

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Influencia de voladura masiva utilizando
detonadores electrónicos en el
comportamiento dinámico del macizo rocoso,
tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo**

Jeyson Diomenes Araujo Zurita
Eleving Polino Puente

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental

Tesis digital



Esta obra está bajo una licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional"

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Julio Fredy Porras Mayta
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 21 de Julio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Influencia de voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Autores:

1. Jeyson Diomenes Araujo Zurita – EAP. Ingeniería de Minas
2. Eiving Polino Puente – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 16 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☒ | NO ☐ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 20 | SI ☒ | NO ☐ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

DEDICATORIA

A mi esposa y mi hijo, por su comprensión y paciencia durante incontables horas de estudio e investigación. A mi mamá y mi hermana, por sus constantes oraciones, apoyo y fe que ha sido la fuerza que me impulsó a superar cada desafío. Este logro también es suyo.

Jeyson

A mis padres: David y Paulina, cuyo amor incondicional ha sido el cimiento de cada logro. A mis hijos: Hans y Bastián, por darle sentido a mi vida y ser la fuerza que me impulsa a alcanzar cada meta.

Eleving

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis: Ma. Julio Porras Mayta, por su invaluable guía, apoyo constante y paciencia a lo largo del desarrollo de esta investigación. Sus profundos conocimientos, su perspicacia para la investigación y sus constructivas críticas fueron fundamentales para la consecución de este trabajo.

Asimismo, extendo mi gratitud a los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Continental, por la excelente formación académica recibida durante mis años de estudio. Sus enseñanzas sentaron las bases teóricas y prácticas que hicieron posible la comprensión y aplicación de los conceptos necesarios para esta investigación.

Jeyson

A la empresa Orica, por compartir con nosotros su valiosa tecnología en explosivos y sistemas de iniciación, contribuyendo al desarrollo técnico de esta investigación.

A nuestro asesor académico: Magíster Julio Fredy Porras Mayta, por su orientación constante, compromiso y dedicación, que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Continental y a la facultad de Ingeniería, por proporcionarnos las herramientas, conocimientos y espacios que hicieron posible nuestra formación profesional.

Finalmente, al ingeniero Armando Picoy, por compartir generosamente su experiencia, por abrirnos las puertas al fascinante mundo de la voladura de rocas y por su colaboración y ánimo permanente, que enriquecieron profundamente este camino académico.

Eleving

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I	16
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema	16
1.1.1 Planteamiento del problema	16
1.1.2 Formulación del problema.....	17
1.1.2.1 Problema general	17
1.1.2.2 Problemas específicos	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificación e importancia	18
1.3.1 Justificación de la investigación	18
1.3.1.1 Justificación práctica.....	18
1.3.1.2 Justificación social	19
1.3.1.3 Justificación metodológica.....	19
1.3.1.4 Justificación económica	19
1.3.2 Importancia de la investigación	20
1.4 Delimitación del proyecto	20
1.5 Hipótesis y variables	21
1.5.1 Hipótesis general	21
1.5.2 Hipótesis específicas	21
1.5.3 Variables de investigación	21
1.5.3.1 Variable independiente	21
1.5.3.2 Variable dependiente	21
1.6 Operacionalización de las variables de investigación	22
CAPÍTULO II.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23

2.1	Antecedentes de la investigación.....	23
2.1.1	Antecedentes internacionales.....	23
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	28
2.2	Bases teóricas.....	33
2.2.1	Voladuras masivas.....	33
2.2.1.1	Ritmo de producción y tonelaje en voladuras masivas.....	34
2.2.1.2	Métodos de explotación.....	35
2.2.2	Detonadores electrónicos.....	49
2.2.2.1	Componentes del sistema electrónico I-KON III.....	49
2.2.2.2	Beneficios de los detonadores electrónicos.....	54
2.2.3	Comportamiento dinámico del macizo rocoso.....	55
2.2.3.1	Propiedades del macizo rocoso.....	56
2.2.3.2	Monitoreo de vibraciones.....	56
2.3	Definición de términos.....	69
CAPÍTULO III.....		73
METODOLOGÍA.....		73
3.1.	Método y alcances de la investigación.....	73
3.1.1.	Método de la investigación.....	73
3.1.2.	Tipo de investigación.....	73
3.1.3.	Nivel de investigación.....	74
3.1.4.	Diseño de investigación.....	74
3.2.	Población.....	74
3.3.	Muestra.....	74
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	75
3.4.2.	Técnicas de recolección de datos.....	75
3.4.3.	Instrumentos de recolección de datos.....	75
3.4.4.	Formato de validación de contenido por juicio de expertos.....	76
3.4.5.	Ficha de validez y confiabilidad del instrumento.....	91
3.5.	Técnicas de procesamiento de datos.....	94
3.6.	Materiales.....	94
CAPÍTULO IV.....		96
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		96
4.1.	Presentación de resultados.....	96
4.1.1.	Aspectos generales de la UM Cerro Lindo.....	96
4.1.1.1.	Ubicación.....	96
4.1.1.2.	Accesibilidad.....	96
4.1.1.3.	Geología regional.....	97

4.1.1.4.	Geología local	99
4.1.1.5.	Mineralización	101
4.1.1.6.	Planes de minado	104
4.1.1.7.	Geomecánica.....	106
4.1.1.8.	Sostenimiento	111
4.1.2.	Comportamiento dinámico del macizo rocoso	114
4.1.2.1.	Control de vibraciones y ondas de esfuerzo	115
4.1.2.2.	Reducción del daño al macizo rocoso remanente	117
4.1.2.3.	Comportamiento dinámico general	122
4.1.3.	Tiempos de retardo y secuencia de iniciación con detonadores electrónicos ..	122
4.1.4.	Niveles de fragmentación de la roca	126
4.1.5.	Modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso.....	128
4.1.5.1.	Cálculo de la velocidad pico partícula crítica (PPVc) de la roca	128
4.1.5.2.	Predicción de daño al macizo rocoso circundante en taladros de rotura .	130
4.2.	Discusión de resultados	132
CAPÍTULO V.....		135
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		135
5.1.	Conclusiones	135
5.2.	Recomendaciones.....	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		138
ANEXOS		141
Anexo 1.....		142
Matriz de consistencia.....		142
Anexo 2.....		144
Matriz de operacionalización de las variables		144
Anexo 3.....		145
Fotografías de las pruebas en campo.....		145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de las variables	22
Tabla 2. Parámetros de perforación de frentes	38
Tabla 3. Parámetros de perforación slot	39
Tabla 4. Parámetros de perforación VCR negativo	40
Tabla 5. Parámetros de perforación VCR positivo	41
Tabla 6. Parámetros equipos de perforación taladros largos	42
Tabla 7. Voladura de slot positivo y negativo	43
Tabla 8. Explosivos y accesorios utilizados en la voladura del VCR negativo	44
Tabla 9. Explosivos y accesorios utilizados en la voladura del VCR positivo	45
Tabla 10. Equipos de perforación – UM Cerro Lindo	47
Tabla 11. Parámetros de los equipos de limpieza, carguío y transporte	48
Tabla 12. Parámetros del modelo vibracional de campo lejano (modelo de Devine) de diferentes macizos rocosos.....	67
Tabla 13. Escala de daño según PPV crítico	69
Tabla 14: Materiales usados en la investigación	95
Tabla 15. Acceso a la UM Cerro Lindo	96
Tabla 16. Dimensiones del ore bodies mineralizados en la zona de producción – UM Cerro Lindo	103
Tabla 17. Producción de tajos 2024 por ore bodie	104
Tabla 18. Producción de tajos 2025 por ore bodie	105
Tabla 19. Zonificación de ore bodies por tipo de roca	107
Tabla 20. Resultados de la VPP obtenidos en taladros de rotura	116
Tabla 21. Resultados de la VPP obtenidos en taladros de control	117
Tabla 22. Voladuras ejecutadas en taladros de rotura.....	120
Tabla 23. <i>Voladuras ejecutadas en taladros de control</i>	121
Tabla 24. Resultados de la granulometría obtenida con detonadores electrónicos	128
Tabla 25. Parámetros geomecánicos de la roca	129
Tabla 26. Criterio de daño según Holmberg & Persson	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de minado masivo.....	34
Figura 2. Método de explotación Sublevel Stopping.....	36
Figura 3. Método de explotación Sublevel Caving	37
Figura 4. Esquema de apertura de slot.....	39
Figura 5. Esquema de ejecución de las chimeneas slot – Chimenea RB	40
Figura 6. Esquema de perforación en Chimenea VCR	41
Figura 7. Esquema de perforación en tajos.....	42
Figura 8. Voladura de anillos radiales	46
Figura 9. Perforadora Sandvik DL 421	47
Figura 10. Volquete Scania G540 - B8X4 (izquierda) y faja transportadora N°3 salida de mina a superficie (derecha).....	49
Figura 11. Componentes del sistema electrónico de voladura I-KON III.....	50
Figura 12. Características del detonador I-KON™ III	51
Figura 13. Aplicación del Logger II en campo.....	52
Figura 14. Partes del cable de arnés	53
Figura 15. Voladura con ShotPlus 5.....	54
Figura 16. Monitoreo de vibraciones en campo	57
Figura 17. Consumo de explosivos vs VPP.....	58
Figura 18. Componentes de una onda	60
Figura 19. Onda P de compresión o primaria.	61
Figura 20. Onda S transversal, de corte o secundaria.	61
Figura 21. Onda R Rayleigh o superficial.	62
Figura 22. Equipos de monitoreo para análisis de vibraciones.	63
Figura 23. Instalación de sismógrafo y geófono en campo	65
Figura 24. Ubicación de la UM Cerro Lindo.....	97
Figura 25. Plano geológico regional – UM Cerro Lindo	98
Figura 26: Plano geológico con ubicación de cuerpos mineralizados – UM Cerro Lindo.....	99
Figura 27: Columna estratigráfica local – UM Cerro Lindo.....	100
Figura 28: Sección transversal del yacimiento - UM Cerro Lindo.	101
Figura 29. Plano de ubicación de los cuerpos mineralizados – UM Cerro Lindo	104
Figura 30: Sistema de falla de la UM Cerro Lindo.....	106
Figura 31: Comparación de clasificaciones RMR y Q de Barton	107
Figura 32. Incidencia de rangos de RMR.	107

