malla de 15 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “ n_2 ”.

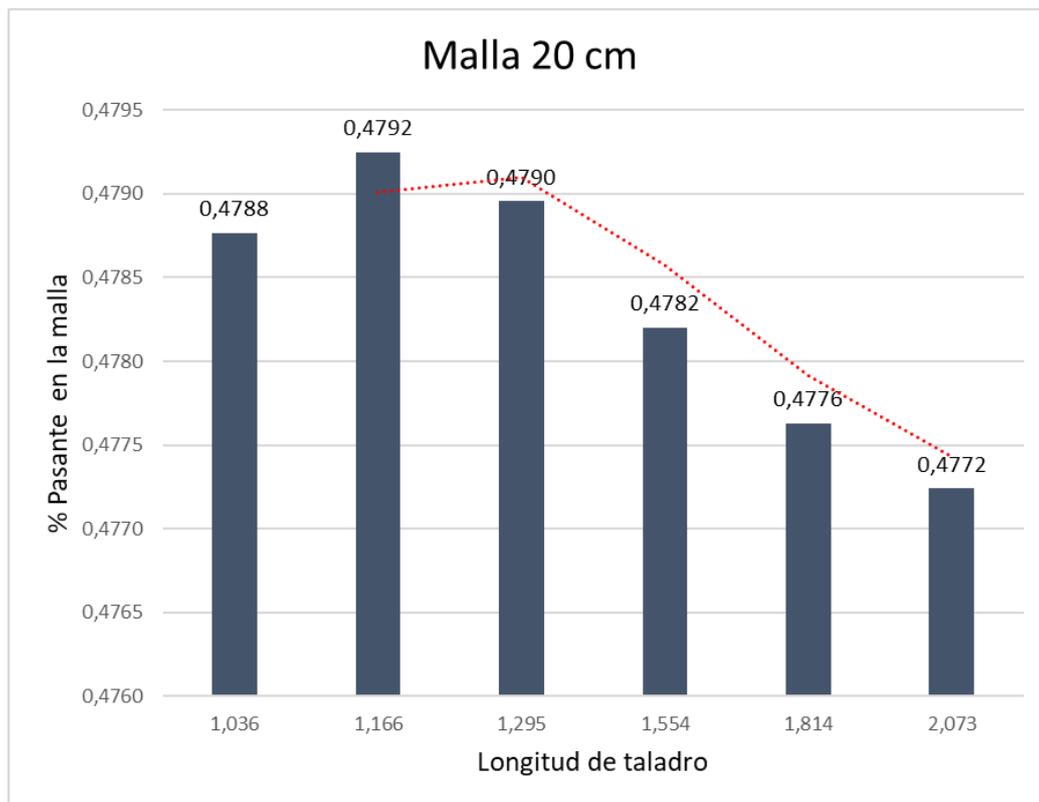


Figura 13: Contenido pasante en la malla de 20 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “ n_2 ”.

