

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



**TESIS**

**“PROPUESTA DE UNA MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR EL  
PLAN DE MINADO DE LA CANTERA DE CALIZA EL ZASAL,  
BAMBAMARCA”**

Para Optar el Título Profesional de:  
**INGENIERO DE MINAS**

Autor:

**Bach. Ynga Delgado Jim Harry Jesús**

Asesor:

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

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2025**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** JIM HARRY JESÚS YNGA DELGADO  
**DNI:** 72667370  
**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:**  
PROPUESTA DE UNA MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR EL PLAN DE MINADO DE LA CANTERA DE CALIZA EL ZASAL, BAMBAMARCA  
**Fecha de evaluación:** 14/08/2025
- Software antiplagio:**       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 10%
- Código Documento:** Oide:3117: 483483173
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 14/08/2025

 <hr/> <p><b>FIRMA DEL ASESOR</b> <i>Roberto Severino Gonzales Yana</i></p>	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 14/08/2025 20:12:14-0500</p> <hr/> <p><b>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</b></p>
---	--



# Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

## FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



### ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *PROPUESTA DE UNA MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR EL PLAN DE MINADO DE LA CANTERA DE CALIZA EL ZASAL, BAMBAMARCA.*

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

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0518-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 22 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintinueve días del mes de agosto de 2025**, siendo las ocho horas (08:00 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. Victor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *PROPUESTA DE UNA MALLA DE PERFORACIÓN PARA MEJORAR EL PLAN DE MINADO DE LA CANTERA DE CALIZA EL ZASAL, BAMBAMARCA*, presentado por *JIM HARRY JESÚS YNGA DELGADO*, 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 ..... *(QV INCE)* ..... (En letras)

En consecuencia, se lo declara *APROBADO* ..... con el calificativo de ..... *(QV INCE)* ..... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las ..... *8:00 a.* ..... 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. Victor Ausberto Arapa Vilca.  
Secretario

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

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Nacional de Cajamarca en especial a la escuela profesional de ingeniería de minas por formarme profesionalmente para poder ser un profesional que aporte valor a la industria minera, también a mi asesor quien me ha compartido su conocimiento para el desarrollo de la tesis.*

## **DEDICATORIA**

*A Dios por ser la luz incondicional que me ha guiado mi camino para ir cumpliendo cada objetivo en mi vida.*

*A mis Padres por inculcarme grandes valores, ser mi inspiración y soporte en mi desarrollo profesional. A mis hermanos, por estar en todo momento brindándome comprensión, cariño y motivándome para cumplir mis objetivos.*

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1.1. Antecedentes Internacionales</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1.2. Antecedentes Nacionales</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. BASES TEÓRICAS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.1. Clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski 1989</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.2. Formación de la Caliza</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.3. Explotación de Canteras</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2.4. Elementos de un barco en un Cantera</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2.5. Evaluación de Yacimientos y Reservas</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2.6. Ubicación de la planta</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.7. Tipos de explotaciones de cantera</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.8. Cantera como fuente de aprovisionamiento</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.9. Clases de canteras</b> .....	<b>14</b>

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
2.2.10. Explotación de canteras.....	15
2.2.11. Diseño de cantera.....	16
2.2.12. Fases de la explotación de canteras.....	17
2.2.13. Explosivos.....	21
2.2.14. Perforación.....	24
2.2.15. Actividades mineras superficiales iniciales.....	28
2.2.16. Secuencia de voladura en un banco.....	32
2.2.17. Cal.....	34
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	35
<b>CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN.....	37
3.1.1. Ubicación Geográfica.....	37
3.1.2. Accesibilidad.....	37
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	38
3.2.1. Tipo de investigación.....	38
3.2.2. Nivel de investigación.....	39
3.2.3. Diseño de la investigación.....	39
3.2.4. Método de la investigación.....	39
3.2.5. Población de estudio.....	39
3.2.6. Muestra.....	39
3.2.7. Unidad de análisis.....	40
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	40
3.3.1. Técnicas .....	40
3.3.2. Instrumentos, materiales, equipos y personal.....	40

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>3.4. PROCEDIMIENTO</b> .....	41
<b>3.4.1. Etapa preliminar de gabinete</b> .....	41
<b>3.4.2. Etapa de campo</b> .....	41
<b>3.4.3. Etapa final de gabinete</b> .....	41
<b>3.5. GEOLOGÍA</b> .....	42
<b>3.5.1. Geología Local</b> .....	42
<b>3.6. OPERACIÓN MINERA EN CANTERA EL ZASAL – BAMBAMARCA</b> ... 43	
<b>3.6.1. Producción diaria de caliza.</b> .....	43
<b>3.6.2. Estimación de reservas minerales en cantera El Zasal a mayo de 2024.</b> .....	43
<b>3.6.3. Reservas probadas de mineral de caliza.</b> .....	43
<b>3.6.4. Características técnicas.</b> .....	46
<b>3.6.5. Método de explotación de yacimiento de caliza en cantera El Zasal</b> .....	46
<b>3.6.6. Operaciones unitarias.</b> .....	47
<b>3.6.7. Factor de esponjamiento.</b> .....	48
<b>3.6.8. Carguío</b> .....	48
<b>3.6.9. Equipos de la Sociedad Minera de el Zasal de Cajamarca.</b> .....	48
<b>3.6.10. Transporte.</b> .....	48
<b>3.6.11. Trituración manual con combas.</b> .....	50
<b>3.6.12. Chancado de carbón</b> .....	52
<b>3.6.13. Calcinación</b> .....	52
<b>3.6.14. Derivados de la caliza</b> .....	52
<b>3.6.15. Cal</b> .....	52
<b>3.6.16. Canales de comercialización</b> .....	53
<b>CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	54

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>4.1. CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS DE LA EXPANSIÓN DE LA ZONA 2.....</b>	<b>54</b>
4.1.1. <b>Determinación de RQD (Rock Quality Designation) progresiva 0 – 24 km. .</b>	<b>54</b>
4.1.2. <b>Evaluación geomecánica de la cantera de caliza El Zasal .....</b>	<b>55</b>
4.1.3. <b>Resultados de resistencia compresiva uniaxial (RCU) con esclerómetro.....</b>	<b>56</b>
4.1.4. <b>Resistencia compresiva uniaxial (RCU) de especímenes. ....</b>	<b>56</b>
4.1.5. <b>Calidad del macizo rocoso mediante RMR de Bieniawski 1989. ....</b>	<b>56</b>
4.1.6. <b>Calidad de macizo rocoso de cantera de caliza El Zasal.....</b>	<b>57</b>
4.1.7. <b>Especificaciones técnicas del macizo rocoso. ....</b>	<b>57</b>
<b>4.2. PLAN DE MINADO ANTIGUO .....</b>	<b>57</b>
4.2.1. <b>Método de explotación de yacimiento de caliza en cantera El Zasal.....</b>	<b>57</b>
4.2.2. <b>Perforación antigua.....</b>	<b>58</b>
4.2.3. <b>Disparo simultáneo y rotativo antiguo. ....</b>	<b>58</b>
4.2.4. <b>Malla antigua de perforación. ....</b>	<b>59</b>
4.2.5. <b>Diseño de malla de perforación antigua.....</b>	<b>59</b>
4.2.6. <b>Voladura antigua.....</b>	<b>62</b>
4.2.7. <b>Volumen antiguo.....</b>	<b>62</b>
<b>4.3. PLAN DE MINADO NUEVO .....</b>	<b>63</b>
4.3.1. <b>Perforación Propuesta-nueva.....</b>	<b>63</b>
4.3.2. <b>Disparo simultáneo y rotativo nuevo .....</b>	<b>63</b>
4.3.3. <b>Nueva malla de perforación en la cantera de caliza El Zasal.....</b>	<b>64</b>
4.3.4. <b>Diseño de malla de perforación nueva.....</b>	<b>65</b>
4.3.5. <b>Voladura nueva.....</b>	<b>67</b>
4.3.6. <b>Volumen nuevo. ....</b>	<b>67</b>

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
4.3.7. Detalles Técnicos de los equipos de carguío y transporte.....	68
4.4. VIDA DE LA MINA DE ACUERDO A LA CAPACIDAD DE CALCINACIÓN.....	69
4.4.1. Vida de la mina de acuerdo a la malla antigua.....	69
4.4.2. Vida de la mina de acuerdo a la malla propuesta (nueva). .....	70
4.5. Evaluación de programa de producción y plan de minado .....	70
4.5.1. Cálculo de ciclos para producción diaria caliza en m <sup>3</sup> . .....	71
4.5.2. Cálculo de producción en metros cúbicos de caliza. ....	71
4.5.3. Tonelaje de caliza puesta en cancha de horno de calcinación por día.....	72
4.5.4. Capacidad de calcinación óptima en los hornos de la cantera el Zasal.....	72
4.5.5. Optimización capacidad de calcinación en hornos H-A y H-B. ....	75
4.5.6. Ganancias logradas con el plan de minado de la malla antigua .....	76
4.5.7. Ganancias logradas con el plan de minado de la malla propuesta (nueva). ..	76
4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	77
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	78
5.2. RECOMENDACIONES.....	79
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Descripción de grado de meteorización de rocas. ....	5
<b>Tabla 2.</b> Descripción de resistencia a compresión simple. ....	6
<b>Tabla 3.</b> Factor de esponjamiento. ....	8
<b>Tabla 4.</b> Coordenadas UTM. ....	37
<b>Tabla 5.</b> Datos de accesibilidad a la zona de estudio. ....	37
<b>Tabla 6.</b> Resumen de reservas de la cantera de caliza El Zasal. ....	46
<b>Tabla 7.</b> Resumen de dominio estructural progresiva 0 – 24m cantera de caliza El Zasal. ....	55
<b>Tabla 8.</b> Rock Mass Rating (RMR) progresiva 0 - 24 cantera de caliza El Zasal. ....	56
<b>Tabla 9.</b> El valor de RMR en la tabla se tiene. ....	57
<b>Tabla 10.</b> Modelos de maquinarias. ....	68
<b>Tabla 11.</b> Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno en cantera El Zasal. ....	72
<b>Tabla 12.</b> Estadística de capacidad de calcinación en tn/día en horno H-A y horno H-B en el año 2024. ....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.
<b>Figura 1.</b> Elementos de un Banco.....	9
<b>Figura 2.</b> Etapas para la planificación de una cantera. ....	11
<b>Figura 3.</b> Ciclos funcionales de una empresa minera. ....	21
<b>Figura 4.</b> Desarrollo de una detonación.....	23
<b>Figura 5.</b> Proceso de reacción de explosivo. ....	24
<b>Figura 6.</b> Estructuras de martillo en fondo. ....	27
<b>Figura 7.</b> Broca de botones.....	27
<b>Figura 8.</b> Esquema de carga. ....	32
<b>Figura 9.</b> Desplazamiento en voladura. ....	33
<b>Figura 10.</b> Perforación y volcadura en bancos de Caliza. ....	33
<b>Figura 11.</b> Rutas de accesibilidad. Ruta Cajamarca – Calera El Zasal.....	38
<b>Figura 12.</b> Ubicación de la Formación Cajamarca (Ks-ca), en la zona de estudio.....	42
<b>Figura 13.</b> Área de las tres zonas de la Calera el Zasal. ....	44
<b>Figura 14.</b> Área y volumen de la Zona 2-Fase 2 de la Cantera el Zasal.....	45
<b>Figura 15.</b> Proceso de operaciones mina en la cantera El Zasal.....	51
<b>Figura 16.</b> Malla de perforación antigua para RMR 60 en cantera de caliza El Zasal Bambamarca. ....	59
<b>Figura 17.</b> Perfil longitudinal antiguo del banco de producción en cantera el Zasal - Bambamarca. ....	59
<b>Figura 18.</b> Transferencia de Energía en Malla de perforación antigua en la cantera el Zasal- Bambamarca. ....	60
<b>Figura 19.</b> Malla de perforación nueva (propuesta) para RMR 60 en cantera de caliza El Zasal – Bambamarca. ....	64

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 20.</b> Banco en cantera de caliza el Zasal. ....	65
<b>Figura 21.</b> Transferencia de Energía en Malla de perforación propuesta en la cantera el Zasal-Bambamarca .....	65
<b>Figura 22.</b> Capacidad de calcinación optima en tn/día en horno H-A.....	73
<b>Figura 23.</b> Capacidad de calcinación optima en tn/día en horno H-B.....	73
<b>Figura 24.</b> Capacidad de calcinación optima en tn/día en horno H-C.....	74
<b>Figura 25.</b> Capacidad de calcinación optima en tn/día en horno H-D.....	74
<b>Figura 26.</b> Estadísticas de calcinación optima en tn/día en horno H-A y horno H-B. ....	76

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

CONTENIDO	Pág.
<b>Fotografía 1.</b> Camión Volvo para el transporte de caliza - Cantera El Zasal.....	49
<b>Fotografía 2.</b> Pila de Caliza con bolones de diámetro de 15cm. ....	49
<b>Fotografía 3.</b> Fragmento de cal de diámetro 5cm después de ser calcinado y triturado por la chancadora primaria. ....	51
<b>Fotografía 4.</b> Producto de la calcinación de la caliza. ....	52
<b>Fotografía 5.</b> Fracturas y diaclasas en 24 metros en cara del talud de caliza. ....	55
<b>Fotografía 6.</b> Perforación diseño de malla antigua.....	61
<b>Fotografía 7.</b> Proceso de perforación con AirRoc T25 en la cantera el Zasal.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS

NE:	Noreste
s:	Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
sigc:	Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso
sigcm:	Resistencia global del macizo rocoso
sigt:	Fuerza de compresión del macizo rocoso
SW:	Suroeste
$\sigma_{ci}$ :	Resistencia a la compresión uniaxial de los bloques de roca
$\phi$ :	Diámetro de taladro
$\tau$ :	Tensión Tangencial
UTM:	Universal Transversal de Mercator
WGS-84:	World Geodesic System 1984
$\gamma$ :	Peso Específico
RQD:	Índice de calidad de roca.
RMR:	Valoración de la masa rocosa.
GSI:	Índice de Resistencia Geológica.
JRC:	Índice de rugosidad de junta
JCS:	Resistencia a la compresión simple de la discontinuidad.
TM:	Toneladas métricas.
m:	Metros.
m <sup>2</sup> :	Metros cuadrados.
m <sup>3</sup> :	Metros cúbicos.

## RESUMEN

En la investigación el objetivo principal es proponer una malla de perforación para mejorar el plan de minado de la cantera de caliza el Zasal. Siendo la metodología de tipo no experimental, diseño descriptivo y método de investigación deductivo e inductivo, Se ha determinado del macizo rocoso de calizas es de un RMR 60 es una roca de calidad regular con una densidad en banco de  $2.52\text{tn}/\text{m}^3$ , las reservas minerales en la zona 2 en expansión Fase 2 son de un área de  $35070.182\text{m}^2$ , volumen de  $1753509.10\text{m}^3$  y de un tonelaje de  $4418842.93\text{tn}$ , en el diseño de mallas de perforación resulto un incremento de la profundidad del taladro de  $1.20\text{m}$  a  $1.70\text{m}$ , el número de taladros de 8 a 18, en la voladura se logró optimizar al incrementar a un volumen de  $207.44\text{m}^3$  de roca fragmentada, el transporte y carguío en cargadora de cucharón  $4.65\text{m}^3$  la producción diaria de  $319\text{tn}/\text{día}$  de calcinación de los cuatro hornos con una capacidad operativa de 95%, con esta producción diaria se logra incrementar las ganancias de US \$  $165676.00$  resultando de un 17% más.

**Palabras clave:** Optimización, Calidad del macizo rocoso, Cantera de caliza, Diseño de malla de perforación, Plan de minado.

## ABSTRACT

The main objective of the research is to propose a drilling mesh to improve the mining plan for the El Zasal limestone quarry. Being the methodology of non-experimental type, descriptive design and deductive and inductive research method, it has been determined that the limestone rock massif is an RMR 60 is a regular quality rock with a bench density of 2.52 tn / m<sup>3</sup>, the mineral reserves in zone 2 in Phase 2 expansion are an area of 35070.182 m<sup>2</sup>, volume of 1753509.10 m<sup>3</sup> and a tonnage of 4418842.93 tn, in the design of drilling meshes resulted in an increase in the depth of the drill from 1.20 m to 1.70 m, the number of drills from 8 to 18, in the blasting it was possible to optimize by increasing to a volume of 207.44 m<sup>3</sup> of fragmented rock, the transport and loading in a bucket loader 4.65 m<sup>3</sup> the daily production of 319 tn / day of Calcination of the four kilns with an operating capacity of 95%, with this daily production, increased profits by US\$165,676.00, resulting in a 17% increase.

**Keywords:** Optimization, Rock mass quality, Limestone quarry, Drilling pattern design, Mining plan.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La cantera de caliza El Zasal, ubicada en el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, región Cajamarca, desarrolla sus operaciones extractivas con una producción diaria aproximada de 100 toneladas mediante técnicas convencionales, como el uso de retroexcavadoras y perforadoras AirRoc T25 con una profundidad promedio de 1.2 metros. Sin embargo, esta producción se realiza de forma artesanal y poco planificada, lo que limita significativamente la eficiencia operativa, el aprovechamiento del yacimiento y la sostenibilidad de la actividad minera en la zona. La escasa aplicación de criterios técnicos adecuados en la perforación y voladura ha generado un bajo rendimiento en el avance de bancos, una mala distribución del material fragmentado y un uso ineficiente de los recursos disponibles, como el sistema de transporte, el carguío y la capacidad de los hornos.

En este contexto, resulta necesario formular una propuesta técnica que permita optimizar el proceso de explotación. Surge entonces la interrogante central: ¿Cómo será el impacto de una propuesta de malla de perforación en la mejora del plan de minado en la cantera de caliza El Zasal, distrito de Bambamarca? Frente a esta situación, la presente investigación tiene como objetivo general realizar una malla perforación para mejorar el plan de minado de la cantera de caliza el Zasal distrito Bambamarca. Obteniendo como resultado el aumento en la eficiencia de la fragmentación y aprovechar de forma más racional los recursos disponibles. De la misma manera este objetivo se encuentra complementada de sus objetivos específicos que son: Evaluar las características geomecánicas de la expansión de la Zona 2 del yacimiento y las reservas minerales en la cantera de caliza El Zasal. Determinar el número de taladros en frente del banco aplicando el diseño de malla de perforación.

Determinar el avance de la voladura con el diseño de malla de perforación el banco de cantera el Zasal. Finalmente proponer una nueva malla de perforación en la cantera de caliza El Zasal distrito Bambamarca.

La importancia de esta investigación radica en el contexto actual de la industria minera no metálica, donde la demanda de óxido de calcio (cal) ha incrementado considerablemente debido a su aplicación en diversas actividades industriales, como la metalurgia del cobre, oro y plata, donde cumple funciones de regulador de pH, fundente y desmoldante. Este incremento en la demanda genera una oportunidad para optimizar la

explotación de caliza, particularmente en la cantera El Zasal, que cuenta con reservas explotables, pero mal aprovechadas debido a la falta de una estrategia técnica adecuada.

Asimismo, si bien la actividad minera genera beneficios económicos significativos a través de impuestos y regalías, también puede ocasionar impactos negativos al medio ambiente y a la salud de los trabajadores cuando se realiza sin planificación ni control técnico. Por ello, una propuesta de mejora en el diseño de perforación no solo busca incrementar la producción y rentabilidad, sino también minimizar los riesgos ambientales y ocupacionales asociados a voladuras mal ejecutadas.

Este estudio se desarrollará específicamente en la Zona 2 – Expansión Fase 2 de la cantera, donde se evaluarán las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y se aplicarán criterios técnicos para el diseño de una malla de perforación eficiente. La investigación estará limitada a los dominios actualmente operativos de la cantera, sin considerar nuevas áreas de exploración. Cabe señalar que existen limitaciones técnicas, ya que no se cuenta con equipos especializados para la medición de vibraciones, el análisis detallado de la fragmentación del material ni para la evaluación de la velocidad de detonación y su interacción con las características mecánicas de la roca. A pesar de ello, se utilizarán métodos convencionales de evaluación geotécnica y cálculos de diseño basados en parámetros empíricos confiables.

La investigación se desarrolla en cinco capítulos: El Capítulo I contiene el planteamiento del problema, justificación, delimitación y objetivos planteados en la investigación. El Capítulo II, contiene el marco teórico de la investigación, con los antecedentes teóricos, bases teóricas en las cuales se ha fundamentado la investigación y definición de términos básicos. En el capítulo III, se realiza un detalle de los materiales y métodos describiendo la ubicación geográfica de la zona de estudio, la metodología de la investigación y las técnicas e instrumentos de recolección de datos. En el capítulo IV; se realiza el análisis y discusión de resultados, exponiéndose los resultados a la vez contrastándose con la hipótesis y el Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones finales.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

**Murcia (2020)**, en “Procedimiento para el diseño de mallas de voladura en explotación de canteras a cielo abierto con base en la estabilidad temporal y final de los bancos de producción”, se propone una metodología para diseñar mallas de voladura en la cantera Piedra del Sol (San Gil, Santander), considerando la estabilidad temporal y final de los frentes de explotación, donde se realizaron cinco voladuras de prueba aplicando distintas metodologías, complementadas con un análisis cinemático del macizo rocoso. Como resultado, se elaboró una guía práctica de 13 pasos para el diseño de voladuras, resaltando la importancia de un adecuado levantamiento geológico previo.

**Correa (2017)**, en “Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos D, E y F de la mina de caliza El Tesoro, contrato de concesión ILI-16111, ubicada en la vereda Las Caleras, municipio de Nobsa – Boyacá”, se propone optimizar el proceso de perforación y voladura en la etapa de arranque de la roca. Se establece un diseño técnico de voladura adaptado a las condiciones geológicas, estructurales y físicas de los bancos D,E y F de la Formación Belencito, se identificó la carencia de criterios técnicos, generando impactos ambientales y altos costos. Se pretende plantear un esquema de perforación y voladura adecuado y eficiente, minimizando efectos negativos, mejorando la fragmentación y reduzca el costo por metro cúbico de roca extraída.

**Choqueña (2017)**, la tesis presenta una investigación sobre la optimización de la fragmentación P(80) de roca en proyectos de voladura, enfocándose en la reducción de bloques de gran tamaño que obstaculizaban el carguío y acarreo. Se analizaron características geomecánicas y se propuso la aplicación del sistema P(80) con software WipFrag. Los resultados de los parámetros de fragmentación mostró un P(80) promedio de 3.40 pulgadas, lo que mejoró significativamente el proceso de minado. La implementación de la doble iniciación no electrónica aumentó el dig-rate de los equipos de acarreo en un 5%, demostrando la efectividad de la investigación y su aceptación por parte de la empresa.

### 2.1.2. Antecedentes Nacionales

**López y Miranda (2022)**, en “Diseño de la malla de perforación y voladura para optimizar la fragmentación de la roca caliza en la cantera claudina 8, Cajamarca 2021”, la antigua malla de voladura fue de  $B \times E = 4.5 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$  y del diámetro de perforación a 9”, utilizando explosivo HA 46 la voladura proporciona un producto muy fragmentado, con p80 de 90.69%  $-3/4$ ”, perdiéndose este material en lugar de destinarlo a producción. Se concluye que, al cambiar malla de  $B \times E = 5.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$  y del diámetro de perforación a 9 7/8”, utilizando explosivo MEQ 73 de 1.10 gr/cc, la voladura proporciona un producto de mayor tamaño con un P(100), donde el 68.42 % de los fragmentos tienen un tamaño desde 12.33” a menos de 14.05”. Se concluye que el costo por tonelada de la mezcla explosiva ME Quantex 73 es 614.2 US\$/tn, en comparación con el HA 46, cuyo costo es de 674.0 US\$/tn, que representa una diferencia de 59.80 US\$/tn.

**Hanco (2022)**, en la Explotación de la cantera Oscollo, en Cusco, el macizo rocoso fue clasificado como roca media (Clase III) según el RMR de Bieniawski (1989). Se empleó una malla de perforación triangular, con búrden de 2.8m, espaciamiento de 3.3m, diámetro de perforación de 10.16cm y un factor de carga de 0.31 kg/m<sup>3</sup>. La voladura se realizó con salidas simultáneas por filas y retardos entre ellas. La fragmentación, evaluada mediante el modelo Kuz-Ram, mostró que más del 64% del material superó los 30cm y menos del 10% fue inferior a 7cm; resultados confirmados por el método fotográfico. Se concluye que el diseño aplicado fue satisfactorio, logrando una fragmentación mayormente uniforme.

**Salazar y Arango (2022)**, en la investigación que se centra en la cantera El Pedregal ubicada en la ciudad de Reque, los resultados se comprobó y analizo la geología regional, local y estructural de la zona concesionada. También se evaluó la fragmentación de la malla que se estuvo trabajando anteriormente en la cantera. De igual manera se logró diseñar una malla de perforación que cumpliera con el objetivo de mejorar la fragmentación haciendo simulaciones consecutivas en el software JK-Simblast. Finalmente, se evaluó el costo de la nueva malla propuesta, la cual tuvo un mayor costo de explosivos, pero una mejor fragmentación.

**Palacios (2019)**, en su investigación de perforación y voladura en canteras de las zonas de extracción de rocas para escollera 4D y 4I de la cantera Christopher de Carabayllo y como muestra zona 4D. Para lograr la fragmentación requerida se realizó un primer diseño de malla y carga como referencia 0, a partir de esta línea base se desarrollaron diseños más puntuales de acuerdo a la configuración de la roca, 8 filas de taladros, de 7 taladros por fila en donde se diseñó en paquetes simultáneos de 3 para lograr uniformidad de corte y movilización de la roca para evitar el amarrado de la roca y sea difícil su extracción. El factor de carga fue de 0.16 kg/m<sup>3</sup> y el 95% de las rocas para escolleras o coraza tuvieron las dimensiones requeridas.