Figura 33. Ábaco de Barton para el sostenimiento de labores permanentes	112
Figura 34. Clasificación geomecánica por RMR.....	113
Figura 35. Tipo de sostenimiento para labores permanentes	113
Figura 36. Ábaco de Barton para el sostenimiento de labores temporales.....	113
Figura 37. Tipo de sostenimiento para labores temporales.....	114
Figura 38. Sostenimiento recomendado para zonas sísmicas	114
Figura 39: Sismograma de voladura con detonadores electrónicos – Fase 1	116
Figura 40: Sismograma de voladura con detonadores electrónicos – Fase 2.	116
Figura 41. Modelo de atenuación de taladros de rotura tajo 821G-OB6A.....	119
Figura 42: Modelo de atenuación en taladros de control tajo 821G-OB6A.....	120
Figura 43. Levantamiento topográfico del tajo 821G-OB6A vacío.....	122
Figura 44. VPP vs tiempos de retardo en voladura fase 1 - tajo 821G-OB6A.....	123
Figura 45. VPP vs tiempos de retardo en voladura fase 2 - tajo 821G-OB6A.....	124
Figura 46. Detalle de tiempos de retardo, secuencia de iniciación y diseño de carga en el Tajo 821G-OB6A.....	125
Figura 47. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop tajo 821G-OB6A	126
Figura 48. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop – Disparos 1, 2, 3, 4 y 5.....	127
Figura 49. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop – Disparos 6, 7 y 8.....	127
Figura 50: Modelo predictivo de daño al macizo rocoso en taladros de rotura tajo 821G-OB6A	131
Figura 51. Modelo predictivo de daño al macizo rocoso en taladros de control tajo 821G-OB6A	132
Figura 52. Reporte de evento sismográfico Tj 821G-OB6A – octubre 2024.....	148
Figura 53. Reporte de evento sismográfico Tj 821G-OB6A – enero 2025.....	149

RESUMEN

Las prácticas de voladuras convencionales en minería subterránea a menudo generan altas intensidades de vibraciones que alteran al macizo rocoso circundante. Ante esta realidad, la implementación de técnicas de voladura más eficientes se torna indispensable para el progreso de la industria, siendo la aplicación de detonadores electrónicos con una carga operante reducida, una innovación prometedora en este ámbito. En ese sentido, el objetivo de esta investigación fue evaluar el grado de influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo, 2025. La población estuvo conformada por la totalidad de los tajos presentes en la UM Cerro Lindo, se aplicó el muestreo no probabilístico intencional para poder seleccionar el tajo de estudio 821G-OB6A debido a sus características relevantes para el análisis propuesto. Los resultados demuestran que, la implementación de detonadores electrónicos tiene una influencia significativa en el comportamiento dinámico del macizo rocoso. Asimismo, al aplicar una secuencia y sincronización optimizada se produce una fragmentación más homogénea. Además, se reduce significativamente la intensidad y la duración de las ondas sísmicas generadas en el macizo rocoso circundante. Finalmente, el análisis estadístico de voladuras tomadas en campo permite desarrollar modelos empíricos más robustos y específicos para predecir el comportamiento dinámico bajo condiciones geológicas y de voladura similares. Por lo tanto, la implementación de detonadores electrónicos en voladuras masivas permitirá cuantificar y caracterizar los parámetros de diseño de la voladura en la fragmentación, las vibraciones inducidas y la estabilidad del macizo rocoso local.

Palabras clave: voladura masiva, detonadores electrónicos, comportamiento dinámico, macizo rocoso, secuencia, sincronización, fragmentación, vibraciones

ABSTRACT

Conventional blasting practices in underground mining often generate high vibration intensities that alter the surrounding rock mass. Faced with this reality, the implementation of more efficient blasting techniques becomes indispensable for the industry's progress, with the application of electronic detonators using a reduced operating charge being a promising innovation in this field. In this context, the objective of this research was to evaluate the degree of influence of mass blasting using electronic detonators on the dynamic behavior of the rock mass, pit 821G-OB6A, Cerro Lindo Mining Unit, 2025. In this regard, from the population made up of all the pits present in the Cerro Lindo UM, intentional non-probability sampling was applied in order to select the study pit 821G-OB6A due to its relevant characteristics for the proposed analysis. The results demonstrate that the implementation of electronic detonators has a significant influence on the dynamic behavior of the rock mass. Furthermore, applying an optimized sequence and timing produces more homogeneous fragmentation. Additionally, the intensity and duration of seismic waves generated in the surrounding rock mass are significantly reduced. Finally, the statistical analysis of field blast data allows for the development of more robust and specific empirical models to predict dynamic behavior under similar geological and blasting conditions. Therefore, the implementation of electronic detonators in mass blasting will allow for the quantification and characterization of blast design parameters concerning fragmentation, induced vibrations, and the stability of the local rock mass.

Keywords: mass blasting, electronic detonators, dynamic behavior, rock mass, sequence, synchronization, fragmentation, vibrations

INTRODUCCIÓN

El uso progresivo de detonadores electrónicos representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones más precisas y controladas para la fragmentación de la roca. Estos dispositivos ofrecen la capacidad de programar con exactitud milimétrica la secuencia de iniciación con distintas cargas operantes. En consecuencia, se anticipa un impacto significativo menor en la respuesta dinámica del macizo rocoso adyacente a la zona de voladura.

La implementación de esta tecnología requiere un análisis minucioso de los parámetros de diseño de la voladura electrónica, las propiedades intrínsecas del macizo rocoso y su respuesta dinámica, a fin de optimizar los patrones de retardo, las cargas explosivas, el potencial de daño a las estructuras circundantes y garantizar la estabilidad general del tajo.

En este contexto, la presente investigación se enfoca específicamente en evaluar la influencia de las voladuras masivas implementadas con detonadores electrónicos sobre el comportamiento dinámico del macizo rocoso en el tajo 821G-OB6A de la UM Cerro Lindo. La elección de este tajo en particular se basa en la evaluación de sus condiciones geomecánicas específicas y en el objetivo de incrementar la eficiencia de las operaciones de voladura en esta área crítica de la mina.

El primer capítulo sienta las bases de esta investigación, presentando el problema central que se desarrolla, definiendo los objetivos puntuales que orientaron el estudio y resaltando la relevancia y el impacto esperado de los hallazgos. Además, se definen las limitaciones del estudio, se formula la hipótesis y se identifican las variables objeto de nuestro análisis.

El segundo capítulo establece el marco teórico de la investigación, presentando estudios análogos que sirven de fundamento y las bases teóricas que sustentan el presente trabajo.

El tercer capítulo describe minuciosamente las metodologías y técnicas empleadas para la recolección y el procesamiento de los datos. Asimismo, se identifica la población de estudio y se explica la elección de nuestro objeto de estudio.

En el cuarto capítulo se realiza un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, contrastándolos con la hipótesis inicial y las investigaciones previas.

Finalmente, se exponen las conclusiones que sintetizan los resultados de la investigación y sirven como base para la formulación de recomendaciones prácticas y relevantes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

La minería subterránea, fundamental para la extracción de valiosos recursos minerales, se enfrenta constantemente al reto de optimizar sus procesos. Dentro de estos, la voladura emerge como una técnica crítica para la fragmentación de la roca. Sin embargo, las prácticas convencionales de voladura a menudo introducen vibraciones significativas y pueden comprometer la integridad del macizo rocoso circundante, poniendo en riesgo la estabilidad de las labores y la seguridad interdependiente. En este escenario, la exploración e implementación de técnicas de voladura más precisas y eficientes se vuelve imperativa para el avance de la industria.

La introducción de detonadores electrónicos representa una innovación prometedora en el campo de las voladuras subterráneas. Su capacidad para ofrecer una programación detallada de la secuencia de encendido de los explosivos contrasta con las limitaciones de los detonadores tradicionales. Esta precisión teórica conlleva el potencial de lograr una fragmentación más uniforme, una notable reducción en la generación de ondas vibratorias y, por ende, un impacto minimizado en la respuesta dinámica del macizo rocoso. No obstante, la UM Cerro Lindo muestra que la mera adopción de esta tecnología no garantiza por sí sola resultados óptimos.

En la UM Cerro Lindo, el problema subyacente radica en una supervisión técnica deficiente del proceso de voladura, a pesar de la disponibilidad de detonadores electrónicos. Se ha detectado una falta de control riguroso sobre la carga explosiva utilizada en los taladros de rotura y control. Evidencia de campo revela casos donde la carga operante excede los 190 kg

por retardo, lo que se traduce directamente en un incremento sustancial de los niveles de vibraciones transmitidas al macizo rocoso, afectando su estabilidad inherente.

Las consecuencias de este control inadecuado son evidenciables en los indicadores clave de rendimiento de la UM Cerro Lindo. La elevada intensidad de las vibraciones inducidas por las voladuras está directamente relacionada con un porcentaje de sobrerotura, el cual alcanza un promedio del 25 %, acompañado de una dilución del mineral extraído del 18 %. Adicionalmente, la fragmentación obtenida, con un P80 de 22 pulgadas, impacta negativamente las etapas posteriores de acarreo, transporte y conminución, evidenciando una ineficiencia integral en el proceso.

Por consiguiente, el presente estudio se enfoca en evaluar de manera específica la influencia de las voladuras masivas implementadas con detonadores electrónicos sobre el comportamiento dinámico del macizo rocoso en el tajo 821G-OB6A de la UM Cerro Lindo. La selección de este tajo responde a sus particulares condiciones geomecánicas y a la urgente necesidad de optimizar las prácticas de voladura en esta área crítica de la mina. La investigación busca determinar si, bajo una gestión técnica rigurosa de los parámetros de voladura con detonadores electrónicos, es posible alcanzar una mejora significativa en la estabilidad estructural del macizo rocoso y, en última instancia, una mayor eficiencia en el proceso de voladura dentro de este entorno subterráneo específico.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cómo influye la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo 2025?

1.1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización influye en el comportamiento dinámico del macizo rocoso?
- b) ¿Qué efectos produce la voladura masiva con detonadores electrónicos en la fragmentación de las rocas?
- c) ¿Cómo se integran los datos de la voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el grado de influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo 2025.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Evaluar en qué medida el uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización influye en el comportamiento dinámico del macizo rocoso.
- b) Evaluar los efectos que produce la voladura masiva con detonadores electrónicos en la fragmentación de las rocas.
- c) Establecer cómo se integran los datos de la voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación de la investigación

1.3.1.1 Justificación práctica

Desde una perspectiva práctica, la razón de ser de esta investigación es la búsqueda de una mayor optimización en las operaciones de voladura en minería subterránea y mitigar los riesgos asociados a la inestabilidad del macizo rocoso. Las voladuras convencionales, si bien efectivas para la fragmentación de la roca, a menudo generan vibraciones intensas que pueden inducir daños en las labores subterráneas, poniendo en riesgo la integridad del personal y la continuación de las operaciones. En efecto, la implementación de detonadores electrónicos ofrece la posibilidad de un control más preciso de la secuencia de iniciación, es decir, se genera una reducción en el nivel de vibraciones y una mejora significativa en la fragmentación (P80). Por lo tanto, esta investigación busca evaluar de manera concreta los beneficios del uso de detonadores electrónicos en el tajo 821G-OB6A de la UM Cerro Lindo y su relación con la estabilidad del macizo rocoso, control de la sobredilución, seguridad y productividad de la mina. Los resultados obtenidos permitirán a la UM Cerro Lindo tomar decisiones informadas sobre la optimización de esta tecnología en el sistema de iniciación, mejorar su proceso de voladura y maximizar el valor del mineral.