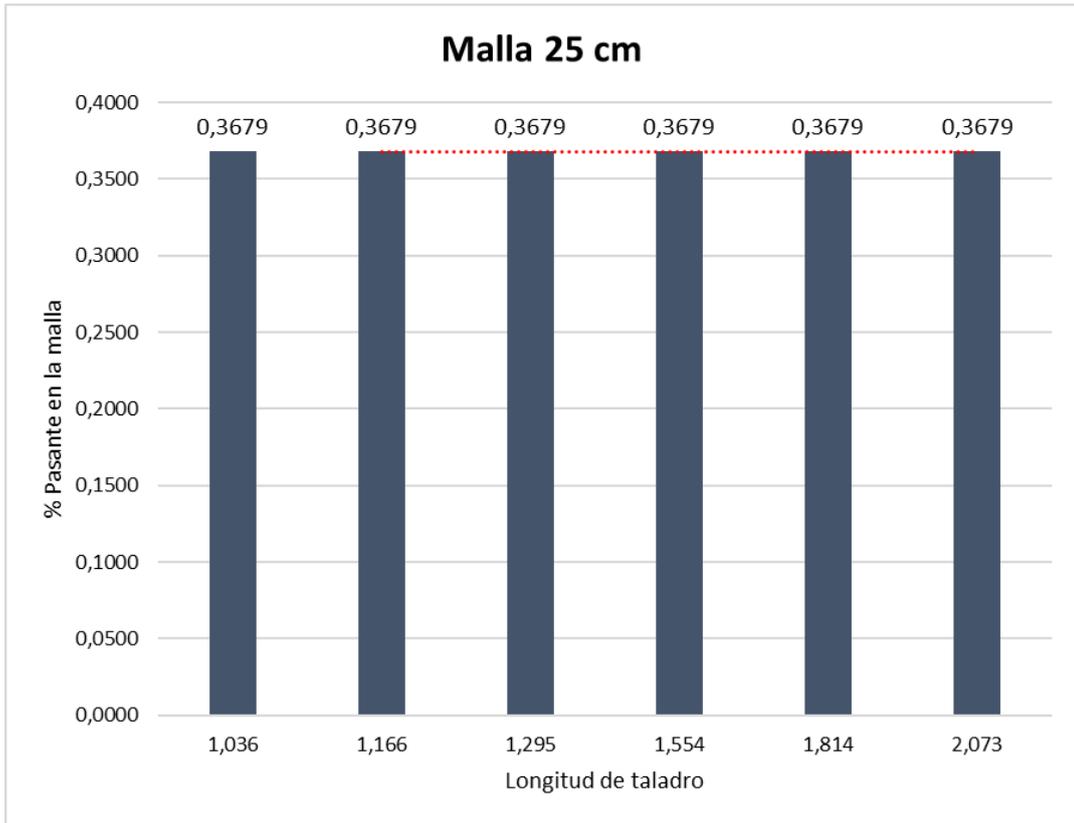


Figura 14: Contenido pasante en la malla de 25 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

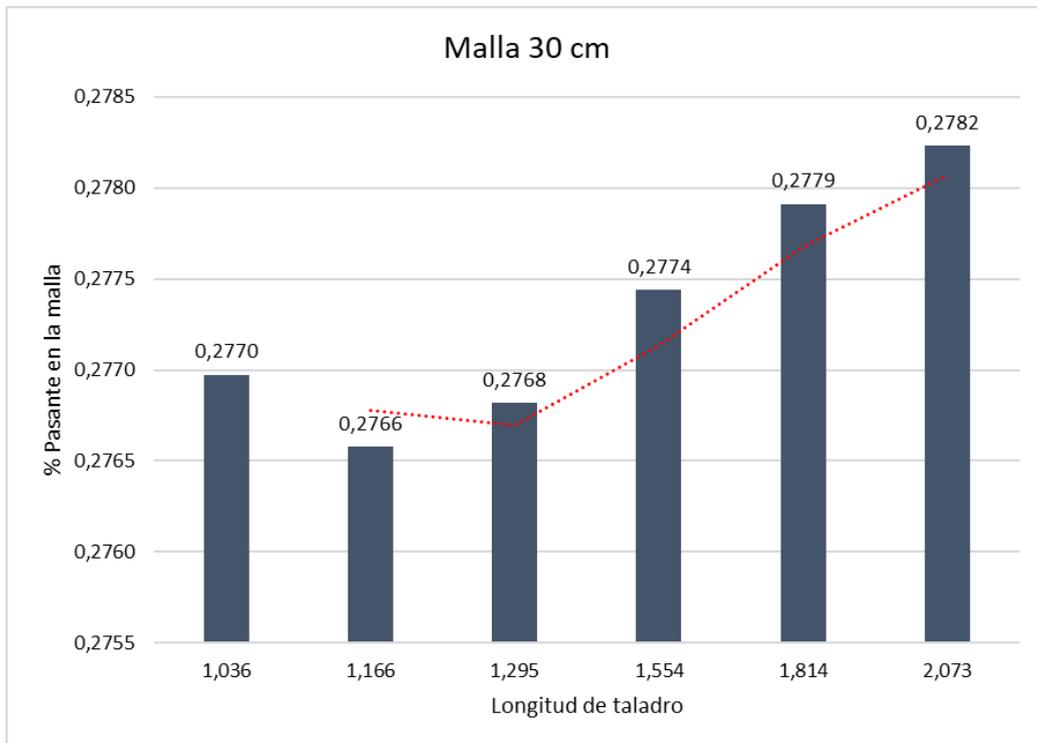


Figura 15: Contenido pasante en la malla de 30 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