## 2.2. BASES TEÓRICAS

### 2.2.1. Clasificación Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski 1989

La clasificación ha sido creada tomando como referencia otras clasificaciones ya existentes. El factor determinante de esta clasificación es el índice RMR (Rock Mass Rating), el cual evalúa la calidad del macizo rocoso en diferentes dominios estructurales según cada uno de sus parámetros. Esto se encuentra resumido y expresado en el Anexo 01, donde está la tabla de identificación de los parámetros a evaluar, acorde a Bieniawski (1989).

Se analiza in situ primero como se encuentra la roca respecto a su meteorización, el cual se refiere al nivel de deterioro o cambio que experimenta una roca debido a la acción de los elementos atmosféricos como el viento, la lluvia, la humedad o la temperatura, consulte la Tabla 1 para una descripción detallada de los diferentes niveles de meteorización de las rocas.

**Tabla 1.**  
Descripción de grado de meteorización de rocas.

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
Fresca	No se observan signos de meteorización.
Decolorada	Se observan cambios de color original de la matriz rocosa. Conviene indicar el grado de variación o si están restringidas a minerales concretos.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniendo la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

**Fuente:** González de Vallejo, 2004.

Se continua la evaluación tomando en cuenta los parámetros que fueron clasificados siendo los siguientes:

- Resistencia
- RQD
- Presencia de agua
- Estado de discontinuidades

Para esto se toma en cuenta las características de la roca empezando por, la resistencia a la compresión simple uniaxial (RCS) se refiere a la capacidad de resistencia de la roca en su estado intacto, es decir, sin grietas estructurales. Tomando en cuenta su comportamiento al recibir el golpe del martillo de geólogo o picota.

### 2.2.1.1. Resistencia

La resistencia es una característica mecánica de las rocas, la cual se define como la capacidad máxima que tiene la roca para resistir esfuerzos de compresión uniaxial. Para determinar la resistencia a la compresión simple de una roca, se pueden llevar a cabo varios ensayos tanto en el lugar donde se encuentre la roca o con muestras no confinadas, según lo indicado en la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
Descripción de resistencia a compresión simple.

<b>TÉRMINO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
>250	Extremadamente dura

**Fuente:** González de Vallejo, 2004.

### 2.2.1.2. Rock Quality Designation

El índice de Calidad de la Roca (RQD, por sus siglas en inglés) es un parámetro fundamental utilizado en la evaluación del macizo rocoso, especialmente relevante al momento de seleccionar el tipo de revestimiento necesario en túneles, y forma parte de la

valoración del RMR básico. Este indicador proporciona información clave sobre la continuidad e integridad del macizo rocoso en una sección determinada. Un valor elevado de RQD suele asociarse a una mayor cohesión y resistencia del macizo. Debido a que la presencia, tamaño y distribución de fracturas o discontinuidades influyen directamente en la estabilidad de las formaciones rocosas, el RQD resulta ser un elemento crucial para determinar la calidad geomecánica del macizo y su viabilidad en obras de construcción, excavación o proyectos de ingeniería geotécnica (González de Vallejo, 2004).

$$RQD = 100 * e^{(-0.1\lambda)} * (0.1\lambda + 1)$$

Donde  $\lambda$  es el número promedio de discontinuidades por metro.

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ discontinuidades}}{(L)m}$$

### **2.2.1.3. Estado de las Discontinuidades**

- Espaciado de las diaclasas o discontinuidades. Que es la distancia medida entre los planos de discontinuidad de cada familia.
- Naturaleza de las diaclasas. El cual consiste en considerar los siguientes parámetros.
- Apertura. De las caras de la discontinuidad.
- Continuidad de las diaclasas. Discontinuidad según su rumbo y buzamiento (persistencia).
- Rugosidad. Se refiere a la amplitud de asperezas se mide con peine de Barton.
- Dureza. De las caras de la discontinuidad.
- Relleno. Se refiere al relleno de las juntas.

### **2.2.1.4. Agua Freática**

En un conjunto de rocas con grietas y fisuras, el agua juega un papel importante en su comportamiento, siendo descrito según cuatro condiciones: sin humedad o con humedad, con presencia de agua a presión moderada y con agua a presión elevada.

### 2.2.2. Formación de la Caliza

La caliza es un tipo de roca carbonatada que contiene al menos un 50% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), junto con varias impurezas. En términos generales, se considera como material carbonatado a cualquier material calcáreo que contenga carbonato de calcio, como el mármol, la creta, el travertino, el coral y la marga. Cada uno de estos materiales tiene diferentes propiedades físicas, pero se considera que la caliza es una roca estratificada compuesta principalmente por calcita, que al ser calcinada produce cal viva. En Perú, existen yacimientos de materiales calcáreos que son rocas calizas con distintos niveles de pureza.

Desde un punto de vista geológico, la formación de la roca caliza se origina principalmente en ambientes marinos someros, donde la acumulación de sedimentos ricos en carbonato de calcio, provenientes de restos biológicos como conchas, corales y microorganismos marinos, se compactan y litifican a lo largo del tiempo. Estos procesos ocurren en condiciones de baja energía, como plataformas continentales, lagunas y arrecifes, permitiendo la precipitación química y la deposición orgánica del carbonato de calcio. En algunos casos, también pueden formarse por procesos químicos en ambientes lacustres o en cavernas, como ocurre con el travertino o la espeleotema.

La meteorización de la roca caliza pura suele incluir carbonato de hierro, lo que provoca la disolución de la caliza y la formación de óxido de hierro como residuo. En condiciones favorables, el espesor de la caliza meteorizada puede resultar en la formación de depósitos de hierro explotables llamados terra-rosa, como se observa en las mesetas de meteorización.

**Tabla 3.**  
Factor de esponjamiento.

<b>MATERIAL</b>	<b>Estado</b>	<b>gB (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>FW</b>
CALIZA		2,61	0,59
	estado natural	2,02	0,83
	seca	1,84	0,81
	húmeda	2,08	0,80

**Fuente:** Yepes, 2023.

### 2.2.3. Explotación de Canteras

Según Morales (2022) menciona que una cantera consiste en las operaciones realizadas para extraer y procesar material útil para la construcción, en este caso, se refiere a la extracción y clasificación de rocas sólidas. En la explotación de una cantera se consideran factores como la inclinación del terreno, la ubicación de los depósitos de material pétreo y se trabaja en capas horizontales para explotar varios bancos de rocas al mismo tiempo, lo que da lugar a la forma escalonada característica de una cantera.

### 2.2.4. Elementos de un banco en un Cantera

Los elementos de una cantera se muestran en la Figura 1.

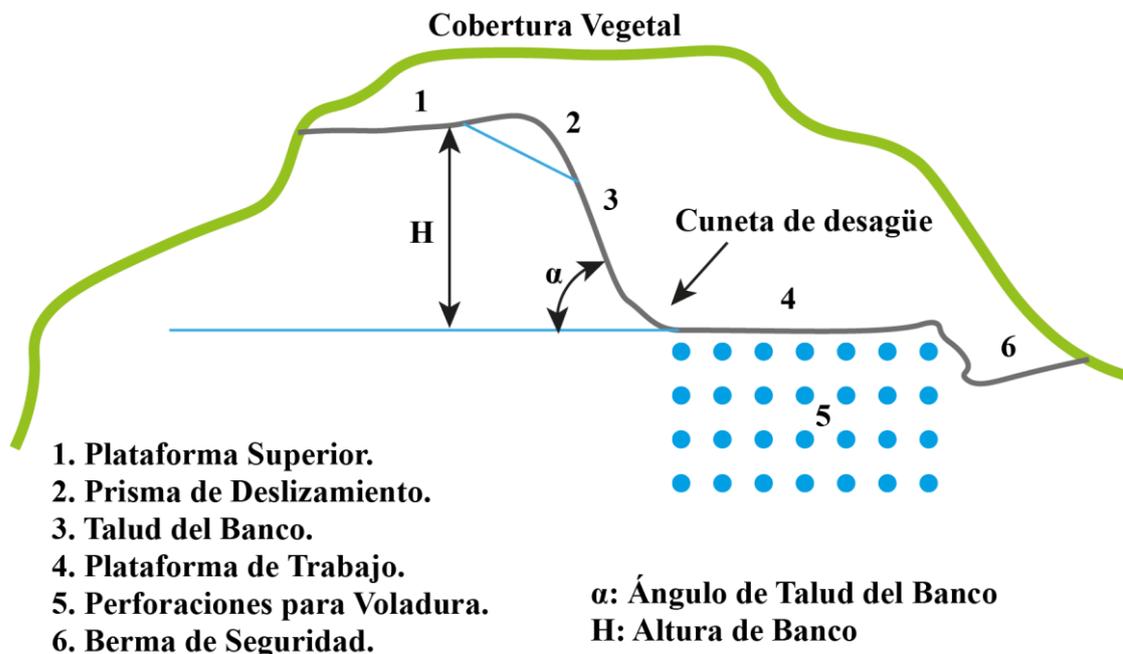


Figura 1. Elementos de un Banco.  
Fuente: Adaptado de Morales, 2019.

### 2.2.5. Evaluación de Yacimientos y Reservas

Según Morales (2019), para realizar un desbroce adecuado en operaciones mineras no metálicas, es esencial seguir criterios operativos que consideren las características geológicas y geomecánicas del yacimiento, así como la presencia de cobertura vegetal. Estos

aspectos permiten establecer parámetros adecuados para el diseño del banco, la estabilidad del talud y la operatividad del equipo en campo.

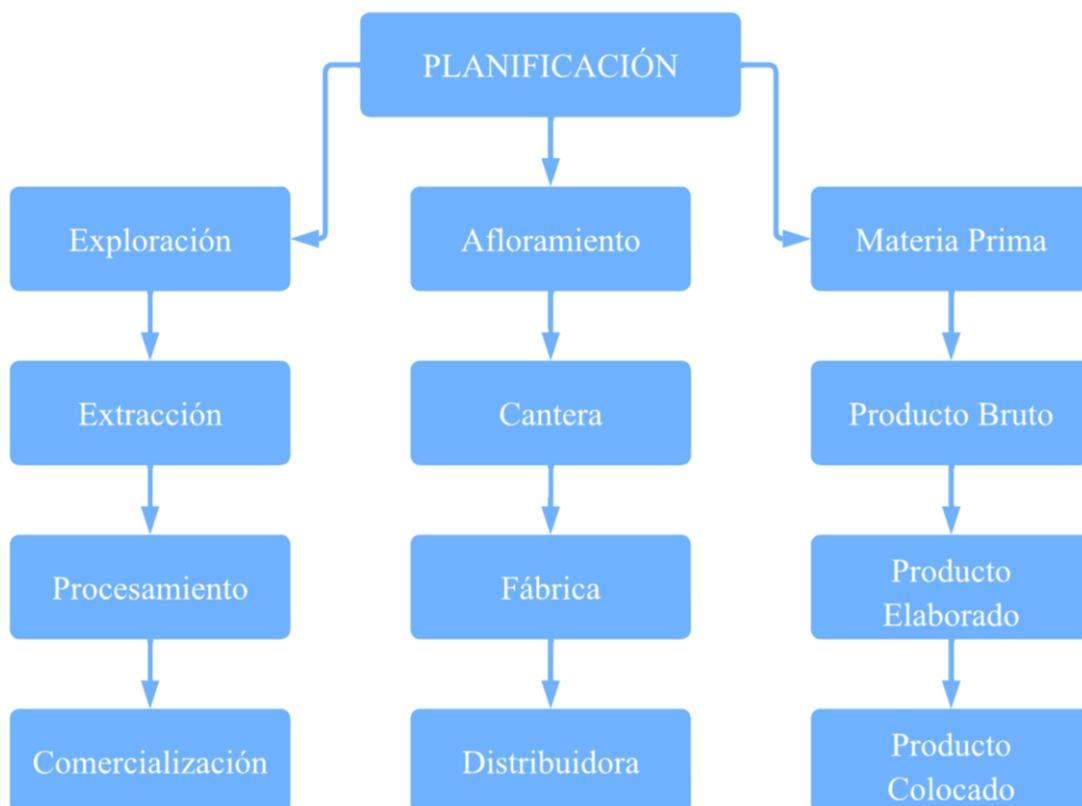
La altura de banco debe respetar las normativas técnicas, siendo determinada generalmente por la capacidad de excavación del cucharón de la pala en el caso de arranque directo. Si se emplea un bulldozer para el arranque y empuje del material, la altura no se encuentra restringida, aunque sí debe considerarse una pendiente máxima de trabajo del 25 %. Las plataformas de trabajo deben diseñarse con dimensiones suficientes para permitir el tránsito seguro del personal y el movimiento de la maquinaria pesada, incluyendo el giro de volquetes sin restricciones. En cuanto a las bermas, su uso es obligatorio cuando la altura del banco excede el talud permitido. Durante la operación, estas deben tener una altura equivalente al menos a la de la plataforma de trabajo, y al finalizar la explotación, deben contribuir a garantizar la estabilidad global del talud. Usualmente, se mantiene una relación de 1:4 entre la anchura y la altura de la berma. Las pistas y rampas de acceso, por su parte, deben tener un ancho de entre 3 a 4 veces el tamaño del volquete más grande utilizado, y su pendiente no debe superar el 8 % para mantener condiciones operativas seguras.

El módulo de trabajo o espacio operativo va modificándose progresivamente conforme avanza la explotación del yacimiento. Este avance debe planificarse de forma secuencial, permitiendo que la restauración del terreno se lleve a cabo simultáneamente con la extracción del material, de acuerdo con principios de minería sostenible.

La planificación estratégica de las actividades a desarrollar es un componente clave para el éxito de cualquier operación minera. En proyectos de explotación no metálica para materiales de construcción, el desarrollo de las actividades suele organizarse en tres etapas claramente definidas, las cuales se ejecutan secuencialmente, dependiendo del cumplimiento de los objetivos en cada fase.

Dentro de este contexto, es fundamental considerar las reservas minerales del yacimiento, ya que representan la porción de los recursos identificados que pueden ser económicamente explotables en el momento de su evaluación. En el presente trabajo, estas reservas corresponden al depósito mineral de caliza evaluado en la zona de estudio.

Las reservas probadas son aquellas cuya cantidad y calidad han sido determinadas con alta confiabilidad, basadas en observaciones directas a través de afloramientos, trincheras, labores subterráneas y sondeos exploratorios, lo que permite calcular su tonelaje con precisión. Por otro lado, las reservas probables se estiman a partir de análisis de muestras combinados con interpretaciones geológicas razonables, lo que brinda un grado medio de certeza sobre su aprovechamiento. Finalmente, las reservas inferidas o posibles se basan en un conocimiento general de la geología regional y presentan un nivel de incertidumbre mayor, por lo que su explotación futura dependerá de estudios adicionales que permitan confirmarlas.



**Figura 2.** Etapas para la planificación de una cantera.  
**Fuente:** Morales, 2019.

### 2.2.6. Ubicación de la planta.

A la hora de decidir la ubicación de una planta, es fundamental tener en cuenta diversos aspectos para garantizar su eficacia y eficiencia. En primer lugar, es crucial realizar una cuidadosa elección del emplazamiento, teniendo en cuenta factores como la proximidad a los frentes de explotación y la minimización del impacto visual.

Además, es importante planificar adecuadamente los accesos, tanto para vehículos como para peatones, así como la ubicación de las oficinas, servicios, báscula de ventas y zona de residuos. También se deben tener en cuenta las zonas destinadas a mantenimiento y talleres, así como la necesidad de contar con mayores superficies para garantizar un funcionamiento óptimo de la planta.

#### **2.2.6.1. Concepto tradicional de la cantera.**

Según Herrera (2019), explotaciones de cantera para áridos y otros materiales de construcción, explotación de cantera métodos de minería a cielo abierto de la Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas - España, Las explotaciones de cantera eran consideradas de poco interés, ya que se creía que proporcionaban materiales con poco valor económico. Había una gran cantidad de yacimientos en todas partes, por lo que no se anticipaban problemas de agotamiento y los criterios de selección de material eran simples.

En tiempos pasados, el concepto de "cantera" hacía referencia a las explotaciones a cielo abierto que eran de tamaño reducido, poco tecnificadas y con producciones bajas. Estas canteras solían tener uno o dos bancos, o incluso un banco único de gran altura, y se caracterizaban por su desorden y falta de planificación. Su principal objetivo era extraer minerales abundantes, pero de poco valor económico. Además, trabajaban en yacimientos con pocas preocupaciones en cuanto a reservas, agotamiento o selección del material, ya que tenían suficientes recursos a nivel global o local.

El depósito poseía una calidad natural apropiada para las demandas del mercado, de tal manera que podían proporcionar los materiales de construcción necesarios para las obras locales sin problemas. Era común que la realización de proyectos nuevos, como la construcción de carreteras, vías de ferrocarril, puertos, entre otros, implicara la búsqueda y apertura de una nueva cantera (también conocida como "préstamo" en el ámbito de la obra pública) para abastecerse del material requerido. Además, se solía explorar en profundidad las reservas explotables para evitar ocupar grandes extensiones de terreno más costoso y difícil de rehabilitar.

### **2.2.6.2. Definición actual de la cantera.**

Para Herrera (2019), las perspectivas del concepto de cantera han evolucionado debido a las presiones sociales y ambientales, así como a las especificaciones técnicas cada vez más estrictas que se requieren para el material. Actualmente, en el sector de los áridos se está observando un cambio significativo, pasando de explotaciones casi totalmente anárquicas a un conjunto de exigencias técnicas, de calidad, medioambientales y sociales que deben cumplirse simultáneamente en el desarrollo de cualquier proyecto, por pequeño que sea, en contraposición a las simples autorizaciones que bastaban antes para iniciar los trabajos.

La demanda de productos de cantera ha ido en aumento debido al crecimiento de la población y la riqueza per cápita. Las exigencias técnicas de la explotación han aumentado por las normativas ambientales, y ahora las administraciones requieren el respaldo de asociaciones para integrar las labores extractivas en la política de ordenación del territorio. En el sector de la roca ornamental, la internacionalización se ha basado en la tecnificación y la calidad, al igual que en otros tipos de empresas mineras. La tecnología de explotación, la legislación y la rentabilidad de las inversiones son similares en estos sectores.

### **2.2.7. Tipos de explotaciones de cantera.**

Según Herrera (2022) en la clasificación de tipos de canteras permitiría distinguir:

- Se refiere a las explotaciones de áridos como zahorras, rellenos, escolleras, asfaltos y hormigones, incluyendo también a las graveras.
- Se habla de las canteras de roca ornamental, como pizarras, granitos, calizas y mármoles.
- También se mencionan las canteras de rocas y minerales industriales, como cementos, ladrillos, cerámica y vidrio.

### **2.2.8. Cantera como fuente de aprovisionamiento.**

Las canteras son fuentes de suministro de suelos y rocas necesarios para la construcción de proyectos. Se refieren a explotaciones al aire libre de materiales de

construcción como rocas industriales, gravas, arenas y arcillas, que se utilizan para diversas aplicaciones en obras civiles. Estos lugares proveen materiales esenciales para la realización de terraplenes, estabilizaciones y concretos, entre otros. Una vez que se agota la cantera, el abandono de la actividad puede causar problemas ambientales, como la degradación del paisaje.

### **2.2.9. Clases de canteras**

Se clasifican en dos clases principales de canteras, las de formación de aluvión, también conocidas como canteras fluviales, en las cuales los ríos son responsables de transportar rocas a lo largo de grandes distancias utilizando su fuerza cinética para depositarlas en áreas de menor potencial geológico, formando extensos depósitos que van desde cantos rodados y gravas hasta arena, limo y arcilla; la acción de las corrientes de agua permite que estas canteras parezcan tener un ciclo de autoabastecimiento, lo que facilita su explotación económica, pero también afecta negativamente a los cuerpos de agua y a su entorno natural. En términos ambientales, es preferible ubicar una cantera de aluvión en terrazas alejadas del cauce, en lugar de directamente sobre él. El otro tipo de canteras son las de roca, también conocidas como canteras de peña, que se forman a partir de la geología de una determinada región, pudiendo ser sedimentarias, ígneas o metamórficas; debido a su naturaleza estática, estas canteras no se autoabastecen y por lo tanto tienen una cantidad limitada de materiales disponibles.

#### **2.2.9.1. Clasificación de las canteras según tipo de explotación.**

Se pueden clasificar dependiendo del tipo de explotación, el material que se quiera explotar y su origen.

- Canteras a cielo abierto.
- En laderas, cuando la roca se arranca en la falda de un cerro.
- En corte, cuando la roca se extrae de cierta profundidad en el terreno.
- Canteras subterráneas.

### **2.2.9.2. Clasificación de las canteras según el material a explotar.**

- De materiales no consolidados: Suelos (tierra), agregados, terrazas aluviales y arcillas.
- De materiales consolidados o rocas.

### **2.2.9.3. Clasificación de las canteras según su origen.**

- Canteras aluviales.
- Canteras de roca o peña.

### **2.2.10. Explotación de canteras.**

En el proceso de extracción de materiales de una cantera se utilizan métodos mecánicos y maquinaria especializada, como excavadoras, cargadoras sobre ruedas, tractores sobre orugas y cargadores frontales. En la actualidad, se dispone de equipos de última generación para llevar a cabo estas tareas de manera eficiente.

Una cantera es un lugar de extracción minera, por lo general al aire libre, donde se obtienen rocas utilizadas en la industria, en la ornamentación o como materiales de construcción. Entre las rocas más comunes que se extraen de las canteras se encuentran el mármol, el granito, la caliza y la pizarra.

Debido a sus características geológicas, la zona interandina es ideal para la ubicación de depósitos de minerales no metálicos, piedras ornamentales y materiales de construcción. Se encuentran rocas como arcillas, arenas, areniscas, gravas conglomeradas, piedra pómez, perlita, andesita, entre otras, que son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción. La extracción de estos materiales en la mayoría de las canteras de la región se realiza de forma semi mecanizada, con un pequeño porcentaje realizado manualmente y predominando el método de cielo abierto.

### **2.2.10.1. Selección de una cantera.**

Para elegir una cantera, es necesario encontrar un bloque de piedra y realizar estudios geológicos - mineros, como la litología, topografía, áreas protegidas, rutas de comunicación, áreas urbanas, cursos de agua, ortofoto mapas y límites administrativos. El geólogo y el geotécnico estudian la estructura, origen y formación del bloque de piedra. La secuencia de selección incluye un modelo digital de elevaciones, un modelo digital del terreno, diversos mapas, mapas temáticos y mapas de zonas.

### **2.2.11. Diseño de cantera.**

El diseño minero se basa en la optimización de costos y beneficios, con el objetivo de extraer reservas de forma eficiente y con el menor impacto ambiental posible. La ingeniería de rocas juega un papel crucial al predecir el comportamiento de las mismas ante las labores mineras, para evaluar los costos y beneficios de cada opción. Sin embargo, dado la complejidad de los materiales naturales y los procesos involucrados, estas predicciones no son exactas y los análisis son solo aproximaciones a la realidad.

Actividades realizadas en una cantera:

- Llevar a cabo una detonación para extraer roca de un macizo rocoso.
- Utilizar el tractor y la excavadora para romper y desmenuzar la roca.
- Encargarse de cargar el material en los volquetes con la ayuda del cargador frontal, la retroexcavadora y la excavadora.
- Mover el material pétreo utilizando los volquetes después de romper la roca.

Lo que incluye la adquisición de derechos y permisos para iniciar la explotación, el desarrollo completo y la construcción de infraestructuras, el diseño y planificación detallada de la explotación, la selección de áreas para la disposición de residuos y manejo de materiales no deseados, la adquisición de equipos y materiales, la elaboración de presupuestos y la financiación del proyecto, entre otras tareas. La duración de este proceso varía según las características y el tamaño del proyecto, desde varios meses hasta 2 o 3 años. El objetivo

principal del desarrollo es llevar la mina a su capacidad máxima de operación con la menor inversión posible.

#### **2.2.12. Fases de la explotación de canteras.**

Las etapas de extracción de materiales de una cantera al aire libre incluyen: despeje, extracción, traslado interno, clasificación, venta, transporte externo, almacenamiento y disposición de desechos:

- **Destape.** La actividad de destape consiste en retirar el material no deseado para dejar al descubierto el material útil que será extraído, ya sea por medios como la perforación, voladura, retroexcavadora o bulldózer con ripper, dependiendo de si se trata de rocas duras o suaves. Esta operación permite mantener intacto el suelo fértil, así como las especies nativas, semillas y estacas, para luego reforestar y recuperar el área explotada. Para llevar a cabo el destape, se debe excavar trincheras de acceso, también conocidas como caminos en la cantera, teniendo en cuenta parámetros como el largo, la anchura de fondo, la pendiente, el ángulo de talud, el equipo de excavación y el propósito para el cual se está construyendo la trinchera.
- **Arranque.** En el caso de rocas duras, se perforan bancos descendentes con máquinas de perforación y se procede a la voladura con explosivos. En el caso de rocas suaves, el arranque se realiza directamente con excavadores que desmenuzan la roca, que luego es cargada en volquetes.
- **Transporte interno.** El material diverso se coloca en la plataforma de trabajo y se deposita en los camiones con la retroexcavadora. Estos transportan el material hasta la zaranda, localizada dentro o fuera de la zona de concesión, para su separación y clasificación.
- **Clasificación.** El material que ha sido fragmentado mediante explosiones puede ser introducido en una trituradora de mandíbulas o cónica, donde se obtendrán diversos productos como ripio, arena y chispa. Para la venta, el material suave extraído con una excavadora es transportado a zarandas fijas, donde se separan productos como arena, ripio, base, sub base, piedra bola, mientras que el material grueso sin procesar se convierte en molones para su venta

- Comercialización. Los diversos productos extraídos de la cantera son vendidos de acuerdo a las exigencias de los consumidores, siendo empresas no relacionadas con los dueños de la mina las encargadas de su comercialización. En ocasiones, los propietarios disponen de camiones y venden directamente los productos.
- Almacenamiento. El material que no ha sido vendido se guarda en áreas separadas de la zona de extracción para su venta posterior, siendo denominado como inventario.
- Escombreras. Un sitio donde se almacena de forma temporal o permanente la tierra de cobertura o el material no útil o comercializable, dependiendo de la situación.