1.3.1.2 Justificación social

Desde una perspectiva social, esta investigación se basa en la capacidad para optimizar las condiciones laborales y la seguridad de los trabajadores en la UM Cerro Lindo. La reducción de vibraciones y la mejora en la estabilidad del macizo rocoso, como resultado del uso de detonadores electrónicos, disminuyen el riesgo de accidentes laborales asociados a desprendimientos de rocas, derrumbes y otros eventos geotécnicos. Al minimizar estos riesgos, se contribuye directamente al bienestar y la integridad física de los trabajadores, generando un ambiente laboral más seguro y confiable. Además, la optimización de las voladuras genera un impacto positivo en la percepción de la comunidad local sobre la actividad minera, al demostrar un compromiso con la seguridad y la implementación de tecnologías que buscan minimizar los impactos negativos en el entorno. En última instancia, esta investigación busca contribuir a una minería más responsable y sostenible, que priorice la seguridad de las personas y el respeto por el entorno social.

1.3.1.3 Justificación metodológica

Para esta investigación se propone una metodología que combina tanto la recopilación de datos de campo, incluyendo el monitoreo de vibraciones mediante sismógrafos de última generación como el Minimate Pro de 8 canales, los cuales captan las vibraciones inducidas por las voladuras en los ejes longitudinal, vertical y transversal; y el análisis de la fragmentación de la roca mediante técnicas de fotométrica y software especializado como el WipFrag, el cual nos permite analizar el grado de fragmentación (P80). En ese sentido, la integración de métodos cuantitativos y cualitativos permitirá obtener una comprensión integral del fenómeno estudiado, contrastando los resultados obtenidos en campo con las simulaciones teóricas. La elección del tajo 821G-OB6A como caso de estudio específico proporciona un contexto real y concreto para la aplicación de la metodología propuesta, permitiendo la validación de los resultados y la generación de conclusiones aplicables a otras operaciones mineras subterráneas con características similares. Además, la investigación se apoyará en la revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relevante, lo que permitirá contextualizar los hallazgos y contribuir al avance del conocimiento en el campo de la mecánica de rocas y la ingeniería de perforación y voladura.

1.3.1.4 Justificación económica

La optimización de las voladuras mediante el uso de detonadores electrónicos se traduce en una serie de beneficios económicos directos e indirectos. En primer lugar, una mejor fragmentación de la roca reduce los costos asociados al chancado primario y secundario y al manejo de material sobredimensionado, disminuyendo el consumo de energía y el desgaste de

equipos como los martillos hidráulicos (rompe bancos). En segundo lugar, una mayor estabilidad del macizo rocoso disminuye los costos de voladuras secundarias y mejora la recuperación de mineral. En ese sentido, esta investigación ofrece evidencia concreta del valor económico que representa la implementación de detonadores electrónicos en un contexto específico como el tajo 821G-OB6A, contribuyendo a la viabilidad y crecimiento de la Unidad Minera Cerro Lindo.

1.3.2 Importancia de la investigación

La ejecución de la presente tesis de investigación es relevante tanto para la Unidad Minera Cerro Lindo como para el desarrollo del conocimiento en la industria minera. En primer lugar, los resultados de este estudio proporcionarán información esencial para optimizar el proceso de voladura en el tajo 821G-OB6A. Al analizar la influencia de los detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, se podrán identificar beneficios como la reducción de la velocidad pico de partícula (VPP), el control de frecuencias en las voladuras, la mejora en la fragmentación de la roca y una mayor estabilidad de los tajos. Esta información permitirá a la empresa tomar decisiones informadas sobre la correcta utilización de detonadores electrónicos, optimizando sus operaciones, mejorando la seguridad laboral y maximizando la recuperación del recurso mineral, además de reducir costos operativos al minimizar la sobredilución del mineral.

En segundo lugar, la investigación aportará al avance de la industria minera al promover la adopción de tecnologías más innovadoras y responsables con el entorno, fomentando prácticas más seguras, productivas y con menor impacto ambiental. Los datos generados también serán valiosos para la calibración y validación de modelos numéricos que simulen el comportamiento de macizos rocosos, fortaleciendo la capacidad de predicción y diseño en futuras operaciones. Así, este estudio no solo beneficiará directamente a la Unidad Minera Cerro Lindo, sino que contribuirá a establecer estándares más altos en la industria minera, impulsando una minería más eficiente y sostenible.

1.4 Delimitación del proyecto

La presente investigación se delimita al estudio de la influencia de las voladuras masivas con detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso en el tajo 821G-OB6A de la Unidad Minera Cerro Lindo. Geográficamente, el estudio se circunscribe exclusivamente a este tajo específico, descartando otros tajos o áreas de la mina. Temporalmente, el análisis está centrado en las voladuras ejecutadas durante los meses de octubre 2024 a enero 2025, lo que nos permite un análisis comparativo y la obtención de datos

representativos. Nuestro enfoque principal es la respuesta dinámica del macizo rocoso (vibraciones, deformaciones, diseño de la carga operante) ante las voladuras con detonadores electrónicos, sin abordar en profundidad otros aspectos como la optimización de la malla de perforación, aunque estos se considerarán como parámetros de entrada.

Metodológicamente, esta investigación se delimita al análisis de datos de monitoreo de vibraciones obtenidos mediante geófonos ubicados a distancias que comprende desde 20 m a 100 m en el entorno del tajo 821G-OB6A, al análisis de la fragmentación de la roca producto de las voladuras utilizando técnicas de granulometría (P80) y al modelamiento numérico del macizo rocoso para simular su comportamiento dinámico.

1.5 Hipótesis y variables

1.5.1 Hipótesis general

La voladura masiva utilizando detonadores electrónicos influye significativamente en el comportamiento dinámico del macizo rocoso del tajo 821G-OB6A en la Unidad Minera Cerro Lindo, optimizando el control de vibraciones, mejorando la fragmentación y reduciendo los impactos negativos sobre la estabilidad del macizo rocoso.

1.5.2 Hipótesis específicas

- a) El uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización controlada influye significativamente en la reducción de la energía sísmica transmitida al macizo rocoso, optimizando su comportamiento dinámico durante la voladura.
- b) La aplicación de voladuras masivas con detonadores electrónicos mejora significativamente la uniformidad y el tamaño promedio de fragmentación de las rocas.
- c) La integración de datos de voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos mejora sustancialmente la precisión en la estimación del comportamiento dinámico del macizo rocoso, permitiendo una planificación geotécnica más confiable.

1.5.3 Variables de investigación

1.5.3.1 Variable independiente

Voladura masiva con detonadores electrónicos.

1.5.3.2 Variable dependiente

Comportamiento dinámico del macizo rocoso.

1.6 Operacionalización de las variables de investigación

Tabla 1. Matriz de operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas de medición	Instrumentos
Voladura masiva con detonadores electrónicos	Técnica de fragmentación de roca que utiliza múltiples taladros y detonadores electrónicos programables para controlar la secuencia y sincronización de la detonación a gran escala.	Es el conjunto de parámetros técnicos aplicados durante la ejecución de una voladura masiva que emplea detonadores electrónicos, como parte de una estrategia para optimizar resultados geotécnicos.	• Parámetros de diseño de voladura • Secuencia y sincronización electrónica • Tipo y cantidad de explosivo	• Diámetro y profundidad de taladros • Interrelación temporal entre detonaciones • Precisión de sincronización • Energía por taladro • Tipo de detonador electrónico	• Observación directa • Revisión de reportes técnicos • Monitoreo digital del sistema de iniciación	• Ficha técnica de voladura • Software de diseño (ShotPlus, i-kon™) • Reporte técnico del disparo • Videos de alta velocidad
Comportamiento dinámico del macizo rocoso	Respuesta del macizo rocoso a la energía inducida por las detonaciones, observada en términos de vibraciones, desplazamientos, daños estructurales y redistribución de esfuerzos.	Son los efectos físicos medibles que manifiesta el macizo rocoso luego de la voladura, evaluados mediante monitoreo geotécnico, análisis sísmico y observación de patrones de fracturamiento.	• Vibraciones inducidas • Daño estructural • Reacomodo de esfuerzos	• Velocidad de partícula (PPV) • Aceleración sísmica • Zonas de sobre fracturamiento • Cambios en esfuerzos en zonas críticas • Apertura de juntas preexistente	• Factor de amplitud “K” • Exponente de atenuación “α”	• Sismógrafo. • Geófono triaxial. • Software Blastware. • Registro de Unidades de Adquisición de Datos (DAQ).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Díaz (1), en su trabajo de investigación denominado: «*Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres*», desarrolló un modelo basado en la velocidad pico de partícula para predecir la intensidad de las vibraciones que experimenta la roca y evaluar el posible daño que podría sufrir el macizo rocoso. El objetivo de la investigación era identificar la influencia que ejercen las vibraciones generadas por las voladuras sobre el macizo rocoso circundante, considerando los efectos a corta y larga distancia.

Esta investigación se basa en un diseño de investigación mixta secuencial. Asimismo, los resultados del modelo mostraron que las vibraciones inducidas por tronaduras en la minera Los Pelambres tienen un impacto significativo en el macizo rocoso, con la potencialidad de causar daños en los taludes. El modelo también permitió identificar correlaciones entre las características de las explosiones y el daño observado, permitiendo validar y ajustar modelos predictivos previamente conocidos. En ese sentido, la investigación de Díaz (1) llega a la conclusión de que el diseño de las cargas de explosivos y la ubicación de las distancias de seguridad son factores clave que deben ser evaluados para mitigar los riesgos de daño en los taludes. Además, enfatiza la importancia de ampliar la base de datos sobre las características del macizo rocoso para mejorar la confiabilidad de las estimaciones y predicciones. Finalmente, el aporte que presenta esta investigación es que se debe tener especial cuidado en establecer los parámetros de voladura (tipo de explosivo, carga operante, secuencia de detonación, espaciamiento, burden, entre otros) a fin de minimizar la VPP, el daño al macizo rocoso y la optimización de la fragmentación del mineral.

Báez (2), en su tesis de investigación denominada: *«Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones de tronadura frente a cambios en el burden, el espaciamiento y tipo de explosivo: Aplicación a fases 7 y 10 en minería Los Pelambres»*, desarrolló el modelo Kuz-Ram para cada unidad geotécnica y determina la precisión del ajuste a través de la raíz del error cuadrático medio. El objetivo de la investigación era evaluar la relación entre las modificaciones en el burden y espaciamiento y la fragmentación resultante de la roca durante la tronadura en las Fases 7 y 10 de minera Los Pelambres.