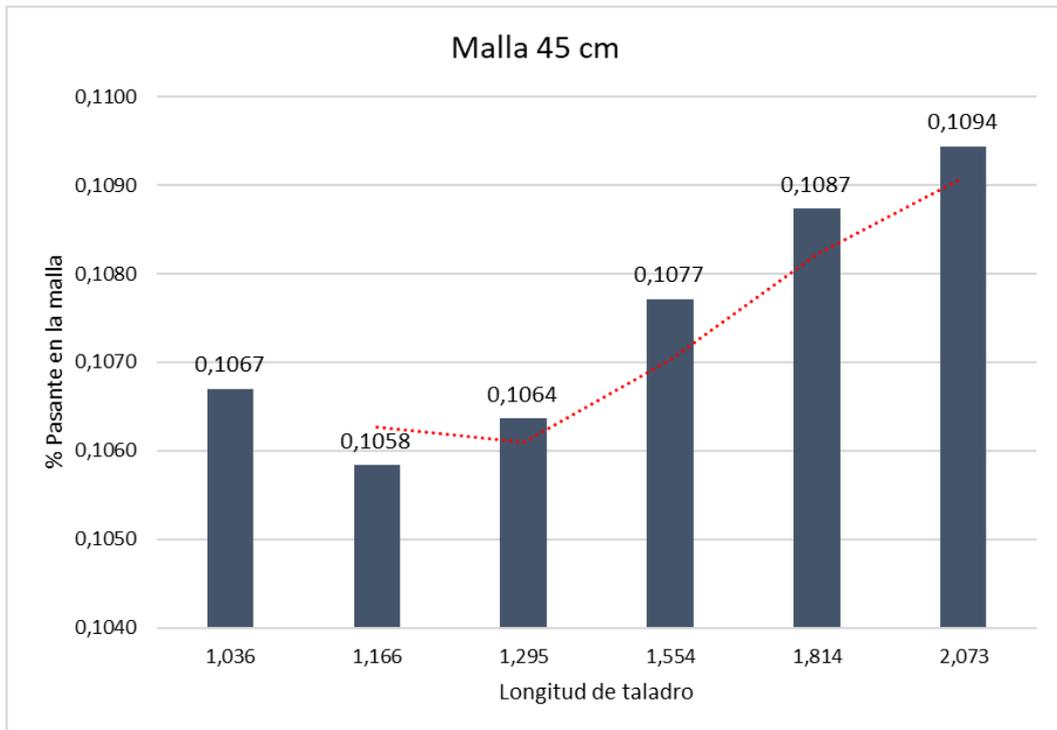


Figura 16: Contenido pasante en la malla de 45 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

