

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Tesis

Optimización de la voladura con la iniciación no electrónica para el control de las vibraciones
en los tajos B1 y B2, de la Unidad Minera Calcesur S. A. – Juliaca, 2025

Presentado por:

Marco Dinm Carrión Rojas

Rosinaldo Samuel Lima Aroni

Para optar el título de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

Optimización de la voladura con la iniciación no electrónica para el control de las vibraciones en los tajos B1 y B2, de la Unidad Minera Calcesur S. A. – Juliaca, 2025

Presentado por **Marco Dinm Carrión Rojas y Rosinaldo Samuel Lima Aroni**, para optar el título de Ingeniero de Minas

Sustentado y aprobado el 14 de agosto del 2026 ante el jurado evaluador:

Presidente:



Dr. Crisólogo Conza Ancaypuro

Primer miembro:



Mtro. Oscar Eugenio Álvarez Gamarra

Segundo miembro:



Mag. Agustín Pérez Quispe

Asesor:



Mtro. Dario Dante Sánchez Castillo



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD
N° 206-2026

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la tesis titulada: **Optimización de la voladura con la iniciación no electrónica para el control de las vibraciones en los tajos B1 y B2, de la Unidad Minera Calcesur S. A. - Juliaca, 2025**, Presentado por los bachilleres: **Marco Dinm Carrión Rojas y Rosinaldo Samuel Lima Aroni**; para optar el Título de **Ingeniero de Minas**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud ACEPTABLE de **(15%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 20 de julio del 2026



Dr. Wilfredo J. Calsín
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN

C. c.
Archivo
WHC/ DUI-FI
Yovana/sec
REG. N° 729



Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi alma máter Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac y con mayor ahínco a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, cuyas aulas me acogieron durante mi formación profesional de la misma forma el agradecimiento a todos mis docentes que impartieron sus conocimientos para poder enfrentar el mundo competitivo laboral.

Rosinaldo Samuel Lima Aroni

Manifiesto mi profundo agradecimiento a mi alma máter, la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, y de manera especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, por haberme acogido y brindado la formación necesaria para mi desarrollo profesional.

Asimismo, agradezco a mis asesores y docentes por compartir sus conocimientos, orientación y experiencia, contribuyendo de manera significativa a mi formación y al desarrollo de este trabajo. A mis amigos, por su apoyo, compañía y motivación durante este proceso. A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

Marco Dinm Carrión Rojas



Dedicatoria

El presente trabajo dedico a mi linda madre, padre, hermanos y hermanas por ser quienes me formaron y me dieron valores para ser la persona que actualmente soy, a pesar de las dificultades de la vida, siempre estuvieron con su apoyo incondicional durante mi etapa universitaria más aun durante la elaboración de este trabajo de investigación.

Rosinaldo Samuel Lima Aroni

Dedico este trabajo a mi familia, por inculcarme los valores que han guiado mi camino y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. De manera especial, a mi pareja y a mis hijos, quienes con su amor, motivación y constante respaldo me impulsaron a seguir adelante en cada desafío. Este logro también es de ellos, pues su apoyo fue fundamental para alcanzar esta meta.

Marco Dinm Carrión Rojas



Optimización de la voladura con la iniciación no electrónica para el control de las vibraciones
en los tajos B1 y B2, de la Unidad Minera Calcesur S. A. – Juliaca, 2025

Línea de investigación: Minería, procesamiento de minerales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	6
1.3 Justificación de la investigación	6
1.4 Ubicación y contextualización	7
1.4.1 Ubicación	7
1.4.2 Accesibilidad	7
1.4.3 Geología local estructural	9
1.4.4 Clasificación de los suelos	12
1.4.5 Contextualización	14
CAPÍTULO II	16
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
2.1 Objetivos de la investigación	16
2.1.1 Objetivo general	16
2.1.2 Objetivos específicos	16
2.2 Hipótesis de la investigación	16
2.2.1 Hipótesis general	16
2.2.2 Hipótesis específicas	17
2.3 Operacionalización de variables	18
CAPÍTULO III	19
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	19
3.1 Antecedentes	19
3.1.1 Antecedentes internacionales	19
3.1.2 Antecedentes nacionales	20
3.2 Marco teórico	22
3.2.1 Características del Macizo Rocoso	22
3.2.2 Perforabilidad	24
3.2.3 Principio de perforación	26
3.2.4 Voladura	29
3.2.5 Explosivos	31



3.2.6	Mecanismo de fragmentación de la roca por explosivos	34
3.2.7	Costos unitarios	39
3.3	Definición de términos	41
CAPÍTULO IV		44
METODOLOGÍA		44
4.1	Tipo y diseño de la investigación	44
4.1.1	Tipo de investigación	44
4.1.2	Diseño de la investigación	44
4.2	Población y muestra	45
4.2.1	Población	45
4.2.2	Muestra	45
4.3	Procedimiento de la investigación	45
4.4	Material de investigación	46
4.5	Plan de tratamiento de datos	46
CAPÍTULO V		48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		48
5.1	Resultados	48
5.1.1	Trabajos de mecánica de rocas para la aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2	48
5.1.2	Iniciación no electrónica e incidencia en la reducción de los costos de voladura y productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2	60
5.1.3	Evaluación del control de vibraciones mediante la aplicación de la iniciación no electrónica en voladuras en los tajos B1 y B2	77
5.2	Discusión	83
CAPÍTULO VI		85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		85
6.1	Conclusiones	85
6.1.1	Conclusión general	85
6.1.2	Conclusiones específicas	86
6.2	Recomendaciones	86
6.2.1	Recomendación general	86
6.2.2	Recomendaciones específicas	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88
ANEXOS		91

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Ubicación en coordenadas UTM	7
Tabla 2 — Accesibilidad a la zona del proyecto	8
Tabla 3 — Muestreo de suelos (arcillas) del área de estudio	14
Tabla 4 — Clasificación de suelos	14
Tabla 5 — Operacionalización de variable	18
Tabla 6 — La Perforabilidad es inversamente proporcional a la resistencia de la compresión	23
Tabla 7 — Perforabilidad y desgaste de algunas rocas comunes	25
Tabla 8 — Resistencia uniaxial de la matriz rocosa	49
Tabla 9 — Características del macizo rocoso del tajo	50
Tabla 10 — Índice de calidad de la roca	51
Tabla 11 — Espaciado de las juntas	52
Tabla 12 — Descripción según la persistencia	53
Tabla 13 — Descripción según la apertura	54
Tabla 14 — Descripción según la rugosidad	54
Tabla 15 — Descripción según el relleno	54
Tabla 16 — Descripción según la intemperización	55
Tabla 17 — Descripción según la presencia de agua	56
Tabla 18 — Descripción según la orientación de las continuidades	56
Tabla 19 — Resumen del cálculo del RMR de los tajos	58
Tabla 20 — Ubicación dentro de la escala RMR	59
Tabla 21 — Parámetros de voladura electrónica	61
Tabla 22 — Costos unitarios iniciación electrónica	62
Tabla 23 — Costo por taladro – electrónica	62
Tabla 24 — Valores de la constante Kb	64
Tabla 25 — Parámetros de voladura no electrónica	66
Tabla 26 — Costos unitarios iniciación no electrónica	67
Tabla 27 — Costos unitarios iniciación no electrónica	67
Tabla 28 — Comparación técnico – económica	69
Tabla 29 — Comparación de sistemas de iniciación	76



Tabla 30 — Valores guía de velocidad pico de partícula (PPV) para diferentes tipos de edificaciones según la frecuencia de vibración	77
Tabla 31 — Límites de velocidad pico de partícula (PPV) y factores de distancia escalada para voladuras sin monitoreo sísmico	78
Tabla 32 — Resumen de comparación entre los sistemas de iniciación	82
Tabla 33 — Matriz de consistencia	92



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Mapa de ubicación	9
Figura 3 — Perforabilidad vs resistencia a la compresión	23
Figura 4 — Acción en el área periférico	33
Figura 5 — Acción de explosión de una carga	34
Figura 6 — Rotura radial como efecto de la onda de detonación a las paredes de un taladro	36
Figura 7 — Detonación de un taladro con cara libre	37
Figura 8 — Variación de la resistencia del macizo rocoso en relación entre la resistencia a compresión y el espaciado de las juntas	53
Figura 9 — Diseño de carga iniciación electrónica	60
Figura 10 — Diseño de carga de iniciación no electrónica	66
Figura 11 — Monitoreo de vibraciones con sismógrafo micromate	81
Figura 12 — Personal de voladura CALCESUR S.A	93
Figura 13 — Carguío de taladros con ANFO a granel	93
Figura 14 — Perforadora DTH Sandvik	94
Figura 15 — Equipo de perforación FlexiRoc D65	94
Figura 16 — Fanel dual y multiplicador Booster para el primado	95
Figura 17 — Emulsión encartuchada FAMESA S.A.C	95
Figura 19 — Equipo de sismógrafo Micromate Instantel para el monitoreo de vibraciones	96
Figura 18 — Fotografías de los bancos de producción tajo B1 y B2	96
Figura 20 — Carguío de taladros de producción de los tajos B1 y B2	97
Figura 21 — Acarreo de material volado de los tajos B1 y B2	97
Figura 22 — Certificado de calibración de sismógrafo Micromate	98
Figura 23 — Plano de isoleyes de los tajos B1 y B2	99

INTRODUCCIÓN

En la minería a cielo abierto, la voladura constituye una de las operaciones más relevantes para el arranque del macizo rocoso, debido a que de su adecuada ejecución depende la eficiencia de las etapas posteriores del ciclo minero, como la carga, el acarreo y el chancado. No obstante, este proceso genera impactos colaterales, siendo las vibraciones sísmicas uno de los principales factores a controlar, ya que pueden comprometer la estabilidad de los taludes, afectar estructuras cercanas y poner en riesgo la seguridad del personal, especialmente en macizos rocosos de calidad intermedia.

En este contexto, la Unidad Minera Calcesur S.A., ubicada en el distrito de Caracoto, provincia de San Román, región Puno, desarrolla sus operaciones en los tajos B1 y B2, donde el macizo rocoso presenta un $RMR = 49$, clasificándose como Clase III (regular), con estabilidad media, fracturamiento moderado y sensibilidad intermedia a las vibraciones. Esta condición geomecánica evidencia la necesidad de aplicar un adecuado control de la energía explosiva, a fin de optimizar el proceso de voladura y minimizar los efectos adversos generados durante la detonación.

Ante esta problemática, la aplicación del sistema de iniciación no electrónica se presenta como una alternativa técnica eficiente, ya que permite mejorar la secuencia de retardos y reducir la detonación simultánea de cargas, contribuyendo al control de las vibraciones. Asimismo, su implementación favorece la optimización del consumo de explosivos, evidenciado en la reducción del factor de carga de $0,428 \text{ kg/m}^3$ a $0,41 \text{ kg/m}^3$ y del factor de potencia de $0,194 \text{ kg/TM}$ a $0,19 \text{ kg/TM}$, manteniendo constante la producción de 140 m^3 y 308 TM por taladro. De igual manera, permite mejorar la eficiencia económica del proceso, reduciendo el costo por taladro de US\$70,35 a US\$46,05 (34,53 %) y el costo unitario de US\$0,503/ m^3 a US\$0,329/ m^3 .

En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo determinar de qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., Juliaca – 2025, evaluando además su incidencia en los costos de voladura y en la productividad de las operaciones. De esta manera, el estudio busca aportar técnicamente a la optimización de las operaciones



mineras, así como contribuir al desarrollo académico en el ámbito de la ingeniería de minas y al cumplimiento de los requisitos para la obtención del título profesional.



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la voladura mediante la aplicación de un sistema de iniciación no electrónica para controlar las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., ubicada en Juliaca, durante el año 2025. El estudio surgió debido a la necesidad de reducir los efectos de las vibraciones producidas por las voladuras, las cuales pueden afectar la estabilidad del macizo rocoso, la seguridad operacional y el desempeño de las labores mineras. La investigación fue de enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y de nivel explicativo, con un diseño preexperimental, en el que se compararon los resultados obtenidos antes y después de la implementación del sistema de iniciación no electrónica. Se evaluaron parámetros de diseño de voladura, como la secuencia de iniciación, los tiempos de retardo y la configuración de la malla de perforación y voladura. Asimismo, se monitorearon las vibraciones mediante la medición de la Velocidad Pico de Partícula (PPV), el comportamiento de la atenuación de las vibraciones en función de la distancia y el cumplimiento de los límites permisibles establecidos por la normativa técnica vigente. En este contexto, la aplicación del sistema de iniciación no electrónica se presenta como una alternativa técnica eficiente, ya que permite mejorar la secuencia de retardos y reducir la detonación simultánea de cargas, contribuyendo al control de las vibraciones. Asimismo, su implementación favorece la optimización del consumo de explosivos, evidenciado en la reducción del factor de carga de 0,428 kg/m³ a 0,41 kg/m³ y del factor de potencia de 0,194 kg/TM a 0,19 kg/TM, manteniendo constante la producción de 140 m³ y 308 TM por taladro. De igual manera, permite mejorar la eficiencia económica del proceso, reduciendo el costo por taladro de US\$70,35 a US\$46,05 (34,53 %) y el costo unitario de US\$0,503/m³ a US\$0,329/m³.

Palabras clave: Voladura, control de vibraciones, iniciación no electrónica, velocidad máxima de partículas, monitorización de vibraciones.



ABSTRACT

This research aimed to optimize blasting by implementing a non-electronic initiation system to control vibrations generated in pits B1 and B2 of the Calcesur S.A. Mining Unit, located in Juliaca, during 2025. The study arose from the need to reduce the effects of blasting vibrations, which can affect rock mass stability, operational safety, and mining performance. The research employed a quantitative, applied, and explanatory approach, with a pre-experimental design. Results obtained before and after the implementation of the non-electronic initiation system were compared. Blasting design parameters, such as initiation sequence, delay times, and the configuration of the drilling and blasting pattern, were evaluated. Vibrations were also monitored by measuring Peak Particle Velocity (PPV), the behavior of vibration attenuation as a function of distance, and compliance with the permissible limits established by current technical regulations. In this context, the application of the non-electronic initiation system is presented as an efficient technical alternative, since it allows for improved delay sequencing and reduces the simultaneous detonation of charges, contributing to vibration control. Furthermore, its implementation optimizes explosive consumption, evidenced by the reduction of the charge factor from 0.428 kg/m³ to 0.41 kg/m³ and the power factor from 0.194 kg/MT to 0.19 kg/MT, while maintaining a constant production of 140 m³ and 308 MT per drill hole. Similarly, it allows for improved economic efficiency of the process, reducing the cost per drill from US\$70.35 to US\$46.05 (34.53 %) and the unit cost from US\$0.503/m³ to US\$0.329/m³.

Keywords: *Blasting, vibration control, non-electronic initiation, peak particle velocity, vibration monitoring.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En las operaciones mineras a cielo abierto, la voladura constituye una etapa crítica para garantizar el arranque eficiente de la roca. Sin embargo, uno de los principales efectos indeseados de esta operación son las vibraciones sísmicas generadas por la detonación de los explosivos, las cuales pueden comprometer la seguridad del personal, la estabilidad de las estructuras cercanas y generar impactos ambientales que requieren control.

En la Unidad Minera Calcesur S.A., ubicada en Juliaca, las operaciones en los tajos B1 y B2 presentan la necesidad de mejorar el control de estas vibraciones sin comprometer la fragmentación del material ni incrementar los costos operativos. Actualmente, la utilización de sistemas electrónicos de iniciación de voladuras ha mostrado limitaciones en los costos para reducir de manera eficiente las vibraciones y optimizar la productividad, lo que genera la necesidad de aplicar alternativas tecnológicas más seguras y rentables.

En este contexto, la implementación de la iniciación no electrónica se plantea como una solución viable, ya que permite mayor precisión en los tiempos de retardo, mejor control en la secuencia de detonación y, por ende, una disminución significativa de las vibraciones generadas. No obstante, aún persiste la interrogante respecto a la eficacia real de esta tecnología en las condiciones específicas de los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., tanto en términos de seguridad y control de vibraciones, como en su incidencia en los costos de voladura y la productividad de las operaciones mineras.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar las vibraciones generadas en el Tajo B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025?



1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo se realizarán los trabajos de mecánica de rocas para aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025?
- ¿En qué medida la implementación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras incide en la optimización de los costos de voladura y la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025?
- ¿De qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica contribuye al control de las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025?

1.3 Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica debido a la necesidad de optimizar las operaciones de perforación y voladura en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., mediante la aplicación de un sistema de iniciación no electrónica que permitió mejorar los resultados operacionales y reducir los efectos adversos generados por efecto de las vibraciones en las voladuras. En la actualidad, las vibraciones producidas durante las detonaciones constituyen uno de los principales factores que afectan la estabilidad del macizo rocoso, la seguridad de las operaciones y la eficiencia del proceso de arranque de roca, por lo que resulta necesario evaluar alternativas que permitan su adecuado control.

Desde el punto de vista técnico, la investigación permitió realizar una caracterización geomecánica del macizo rocoso mediante trabajos de mecánica de rocas, proporcionando información relevante para el diseño y aplicación de secuencias de iniciación no electrónica adecuadas a las condiciones geológicas y geotécnicas presentes en los tajos B1 y B2. Asimismo, contribuyó a determinar la influencia de este sistema de iniciación sobre los niveles de vibración generados durante las voladuras, favoreciendo un mejor control de los parámetros de diseño y ejecución.



Desde la perspectiva económica, el estudio permitió evaluar la incidencia de la iniciación no electrónica en la optimización de los costos de voladura, identificando posibles reducciones en el consumo de explosivos, accesorios de voladura y costos asociados a la operación. Del mismo modo, se analizará su efecto sobre la productividad de las operaciones mineras, considerando aspectos como la fragmentación obtenida, el rendimiento de carguío y acarreo, y la eficiencia global del proceso productivo.

En el ámbito práctico, los resultados de la investigación proporcionaron información confiable para la toma de decisiones en la Unidad Minera Calcesur S.A., permitiendo establecer criterios técnicos para la implementación de sistemas de iniciación no electrónica orientados a mejorar el desempeño operacional y la sostenibilidad de las actividades mineras.

Finalmente, la investigación adquiere relevancia académica porque generó conocimientos aplicados sobre el uso de sistemas de iniciación no electrónica en minería a cielo abierto, constituyendo una referencia para futuras investigaciones relacionadas con la optimización de voladuras, el control de vibraciones y la mejora de la productividad minera.

1.4 Ubicación y contextualización

1.4.1 Ubicación

La Unidad Minera Calcesur S.A. se encuentra ubicada en el distrito de Caracoto, provincia de San Román, departamento de Puno, en las cercanías de la ciudad de Juliaca, a una altitud promedio de 4000 m.s.n.m.

Tabla 1 — Ubicación en coordenadas UTM

Este	Norte	Zona
375200	8276700	19 L
FUENTE: Elaboración propia.		

1.4.2 Accesibilidad

La Unidad Minera Calcesur S.A., ubicada en el distrito de Caracoto, provincia de San Román, región Puno, cuenta con accesos viales adecuados desde las principales ciudades del sur del país.