Esta investigación presenta una metodología cuantitativa enfocada en la aplicación de un modelo específico para la estimación de parámetros relacionados con la granulometría de los materiales resultantes de operaciones de tronadura. En particular, se detalla la implementación del modelo Kuz-Ram, el cual implica una serie de etapas sistemáticas como la selección de curvas granulométricas, definición de parámetros y variables y estimación de dichos parámetros, permitiendo obtener datos representativos para su análisis. Por consiguiente, la investigación de Báez (2) llega a la conclusión de que al determinar el parámetro A de la ecuación de Kuz-Ram, aplicada a las Fases 7 y 10 del área de estudio, permite obtener valores representativos y específicos para diferentes unidades geotécnicas (UGT). Los resultados obtenidos, que varían entre 0.25 y 1.37 para las UGT's analizadas, destacan la importancia de seleccionar adecuadamente las curvas granulométricas y los parámetros de diseño relacionados con la tronadura, lo que podría contribuir a una mejor comprensión del proceso de fragmentación y optimización de las operaciones de perforación y voladura. En ese sentido, el aporte que presenta esta investigación es que el modelo Kuz-Ram podría ser adaptada y aplicada al tajo 821G-OB6A a fin de que nos permita evaluar de forma cuantitativa el P80 producto de las voladuras masivas. Además, el análisis de la variación del burden y espaciamiento en la granulometría resultante ofrece datos empíricos sobre la relación entre el diseño de la voladura y el producto final P80, lo que es relevante para comprender cómo las vibraciones generadas por la voladura pueden afectar la estabilidad del macizo rocoso. Finalmente, la evaluación del cambio de explosivo en la granulometría proporciona información sobre la influencia de las propiedades del explosivo como la velocidad de detonación y poder rompedor en la fragmentación de la roca, lo cual es crucial para elegir el explosivo correcto en función de las características del macizo rocoso y los objetivos de la voladura en el tajo 821G-OB6A.

Muñoz (3), en su trabajo de investigación denominado: *«Simulación de explosiones y voladuras mediante una formulación acoplada del método de los elementos finitos y el método de los elementos discretos»*, presenta la simulación de explosiones y voladuras mediante una

formulación acoplada de los métodos de elementos finitos y elementos discretos, así como la aplicación de métodos de predicción y el estudio de las propiedades de los explosivos. El objetivo de la investigación era analizar cómo las características del macizo rocoso y el diseño de las voladuras afectan la fragmentación y el rendimiento del proceso.

Esta investigación presenta una metodología cuantitativa de diseño experimental ya que incluye la ejecución de varias voladuras para ajustar el factor de roca de manera iterativa. Además, se hace uso de modelos de predicción, como el método Kuz-Ram, que implica un análisis cuantitativo de los datos obtenidos de las voladuras para mejorar la fragmentación y la eficiencia energética del sistema de trituración. Así pues, Muñoz (3) llega a la conclusión de que el método de elementos finitos es una herramienta eficaz para modelar voladuras y demoliciones, aunque presenta limitaciones debido a simplificaciones en el modelo del macizo rocoso y del explosivo. A pesar de estas limitaciones, el método proporciona resultados coherentes en la simulación de la rotura de macizos rocosos y estructuras de hormigón. En definitiva, el aporte que presenta esta investigación es que para predecir la fragmentación y optimizar diseños de voladura, se debe comparar con métodos de predicción de fragmentación clásicos y análisis fotográfico de la granulometría. Además, es importante considerar la heterogeneidad del macizo rocoso, la presencia de planos de debilidad y la variabilidad de las propiedades del explosivo tales como su densidad, velocidad de detonación y energía liberada, los cuales deben ser evaluados cuidadosamente, especialmente en condiciones particulares como el tajo 821G-OB6A, donde estas variables influyen en la eficiencia y la fragmentación del mineral.

De Cospedal (4), en su tesis de investigación denominada: *«Utilización de la medida de vibraciones en voladura para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental»*, se centra en encontrar las máximas cargas que pueden ser utilizadas en las rocas ornamentales a fin de comprender y predecir los daños que estas vibraciones pueden causar en el macizo rocoso. El objetivo de su investigación fue optimizar el uso de explosivos en la extracción de roca ornamental, determinando las distancias y cargas máximas que se pueden emplear sin dañar la roca de valor comercial.

Esta investigación presenta una metodología aplicada de diseño experimental y correlacional, ya que incluye la realización de experimentos de campo como voladuras controladas en diferentes canteras y la medición de las vibraciones resultantes mediante geófonos y sismógrafos. Además, se llevan a cabo ensayos de laboratorio para determinar las propiedades geomecánicas de las rocas, como la resistencia a compresión, tracción y la velocidad de propagación de ondas sísmicas. Asimismo, se busca establecer relaciones entre

las variables involucradas, como la carga explosiva, la distancia de propagación de las vibraciones y las propiedades de la roca para desarrollar modelos predictivos de vibraciones. Por ende, De Cospedal (4) concluye que es posible optimizar el uso de explosivos en canteras de roca ornamental mediante la medición y análisis de vibraciones, lo que permite establecer umbrales críticos de vibración y distancias seguras para evitar daños al macizo rocoso. Así también, se confirma que las leyes de amortiguación de vibraciones, como la ley USBM, son conservadoras y pueden ajustarse mediante metodologías avanzadas, como el ajuste multivariante y el uso de datos geomecánicos. Por otro lado, los resultados de la investigación muestran que las distancias de daño pronosticadas en estudios previos pueden reducirse significativamente al aplicar metodologías más precisas, como el ajuste parcial y el uso de datos teóricos de la zona de plastificación.

Por consiguiente, el aporte que presenta esta investigación radica en que, al integrar datos geomecánicos como la resistencia a la compresión y tracción, así como el índice de calidad de la roca en el análisis de vibraciones se puede mejorar significativamente la comprensión del comportamiento dinámico del macizo rocoso. Además, el control de los tiempos de retardo con los detonadores electrónicos permite un control preciso de la carga operante, maximizando la eficiencia de la voladura. Esta metodología ofrece herramientas para optimizar el diseño de voladuras al establecer umbrales de daño que eviten daños al macizo rocoso. Asimismo, permite evaluar el impacto de los detonadores electrónicos en la estabilidad del macizo rocoso, como se observa en el tajo 821G-OB6A de la Unidad Minera Cerro Lindo, lo que facilita una comparación más precisa entre las diferentes técnicas de voladura y su efecto en la dinámica del macizo rocoso.

Gallardo (5), en su trabajo de investigación titulado: *«Propuesta de diseño de diagrama de tronadura en avance de túneles en Mina Paraíso, verificando bajo nivel de vibraciones»*, propone un diseño de diagrama de tronadura óptimo y eficiente ajustado a las características del terreno y las rocas presentes, considerando variables que optimicen el proceso de explotación de la mina Paraíso. El objetivo de su investigación fue identificar y evaluar los niveles de vibraciones generados, el costo de avance de túneles y los distintos tipos de diagramas de tronadura según el tipo de roca.

Esta investigación presenta una metodología aplicada de diseño experimental ya que se propone un nuevo diagrama de tronadura basado en el análisis de variables y condiciones del terreno y las rocas encontradas. En ese sentido, Gallardo (5) llega a la conclusión de que la implementación del nuevo diagrama de tronadura propuesto puede reducir significativamente los niveles de vibraciones generadas durante la perforación, lo que a su vez mejora la seguridad

y reduce los costos operativos en la mina "El Paraíso". Además, se concluye que un enfoque más sistemático y basado en datos para la selección de métodos de tronadura puede optimizar el uso de explosivos y minimizar gastos innecesarios. Los resultados de la tesis indican que el nuevo diagrama de tronadura propuesto logró una reducción del 30 % en los niveles de vibraciones en comparación con los métodos utilizados anteriormente, lo que contribuyó a mejorar la seguridad en la mina. En efecto, el aporte que presenta esta investigación radica en el análisis del nivel de vibraciones y la elección de un diagrama de voladura, especialmente al abordar el uso de detonadores electrónicos y su influencia en el comportamiento dinámico del macizo rocoso. La optimización del diseño de los diagramas de voladura, basado en un análisis minucioso de las propiedades del macizo rocoso, puede aplicarse para minimizar las vibraciones generadas durante las voladuras. Esto no solo mejorará la seguridad en el tajo 821G-OB6A, sino que también optimizará la eficiencia en el uso de explosivos, controlando la carga operante de manera más precisa a través de los detonadores electrónicos. Al integrar este enfoque, se podrán reducir los efectos negativos de las vibraciones en el macizo rocoso y mejorar la estabilidad del terreno.

Díaz (6), en su tesis de investigación titulada: «*Predicción de vibraciones producidas por tronaduras mediante redes neuronales artificiales*», encuentra una forma de integrar el estimador multivariable más adecuado en el proceso de predicción de vibraciones generadas por tronaduras en minería a cielo abierto. El objetivo de su investigación fue crear un método práctico para predecir las vibraciones ocasionadas por las tronaduras en la minería a cielo abierto utilizando redes neuronales.

Esta investigación presenta una metodología aplicada de diseño experimental ya que se basa en la comparación de dos enfoques: el método tradicional (ley escalar de Devine) y el método basado en redes neuronales artificiales. Asimismo, se realiza un análisis exhaustivo de datos históricos, se construyen modelos predictivos y se evalúan mediante métricas como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE). Por lo tanto, Díaz B. (6) llega a la conclusión que el uso de redes neuronales artificiales es una metodología viable y efectiva para predecir las vibraciones producidas por tronaduras en minería a cielo abierto. Comparado con los métodos tradicionales, como la ley escalar de Devine, las redes neuronales ofrecen una mayor precisión, adaptabilidad y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos. Los resultados de la investigación muestran que las redes neuronales superan significativamente a los métodos tradicionales en la predicción de vibraciones. Mientras que los modelos basados en la ley escalar de Devine alcanzaron coeficientes de determinación entre 62.0 % y 85.4 %, el modelo de redes neuronales optimizado logró un R^2 de 93.8 %. En ese sentido, el aporte que presenta esta investigación es que el uso de redes neuronales artificiales

para predecir vibraciones sísmicas podría complementar el análisis del comportamiento dinámico del macizo rocoso, ya que permite modelar relaciones no lineales y complejas entre los parámetros de las voladuras y las vibraciones resultantes, lo cual podría mejorar la precisión en la predicción de los efectos de las voladuras masivas, especialmente cuando se utilizan detonadores electrónicos, que introducen variaciones en los tiempos de retardo y la secuencia de detonación. Asimismo, la capacidad de las redes neuronales para procesar grandes volúmenes de datos y adaptarse a cambios en las condiciones iniciales sería particularmente útil para evaluar cómo las vibraciones generadas por detonadores electrónicos afectan la estabilidad del macizo rocoso.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Ninaja (7), en su trabajo de investigación denominado: «*Implementación de detonadores electrónicos en la voladura para optimizar los costos unitarios en las operaciones de Mina Toquepala*», se enfoca en evaluar el efecto de la implementación de detonadores electrónicos en la fragmentación del macizo rocoso, las vibraciones generadas por las voladuras y analizar la factibilidad económica de su aplicación. El objetivo de su investigación fue investigar de qué manera la utilización de detonadores electrónicos influye en la optimización de los costos unitarios de las operaciones de voladura en la mina Toquepala.