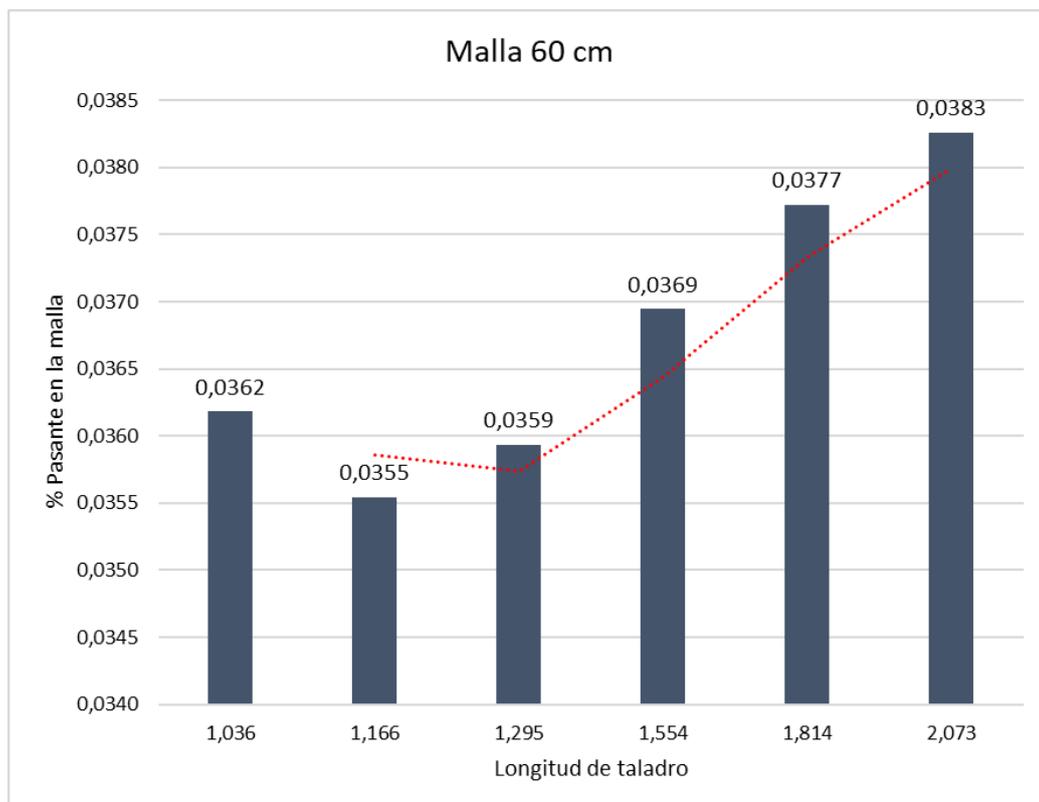


Figura 17: Contenido pasante en la malla de 60 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

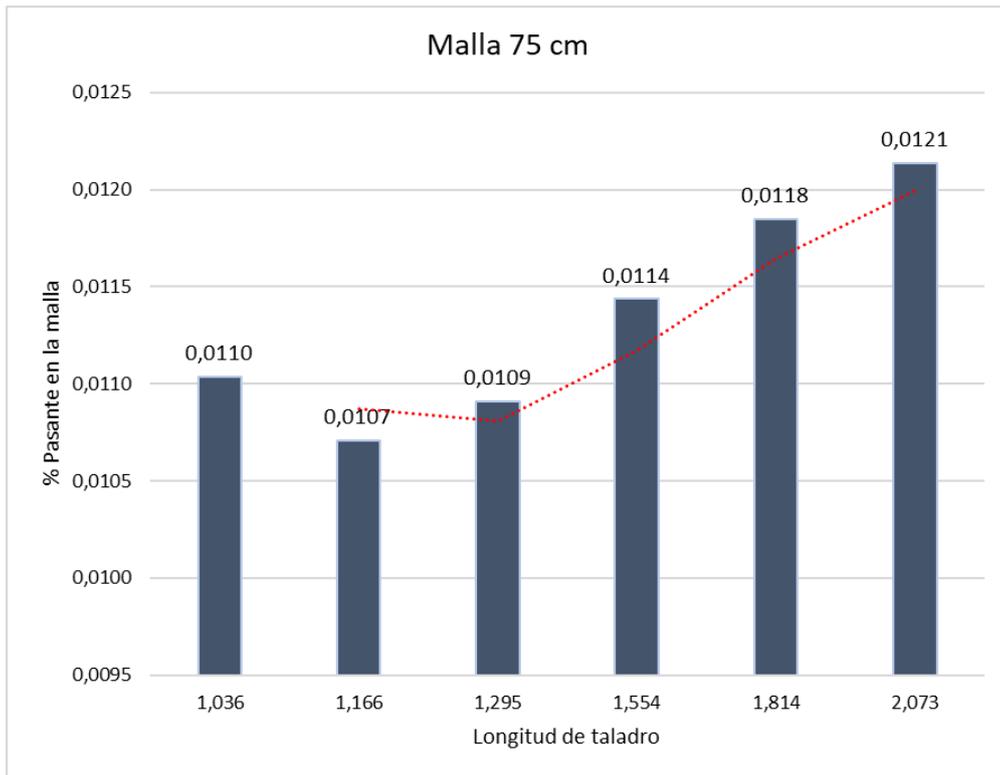


Figura 18: Contenido pasante en la malla de 75 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