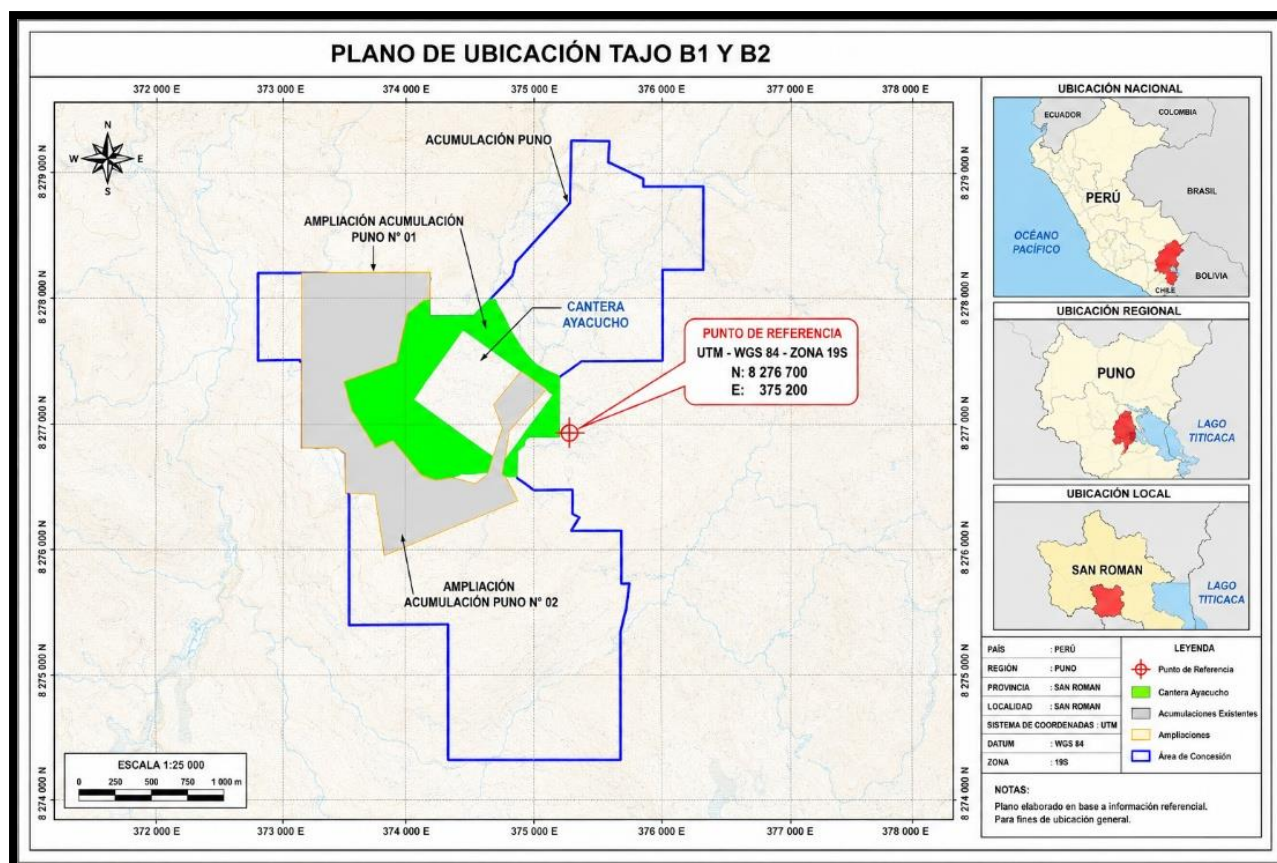
Desde la ciudad de Abancay, el acceso se realiza por vía asfaltada a través de la Carretera Interoceánica Sur, recorriendo aproximadamente es de 200 km hasta Cusco en un tiempo aproximado de 5 horas y 20 minutos, y posteriormente 343 km hasta Juliaca en 5 horas y 30 minutos. Desde Juliaca, se continúa hacia Caracoto por una vía asfaltada de 10 km (18 minutos de recorrido).

Desde Caracoto, se accede a la Planta Calcesur mediante una vía afirmada de 1,8 km (10 minutos), y finalmente hacia el Tajo B1 y B2, también por vía afirmada, con una distancia de 9,8 km y un tiempo estimado de 30 minutos.

En total, el recorrido desde Abancay hasta los tajos operativos comprende una distancia aproximada de 564,6 km, con un tiempo total de viaje de 11 horas y 30 minutos por vía terrestre. Este acceso garantiza la adecuada comunicación y transporte de personal, insumos y materiales necesarios para el desarrollo de las operaciones mineras.

Tabla 2 — Accesibilidad a la zona del proyecto

Vía terrestre				
Origen	Destino	Vía	Tiempo (h)	Distancia (Km)
Abancay	Cusco	Asfaltada	5h 20min	200
Cusco	Juliaca	Asfaltada	5h 30min	343
Juliaca	Caracoto	Asfaltada	0h 18min	10
Caracoto	Planta	Afirmada	0h 10min	1,8
Planta	Tajo B1 y B2	Afirmada	0h 30min	9,8
Total:			11h 30min	564,6
FUENTE: Elaboración propia.				



FUENTE: Plan de minado calcesur, 2025

Figura 1 — Mapa de ubicación

1.4.3 Geología local estructural

La caracterización geológica del área de estudio se realizó tomando como referencia el mapa geológico base proporcionado por Calcesur S.A., a partir del cual se efectuó la elaboración y digitalización de los mapas geológico y estructural correspondientes al área de los tajos B1 y B2. En el área de estudio se reconocen principalmente facies de naturaleza carbonatada, diferenciadas de acuerdo con sus características litológicas y litoestratigráficas.

Las unidades identificadas corresponden a caliza alta, caliza dolomítica, caliza baja y marga, denominadas en el estudio como Caliza Packstone, Dolomía Calcárea y Caliza Margosa, según sus características composicionales y texturales. Estas unidades presentan rasgos litoestratigráficos particulares y una expresión morfológica diferenciable en campo, condicionando las características y el comportamiento del macizo rocoso en el área de explotación.

La distribución de estas unidades litológicas constituye un factor relevante para la caracterización geomecánica de los tajos B1 y B2, debido a que las variaciones litológicas pueden influir en las propiedades del macizo rocoso y, consecuentemente, en el comportamiento de los taludes y en las condiciones de perforación y voladura.

1.4.3.1 Caliza Packstone

Durante la caracterización geológica realizada en el área de estudio, se identificó la presencia de Caliza Packstone, la cual fue reconocida como una caliza de alta ley. En campo, esta unidad litológica presentó un relieve abrupto y de características cársticas, con laderas empinadas y un marcado grado de fracturamiento.

Los afloramientos de esta litología fueron observados principalmente en la parte superior de la secuencia estratigráfica, donde presentaron tonalidades que variaron entre gris oscuro y gris claro. A partir de las características litológicas y de los resultados de los estudios petrográficos considerados para la caracterización del área, se determinó que esta unidad correspondió a una Caliza Packstone. Estas características permitieron reconocerla y diferenciarla de las demás unidades carbonatadas presentes en el área de estudio.

1.4.3.2 Caliza Dolomítica

Presenta un relieve moderadamente abrupto y de características cársticas. Sus afloramientos fueron reconocidos tanto en la base como en el tope de la secuencia estratigráfica, así como en zonas de transición hacia las calizas Mudstone y Packstone.

En campo, esta unidad litológica presentó una tonalidad característica pardo amarillenta, atribuida a la presencia de limos que se encontraban tanto en la matriz de la roca como en el relleno de las oquedades y fracturas. Estas características permitieron diferenciarla de las demás unidades carbonatadas presentes en el área de estudio. De acuerdo con los resultados de los estudios petrográficos considerados para la caracterización, esta litología fue denominada Dolomía Calcárea.

1.4.3.3 Caliza Mudstone

Considerada Caliza de baja ley. Esta unidad presentó un relieve suave y homogéneo, formando laderas de pendiente baja. En campo, se observó que generalmente se encontraba estratificada y presentaba venilleo de calcita. En sectores donde se evidenció un mayor grado de fracturamiento, la roca se presentó en forma de bloques subangulosos sueltos. Los afloramientos de esta unidad fueron reconocidos principalmente en zonas de contacto transicional con las Calizas Packstone y las Dolomías Calcáreas. Asimismo, dentro de esta unidad se diferenciaron dos secuencias litológicas claramente marcadas: una correspondiente a caliza gris oscura de carácter bioclástico y otra constituida por caliza gris clara con presencia de extraclastos limoarcillosos.

De acuerdo con los resultados de los estudios petrográficos considerados para la caracterización del área, esta unidad litológica fue denominada Caliza Mudstone. Las características observadas permitieron diferenciar esta litología de las demás unidades carbonatadas presentes en el área de estudio y establecer su distribución dentro de la secuencia estratigráfica.

1.4.3.4 Caliza Margosa

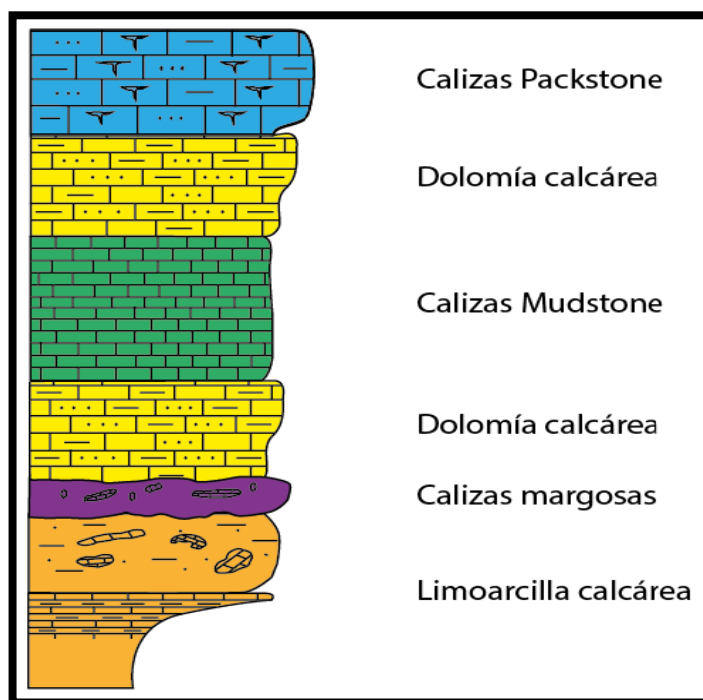
Presentan relieve brechado y craquelado, con una textura predominantemente pulverulenta. En campo, se observó la presencia de contaminación por arcillas blanquecinas, así como venilleo de calcita asociado a la masa rocosa. Esta unidad desarrolló principalmente laderas de pendiente suave, evidenciando características morfológicas diferenciables respecto a las demás unidades carbonatadas.

Los afloramientos de la Caliza Margosa se encontraron generalmente asociados a las secuencias limoarcillosas de la base de la columna estratigráfica, mientras que hacía niveles superiores se observó que subyacía a las Dolomías Calcáreas y a las Calizas Packstone. Esta disposición permitió establecer su posición relativa dentro de la secuencia estratigráfica del área de estudio y reconocer su relación con las demás unidades litológicas presentes en los tajos B1 y B2.

1.4.3.5 Limoarcilla Calcárea

En la caracterización geológica realizada por el área de estudio, se identificó la presencia de Limoarcilla Calcárea, la cual se presentó como secuencias finas y deleznables constituidas principalmente por agregados limoarcillosos. En campo, se observó que esta unidad podía contener clastos calcáreos englobados dentro de la matriz, evidenciando una composición heterogénea.

Asimismo, presentó un aspecto predominantemente pulverulento, con una coloración característica que varió entre pardo rojizo y amarillento. Estas características permitieron diferenciar la Limoarcilla Calcárea de las demás unidades litológicas reconocidas en el área de estudio y establecer su presencia dentro de la secuencia geológica de los tajos B1 y B2.



FUENTE: Estudio geotécnico – Calcesur S.A., 2016

Figura 2 — Columna estratigráfica de la acumulación Puno

1.4.4 Clasificación de los suelos

1.4.4.1 Suelos orgánicos

Durante la caracterización de los suelos realizada en el área de estudio, se identificaron suelos limo-arcillosos de origen orgánico, los cuales se encontraron asociados principalmente a las zonas llanas de los valles.

Estos suelos se originaron a partir de la acumulación de restos de vegetación y materia orgánica, producto de procesos de sedimentación y descomposición natural.

En estas áreas se observó la presencia de materia orgánica en diferentes estados de descomposición, cuya transformación estuvo relacionada con la actividad de microorganismos presentes en el suelo. La acumulación progresiva de estos materiales favoreció la formación de horizontes de suelo de naturaleza limo-arcillosa, los cuales se diferenciaron de los materiales rocosos y depósitos no orgánicos presentes en el área de estudio.

1.4.4.2 Suelos expansivos

Durante la caracterización geotécnica realizada en el área de estudio, se identificaron materiales arcillosos clasificados como CL, los cuales presentaron características asociadas a un comportamiento expansivo. Este tipo de suelo se caracterizó por experimentar cambios significativos de volumen ante variaciones en su contenido de humedad, principalmente debido a la presencia de materiales arcillosos.

Asimismo, los materiales identificados presentaron un comportamiento mecánico de malo a aceptable, lo que evidenció condiciones variables en cuanto a su respuesta frente a las sollicitaciones a las que fueron sometidos. En relación con sus propiedades hidráulicas, se determinó que estos materiales presentaron una capacidad de drenaje muy baja, considerada casi impermeable, característica que estuvo asociada a su composición predominantemente arcillosa.

1.4.4.3 Disponibilidad del material de cobertura

En el área de estudio, el material de cobertura estuvo conformado principalmente por suelos de naturaleza limo-arcillosa. Asimismo, se observó que el nivel freático se encontraba a una profundidad que no representaba una condición desfavorable para la disposición de materiales, debido a que no se evidenció una posibilidad significativa de contaminación de las aguas subterráneas.



Para determinar las características de los suelos presentes en el área de estudio, se consideraron los resultados de las propiedades índice y del análisis granulométrico de los materiales evaluados. A partir de estos resultados, los suelos fueron clasificados mediante los sistemas SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y AASHTO. Los resultados obtenidos para los materiales analizados fueron resumidos en las Tablas 3 y 4, denominadas “Clasificación de Suelos”, permitiendo establecer las características y clasificación de los materiales que conformaron la cobertura del área de estudio.

Tabla 3 — Muestreo de suelos (arcillas) del área de estudio

Excavación Nº	Tipo de suelo	Muestra Nº	Prof. De - A	Peso P (kg)	Coordenadas	
					N	E
C-1	ARCILLOS O	M-1	0 - 0,05 m	25	8273360	377598
		M-2	0,05 - 1,10 m	25	8273360	377598
C-2	MARGOSO	M-3	0 - 0,10 m	25	8273597	377416
		M-4	0,10 - 0,80 m	25	8273597	377416
C-3	ORGANICO	M-5	0 - 0,10 m	25	8273530	377516
		M-6	0,10 - 0,80 m	25	8273530	377516
FUENTE: Estudio geotécnico – Calcesur S.A., 2016						

Los resultados del estudio de los materiales muestreados de las diferentes calicatas en las alternativas planteadas fueron las siguientes:

Tabla 4 — Clasificación de suelos

Tipo de suelo	Zona	Color	PROF.	Clasificación	
				SUCS	AASHTO
ARCILLOSO	SUR	Marrón Rojizo	0,05 – 0,10	CL	A-7-6
MARGOSO	OESTE	Pardo Amarillento	0,10 – 0,80	CL	A-6
ORGÁNICO	NORESTE	Café Oscuro	0,10 - 0,80	OH	-
FUENTE: Estudio geotécnico– Calcesur S.A., 2016					

1.4.5 Contextualización

En las operaciones mineras a tajo abierto, la voladura constituye una de las actividades fundamentales para el arranque del mineral y la roca estéril. Sin embargo, esta operación genera efectos secundarios, como las vibraciones



sísmicas, que pueden afectar la estabilidad de las estructuras cercanas, la seguridad del personal y el medio ambiente. En este contexto, la Unidad Minera Calcesur S.A., ubicada en Juliaca, desarrolla sus operaciones en los tajos B1 y B2, donde resulta necesario implementar técnicas que permitan optimizar la fragmentación de la roca, reducir costos y, al mismo tiempo, controlar las vibraciones generadas. La aplicación de sistemas de iniciación no electrónica se presenta como una alternativa tecnológica viable para mejorar la eficiencia de la voladura y garantizar un adecuado desempeño operacional con menor impacto ambiental.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Determinar de qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.

2.1.2 Objetivos específicos

- Identificar cómo se realizarán los trabajos de mecánica de rocas para la aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.
- Determinar la incidencia de la implementación del sistema de iniciación no electrónica en la optimización de los costos de voladura y la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025.
- Evaluar el efecto de la iniciación no electrónica en la reducción de los niveles de vibración generados por las voladuras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

La aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar de manera significativa las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.



2.2.2 Hipótesis específicas

- La realización adecuada de los trabajos de mecánica de rocas permite una correcta aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.
- La implementación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras optimiza los costos de voladura y mejora la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025.
- La aplicación de la iniciación no electrónica reduce significativamente los niveles de vibración generados por las voladuras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.



2.3 Operacionalización de variables

- Variable independiente: Voladura con la iniciación no electrónica
- Variable dependiente: Control de las vibraciones

Tabla 5 — Operacionalización de variable

Tipo de variable	Nombre de la variable	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente	Iniciación no electrónica en las voladuras	Secuencia de iniciación.	• Número de secuencias de disparo programadas (N° de secuencias) • Orden de salida de los taladros
		Tiempos de Retardo	• Tiempo de retardo entre taladros (ms) • Tiempo de retardo entre filas (ms) • Tiempo total de iniciación de la voladura (ms)
		Diseño de malla de voladura	• Burden (m) • Espaciamiento (m) • Factor de carga (Kg/m³).
Variable dependiente	Control de las vibraciones generadas por las voladuras	Mecánica de rocas	• Calidad del Macizo rocoso (RMR) • Índice de Calidad de Roca (RQD)
		Costos de voladura	• Costo de explosivos por disparo • Costo por tonelada fragmentada
		Niveles de vibración	• Velocidad Pico de Partícula (PPV) • Cumplimiento de límites permisibles
FUENTE: Elaboracion propia			

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes internacionales

De acuerdo con Araujo et al.(2025) en su tesis Influencia de voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo, concluye que se comprobó que la secuencia y sincronización de la voladura, facilitada por el uso de detonadores electrónicos y la aplicación de retardos específicos (7 ms en un mismo taladro, 14 ms entre taladros y 100 ms entre filas), influyen positivamente en el comportamiento dinámico del macizo rocoso con tiempos totales de 1,889 ms y 1,219 ms. Los resultados demuestran una clara correlación entre la carga operante por retardo y las vibraciones generadas; por ejemplo, en los taladros de rotura (90 kg/retardo), la VPP promedio fue de 79,77 mm/s, mientras que, en los taladros de control (35 kg/retardo) se redujo significativamente la VPP a 31,24 mm/s. Esta manipulación precisa de la carga, exclusiva de los detonadores electrónicos, representa una minimización efectiva de las vibraciones y una dilución controlada del 13 %.

Según Cabada et al.(2022) en su trabajo de investigación que titula Aplicación del sistema de iniciación electrónico digishot plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura en una empresa minera de Cajamarca – 2022, concluye que, mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus en el proceso de voladura se logró obtener mejores resultados en la fragmentación de la roca con un P80 promedio de 3,72 pulgadas, además se obtuvieron mejores resultados en el control de estabilidad de taludes, minimizar el daño de las vibraciones, reducir la ocurrencia de flyrock.

Catacora (2026). en su tesis que tiene por título Optimización de la productividad por la implementación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral en

la Mina Marcona, 2025, concluye que la aplicación de detonadores electrónicos en la voladura de mineral permitió optimizar la productividad en la unidad minera, al mejorar la fragmentación, incrementar el ritmo de producción, reducir el consumo energético y disminuir tanto la voladura secundaria como los costos operacionales. Esta tecnología se presenta, por tanto, como una solución integral para mejorar la eficiencia del ciclo de minado en operaciones a cielo abierto, con beneficios medibles en los ámbitos técnico, económico y operativo.

Según Rivera (2025). en su tesis Aplicación de la iniciación electrónica para mejorar el sistema de gestión de seguridad y productividad en el proceso de voladura de la U.E.A. Heraldos Negro, concluye que se tiene un margen de rentabilidad con la implementación de la voladura electrónica. Estos valores fueron llevados en dólares/año y se relacionó los costos de implementación con la productividad de los equipos generando significativamente una renta aproximada de 33,000 dólares por año.

De acuerdo con Campos et al. (2021) en su tesis que titula Modelamiento y diseño de malla de perforación para controlar la dilución, en tajos de producción en una mina a cielo abierto 2021, concluyen que, a partir de los resultados obtenidos en la investigación, se confirma que la aplicación del estudio geomecánico y el diseño de la malla de perforación contribuyen significativamente al control de la dilución en los tajos de producción durante la explotación minera a cielo abierto. Los hallazgos evidencian una mejora en el control del proceso de perforación y voladura, reflejada en una mayor precisión del diseño, una adecuada distribución del factor de carga de explosivos y un mejor manejo de las operaciones de carguío de mineral, permitiendo optimizar las condiciones de explotación. En conjunto, los resultados demuestran que la planificación y ejecución técnica de estos parámetros favorecen un control más eficiente de la dilución del mineral, incrementando el desempeño operativo y la eficiencia del proceso minero.

3.1.2 Antecedentes nacionales

Según Quispe (2023). en su tesis que tiene por título, Influencia de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de voladura en la unidad minera Cerro Corona-Cajamarca, 2019 concluyó que los detonadores electrónicos DigiShot Plus ofrecieron un desempeño superior frente a los



detonadores pirotécnicos tradicionales. Esto se evidenció en la reducción significativa del tamaño de los fragmentos de roca, pasando de 8,74 pulgadas a 2,96 pulgadas, lo que indica una fragmentación más eficiente. Además, se observó una disminución notable de las vibraciones generadas por la voladura, reduciéndose de 20,15 mm/s a 9,64 mm/s, lo que refleja un mejor control del impacto sísmico sobre las estructuras y el entorno.