Esta investigación presenta una metodología aplicada con un enfoque cuantitativo y experimental, ya que se compara los resultados de voladuras realizadas con detonadores pirotécnicos y electrónicos, analizando variables como la fragmentación, vibraciones, velocidad de minado y costos unitarios, con el fin de determinar el impacto de la implementación de esta tecnología en la optimización de los procesos mineros. Por ende, Ninaja (7) llega a la conclusión que el uso de detonadores electrónicos en voladuras presenta ventajas significativas en comparación con los detonadores pirotécnicos, ya que reduce la fragmentación en un 11,14 % lo que disminuye la presencia de bolonería en un 36,99 %; además, reduce la vibración de las voladuras en un 14,05 %. En términos económicos, reduce el costo unitario de voladura en un 9,68 %, lo que permite aumentar la velocidad de minado en un 11,56 % e impacta positivamente en los costos unitarios post voladura, generando una utilidad adicional de 3,5 millones de dólares. Por esta razón, el aporte de esta investigación demuestra que el uso de detonadores electrónicos optimiza la granulometría del material volado al reducir significativamente el grado de fragmentación y la presencia de bolonería. Como resultado, disminuyen los costos energéticos en el chancado primario, lo que representa una oportunidad para procesar un mayor volumen de material. Asimismo, al generar una menor cantidad de fragmentos y reducir la intensidad de las vibraciones, se minimiza el daño al macizo rocoso y

se mejora la estabilidad general de la zona de trabajo. Además, la reducción en los costos de voladura y el incremento en la velocidad de minado se traducen en una mayor eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras en el tajo 821G-OB6A.

Contreras (8), en su tesis de investigación denominado: *«Implementación del sistema electrónico de voladura para mejorar la dilución, sobre excavación, avance por disparo y flujo económico en labores horizontales en minería subterránea»*, busca reducir los altos porcentajes de dilución y sobre excavación, mejorar el avance por disparo y optimizar el flujo económico en la Compañía Minera Argentum a través de la aplicación de detonadores electrónicos Ikon III Rx y eDev II y comparar su eficiencia frente a los métodos tradicionales de voladura con detonadores no eléctricos. El objetivo de su investigación fue determinar la influencia de la implementación de detonadores electrónicos en la mejora de diversos parámetros operativos en labores mineras subterráneas.

Esta investigación presenta una metodología aplicada con un enfoque cuasiexperimental, ya que se analizan los resultados de pruebas realizadas en campo, evalúan indicadores como la dilución del mineral, la sobre excavación, el avance por disparo y el flujo económico. Por tanto, Contreras (8) llega a la conclusión que la implementación del sistema electrónico de voladura mejora significativamente los parámetros operativos en labores mineras subterráneas, es decir, se logra reducir la dilución del mineral, disminuir la sobre excavación, aumentar la eficiencia del avance por disparo y mejorar el flujo económico. De igual forma, los detonadores electrónicos como el Ikon III Rx y el eDev II demuestran ser más precisos y eficientes que los métodos tradicionales, permitiendo una mayor recuperación de mineral y reduciendo costos operativos. En cuanto a los resultados, se observa que el uso de detonadores electrónicos reduce la dilución del mineral, aumentando el Valor por Tonelada del mineral de 79.41 \$/t a 170.50 \$/t. La sobre excavación disminuye del 13 % al 3 %, cumpliendo con los estándares establecidos. Además, la eficiencia del avance por disparo mejora del 86 % al 91 %, permitiendo avances de hasta 3.20 metros por disparo. Finalmente, el flujo económico muestra un aumento en las utilidades, con un beneficio de 4,429 \$/disparo, lo que confirma la rentabilidad de la implementación de estos sistemas en labores mineras subterráneas. Por este motivo, el aporte de esta investigación demuestra que la implementación de detonadores electrónicos en voladuras masivas no solo optimiza la fragmentación de material volado, sino que también mejora la estabilidad del tajo 821G-OB6A. Además, la precisión en la temporización de los tiempos de retardo permite un control más eficiente de la energía liberada, reduciendo la perturbación en la roca encajonante. Como resultado, se minimiza la dilución del mineral, se incrementa la recuperación y como consecuencia el valor del mineral \$/ton. Estas mejoras, en conjunto reducen los costos operativos y garantizan la rentabilidad de las

operaciones mineras, consolidando el uso de detonadores electrónicos como una estrategia clave para maximizar la productividad en voladuras masivas.

Quispe (9), en su tesis de investigación denominada: *«Influencia de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de voladura en la unidad minera Cerro Corona - Cajamarca, 2019»*, presenta un estudio que se centra en dos aspectos clave: la mejora de la fragmentación de la roca y la reducción de las vibraciones generadas durante las voladuras, los cuales son cruciales para optimizar los procesos mineros posteriores, como el carguío, acarreo y chancado. El objetivo de su investigación fue determinar cómo la implementación de detonadores electrónicos influye en la mejora del proceso de voladura en la Unidad Minera Cerro Corona.

Esta investigación presenta una metodología aplicada con enfoque cuantitativo y diseño no experimental ya que no se manipulan las variables de estudio (fragmentación y vibraciones) de manera intencional. En su lugar, se recopilan y analizan datos de manera observacional, comparando los resultados obtenidos con detonadores no electrónicos y electrónicos en condiciones reales de operación. En ese sentido, Quispe (9) llega a la conclusión que la implementación de detonadores electrónicos DigiShot Plus influye positivamente en la mejora del proceso de voladura en la Unidad Minera Cerro Corona, ya que, inciden significativamente en la fragmentación de la roca reduciendo el tamaño del P80 de 8,74” a 2,96”, lo cual cumple con los estándares requeridos por la empresa. Los resultados de la investigación mostraron que, al utilizar detonadores electrónicos, se obtuvo una fragmentación más fina y uniforme, con un P80 promedio de 2,96”, lo que representa una mejora del 72% en comparación con los detonadores no electrónicos. En cuanto a las vibraciones, se registró una reducción significativa, con un VPP promedio de 9,64 mm/s y una frecuencia de 10,56 Hz, valores que están por debajo de los límites críticos establecidos por las normas internacionales. Finalmente, el aporte de esta investigación demuestra que los detonadores electrónicos mejoran la granulometría (P80) y a nivel vibracional se reduce la velocidades pico partícula (VPP) lo que se traduce en una voladura controlada y disminución en el daño al macizo rocoso, dos variables claves que influyen positivamente en la optimización del proceso de explotación, es decir, al obtenerse un P80 bajo optimizará los costos en la fase de chancado y molienda y al controlarse la VPP las labores presentarán estabilidad permitiéndonos tener una operación dinámica y segura durante la extracción y limpieza del mineral.

Alvis (10), en su trabajo de investigación denominado: *«Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema de voladura electrónica Fametronic en la Unidad Minera Tacaza – Lampa – Puno»* se enfoca en mejorar la fragmentación de rocas mediante el uso de

detonadores electrónicos, comparando su eficacia con los sistemas de iniciación no eléctricos tradicionales. La investigación se desarrolla en el contexto de la minería a cielo abierto, específicamente en la Unidad Minera Tacaza, donde se evalúan dos proyectos de voladura: uno con detonadores no eléctricos y otro con el sistema electrónico Fametronic. El objetivo de su investigación fue determinar el nivel de influencia del sistema de voladura electrónica Fametronic en la optimización de las voladuras primarias en la Unidad Minera Tacaza.

Esta investigación presenta una metodología aplicada con enfoque cuantitativo ya que se analiza los parámetros técnicos de ambos sistemas de iniciación, asimismo, se realizan cálculos y diseños de voladura, evaluando la fragmentación obtenida, el factor de potencia y los costos asociados. En ese sentido, Alvis (10) llega a la conclusión que el sistema de voladura electrónica Fametronic ofrece ventajas significativas en comparación con el sistema de voladura no eléctrica convencional en la Unidad Minera Tacaza. Además, al proporcionar una mayor precisión en los tiempos de retardo y una dispersión casi nula, el sistema Fametronic permite optimizar la secuencia de salida de los taladros, lo que se traduce en una mejora notable en la fragmentación de la roca, una reducción en el consumo de explosivos y una disminución de los costos de voladura. Específicamente, se logró una reducción del 57.12 % en el tamaño de fragmentación, una disminución del 41.51 % en el factor de potencia y una disminución del 20.83 % en el costo de voladura por tonelada de mineral. Estos resultados resaltan el potencial del sistema de voladura electrónica Fametronic para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras. Por consiguiente, el aporte de esta investigación nos ayuda a comprender que, al programar los tiempos de retardo y la secuencia de iniciación de los detonadores electrónicos, se puede optimizar la fragmentación de la roca de acuerdo con los requerimientos de la planta. Asimismo, el uso de decks permite optimizar el factor de potencia, lo que, a su vez, mejora la estabilidad del macizo rocoso, mejorando la seguridad en las operaciones.

Ruiz (11), en su tesis de investigación denominada: «Aplicación del Sistema de Iniciación Electrónica para la mitigación de efectos adversos de voladuras controladas en zona urbana – Terminal Multipropósito Megapuerto de Chancay» aborda la problemática relacionada con las voladuras controladas, que, aunque son necesarias en proyectos de construcción y minería, pueden generar efectos negativos en las comunidades cercanas, como vibraciones y ruido. El objetivo de su investigación fue analizar la capacidad del sistema de iniciación electrónica para minimizar los efectos no deseados de las voladuras controladas realizadas en el contexto urbano del Terminal Multipropósito Megapuerto de Chancay.