#### **2.2.12.1. Plan de minado.**

El Plan de explotación minera es un análisis detallado de las oportunidades a través de un proceso de reflexión y comprende la evaluación completa de los recursos de producción dentro de la compañía minera, así como sus limitaciones internas y externas; y todo lo relacionado con la selección de un objetivo a alcanzar. El plan representa el resultado de todo el proceso de planificación.

Según Munier (2019) el plan de minado consiste en la identificación y programación detallada de las actividades necesarias para llevar a cabo un proyecto minero, determinando su duración en términos de días, semanas u otras unidades de tiempo, y estableciendo la relación y secuencia entre cada una de ellas.

Para Velasquez (2019) el Plan de explotación minera es un análisis detallado de las oportunidades a través de un proceso de reflexión y comprende la evaluación completa de los recursos de producción dentro de la compañía minera, así como sus limitaciones internas y externas; y todo lo relacionado con la selección de un objetivo a alcanzar. El plan representa el resultado de todo el proceso de planificación. De esta manera, los objetivos de la empresa, sus políticas, estrategias, presupuestos, procedimientos, normas y programas se ven reflejados de diversas formas en el plan.

Para Ackoff (2021) la planificación es un proceso de toma de decisiones, en el cual cabe considerarse tres aspectos fundamentales: La planificación es la anticipación de decisiones, un proceso que determina qué hacer y cómo hacerlo antes de que sea necesario

actuar. Se trata de un sistema de decisiones interrelacionadas que surgen cuando el estado futuro deseado requiere una serie de decisiones coordinadas. La planificación busca alcanzar un estado deseado que no puede lograrse sin tomar las acciones adecuadas previamente. Su objetivo es evitar acciones erróneas en el futuro y minimizar la pérdida de oportunidades.

#### **2.2.12.2.Elementos del planeamiento.**

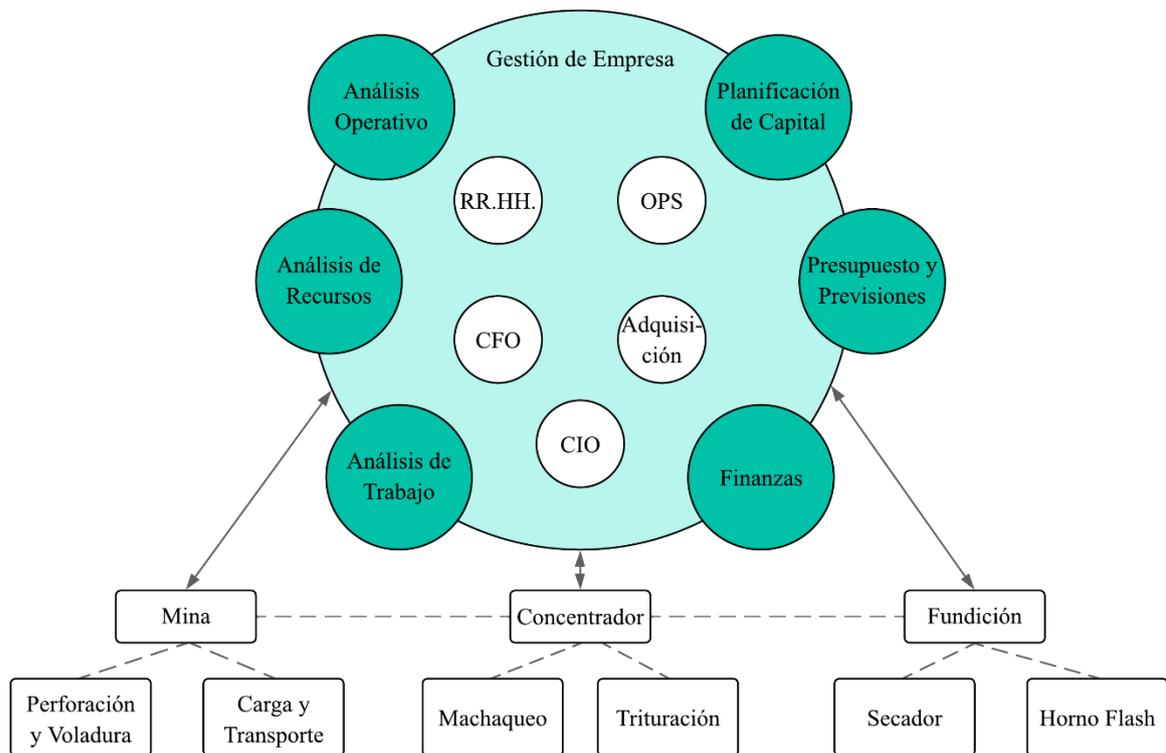
- Cantidad y calidad son aspectos fundamentales en los trabajos mineros. La cantidad se refiere a métricas como tonelaje de concentrados, volúmenes de desmonte, relave y relleno, metros lineales de frentes de avance, entre otros. Por otro lado, la calidad abarca las leyes del mineral, características técnicas de los frentes de avance, estabilidad de los cuadros de sostenimiento, recuperación metalúrgica, entre otros aspectos.
- En cuanto al tiempo, se establecen fechas de inicio y de conclusión para las actividades, etapas o el proyecto en su totalidad. Es importante considerar un margen de tolerancia adecuado de acuerdo a la complejidad de las actividades.
- Respecto al lugar, se deben especificar las coordenadas topográficas, cotas, zonas, unidades de operación, entre otros. Esto no solo se refiere a los lugares donde se llevarán a cabo las labores, sino también a la adquisición de insumos necesarios.
- Recursos. Considerar las disponibilidades y requerimientos; así como las fuentes de adquisición de todos los recursos que precisara el plan:
  - Personal, tecnología y herramientas
  - Instalaciones, materiales diversos
  - Instrumentos
  - Energía, financiamiento y
  - Otros suministros
- Costos. Es fundamental calcular minuciosamente los costos de todos los recursos y actividades necesarios en el plan, asegurándose de que sean estimados con precisión y realismo. Se debe considerar un margen de seguridad en función del tiempo de duración de los trabajos, posibles variaciones en los precios, fluctuaciones en los tipos de cambio y condiciones del mercado de adquisición.
- Explosivos. Los explosivos químicos industriales consisten en una mezcla de materiales combustibles y oxidantes que, al ser iniciados de forma adecuada,

provocan una reacción química extremadamente rápida. Durante esta reacción, el explosivo libera grandes cantidades de gases y energía hacia la roca, provocando su fragmentación y la formación de fisuras y grietas.

### **2.2.12.3. Optimización de explotación minera.**

Según Jessop (2021) la integración en la empresa minera es esencial para mejorar la eficiencia en un sector que cada vez cobra más importancia. Las empresas mineras a nivel mundial buscan incrementar su producción, perfeccionar sus procesos y aumentar su rentabilidad, con el fin de aprovechar al máximo sus operaciones. Sin embargo, la compleja estructura de la cadena de valor minera suele fragmentar a las empresas en diversas ramas o divisiones según su área de especialización, lo que dificulta la colaboración entre ellas. Esta problemática se acentúa en explotaciones mineras con múltiples ubicaciones, donde la falta de sistemas integrados dificulta la optimización del negocio y la coordinación entre las diferentes divisiones.

Las actividades mineras suelen abarcar vastas áreas geográficas, los profesionales encargados de administrar distintos aspectos de las operaciones, como geólogos, ingenieros de minas, planificadores de la cadena de suministro y equipos de ventas, también se encuentran dispersos geográficamente. Para enfrentar este desafío, muchas empresas mineras optan por establecer centros de operaciones remotos (ROC) que centralizan los procesos operativos esenciales en una sola ubicación. Aunque esto trae consigo beneficios como mayor seguridad y comodidad para el personal clave, la principal ventaja es la posibilidad de reunir a diario a los responsables de la toma de decisiones en una sala para asegurar el correcto funcionamiento de toda la operación.



**Figura 3.** Ciclos funcionales de una empresa minera.

**Fuente:** Adaptado de Ventrix, 2014.

### 2.2.13. Explosivos.

- El detonador: es el mecanismo que alberga una pequeña cantidad de carga detonante para iniciar un explosivo, como estopines, fulminantes, detonadores instantáneos, eléctricos de micro retardo, entre otros.
- El detonador eléctrico: es dispositivo que se puede activar mediante corriente eléctrica, compuesto por tres partes colocadas dentro de un casquillo metálico. Estas partes son la eléctrica, la retardadora y la explosiva, sirviendo para controlar con precisión el momento de la detonación.
- El explosivo: sustancia con poca estabilidad química capaz de transformarse violentamente en gases, como las dinamitas y los nitratos de amonio.
- Los explosivos gelatinosos: sustancias que incluyen nitroglicerina, nitro algodón, nitrato de sodio y materiales celulósicos, con características como consistencia plástica y buena resistencia al agua.
- Los explosivos plásticos y semiplásticos: materiales moldeables que permiten llenar un taladro con presión moderada, dependiendo de la diferencia del equipo de fabricación.

- El explosivos tipo slurry: compuestos por nitrato de amonio, TNT y agua para mantener homogéneo el explosivo, utilizados en barrenos largos y húmedos, y resistentes al agua.

#### **2.2.13.1. Fases de la explosión**

- Combustión. Se puede clasificar como reacción química exotérmica a aquella que libera calor, pudiendo o no ser detectada por nuestros sentidos, y que tiene un tiempo de reacción prolongado.
- Deflagración. Es un proceso de liberación de energía que se produce al descomponerse una sustancia, el cual se desarrolla en la superficie y se transmite principalmente a través de la conductividad térmica. Durante este fenómeno, la velocidad de propagación del frente de la reacción es relativamente baja, generalmente no superando los 1 000 m/s, y ocurre en capas paralelas en el explosivo. La deflagración se caracteriza por ser una combustión rápida, y cuando los explosivos se activan lentamente, se produce una deflagración en la que las reacciones se extienden por conducción térmica y radiación
- Detonación. La detonación es un proceso físico-químico que se caracteriza por ser extremadamente rápido y por la generación de una gran cantidad de productos gaseosos a alta temperatura, los cuales tienen una fuerza expansiva considerable que ejerce presión en el entorno circundante. En los explosivos detonantes, las primeras moléculas gasificadas se mueven a una velocidad tan alta que no transfieren su calor a través de conductividad a la zona no afectada de la carga, sino que lo transmiten mediante impacto, provocando deformación y calentamiento, lo que genera una explosión adiabática con la producción de nuevos gases. Este proceso se repite en un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se conoce como "onda de choque", la cual se desplaza a velocidades que varían entre 1,500 y 7,000 m/s dependiendo de la composición y condiciones del explosivo. Una característica clave de la onda de choque en la detonación es que una vez que alcanza su nivel de equilibrio en términos de temperatura, velocidad y presión, se mantiene constante a lo largo del proceso, lo que la hace auto sostenida, a diferencia de la onda deflagrante que tiende a disiparse con el tiempo y la distancia recorrida.

- Tanto en la deflagración como en la detonación, la turbulencia de los productos gaseosos conduce a la formación de la onda de choque. En el frente de esta onda, donde la presión aumenta rápidamente, se llevan a cabo las reacciones químicas que convierten gradualmente la materia explosiva en sus productos finales. Detrás del frente de choque, que se mueve a lo largo del explosivo, se forma una zona de reacción. En el último tramo de esta zona, se encuentra el "Plano de Chapman - Jouguet (CJ)", que marca el punto donde la reacción alcanza su equilibrio en términos de velocidad, temperatura, presión de gases, composición y densidad, conocido como las condiciones del estado de detonación. En el plano "CJ", los gases están en un estado de hiper compresión.
- La zona de reacción en los altos explosivos varía dependiendo del tipo de explosivo, siendo muy estrecha en aquellos más violentos como el TNT y la dinamita gelatinosa, y más amplia en los explosivos lentos como el ANFO. En el caso de una combustión o deflagración, los productos de la reacción se desplazan en sentido contrario al avance de la combustión, mientras en una detonación, estos productos se desplazan en la misma dirección que la detonación. Esto se evidencia por medio de la ecuación fundamental conocida como la "Condición de Chapman – Jouguet".

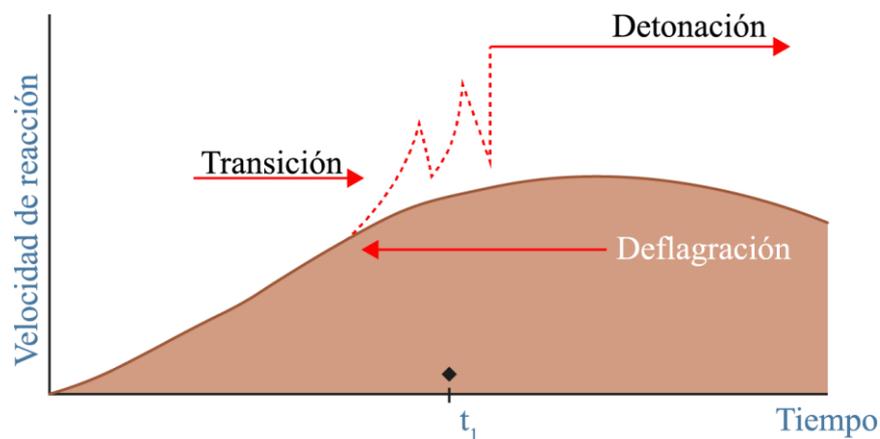
$$VOD = S + W$$

Donde:

VOD: Velocidad de detonación.

S: Velocidad de sonido.

W: Velocidad de partículas (productos).

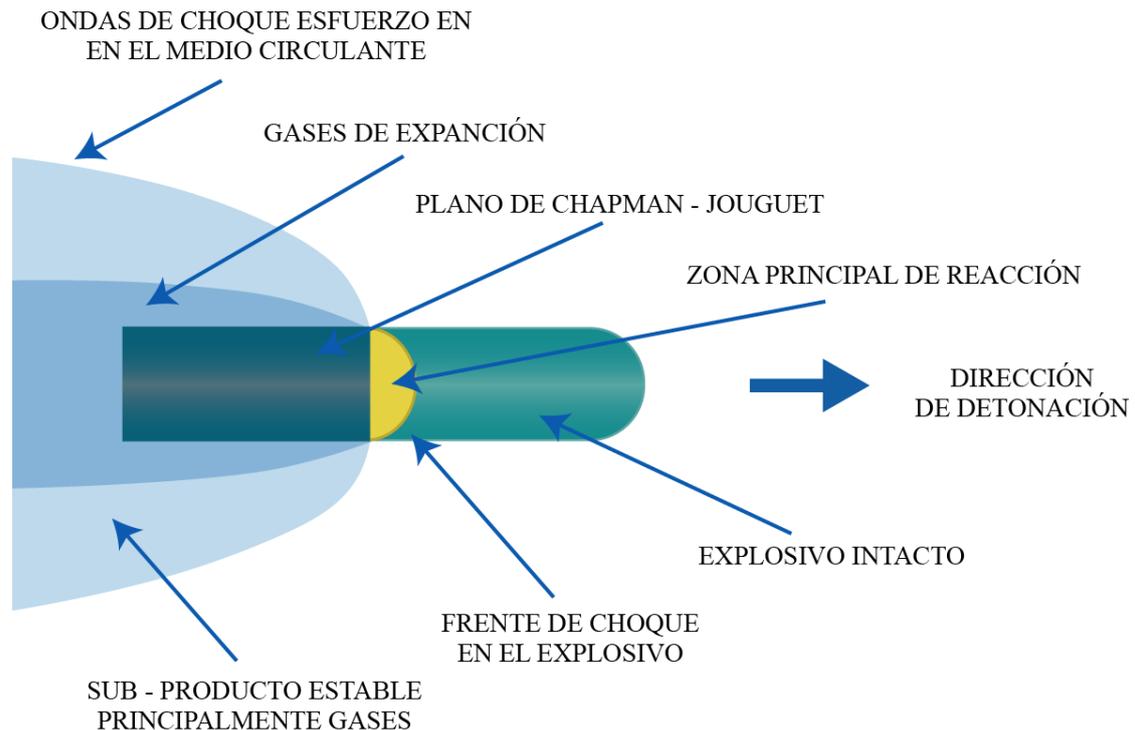


**Figura 4.** Desarrollo de una detonación.

**Fuente:** Exsa, 2019.

### 2.2.13.2. Mecanismo de detonación.

Es importante tener en cuenta la estructura de las distintas áreas de reacción que surgen durante el proceso de detonación para comprender cómo funciona este fenómeno. Al analizar una carga cilíndrica que estalla desde uno de sus extremos, como se muestra en la Figura. 5, se pueden identificar las siguientes secciones.



**Figura 5.** Proceso de reacción de explosivo.

**Fuente:** Exsa, 2019.

### 2.2.14. Perforación.

Las técnicas de perforación se utilizan en una variedad de aplicaciones además de las voladuras, como exploración, drenaje y sostenimiento. La perforación de rocas en el contexto de voladuras es la primera etapa, con el objetivo de crear huecos en los macizos rocosos para ubicar las cargas explosivas y sus accesorios. Los sistemas de perforación de rocas son categorizados según su método de aplicación en percusión, rotación y roto percusión.

El método de perforación por impacto implica la utilización de un elemento metálico que golpea y rompe la formación de roca, como un pico o trépano, junto con un dispositivo que recoge el material triturado, como una pala o cucharón de válvula. Por otro lado, el método de perforación por rotación se divide en dos categorías, dependiendo de si la penetración se logra mediante trituración, con triconos, o corte, con brocas especiales. El primero se emplea en rocas de dureza media a alta, mientras que el segundo se utiliza en rocas más blandas. Este último método implica el uso de fricción y rayado con materiales extremadamente duros, como los utilizados en las perforadoras de diamante para fines de exploración.

El método de perforación por roto percusión es ampliamente empleado en la mayoría de los tipos de roca, ya sea con el martillo ubicado en la parte superior o en el fondo del agujero, generando un efecto de golpe, corte y giro. Este proceso es comúnmente utilizado en perforadoras neumáticas, AirRoc T25 y jumbos hidráulicos.

#### **2.2.14.1. Métodos de perforación.**

La primera tarea en el proceso de voladuras es la perforación en el terreno, la cual busca crear agujeros con la disposición adecuada en las rocas para ubicar las cargas explosivas y los dispositivos de detonación.

#### **2.2.14.2. Principios de perforación mecánica de las rocas.**

Un equipo de perforación combina los principios básicos de electricidad, hidráulica y neumática, utilizando aire para limpiar el agujero y operar algunos de sus mecanismos mecánicos. El sistema hidráulico proporciona potencia a los cilindros, mecanismos de rotación, avance y accesorios. Los controles eléctricos se emplean para activar solenoides, relés, entre otros. En el proceso de perforación por percusión, la broca puede contar con un martillo en la cabeza o un martillo en el fondo, logrando la penetración mediante la combinación de percusión, rotación, avance y limpieza.

### **2.2.14.3.Sistemas de accionamiento.**

Las máquinas de perforación de tipo AirRoc T25 pueden ser de perforación hidráulica o neumática, funcionando con aire comprimido a una presión constante para el mecanismo de impacto y el aire de barrido. Estas herramientas suelen utilizarse para hacer agujeros de menos de 150 mm de diámetro, siendo más ligeras y compactas que las perforadoras hidráulicas. Su consumo de aire es de aproximadamente 2,1-2,8 m<sup>3</sup>/min por cada centímetro de diámetro, con una velocidad de rotación entre 40 y 400 rpm y una carrera del pistón de 35-95.

Los AirRoc T25 pueden ser adicionalmente neumáticos o hidráulicos, tal como se observa en martillo en cabeza (top hammer). La percusión se realiza en la superficie de la roca que se va a perforar, mientras que la rotación se lleva a cabo en el exterior de la broca. El movimiento del pistón se hace con aire comprimido, mientras que la rotación puede ser realizada con aire comprimido o mediante un sistema hidráulico.

### **2.2.14.4.Indentación**

En la indentación, los dientes o insertos se introducen en la roca gracias a la presión ejercida sobre la boca, lo cual provoca la trituración de la roca, tal como se observa.

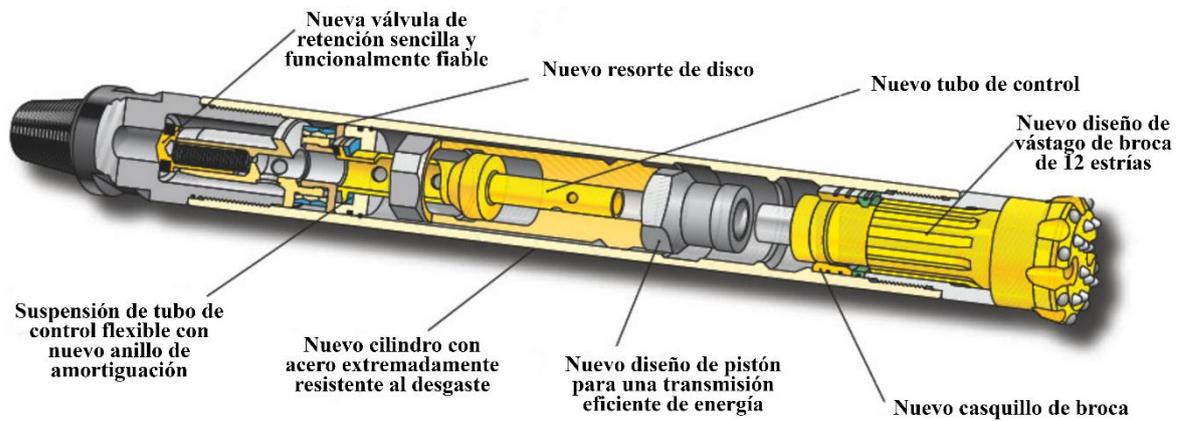
### **2.2.14.5.Las perforadoras rotativas.**

Las perforadoras rotativas están constituidas esencialmente por una fuente de energía, una batería de barras de tubos, individualmente o conectadas en serie, que transmiten el peso, la rotación y el aire de barrido a una boca con dientes de acero o insertos de carburo de tungsteno que actúa sobre la roca.

Se dividen en dos categorías según el método de perforación utilizado: uno que emplea triconos para triturar en rocas duras, y otro que utiliza bocas especiales para cortar en rocas blandas.

Perforación con triconos. Los tamaños de los agujeros de perforación van desde 2 pulgadas hasta 17 1/2 pulgadas (152 a 311 mm). La técnica de perforación es flexible y puede

utilizarse en una amplia variedad de tipos de rocas, desde las más suaves hasta las más duras, desplazando a otros métodos en algunos casos.



**Figura 6.** Estructuras de martillo en fondo.

**Fuente:** AtlasCopco, 2018.

La perforación roto percusiva es ampliamente utilizada en diversos tipos de rocas, donde el martillo puede estar ubicado tanto en la cabeza como en el fondo del barreno. Dependiendo de la resistencia y diámetro de las rocas, es posible determinar qué tipo de perforación se puede llevar a cabo y cuál es su campo de aplicación. Según el Manual de perforación y voladura de rocas de Lopes Jimeno, los métodos de explotación se clasifican en función de la resistencia de la roca y el diámetro de los barrenos. En este tipo de perforación, se utiliza un pistón que impacta en un útil, transmitiendo energía al fondo del barreno a través de una boca. Los equipos de roto percusión se dividen en dos grupos según la colocación del martillo.



**Figura 7.** Broca de botones.

**Fuente:** Muñoz et al, 2019.

### **2.2.15. Actividades mineras superficiales iniciales.**

Desbroce hace referencia a la retirada del suelo vegetal que se encuentra sobre la roca caliza, la presencia de este suelo vegetal conocido como top soil dificulta la realización del mapeo geotécnico necesario para evaluar la calidad del macizo rocoso. Además, determinar las reservas minerales ha sido esencial para establecer las dimensiones y características del yacimiento mineral no metálico de caliza, es decir la topografía superficial y la capa compuesta por material detrítico como arcillas, arenas calcáreas, margas y materiales orgánicos.

#### **2.2.15.1. Operación mina, equipos y recursos en cantera de caliza.**

Tomando como referencia por sus características de yacimiento no metálico, según las operaciones realizadas en la Concesión Minera “Colquirrumi N° 49 AB” está cubierto de material cuaternario diluvio - coluvial, generado por los procesos geodinámicos externos del lugar.