De acuerdo con Cueva et al. (2020), en su trabajo de investigación concluyen que, el primer paso en el desarrollo de este estudio consistió en identificar uno de los problemas críticos de CMCP, con el fin de proponer una solución que minimice o elimine dicho problema. Se detectó que uno de los principales inconvenientes en la mina estaba relacionado con las operaciones de voladuras a cielo abierto. Se observó que los impactos generados por estas voladuras afectaban negativamente al entorno. Ante esta situación, se decidió no continuar utilizando el ANFO como agente de voladura, y se planteó probar el Plasma Frag Be como alternativa para la fragmentación del macizo rocoso, con el objetivo de continuar con las operaciones de explotación en sectores cercanos a zonas urbanas sin generar un impacto negativo en el entorno.

De acuerdo con Cardenas (2023). en su trabajo de tesis concluye que, se definió de manera precisa el proceso a seguir al utilizar las cápsulas Softbreaker, considerando aspectos clave como su diseño, los parámetros técnicos, el área de trabajo, las restricciones del lugar, la perforación que se debe realizar, los protocolos de fragmentación, la notificación del proceso, las reuniones de campo sobre el trabajo de fragmentación, el despeje del área, así como el personal y los materiales que se utilizarán. Todos estos elementos fueron establecidos previamente para garantizar una correcta implementación y asegurar que todo esté preparado antes de llevar a cabo la fragmentación.

Según Romero (2016). en su tesis titulada voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A, concluyó que la utilización de detonadores electrónicos contribuye a una mejor optimización del P80 en la fragmentación del material. Específicamente, en el lado oeste del tajo, el P80 mejoró en un 5,4 %, mientras que en el lado este se observó una mejora más significativa del 16,7 %, en



comparación con los resultados obtenidos utilizando detonadores pirotécnicos. Esto evidencia que los detonadores electrónicos permiten un control más preciso de la fragmentación, incrementando la eficiencia del proceso de voladura y contribuyendo a la seguridad en las operaciones mineras.

De acuerdo con Pampacata (2015). en su tesis que tiene por título: Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones; concluyó que, a una distancia de 165,8 metros, los resultados de vibración mostraron un nivel máximo de 12,2 mm/s. Se identificaron algunos valores por encima de la curva de daño, especialmente en la onda longitudinal. Sin embargo, estos datos fueron de gran utilidad para ajustar el modelo de voladura y determinar una nueva relación de carga/retardo de 33 kg para el caso de estudio, lo cual permitió que las velocidades pico de partículas obtenidas estuvieran muy próximas a las previstas por el modelo. Esto evidencia la importancia de monitorear y ajustar los parámetros de voladura para garantizar un control adecuado de las vibraciones y minimizar los riesgos sobre las áreas cercanas.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Características del Macizo Rcoso

a) Estructura

Las rocas se pueden clasificar según la disposición de sus minerales. Cuando los granos minerales están mezclados uniformemente formando una masa homogénea, se considera que la roca es maciza, como ocurre con el granito. En cambio, cuando los granos minerales se disponen en capas o estratos, la roca se denomina estratificada, como en el caso de las pizarras (Gamarra, 2011)

b) Dureza

La dureza de una roca depende en gran medida del tamaño de sus granos. Una roca con granos gruesos es más fácil de perforar y genera menos desgaste en los equipos que una roca de granos finos. Esto implica que dos rocas con un contenido mineral similar pueden presentar diferentes niveles de perforabilidad, como ocurre entre el granito fino y el granito compacto.



c) Resistencia a la compresión

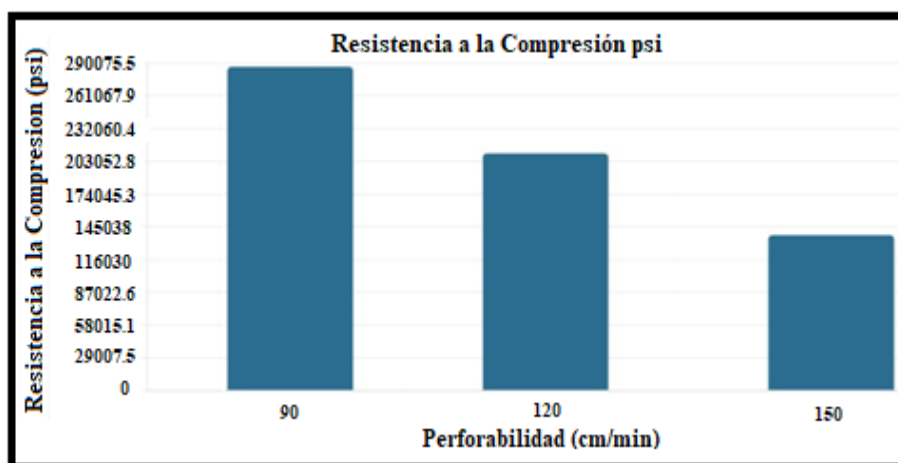
La resistencia a la compresión indica la presión máxima que una roca puede soportar antes de fracturarse. Este parámetro se utiliza frecuentemente para estimar la perforabilidad de la roca, ya que esta suele ser inversamente proporcional a su resistencia. Por ejemplo, si una roca con resistencia a la compresión de 29007,5 psi tiene una velocidad de penetración de 90 cm/min, una roca más blanda con resistencia de 21755,7 psi tendrá una velocidad mayor, calculada como:

$$Velocidad\ de\ penetracion = \frac{90 * 29007,5}{21755,7}$$

$$Velocidad\ de\ penetracion = 120\ cm/min$$

Tabla 6 — La Perforabilidad es inversamente proporcional a la resistencia de la compresión

Perforabilidad (cm/min)	Resistencia a la compresión (psi)
90	29007,5
120	21755,7
150	14503,8
FUENTE: Gamarra, 2011	



FUENTE: Gamarra, 2011

Figura 2 — Perforabilidad vs resistencia a la compresión

Como se puede observar en el diagrama que relaciona la velocidad de penetración con la resistencia a la compresión, existe una relación

inversamente proporcional: a medida que aumenta la resistencia de la roca, la velocidad de penetración disminuye. Este análisis resulta útil como referencia para estudiar el rendimiento de brocas en el área de perforación, aunque no será el único criterio utilizado.

En la práctica, identificar y clasificar un tipo de roca puede ser complejo, ya que sus características varían incluso dentro de un mismo yacimiento. Por ello, para nuestro estudio se realizará una evaluación práctica basada en la experiencia diaria de trabajo, considerando los principios teóricos sobre macizo rocoso, la perforabilidad de la roca y factores como tamaño de grano, mineralogía y estructura, con el fin de obtener un análisis más preciso y aplicable a las condiciones reales de perforación. Gamarra, (2011)

3.2.2 Perforabilidad

De acuerdo con Gamarra (2011), la perforabilidad de un determinado tipo de roca está influenciada por diversos factores, entre los cuales destacan la dureza de la roca, la composición mineralógica y el tamaño de los granos. Por ejemplo, el cuarzo, al ser un mineral muy duro (sílice), hace que una roca con un alto contenido de este mineral sea difícil de perforar, generando un mayor desgaste en el carburo cementado de la broca.

Por otro lado, las rocas con un alto contenido de caliza presentan menor dureza y son mucho más fáciles de perforar, causando desgaste mínimo en la broca. En general, la perforabilidad de una roca depende de la combinación del contenido mineral, el tamaño de los granos y la estructura interna del macizo rocoso, lo que determina el comportamiento de la roca frente a los procesos de perforación y la eficiencia de los equipos utilizados.

Tabla 7 — Perforabilidad y desgaste de algunas rocas comunes

Tipo de roca	Perforabilidad	Desgaste
Granito	Normal de perforar	Mucho desgaste en la broca y el varillaje
Basalto (rocas eruptivas)	Normal de perforar	Menos desgaste en el varillaje
Diorita (rocas eruptivas)	Normal de perforar	Desgaste normal en el varillaje
Anfibolita (roca metamórfica)	Difícil de perforar	Produce un fuerte desgaste debido al contenido de cuarzo
Génesis (roca metamórfica)	Más difícil de perforar debido a la granulación fina	Produce un fuerte desgaste
Pizarra (roca sedimentaria)	Fácil de perforar	Poco desgaste en los aceros
Piedra caliza (roca sedimentaria)	Fácil de perforar	Poco desgaste en los aceros
Arenisca (roca sedimentaria)	Fácil de perforar	Produce un fuerte desgaste por la presencia del cuarzo
Cuarcita	Difícil de perforar por la presencia del SiO ₂	Produce un elevado desgaste de los aceros
FUENTE: Gamarra, 2011		

Es poco frecuente que en una formación geológica exista un solo tipo de roca, lo que dificulta predecir con exactitud si la perforación será fácil o complicada. En la práctica, la respuesta real de la roca solo se conoce una vez iniciada la perforación.

Como se puede observar en la tabla de matriz, esta herramienta es de gran importancia para predecir la perforabilidad y el desgaste de las brocas. Si se utiliza correctamente, permite analizar el rendimiento de las perforaciones, estimar la vida útil de los aceros de perforación y, en consecuencia, optimizar los procesos de perforación, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos en las labores mineras.

3.2.2.1 Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Suarez (2013), La clasificación geomecánica del macizo rocoso es un proceso utilizado para evaluar y categorizar las características físicas y



mecánicas de las rocas en función de su comportamiento bajo cargas externas, condiciones ambientales y la interacción con actividades humanas, como la perforación, voladura y excavación. Esta clasificación permite obtener información crucial para el diseño y la estabilidad de proyectos mineros, civiles y geotécnicos. Existen varios sistemas de clasificación geomecánica, siendo algunos de los más utilizados:

- a) **Clasificación de Rock Mass Rating (RMR):** Desarrollada por Bieniawski, esta clasificación toma en cuenta parámetros como la resistencia a la compresión de la roca intacta, la calidad de las discontinuidades, la orientación de las fracturas, la presencia de agua y la abrasividad de la roca. Los resultados permiten asignar un valor que indica la estabilidad y el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones.
- b) **Sistema de clasificación Q de Barton:** Este sistema se basa en la observación de la geometría, la persistencia y el espesor de las discontinuidades en el macizo rocoso. Utiliza varios parámetros como la resistencia de la roca intacta, la dureza de la roca, el tipo de discontinuidades y el espacio entre ellas, para asignar un índice que representa la calidad del macizo rocoso.
- c) **Clasificación de GSI (Geological Strength Index):** Este método evalúa la calidad del macizo rocoso tomando en cuenta las características geológicas de las fracturas y las propiedades de la roca. La clasificación GSI proporciona una medida para predecir la resistencia del macizo y la capacidad de soporte para proyectos geotécnicos.

3.2.3 Principio de perforación

En minería, el principio de perforación hace referencia al conjunto de técnicas, métodos y herramientas utilizadas para realizar perforaciones en el macizo rocoso con diversos fines. Este proceso es esencial para llevar a cabo actividades críticas como la extracción de muestras geológicas, la preparación de voladuras, la instalación de sistemas de soporte en excavaciones subterráneas y la perforación

de pozos de ventilación o agua. La perforación, al permitir acceder y estudiar el interior del macizo rocoso, proporciona información crucial sobre las propiedades geotécnicas y mineralógicas del terreno, facilitando así la toma de decisiones en las etapas de planificación y diseño de las operaciones mineras.

Este proceso también es determinante para el éxito de las voladuras, ya que una perforación adecuada es fundamental para asegurar la correcta colocación de los explosivos, optimizando los resultados de la fragmentación de la roca. Una voladura eficiente facilita la extracción del mineral de manera más económica y con menores riesgos, acelerando el avance de las obras. Además, la perforación es clave para la instalación de sistemas de soporte en túneles y minas subterráneas, garantizando la estabilidad de las excavaciones. En resumen, la perforación es una de las actividades más importantes dentro de la minería, ya que influye directamente en la productividad, seguridad y eficiencia de los proyectos mineros. (Arcos, 2007)

3.2.3.1 Tipos de perforación

a) Perforación por percusión

La perforación por percusión es un método utilizado principalmente en minería, construcción subterránea y perforación de túneles para fracturar rocas duras a través de impactos repetidos y controlados. Este proceso se lleva a cabo utilizando equipos especializados, como martillos perforadores o barrenadoras, que transmiten energía de impacto a la broca o taladro, permitiendo que el equipo avance a través de formaciones rocosas compactas. La perforación por percusión se combina frecuentemente con la rotación del taladro para mejorar su eficiencia y acelerar el progreso, lo que la convierte en una técnica especialmente útil para perforar en rocas duras como granitos, basaltos o calizas, donde otros métodos pueden resultar menos efectivos.

Una de las principales ventajas de este método es que permite un avance rápido con menor desgaste de las herramientas y una menor fuerza de empuje en comparación con otros tipos de perforación. Esto lo hace ideal para operaciones en terrenos difíciles o rocas de

alta dureza. Sin embargo, la perforación por percusión presenta limitaciones, como una menor precisión en el control de la dirección del agujero y una menor efectividad en rocas más blandas o menos compactas. A pesar de estas desventajas, la técnica es ampliamente utilizada en minería subterránea, proyectos de perforación de túneles y exploración geotécnica, debido a su capacidad para avanzar rápidamente y afrontar formaciones rocosas difíciles de perforar. (Chipana, 2015)

b) Perforación por rotación

La perforación por rotación es un proceso utilizado en minería, construcción y otras aplicaciones geotécnicas, que consiste en perforar rocas o suelos mediante una broca que gira a alta velocidad, aplicando presión vertical hacia abajo. Este método es especialmente eficiente en formaciones rocosas blandas a moderadamente duras, ya que permite un control preciso sobre la dirección, profundidad y ángulo de la perforación. Gracias a su capacidad para ajustar estos parámetros, la perforación por rotación se convierte en una técnica ideal para terrenos no consolidados, suelos blandos o rocas de baja resistencia.

Una de sus principales ventajas es el bajo desgaste de las herramientas, lo que contribuye a la eficiencia del proceso, y un avance relativamente rápido cuando se trabaja con materiales menos resistentes. Sin embargo, en formaciones rocosas extremadamente duras o altamente consolidadas, la perforación por rotación puede volverse menos efectiva, ya que el proceso de rotación por sí solo no es suficiente para fracturar rocas de alta dureza, en cuyo caso métodos como la perforación por percusión son más adecuados. A pesar de este inconveniente, la perforación por rotación sigue siendo una técnica ampliamente utilizada en minería, exploración geotécnica y la construcción de pozos de agua, debido a su precisión, rapidez y eficiencia en una amplia variedad de condiciones de terreno. (Chipana, 2015)

c) Perforación por rotopercusión

La perforación por rotopercusión es un método que combina las técnicas de rotación y percusión, utilizando un barreno que rota mientras realiza impactos repetidos sobre la roca. Este proceso es altamente efectivo en formaciones rocosas duras y compactas, como granitos, basaltos o cuarcitas, ya que la combinación de la rotación y los impactos permite fracturar la roca de manera más rápida y eficiente que si se utilizara sólo uno de los métodos por separado. La rotación proporciona un corte constante y efectivo en la roca, mientras que la percusión genera un impacto que ayuda a romper la roca, acelerando el avance de la perforación.

Una de las ventajas principales de la perforación por rotopercusión es que ofrece un avance más rápido y un mayor control direccional en comparación con la percusión sola, lo que la convierte en una opción ideal para trabajos en terrenos difíciles o de alta dureza. Además, este método tiende a reducir el desgaste de las herramientas en comparación con la perforación por percusión tradicional, lo que aumenta su eficiencia y vida útil. Sin embargo, la perforación por rotopercusión requiere equipos especializados, lo que puede implicar mayores costos operativos, y, en algunos casos, puede ser más difícil de controlar con precisión la profundidad exacta de la perforación. A pesar de estos desafíos, la perforación por rotopercusión es ampliamente utilizada en minería, construcción de túneles y exploración geotécnica, donde se requieren soluciones eficaces para perforar en formaciones rocosas duras y complejas. (Chipana, 2015)

3.2.4 Voladura

De acuerdo con Posada (2019), El trabajo de voladura de rocas es una técnica clave en la minería, utilizada para la extracción de material en terrenos donde los métodos mecánicos resultan costosos o ineficaces. Este proceso comienza con la perforación de agujeros en la roca, en los cuales se colocan explosivos que, al ser detonados, liberan una gran cantidad de energía, provocando la fragmentación del

macizo rocoso. Esta fragmentación facilita la extracción de los recursos mineros de manera más eficiente.

Para que la voladura sea exitosa, es crucial que la perforación sea precisa. Un taladro bien ejecutado es indispensable, pero solo será efectivo si se emplean los explosivos adecuados, tanto en términos de potencia como de cantidad. Asimismo, una carga explosiva correctamente diseñada no tendrá el mismo impacto si la perforación presenta fallos, como una profundidad incorrecta, mal paralelismo o baja densidad.

Los explosivos comerciales utilizados en la voladura de rocas incluyen mezclas de nitrato de amonio y nitroglicerina, y se dividen en varias categorías: dinamitas, gelatinas y agentes explosivos. Las dinamitas se clasifican en dos tipos: las regulares, que se componen principalmente de nitroglicerina, y las amoniacaes, que utilizan nitrato de amonio. Las gelatinas son una variante de dinamita que se gelifican con nitrocelulosa, lo que le otorga una consistencia parecida a la goma, y una mayor resistencia al agua. Entre las gelatinas se encuentran diferentes subcategorías, como la gelatina regular, la gelatina amoniacaal y las semigelatinas, cada una con características específicas para diferentes tipos de terrenos y condiciones de voladura.

En el proceso de voladura de rocas, existen diversas variables que pueden ser ajustadas y controladas para optimizar los resultados y garantizar la seguridad de las operaciones. Entre estas variables, destacan:

- **Diseño de la voladura:** El patrón de perforación, el número de taladros, su profundidad, orientación, burden y el espaciamiento entre ellos son elementos clave que determinan la eficacia de la voladura. Un diseño bien planificado asegura una fragmentación eficiente y minimiza los riesgos de desplazamientos no deseados del material.
- **Tipo y cantidad de explosivos:** La selección del explosivo adecuado y su carga influye directamente en la efectividad de la voladura. Es fundamental elegir el explosivo con la potencia correcta en relación con las características de la roca y el volumen a fragmentar.



- **Tiempo de detonación:** El retardo entre las detonaciones de cada barreno debe ser cuidadosamente calculado para controlar la dirección de la fractura, evitar sobrepresiones indeseadas y asegurar una fragmentación homogénea.
- **Condiciones geológicas y geotécnicas:** La resistencia y la estructura de la roca juegan un papel determinante en el éxito de la voladura. Se deben estudiar factores como la fisuración y la homogeneidad del macizo rocoso para ajustar las variables mencionadas de manera eficiente.
- **Seguridad y control de riesgos:** La seguridad es una prioridad en las voladuras. Esto incluye el uso de sistemas de monitoreo para detectar vibraciones, la correcta señalización y aislamiento de áreas cercanas, y el cumplimiento de los protocolos de evacuación para proteger al personal y las instalaciones cercanas.

3.2.5 Explosivos

De acuerdo con Serin (2017), Un explosivo es una sustancia que, al ser activada por factores como calor, fricción o una onda de choque, provoca una reacción química rápida y exotérmica, lo que genera la liberación de gases a alta presión. Esta liberación de gases produce trabajo mecánico y, al detonar, se origina una onda de choque que impacta la roca, creando fisuras en su estructura. Estas fisuras se expanden debido a la tensión generada durante la detonación, facilitando así la rotura del macizo rocoso. Los explosivos contienen una combinación de componentes combustibles y oxidantes que, al recibir un estímulo externo, inician el proceso de detonación. Esta reacción libera una gran cantidad de energía de manera rápida, la cual se propaga a través del material explosivo y se transmite a la roca, produciendo la fragmentación deseada.

3.2.5.1 Fundamentos Sobre Explosivos y la teoría de detonación

a) Tipos de reacción en función de la cinética química

- **Combustión**

Según Chura (2019), Una reacción exotérmica es un tipo de reacción química que libera calor al entorno, aunque este desprendimiento de energía puede no ser percibido por nuestros



sentidos debido a su ritmo gradual. A diferencia de las reacciones endotérmicas, las exotérmicas generan calor como un subproducto de la reacción, y esta liberación de energía es fundamental para su naturaleza. Aunque el tiempo de reacción en una exotérmica suele ser más lento en comparación con otras reacciones más inmediatas, el calor liberado sigue siendo una característica clave que define este tipo de reacciones, y a menudo contribuye a aumentar la temperatura del sistema en el que ocurren.