Esta investigación presenta una metodología aplicada de diseño experimental ya que se busca evaluar el impacto de los detonadores electrónicos en las vibraciones producidas por las voladuras en el megapuerto de Chancay; para ello, se ajustarán los parámetros de diseño de las voladuras y se realizarán simulaciones a fin de anticipar los resultados y optimizar el proceso. Por ello, Ruiz (11) llega a la conclusión que, la implementación de detonadores electrónicos en voladuras urbanas demuestra ser altamente efectiva para mitigar los efectos adversos de las voladuras convencionales. Durante las pruebas en la zona portuaria de Chancay, no se registraron quejas por vibraciones, ruido, proyección de rocas, gases o polución, lo que se traduce en una percepción favorable por parte de los pobladores. Los detonadores electrónicos permiten realizar voladuras controladas, reduciendo significativamente los niveles de vibración (manteniéndose dentro de los límites de la norma USBM RI 8507), el ruido (con un máximo de 66.99 dB), y la polución, gracias al uso de mallas y geosintéticos. Además, se logró un incremento del 78 % en el volumen de material quebrado y un 47.46 % en la cantidad de taladros disparados en comparación con el sistema convencional, lo que evidencia la mayor eficiencia del sistema electrónico. En consecuencia, el aporte de esta investigación demuestra que el uso de detonadores electrónicos permite controlar y mitigar los efectos adversos de las voladuras, como las vibraciones por debajo del umbral de daño, el ruido y la proyección de rocas, de acuerdo con los criterios de prevención de daños. Además, la tecnología de iniciación electrónica garantiza el cumplimiento de los estándares operativos, de seguridad y ambientales, logrando una voladura económicamente productiva y socialmente responsable.

Solís (12), en su tesis de investigación denominada: *«Uso de los detonadores electrónicos Fametronic para evaluar la fragmentación de la roca en compañía minera Condestable S. A.»*, se centra en comparar el desempeño de los detonadores electrónicos con los tradicionales pirotécnicos, analizando su impacto en la granulometría post voladura, el factor de potencia y los costos asociados a la perforación y voladura en minería subterránea. El objetivo de su investigación fue analizar la eficiencia de los detonadores Fametronic en la fragmentación de rocas en la Compañía Minera Condestable S. A.

Esta investigación presenta una metodología aplicada de diseño no experimental de corte longitudinal (evolutivo) ya que pretende solucionar los desafíos que presenta el manejo del material post voladura en la Compañía Minera Condestable S.A., específicamente aquellos derivados de la perforación de taladros largos. Por ende, Solís (12) llega a la conclusión que, el estudio de 24 voladuras con detonadores electrónicos Fametronic en la Compañía Minera Condestable S.A., abarcando diferentes tipos de tajeos y longitudes de taladro, optimiza la fragmentación de la roca en comparación con los detonadores pirotécnicos. Además, se observa una reducción significativa en el tamaño del material fragmentado (P80 de 6.80" vs 10.26"), lo

que se traduce en un menor consumo de energía y costos en las etapas posteriores de procesamiento. Los resultados demuestran que, al lograr una mejor fragmentación de la roca, se observa una disminución en el consumo de energía de 0.06 KWh por tonelada. Esto, con un costo de energía de 0.30 dólares por KWh, resulta en un costo de fragmentación por tonelada de 0.018 dólares. Este menor costo de fragmentación por tonelada implica un ahorro significativo en los costos de energía, estimado en 2,700 dólares mensuales y 32,400 dólares anuales, para una producción mensual de 150,000 toneladas. Es por ello que, el aporte de esta investigación proporciona datos empíricos sobre el rendimiento de los detonadores electrónicos en condiciones reales de minería subterránea, incluyendo el análisis del factor de potencia y la granulometría del material post voladura en diferentes tipos de frentes. De igual forma, el uso de detonadores electrónicos no solo puede mejorar la eficiencia de la voladura en sí, sino también generar beneficios en términos de reducción de costos energéticos en las etapas de conminución y otros procesos unitarios.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Voladuras masivas

El minado masivo en minería subterránea es una técnica utilizada en la explotación de yacimientos minerales de gran volumen, permitiendo la extracción eficiente y controlada. Este método se basa en la fragmentación del macizo rocoso, aprovechando su estructura geológica para optimizar la producción y reducir costos. Se distingue por su alta productividad y la capacidad de extracción selectiva en depósitos con continuidad mineralizada, asegurando un mejor aprovechamiento de los recursos. Los métodos más utilizados en este tipo de minería son el *sublevel stoping* y el *sublevel caving*, ambos diseñados para garantizar la recuperación del mineral con un impacto estructural controlado.

El *sublevel stoping* es un método eficiente que se basa en la perforación y voladura progresiva en subniveles, permitiendo un flujo continuo de mineral sin necesidad de un soporte estructural complejo. Su ventaja radica en su economía operativa, la reducción de los laboreos de preparación, reducción de elementos de sostenimiento y la reducción de los índices de accidentabilidad en comparación con otros métodos. Sin embargo, requiere una planificación detallada y una preparación precisa del área para minimizar la dilución del mineral. Por otro lado, el *sublevel caving* es una técnica utilizada cuando las condiciones geomecánicas no permiten una explotación convencional, favoreciendo el hundimiento controlado del techo para la recuperación del mineral. A pesar de su alta eficiencia en la extracción, este método puede presentar desafíos como la dilución del material extraído y la generación de subsidencias en la superficie. Ambos métodos representan estrategias avanzadas de minería subterránea masiva,

optimizando la producción en depósitos de gran tonelaje y garantizando una explotación sostenible con menor impacto ambiental en comparación con métodos a cielo abierto.

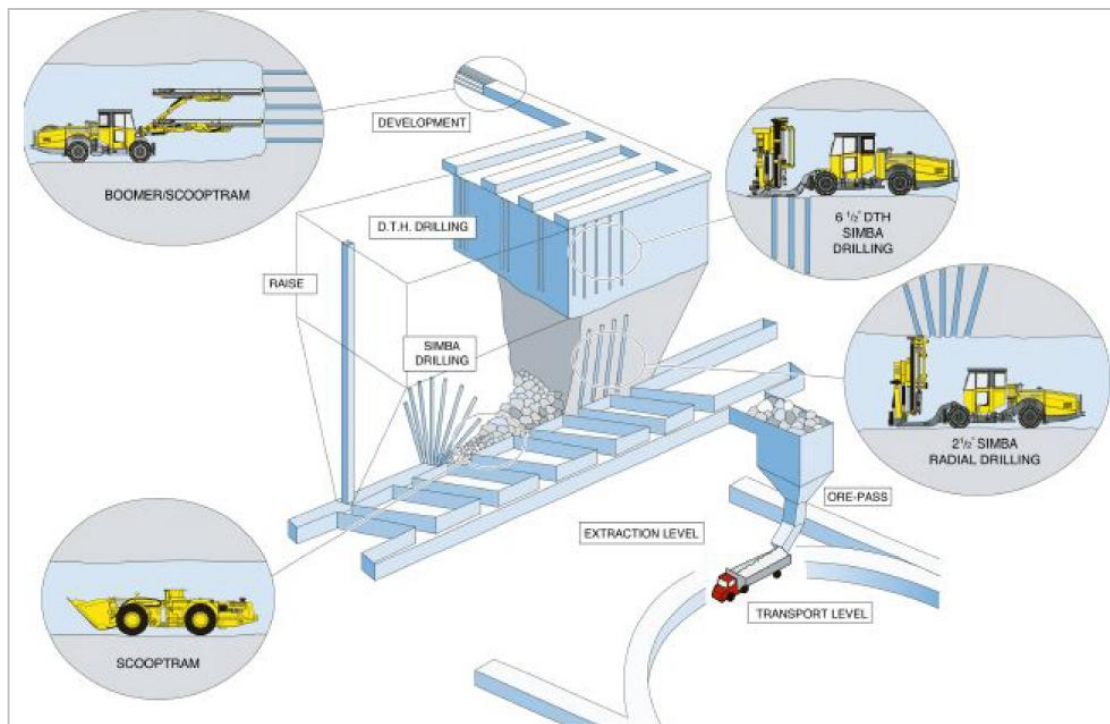


Figura 1. Diagrama de minado masivo
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

2.2.1.1 Ritmo de producción y tonelaje en voladuras masivas

El éxito de una voladura masiva está directamente relacionado con el ritmo de producción y la capacidad de movilización del material fragmentado. En minas subterráneas de gran escala, como El teniente, Chuquicamata (Chile), las voladuras pueden generar entre 5,000 y 60,000 toneladas de mineral por disparo, dependiendo del tipo de yacimiento y la geometría de la explotación. Este volumen de material extraído debe ser manejado eficientemente para mantener la continuidad operativa y evitar cuellos de botella en el transporte y procesamiento.

En minas con explotación mediante *block caving*, como El teniente y Chuquicamata subterránea (Chile), las voladuras masivas generan grandes cantidades de material fragmentado que posteriormente se recupera mediante la gravedad, alcanzando tasas de producción de más de 140,000 TM diarias en algunos casos. En la unidad minera Cerro Lindo el ritmo de producción es de 25, 000 TM diarias.

2.2.1.2 Métodos de explotación

2.2.1.2.1. Sublevel stoping

El método de explotación minera conocido como *sublevel stoping*, también denominado hundimiento por subniveles es una técnica utilizada cuando tanto el cuerpo mineralizado como las rocas que lo rodean poseen una adecuada competencia mecánica. Este método se implementa en yacimientos que presentan buzamientos mayores a 60° y con geometrías relativamente regulares, favoreciendo una extracción eficiente. Su principio fundamental radica en la fragmentación del mineral mediante perforaciones y voladuras, permitiendo que el material se acumule en la base para su posterior extracción sin la necesidad de soporte adicional significativo.

En el yacimiento de Cerro Lindo, la explotación mediante *sublevel stoping* se organiza con subniveles espaciados a cada 30 metros. Los cuerpos mineralizados se dividen en tajos que presentan dimensiones aproximadas de 30 metros de altura, 20 metros de ancho y 25 metros de longitud. Esto da lugar a volúmenes extraídos del orden de 15,000 metros cúbicos y un peso estimado de 67,500 toneladas métricas. Para el proceso de extracción se emplea un sistema de perforación radial, tanto positiva como negativa, con el objetivo de optimizar la fragmentación y el desplazamiento del mineral.

a) Características

El método de cámaras por subniveles es una técnica de explotación minera que permite extraer el mineral en grandes cavidades creadas progresivamente mediante perforación y voladura. Se emplea principalmente en yacimientos con características específicas, tales como:

- Mineralización con buzamiento mayor a 60°, generalmente mayor al ángulo de reposo, lo que facilita el flujo del material.
- Cuerpos mineralizados con un ancho mayor a 6 metros.
- Profundidades que pueden alcanzar hasta 2.000 metros.
- Macizo rocoso con roca encajonante estable.
- Límites bien definidos del cuerpo mineralizado, lo que permite reducir la dilución por debajo del 20%.