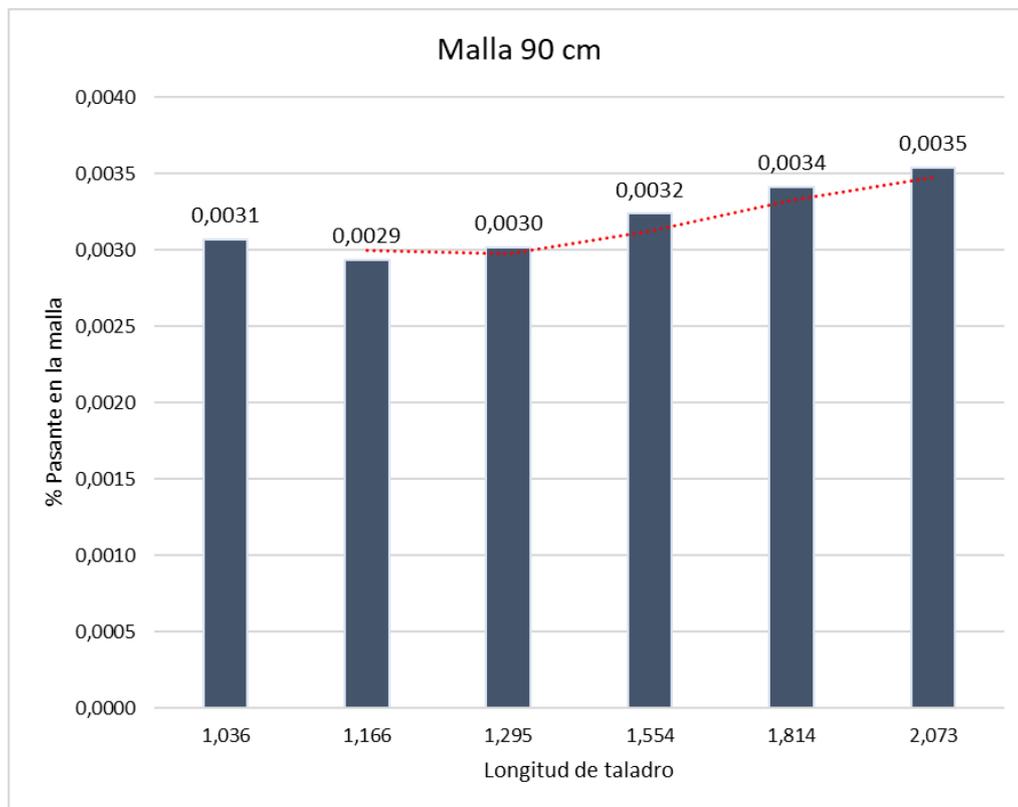


Figura 19: Contenido pasante en la malla de 90 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “n₂”.