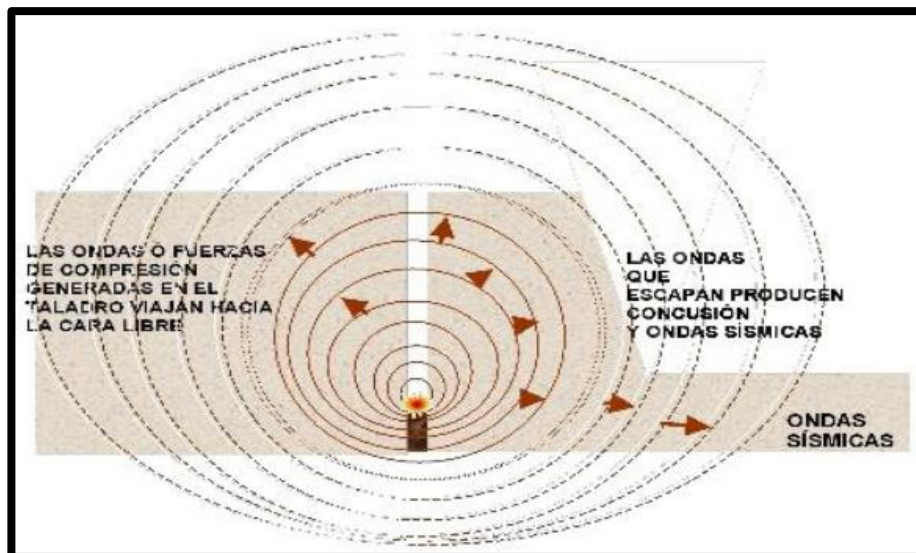
- **Deflagración**

Chura (2019), La deflagración es un proceso de combustión rápida en el que la propagación de la llama ocurre a una velocidad menor que la del sonido en el medio en el que se desarrolla. A pesar de ser una combustión que ocurre a temperaturas elevadas y genera calor rápidamente, no alcanza la velocidad de una explosión. En este tipo de proceso, la energía se libera de manera más controlada que en una detonación, lo que implica que la reacción se propaga a través del material a una velocidad sub-sónica, sin la liberación instantánea de una onda de choque como ocurre en las explosiones. La deflagración es común en situaciones donde se requiere un control más preciso de la liberación de energía, como en ciertos tipos de propulsores y explosivos de bajo rendimiento.

- **Detonación**

De acuerdo con Chura (2019), es un proceso fisicoquímico caracterizado por su alta velocidad de reacción y por la formación de una gran cantidad de productos gaseosos a elevadas temperaturas. Durante este fenómeno, la reacción ocurre de manera extremadamente rápida, generando gases a alta temperatura que se expanden de forma casi instantánea. Esta rápida expansión produce una presión intensa sobre el entorno circundante, generando un impacto de alta energía. Este efecto es característico de las reacciones explosivas, en las cuales la

liberación de energía se manifiesta en forma de una onda de choque, que viaja a gran velocidad y causa la fragmentación o desplazamiento de materiales cercanos.



FUENTE: Chura, 2019

Figura 3 — Acción en el área periférico

b) Mecanismo de la detonación

Según Chura (2019), los mecanismos de detonación son los siguientes

- **Detonador:** Es el dispositivo que inicia la onda de choque inicial. Esta onda se propaga a gran velocidad, desencadenando la reacción en un punto específico que luego se extiende rápidamente hasta abarcar todo el diámetro del explosivo, alcanzando su velocidad máxima de detonación.
- **Frente de Choque (FC):** Es la región donde se propaga la onda de choque generada por el detonador. Detrás de este frente se forma la zona de reacción (ZR), delimitada por el plano de Chapman-Jouget (PCJ), que es la zona donde se alcanzan las máximas temperaturas y presiones durante la detonación. En esta área, la masa explosiva se descompone de manera rápida y eficiente, dando paso a la zona de explosión (ZE), que sigue

detrás, y donde las temperaturas y presiones son extremadamente altas.



FUENTE: Chura, 2019

Figura 4 — Acción de explosión de una carga

3.2.6 Mecanismo de fragmentación de la roca por explosivos

El rompimiento y desplazamiento del material que ocurre durante y después de la detonación completa de una carga explosiva confinada se desarrolla en varias etapas. Según López (2003), estas etapas pueden clasificarse en cuatro fases principales, las cuales describen de manera detallada cómo la energía del explosivo se transmite a la roca, provocando su fragmentación y desplazamiento.

3.2.6.1 Detonación

La detonación constituye la fase inicial del proceso de fragmentación por explosivos. Durante esta etapa, los componentes del explosivo (combustibles y carburantes) reaccionan de forma casi instantánea, transformándose en gases a altísimas presiones y temperaturas. En rapidez y energía liberada la detonación se asemeja, en escala química, a

una reacción extremadamente veloz —es la reacción química más rápida conocida.

En explosivos de uso comercial, las presiones inmediatamente detrás del frente de detonación suelen estar en un rango muy elevado, típicamente entre 2 000 MPa (20 kbar) y 27 500 MPa (275 kbar). Este valor, denominado presión de detonación, está determinado principalmente por la densidad del explosivo y su velocidad de detonación (VOD).

El tiempo que requiere completar la detonación depende de la geometría y el tamaño de la carga: para una carga pequeña y aproximadamente esférica la detonación se completa en el orden de microsegundos, mientras que en una carga cilíndrica larga el proceso puede extenderse hasta el orden de milisegundos. Además de la geometría y las dimensiones, otros factores que influyen en la duración y comportamiento de la detonación son la VOD del material, la compacidad de la carga y las condiciones de confinamiento. Lopez, (2003)

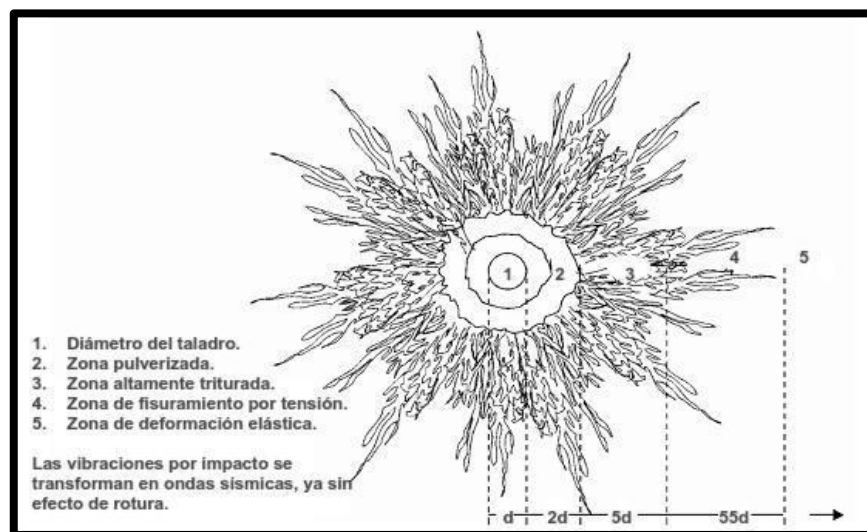
3.2.6.2 Propagación de las ondas de choque y/o de esfuerzo

La propagación de las ondas de choque es la fase que sigue a la detonación, en la cual las ondas de choque y de esfuerzo se transmiten a través del macizo rocoso. Esta perturbación u onda de presión es generada en gran parte por la rápida expansión de los gases y las altas presiones resultantes de la detonación, impactando directamente en las paredes del taladro y generando la presión de detonación.

La dispersión de estas ondas depende de diversos factores, como la ubicación del punto o puntos de iniciación, la velocidad de detonación (VOD) del explosivo y la velocidad de propagación de la onda en la roca. Generalmente, el fallamiento por compresión, tensión y cizalle se produce en forma de una zona pulverizada cercana a la carga, donde la energía de la onda es máxima.

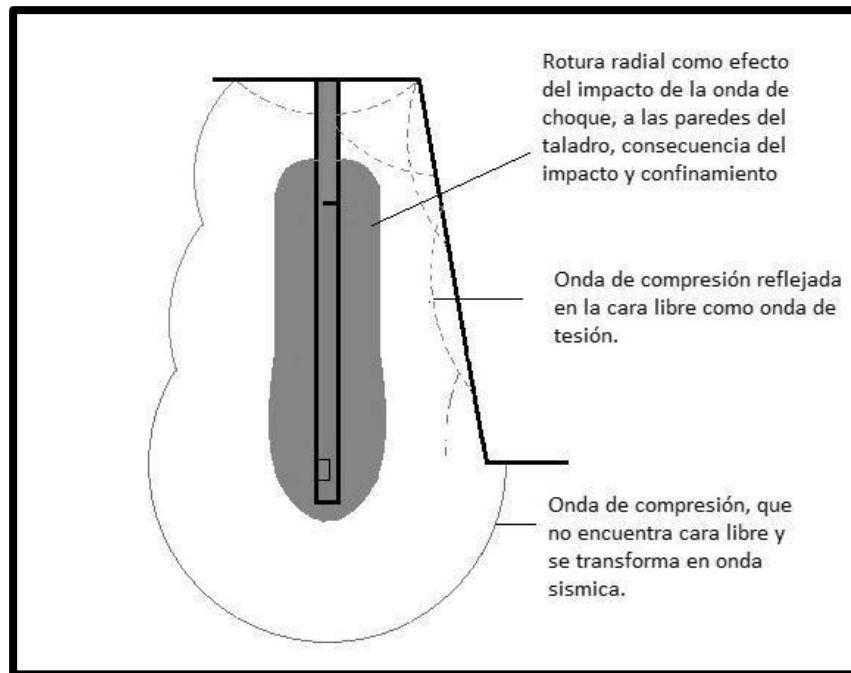
A medida que el frente de onda se desplaza hacia el exterior, se observa una tendencia a comprimir el material en la dirección de propagación. Perpendicular a este frente de compresión surge un componente denominado esfuerzo tangencial, que, si alcanza suficiente magnitud, puede generar fallamiento por tensión en ángulos rectos a la dirección de propagación. Los fallamientos por tensión más significativos tienden a ocurrir cerca del taladro, en discontinuidades del macizo o en zonas donde existe un cambio abrupto en la impedancia de los materiales.

Los componentes de compresión, tensión, cizalle y sus combinaciones en cualquier frente de onda tienden a disminuir con la distancia respecto a la carga. La interacción de estas ondas de esfuerzo en un medio complejo y discontinuo, como el macizo rocoso, es un área de investigación intensa y representa un elemento clave en las nuevas teorías de voladura, debido a su influencia en la fragmentación y eficiencia de la operación.



FUENTE: López Jimeno, 2003

Figura 5 — Rotura radial como efecto de la onda de detonación a las paredes de un taladro



FUENTE: López Jimeno, 2003

Figura 6 — Detonación de un taladro con cara libre

Quispe (2023), para iniciar la carga explosiva en voladuras —tanto en tajo abierto como en labores subterráneas— se emplean distintos tipos de detonadores, cuyo propósito es activar un cartucho iniciador o multiplicador que provoque la detonación dentro del barreno. La selección del tipo de detonador depende de múltiples factores, entre ellos las necesidades de conexión, las condiciones ambientales, la complejidad del tendido o enlace y el modo de disparo utilizado por el sistema de voladura.

- a) Detonadores eléctricos:** Su principio de funcionamiento se basa en un circuito eléctrico que calienta un elemento por efecto Joule hasta que la resistencia genera una llama iniciadora, la cual desencadena la reacción posterior. El rendimiento y la fiabilidad de estos detonadores pueden verse afectados por la longitud y la composición del cableado, lo que plantea retos en términos de tiempo nominal y extensión. Cuando un detonador carece de dispositivo de retardo, se clasifica como instantáneo (retardo “0”).

b) Detonadores no eléctricos: Para superar las limitaciones asociadas al uso de señales eléctricas (por ejemplo, la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas), se desarrolló en 1976 el sistema NONEL (no eléctrico). Al prescindir de conductores eléctricos, estos sistemas son inertemente inmunes a perturbaciones electromagnéticas. Los sistemas no eléctricos incluyen elementos que permiten el retardo de la iniciación, una carga inicial y las cargas base necesarias para propagar la detonación.

3.2.6.3 Detonadores no electrónicos (sistemas basados en tubos de choque):

Este tipo de iniciador está compuesto por un tubo de choque sellado con una cápsula de aluminio en uno de sus extremos. En su interior incorpora un tren de retardo, una primera carga iniciadora (por ejemplo, azida de plomo) y una segunda carga de potencia (por ejemplo, pentrita/PETN). Estos detonadores pueden ser activados mediante detonadores ordinarios, cordones detonantes u otros sistemas no eléctricos, y constituyen una alternativa robusta frente a las limitaciones de los detonadores eléctricos en ambientes con riesgo de inducción eléctrica o cuando se requiere inmunidad frente a interferencias.

3.2.6.4 Detonadores eléctricos

El ensamblaje del detonador eléctrico está formado por un cuerpo metálico que aloja en uno de sus extremos una tapa protectora. En su interior se encuentra una carga pirotécnica de iniciación (llamada ojiva o cápsula), cuya ignición pone en marcha la secuencia detonante. La activación se realiza mediante el suministro de un pulso eléctrico a través del cable detonador, cuyo calentamiento por efecto Joule genera la energía necesaria para encender la ojiva y provocar la detonación del iniciador.

Existen distintos tipos y modelos de sistemas de iniciación eléctricos, que pueden ser instantáneos o incorporar retardos programados. Gracias al rápido avance tecnológico, los detonadores eléctricos modernos han alcanzado niveles muy altos de precisión y confiabilidad; muchos incorporan circuitos electrónicos integrados (microchips) que permiten

controlar con exactitud el tiempo de disparo, mejorar la sincronización entre cargas y reducir la variabilidad en la secuencia de iniciación.

Estas características hacen que los detonadores eléctricos sean una opción adecuada cuando se requiere una sincronización precisa de los retardos y un control avanzado de la secuencia de voladura, aunque su uso exige consideraciones sobre el tendido eléctrico y la protección frente a posibles interferencias electromagnéticas.

3.2.7 Costos unitarios

3.2.7.1 Estructura de costos en minería

La estructura de costos en minería es clave para la correcta gestión financiera de las actividades mineras, englobando todos los gastos relacionados con la exploración, desarrollo, extracción y procesamiento de minerales. Esta estructura incluye diferentes elementos esenciales, tales como los costos de exploración, que abarcan estudios geológicos y perforaciones; los costos de desarrollo y construcción, vinculados a la infraestructura minera y la adquisición de maquinaria; y los costos operativos, que comprenden gastos en extracción, procesamiento y personal. También se deben tener en cuenta los costos asociados al mantenimiento de equipos e infraestructura, así como los costos financieros derivados del financiamiento y las obligaciones fiscales.

Los costos ambientales tienen una relevancia significativa, dado que las empresas deben cumplir con las normativas ambientales y gestionar los residuos generados, lo que requiere inversiones sustanciales en tratamiento de residuos y restauración de las áreas afectadas. Además, los costos de comercialización y logística son importantes, pues incluyen los gastos de transporte y venta del mineral, lo cual es fundamental para mantener la competitividad en el mercado.

Una adecuada clasificación de los costos, diferenciando entre fijos y variables, es crucial para maximizar la rentabilidad. Los costos fijos, como la amortización de equipos, permanecen constantes independientemente de la producción, mientras que los costos variables,

tales como el consumo de energía y explosivos, aumentan conforme aumenta el volumen de mineral extraído. Tener un conocimiento detallado de estos costos permite a las empresas mineras tomar decisiones estratégicas acertadas, minimizar gastos innecesarios y establecer precios competitivos, lo que contribuye a mejorar la eficiencia operativa y asegurar la viabilidad financiera a largo plazo.

3.2.7.2 Costos unitarios en operaciones mineras

Los costos unitarios en operaciones mineras son una métrica esencial para evaluar la eficiencia y rentabilidad de las actividades mineras. Estos costos representan los gastos vinculados a la extracción de una unidad de mineral o a la realización de una operación minera específica. El cálculo de estos costos es crucial para medir el rendimiento de la operación y optimizar el uso de los recursos. Los costos unitarios permiten determinar la efectividad en la gestión de insumos y recursos en función de la producción alcanzada, facilitando la toma de decisiones estratégicas en las empresas mineras para mejorar su competitividad y sostenibilidad. Mamani, (2024).

a) Componentes de los costos unitarios

- **Costos de Extracción:** Este componente abarca los gastos asociados con actividades como perforación, voladura, acarreo y transporte del mineral desde el yacimiento hasta las plantas de procesamiento. Los costos de perforación y voladura varían según factores como el tipo de roca, la profundidad de la mina y las tecnologías empleadas, mientras que los costos de acarreo dependen de la distancia y volumen del mineral extraído.
- **Costos de Procesamiento:** Son los gastos relacionados con la concentración y tratamiento del mineral. Esto incluye el uso de reactivos químicos, energía, agua y equipos necesarios para procesos como trituración, molienda, flotación y cianuración, entre otros. Los costos unitarios de procesamiento están influenciados por la eficiencia de los equipos, el tipo de mineral

y la calidad del mismo, así como la recuperación esperada del metal.

- **Costos Administrativos y Operativos:** Involucran los gastos generados en la gestión y administración de la operación minera, como salarios, beneficios laborales, seguridad y transporte del personal. También incluyen los costos asociados con el mantenimiento de maquinaria y equipos, esenciales para asegurar la continuidad y eficiencia de las operaciones mineras.
- **Costos Financieros y Ambientales:** Los costos financieros abarcan los pagos de intereses y amortización de deudas, mientras que los costos ambientales incluyen la gestión de residuos, el tratamiento de aguas, la rehabilitación de terrenos y el cumplimiento de las normativas medioambientales. Ambos tipos de costos tienen un impacto considerable en la rentabilidad y viabilidad a largo plazo de las operaciones mineras.

3.3 Definición de términos

a) Botadero

Es una área o depósito utilizado en minería para almacenar los materiales excavados que no tienen valor económico y que no son procesados. Estos materiales, conocidos como desmonte, pueden incluir rocas estériles, tierra o residuos generados durante la extracción del mineral. Paucar, (2015)

b) Mallas de perforación

En minería se refieren a los patrones o disposiciones planificadas que definen cómo se deben perforar los taladros en el macizo rocoso para realizar las voladuras. Este patrón determina la distribución de los taladros, su diámetro, la profundidad, la separación entre ellos y el ángulo de inclinación. El diseño de las mallas de perforación tiene como objetivo optimizar varios aspectos del proceso de voladura, como la fragmentación de la roca, la eficiencia en el uso de explosivos, y la seguridad en las operaciones. Chipana, (2015)

c) Perforación

Es el proceso mediante el cual se realizan agujeros en el macizo rocoso para diversos fines, tales como la extracción de muestras geológicas, la instalación de explosivos para voladuras o la preparación de espacios para la instalación de sistemas de soporte en excavaciones subterráneas. Este proceso se lleva a cabo utilizando equipos especiales como taladros, barrenadoras o martillos perforadores, dependiendo de la dureza de la roca y el objetivo de la perforación. Lozano, (2012)

d) Espaciamiento

El espaciamiento de los taladros de perforación es una medida clave en el diseño de la malla de perforación utilizada en las voladuras en minería. Este término se refiere a la distancia entre los taladros perforados en la roca, los cuales serán utilizados para alojar los explosivos que se detonan para fragmentar el material rocoso. El espaciamiento adecuado de los taladros es crucial para garantizar una voladura eficiente y controlada, ya que influye directamente en cómo se distribuye la energía liberada por los explosivos a través del macizo rocoso. Chipana, (2015)

e) Burden

Es la distancia entre el taladro perforado con el borde del banco o la superficie que se va a fragmentar durante una voladura. Este parámetro es fundamental en el diseño de la malla de perforación, ya que tiene un impacto directo en la eficiencia y efectividad de la voladura. El burden influye en cómo se distribuye la energía liberada por los explosivos en la roca, lo que afecta tanto la fragmentación del material como el control de la voladura. Lara, (2013)

f) Cara libre o taladro de alivio

Es un tipo de perforación que se realiza en el proceso de voladura, y su principal objetivo es aliviar la presión generada por los explosivos durante la detonación. Este taladro se perfora generalmente cerca de una cara de la roca o a lo largo de los bordes de la zona a fragmentar, con el fin de permitir que la energía de la explosión se disperse de manera controlada y evitar que la roca no deseada se fracture de manera excesiva. Lara, (2013)



g) Peligro

El peligro en minería se refiere a cualquier circunstancia, condición o factor que pueda causar daño, lesión, accidente o enfermedad en los trabajadores, el entorno o los equipos dentro de una operación minera. DS.024, (2016).

h) Riesgo

Se refiere a la probabilidad de que un peligro identificado cause daño, lesión, accidente o enfermedad en los trabajadores, el entorno o los equipos. Es el resultado de la interacción entre un peligro potencial y la exposición a ese peligro. DS.024, (2016).

i) Accidentabilidad

La accidentabilidad en minería se refiere a la frecuencia o tasa de accidentes que ocurren en el entorno laboral minero durante un período específico. Este indicador es crucial para evaluar la seguridad en el trabajo y se utiliza para medir el nivel de riesgo en un ambiente de trabajo dentro de una empresa o industria minera. DS.024, (2016)

j) Vibraciones

Son los movimientos sísmicos generados por la detonación de un agente externo en este caso el uso de explosivos.

k) Control

Con medidas de contingencia para contrarrestar un suceso o acción que perturbe un estado normal de una situación.