• Ventajas

- Alta productividad y rendimiento.
- La gran altura de tajeos permite disparar grandes volúmenes de material.
- Nos permite planear los ciclos de minado, optimizando las operaciones.
- Mayor seguridad.

- Reduce los costos operativos por tonelada y requiere menos personal.
 - Favorece una adecuada ventilación en la mina.
- **Desventajas**
 - La sobrerotura de las cajas incrementa la dilución, baja selectividad, con un porcentaje de recuperación cercano al 75 %.
 - Se requiere un control adecuado en la perforación para minimizar la desviación de los taladros.
 - Fragmentación irregular en muchos casos (voladura secundaria frecuente).

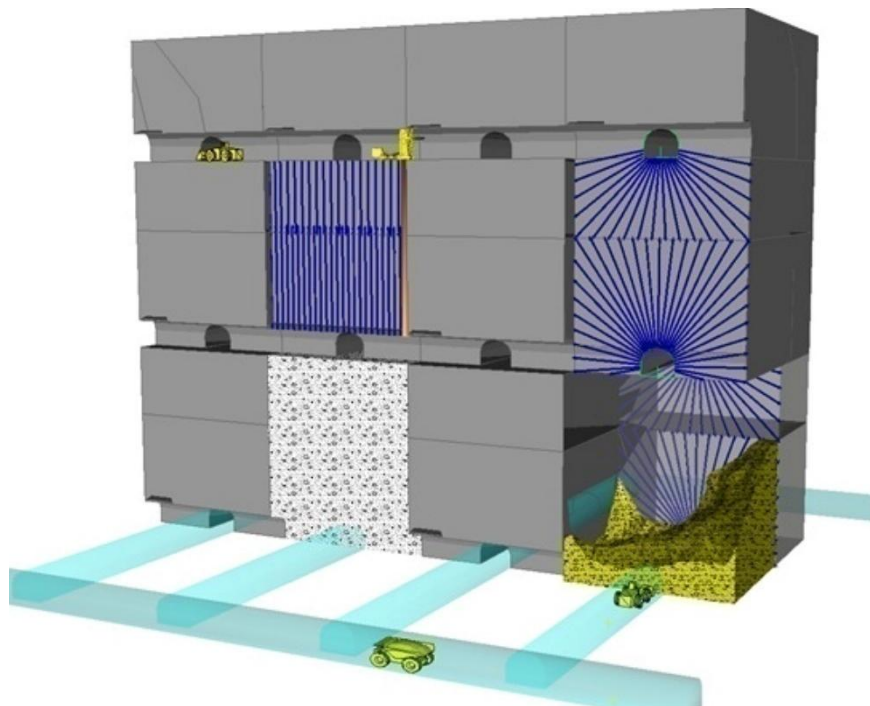


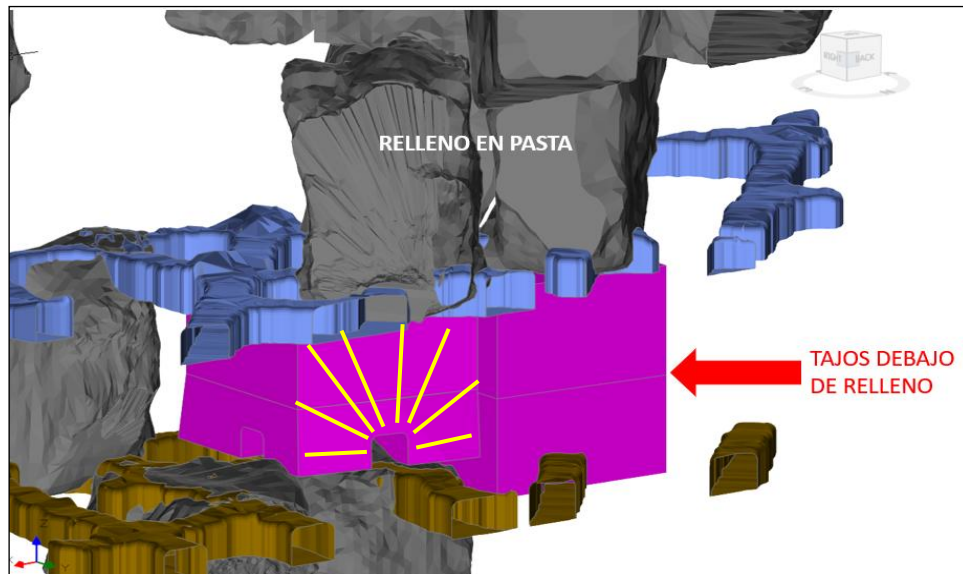
Figura 2. Método de explotación Sublevel Stopping
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

2.2.1.2.2. Sublevel caving

El método de *sublevel caving* se utiliza en áreas donde los parámetros geomecánicos no son adecuados para implementar el método de *sublevel stopping*.

El proceso de minado con *sublevel caving* utilizará los mismos trabajos de desarrollo y preparación empleados en *sublevel stopping*. Se llevarán a cabo perforaciones radiales positivas y la creación de la cara libre será realizada a través de VCR (vertical crater retreat). El diseño de la malla deberá permitir la ejecución de una secuencia de voladuras en retirada. Además, el levantamiento del VCR se llevará a cabo de manera que se asegure la exposición del relleno en pasta superior, garantizando de esta forma que el resto de las mallas radiales puedan ser evacuadas correctamente. Los controles implementados en este proceso incluyen:

- Aislamiento de las zonas superiores dentro del cono de influencia de minado del tajo.
- Limpieza manual únicamente del VCR y expansión del slot.
- Limpieza controlada de las mallas y slot mediante tecnología de control remoto.



*Figura 3. Método de explotación Sublevel Caving
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025*

a) Desarrollo y preparación

Desarrollo: este proceso se basa en el acceso mediante rampas de 5m x 5m de sección, alineadas de manera paralela al eje vertical del cuerpo mineral. A partir de estas rampas, se establecen los subniveles cada 30 metros, con un gradiente positivo del 2%, y una sección de 5m x 4.5m. Estos subniveles, que funcionan como accesos principales, siguen una orientación paralela al eje horizontal del cuerpo y se ubican en la caja del piso.

Preparación: siguiendo el diseño de los desarrollos, se inicia la preparación de los cruceros de acceso hacia el cuerpo mineralizado hasta alcanzar la caja techo, lo que permite una mejor evaluación del cuerpo mineral. Desde estos cruceros, se procede a preparar las galerías con una sección de 5.00 m x 4.50 m, conectando todos los cruceros de preparación. Posteriormente, en el centro de la galería, se desarrollan cruceros de 20 metros de longitud, también de 5.00 m x 4.50 m de sección, que se utilizarán para ejecutar el slot de ambos tajos.

Es importante resaltar que, durante las fases de desarrollo y preparación, se sigue el estándar establecido por NEXA – Cerro Lindo, que consiste en la regla “metro avanzado, metro sostenido”. Para garantizar la estabilidad, se emplea un sostenimiento sistemático con shotcrete, acompañado de pernos helicoidales de 2,10 metros (7 pies) y una malla de 1,20m x 1,20m.

Tabla 2. Parámetros de perforación de frentes

Perforación			
Jumbos	Barra (m)	Ø Broca (mm)	Avance por disparo (m)
Rocket Boomer 282	4.5	45	4.1
Sostenimiento			
Equipo	Modelo	Barra (m)	Ø Broca (mm)
Enmallador	SANDVIK DS411	2.1	38.00
Empernador	SANDVIK DD321	2.1	38.00
Limpieza			
Scoops	Capacidad (m3)	(TM/Hr.)	
CAT R2900G	7.2	215	
CAT R3500G	8.8	312	
SANDVIK LH 621	8.8	312	

*Tomada del Departamento de Planeamiento***b) Perforación**

- **Slot**

La perforación del slot implica realizar taladros pasantes en paralelo, con una malla de 1.50 m x 1.50 m, utilizando un diseño de tres y dos taladros por fila, lo que da un total de 14 filas (35 taladros de 26 metros de longitud por cada taladro). Se llevan a cabo mallas negativas utilizando una broca de 105 mm, alcanzando un total de 910 metros perforados. Para la ejecución de este slot, la cara libre es la chimenea del slot. En cuanto a la perforación tanto del slot como de los taladros radiales, se emplean accesorios específicos de perforación, dependiendo del equipo utilizado, como se detalla en la siguiente tabla 8.

Tabla 3. Parámetros de perforación slot

ACCESORIOS	SIMBA ITH
Perforadora (Unidad de rotación)	DHR 6 HU 56-3
Martillo	Martillo DTH 460 3.5"
Barras	Drill pipe 076X6.3X1800
Brocas	Broca DTH 105 mm
Rendimiento (m/hr)	20.11

Tomada del Departamento de Planeamiento

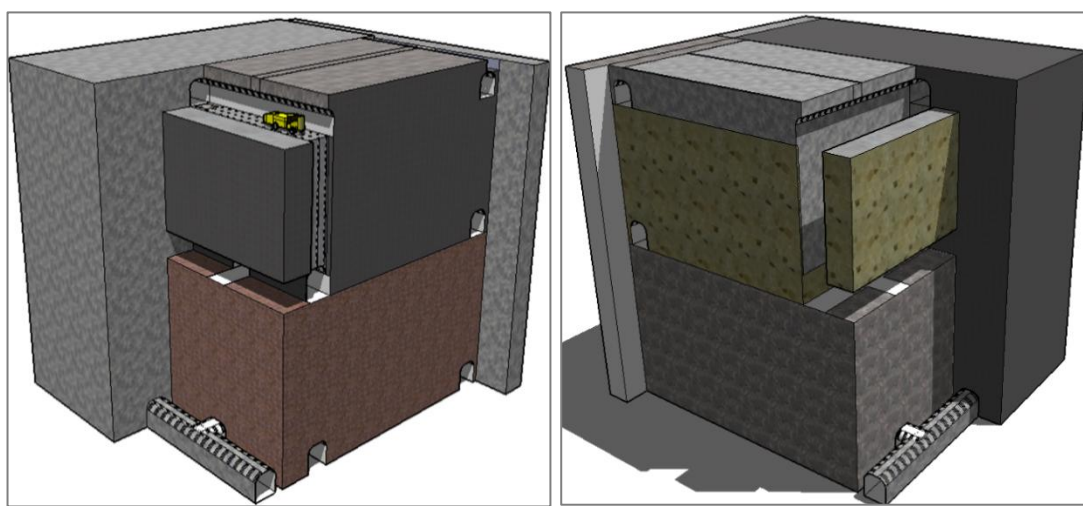


Figura 4. Esquema de apertura de slot
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

- **Chimenea Slot – Chimenea RB**

La chimenea Slot se lleva a cabo mediante una perforación piloto seguida de un proceso de rimado utilizando el equipo RB de Tumi (modelo SBM 400SR). Las chimeneas tienen una longitud promedio de 25 metros, lograda con la perforación piloto realizada con barras de 12 ¼" de diámetro ($\emptyset$) y el rimado posterior con tuberías de 2,10 metros de diámetro ($\emptyset$). Este proceso permite la creación de una chimenea estable y eficiente, adecuada para facilitar la extracción del mineral en el área de trabajo. Las herramientas y equipos utilizados están especialmente diseñados para garantizar la seguridad y eficacia de la operación, asegurando una perforación precisa y un rimado robusto para soportar las condiciones geomecánicas del área.