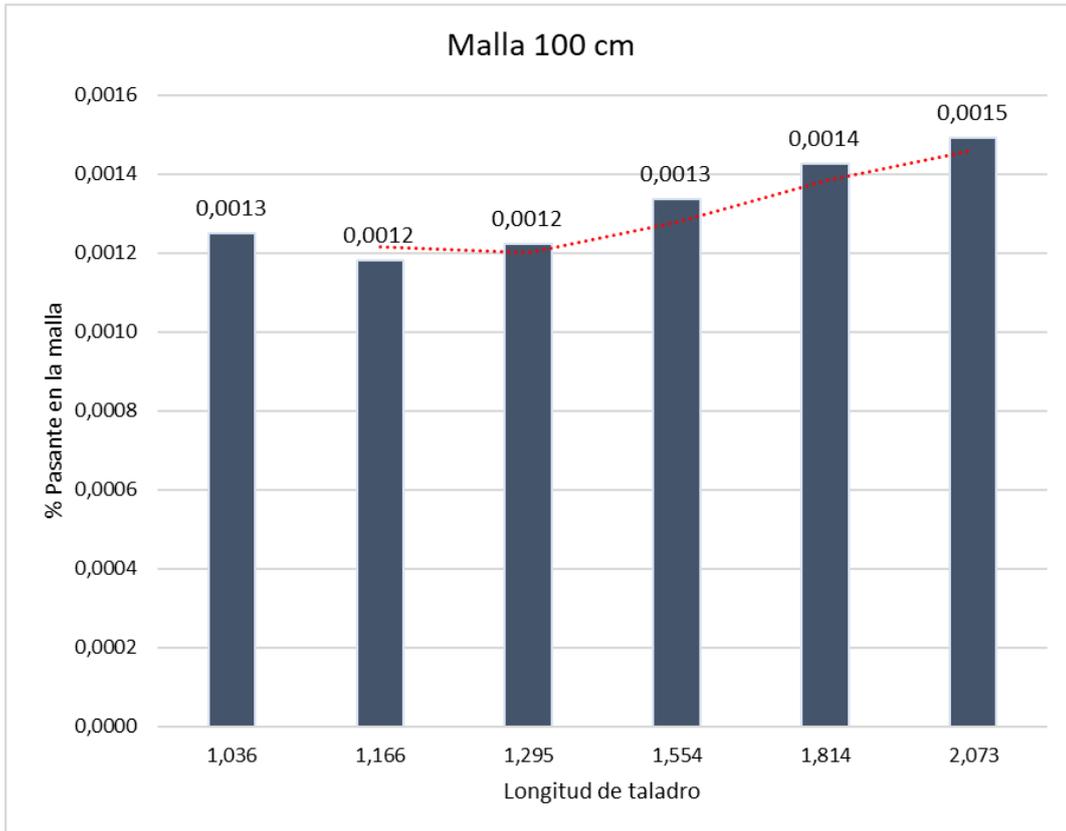


Figura 20: Contenido pasante en la malla de 100 cm para cada longitud de taladro, exponente de uniformidad “ n_2 ”.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Los parámetros de fragmentación utilizados en la cantera Bendición de Dios que son principalmente el diseño de malla, longitud de taladros y la carga explosiva.

El tamaño ideal requerido para el proceso de calcinación en la cantera Bendición de Dios, es de $X_n = 30 \text{ cm}$, el cual sirvió para identificar los valores de la carga explosiva de acuerdo al coeficiente de uniformidad, siendo este “n2”.

La elección de la longitud y distribución de taladros se evaluó según la fragmentación deseada para un óptimo proceso de calcinación, obteniendo como valores: $L = 1.814 \text{ m}$, $H = 2.134 \text{ m}$, 1.670 m , $S = 2.004$.

Con los valores obtenidos, se puede mantener al estándar establecido por la empresa para la calcinación, ello podrá favorecer en la reducción de tiempos y costos operacionales, todo esto basado teóricamente al modelo de Kuz – Ram.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio para determinar la fragmentación de roca mediante algún software como Wipfrag, DataFrag o SHOTPlus.

Desarrollar un estudio comparativo que analice el desempeño de distintos tipos de explosivo, como ANFO, las dinamitas y los hidrogeles, con el fin de identificar el más eficiente para alcanzar una voladura controlada y una fragmentación óptima.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Báes, Á. (2021). Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones de tronadura frente a cambios en el burden, el espaciamiento y tipo de explosivo: aplicación a fases 7 y 10 en minera los pelambres. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Báez Contreras, Á. S. (2021). Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones. Santiago de Chile.
- Barona, F. A. (2014). Evaluación del funcionamiento de sistemas de análisis digital de imágenes - Wipfrag y Split Online. Madrid.
- Barreda de la Cruz, M. A. (2022). Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de un sostenimiento adecuado en mina Chaparra, Caravelí, Arequipa - 2021. Arequipa.
- Barrera, L. (2017). Validación del modelo Kuz - Ram para optimizar la fragmentación de roca por voladura. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bavaresco, G. (2019). Modelos de taladros horizontales, taladradora de cabezas múltiples y taladradora de ejes múltiples y precaución y realización en el taladro. Junín.
- Becerra, L., & Torres, M. (2018). Influencia del plan de minado en la rentabilidad de la concesión Victoria, Frutillo Alto – Bambamarca, 2018. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Beraun, A. (2018). Análisis comparativo y evaluación técnica económica de los explosivos Heavy Anfo y Emulsión Fortis Advantage 100 gasificada para la fragmentación en el tajo norte del nivel 4336-Sociedad Minera El Brocal Colquijirca 2018. Huancayo.
- Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.
- ENAEEX. (2015). Manual de Voladura. Santiago de Chile.
- EXSA. (2019). Manual de Perforación y Voladura. Lima.
- Häberer, H. (2017). Guía de gestión ambiental para la minería no metálica y Oportunidades de la aplicación de los instrumentos de gestión ambiental a actividades de bajo o moderado impacto ambiental. Lima.