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo y diseño de la investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación del presente estudio es aplicada, ya que se orientó a la implementación de una solución tecnológica específica, la iniciación no electrónica, con el propósito de resolver un problema práctico en las operaciones de voladura en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., - Juliaca, 2025.

El objetivo principal es evaluar cómo la aplicación de este sistema de iniciación contribuye al control de las vibraciones generadas por las voladuras, mejorando la eficiencia operativa, optimizando la seguridad de las operaciones y reduciendo los costos asociados. A través de esta investigación, se busca generar conocimientos prácticos que puedan aplicarse directamente en el contexto minero, permitiendo mejorar los procesos existentes y establecer un referente técnico para futuras operaciones en minería a cielo abierto.

4.1.2 Diseño de la investigación

El diseño de investigación de este trabajo de tesis es descriptivo, ya que se orientó a detallar y analizar las características y efectos de la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras realizadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., - Juliaca, 2025.

Mediante este enfoque descriptivo se examinó los aspectos técnicos, económicos y de seguridad asociados con la implementación de este sistema de iniciación, evaluando cómo influye en el control de las vibraciones generadas durante las voladuras. Si bien no se busca modificar directamente las condiciones operativas, el propósito es proporcionar una comprensión clara de los beneficios y limitaciones de esta alternativa tecnológica en el contexto específico de la operación minera, con miras a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso.



4.2 Población y muestra

4.2.1 Población

La población está conformada por todos los aspectos relacionados con el diseño, operación y control de las voladuras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., incluyendo los registros de vibraciones, los procedimientos de iniciación y los costos asociados a las voladuras.

4.2.2 Muestra

La muestra se seleccionó de forma intencional, ya que los tajos B1 y B2 representan las principales áreas donde se implementará la iniciación no electrónica para el control de vibraciones. Esta muestra incluye los frentes de voladura, los datos de medición de vibraciones, los reportes de costos y productividad, así como los procedimientos técnicos asociados, permitiendo evaluar de manera específica el impacto de la tecnología en las operaciones mineras.

4.3 Procedimiento de la investigación

El procedimiento de investigación, se llevó cabo mediante un enfoque estructurado y sistemático para analizar la aplicación de la iniciación no electrónica como alternativa a los sistemas tradicionales de detonación en las voladuras de los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025.

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica y de documentos técnicos relacionados con la voladura, el control de vibraciones, la iniciación no electrónica y las normativas de seguridad y ambientales aplicables en minería a cielo abierto. Posteriormente, se procedió la recolección de datos primarios mediante observaciones directas en los tajos B1 y B2, medición de vibraciones con equipos sismográficos, entrevistas con personal técnico clave y análisis de los costos operativos, tiempos de ejecución y productividad de las voladuras.

Los datos obtenidos fueron analizados de manera cualitativa y cuantitativa, permitiendo una descripción detallada de los impactos de la iniciación no electrónica sobre el control de vibraciones, la seguridad del personal y la eficiencia operativa. Este enfoque permitirá

evaluar la viabilidad técnica, económica y operativa de la implementación de esta tecnología en los tajos estudiados.

4.4 Material de investigación

El material de investigación estuvo compuesto por diversos recursos que permitieron obtener y analizar la información necesaria para cumplir con los objetivos del estudio. Se utilizaron documentos técnicos y normativos relacionados con la voladura, el control de vibraciones y la implementación de iniciación no electrónica en minería a cielo abierto. Asimismo, se revisó informes previos y datos históricos de las operaciones en los tajos B1 y B2, incluyendo registros de voladuras, mediciones de vibraciones, costos operativos y productividad.

Además, se contó con instrumentos de recolección de datos primarios, tales como entrevistas semiestructuradas con el personal técnico y operativo involucrado en la implementación de la iniciación no electrónica, así como encuestas dirigidas a los responsables de la planificación y control de voladuras. También se recopiló registros de vibraciones, tiempos de ejecución y resultados de fragmentación en los tajos B1 y B2.

El análisis de estos materiales permitió obtener una visión detallada de los efectos de la aplicación de la iniciación no electrónica, evaluando su impacto en la seguridad, eficiencia operativa y control de vibraciones dentro del contexto de la Unidad Minera Calcesur S.A.

4.5 Plan de tratamiento de datos

El plan de tratamiento de datos consistió en una serie de pasos estructurados para organizar, procesar y analizar la información obtenida durante la investigación. En primer lugar, los datos cualitativos provenientes de entrevistas y observaciones serán transcritos y codificados para identificar patrones y categorías relevantes sobre la aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A.

Los datos cuantitativos, como los registros de vibraciones, costos operativos, tiempos de ejecución y resultados de fragmentación, fueron organizados en tablas y gráficos para facilitar su análisis comparativo. Posteriormente, se aplicó herramientas estadísticas descriptivas para evaluar la variabilidad y las tendencias de los datos, permitiendo una interpretación clara de los impactos de la iniciación no electrónica en términos de control de vibraciones, eficiencia operativa y seguridad.



Los resultados se presentaron de manera estructurada y coherente, facilitando la identificación de conclusiones y recomendaciones basadas en la evidencia recopilada, con miras a optimizar los procesos de voladura en los tajos B1 y B2 y servir como referencia técnica para futuras operaciones mineras.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados

5.1.1 Trabajos de mecánica de rocas para la aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2

5.1.1.1 Clasificación geomecánica

La litología predominante en los tajos B1 y B2 corresponde a caliza sedimentaria, la cual presenta un comportamiento frágil, resistencia media a compresión y un grado de fracturamiento moderado.

Desde el punto de vista geomecánico, estas características influyen directamente en:

- La propagación de ondas de voladura
- La distribución de energía explosiva
- El control de vibraciones
- La estabilidad de los bancos

Para la evaluación se utilizó el sistema **RMR (Rock Mass Rating)** de **Bieniawski (1989)**

5.1.1.2 Clasificación geomecánica RMR

El sistema de clasificación RMR (Bieniawski, 1989) es calculado de la siguiente manera:

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + Ajuste \quad (1)$$

donde

- | | |
|-----------|--|
| <i>R1</i> | es la resistencia de la matriz rocosa; |
| <i>R2</i> | es el índice de calidad de roca, RQD; |
| <i>R3</i> | es la separación entre diaclasas; |
| <i>R4</i> | es el estado de las discontinuidades; |
| <i>R5</i> | es el agua subterránea; |



Ajuste es la orientación Bieniawski (1989).

Para la obtención del RMR de los bancos de determinaron los 5 parámetros y se muestran a continuación:

- a) **Primer Parámetro (R1):** Resistencia uniaxial de la matriz rocosa, el cual se determina con ensayos de compresión simple en laboratorios.

La resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta se ha estimado a partir de la información proporcionada por el personal del área de Geomecánica y de los ensayos in-situ de chequeo con el martillo de geólogo. Según esto, se ha observado que la resistencia compresiva de la roca intacta varía entre 50 a 100 MPa por lo que podemos establecer como valor promedio 75 MPa.

Tabla 8 — Resistencia uniaxial de la matriz rocosa

Descripción	Resistencia a la compresión (MPa)
Muy alta	>250
Alta	100-250
Media	50-100
Baja	25-50
Muy Baja	<25
FUENTE: Departamento de geomecánica Calcesur,2025	

Clasificación: Resistencia Media (50–100 MPa)

Explicación:

Este resultado indica que

- La roca posee resistencia moderada.
- No es altamente competente.
- Permite buena fragmentación.
- No requiere cargas excesivas.

En términos de voladura, una resistencia media favorece el uso de iniciación no electrónica, ya que permite controlar la energía liberada por retardo sin generar vibraciones excesivas.

Valor asignado en RMR: 7 puntos

- b) **Segundo Parámetro (R2):** Cálculo del RQD, este puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen, donde la masa rocosa está libre de arcilla.

La litología involucrada en los tajos es de tipo sedimentario caliza.

Los datos que se tomaron en campo fueron:

Tabla 9 — Características del macizo rocoso del tajo

Características identificadas		Descripción	Valores
Fractura miento		Regular	13 frac/ metro
Resistencia de picota		Media	Se rompe con 2 golpes
Resistencia de compresión		Media	50-100 MPa
RQD		Media	50-75 %
Espaciado de la discontinuidad		Fracturado	0,06 – 0,2 m
Condición de las discontinuidades	Persistencia	Mediana	3-10 m
	Apertura	Cerrada	0,1-1mm
	Rugosidad	Ligeramente rugoso	
	Relleno	Suave < 5mm	
	Intemperización	Ligeramente intemperizado	
Agua subterránea		Mojado	
Orientación de las discontinuidades		Regular	50° - 85°
FUENTE: Departamento de geomecánica Calcesur, 2025			

Con estos datos se obtiene los siguientes parámetros y se realiza la tabla RMR del tajo B1 y B2.

Datos relevantes:

- 13 fracturas/metro
- RQD estimado entre 50–75 %
- Espaciamiento 0,06 – 0,2 m
- Apertura cerrada
- Ligeramente intemperizado
- Mojado

Explicación:

El macizo presenta:

- Fracturamiento regular
- Discontinuidades frecuentes

- Condiciones que facilitan la propagación de ondas sísmicas
- Influencia moderada del agua.

Estas características son coherentes con un macizo Clase III – Regular, donde la energía explosiva debe distribuirse adecuadamente para evitar sobre vibraciones.

c) Determinación del RQD:

$$RQD = 115 - 3,3 * J_v \quad (2)$$

donde

J_v es el número de discontinuidades Arild Palmstrom (1982).

tenemos 13 fracturas/m por lo tanto aplicando la teoría de Palmstrom tenemos:

$$RQD = 115 - 3,3 * 13$$

$$RQD = 72,1 \%$$

Tabla 10 — Índice de calidad de la roca

Calidad de la roca	RQD
Muy mala	0-25 %
Mala	25-50 %
Regular	50-75 %
Buena	75-90 %
Excelente	90-100 %
FUENTE: Departamento de geomecánica Calcesur, 2025	

Clasificación: **Regular (50–75 %)**

Valor RMR: **13 puntos**

Explicación:

Un RQD del 72 % indica:

- Fragmentación natural moderada.
- Presencia significativa de discontinuidades.
- El macizo no es masivo ni extremadamente fracturado.

En voladura, esto implica que:

- La energía no se disipa completamente.
- Existe riesgo de vibraciones si no se controla la carga por retardo.

d) Tercer parámetro (R3): Espaciado de las discontinuidades, es la distancia medida entre los planos de discontinuidad de una misma familia.

Tabla 11 — Espaciado de las juntas

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipos de macizo rocoso
Muy ancho	>2 m	Solido
Ancho	0,6-2 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0,2-0,6 m	En bloques
Cerrado	0,06-0,2 m	Fracturado
Muy cerrado	<0,06 m	Machacado
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

Espaciamiento observado: 0,06 – 0,2 m

Clasificación: Cerrado – Macizo Fracturado

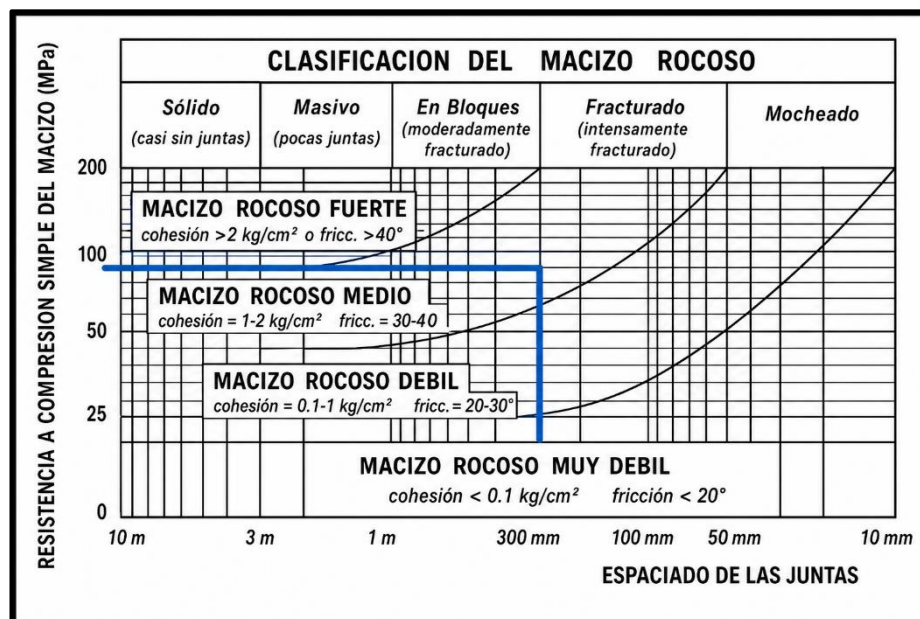
Valor RMR: 8 puntos

Explicación:

Este espaciamiento indica:

- Bloques pequeños a medianos.
- Buena fragmentación natural.
- Menor necesidad de alta energía explosiva.

Sin embargo, también implica que la onda sísmica puede transmitirse a través de planos estructurales, aumentando vibraciones si no se controla la simultaneidad de detonación.



FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989

Figura 7 — Variación de la resistencia del macizo rocoso en relación entre la resistencia a compresión y el espaciado de las juntas.

e) Cuarto Parámetro (R4): Condición de las discontinuidades

- La persistencia, es el tamaño de una discontinuidad.

Tabla 12 — Descripción según la persistencia

Grado	Descripción	Separación de las caras	RMR
1	Muy pequeña	<1 m	6
2	Pequeña	1-3 m	4
3	Mediana	3-10 m	2
4	Alta	10-20 m	1
5	Muy alta	>20 m	0

FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989

- La apertura, es la separación perpendicular de las paredes de una discontinuidad abierta, en la cual el espacio intermedio tiene agua o aire.

Tabla 13 — Descripción según la apertura

Grado	Descripción	Separación de las caras	RMR
1	Abierta	>5 mm	0
2	Moderadamente abierta	1-5 mm	2
3	Cerrada	0,1-1 mm	4
4	Cerrada	<0.1 mm	5
5	No tiene	0	6
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989			

- La rugosidad, determina la resistencia al corte, disminuye cuando la abertura aumenta o el espesor del relleno.

Tabla 14 — Descripción según la rugosidad

Grado	Descripción	RMR
1	Muy rugosa	5
2	Rugosa	4
3	Ligeramente rugosa	3
4	Suave	1
5	Espejo de falla	0
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

- El relleno, es el material entre las paredes de una discontinuidad, con diferentes propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 15 — Descripción según el relleno

Grado	Descripción	RMR
1	Relleno suave >5 mm	0
2	Relleno suave <5 mm	1
3	Relleno duro >5 mm	2
4	Relleno duro <5 mm	4
5	Limpio	6
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

- La intemperización, condiciona las propiedades mecánicas de la roca su resistencia puede disminuir dependiendo del proceso de meteorización, lo que aumenta la porosidad, permeabilidad.

Tabla 16 — Descripción según la intemperización

Grado	Descripción	RMR
1	Descompuesta	0
2	Muy intemperizada	2
3	Moderadamente intemperizada	3
4	Ligeramente intemperizada	5
5	Sana	6
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

Resumiendo, tenemos:

Persistencia: 3–10 m → 2 puntos

Indica continuidad moderada de fracturas.

Apertura: 0,1–1 mm → 4 puntos

Discontinuidades cerradas → mayor fricción → mejor estabilidad.

Rugosidad: Ligeramente rugosa → 3 puntos

Proporciona resistencia a la corte intermedia.

Relleno: Suave < 5 mm → 2 puntos

Reduce resistencia al corte.

Intemperización: Ligeramente intemperizada → 5 puntos

Conserva buena resistencia estructural.

Explicación General:

Estas condiciones indican:

- Estabilidad moderada.
- Influencia media en transmisión de vibraciones.
- Respuesta mecánica típica de macizo regular.

- f) **Quinto Parámetro (R5):** Presencia de agua, tiene gran influencia en una excavación, en relación con el espaciado, la discontinuidad y la apertura puede controlar el flujo del agua hacia las excavaciones.

Tabla 17 — Descripción según la presencia de agua

Grado	Descripción	RMR
1	Seco	15
2	Húmedo	10
3	Mojado	7
4	Goteo	4
5	Flujo	0
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

Valor RMR: 7–10 puntos (según tabla aplicada)

Explicación

El agua:

- Reduce fricción en discontinuidades.
- Aumenta transmisibilidad de ondas.
- Puede incrementar vibraciones si no se controla la carga.

En este caso la influencia es moderada

g) Sexto Parámetro (R6): Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación, es un factor determinante para elegir el tipo de sostenimiento (Ramírez Oyanguren, y otros, 2004).

Si una excavación avanza en forma paralela a un sistema de discontinuidades, la estabilidad será muy desfavorable, especialmente cuando el buzamiento es mayor a 45°. Si una excavación avanza en forma perpendicular a un sistema de discontinuidades, la estabilidad será favorable.

Tabla 18 — Descripción según la orientación de las continuidades

Rumbo perpendicular				Rumbo paralelo al eje		Buzamiento 0°-20° (Independiente del rumbo)
Dirección según Buzamiento		Dirección contra buzamiento				
Buzamiento o 45°-90°	Buzamiento o 20°-45°	Buzamiento o 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento o 45°-90°	Buzamiento o 20°-45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989						

Clasificación: **Regular**

Ajuste aplicado: **-5**

Explicación:

La orientación entre 50° – 85° respecto al banco indica:

- No es completamente desfavorable.
- Tampoco es óptima.
- Genera estabilidad intermedia.

Este ajuste reduce el valor final del RMR

Tabla 19 — Resumen del cálculo del RMR de los tajos

Valorización del macizo rocoso (RMR)																
Parámetros		Escala de valores													Valoración	
Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	> 10 MPa	15	4-10 MPa	12	2-4 MPa	7	1-2 MPa	4	Para estos valores es preferible la resistencia a						
	A comprensión simple	> 250 MPa	15	100-250 MPa	12	50-100 MPa	7	25-50 MPa	4	5-25 MPa	2	1-5 MPa	1	< 1 MPa	0	7
RQD		90- 100 %	20	75-90 %	17	50-75 %	13	25-50 %	8	25 %					3	13
Espaciamiento		> 2m	20	0,6-2m	15	0,2-0.6m	10	0,06-0.2m	8	< 0,06m					5	8
Condición de juntas	Persistencia	< 1m long.	6	1-3 m long.	4	3-10 m	2	10-20 m	1	> 20 m					0	2
	Apertura	Cerrada	6	< 0.1 mm apert.	5	0,1-1 mm	4	1-5 mm	2	> 5 mm					0	4
	Rugosidad	Muy rugosa	5	Rugosa	4	Lig. Rugosa	3	Lisa	1	Espejo de falla					0	3
	Relleno	Limpia	6	Duro < 5 mm	4	Duro > 5 mm	2	Suave <5 mm	1	Suave > 5 mm					0	2
	Intemperización	Sana	6	Lig. Intemp.	5	Mode. Intemp.	3	Muy intemp.	2	Descompuesta					0	5
Agua subterránea		Seco	15	Húmedo	10	Mojado	7	Goteo	4	Flujo					0	10
Ajuste por orientación		Muy Favorable	0	Favorable	-2	Regular	-5	Desfavorable	-10	Muy desfavorable					-12	-5
Valor RMR															49	
Clase de macizo rocoso																
RMR	100-81	80-61			60-41			40-21			20-0					
Descripción	I Muy buena	II Buena			III Regular			IV Mala			V Muy mala					
FUENTE: Elaboración propia																

Interpretación Final:

RMR = 49 → Clase III → Macizo Rocoso Regular

Esto significa:

- Estabilidad media.
- Fracturamiento moderado.
- Resistencia intermedia.
- Sensibilidad moderada a vibraciones.