#### **2.2.15.2. Ciclo de minado en la cantera de caliza.**

Según los aspectos tenemos a los geológicos, geomecánicos, ambientales y de seguridad, el desarrollo del proceso de extracción de minerales se divide en varias etapas:

- Remoción del suelo superficial cuaternario.
- Perforación y explosión para eliminar o fracturar las capas de piedra caliza.
- Uso de la retroexcavadora con el accesorio llamado "Picotón" para hacer cortes en la ladera.
- Perforación y explosión adicional para reducir el tamaño de los bloques.
- Empleo de maquinaria y equipos como retroexcavadora con cucharón y picotón, y una perforadora portátil Bosch con generador de 5000 Watts.
- Personal. El personal en la cantera de caliza incluye operadores de maquinaria con capacitación y experiencia en distintos equipos.
- Los perforistas que trabajan en la explotación de la cantera deben estar capacitados y tener la licencia adecuada para manipular explosivos civiles.

Basándose en la estabilidad de taludes, su clasificación geomecánica y el tamaño de la cantera de caliza muy similar, se describen los cálculos de diseño de perforación y voladura según Artigas (2012) como se indica a continuación:

Cálculo de la altura crítica del banco. La función del diámetro del taladro ( $\emptyset$ t).

$$H_{crítica} = (\emptyset) * (mm) * (15)$$

Altura banco. Debe ser mayor que la altura crítica, para ello, a continuación, se realiza el cálculo de la altura crítica que está en función directa del diámetro del taladro.

$$H_{Banco} \geq H_{Crítica} \geq 1.6 m$$

Sobre perforación (SP).

$$SP = (12) * (\emptyset)$$

Longitud de taladro (LT). Artigas (2012) la longitud de perforación es igual a la altura de banco más la sobre perforación.

$$LT = (H) + (SP)$$

Cálculo de taco (T). Es la longitud de taladro que se coloca el material inerte (detritos o arcilla).

$$T = (30) * (\emptyset) * (Para\ cantera)$$

Cálculo del burden (B). Es la distancia entre la fila de taladro y la cara libre. Roca dura RMR de 65 A 70.

$$B = (36) * (\emptyset)$$

Cálculo del espaciamento (E). Es la distancia entre los taladros de una fila.

$$E = KeXB$$

Radio de longitud del burden (L / B). Es la relación de la longitud del taladro y el burden, esta distancia no debe ser superior a 3.2.

$$Rad = LB$$

Cálculo de carga de fondo (CF). Es la columna de carga de explosivo iniciando del fondo del taladro para obtener una mejor distribución de carga explosiva.

$$CF = (1.3) * (B)$$

Carga de columna (CC). Es la columna de carga de explosivo que va luego de la carga de fondo.

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

De explosivo por taladro (Q). La cantidad de explosivo por taladro es la suma entre la carga de fondo y la carga de columna, el cálculo se realiza de la siguiente forma:

Cantidad de explosivo en el fondo del taladro (Qf)

$$Qf = (de) * (\emptyset^2) * (CF)$$

Donde:

de: Densidad del explosivo.

∅: Diámetro del taladro.

CF: Longitud de carga de fondo.

Cantidad de explosivo en la columna del taladro (Qc)

$$Qc = (de) * (\emptyset^2) * (CC)$$

Donde:

de: Densidad del explosivo.

Ø: Diámetro del taladro.

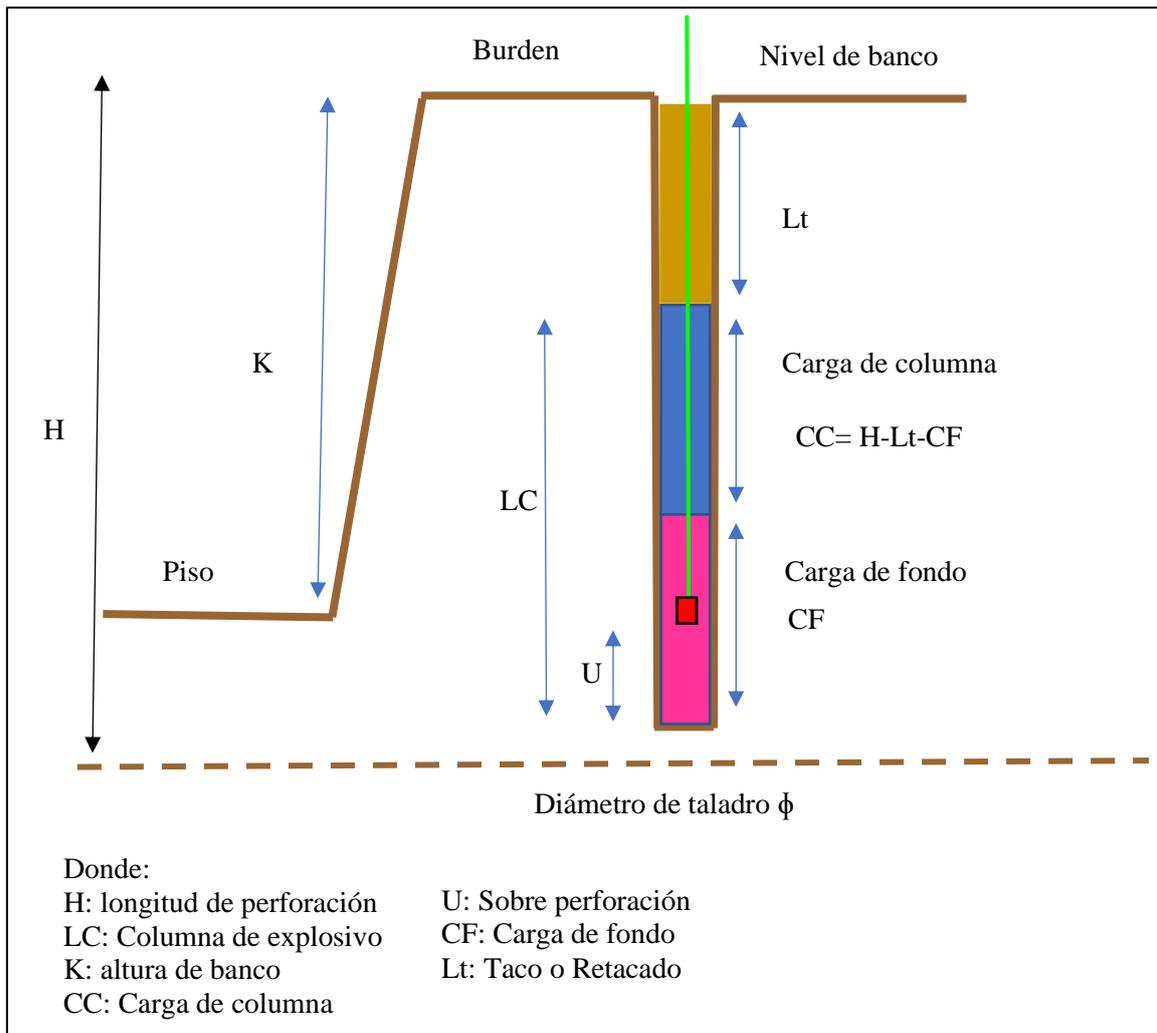
CC: Longitud de carga de columna.

Entonces la cantidad de explosivo total por taladro es:

$$Q = (Qf) + (Qc)$$

Parámetros de perforación.

- La altura de banco.
- El diámetro de taladro.
- La sobre perforación.
- Longitud de perforación.
- El burden.
- Espaciamiento.
- Carga de fondo.
- Carga de columna.
- Explosivo carga de fondo.
- Explosivo carga columna.

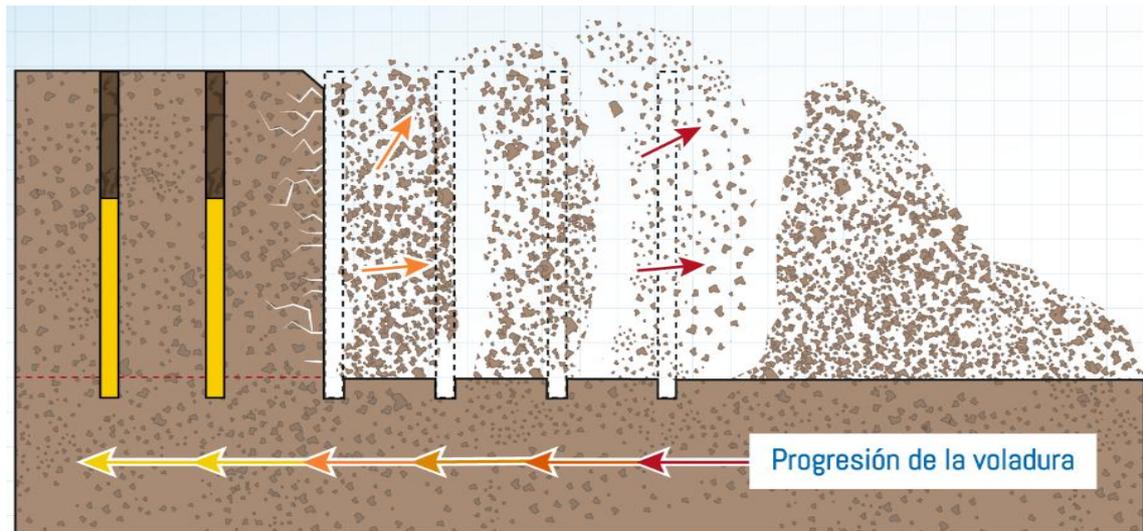


**Figura 8.** Esquema de carga.

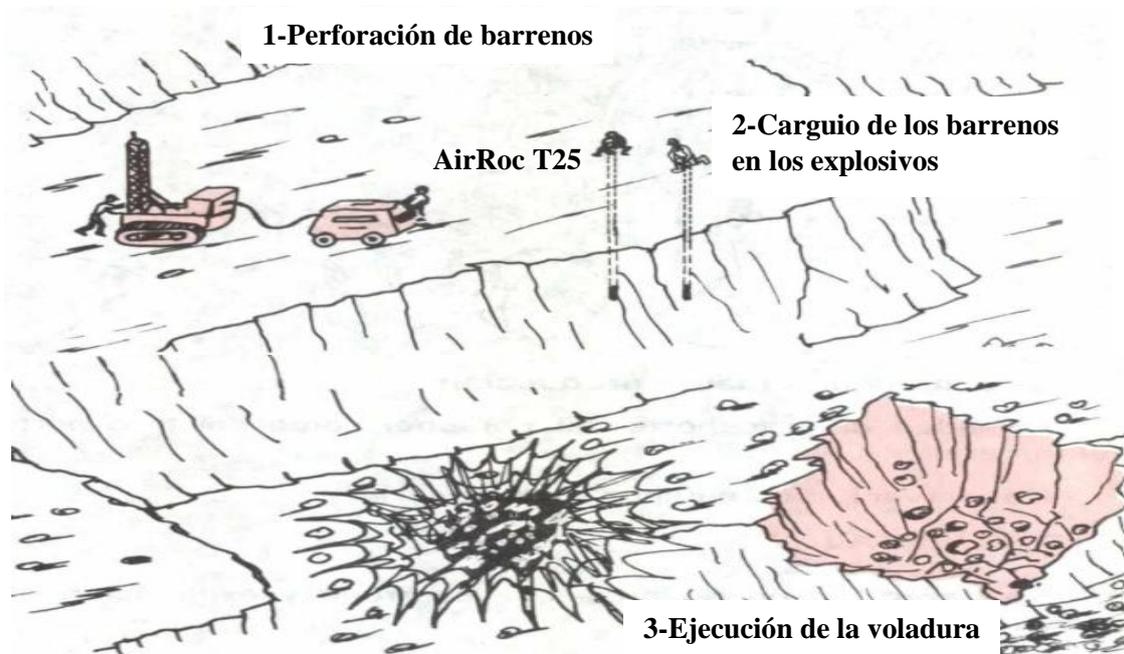
**Fuente:** Artigas, 2012.

### 2.2.16. Secuencia de voladura en un banco.

Se muestran el sentido de las ondas compresivas, tensivas y presión de los gases en el proceso de la voladura, ver Figura 9.



**Figura 9.** Desplazamiento en voladura.  
**Fuente:** Exsa, 2019.



**Figura 10.** Perforación y voladura en bancos de Caliza.  
**Fuente:** SENA, 2016.

### 2.2.16.1. Fragmentación de la roca

El explosivo al detonar produce una gran presión en la roca en diferentes direcciones en fracción de segundos, este introduce ondas de esfuerzo compresivo que se transmiten a través de la masa rocosa como ondas elásticas.

Al encontrar una cara libre, cambio de densidad, discontinuidades o fracturas se reflejan como ondas tensivas produciéndose el fracturamiento ( $\sigma_{\text{ondas}} > \sigma_{\text{roca}}$ ), el viaje de las ondas compresivas depende de la densidad de la roca  $>$  resistencia a la compresión.

### **2.2.17. Cal**

La cal es son las diferentes formas físicas en las que se presenta el óxido de calcio y magnesio, conocidos como cal viva y dolomía calcinada respectivamente. Estos productos se obtienen al calentar rocas como calizas o dolomías. También se pueden obtener productos hidratados añadiendo agua a la cal viva y la dolomía calcinada, como la cal apagada y la dolomía hidratada.

La caliza, al calentarse a altas temperaturas, se convierte en cal viva al perder dióxido de carbono. Al mezclar el óxido de calcio con agua, se forma hidrato cálcico que se endurece al fraguar. La cal viva, al reaccionar con agua, se convierte en cal apagada.

#### **2.2.17.1. Variedades comerciales**

Cal viva. Material obtenido de la calcinación de la caliza que, al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. Cal hidratada, especie química de hidróxido de calcio, el que se obtiene combinando el óxido de calcio con agua.

También se pueden obtener productos hidratados añadiendo agua a la cal viva y la dolomía calcinada, como la cal apagada y la dolomía hidratada.

Cal hidráulica, cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílica y alúmina o mezclas sintéticas de composición similar.

#### **2.2.17.2. Selección de cal viva**

La cal viva obtenida contiene impurezas como los trozos de carbón que no se ha quemado y algunas rocas de caliza pequeñas que no se calcinaron; para ello se seleccionará el producto.

### 2.2.17.3.Comercialización y transporte

Según Moya (2015) la cal viva obtenida se vende a las empresas que lo requieran y transportadas al lugar donde lo necesitan, generalmente las empresas mineras y plantas de cemento como también los laboratorios químicos. El transporte se hace con máquinas debidamente certificadas para el transporte de los productos de la cal.

## 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**La exploración:** se lleva a cabo la investigación de campo en la zona estudiada para analizar las oportunidades que ofrece.

**La clasificación del macizo rocoso:** es la categorización de una formación rocosa proporciona una primera impresión de la resistencia y la diversidad del material, así como de las distintas grietas y deformaciones estructurales presentes.

**La durabilidad:** es la capacidad para resistir la acción de agentes externos y condiciones atmosféricas varía según el uso y la exposición.

**Proceso de explotación de una cantera:** aprovechando la inclinación del terreno, se separa el depósito de roca en diferentes niveles horizontales para extraer varias capas al mismo tiempo, lo que resulta en una cantera con una estructura escalonada.

**Operaciones mineras:** Todas las actividades relacionadas con el desarrollo de la minería.

**Productos mineros:** rocas, minerales extraídos de un yacimiento o los productos resultantes de su separación.

**Yacimiento:** Acumulación de rocas o minerales en la tierra.

**Afloramiento:** Parte de un yacimiento mineral visible en la superficie.

**Arranque mecánico:** Uso de máquinas para extraer mineral.

**Banco:** Escalón de explotación en minas a cielo abierto.

**Calcáreo:** Material con carbonato de calcio.

**Calcina:** Producto de la calcinación, proceso de calentamiento para eliminar impurezas.

**Desarrollo minero:** Fase que va desde la confirmación del yacimiento hasta su explotación.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. Ubicación Geográfica.

La operación de cantera El Zasal se localiza en el departamento de Cajamarca, en la provincia de Hualgayoc, en particular en los distritos de Bambamarca y la población aledaños. Se localiza en los Andes del Norte del Perú, entre los 2980 a 3500 m.s.n.m. en la vertiente continental atlántica.

**Tabla 4.**  
Coordenadas UTM.

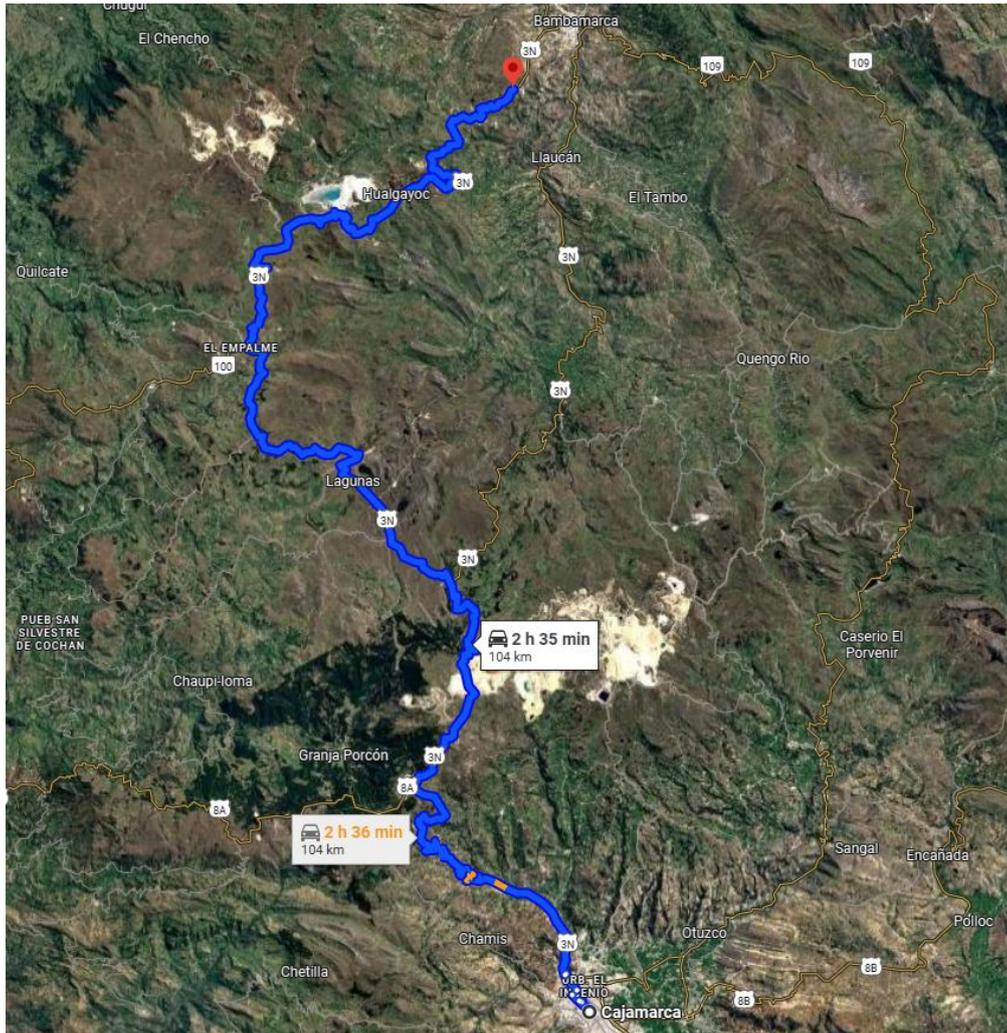
VÉRTICES	COORDENADAS UTM (WGS-84)	
	ESTE	NORTE
1	772276.597	9257932.333
2	772058.213	9254940.697
3	769066.578	9255159.081
4	769248.962	9258150.717

##### 3.1.2. Accesibilidad.

La vía principal del proyecto está ubicado al noroeste de Hualgayoc, al suroeste de Bambamarca y a 104 km al noroeste de Cajamarca, teniendo un tiempo de 2 horas 30 minutos de recorrido para llegar.

**Tabla 5.**  
Datos de accesibilidad a la zona de estudio.

ORIGEN/DESTINO	DISTANCIA (KM.)	TIEMPO (HRS.)	TIPO
Cajamarca – Calera El Zasal	104 km	2 h 37 min	Asfaltada – Trocha Carrozable



**Figura 11.** Rutas de accesibilidad. Ruta Cajamarca – Calera El Zasal.  
**Fuente:** Tomado de Google Maps (2025)

### 3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.2.1. Tipo de investigación.

En cuanto al tipo de investigación es aplicada orientado a lograr nuevos conocimientos destinados a dar soluciones de problemas prácticos en el planteamiento para la expansión superficial de la cantera “El Zasal”, distrito de Bambamarca, Cajamarca.

La descripción e identificación de cada uno de los componentes esenciales de las características del macizo rocoso de las reservas minerales no metálicos de caliza de cantera “El Zasal”, distrito Bambamarca, Cajamarca.

### **3.2.2. Nivel de investigación.**

En cuanto al nivel de la investigación es descriptivo el cual describe las características del macizo rocoso en una circunstancia temporal y geográfica determinada de cantera “El Zasal”, Distrito de Bambamarca, Cajamarca.

El comportamiento de una variable en función de otra por ser estudios de causa - efecto de cantera “El Zasal”, distrito de Bambamarca, Cajamarca.

### **3.2.3. Diseño de la investigación.**

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se manipularán las variables en estudio. La prueba se realizó in situ para posteriormente analizar y cuantificar las coordenadas geográficas. Con esto, se podrán determinar las áreas y volúmenes, con el objetivo de optimizar el tiempo de vida de la explotación de la calera.

### **3.2.4. Método de la investigación.**

Utilizo un enfoque tanto deductivo como inductivo en mi método, basándome en fórmulas preestablecidas y conocidas para calcular áreas, volúmenes, tiempo y costos de producción, además del tiempo de vida de la caldera a optimizar.

### **3.2.5. Población de estudio.**

En el trabajo de investigación la población está conformada por la cantidad de datos de campo de la caracterización del macizo rocoso, reservas minerales los tiempos, espacios del ciclo operativo de la cantera de caliza “El Zasal”, distrito de Bambamarca, Cajamarca.

### **3.2.6. Muestra.**

Constituye un conjunto de unidades o elementos de una población conformada por un grupo de datos seleccionados como representativos. La muestra se obtendrá aplicando la fórmula para cálculo del tamaño de la muestra conociendo la población en la caracterización

del macizo rocoso y el ciclo de operaciones mineras de cantera “El Zasal”, distrito Bambamarca, Cajamarca.

### **3.2.7. Unidad de análisis.**

En cuanto a la unidad de análisis tenemos el área, el volumen, el tonelaje y el tiempo con el costo.

## **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

### **3.3.1. Técnicas**

Análisis Documental, para la recopilación de los estudios existentes de la zona de investigación por parte de la empresa; adquisición de mapas geológicos realizados por el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET).

Clasificación morfogénica, para identificar las unidades morfogénicas. Reconocimiento de campo para identificar formaciones geológicas. Caracterización geomecánica, usando la clasificación geomecánica GSI que es la más ajustable al tipo de material.

Observación en campo, con el fin de obtener un conjunto de muestras e imágenes que faciliten la visualización y comprensión de la recopilación de datos de campo.

### **3.3.2. Instrumentos, materiales, equipos y personal**

- Laptop: para el procesamiento y análisis de datos usando los softwares Civil 3d, Microsoft Word, Excel y Arguis.
- GPS offline, para el levantamiento y para ubicar los puntos en el área de investigación calera el Zasal, aplicando de referencia las coordenadas GSW 84.
- Equipos de operación manual de topografía.
- Cámara fotográfica: Para registrar las evidencias de campo.
- Libreta de campo, lapicero y lápiz: para anotar los datos tomados en campo.

- Asistente: El equipo de trabajo consta de un Supervisor de operaciones y asistente o ayudante. El supervisor de operaciones se encarga ver las operaciones mina y transporte de la caliza como también el asistente.

### **3.4. PROCEDIMIENTO**

#### **3.4.1. Etapa preliminar de gabinete**

En cuanto a etapa preliminar iniciamos con la recolección de planos de la zana tanto geológicas y mineros, avances, áreas y volumen, de ello podemos ver la zona hasta donde está siendo minada y el cual sería nuestra nueva zona de expansión para poder iniciar la explotación.

#### **3.4.2. Etapa de campo**

En cuanto a la etapa de campo iremos a medir la zona cual la otra propiedad tendemos que utilizar nuestro GPS Offline para tener más presión de los puntos, analizaremos en campo los métodos de levantamiento en este caso GPS y análisis a través de Google Earth Pro 2024, utilizaremos las cartillas de UTM de la concesión para ver donde nos estamos posicionando.

#### **3.4.3. Etapa final de gabinete**

En tapa final de gabinete utilizaremos el análisis de los datos recolectados en campo, con los datos obtenidos se realizara un diseño mediante la caracterización del macizo rocoso de la cantera de caliza donde la roca predominante es la caliza que se encuentra mostrando un afloramiento con estructura donde se observa las discontinuidades mayores y menores con una persistencia y apertura de acuerdo a la litología estructural englobados en una matriz fina de color gris pardusco “ El Zasal”, Distrito de Bambamarca, Cajamarca.

### 3.5. GEOLOGÍA

#### 3.5.1. Geología Local

##### 3.5.1.1. Formación Cajamarca (Ks-ca)

La zona de estudio se ubica dentro de la Formación Cajamarca, la cual presenta un espesor aproximado de 160 metros. Esta unidad geológica está compuesta predominantemente por calizas de tonalidad gris oscura a azulada, intercaladas con delgados estratos de lutitas y margas. Las calizas se disponen en bancos masivos que alcanzan varios metros de grosor. Estratigráficamente, la Formación Cajamarca se encuentra en posición concordante sobre la Formación Quilquiñán y, de igual manera, subyace de forma concordante a la Formación Celendín.