- Heredia, J. (2012). La carga de entrenamiento de los levantadores en los halones y cuclillas Anuario de levantamiento de pesas. Cultura física y deportes Moscú. Estados Unidos.
- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2013). PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS EN MINERIA.
- Herrera Herdbert, J. (2017). Introducción a la minería (Vol. I). Madrid, Madrid, España. <https://doi.org/10.20868>
- Herrera, J. (2017). Diseño de explotaciones de cantera para áridos y excavacion descendiente y abandono del talud final en bancos altos. Lima.
- Herrmann, C., & Zappettini, E. (2014). Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente. Buenos Aires: SEGEMAR.
- J. W. (1984). Boletín N°38. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Kuznetsov, V. (1973). The Mean Diameter of the Fragments formed by Blasting Rock. Soviet Mining Science.
- Leiva, A. (2007). Influencia de la optimización de la fragmentación de roca en la rentabilidad de las operaciones mina - molienda. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Nicolas, A. (2020). Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de cápsulas plasma en el Tajo Santa Rosa de la Empresa Administradora Cerro S.A.C. Cerro de Pasco. . Pasco.
- ODN. (2024). Pronóstico semanal del clima - Oficina de Defenza Nacional - Bambamarca. Bambamarca.
- OSINERGMIN. (2017). Guía de criterios Geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Lima: Osinergmin.
- Portal, M. (2021). Análisis técnico económico en el proceso de perforación y voladura en el Tajo Quecher Main - Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Quispialaya, J., & Mesias, J. (2022). Aplicación del modelo Kuz-Ram para predecir la fragmentación en base a la velocidad de perforación en una mina a cielo abierto. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Rojas Valenzuela, F. J. (2021). Estimación de la fragmentación producto de la tronadura de rocas en minería a cielo abierto utilizando modelos predictivos y algoritmos de regresión. Concepción.

- Rolando, A., & Manuel, S. (2022). Propuesta de ajuste al modelo predictivo Kuz-Ram empleando análisis granulométrico de imágenes para mejorar la estimación de la fragmentación de roca volada en un yacimiento hidrotermal de alta sulfuración del Perú. Lima: Universidad Tecnológica del Perú.
- Salazar, A. (2013). Descripción de modelos de predicción de fragmentación rocosa para minería y reducción del consumo de explosivos y accesorios. Arequipa.
- Wabo, E. (2019). Medición de diámetros por encima de la Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Lima.

ANEXOS

ANEXO I. PLANO N.º 01. UBICACIÓN POLÍTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

ANEXO II. PLANO N.º 02. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

ANEXO III. PLANO N.º 03. GEOLOGÍA LOCAL

ANEXO IV. IMÁGENES TOMADAS EN LA ETAPA DE CAMPO

ANEXO V. CARTA DE ACEPTACIÓN PARA ELABORACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA EMPRESA.



Figura 21: Zona de acopio de la Calera Bendición de Dios, Bambamarca.



Figura 22: Barrenos de perforación de 4 y 6 pies de la mina Bendición de Dios, Bambamarca



Figura 23: Zona de acopio de fragmentos óptimos para la calcinación de la mina Bendición de Dios



Figura 24: Toma de rumbo y buzamiento de la mina Bendición de Dios, Bambamarca



Bambamarca 24 de julio de 2023

CARTA N° 001-2024-CBD

Ing. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA
Director De La E.A.P. De Ingeniería De Minas
Universidad Nacional de Cajamarca

Asunto : ACEPTACIÓN PARA ELABORACION DE TESIS

De mi especial consideración:

Es grato dirigirme a usted para saludarle cordialmente y a la vez comunicarle que el ex alumno **Hilton Gyancarlos Sánchez Balcázar**, egresado de la escuela académico profesional de Ingeniería de Minas, facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, **ha sido aceptado para poder realizar su tesis** que lleva por título "DETERMINACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN FUNCIÓN AL MODELO KUZ – RAM DE LA CALERA BENDICIÓN DE DIOS" dentro de nuestras operaciones, por la cual se le autoriza el ingreso y se le dará las facilidades para que realice y culmine la misma, dando inicio el 01 de agosto del año 2023.

Sin otro particular aprovecho la oportunidad para expresarle las muestras de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente:

GUILLERMO ORTIZ COTRINA
GERENTE GENERAL
CALERA BENDICIÓN DE DIOS E.I.R.L