Relación con la Iniciación no electrónica

En un macizo regular:

- Es necesario controlar la carga por retardo
- Reducir detonación simultánea
- Distribuir energía progresivamente
- Minimizar VPP

La iniciación no electrónica permite:

- Mejor secuencia de retardos
- Mayor precisión temporal
- Reducción de vibraciones
- Optimización de fragmentación

Análisis Técnico del Resultado:

Tabla 20 — Ubicación dentro de la escala RMR

RMR	Clase	Calidad del macizo
100–81	I	Muy buena
80–61	II	Buena
60–41	III	Regular
40–21	IV	Mala
20–0	V	Muy mala
FUENTE: Bieniawski, Z. T, 1989		

El valor 49 se ubica dentro del rango 60–41, por lo tanto, el macizo es regular, con tendencia hacia el límite inferior del rango.

5.1.2 Iniciación no electrónica e incidencia en la reducción de los costos de voladura y productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2

Para realizar la reducción, primero se evalúa los resultados de los costos que se genera con sistema de iniciación electrónica para luego comparar los resultados de los costos que se genera con un sistema de iniciación no electrónica.

Cabe resaltar que en ambos sistemas de iniciación se:

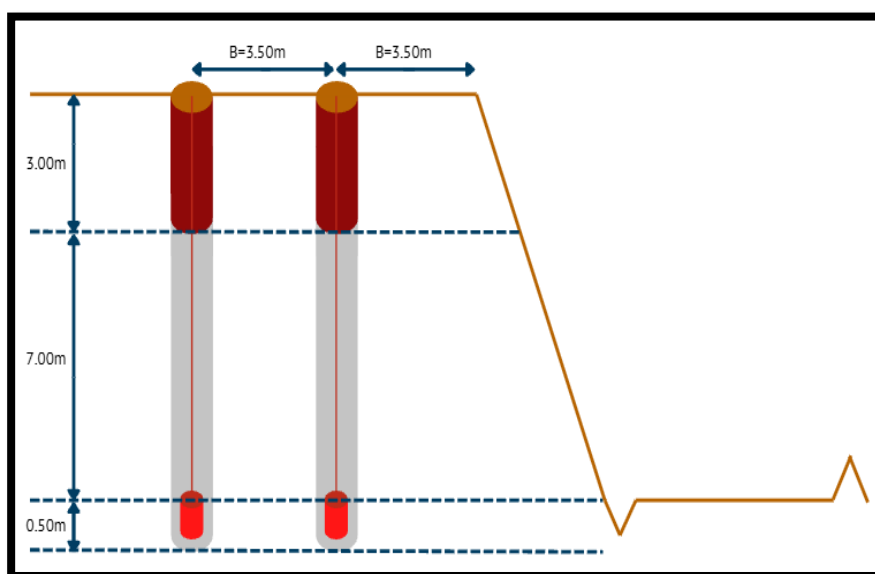
- Efectuaron bajo las mismas condiciones geológicas
- Realizo la perforación con los mismos equipos
- Mantiene igual diámetro de taladro y altura de banco

5.1.2.1 Costos por taladro en una iniciación electrónica

Los costos por taladro en una iniciación electrónica comprenden el conjunto de gastos asociados a los insumos necesarios para la ejecución del proceso de voladura mediante sistemas de detonación electrónica.

- **Diseño de carga de voladura electrónica**

La siguiente imagen representa el diseño de carga de la voladura electrónica aplicado en la operación, el cual sirve como referencia para la correcta ejecución de la carga y programación del sistema de iniciación.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 8 — Diseño de carga iniciación electrónica

- **Parámetros de voladura electrónica**

En el siguiente cuadro se presentan los parámetros de voladura obtenidos de campo, los cuales corresponden a las condiciones reales bajo las que se ejecutó la voladura.

Tabla 21 — Parámetros de voladura electrónica

Parámetro	Cantidad	Unidad
Burden	3,5	m
Espaciamiento	4	m
Diámetro de Taladro	0,127	m
Taco	3,5	m
Sobre perforación	0,5	m
Longitud de taladro	10,5	m
Longitud de carga	7,0	m
FUENTE: Elaboración propia		

Volumen influenciado por taladro:

$$V = B \times S \times H \quad (3)$$

$$V = 3,5m \times 4,0m \times 10m$$

$$V = 140m^3$$

Consumo Estimado de Explosivo

Longitud de carga aproximada: 7 m

Densidad ANFO: 0,85 t/m³

Carga estimada $\approx$ 60 kg/taladro

- **Costo de voladura electrónica por taladro**

El siguiente cuadro muestra los costos asociados a la voladura electrónica por taladro, considerando los elementos necesarios para su ejecución

Tabla 22 — Costos unitarios iniciación electrónica

Insumo	Unidad	PU (US\$)
ANFO	kg	0,55
Emulsión	kg	1,35
Booster 1/2 lb	und	2,1
Detonador electrónico	und	25
Cable duplex	m	0,2
FUENTE: Elaboración propia		

Tabla 23 — Costo por taladro – electrónica

Concepto	Cantidad	Costo (US\$)
ANFO (60 kg)	60	33
Emulsión (5 kg)	2	6,75
Booster	1	2,1
Detonador electrónico	1	25
Cableado	—	3,5
Total, por taladro		US\$70,35
FUENTE: Elaboración propia		

Costo por m³

$$\text{US\$ } 70,35 / 140 \text{ m}^3 = \text{US\$ } 0,503/\text{m}^3$$

En la tabla 22 se presenta los costos unitarios de los principales insumos utilizados en el proceso de voladura mediante un sistema de iniciación electrónica. Entre los materiales considerados se encuentran el ANFO como explosivo principal, la emulsión empleada como carga de fondo para mejorar la iniciación, el booster de ½ libra que actúa como multiplicador de la detonación, el detonador electrónico que permite el control preciso del tiempo de disparo, y el cable dúplex utilizado para la conexión del sistema de iniciación.

Estos costos unitarios representan el valor de mercado aproximado de los insumos empleados en las operaciones de voladura en los tajos B1 y B2

de la Unidad Minera Calcesur S.A., constituyendo la base para el cálculo del costo total de voladura por taladro.

El segundo cuadro muestra el costo total de voladura por taladro utilizando el sistema de iniciación electrónica. Para este cálculo se consideró un consumo promedio de **60 kg de ANFO**, que representa el explosivo principal empleado en la columna de carga, con un costo de **US\$ 33,00**. Asimismo, se incorpora **5 kg de emulsión**, utilizada como carga de fondo para garantizar una adecuada iniciación del explosivo, cuyo costo asciende a **US\$ 6,75**.

Adicionalmente, se incluye el uso de **un booster de ½ libra**, cuyo costo unitario es de **US\$ 2,10** el cual tiene la función de asegurar la transmisión eficiente de la energía detonante hacia la columna explosiva. Del mismo modo, se considera **un detonador electrónico**, cuyo costo es de **US\$ 25,00** siendo este el componente más costoso del sistema debido a su alta precisión en el control de los tiempos de retardo.

Finalmente, se incluye el costo del **cableado dúplex**, necesario para la conexión del sistema de iniciación electrónica, estimado en **US\$ 3,50 por taladro**.

La suma de todos estos insumos genera un **costo total de voladura electrónica por taladro de US\$ 70,35**.

Considerando que cada taladro influye en un volumen aproximado de **140 m³ de roca**, el costo unitario de voladura se obtiene dividiendo el costo total por taladro entre el volumen fragmentado.

$$\text{Costo por m}^3 = \frac{\text{US\$70,35}}{140\text{m}^3}$$

El resultado obtenido es **US\$ 0,503/m³**, lo cual representa el costo unitario de voladura cuando se emplea el sistema de iniciación electrónica en las condiciones geomecánicas y operativas del tajo B1 y B2.

Este valor constituye el **escenario base de costos**, que posteriormente será comparado con el costo obtenido mediante la aplicación del sistema de **iniciación no electrónica**, con el objetivo de evaluar su incidencia en la reducción de los costos de voladura.

5.1.2.2 Costos por taladro en una iniciación no electrónica.

A continuación, se tienen los cálculos realizados de los parámetros de perforación y voladura.

- **Burden**

Para encontrar los parámetros de perforación y voladura óptimos se utilizó el modelo matemático de Ash con el cual se efectuaron los cálculos correspondientes.

$$B = \frac{Kb \cdot D}{12} \quad (4)$$

donde

B es el Burden;

Kb depende del tipo de roca y tipo de explosivo empleado;

D es el diámetro de barreno medido en pulgadas R.L. Ash (1963).

Tabla 24 — Valores de la constante Kb

Tipo de explosivo	Clase de roca		
	Blanda	Media	Dura
Baja densidad (0,8 a 0,9 g/cc) y baja potencia	30	25	20
Densidad media (1,0 a 1,2 g/cc) y potencia media	35	30	25
Alta potencia (1,3 a 1,6 g/cc) y alta potencia	40	35	30
FUENTE: Adaptado de López Jimeno, 2003			

- **Cálculos de los parámetros de voladura:**

- **Burden (B):**

$$B = \frac{Kb \cdot D}{12}$$

$$B = \frac{30 \cdot 4,5}{12}$$

$$B = 11,48 \text{ pies}$$

$$B = 11,48 \text{ pies} \cdot 0,3048 \text{ m/pie}$$

$$B = 3,50 \text{ m}$$

- **Espaciamiento(S):**

$$S = 1,15 \cdot B \quad (5)$$

$$S = 1,15 \cdot 3,50$$

$$S = 4,025 = 4 \text{ m}$$

- **Sobre perforación (J):**

$$J = 0,15 \cdot B \quad (6)$$

$$J = 0,15 \cdot 3,5$$

$$J = 0,5 \text{ m}$$

- **Nuevo Volumen por Taladro:**

$$V = B \cdot S \cdot H$$

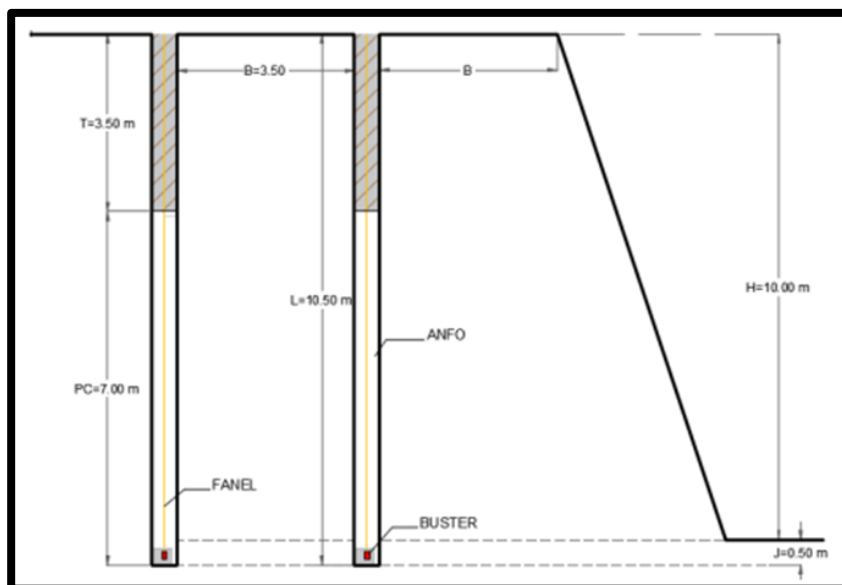
$$V = 3,5 \text{ m} \cdot 4,0 \text{ m} \cdot 10 \text{ m}$$

$$V = 140 \text{ m}^3$$

Aumento de 33 % en volumen influenciado por taladro.

- **Diseño de carga voladura no electrónica**

La siguiente imagen representa el diseño de carga de la voladura no electrónica aplicado en la operación, el cual sirve como referencia para la correcta ejecución de la carga y programación del sistema de iniciación.



FUENTE: PLAN DE MINADO CALCESUR, 2025

Figura 9 — Diseño de carga de iniciación no electrónica

Ajuste de Carga

Gracias a mejor secuencia de retardos:

Carga optimizada ≈ 58 kg/taladro

(se reduce carga por mejor distribución energética)

- **Parámetros de voladura no electrónica**

En el siguiente cuadro se presentan los parámetros de voladura obtenidos de campo, los cuales corresponden a las condiciones reales bajo las que se ejecutó la voladura.

Tabla 25 — Parámetros de voladura no electrónica

Parámetro	Cantidad	Unidad
Burden	3,5	m
Espaciamiento	4,0	m
Diámetro de taladro	0,127	m
Taco	3,5	m
Sobre perforación	0,5	m
Longitud de taladro	10,5	m
Longitud de Carga	7,0	m
FUENTE: Elaboración propia		

- **Costo de voladura no electrónica por taladro**

El siguiente cuadro muestra los costos asociados a la voladura electrónica por taladro, considerando los elementos necesarios para su ejecución.

Tabla 26 — Costos unitarios iniciación no electrónica

Insumo	Unidad	PU (US\$)
ANFO	kg	0,55
Emulsión	kg	1,35
Booster	und	2,1
Fanel Dual	und	2,5
Fanel CTD	und	1,1
Carmex	und	0,6
Cable	m	0,2
FUENTE: Elaboración propia		

Tabla 27 — Costos unitarios iniciación no electrónica

Concepto	Cantidad	Costo (US\$)
ANFO (58 kg)	58	31,9
Emulsión (5 kg)	2	6,75
Booster	1	2,1
Fanel Dual	1	2,5
Fanel CTD	2	2,2
Carmex	1	0,6
Cable	0	3,5
Total, por taladro		US\$46,05
FUENTE: Elaboración propia		

Costo por m³

$$\text{US\$ } 46,05 / 140 \text{ m}^3 = \text{US\$ } 0,329/\text{m}^3$$

En la tabla 26 se presenta los costos unitarios de los insumos utilizados en el proceso de voladura mediante un sistema de iniciación no electrónica. Este sistema se caracteriza por emplear dispositivos de iniciación basados en tubos de choque y el Carmex, los cuales permiten una adecuada secuencia de detonación sin necesidad de equipos electrónicos.

Dentro de los principales materiales considerados se encuentra el ANFO, que actúa como explosivo principal en la columna de carga; la emulsión, utilizada como carga de fondo para garantizar una iniciación eficiente; y el booster, que cumple la función de multiplicar la onda detonante para asegurar la detonación completa del explosivo principal.

Asimismo, se consideran los accesorios de iniciación propios del sistema no electrónico, tales como el Fanel Dual, utilizado para el inicio del circuito de detonación; el Fanel CTD, empleado para generar los retardos necesarios entre taladros; y el Carmex, que actúa como elemento de seguridad y conexión en el sistema de iniciación. Finalmente, se realizan las conexiones correspondientes dentro del diseño de voladura.

Estos costos unitarios corresponden a valores promedio de mercado de los insumos utilizados en las operaciones de voladura en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., y sirven como base para determinar el costo total de voladura por taladro bajo el sistema de iniciación no electrónica.

El segundo cuadro muestra el cálculo del costo total de voladura por taladro utilizando el sistema de iniciación no electrónica. Para este cálculo se consideró un consumo aproximado de 58 kg de ANFO, que representa el explosivo principal utilizado en la columna de carga, con un costo total de US\$ 31,90. Asimismo, se emplean 5kg de emulsión como carga de fondo para mejorar la eficiencia de la detonación, generando un costo de US\$ 6,75.

De igual manera, se considera el uso de un booster, cuyo costo unitario es de US\$ 2,10 el cual permite garantizar la correcta transmisión de la energía detonante hacia la columna de explosivo.

En cuanto al sistema de iniciación no electrónica, se incluyen los siguientes accesorios: un Fanel Dual, con un costo de US\$ 2,50

utilizado para iniciar la secuencia de detonación; dos Fanel CTD, cuyo costo total asciende a US\$ 2,20 empleados para generar los retardos necesarios entre taladros; y un Carmex, con un costo de US\$ 0,60 que contribuye al sistema de conexión y seguridad de la voladura. La suma de todos estos insumos genera un costo total de voladura no electrónica por taladro de US\$ 46,05.

Considerando que cada taladro influye en un volumen aproximado de 140m³ de roca, debido al incremento del burden y espaciamientos optimizados para el macizo rocoso de calidad regular (RMR = 49), el costo unitario de voladura se obtiene dividiendo el costo total por taladro entre el volumen fragmentado.

$$\text{Costo por m}^3 = \frac{\text{US\$ 46,05}}{140\text{m}^3}$$

El resultado obtenido es US\$ 0,329/m³, lo que representa el costo unitario de voladura utilizando el sistema de iniciación no electrónica.

Este resultado evidencia una optimización en el costo de voladura, debido principalmente al mayor volumen de roca fragmentada por taladro y al menor costo de los accesorios de iniciación, lo cual permite mejorar la eficiencia económica del proceso de perforación y voladura en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A.

5.1.2.3 Análisis de los Comparación técnico – económica

Tabla 28 — Comparación técnico – económica

Indicador	Electrónica	No electrónica
Burden	3,5 m	3,5 m
Espaciamiento	4,0 m	4,0 m
Diámetro de taladro	0,127 m	0,127 m
Volumen por taladro	140 m ³	140 m ³
Carga por taladro	60 kg	58 kg
Costo por taladro	US\$ 70,35	US\$ 46,05

Costo por m ³	US\$ 0,503 /m ³	US\$ 0,329 /m ³
FUENTE: Elaboración propia		

La comparación de costos de voladura entre el sistema de iniciación electrónica y el sistema no electrónico evidencia una reducción económica significativa al emplear este último. El costo por taladro disminuye de US\$ 70,35 a US\$ 46,05 lo que representa una reducción absoluta de US\$ 24,30 por taladro. En términos porcentuales, esta diferencia equivale a una disminución aproximada del 34,54 %, lo cual refleja un impacto económico importante en la operación.

Es importante señalar que esta reducción de costos se obtiene manteniendo constantes los parámetros geométricos de diseño, como el burden (3,5m), el espaciamiento (4,0m) y el volumen influenciado por taladro (140m³). Asimismo, la carga por taladro presenta una ligera disminución de 60kg a 58kg, lo que contribuye directamente a la reducción del costo total sin afectar la productividad ni la eficiencia de la voladura.

Desde el punto de vista técnico, la disminución de costos no se atribuye únicamente al menor costo del sistema de iniciación no electrónica, sino principalmente a una mejor eficiencia en el uso de la energía explosiva. Este sistema permite una adecuada secuenciación de retardos, reduciendo la superposición de cargas y optimizando la fragmentación del macizo rocoso. Como resultado, se logra mantener el mismo volumen de roca fragmentada con una menor cantidad de explosivo.

En términos unitarios, el costo de voladura por metro cúbico se reduce de US\$ 0,503 /m³ a US\$ 0,329 /m³ lo que confirma la optimización del proceso. En conjunto, estos resultados demuestran que la aplicación del sistema de iniciación no electrónica permite mejorar la eficiencia técnico-económica de la voladura, logrando una reducción

significativa de costos sin comprometer los parámetros de diseño ni los niveles de producción.

5.1.2.4 Tonelaje producido por Iniciación electrónica

Con el propósito de analizar la influencia de la voladura con detonadores no electrónicos en la productividad de las operaciones mineras del Tajo B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., se realizó una comparación técnica entre el tonelaje producido mediante el sistema de **iniciación electrónica** y el sistema de **iniciación no electrónica**.

La productividad en operaciones de perforación y voladura está directamente relacionada con el **volumen de roca fragmentada por taladro, el tonelaje generado y la eficiencia del consumo de explosivos**, parámetros que permiten evaluar el rendimiento del sistema de iniciación empleado.

Para ello se calcularon los siguientes indicadores:

- Carga de explosivo por taladro
- Volumen roto por taladro
- Tonelaje producido por taladro
- Factor de carga
- Factor de potencia

Estos indicadores permiten determinar la eficiencia del proceso de fragmentación y su impacto en la productividad de la operación minera. Una vez establecidos los parámetros de voladura correspondientes al sistema de iniciación electrónica, se procedió a calcular el tonelaje producido por cada taladro.

- **Carga de columna (Qc)**

Para hallar la carga de columna, antes determinamos la densidad de carga lineal de ANFO, mediante la siguiente relación:

$$D_{lineal} = De * (\phi_{tal})^2 * 0,507 \quad (7)$$

donde



D_{lineal} Densidad lineal de explosivo (Kg/m);

D_e Densidad del explosivo (gr/cm³);

$\emptyset_{tal}$ Diámetro del taladro en pulgadas López Jimeno (1987).

Reemplazado en la ecuación se tiene:

$$D_{lineal} = 0,8gr/cc * (4,5pulg)^2 * 0,507$$

$$D_{lineal} = 8,21Kg/m$$

Esto indica que por cada metro de taladro cargado se emplean aproximadamente 8,21 kg de ANFO.