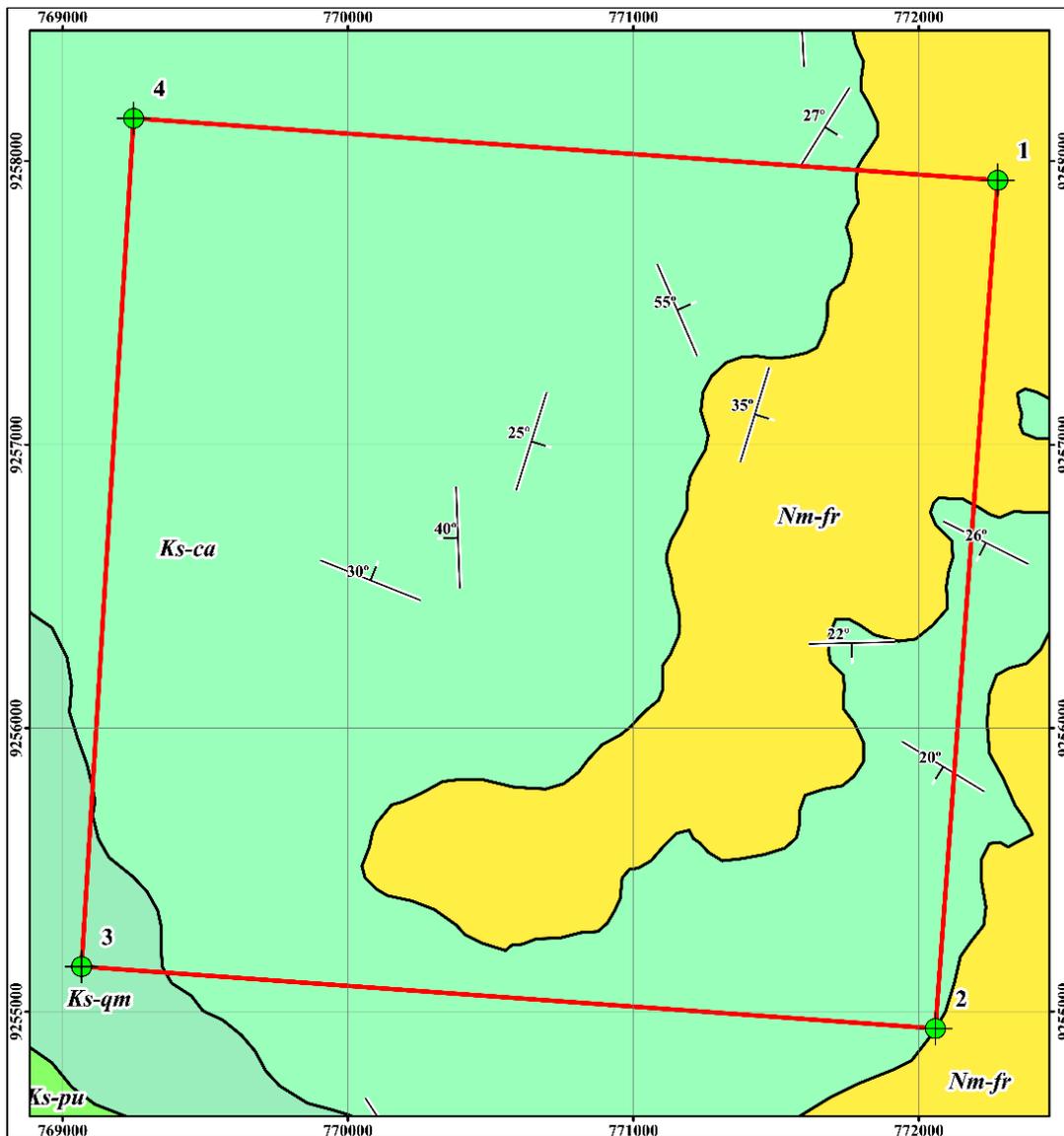


Figura 12. Ubicación de la Formación Cajamarca (Ks-ca), en la zona de estudio.

### **3.6. OPERACIÓN MINERA EN CANTERA EL ZASAL – BAMBAMARCA**

El trabajo de la calera el Zasal tenemos una ejecución diaria de labores el cual detallamos.

#### **3.6.1. Producción diaria de caliza.**

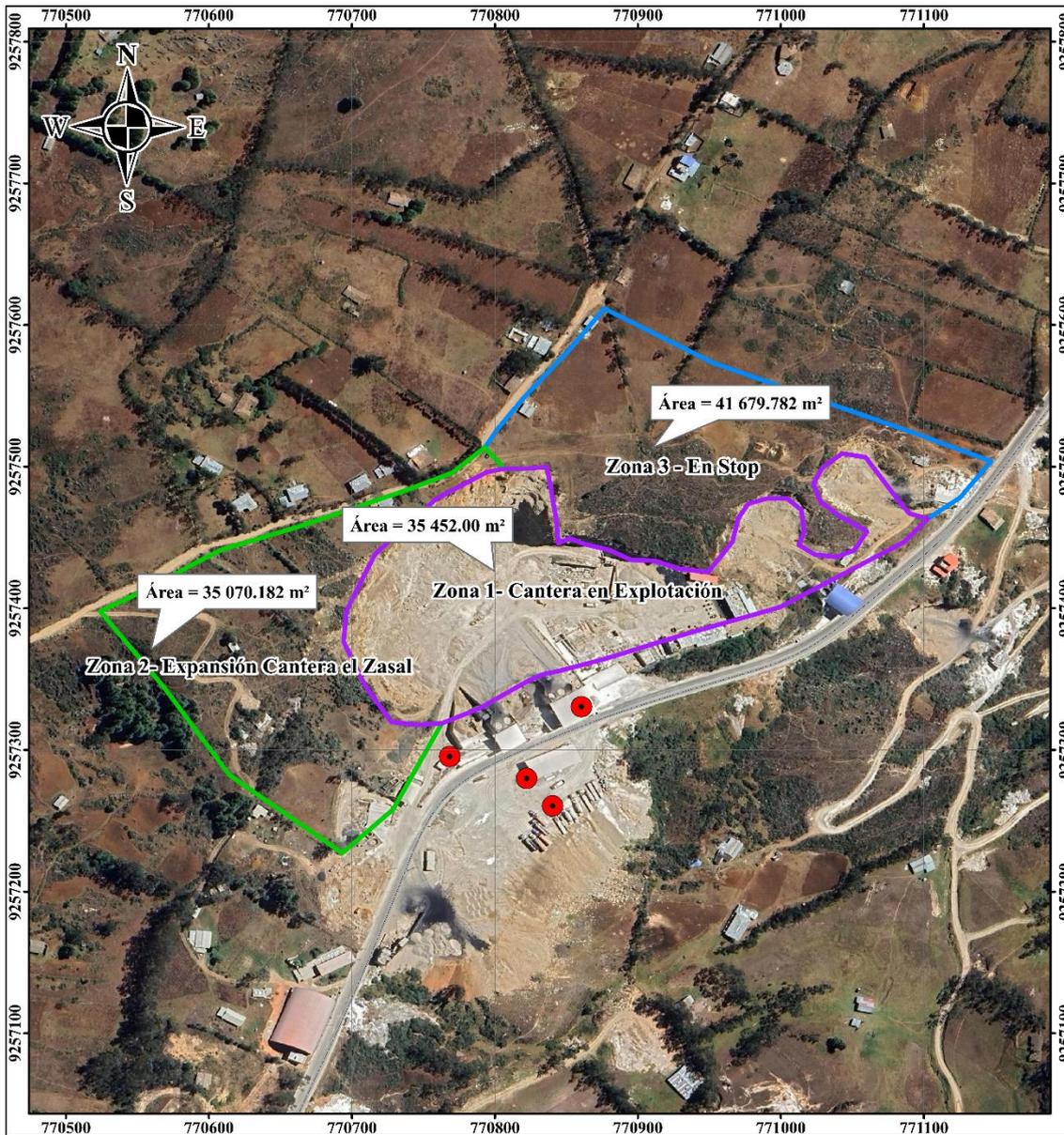
La producción de caliza en año 2023 fue de 100tn/día para calcinación de dos hornos en la actualidad extracción diaria de roca caliza actualmente es de 319tn/día, la calcinación se realiza en cuatro hornos ubicados a una distancia de 80 m del centro de operaciones mineras. La producción está en función a la capacidad de calcinación de los cuatro hornos con que cuenta la empresa y de la demanda de cal en el mercado, con sistema de operación artesanal por cuanto esta empresa está en el rubro de la pequeña minería, uno de los problemas más grandes que tiene la empresa es el financiamiento para la adquisición de equipos y maquinarias para incrementar la producción diaria.

#### **3.6.2. Estimación de reservas minerales en cantera El Zasal a mayo de 2024.**

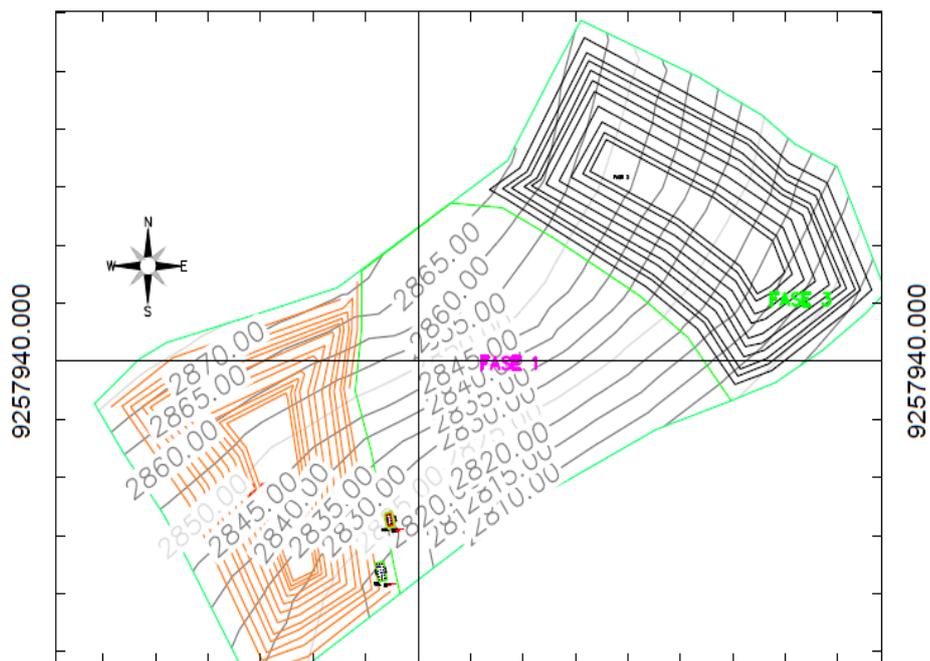
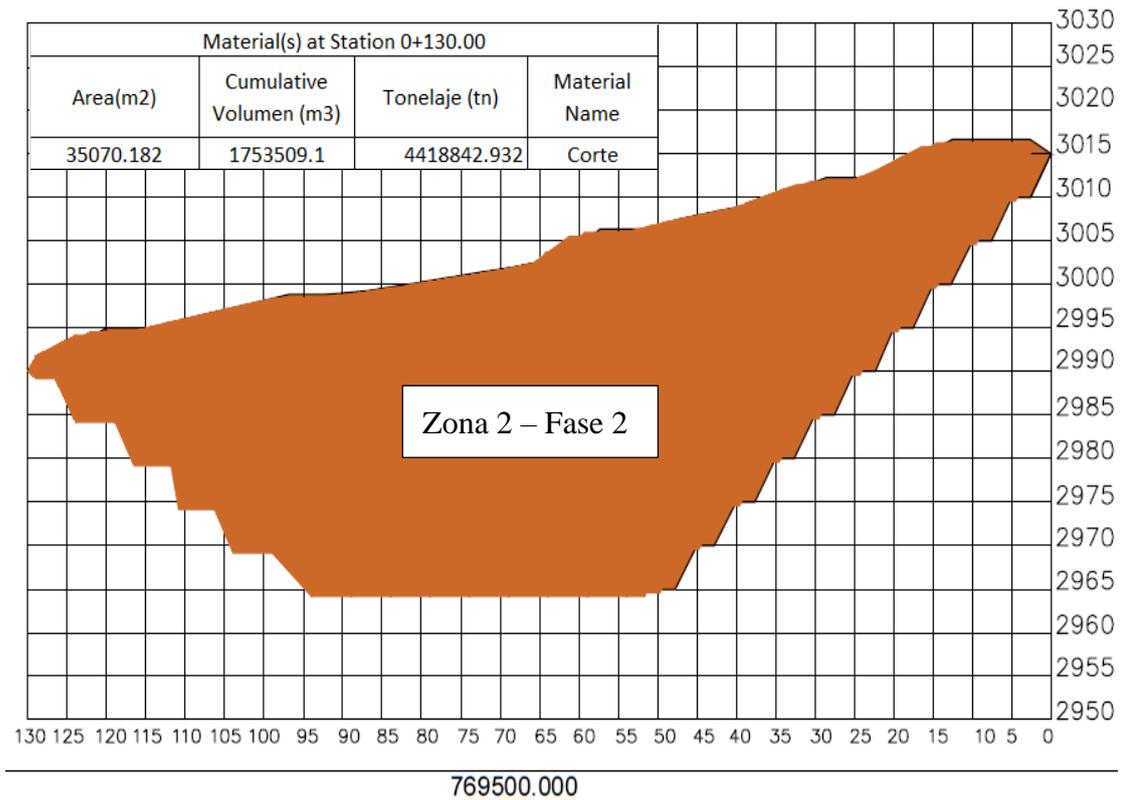
Las reservas geológicas se calcularon empleando las superficies antes descritas. El cálculo se realizó empleando el software Auto CAD, Arguis y usando las superficies de topografía y altura del estrato de caliza es de 50.00 m para los de volúmenes, en el resultado no se han realizado las perforaciones diamantinas en la zona de estudio, además se viene realizando los trabajos de desbroce en áreas aledañas para incrementar las reservas minerales probadas y probables.

#### **3.6.3. Reservas probadas de mineral de caliza.**

El área de las tres Zonas-tres fases es de 112201.965 m<sup>2</sup> y el Volumen es de 5610098.25 m<sup>3</sup> de reservas probadas de minerales de caliza a través del análisis previo en ArcGis y en Civil3D para el cálculo de área y volumen.



**Figura 13.** Área de las tres zonas de la Calera el Zasal.



**Figura 14.** Área y volumen de la Zona 2-Fase 2 de la Cantera el Zasal.

Empleando la densidad establecida anteriormente para la caliza ( $d = 2.52 \text{ tn/m}^3$ ), se puede obtener el tonelaje de caliza como sigue:

$$\text{Toneladas de caliza total} = \text{Volumen caliza} \times \text{densidad} = 5610098.25\text{m}^3 \times 2.52 \text{ tn/m}^3$$

$$\text{Reservas probadas de caliza} = 14137447.59\text{tn.}$$

Para la fase 2 que vamos a trabajar es de un área de 35070.182 m<sup>2</sup> y un volumen de 1753509.1m<sup>3</sup> y un tonelaje de:

$$\text{Toneladas de caliza fase 2} = \text{Volumen caliza} \times \text{densidad} = 1753509.1\text{m}^3 \times 2.52 \text{ tn/m}^3$$

$$\text{Reservas probadas de caliza} = 4418842.932\text{tn.}$$

**Tabla 6.**

Resumen de reservas de la cantera de caliza El Zasal.

<b>RESERVAS MINERALES DE CALIZA – CALERA EL ZASAL – DISTRITO BAMABAMARCA</b>				
<b>Reserva de caliza</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (tn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tonelaje (TM)</b>
<b>ZONA 1</b>	35452.001	1772600.05	2.52	4466952.13
<b>ZONA 2</b>	35070.182	1753509.10	2.52	4418842.93
<b>ZONA 3</b>	41679.782	2083989.10	2.52	5251652.53
<b>TOTAL</b>	112201.965	5610098.25		14137447.60

**Fuente:** Zasal, (2024).

### **3.6.4. Características técnicas.**

El yacimiento de caliza en la Región de Cajamarca es uno de los recursos calcáreos más importantes, se presenta como roca sedimentaria que contiene a lo menos 50% de minerales de calcita (CaCO<sub>3</sub>), y dolomita [Ca, Mg (CO<sub>3</sub>)], predominando la calcita, si tiene un mayor componente de dolomita.

### **3.6.5. Método de explotación de yacimiento de caliza en cantera El Zasal**

En la cantera El Zasal de Cajamarca la explotación de caliza se realiza por método a cielo abierto, este sistema consiste en la eliminación de las capas superiores del suelo para la extracción de minerales de yacimientos cercanos a la superficie, vale decir que el yacimiento de caliza como estructura está cubierto en la superficie por material vegetal en algunas partes en zonas de afloramiento de caliza no hay presencia de tierra vegetal.

La potencia de estrato es de 40.m a 50.00 m hacia la zona Norte la potencia del estrato se incrementa 60.00 a 80.00 m conforme se realiza las exploraciones, por lo que existe un orden lógico en el sentido de la explotación, es decir una secuencia de extracción del mineral de arriba hacia abajo, a medida que se vaya agotando el mineral en cada capa distribuidos en bancos de explotación debe considerarse 2.00 m de altura.

Dada las características de operaciones mineras artesanales se ha adecuado a acuerdo a la longitud de barrenos de 4 pies y la disponibilidad de equipos de perforación, carguío y transporte de minerales se dividido en bancos pequeños de 1.20 m de altura.

La remoción de roca caliza fragmentada se inicia con el carguío y acarreo con cargador de 5 cubos de capacidad hasta la planta de chancado primario y luego la planta de calcinación ubicados a 80 m del centro de operaciones mineras, esta planta se encuentra en al frente de minado de caliza.

### **3.6.6. Operaciones unitarias.**

El proceso de extracción consta de cuatro etapas principales y una adicional que es la trituración manual:

#### **3.6.6.1. Perforación.**

En la Cantera Zasal la producción se realiza en canteras por método superficial en esta etapa se extraerá la roca caliza de la cantera, mediante perforación con equipos de menor capacidad y la voladura mediante el uso de la Booster y ANFO, no existe una malla de perforación establecida se diseña de acuerdo a la calidad del macizo rocoso generalmente se ejecuta en forma artesanal con perforadoras de martillo. Sin embargo, puede variar de acuerdo a las características del banco y la capacidad de producción de la cantera.

### **3.6.6.2. Voladura.**

En el proceso de voladura, se carga cada taladro con explosivo, se introduce un detonante Booster de Famesa luego el que se detona mediante las mechas y utiliza el ANFO 3000 de Famesa, se rellena el taladro con taco hasta logra el llenado de la longitud del taladro, luego se obtiene la roca fragmentada del tamaño necesario los bolones resultantes de la voladura se tritura manualmente para poder cargarla y transportarla a la cancha de los hornos de calcinación, donde se reducirá nuevamente de tamaño antes del ingreso de caliza a los hornos de calcinación.

### **3.6.7. Factor de esponjamiento.**

El factor de esponjamiento de la cantera el Zasal, a través de sus características físicas y químicas la densidad de la caliza mediante una recolección de muestras representativas los resultados en banco de 2,52 tn/m<sup>3</sup> y suelta de 1.54 tn/m<sup>3</sup>.

### **3.6.8. Carguío**

La roca de caliza fragmentada es cargada en volquetes Volvo de 22 cubos aproximadamente con retroexcavadoras CAT con 5 cubos.

### **3.6.9. Equipos de la Sociedad Minera de el Zasal de Cajamarca.**

El Zasal cuenta con retroexcavadoras y minicargadores.

### **3.6.10. Transporte.**

Una vez realizado la voladura respectiva la caliza fragmentada se realiza el carguío de acuerdo a las características del mineral de caliza considerando tres aspectos fundamentales, mineral estéril se refiere al suelo vegetal que cubre la superficie, el mineral de baja ley y mineral de alta ley, el transporte puede realizarse a tres destinos; el mineral con alta ley se transporta a la zona de los hornos de calcinación, el material estéril a botaderos y el mineral de baja ley a botaderos, el transporte se realiza en volquetes Volvos de 22 cubos aproximadamente 30 toneladas.



**Fotografía 1.** Camión Volvo para el transporte de caliza - Cantera El Zasal.



**Fotografía 2.** Pila de Caliza con bolones de diámetro de 15cm.

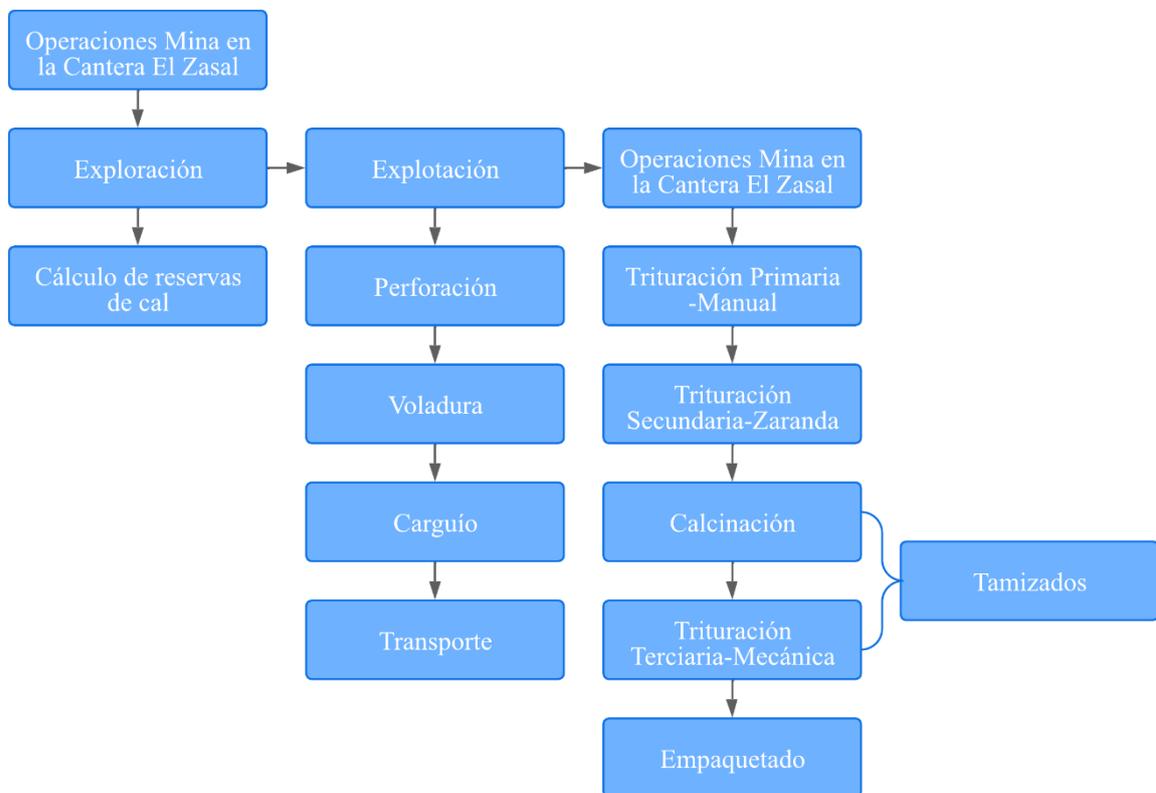
### **3.6.11. Trituración manual con combas.**

La Sociedad Minera de Responsabilidad Limitada (S.M.R.Ltda) “El Zasal” titular de la Concesión Minera no metálica “Colquirrumi N°49” es una empresa que realiza sus operaciones mineras en el rubro de la pequeña minería y muchos de sus operaciones lo realiza en forma artesanal, la producción diaria es de 60 tn/día de caliza fragmentada resultado de la voladura que depende básicamente de la capacidad de calcinación de los dos hornos que posee la empresa el horno H-A de capacidad 30 tn/día y el horno H-B de capacidad de 30 tn/día. Cada uno de los hornos opera con 50% de su capacidad operativa aproximadamente, es decir la producción minera de la empresa es muy bajo en comparación con otras empresas dedicadas a esta actividad minera de producción de cal, sin embargo, tiene un potencial considerable en sus reservas minerales no metálicas de considerando de la zona 2- expansión 2230212.81 tn de caliza y un buen potencial como minerales prospectivos. El proceso de trituración manual consta de dos etapas:

- Trituración manual en etapa primaria en banco de producción: La trituración se realiza en forma manual con el uso de combas de 12 kg a 16 kg se reduce el tamaño de bolones que han resultado de la voladura que constituyen un 07% a 15% del total de volumen de fragmentos resultantes de la voladura máximo de los fragmentos a 0.20 m – 0.25 m de diámetro esta trituración manual es realizado antes de la ejecución del carguío respectivo, ver Fotografía 3.
- Trituración manual en etapa secundaria (cancha de horno), en la cancha de almacenamiento del horno de calcinación la trituración manual es para reducir a un tamaño de 0.10 m a 0.15 m de diámetro aproximadamente previo a la alimentación a los hornos de calcinación, la producción – calcinación.



**Fotografía 3.** Fragmento de cal de diámetro 5cm después de ser calcinado y triturado por la chancadora primaria.



**Figura 15.** Proceso de operaciones mina en la cantera El Zasal.

### **3.6.12. Chancado de carbón**

El carbón antracita tiene que estar con las medidas adecuadas, por tanto, pasa por la zona de chancado.

### **3.6.13. Calcinación**

La Cantera El Zasal cuenta con dos hornos funcionales y para continuar el proceso cuarto en construcción en total unos 6 hornos que están ubicados a 80m de la cantera. La roca caliza como resultado de la voladura es triturada manualmente, esta trituración se realiza antes del proceso de carguío y también en las pilas de alimentación a los hornos de calcinación, extraída es transportada hasta la zona de calcinación, la pila de fragmentos de caliza.

### **3.6.14. Derivados de la caliza**

Los principales derivados de la caliza de acuerdo a su importancia comercial son: Cemento y cal.

### **3.6.15. Cal**

En la elaboración se requiere caliza de alta pureza, 95% de carbonato de calcio, menos de 3% de carbonato de magnesio y menos de 2% de otras impurezas. Este producto que se obtiene calcinando la piedra caliza a 1200 °C.



**Fotografía 4.** Producto de la calcinación de la caliza.

### **3.6.16. Canales de comercialización**

La comercialización de la cal es directa, es decir, venta directa entre productor y consumidor: Los principales consumidores van a ser las empresas mineras de la zona, las municipalidades que requieran entre sus productos la cal y los agricultores que necesiten este insumo. Las empresas mineras beneficiarias con la producción de cal son: Minera Yanacocha, Minera Goldfields, Minera Coimolache, Shahuindo y minera la Zanja.

En cuanto a las Municipalidades tenemos: Municipalidad provincial de Cajamarca, Municipalidad distrital de Bambamarca, Municipalidad provincial de Hualgayoc. También se comercializa con los agricultores: grandes, medianos y pequeños agricultores de la zona de Cajamarca.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS DE LA EXPANSIÓN DE LA ZONA 2

##### 4.1.1. Determinación de RQD (Rock Quality Designation) progresiva 0 – 24 km.

Para el cálculo de RQD (Rock Quality Designation). Priest and Hudson (1976), sugirió la estimación del índice RQD a partir de la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$ , mediante la siguiente expresión que proporciona el valor teórico mínimo del RQD.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Donde:

$\lambda$  = Número de discontinuidades por metro lineal.

El valor de  $\lambda$  se calcula en función al número total de diaclasas en la progresiva. De acuerdo al consolidado de registro lineal se tiene:

Longitud total = 24 m.

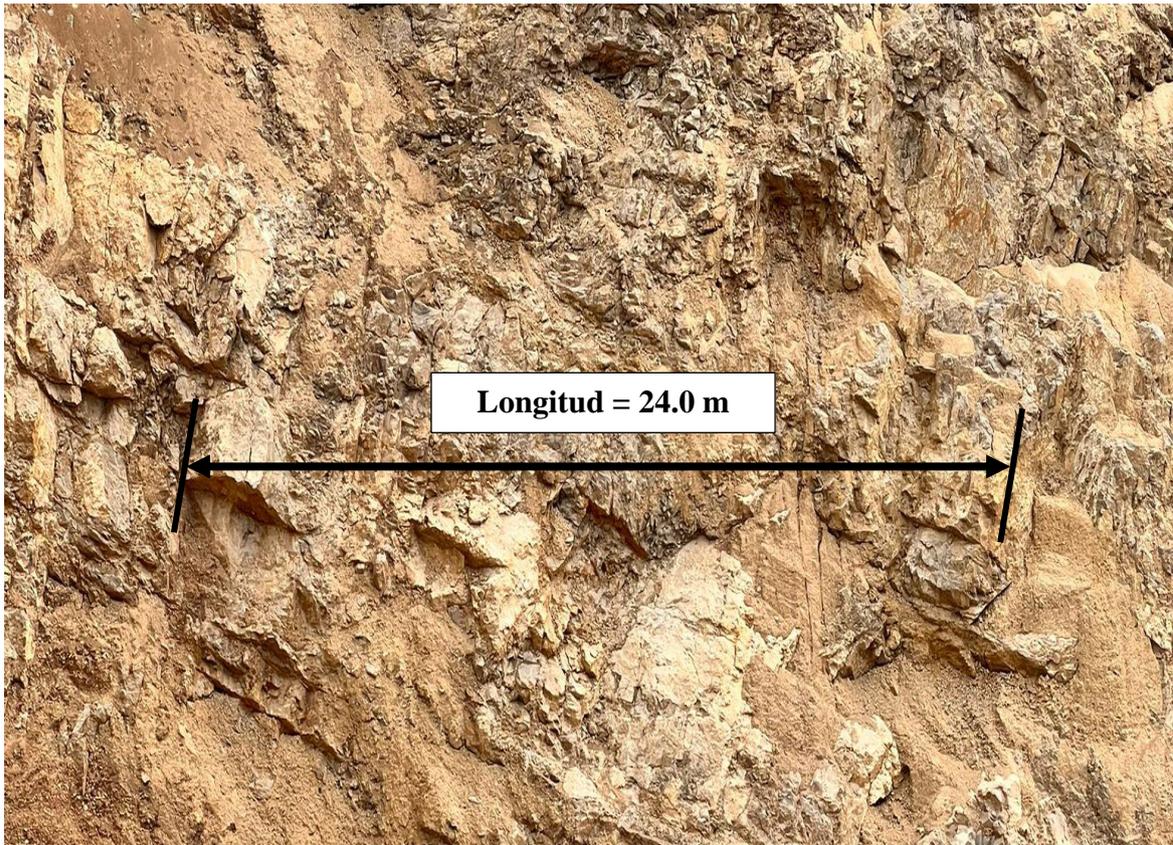
Número de diaclasas = 60 diaclasa.

$$\lambda = 60/24 = 2.5$$

$$RQD = 100e^{-0.1(2.5)}(0.1 * 2.5 + 1)$$

$$RQD = 100(0.779) (1.25)$$

$$RQD = 97.38\%$$



Fotografía 5. Fracturas y diaclasas en 24 metros en cara del talud de caliza.

#### 4.1.2. Evaluación geomecánica de la cantera de caliza El Zasal

Se ha realizado el análisis geomecánico de RMR de Bieniawski 1989 en la progresiva 0-24m en los afloramientos de caliza meteorizada, ver Tabla. 7.

Tabla 7.

Resumen de dominio estructural progresiva 0 – 24m cantera de caliza El Zasal.

Parámetro	PROGRESIVA 0-24 m			Progresiva 0-24
	Familia N° 1	Familia N° 2	Familia N° 3	
Orientación (Bz/DBz)	72/156	71/220	70/040	
<b>Total, discontinuidades en 1 m</b>				
Espaciado	3	3	3	200-600 mm
Persistencia	2	3	2	1-3 m
Apertura	3	3	3	Ang 0.1-1.0 mm
Rugosidad	4	2	4	lig.rugosa
Relleno	3	2	4	Suave<5mm
Meteorización	3	3	3	Moderada
Agua subterránea	2	2	2	Humedo

#### 4.1.3. Resultados de resistencia compresiva uniaxial (RCU) con esclerómetro.

Para lograr obtener le área y volumen de la cantera utilicemos las curvas de nivel y el solidos el cual el cálculo nos da con el software Roc data.

Tipo de roca = Caliza sin alteración. Dando una resistencia compresiva uniaxial.

$$\sigma_c = 74.13 \text{ Mpa}$$

#### 4.1.4. Resistencia compresiva uniaxial (RCU) de especímenes.

La resistencia compresiva uniaxial se muestra en RCU MPa: 72.49, realizado por MRP, Servicios especiales.

#### 4.1.5. Calidad del macizo rocoso mediante RMR de Bieniawski 1989.

Determinamos los parámetros importantes como: Resistencia a la compresión uniaxial, R.Q.D. Rock Quality Designation, Espaciado de las discontinuidades, Condición de las discontinuidades, Condiciones hidrológicas, Ajuste por orientación de las juntas.

**Tabla 8.**  
Rock Mass Rating (RMR) progresiva 0 - 24 cantera de caliza El Zasal.

<b>Cantera el Zasal Progresiva 0-24 m</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Puntaje</b>
Resistencia compresiva uniaxial (RCU)	(72) o (74) Mpa	7
RQD	95.76%	20
Espaciado	200-600 mm	10
Persistencia	3 -10	2
Apertura	0.1-1.0 mm	3
Rugosidad	Ligera rugosa	3
Relleno - espero	Suave < 5 mm	2
Meteorización	moderado	3
Agua subterránea	húmedo	10
<b>RMR Regular</b>		<b>60</b>

#### 4.1.6. Calidad de macizo rocoso de cantera de caliza El Zasal.

La calidad del macizo rocoso es regular o media con RMR básico de 60 de acuerdo a los resultados de la evaluación geomecánica considerando los parámetros fundamentales para su valoración.

**Tabla 9.**

El valor de RMR en la tabla se tiene.

Calidad de Macizo Rocosos	
Tipo	III
Descripción	Regular

- Cohesión: 200 - 300KPa.
- Ángulo de fricción interna: 250 – 350.

#### 4.1.7. Especificaciones técnicas del macizo rocoso.

En la Sociedad Minera de Responsabilidad Limitada (S.M.R.Ltda) “ El Zasal de Cajamarca” titular de la Concesión Minera no metálica “Colquirrumi N° 49” Las especificaciones de la caliza varían con el uso final en el cual se aplique el mineral, estas especificaciones obedecen a sus características físicas y químicas logradas en el laboratorio. Las propiedades físicas son importantes en la utilización directa del material para la obtención de la cal, se ha tenido un especial cuidado de determinar las características físicas y químicas la densidad de la caliza mediante una recolección de muestras representativas los resultados en banco de 2,52 tn/m<sup>3</sup> y suelta de 1.54 tn/m<sup>3</sup>, la resistencia compresiva uniaxial varia de 50.34 MPa a 95.55 MPa.

## 4.2. PLAN DE MINADO ANTIGUO

### 4.2.1. Método de explotación de yacimiento de caliza en cantera El Zasal

En la cantera El Zasal de Cajamarca la explotación de caliza se realiza por método a cielo abierto, este sistema consiste en la eliminación de las capas superiores del suelo para la extracción de minerales de yacimientos cercanos a la superficie, vale decir que el yacimiento de caliza como estructura está cubierto en la superficie por material areno

arcilloso conocido como suelo vegetal. Los bancos de explotación tienen una altura de 1.20m sus operaciones mineras son artesanales el estrato de caliza tiene una potencia de 50m de altura.

La perforación se realiza con equipos de perforación AirRoc T25, con una malla de perforación de 2.00 m x 6.00m el transporte y carguío de caliza se realiza en cargador 5m<sup>3</sup> de capacidad.

#### **4.2.2. Perforación antigua.**

En cantera de caliza El Zasal se extrae la roca caliza de la cantera, mediante perforación con equipos de menor capacidad y la voladura mediante el uso de la emulsión, no existe una malla de perforación adecuado solo se ejecuta en forma artesanal con perforadoras de la AirRoc T25 diariamente se realizan 8 taladros separadas a 2 m, las cuales tendrán una profundidad de 1.20m. La perforación se la lleva a cabo “uno a uno”, esto quiere decir que van a ir avanzando de acuerdo a la perforación de cada uno, van a perforar los 8 taladros con profundidad de 1.20m.

#### **4.2.3. Disparo simultáneo y rotativo antiguo.**

El propósito del disparo rotativo es crear y expandir, por eso se utiliza en las operaciones mineras donde solo hay uno. La cara libre es donde el material se desplaza cuando es disparado por un explosivo en un banco de trabajo.

N° de taladros = 8 taladros

#### 4.2.4. Malla antigua de perforación.

El trazo de malla de perforación se observa en el perfil del banco de caliza.

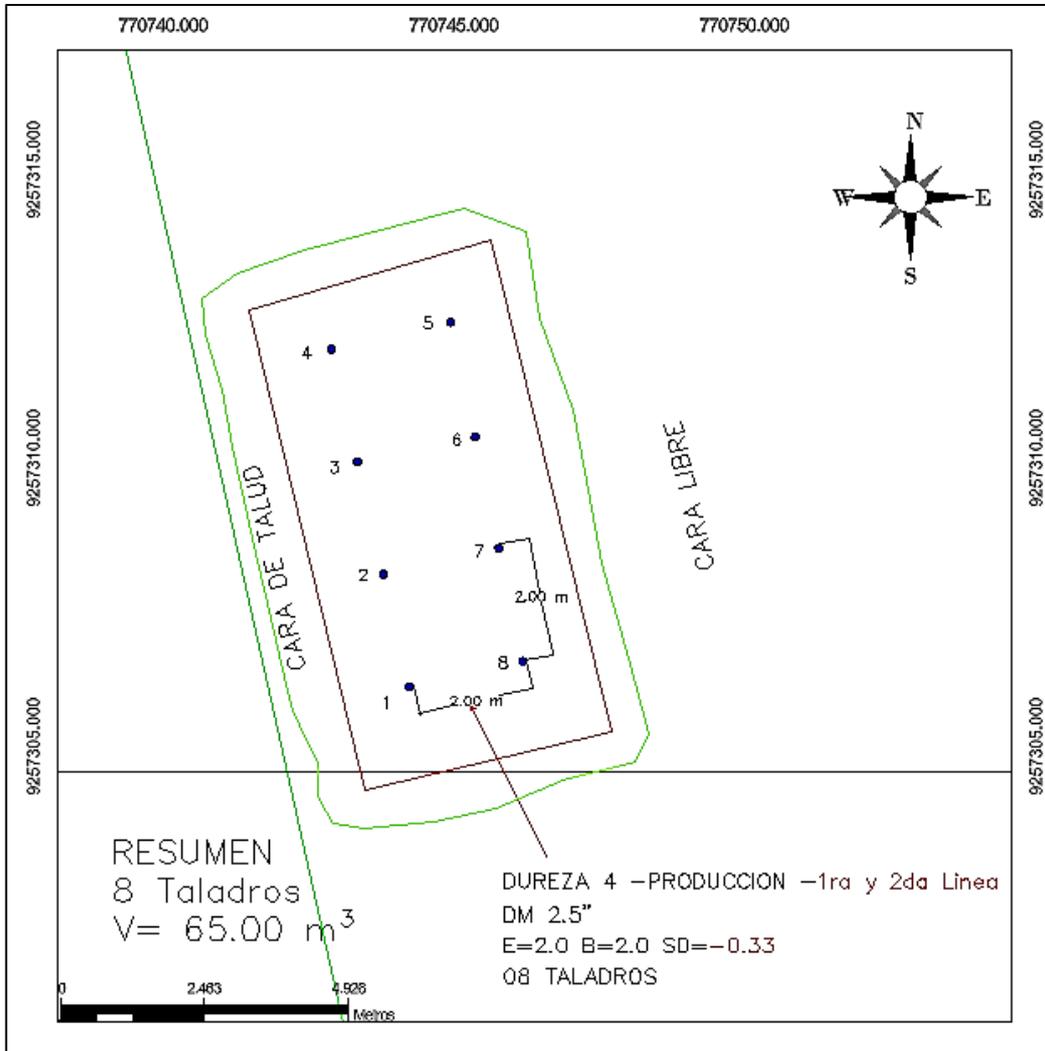


Figura 16. Malla de perforación antigua para RMR 60 en cantera de caliza El Zasal Bambamarca.

#### 4.2.5. Diseño de malla de perforación antigua.

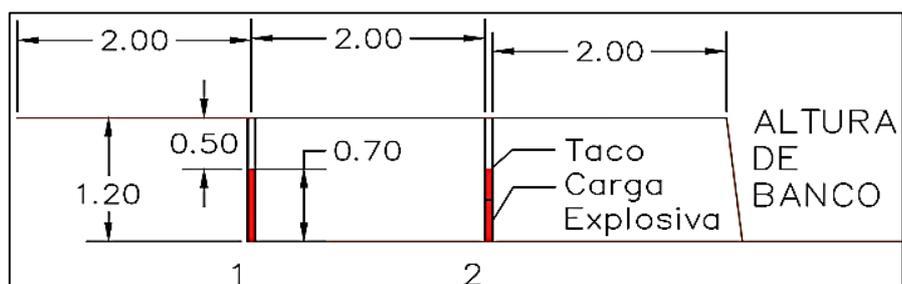
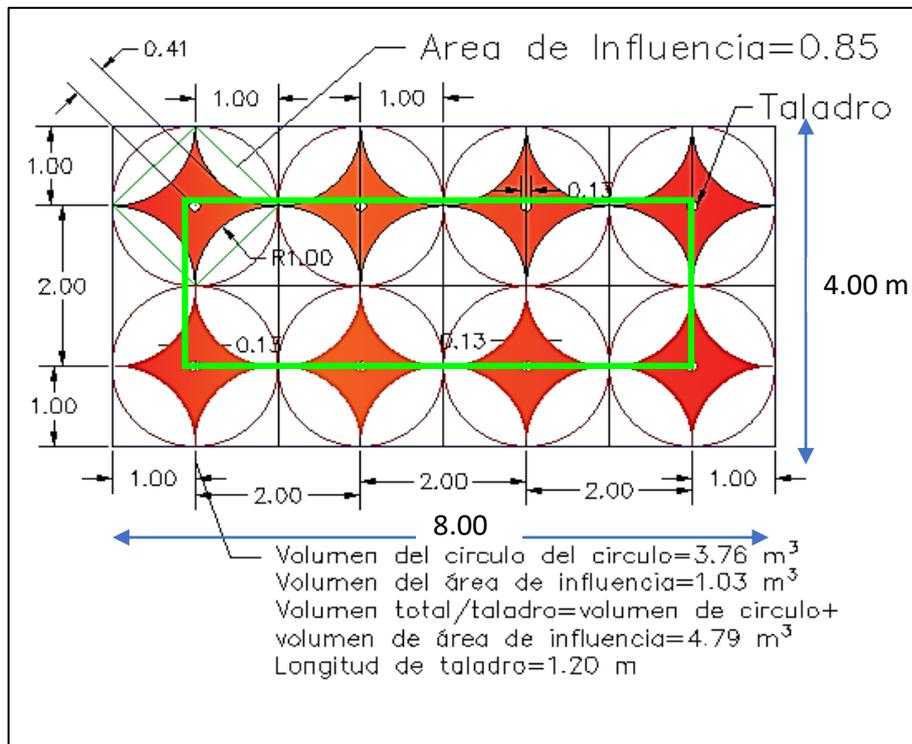
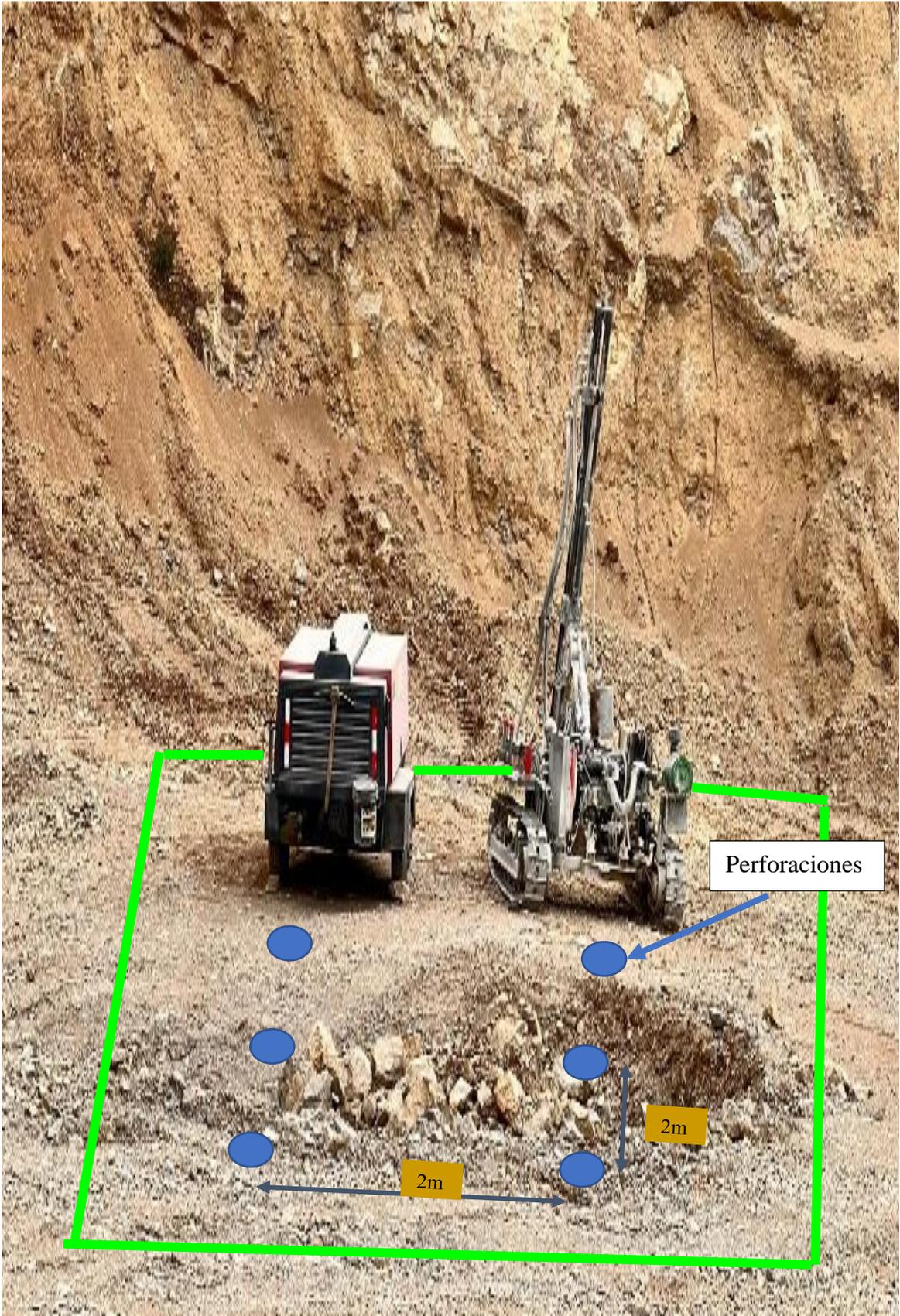


Figura 17. Perfil longitudinal antiguo del banco de producción en cantera el Zasal -Bambamarca.

Malla de perforación antigua es 2mx6m y de una calidad de macizo rocoso regular media RMR 60 en cantera de caliza El Zasal – Bambamarca.



**Figura 18.** Transferencia de Energía en Malla de perforación antigua en la cantera el Zasal-Bambamarca.



Fotografía 6. Perforación diseño de malla antigua.

#### 4.2.6. Voladura antigua.

Una vez que se llega a la profundidad de 1.20 m en todos los taladros se coloca el explosivo que consta de:

- Cada taladro lleno con emulsión.
- Booster.
- Fulminante con mecha lenta.
- Anfo 3000

Se coloca primero la Booster, después un fulminante con mecha lenta, se lo rellena con nitrato disuelto una longitud de 0.70 m y por último el resto de la longitud se tapa con taco.

#### 4.2.7. Volumen antiguo.

El volumen de cada detonación se lo obtiene de acuerdo al radio de acción de cada taladro.

Con un radio 1.00 m y una profundidad de 1.20 m.

Usando la ecuación:

$$\begin{aligned}V1 &= (\pi) * (r^2) * (h) \\V1 &= (3.14) * (1.00)^2 * (1.20) \text{ m} \\V1 &= 3.76 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Área de influencia. El área de influencia se obtiene con Civil 3d convirtiendo en polilínea las cuatro esquinas del cuadrilátero que rodea al cilindro de radio 1.00 m aplicando el comando área resulta 0.86 m<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}V2 &= (\text{Área de influencia}) * (1.20 \text{ m}) \\V2 &= (0.86 \text{ m}^2) * (1.20 \text{ m})\end{aligned}$$

$$V2 = 1.03 \text{ m}^3$$

Volumen taladro= V1 + V2.

$$Vt = 4.79 \text{ m}^3$$

Vt = Volumen en banco por taladro

VT = Volumen total

$$VT = (Vt) * (\text{N}^\circ \text{ de taladros})$$

$$VT = (4.79 \text{ m}^3) * (8 \text{ taladros})$$

$$VTb = 38.39 \text{ m}^3 \text{ en banco}$$

- VTb = Volumen total en banco.
- VTs = Volumen total suelto.

VTs = Volumen total banco + volumen por factor de esponjamiento (69.48% para calizas)

$$VTs = 38.39 \text{ m}^3 + 26.67 \text{ m}^3$$

$$VTs = 65.06 \text{ m}^3$$

### **4.3. PLAN DE MINADO NUEVO**

#### **4.3.1. Perforación Propuesta-nueva**

Diariamente se realizan 18 perforaciones separadas a 2m, las cuales tendrán una profundidad de 1.70m. La perforación se la lleva a cabo en forma secuencial en un macizo rocoso de calidad media o regular de RMR 60.

#### **4.3.2. Disparo simultáneo y rotativo nuevo**

Cuando se disparan los taladros juntos, se dice que el disparo es simultáneo, pero si se disparan sucesivamente, de acuerdo a un orden de encendido previamente establecido el disparo será rotativo. El objeto del disparo rotativo es la formación y ampliación de las caras libres, razón por la cual se usa este sistema en los trabajos de la mina, ya que los frentes solo presentan uno o dos caras libres.

Cara libre, es el lugar hacia el cual se desplaza el material cuando es disparado, por acción del explosivo, considerando la carga explosiva y la altura del banco.