- **Hallamos la cantidad de carga columna**

$$Q_c = D_{lineal} * long.carga columna \quad (8)$$

$$Q_c = 8,21Kg/m * 7m/tal.$$

$$Q_c = 57,47Kg/tal$$

Sin embargo, considerando el uso adicional de emulsión y booster, la carga total de explosivo por taladro utilizada en la voladura electrónica alcanza aproximadamente 60 kg por taladro.

- **Hallamos la cantidad de volumen roto por taladro**

El volumen fragmentado por cada taladro se calcula mediante:

$$Vol/tal = B * E * H \quad (9)$$

donde

B Burden (m);

E Espaciamiento (m);

H Altura de banco (m) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Vol/tal = 3,5 m * 4,0 m * 10,0m/tal.$$

$$Vol/tal = 140m^3/tal$$

- **Hallamos el tonelaje roto por taladro**

El tonelaje generado por taladro se obtiene mediante:

$$TM/tal = B * S * H * Pe \quad (10)$$

donde



B	Burden (m);
S	Espaciamiento (m);
H	Altura de banco (m);
Pe	Peso específico de roca (TM/m ³) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$TM/tal = 3,5m * 4,0m * 10,0m * 2,2TM/m^3$$

$$TM/tal = 308,0TM$$

Con todos los datos obtenidos hallaremos el factor de carga y factor de potencia

- **Hallando el factor de carga**

$$Fc = Ce/(Vol/tal) \quad (11)$$

donde

Fc	Factor de carga (Kg/m ³);
Ce	Cantidad de explosivo por taladro (Kg/tal);
Vol/tal	Volumen roto por taladro(m ³ /tal) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Fc = (60Kg/tal)/(\frac{140m^3}{tal})$$

$$Fc = 0,428Kg/m^3$$

Este valor representa la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar un metro cúbico de roca.

- **Hallando el factor de potencia**

$$Fp = Ce/(TM/tal) \quad (12)$$

donde

Fp	Factor de potencia (Kg/TM);
Ce	Cantidad de explosivo por taladro (Kg/tal);
TM/tal	Tonelaje roto por taladro (TM/tal) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Fp = (60,00Kg/tal)/(308,00 \frac{TM}{tal})$$



$$Fp = 0,194 \text{ Kg/m}^3$$

Este indicador muestra la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar una tonelada de roca.

5.1.2.5 Tonelaje producido por Iniciación no electrónica

El cálculo para la iniciación no electrónica se realiza utilizando los mismos parámetros geomecánicos, pero considerando una mayor eficiencia en la secuencia de disparo, lo cual permite aumentar el volumen fragmentado por taladro.

- **Carga de columna (Q_c)**

Para hallar la carga de columna, antes determinamos la densidad de carga lineal de ANFO, mediante la siguiente relación:

$$D_{lineal} = De * (\phi_{tal})^2 * 0,507 \quad (13)$$

donde

D_{lineal} Densidad lineal de explosivo (Kg/m);

De Densidad del explosivo (gr/cm³);

ϕ_{tal} Diámetro del taladro en pulgadas López Jimeno (1987).

Reemplazado en la ecuación se tiene:

$$D_{lineal} = 0,8 \text{ gr/cc} * (4,5 \text{ pulg})^2 * 0,507$$

$$D_{lineal} = 8,21 \text{ Kg/m}$$

- **Hallamos la cantidad de carga columna**

$$Q_c = D_{lineal} * \text{long. carga columna}$$

$$Q_c = 8,21 \text{ Kg/m} * 7 \text{ m}$$

$$Q_c = 57,47 \text{ Kg/tal}$$

Considerando los accesorios de iniciación utilizados (fanel dual, fanel CTD y carmex), la carga total utilizada es aproximadamente 58 kg de explosivo por taladro.

- **Hallamos la cantidad de volumen roto por taladro.**

En el sistema de iniciación no electrónica se logró incrementar el espaciamiento de la malla de perforación, obteniéndose:

$$Vol/tal = B * E * H \quad (14)$$

donde

- B Burden (m);
- E Espaciamiento (m);
- H Altura de banco (m) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Vol/tal = 3,5m * 4,0m * 10,0m$$

$$Vol/tal = 140m^3/tal$$

- **Hallamos el tonelaje roto por taladro**

$$TM/tal = B * S * H * Pe \quad (15)$$

donde

- B Burden (m);
- E Espaciamiento (m);
- H Altura de banco (m);
- Pe Peso específico de roca (TM/m³) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$TM/tal = 3,5m * 4,0m * 10,0m * 2,2TM/m^3$$

$$TM/tal = 308,0TM$$

Con todos los datos obtenidos hallaremos el factor de carga y factor de potencia

- **Hallando el factor de carga**

$$Fc = Ce/(Vol/tal) \quad (16)$$

donde

- Fc Factor de carga (Kg/m³);
- Ce Cantidad de explosivo por taladro (Kg/tal);
- Vol/tal Volumen roto por taladro(m³/tal) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Fc = 58,00 Kg/tal/140m^3/tal$$

$$Fc = 0,41Kg/m^3$$

- **Hallando el factor de potencia**

$$Fp = Ce / (TM / tal) \quad (17)$$

donde

Fp Factor de potencia (Kg/TM);

Ce Cantidad de explosivo por taladro (Kg/tal);

TM/tal Tonelaje roto por taladro (TM/tal) Konya y Walter (1990).

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$Fp = \left(\frac{58,00Kg}{tal} \right) / \left(\frac{308,0TM}{tal} \right)$$

$$Fp = 0,190 \text{ Kg/TM}$$

5.1.2.6 Análisis comparativo de productividad

La comparación entre ambos sistemas de iniciación muestra diferencias significativas en la productividad del proceso de voladura.

Tabla 29 — Comparación de sistemas de iniciación

Parámetro	Electrónica	No electrónica
Volumen por taladro	140 m ³	140 m ³
Tonelaje por taladro	308 TM	308 TM
Factor de carga	0,428 kg/m ³	0,41 kg/m ³
Factor de potencia	0,194 kg/TM	0,190 kg/TM
FUENTE: Elaboración propia		

Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación del sistema de iniciación no electrónica tiene una incidencia directa en la reducción de los costos de voladura en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A.

Se observa que, manteniéndose constantes el volumen por taladro (140 m³) y el tonelaje por taladro (308 TM), el factor de carga se reduce de 0,428 kg/m³ en el sistema de iniciación electrónica a 0,41 kg/m³ con el

uso de iniciación no electrónica. De manera similar, el factor de potencia disminuye de 0,194 kg/TM a 0,19 kg/TM.

Esta reducción en los indicadores de consumo de explosivo refleja una mayor eficiencia en el uso de la energía explosiva, atribuida a una mejor secuencia de iniciación y control de los retardos. En consecuencia, se logra optimizar la fragmentación del macizo rocoso utilizando menor cantidad de explosivo.

En términos económicos, esta disminución en el consumo específico de explosivos se traduce en una reducción directa de los costos de voladura por unidad de volumen y tonelada producida, evidenciando la ventaja técnica y económica del sistema de iniciación no electrónica frente al sistema electrónico.

5.1.3 Evaluación del control de vibraciones mediante la aplicación de la iniciación no electrónica en voladuras en los tajos B1 y B2

Teniendo en consideración las normas de control de vibraciones aplicadas en la Unidad Minera, estas se toman como referencia para la evaluación e interpretación de los resultados obtenidos en los monitoreos de vibraciones.

a) Norma Alemana – DIN 4150

Los criterios utilizados por la norma son:

- Su campo de aplicación es a todo tipo de fuente.
- Las variables medidas son: PVS (Velocidad de partícula resultante) y PPV (Velocidad pico partícula – Vertical).
- Los valores indicativos recomendados dependen del tipo de edificación.

Tabla 30 — Valores guía de velocidad pico de partícula (PPV) para diferentes tipos de edificaciones según la frecuencia de vibración

Clase de construcción	1–10 Hz	10–50 Hz	50–100 Hz	Todas las frecuencias
Edificios industriales, oficinas y similares	20	20-40	40-50	40



Edificaciones residenciales	5	5-15	15-20	15
Otras edificaciones sensibles a vibraciones	3	3-8	8-10	8
FUENTE: Adaptado de DIN 4150-3:1999, Vibration in buildings – Part 3: effects on structures.				

b) Norma Peruana

La vibración máxima de tierra no deberá exceder los siguiente limites en donde se encuentre cualquier tipo de vivienda, edificio público, colegio, iglesia, o edificios comunal o institucional fuera de voladura:

Tabla 31 — Límites de velocidad pico de partícula (PPV) y factores de distancia escalada para voladuras sin monitoreo sísmico

Distancia desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida para vibración de tierra en pulgadas / segundo	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico
0 a 300	1,25	50
301 a 5000	1,00	55
>5000ft	0,75	65
FUENTE: Adaptado de OSMRE (30 CFR §816.67), basado en Siskind et al. (1980), USBM RI 8507.		

5.1.3.1 Análisis de las vibraciones generadas en voladuras con sistema de iniciación electrónico en los tajos B1 y B2

En esta sección se presenta el análisis de las vibraciones generadas durante las voladuras realizadas en los tajos B1 y B2 antes de la implementación del sistema de iniciación no electrónica. Para ello, se utilizaron equipos sismográficos tipo Micromate, los cuales permitieron registrar parámetros fundamentales como la velocidad de partícula pico (VPP), frecuencia dominante, aceleración y desplazamiento del macizo rocoso.

Los resultados obtenidos evidencian que las voladuras con sistema de iniciación electrónico generan niveles de vibración variables, alcanzando valores máximos de velocidad de partícula pico de hasta 27,045 mm/s en la suma vectorial, así como registros de 13,763 mm/s



y 10,798 mm/s en diferentes eventos monitoreados. Estos valores se encuentran asociados a frecuencias dominantes que oscilan principalmente entre 5 Hz y 12 Hz, lo que indica una propagación de ondas sísmicas es de baja a media frecuencia, con potencial incidencia en la estabilidad del macizo rocoso.

Asimismo, se observa una variabilidad significativa en la respuesta del terreno, con eventos que presentan menores niveles de vibración, del orden de 7,194 mm/s, lo que refleja la influencia de factores como la distribución de carga explosiva, condiciones geomecánicas y secuencia de detonación. Esta dispersión en los resultados evidencia que el sistema de iniciación electrónica no garantiza una adecuada uniformidad en la liberación de energía, generando picos de vibración que pueden afectar la estabilidad del macizo rocoso y las labores cercanas.

En este contexto, los niveles de vibración registrados antes de la aplicación de la iniciación no electrónica constituyen la línea base para evaluar la eficiencia del nuevo sistema de detonación, permitiendo establecer una comparación directa en términos de control de vibraciones y optimización del uso de la energía explosiva.

5.1.3.2 Análisis de las vibraciones generadas mediante la aplicación del sistema de iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2

En esta sección se presenta el análisis de los registros de vibraciones obtenidos en los tajos B1 y B2 posterior a la implementación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras. Los datos fueron registrados mediante equipos sismográficos, permitiendo evaluar parámetros fundamentales como la velocidad pico de partícula (VPP), frecuencia dominante y respuesta dinámica del macizo rocoso.

De acuerdo con los reportes analizados, se observa que los valores de velocidad de partícula pico presentan variaciones controladas, registrándose valores entre 1,319 mm/s y 5,363 mm/s en la suma vectorial, evidenciando una adecuada distribución de la energía

explosiva en el macizo rocoso. Asimismo, en varios eventos se reportan valores menores a 3,6 mm/s, lo cual indica una tendencia hacia la reducción de vibraciones en comparación con condiciones tradicionales.

En cuanto al comportamiento frecuencial, las vibraciones se presentan en rangos predominantemente entre 3 Hz y 7 Hz, aunque en algunos casos se registran frecuencias más altas (hasta 30 Hz), lo que sugiere una mejor fragmentación de la energía y menor riesgo de daño estructural, dado que las frecuencias más elevadas tienden a ser menos perjudiciales para estructuras cercanas.

Por otro lado, los niveles de presión sonora registrados se mantuvieron en valores relativamente bajos, con picos desde 0,93 Pa hasta 6,61 Pa, lo que refleja un adecuado control del impacto acústico generado por las voladuras.

Estos resultados evidencian que la aplicación del sistema de iniciación no electrónica permite una mejor secuenciación de los disparos, logrando una liberación progresiva de la energía explosiva. Esto contribuye directamente a la disminución de vibraciones, evitando la superposición de ondas sísmicas y mejorando la interacción entre la voladura y el macizo rocoso.

En conjunto, el análisis demuestra que la iniciación no electrónica constituye una alternativa eficiente para el control de vibraciones, especialmente en macizos rocosos de calidad regular (Clase III), donde es fundamental optimizar la distribución de la energía para garantizar estabilidad, seguridad y eficiencia operativa.



FUENTE: Elaboración propia

Figura 10 — Monitoreo de vibraciones con sismógrafo micromate

5.1.3.3 Comparación del comportamiento de las vibraciones entre el sistema de iniciación electrónico y la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2

A partir del análisis de los registros sismográficos obtenidos antes y después de la implementación del sistema de iniciación no electrónica, se realizó una comparación del comportamiento vibracional en los tajos B1 y B2, considerando parámetros como la velocidad pico de partícula (VPP), frecuencia dominante y presión sonora.

En relación con la velocidad pico de partícula, se observa que con el sistema de iniciación no electrónica los valores registrados presentan una mejor distribución y control, evidenciándose una reducción en varios eventos y evitando concentraciones elevadas de energía. Mientras que en el sistema electrónico las vibraciones tendían a concentrarse por la detonación simultánea o poco controlada, con la iniciación no electrónica se logra una liberación progresiva de energía, reduciendo la superposición de ondas sísmicas.

Respecto a la frecuencia dominante, el sistema electrónico presentaba frecuencias relativamente bajas, lo cual puede generar mayores efectos estructurales en el macizo rocoso. En contraste, con la iniciación no electrónica se observan frecuencias más variadas e incluso más altas, lo que implica una menor capacidad de daño, ya que las vibraciones de mayor frecuencia tienden a disiparse más rápidamente en el medio.

En cuanto a la presión sonora, los registros posteriores a la implementación del sistema no electrónico evidencian valores moderados y controlados, indicando una mejora en el comportamiento global de la voladura y una menor liberación abrupta de energía.

En términos generales, la iniciación no electrónica demuestra una mayor eficiencia en el control de vibraciones, debido a su capacidad de secuenciar adecuadamente los retardos, optimizar la interacción entre taladros y reducir la carga efectiva detonada por intervalo de tiempo. Esto resulta especialmente favorable en macizos rocosos de calidad regular ($RMR = 49$), donde el control de la energía es un factor crítico para mantener la estabilidad.

Tabla 32 — Resumen de comparación entre los sistemas de iniciación

Parámetro	Iniciación electrónica	Iniciación no electrónica	Interpretación Técnica
Velocidad pico de partícula (VPP)	Valores más variables y con tendencia a picos elevados	Valores más controlados ($\approx 1,3$ a $5,3$ mm/s)	Mejor control de energía explosiva
Distribución de energía	Liberación simultánea o poco controlada	Liberación secuencial y progresiva	Reduce superposición de ondas
Frecuencia dominante	Predominantemente baja	Rango variado (3 Hz – 30 Hz)	Menor potencial de daño estructural
Presión sonora	Mayor liberación abrupta de energía	Valores controlados ($\approx 0,9$ a $6,6$ Pa)	Menor impacto acústico
Interacción taladro-macizo	Menor control	Mejor acoplamiento energía-roca	Mayor eficiencia de fragmentación
Control de vibraciones	Eficiente	Eficiente	Cumplimiento de estándares

Seguridad y estabilidad	Riesgo moderado	Riesgo moderado	Condición más segura
FUENTE: Elaboración propia			

5.2 Discusión

Campos (2021), en su investigación sobre el modelamiento y diseño de mallas de perforación para controlar la dilución en una mina a cielo abierto, concluyeron que la aplicación de estudios geomecánicos permitió optimizar el diseño de la malla de perforación, mejorar la distribución del factor de carga y aumentar la eficiencia de las operaciones de perforación y voladura. Metodológicamente desarrollaron una investigación aplicada basada en la caracterización geomecánica del macizo rocoso y el diseño técnico de la malla de perforación para evaluar su influencia sobre la dilución del mineral. En comparación, la presente investigación determinó un RMR de 49 (Clase III – macizo rocoso regular), con estabilidad media y sensibilidad moderada a las vibraciones, resultado que permitió mantener una malla de 3,5 m de burden y 4,0 m de espaciamiento, además de optimizar la secuencia de iniciación no electrónica para controlar las vibraciones y el consumo de explosivos. Ambos estudios coinciden en que la caracterización geomecánica constituye la base para el diseño de la voladura; sin embargo, no es posible realizar una comparación numérica directa porque Campos et al. no reportan valores de RMR, burden o espaciamiento. La diferencia radica en que dicho antecedente estuvo orientado al control de la dilución, mientras que la presente investigación utilizó la clasificación geomecánica como fundamento para optimizar el control de vibraciones, la reducción de costos y el consumo específico de explosivos.

Catacora (2026), en su investigación sobre la implementación de detonadores electrónicos en la Mina Marcona, reportó un incremento de 15,86 % en la producción, una reducción de 12,50 % en el factor de potencia y una disminución del costo unitario de US\$ 0,88/TM a US\$ 0,78/TM (10,95 %), concluyendo que los detonadores electrónicos incrementan la productividad y reducen los costos operacionales. Metodológicamente desarrolló una investigación aplicada con diseño cuasiexperimental, comparando más de 180 voladuras antes y después de la implementación de detonadores electrónicos, evaluando productividad, fragmentación, costos y consumo de explosivos. En la presente investigación se obtuvo una reducción del costo por taladro de US\$ 70,35 a US\$ 46,05 (34,54 %), mientras que el costo por metro cúbico disminuyó de US\$ 0,503/m³ a US\$ 0,329/m³ (34,59 %); además, el factor de carga disminuyó de 0,428 a



0,410 kg/m³ (4,2 %) y el factor de potencia de 0,194 a 0,190 kg/TM (2,1 %), manteniendo constante la producción de 140 m³ y 308 TM por taladro. Al comparar ambos estudios, se observa que la reducción porcentual del costo obtenida en la presente investigación fue superior (29,6 % frente a 10,95 %), mientras que la disminución del factor de potencia fue menor (2,1 % frente a 12,5 %). Estas diferencias se explican porque Catacora evaluó detonadores electrónicos en una mina con bancos de mayor altura, taladros de gran diámetro y mayores cargas explosivas, mientras que la presente investigación evaluó la sustitución del sistema electrónico por uno no electrónico en un macizo con RMR = 49, priorizando la eficiencia económica sin modificar la producción.

Araujo et al. (2025), en su investigación sobre la influencia de los detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso de la Unidad Minera Cerro Lindo, determinaron que al reducir la carga operante de 90 kg a 35 kg por retardo, la velocidad pico de partícula (VPP) disminuyó de 79,77 mm/s a 31,24 mm/s, equivalente a una reducción del 60,8 %, concluyendo que la sincronización precisa de los retardos permite controlar significativamente las vibraciones generadas por la voladura. Metodológicamente realizaron una investigación aplicada con diseño cuasiexperimental, utilizando monitoreo sísmico mediante geófonos y evaluando el comportamiento dinámico del macizo rocoso durante las voladuras. En la presente investigación se registró que el sistema electrónico alcanzó una VPP máxima de 27,045 mm/s, mientras que con la iniciación no electrónica los valores oscilaron entre 1,319 y 5,363 mm/s, obteniéndose una reducción máxima aproximada del 80,2 %. Comparando ambos estudios, la reducción lograda en la presente investigación fue aproximadamente 19,4 puntos porcentuales mayor que la reportada por Araujo et al., además de registrar una VPP final máxima considerablemente menor (5,363 mm/s frente a 31,24 mm/s). Estas diferencias pueden atribuirse a que ambas investigaciones utilizaron tecnologías de iniciación distintas, diferentes condiciones geomecánicas, cargas por retardo, geometrías de malla, distancias de monitoreo y características del macizo rocoso. No obstante, ambos estudios coinciden en que el adecuado control de la secuencia de detonación constituye el principal factor para reducir las vibraciones inducidas por la voladura.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusión general

Se determinó que la aplicación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar de manera efectiva las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., debido a una mejor secuenciación de los retardos y un adecuado control de la energía explosiva en un macizo rocoso con $RMR = 49$ (Clase III – regular), caracterizado por una sensibilidad moderada a las vibraciones; en este sentido, los resultados de los controles sísmicos evidencian que las velocidades pico de partícula (VPP) se mantuvieron dentro de rangos controlados, registrándose valores entre aproximadamente 1,319 mm/s y 5,363 mm/s en la suma vectorial, con predominancia de eventos por debajo de 4,0 mm/s, así como un comportamiento frecuencial principalmente entre 3 Hz y 7 Hz, con presencia de frecuencias más altas que favorecen la disipación de energía y reducen el potencial de daño estructural, lo que demuestra una menor superposición de ondas sísmicas y una liberación progresiva de la energía en comparación con el sistema electrónico; asimismo, se logró optimizar la carga por taladro de 60 kg a 58 kg, reducir el factor de carga de 0,428 kg/m³ a 0,410 kg/m³ y el factor de potencia de 0,194 kg/TM a 0,19 kg/TM, manteniendo constante la producción de 140 m³ y 308 TM por taladro, evidenciando una menor cantidad de explosivo detonado por intervalo de tiempo y, por ende, una disminución de las vibraciones generadas; finalmente, se obtuvo una mejora significativa en la eficiencia económica, reduciendo el costo por taladro de US\$70,35 a US\$46,05 (34,53 %) y el costo unitario de US\$0,503/m³ a US\$0,329/m³, demostrando que la iniciación no electrónica no solo permite un control eficiente de las vibraciones, sino también una optimización integral del proceso de voladura en términos técnicos, operativos y económicos.