N° de taladros = 18 taladros

#### 4.3.3. Nueva malla de perforación en la cantera de caliza El Zasal

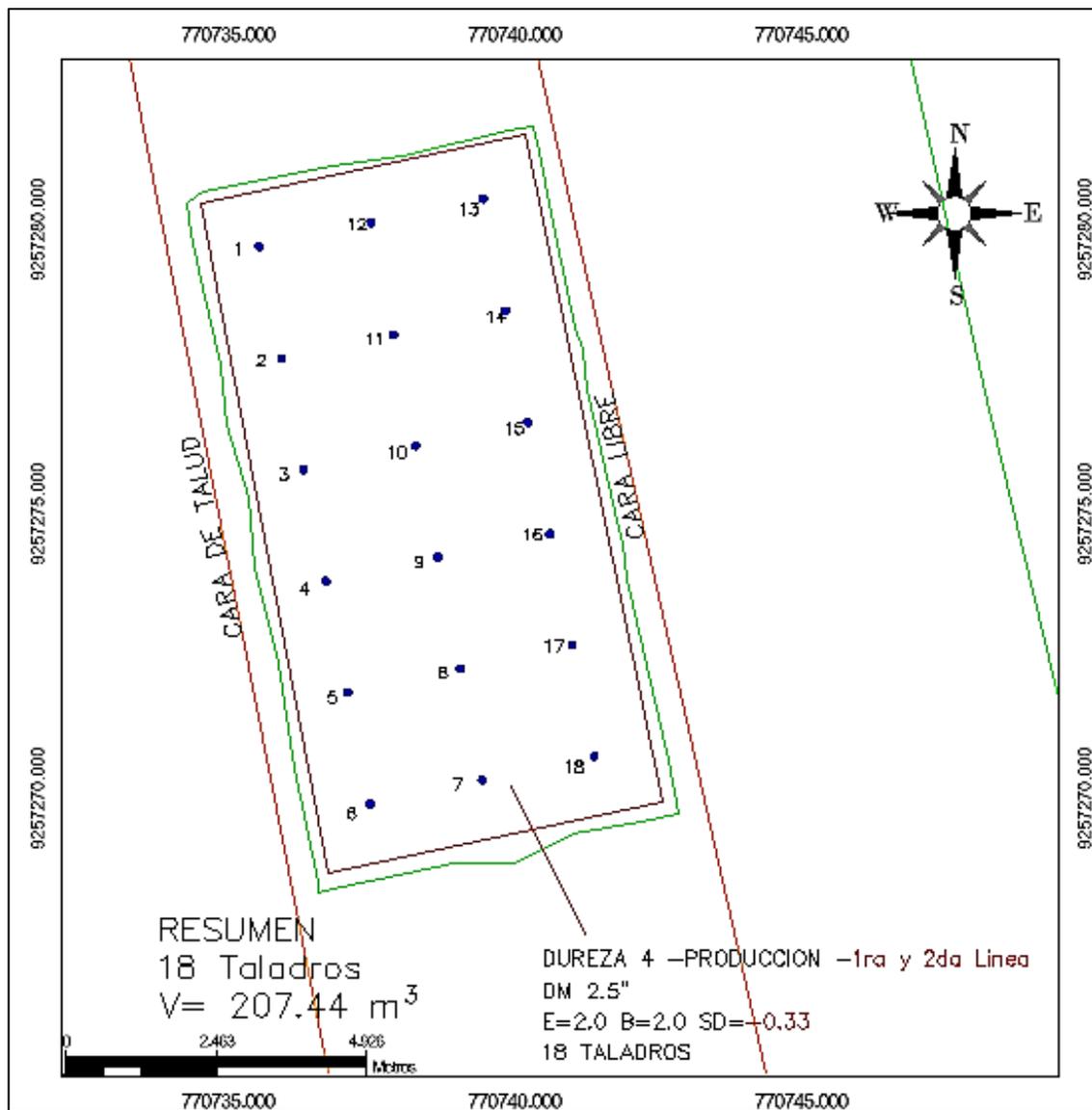
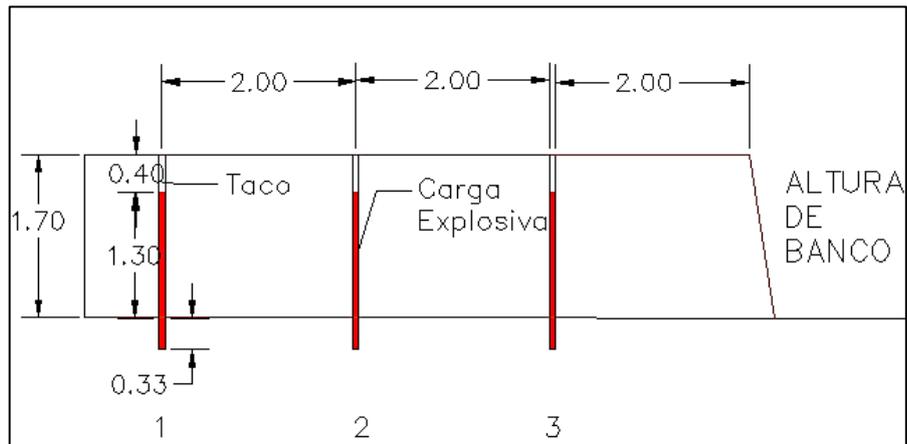


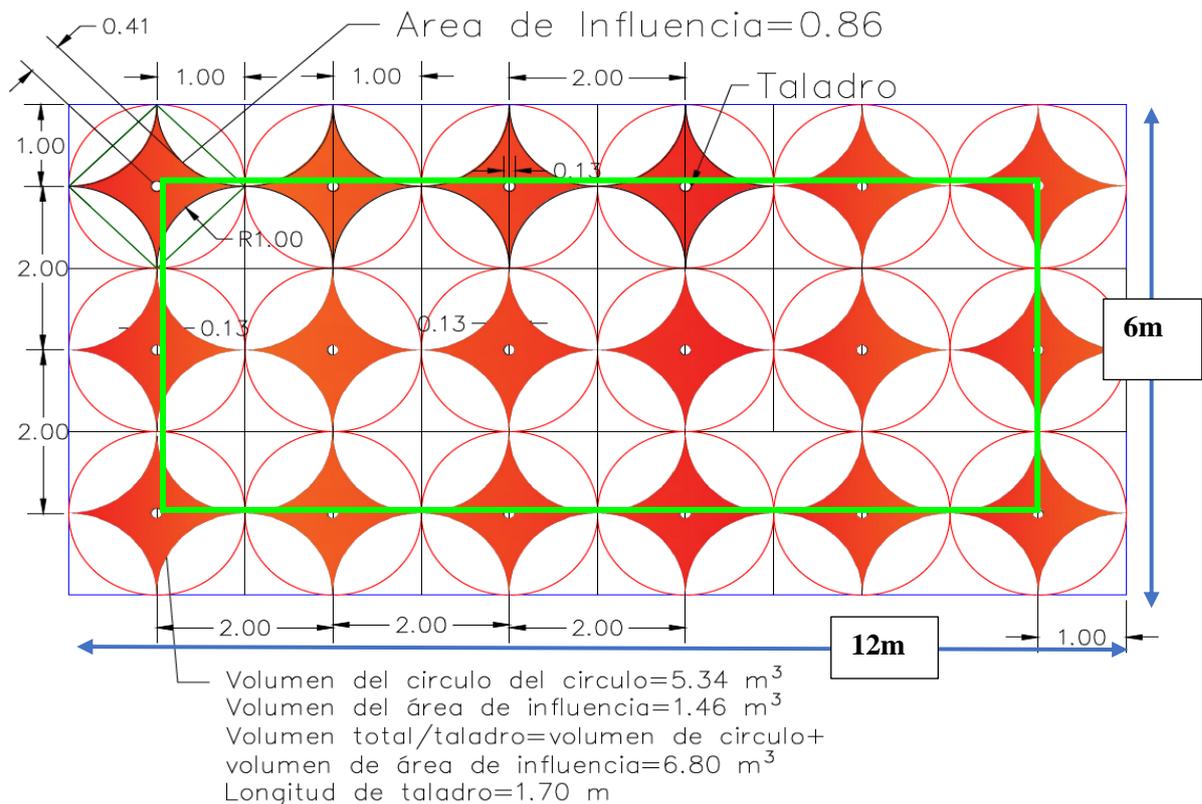
Figura 19. Malla de perforación nueva (propuesta) para RMR 60 en cantera de caliza El Zasal – Bambamarca.

#### 4.3.4. Diseño de malla de perforación nueva.



**Figura 20.** Banco en cantera de caliza el Zasal.

Malla de perforación propuesta es de 4mx10m y de una calidad de macizo rocoso regular media RMR 60 en cantera de caliza El Zasal-Bambamarca.



**Figura 21.** Transferencia de Energía en Malla de perforación propuesta en la cantera el Zasal-Bambamarca

El proceso de perforación se observa en la Fotografía 7.



**Fotografía 7.** Proceso de perforación con AirRoc T25 en la cantera el Zasal.

#### 4.3.5. Voladura nueva.

Una vez que se llega a la profundidad de 1.70 m en todos los taladros se coloca el explosivo que consta de:

- Fulminante con mecha lenta.
- Anfo 3000.
- Booster.

Se coloca primero la dinamita, después un fulminante con mecha lenta, se lo rellena con nitrato disuelto una longitud de 1.30 m y por último el resto de la longitud se tapa con taco.

#### 4.3.6. Volumen nuevo.

El volumen de cada detonación se lo obtiene de acuerdo al radio de acción que fue dato medido en la cantera.

Usando la ecuación:

Con un radio 1.00 m y una profundidad de 1.70 m.

$$\begin{aligned}V1 &= (\pi) * (r^2) * (h) \\V1 &= (3.14) * (1.00)^2 * (1.70) \\V1 &= 5.34 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Área de influencia. El área de influencia se ha determinado haciendo uso de Auto CAD convirtiendo en poli línea las cuatro esquinas del cuadrilátero que rodea al cilindro de radio 1.00 m aplicando el comando área resulta 0.86 m<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}V2 &= (\text{Área de influencia}) * (1.70 \text{ m}) \\V2 &= (0.86 \text{ m}^2) * (1.70 \text{ m}) \\V2 &= 1.46 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Volumen taladro= V1 + V2.

$$Vt = 6.80 \text{ m}^3$$

$Vt = \text{Volumen en banco por taladro.}$

$Vt = \text{Volumen total}$

$VT = Vt \times N^\circ \text{ de taladros con barrenos integrales.}$

$$Vt = 6.8 \text{ m}^3 * 18 \text{ taladros}$$

$$Vt = 122.4 \text{ m}^3 \text{ en banco}$$

$VTs = \text{Volumen total banco} + \text{volumen por factor de esponjamiento de } 69.48\%.$

$$VTs = 122.40 \text{ m}^3 + 85.04 \text{ m}^3$$

$$VTs = 207.44 \text{ m}^3$$

#### 4.3.7. Detalles Técnicos de los equipos de carguío y transporte

Las características principales en los equipos de transporte y carguío se muestran.

**Tabla 10.**

Modelos de maquinarias.

Modelo	Modelo del motor	Potencia bruta		Peso en orden de trabajo		Profundidad de excavación		Cucharón / Tolva		
		kW	hp	kg	Lb	mm	pies	m3	yd3	
430 E	Retroexcavadora	Cat® 420	75	101	11 000	24251	469 8	0.96	0.9 6	1.4
926 M	Cargadora	C7.1 Cat®	125	168	1278 9	28194 5	300 0	9.84	4.6 5	6.5
ZL50GN	Cargadora	Cat 3306	127	170	5000	11023	348 5	11.43	3.0	3.9 2
320 GC	Excavadora	Cat 320 GC	107	143	2040 0	44974	663 0	21.75	6.0	6.5
242 D3	Mini cargador	Cat 242 D3	55. 4	74. 3	2000	4400	391 7	154.2 (pulg )	0.5	1.2
FMX 480	Volquete	VOLVO FMX 480 6X4R 2016	373	500	18 000	39683	-----	-----	22	29

**Fuente:** Catálogos de CAT Latinoamérica.

Las retroexcavadoras son un conjunto de tres equipos en uno, lo que permite realizar una variedad de tareas en la obra de manera sencilla. El tractor es la parte principal de la retroexcavadora, facilitando el desplazamiento por diversos terrenos. Además, la retroexcavadora y el cargador se acoplan al tractor, añadiendo funcionalidad y utilidad a la máquina. El cargador es útil para la limpieza de material de construcción y el traslado de tierra de un lugar a otro.

#### **4.4. VIDA DE LA MINA DE ACUERDO A LA CAPACIDAD DE CALCINACIÓN**

##### **4.4.1. Vida de la mina de acuerdo a la malla antigua**

El tiempo de vida de la mina en la zona 2 con este diseño de malla de la zona1-Fase1, se estima a un ritmo de operación que está determinado en función a su reserva de producción proyectado con un promedio anual. Para determinar el tiempo de vida de una mina, en la etapa de explotación u operación se determina en función a la reserva calculada y desarrollo del yacimiento mediante una estimación con un promedio anual. Los cálculos se muestran a continuación de la siguiente manera:

$$\text{Vida útil de la Mina (operación)} = \text{Reservas} / (\text{Producción anual})$$

- Reservas: 4418842.93tn
- Producción anual: 28800tn/año.
- Producción mensual: 2400tn/mes.
- Producción diaria: 100tn/día.
- Tiempo de vida (operación): 124años.

$$\text{Vida útil de la Mina (operación)} = 4418842.93tn / (28800tn/año) = 153 \text{ vida Útil}$$

$$\text{Vida Útil de la Mina (operación)} = 153 \text{ años.}$$

#### **4.4.2. Vida de la mina de acuerdo a la malla propuesta (nueva).**

El tiempo de vida de la mina para la zona 2 el cual en proyecto es de nombre Fase-2, en la etapa de operación está determinado en función a su reserva y el consumo estimado proyectado con un promedio anual, mostrando el siguiente resultado. Para determinar el tiempo de vida de una mina, en la etapa de explotación se determina en base a la reserva calculada y consumo del yacimiento mediante una estimación con un promedio anual. Los cálculos se muestran a continuación de la siguiente manera:

$$\text{Vida útil de la Mina (operación)} = \text{Reservas} / (\text{Producción anual}).$$

- Reservas: 4418842.93tn
- Producción anual: 91872tn/año
- Producción mensual: 7656tn/mes
- Producción diaria: 319tn/día
- Tiempo de vida (operación): 48 años.

$$\text{Vida útil de la Mina (operación)} = 4418842.93\text{tn} / (91872\text{tn/año}).$$

$$\text{Vida útil de la Mina (operación)} = 48 \text{ años.}$$

#### **4.5. Evaluación de programa de producción y plan de minado**

La producción de la Zona 1-Fase 1 una llegó a su fin en el septiembre del 2023 en ese sentido, se inicia con la Zona 2-Fase 2 la producción lograda en el periodo de prueba de octubre a diciembre de 2024 es de 319 tn/día de caliza puesta en chancha de horno de calcinación es óptima la capacidad de calcinación de los dos hornos, es necesario considerar que la producción de caliza es durante 6 días de la semana mientras el horno trabaja los 6 días de la semana, la cantidad de producción diaria, durante 6 días es de 1914tn el horno requiere durante la semana 1917tn de caliza el cual no hay en exceso por el cual no se acumula en la cancha, está acorde al plan de la expansión de la cantera.

#### **4.5.1. Cálculo de ciclos para producción diaria caliza en m<sup>3</sup>.**

El tiempo de ciclo para una producción diaria puede dividirse en dos componentes principales. La primera componente incluye todas las operaciones que tienen una duración relativamente constante de una aplicación a la siguiente: girar, cambiar de posición, descargar y cargar. Los valores estimados del tiempo necesario para realizar cada una de estas funciones generalmente pueden obtenerse de la documentación del fabricante del equipo. La componente variable del ciclo está asociada con el tiempo de viaje para equipos móviles y con el tiempo de giro en el caso de equipos de base fija. Se ha considerado el tiempo total de carga y acarreo, incluyendo el tiempo de acomodo y demoras imprevistas. Esta técnica es aplicable para la cantera de caliza El Zasal, el tiempo de ciclo trabajo es 8.07min.

$N^{\circ}$  de ciclos= 60 min/ ciclo de trabajo.

- Ciclo de trabajo = 8.07 min.
- $N^{\circ}$  de Ciclos = 60 min/8.07 min.
- $N^{\circ}$  de ciclos = 7.43

Total, de horas trabajadas = (8 h) \* (75% de eficiencia) = 6 h.

Total, horas trabajadas = 6 h.

Si cada cargador puede transportar 4.65 m<sup>3</sup> considerando factor de llenado de 98% roca fragmentada de caliza con trituración resultan 4.9 cubos. Es decir, el volquete transporta 4.9 metros cúbicos de caliza fragmentada hacia la planta de calcinación.

#### **4.5.2. Cálculo de producción en metros cúbicos de caliza.**

La producción de caliza se ha estimado de acuerdo al número de ciclos en función a horas de trabajo.

Producción diaria con un solo volquete:

$$P.D. = 7.43 \text{ ciclos} \times 4.65 \text{ m}^3 (\text{promedio}) \times 1 \text{ cargador} \times 6 \text{ h} = 207.4 \text{ m}^3 / \text{día de caliza}$$

Producción mensual (PM) en m<sup>3</sup>. En P.M. con un volquete.

$$P.M. = 207.4 \text{ m}^3 \times 25 \text{ días trabajadas} = 5186 \text{ m}^3 \text{ de caliza fragmentada/mes}$$

#### 4.5.3. Tonelaje de caliza puesta en cancha de horno de calcinación por día.

La producción de caliza se ha estimado de acuerdo al número de ciclos en función a horas de trabajo.

$$\text{tn/día} = 207.4 \text{ m}^3 \text{ de caliza} \times \text{densidad suelta.}$$

$$\text{Densidad suelta} = 1.54$$

$$\text{tn/día} = 207.4 \text{ m}^3 \text{ de caliza} \times 1.54$$

$$\text{tn/día} = 319 \text{ ton de caliza.}$$

#### 4.5.4. Capacidad de calcinación óptima en los hornos de la cantera el Zasal.

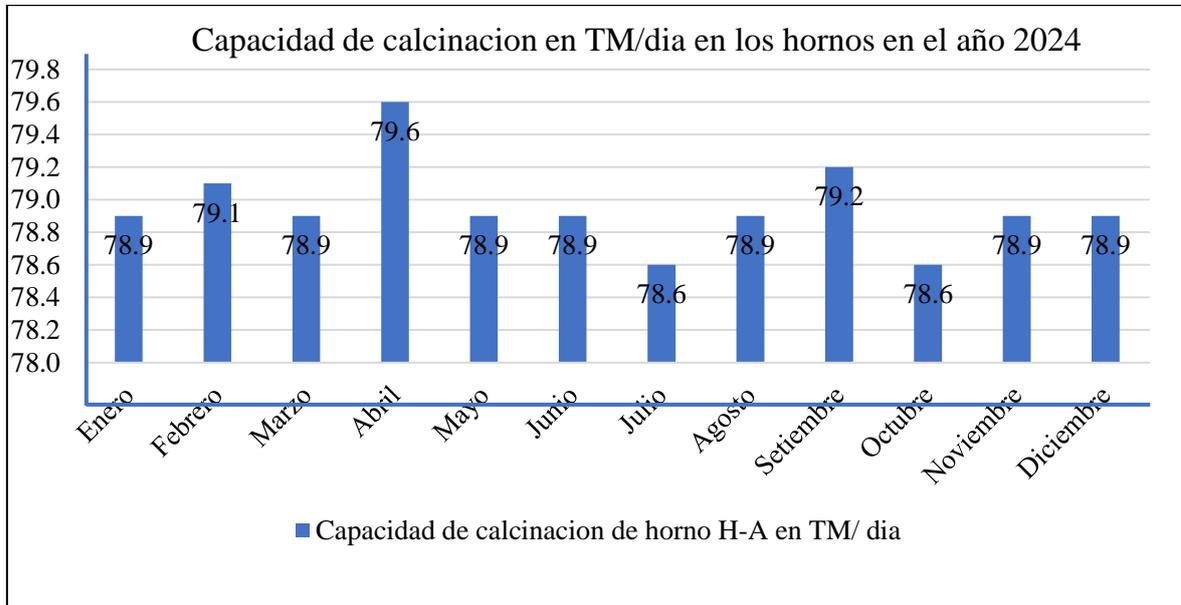
La capacidad de calcinación óptima de los hornos cuatro hornos a considerar H-A, H-B, H-C y H-D se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

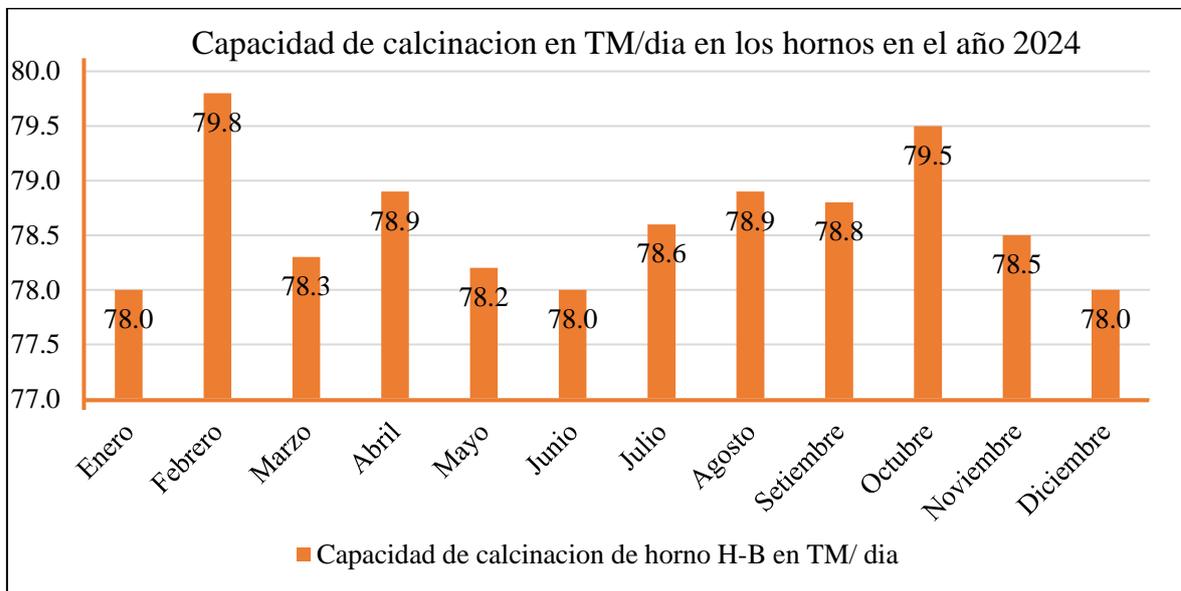
Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno en cantera El Zasal

<b>Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno H-A y H-B en cantera El Zasal</b>	
<b>Horno</b>	<b>Capacidad de calcinación óptima tn/día de caliza</b>
Horno H-A tn/día de caliza	80.00
Horno H-B tn/día de caliza	80.00
Horno H-C tn/día de caliza	80.00
Horno H-D tn/día de caliza	80.00
Capacidad de calcinación Óptima de hornos A y B	320.00

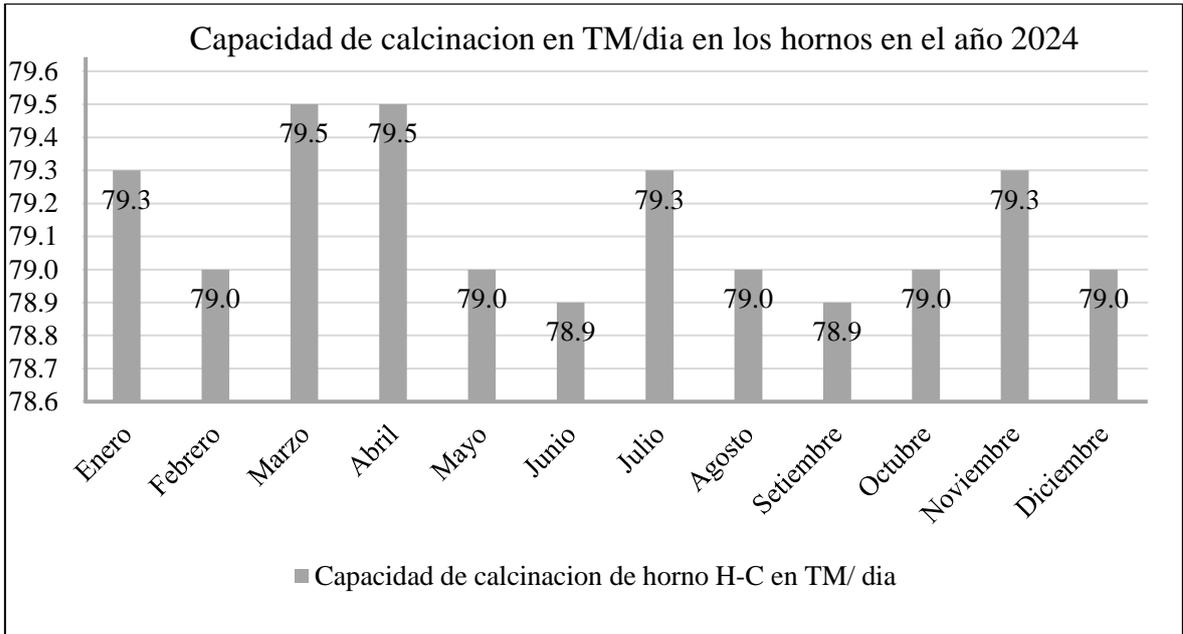
De acuerdo a los resultados de optimización de la capacidad de calcinación de los cuatro hornos es de 80tn/día, pero se recomienda no sobrepasar el límite de capacidad del horno. En ese sentido podemos notar que del mes de enero a diciembre la capacidad por horno fue menor de 160tn, resultando optimo al plan de minado.