6.1.2 Conclusiones específicas

Se determinó que los trabajos de mecánica de rocas en los tajos B1 y B2 se realizaron mediante la clasificación geomecánica del macizo rocoso, obteniéndose un $RMR = 49$, lo que corresponde a un macizo rocoso Clase III (regular). Esta condición evidenció una estabilidad media, fracturamiento moderado y sensibilidad intermedia a las vibraciones, lo que hizo necesario implementar un adecuado control de la energía explosiva. En este contexto, la aplicación de la iniciación no electrónica permitió optimizar la secuencia de detonación y reducir la carga por taladro de 60 kg a 58 kg, contribuyendo al control de vibraciones y a una mejor respuesta del macizo rocoso frente a la voladura.

Se evaluó que la aplicación del sistema de iniciación no electrónica incide significativamente en la reducción de los costos de voladura en los tajos B1 y B2, logrando disminuir el costo por taladro de US\$70,35 a US\$46,05, lo que representa un ahorro de US\$24,3 equivalente al 34,53 %. Asimismo, el costo unitario de voladura se redujo de US\$0,503/m³ a US\$0,329/m³, manteniendo constantes los parámetros de diseño como burden (3,5 m), espaciamiento (4,0 m) y volumen por taladro (140 m³). Estos resultados demuestran una mejora significativa en la eficiencia técnico-económica del proceso de voladura.

Se analizó que la voladura con detonadores no electrónicos influye positivamente en la productividad de las operaciones mineras, evidenciándose una optimización en el consumo de explosivos sin afectar la producción. Los resultados muestran que, manteniéndose constante el volumen por taladro (140 m³) y el tonelaje (308 TM), el factor de carga se redujo de 0,428 kg/m³ a 0,410 kg/m³ y el factor de potencia de 0,194 kg/TM a 0,190 kg/TM, lo que indica una mayor eficiencia en el uso de la energía explosiva. Esta optimización permite mantener los niveles de producción con menor consumo de insumos, mejorando así la productividad y eficiencia operativa.

6.2 Recomendaciones.

6.2.1 Recomendación general

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo de vibraciones (VPP) mediante sismógrafos en los tajos B1 y B2, con la finalidad de validar en campo la reducción de vibraciones lograda con la iniciación no electrónica y



establecer curvas de atenuación propias de la operación. Asimismo, se sugiere complementar el diseño de voladura con el uso de software de simulación de voladuras, que permita predecir el comportamiento de las ondas sísmicas y optimizar la secuencia de retardos, garantizando un mayor control de las vibraciones en macizos rocosos de Clase III.

6.2.2 Recomendaciones específicas

Se recomienda profundizar los estudios de mecánica de rocas mediante la incorporación de ensayos geomecánicos complementarios, como resistencia a la compresión simple (UCS), índice de carga puntual (PLT) y análisis de discontinuidades, con el fin de mejorar la caracterización del macizo rocoso. Asimismo, se sugiere implementar un mapeo geomecánico continuo en campo, que permita ajustar dinámicamente los parámetros de voladura según las variaciones del macizo, optimizando aún más el control de vibraciones y la estabilidad de los taludes.

Se recomienda realizar un análisis detallado de costos operativos integrales, considerando no solo el costo de explosivos, sino también variables como tiempos de carguío, mantenimiento de equipos, consumo de combustible y rendimiento de maquinaria, con el fin de cuantificar el impacto económico total de la iniciación no electrónica. Además, se sugiere evaluar la posibilidad de implementar indicadores de gestión (KPIs) como costo por tonelada, costo por banco volado y eficiencia de voladura, para un control más preciso y sostenido de los costos en la operación.

Se recomienda complementar el análisis de productividad con estudios de fragmentación mediante software especializado (Split-Desktop u otros), con el fin de cuantificar la distribución granulométrica del material volado y su influencia en los procesos de carguío y chancado. Asimismo, se sugiere evaluar la relación entre fragmentación y tiempos de ciclo de los equipos de carguío y acarreo, lo que permitirá optimizar integralmente la productividad de la operación minera y maximizar los beneficios obtenidos con la aplicación de la iniciación no electrónica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, ZURITA Jeyson Diomenes y POLINO, PUENTE Eleving. 2025.** *Influencia De Voladura Masiva Utilizando Detonadores Electrónicos En El Comportamiento Dinámico Del Macizo Rocos, Tajo 821g-Ob6a, Unidad Minera Cerro Lindo*. Universidad Continental, Huancayo : 2025.
- ARCOS, VALVERDE Daniel. 2007.** [En Línea] Geco, Junio De 2007. Http://Geco.Mineroartesanal.Com/Tiki-Download_Wiki_Attachment.Php?Attid=1198.
- CABADA, CASTAÑEDA Oscar Ivan y DIAZ, ABANTO Jeisy Jomeiny. 2022.** *Aplicación Del Sistema De Iniciación Electrónico Digishot Plus Para Optimizar La Fragmentación De Rocas En El Proceso De Voladura En Una Empresa Minera De Cajamarca - 2022*". Universidad Privada Del Norte, Cajamarca : 2022.
- CAMPOS, LOPEZ Enerio y LOZANO, QUILICHE Ruben. 2021 .** *Modelamiento Y Diseño De Malla De Perforación Para Controlar La Dilución, En Tajos De Producción En Una Mina A Cielo Abierto 2021*. Universidad Privada Del Norte, Cajamarca : 2021 .
- CARDENAS, CAYETANO Luis Jorge. 2023.** *Uso Del Pirotécnico Softbreaker Para La Fragmentación De Roca En La Construcción Del Acceso Al Proyecto Obras Pie De Presa En Compañía Minera Antamina*, <Http://Repositorio.Undac.Edu.Pe/Handle/Undac/3399>. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro De Pasco : 2023.
- CATACORA, RAMOS Brian Javier. 2026.** *Optimización De La Productividad Por La Implementación De Detonadores Electrónicos En La Voladura De Mineral En La Mina Marcona, 2025*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann , Tacna : 2026.
- CHÁVEZ, BARRIENTOS Luis Alonso. 2005.** *Uso Y Control De Explosivos Aplicados En Explotación De Bancos De Material*. Chrome-Extension://Efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/Http://Biblioteca.Usac.Edu.Gt/Tesis/08/08_2538_C.Pdf. Universidad De San Carlos De Guatemala, Guatemala : 2005.
- CHIPANA, TITO Rudy Milton. 2015.** Repositorio.Unap.Edu.Pe. [En Línea] Universidad Nacional Del Altiplano, 2015. Http://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unap/1937/Chipana_Tito_Rudy_Milton.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y.
- CHURA, Lope Wilberth. 2019.** *Fundamento Sobre Explosivos Y La Teoria De Detonacion*, Https://Ctivitae.Concytec.Gob.Pe/Appdirectorioci/Verdatosinvestigador.Do?Id_Investigador=19689 6. Puno : Ed, Universidad Nacional Del Altiplano, 2019.
- CUEVA, ROJAS Alexander y HUAYNATE, RÍOS Andree William. 2020.** *Aplicación De Fragmentador De Roca, Plasma Frag Be, En Sectores Productivos De La Compañía Minera Cerro De Pasco Cercanas A Zonas Urbanas Para Reducir Impactos Generados Durante La Fragmentación Del*



Macizo Roco, <https://Repositorioacademico.Upc.Edu.Pe/H>. Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas, Lima : 2020.

Ds.024, Decreto Supremo 024-2016-Em. 2016. *Revistaseguridadminera. Revistaseguridadminera.* [En Línea] Revistaseguridadminera, 28 De Octubre De 2016. [Citado El: 16 De Enero De 2019.] <http://www.Revistaseguridadminera.Com/Reglamento-Ds-024-2016-Em/>.

GAMARRA, CACERES Alex Rolf. 2011. <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe>. <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe>. [En Línea] Universidad Nacional Del Centro Del Perú, 2011. [Citado El: 03 De Octubre De 2019.] <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Uncp/3163/Gamarra%20caceres.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y>.

LARA, BALTAZAR Oscar Rafael. 2013. <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe>. <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe>. [En Línea] Universidad Nacional Del Centro Del Perú, 2013. [Citado El: 21 De Octubre De 2019.] <http://Repositorio.Uncp.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Uncp/2173/Lara%20baltazar.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y>.

LOPEZ, JIMENO Carlos. 2003. *Manual De Perforacion Y Voladura De Rocas*, <https://Oa.Upm.Es/86748/>. Lima : Carlos Lopez Jimeno, 2003.

LOZANO, FERNANDEZ Manuel. 2012. *Es.Slideshare.Net. Es.Slideshare.Net.* [En Línea] Slideshare, 5 De Junio De 2012. [Citado El: 19 De Octubre De 2019.] <https://Es.Slideshare.Net/Georgesar7/Perforacin-En-Mineria>.

MAMANI, CHIQUI Hugo Hernan. 2024. *Diseño De Malla De Perforación Y Voladura Para La Reducción De Costos Unitarios En La Galería 206e - Unidad Minera Yanaquihua S.A.C.* <https://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Handle/20.500.14082/22669>. Universidad Nacional Del Altiplano, Puno : 2024.

PAUCAR, CONDE Gabriel Marcelino. 2015. *Diseño Y Estabilidad De Botaderos De Desmonte Para La Remediación De Pasivos Ambientales De La Mina Recuperada - Huancavelica.* <https://Repositorio.Uncp.Edu.Pe/Items/09357fdc-0bc3-4b63-8165-3944700b44c0>. Universidad Nacional Del Centro Del Peru, Huancayo : 2015.

Posada. 2019. *Voladura De Rocas En Minería Subterránea En Perú*, www.Posada.Pe. www.Posada.Pe. [En Línea] Voladura De Rocas En Minería Subterránea En Perú, 2019. [Citado El: 20 De Octubre De 2019.] <https://www.Posada.Pe/Voladura-De-Rocas-En-Mineria-Subterranea/>.

QUISPE, MAGALLAN Manuelito. 2023. *Influencia De La Implementación De Detonadores Electrónicos En El Proceso De Voladura En La Unidad Minera Cerro Corona-Cajamarca, 2019.* <https://Repositorio.Unamba.Edu.Pe/Handle/Unamba/1309>. Universidad Nacional Micaela Bastidas De Apurímac, Abancay : 2023.

RIVERA, YALICO Yhina Milvia. 2025. *Aplicación De La Iniciación Electrónica Para Mejorar El Sistema De Gestión De Seguridad Y Productividad En El Proceso De Voladura De La U.E.A. Heraldos Negro.* Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión , Cerro De Pasco : 2025.



ROMERO, NARANJO Francisco Rubén. 2009. *Manual Técnico Para El Uso De Explosivos, Chrome-*

Extension:://Efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/Https://Repositorio.Uta.Edu.Ec/Server/Api/Core/Bitstreams/F993185a-5324-4cb6-997d-B3e5f5838bec/Content. Universidad Técnica De Ambato, Ambato : 2009.

SALAZAR, RUBILAR Germán Odlanier. 2005. *Remoción De Rocas Con Explosivos, Para La Construcción De Caminos, Chrome-*

Extension:://Efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/Http://Cybertesis.Uach.Cl/Tesis/Uach/2005/Bmfcis161r/Doc/Bmfcis161r.Pdf. Universidad Austral De Chile, Valdivia : 2005.

SERIN, ALVITES Roger Genix. 2017. Dspace.Unitru.Edu.Pe. *Dspace.Unitru.Edu.Pe.* [En Línea] Universidad Nacional De Trujillo, 2017. [Citado El: 07 De Julio De 2019.] Http://Dspace.Unitru.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unitru/10026/Serin%20alvites%2c%20roger%20genix.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y.

SUAREZ, DIAZ Jaime. 2013. Wwww.Academia.Edu. *Wwww.Academia.Edu.* [En Línea] Universidad Industrial De Santander, 2013. [Citado El: 15 De Diciembre De 2019.] Https://Wwww.Academia.Edu/4639146/Clasificacion_De_Macizo_Rocoso.



ANEXOS



Anexo A

Tabla 33 — Matriz de consistencia

Optimización de la voladura con la iniciación no electrónica para el control de las vibraciones en los tajos B1 y B2, de la Unidad Minera Calcesur S. A. – Juliaca, 2025				
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones
Problema general ¿De qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025?	Objetivo general Determinar de qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.	Hipótesis general La aplicación de la iniciación no electrónica en las voladuras permite controlar de manera significativa las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.	Variable independiente Iniciación no electrónica en las voladuras	• Secuencia de iniciación • Tiempos de Retardo • Diseño de malla de voladura
Problemas específicos ¿Cómo se realizarán los trabajos de mecánica de rocas para aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025? ¿En qué medida la implementación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras incide en la optimización de los costos de voladura y la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025? ¿De qué manera la aplicación de la iniciación no electrónica contribuye al control de las vibraciones generadas en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A., - Juliaca, 2025?	Objetivos específicos Identificar cómo se realizarán los trabajos de mecánica de rocas para la aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025. Determinar la incidencia de la implementación del sistema de iniciación no electrónica en la optimización de los costos de voladura y la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025. Evaluar el efecto de la iniciación no electrónica en la reducción de los niveles de vibración generados por las voladuras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025.	Hipótesis específicas La realización adecuada de los trabajos de mecánica de rocas permite una correcta aplicación de la iniciación no electrónica en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025. La implementación del sistema de iniciación no electrónica en las voladuras optimiza los costos de voladura y mejora la productividad de las operaciones mineras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. - Juliaca, 2025. La aplicación de la iniciación no electrónica reduce significativamente los niveles de vibración generados por las voladuras en los tajos B1 y B2 de la Unidad Minera Calcesur S.A. – Juliaca, 2025.	Variable dependiente Control de las vibraciones generadas por las voladuras	• Mecánica de rocas • Costos de voladura • Niveles de vibración

Anexo B

Panel fotográfico



Figura 11 — Personal de voladura CALCESUR S.A.



Figura 12 — Carguío de taladros con ANFO a granel



Figura 13 — Perforadora DTH Sandvik



Figura 14 — Equipo de perforación FlexiRoc D65



Figura 15 — Fanel dual y multiplicador Booster para el primado



Figura 16 — Emulsión encartuchada FAMESA S.A.C.



Figura 18 — Fotografías de los bancos de producción tajo B1 y B2



Figura 17 — Equipo de sismógrafo Micromate Instantel para el monitoreo de vibraciones



Figura 19 — Carguío de taladros de producción de los tajos B1 y B2



Figura 20 — Acarreo de material volado de los tajos B1 y B2

Lima, July 09 2025

CALIBRATION CERTIFICATE

Part Number: 721A0201

Description: Micromate ISEE Linear Microphone

Serial Number: UL6107

Calibration Date: JUL 09, 2025

TEST REFERENCE*	MODEL	SERIAL
Reference accelerometer	301A10	4123
Reference microphone GRAS	40AZ	504656
Preamplifier GRAS	26CG	274889
Dynamic signal analyser CRYSTAL	Spider-81B	1342432
Digital multimeter FLUKE	87 V	2110095

Geoteknik S.A.C. certifies that this unit has been calibrated and that the results are consistent with the specifications published regarding this instrument.

Please note that the sensor check function is intended to check that the sensors are connected to the unit, installed in the proper orientation and sufficiently level to operate properly. Geoteknik S.A.C. recommends that products be returned to Geoteknik S.A.C. for annual calibration.

Geoteknik S.A.C. is an Authorized Calibration Service Center for Instantel

Calibrated By:

Antony Lizana



* References are traceable to NIST or equivalent

Figura 21 — Certificado de calibración de sismógrafo Micromate

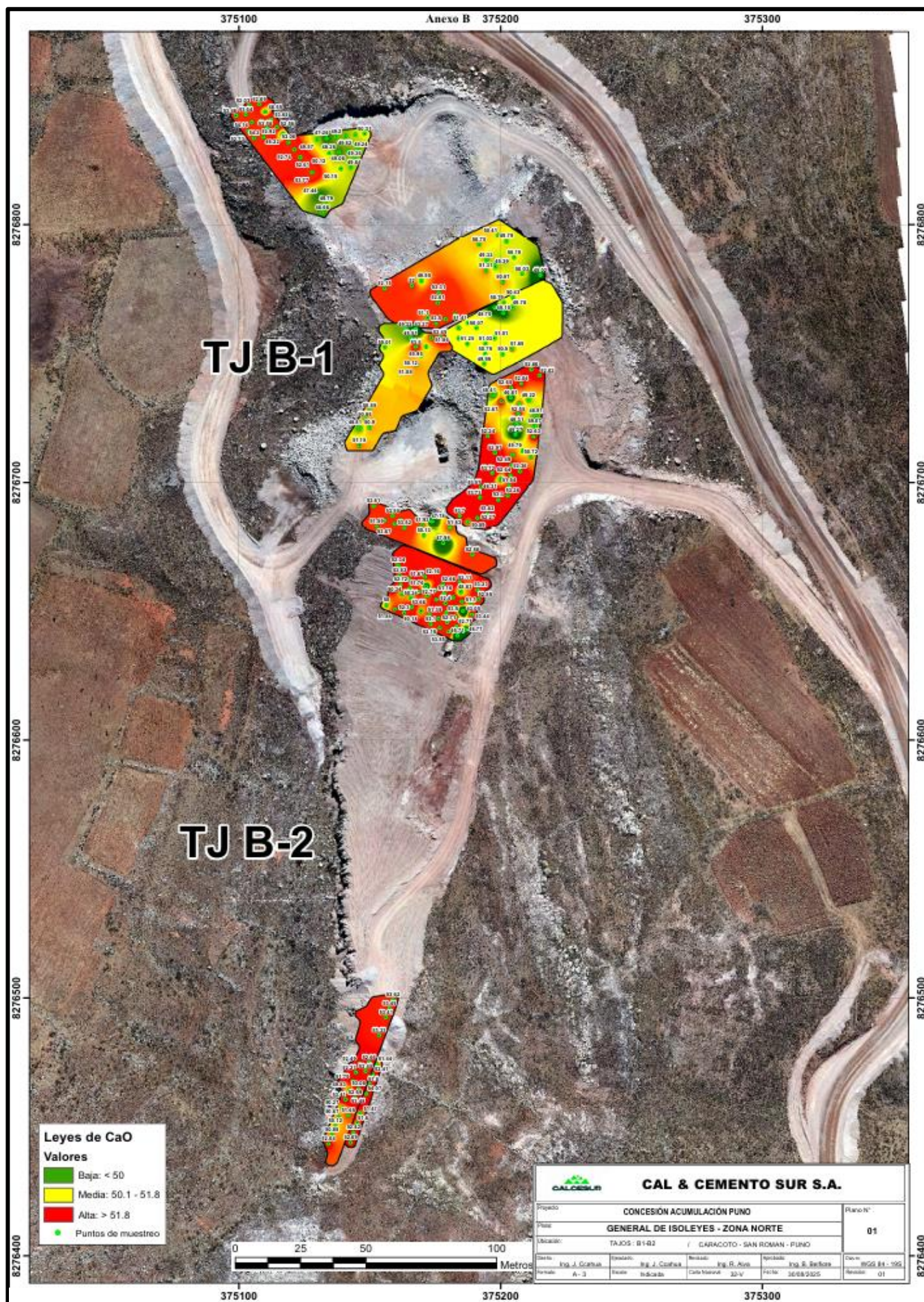


Figura 22 — Plano de isoleyes de los tajos B1 y B2