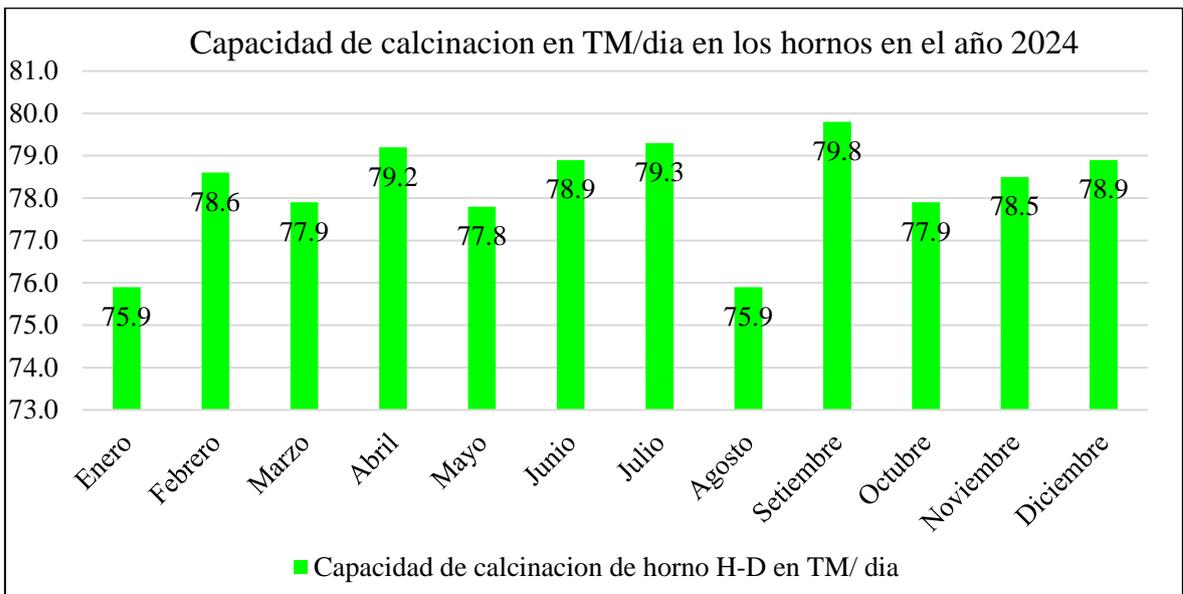
**Figura 22.** Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno H-A.



**Figura 23.** Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno H-B.



**Figura 24.** Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno H-C.



**Figura 25.** Capacidad de calcinación óptima en tn/día en horno H-D.

Esta capacidad de calcinación es el resultado de las pruebas realizadas en los meses de Julio a diciembre de 2024, la optimización del plan de minado en la cantera El Zasal de Bambamarca se plantea para una producción de 300 tn/día.

#### 4.5.5. Optimización capacidad de calcinación en hornos H-A y H-B.

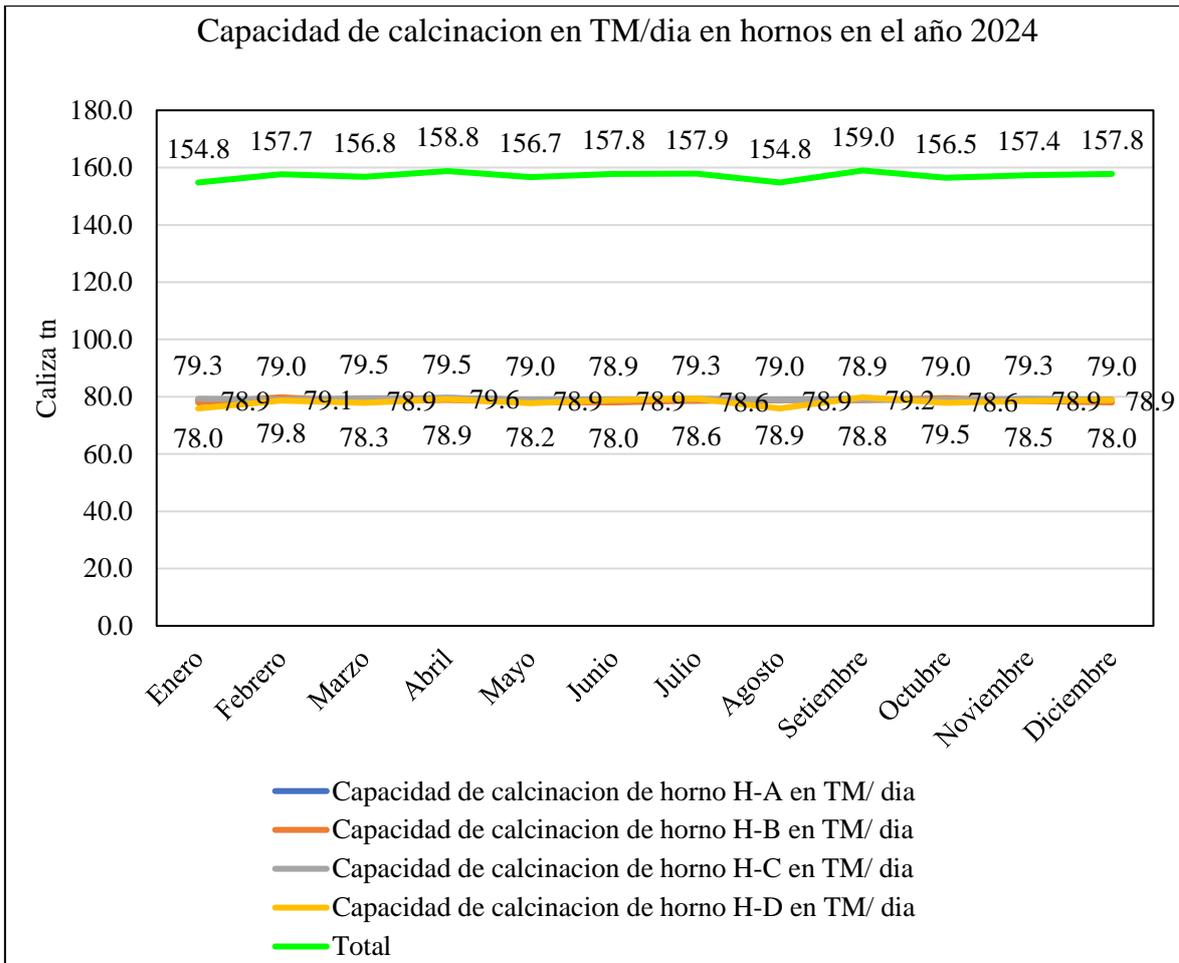
Para la optimización de plan de minado para una producción antigua del plan de minado de 100tn/día de caliza a 319tn/día de caliza para el nuevo diseño de mala a su vez el nuevo plan de minado se ha tomado un especial interés en la planta de calcinación considerando de que si la planta de calcinación no tiene una capacidad de calcinación suficiente puede generarse una producción excesiva de caliza, de allí surge la imperiosa necesidad de optimizar la capacidad de calcinación de los dos hornos con que cuenta la empresa a 80m aproximadamente desde el centro de operaciones mineras.

Los resultados de la evaluación y el periodo de prueba de enero a diciembre de 2024 se pueden observar en la Tabla 12 respectivamente.

**Tabla 12.**

Estadística de capacidad de calcinación en tn/día en horno H-A y horno H-B en el año 2024.

<b>Estadística de capacidad de calcinación en TM/día de los hornos en el año 2024</b>					
<b>Mes</b>	<b>H-A en TM/ día</b>	<b>H-B en TM/ día</b>	<b>H-C en TM/ día</b>	<b>H-D en TM/ día</b>	<b>Total</b>
<b>Enero</b>	78.9	78.0	79.3	75.9	154.8
<b>Febrero</b>	79.1	79.8	79.0	78.6	157.7
<b>Marzo</b>	78.9	78.3	79.5	77.9	156.8
<b>Abril</b>	79.6	78.9	79.5	79.2	158.8
<b>Mayo</b>	78.9	78.2	79.0	77.8	156.7
<b>Junio</b>	78.9	78.0	78.9	78.9	157.8
<b>Julio</b>	78.6	78.6	79.3	79.3	157.9
<b>Agosto</b>	78.9	78.9	79.0	75.9	154.8
<b>Setiembre</b>	79.2	78.8	78.9	79.8	159.0
<b>Octubre</b>	78.6	79.5	79.0	77.9	156.5
<b>Noviembre</b>	78.9	78.5	79.3	78.5	157.4
<b>Diciembre</b>	78.9	78.0	79.0	78.9	157.8
<b>Total</b>	947.4	943.5	949.7	938.6	1886.0



**Figura 26.** Estadísticas de calcinación óptima en tn/día en horno H-A y horno H-B.

#### 4.5.6. Ganancias logradas con el plan de minado de la malla antigua

Para la producción 100tn/día de óxido de calcio de la cantera “El Zasal” los costos de operación se estiman en US\$ 23719.15, con ingresos mensuales de US\$ 33398.00. Obteniéndose una rentabilidad de US\$ 9678.85 por mes.

#### 4.5.7. Ganancias logradas con el plan de minado de la malla propuesta (nueva).

Para 319tn/día para un mes es de óxido de calcio de la cantera “El Zasal” los costos de operación se estiman en US\$ 46329.981 con ingresos mensuales de US\$ 69820.00 obteniéndose una rentabilidad de US\$ 13811.169 por mes.

Si se compara con la producción de un año sin optimización y optimizada no da un incremento la ganancia con una rentabilidad de US\$ 165676.00.

#### 4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la investigación se usaron procedimientos para diseñar la malla considerando el macizo roco al igual que Murcia (2020), para diseñar mallas de voladura, se consideró la estabilidad temporal y final de los frentes de explotación, a través de un caso práctico en la cantera Piedra del Sol. Se llevaron a cabo tres voladuras de prueba con distintas metodologías y dos adicionales para evaluar la estabilidad de los bancos de explotación, complementadas con un análisis cinemático del frente. Como resultado, se elaboró de 13 pasos para diseñar mallas de voladura con parámetros de estabilidad, destacando la importancia del análisis cinemático en la determinación de la estabilidad de los taludes tras la voladura, cuyo éxito depende de un correcto levantamiento del macizo rocoso antes de realizar los cálculos.

En nuestra investigación nos resultó una malla de 10m por 4m con el método de Lopez y Miranda (2022), analiza la efectividad de diferentes mallas de voladura. La antigua malla (4.5 m x 4.8 m) y el uso de explosivo HA 46 generaban un producto muy fragmentado, con un 90.69% de material menor a  $\frac{3}{4}$ ", que se perdía en lugar de ser utilizado. Al modificar la malla a 5.5 m x 6.5 m y aumentar el diámetro de perforación a  $9 \frac{7}{8}$ " con el explosivo MEQ 73, se logró un tamaño de fragmento mayor, con el 68.42% de los fragmentos entre 12.33" y 14.05".

Al igual que Hanco (2022) se determinó que la roca predominante era de clase III (roca media) según la clasificación RMR de Bieniawski. Se diseñó una malla triangular con un búrden de 2.8 m, espaciamiento de 3.3 m, diámetro de perforación de 10.16 cm y factor de carga de 0.31 kg/m<sup>3</sup>. La secuencia de voladura se realizó en salidas simultáneas por filas. La evaluación de la fragmentación, usando el modelo Kuz Ram, mostró que más del 64% de la roca tenía una granulometría mayor a 30 cm y menos del 10% era menor a 7 cm. Que el diseño de la malla de perforación y voladura fue satisfactorio, logrando una fragmentación mayormente uniforme en la explotación de la cantera.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

La implementación de una nueva malla de perforación en la cantera de caliza El Zasal genera un impacto positivo en la mejora del plan de minado, al optimizar la fragmentación del macizo rocoso de calidad regular (RMR 60), aumentar el volumen de roca volada de 65 m<sup>3</sup> a 207.44 m<sup>3</sup> y elevar la producción diaria a 319 toneladas. Este rediseño técnico, con taladros más profundos y mayor número de perforaciones, reduce los costos en 17% y mejora significativamente la rentabilidad del proyecto.

La caracterización de macizo rocoso de las calizas resulta un RMR 60, es una roca de calidad regular con una densidad en banco 2.52tn/m<sup>3</sup> y suelta de 1.54tn/m<sup>3</sup>, la resistencia compresiva uniaxial varía de 50.34 a 95.55MPa, las reservas minerales de cantera de caliza el Zasal de la zona 2 es de 4418842.93tn distrito.

El nuevo diseño de malla para el banco se incrementando en la profundidad del taladro de 1.20 m a 1.70 m, el número de taladros de 8 de la antigua, a 18 número de taladros, adicionando aún 60% de Anfo, en la voladura la mallas en el antiguo diseño resulta de 65m<sup>3</sup> y del diseño de malla propuesta de resulta 207.44 m<sup>3</sup>, obteniendo para el diseño de malla propuesto un óptimo aumento del material fragmentado para el pan de minado.

La propuesta de una nueva malla de perforación para la cantera de caliza El Zasal optimiza el proceso de extracción, porque incrementa la producción de 200tn/día 319tn/día, logrando incrementar las ganancias de US\$ 165 676.00., obteniendo un coto de 17% menor.

La nueva malla de perforación propuesta para la cantera de caliza El Zasal consiste en un diseño optimizado que incrementa la profundidad de los taladros de 1.20 m a 1.70 m, y aumenta su número de 8 a 18 por banco. Este diseño incorpora un 60% de ANFO como explosivo principal, lo cual mejora la fragmentación del macizo rocoso calizo clasificado con un RMR de 60. Como resultado, el volumen de roca fragmentada se incrementa de 65 m<sup>3</sup> (diseño antiguo) a 207.44 m<sup>3</sup>, lo que permite una mayor eficiencia en la operación minera y una mejor adecuación del material extraído al plan de minado.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda extender la implementación de la malla de perforación propuesta a otras zonas de la cantera, con el fin de evaluar su comportamiento en distintos frentes de trabajo y determinar su efectividad en diversas condiciones geológicas. Esto permitirá validar su aplicabilidad a mayor escala y optimizar progresivamente la producción de manera continua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abran G, & Juan C. (2002).** Diseño de un plan de explotación yacimiento de caliza, cantera la gamarra Magdaleno. Aragua, Venezuela.
- Ackoff L, R. (2010).** Un concepto de planificación de empresas. Mexico: Limusa Wiley.
- Alfaro Sulca, R. (2016).** Diseño de malla de perforación y voladura en la cantera sur para producción de roca escollera en la Cía minera el Brocal Cerro de Pasco. Pasco, Peru.  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/3477/Alfaro\\_Sulca\\_Rene.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/3477/Alfaro_Sulca_Rene.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- AtlasCopco. (2018).** Secoroc COP 54 Gold Express. (A. C. CMT, Ed.) Obtenido de <https://carmina.cz/res/pdf/COP54Goldlet%C3%A1k.pdf>
- Br Moya, F. j. (2015).** Verificación de la opción de producción más favorable a partir de diseños de explotación a largo plazo del frente 02, cantera carayaca ubicada en tacagua, distrito capital. Tacagua, Vanazuela.  
<http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/13769/1/T.E.G.%20Freddy%20Moya%202015.pdf>
- Caguana Gutierrez, A. F., & Tenorio Tupacyupanqui, M. P. (2013).** Optimizacion de los parametros de perforacion y voladura en la cantera Las victorias. Cuenca, Ecuador.  
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4390/3/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Carranza Tello, V. (2017).** Colibrí más grande del mundo vive el Bosque de Piedra de Bambamarca. Colibrí más grande del mundo vive el Bosque de Piedra de Bambamarca, pág. 2. Obtenido de <https://radiocoremarca.com/colibri-mas-grande-del-mundo-vive-bosque-piedra-bambamarca/>
- Cartaya Pire, M. (2006).** Caracterizacion geoemcanica de macizos rocosos en obras subterranas de la region oriental de pais. Cuba: Departamento de Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico.  
<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/155/153>
- Choqueña. (2017).** Optimización de la fragmentación de roca mediante las características geo mecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos.
- Correa Rojas, D. A., & Santillán Llovera, L. (2016).** Factibilidad económica de la explotación de roca caliza para producir óxido de calcio en la concesión minera no metálica José Gálvez, Bambamarca, Cajamarca. Cajamarca.

- <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/7578/Correa%20Rojas%2c%20Donny%20Alexander%20-%20Santillan%20Llovera%2c%20Lennin.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Correa, P. L. (2017).** Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos D, E y F en la Mina de Caliza el Tesoro, Contrato de Concesión ILI-16111 ubicada en la vereda las Caleras del municipio de Nobsa-Boyacá. Nobsa-Boyacá. <https://repositorio.uptc.edu.co/items/cde6f947-ff60-46e6-af28-d08a4fe63521>
- Exsa. (2019).** Desplazamiento en voladura. Obtenido de <http://exsa.net/>
- Gonzalez de Vallejo, L. I. (2002).** Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educacion. [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod\\_resource/content/1/Livro%202.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf)
- Hanco Cruz, R. S. (2022).** Diseño de malla de perforación y voladura mediante la clasificación del macizo rocoso para uniformizar la fragmentación en la explotación de la Cantera Oscollo - Espinar. CUSCO. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18707>
- Herrera Herbert, J. (2006).** Metodos de Minería a Cielo Abierto. Madrid, Madrid, España. [https://oa.upm.es/10675/1/20111122\\_metodos\\_mineria\\_a\\_cielo\\_abierto\\_2.pdf](https://oa.upm.es/10675/1/20111122_metodos_mineria_a_cielo_abierto_2.pdf)
- Herrera Herrera, B. (1987).** Elementos de fotogrametría uso de materiales aerofotográficos ( 1a edición ed.). Mexico: Limusa Universidad Autónoma Chapingo.
- J Ventrix, J. (2014).** Funciones de una empresa minera.
- Jessop, J. (2016).** Optimización de la explotación minera. (a. A. Ventyx, Ed.) ABB, 5. [https://library.e.abb.com/public/527e87d38176d987c1257a7e0036aaa2/39-43%203m210\\_FS\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/527e87d38176d987c1257a7e0036aaa2/39-43%203m210_FS_72dpi.pdf)
- Lehmann, G. (1975).** Fotogrametría. España: Editores Tecnicos Asociados S. A.
- Lopes Jimeno, C. (1990).** Manual de perforacion y voladura de rocas. España. <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2021/07/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas.pdf>
- Lopez Eugenio, C. S., & Miranda Mori, N. (2022).** Diseño de la malla de perforación y voladura para optimizar la fragmentación de la roca caliza en la cantera claudina 8, cajamarca 2021”. Cajamarca, Peru. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/32499/Lopez%20Eugenio%2c%20Carlos%20Saul-Miranda%20Mori%2c%20Nicolas.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Mendoza Muñoz, N. (2014).** Optimización de la voladura controlada aplicando un modelo matemático en la unidad minera Paraíso-Ecuador. Ecuador. [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1339/TESIS\\_%20OPTIMIZACION%20DE%20LA%20VOLADURA%20CONTROLADA%20APLICANDO%20UN%20MODELO%20MATEMATICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1339/TESIS_%20OPTIMIZACION%20DE%20LA%20VOLADURA%20CONTROLADA%20APLICANDO%20UN%20MODELO%20MATEMATICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Morales Céspedes, W. (2019).** Guía en geología aplicada. Cajamarca.
- Munier, N. (2008).** Planeamiento de minado. España.
- Muñoz, A., Roa, C. A., & Nieto, D. (2015).** Optimización del funcionamiento de un taladro track drill usado en obras civiles. Colombia, Colombia: Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales (Universidad ECCI).
- Murcia Caro, L. P. (2020).** Procedimiento para el diseño de mallas de voladura en explotación de canteras a cielo abierto con base en la estabilidad temporal y final de los bancos de producción. Bogotá, Colombia. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21139?show=full>
- Ocsa Mellado, M., & Barreda Yabar, R. V. (2022).** Aplicación de drone para elaborar modelos digitales en frente de minado, Unidad Minera Las Bambas. Cusco.
- Olaya Ferrero, V. (2004).** Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1BcsUoJY0gARbWw1JgBf-zHxA3p6YzJz/view>
- Palacios Berrospi, L. B. (2019).** Diseño de malla de perforación - voladura y extracción de rocas para escolleras – Cantera Christopher – Carabayllo – 2019. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5653>
- Pierola Vera, D. (2017).** Optimización del plan de minado de cantera de caliza la Unión distrito de Baños del Inca-Cajamarca. Puno, Perú. [http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/5634/Pi%C3%A9rola\\_Vera\\_Demetrio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/5634/Pi%C3%A9rola_Vera_Demetrio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salazar Cabrejos, R. E., & Arango Retamozo, S. M. (2022).** Diseño de malla de perforación y voladura para mejorar la fragmentación de la roca - Cantera El Pedregal Reque. Cliclayo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/132946?show=full>
- SENA. (1986).** Perforación en bancos de perforación. Servicio Nacional de Aprendizaje Reginal Boyaca, 107.

- Senamhi. (2024).** Clima - Mapa Climático del Perú. (S. -S. Central, Ed.) Mapa Climático del Perú. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Siguenza Amichis , F. (2010).** La extracción del mármol en las canteras de macael. 10. [https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-asi-c2/\\$File/asi-c2.pdf](https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-asi-c2/$File/asi-c2.pdf)
- Velasquez, M. G. (2009).** Planeamiento de Minado.
- Vidal. (2012).** Topografía en cantera. Mexico. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223518176004.pdf>
- Vidal Loli, M. A. (2010).** Estudio del cálculo de flota de camiones para una operación minera a cielo abierto. Lima, Peru. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/534>
- Yepes Piqueras, V. (2023).** Coeficiente de esponjamiento en movimiento de tierras. Valencia, España. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/03/01/coeficiente-de-esponjamiento-en-movimiento-de-tierras/>

## **ANEXOS**

**ANEXO 01:** Tabla ábaco de clasificación geomecánica de Bieniawski 1989.

**ANEXO 02:** Tabla evaluación de calidad de roca según RQD (Deere et al., 1970).

**ANEXO 03:** Medidas de seguridad para ingreso a la labor.

**ANEXO 04:** Construcción del horno de la cantera el Zasal

**ANEXO 05:** Empaquetado de óxido de calcio.

**ANEXO 06:** Plano 01 – Ubicación.

**ANEXO 07:** Plano 02 – Geológico.

**ANEXO 08:** Plano 03 – Satelital.

**ANEXO 09:** Plano 04 – Zona 2 Fase 2.

**ANEXO 10:** Plano 05 – Transferencia de energía - malla antigua.

**ANEXO 11:** Plano 06 – Diseño de malla antigua.

**ANEXO 12:** Plano 07 – Transferencia de energía - malla nueva.

**ANEXO 13:** Plano 08 – Diseño de malla nueva.

**Anexo 1.** Tabla Ábaco de clasificación geomecánica de Bieniawski 1989.

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)										
Parámetros de clasificación										
1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)			
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1	
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %			
	Puntuación			20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m			
	Puntuación			20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			
		Puntuación		6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm			
		Puntuación		6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta			
		Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min			
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5			
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo			
		Puntuación		15	10	7	4	0		
Corrección por la orientación de las discontinuidades										
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables				
Puntuación	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12				
	Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25				
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60				
Clasificación										
Clase	I	II	III	IV	V					
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala					
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20					

**Fuente:** Gonzales de Vallejo, 2004.

**Anexo 2.** Tabla evaluación de calidad de roca según RQD (Deere et al., 1970).

### Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989) (Continuación)

#### Características geotécnicas

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2,5 m de vano	30 minutos con 1 m de vano
Cohesión	> 4 Kp/cm <sup>2</sup>	3-4 Kp/cm <sup>2</sup>	2-3 Kp/cm <sup>2</sup>	1-2 Kp/cm <sup>2</sup>	< 1 Kp/cm <sup>2</sup>
Ángulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

#### Orientación de las discontinuidades en el túnel

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20°. Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento		Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

### Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy Buena	100-81	> 4 kg/cm <sup>2</sup>	> 45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm <sup>2</sup>	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm <sup>2</sup>	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm <sup>2</sup>	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm <sup>2</sup>	< 15°

**Fuente:** Gonzales de Vallejo, 2004.

Anexo 3. Medidas de seguridad para ingreso a la labor.

# PROTOCOLO DE INGRESO



**PROHIBIDO EL INGRESO A PERSONAL NO AUTORIZADO**

**PARA INGRESAR DEBERÁ CUMPLIR CON LAS SIGUIENTES NORMAS**

**OBLIGATORIO**



**SOLICITAR AUTORIZACIÓN DE INGRESO A SSO ZASAL - CANAL 2**

SI NO CUENTA CON RADIO ACERCARSE A GARITA PARA QUE LO HAGAN POR USTED

**OBLIGATORIO**

PARA EL INGRESO A ZONA DE OPERACIONES O A PLANTA DE PRODUCCIÓN DEBES ESPERAR SER GUIADO POR PERSONAL DE ZASAL



**USO OBLIGATORIO DE CASCO Y LENTES DE SEGURIDAD**



**ES OBLIGATORIO EL USO DE CALZADO DE SEGURIDAD**

**Anexo 4.** Construcción del horno de la cantera el Zasal.



**Anexo 5.** Empaquetado de óxido de calcio.