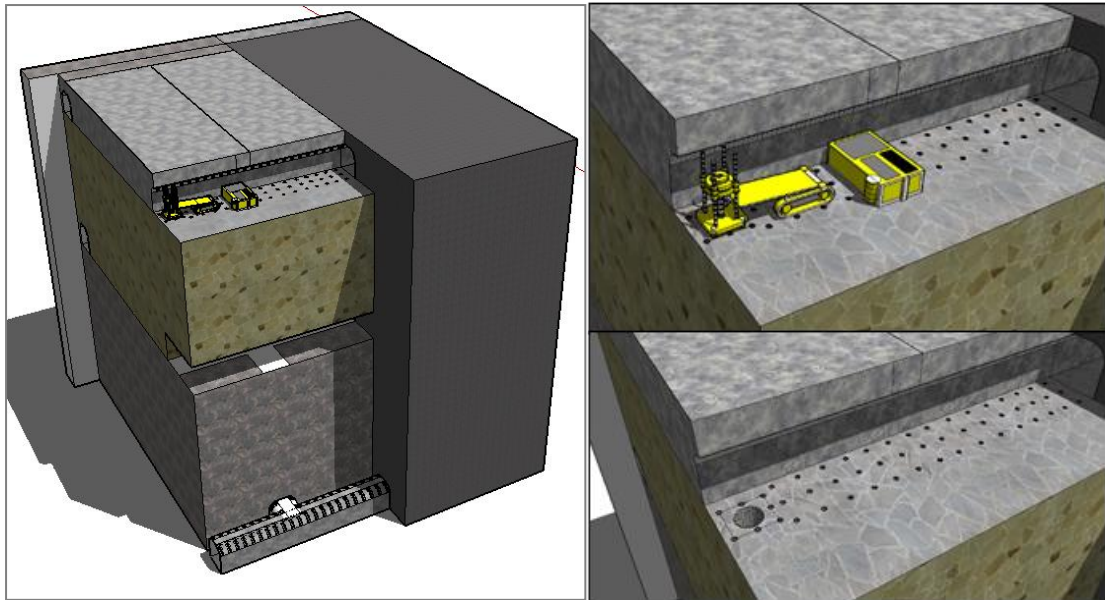


Figura 5. Esquema de ejecución de las chimeneas slot – Chimenea RB
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

- **Chimenea Slot – Chimenea VCR**

Existen dos tipos de chimeneas VCR los cuales son positivas y negativas. Para la perforación de estas chimeneas, se utiliza el equipo ITH-DL-THM4C, lo que permite un trabajo preciso y eficiente. La longitud total de las chimeneas es de 25 metros, con una sección estándar de 3.00 m x 3.00 m. En cuanto a la distribución de los taladros, se perforan 17 taladros que se cargan para su posterior voladura, y se incluyen 6 taladros rimados de 6 pulgadas, los cuales actúan como alivios para asegurar la estabilidad de la estructura. Este proceso de perforación y rimado está diseñado para garantizar una adecuada evacuación de los materiales, controlando las presiones y minimizando los riesgos asociados al desarrollo de las chimeneas VCR.

Tabla 4. Parámetros de perforación VCR negativo

VCR NEGATIVO	
Sección (m)	3.00 x 3.00
Longitud de perforación (m)	25
Metros perforados (m)	575
Inclinación	90°
Cantidad de taladros	23
Taladros cargados	17
Taladros vacíos	6
Diámetro taladro	105

Tomada del Departamento de Planeamiento

Tabla 5. Parámetros de perforación VCR positivo
VCR POSITIVO

Sección (m)	3.00 x 3.00
Longitud de perforación (m)	25
Metros perforados (m)	575
Inclinación	90°
Cantidad de taladros	23
Taladros cargados	17
Taladros vacíos	6
Diámetro taladro	89

Tomada del Departamento de Planeamiento

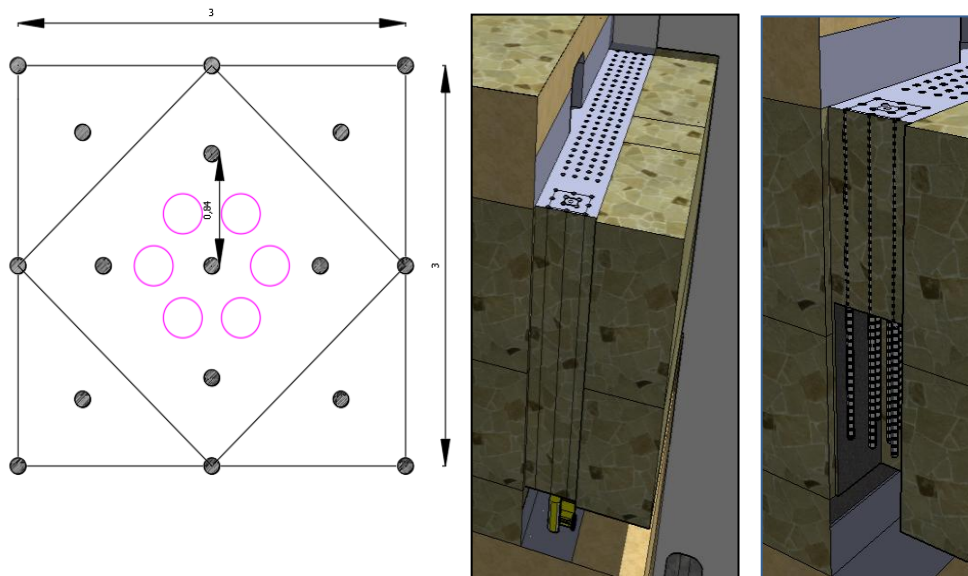


Figura 6. Esquema de perforación en Chimenea VCR
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

- **Tajo**

La perforación radial en el tajo se lleva a cabo utilizando equipos ITH y/o DL, y sigue un proceso detallado para garantizar su precisión y eficiencia. Inicialmente, se realiza un raspado de los pisos hasta alcanzar roca firme, lo que evita problemas de emboquillado y previene desviaciones durante la perforación. Una vez logrado esto, se procede con la perforación radial negativa de todo el tajo, lo cual es fundamental para asegurar un buen rendimiento en la voladura. Posteriormente, se lleva a cabo la limpieza de los detritos acumulados en el piso, lo que reduce la carga de trabajo de los disparadores y mantiene los taladros negativos más limpios. La perforación radial exige una gran exactitud para garantizar que las voladuras se ejecuten correctamente. Cada anillo de perforación debe ser realizado de acuerdo con un diseño específico, y el perforista dispone de un conjunto de planos que detallan la ubicación exacta de

cada anillo, además de las paradas, según el equipo que se utilizará para la perforación. Es importante tener en cuenta que los baricentros pueden variar entre los distintos equipos, por lo que también se debe considerar el ángulo de perforación y el diámetro de los taladros.

La perforación radial negativa se efectúa mediante una malla cuadrada en los extremos del taladro, con dimensiones de 3.50 m x 3.50 m, y una longitud vertical máxima de 26 metros. La broca utilizada tiene un diámetro de 105 mm (4"). En cuanto al rendimiento, la perforación con equipos ITH y/o DL alcanza una velocidad de 20.11 metros por hora (m/h), lo que equivale a un rendimiento mensual de 33,500 metros por flota, garantizando una alta productividad en el proceso de perforación.

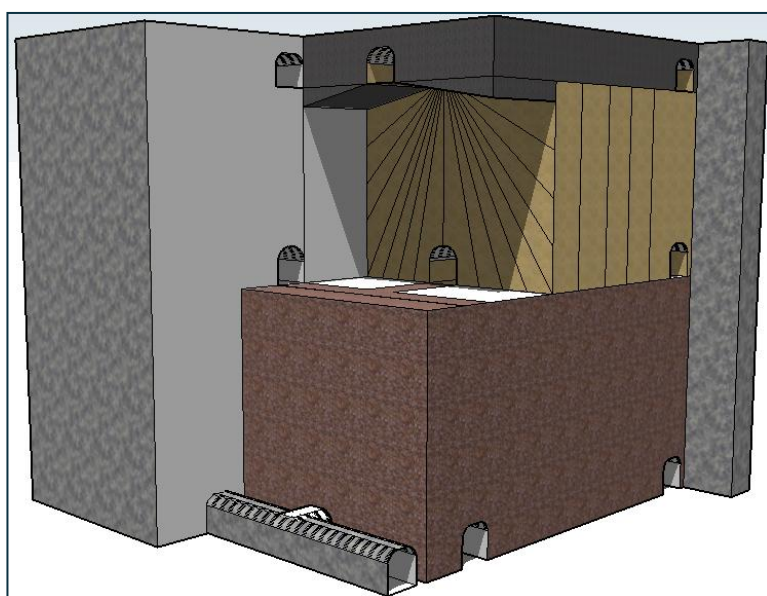


Figura 7. Esquema de perforación en tajos.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

Tabla 6. Parámetros equipos de perforación taladros largos

Parámetros	Tal. Negativo	Tal. Positivo
Disp. Mecánica (%)	73.62	79.1
Rendimiento (m/hr.)	20	20
Rendimiento (TM/MP)	17.5	9.5
Costo (\$/TM)	0.68	0.83
Baricentro (m)	2	1.5 - 1.8

Tomada del Departamento de Planeamiento

c) Voladura

- Slot

El proceso de voladura se lleva a cabo de acuerdo con las características específicas del tajo. En el caso de un tajo donde la cara libre sea una chimenea, se inicia con la ampliación de 5 filas del slot. Posteriormente, se realiza la voladura completa de todo el slot, seguida de la limpieza total del mineral volado. Esta limpieza es esencial para dejar la cara libre vacía (zona conocida como zanja), lo que permite comenzar con la voladura masiva de las mallas radiales.

En los tajos donde la cara libre está representada por una chimenea VCR, el procedimiento varía ligeramente. En primer lugar, se efectúa la voladura del VCR para generar una cara libre adecuada, lo que facilita la expansión del slot. Una vez ampliado el slot, se realiza la voladura de toda la zona, y el proceso continúa de la misma manera que en el caso de un tajo con chimenea como cara libre, es decir, con la limpieza del material volado y la posterior voladura de las mallas radiales.

A continuación, se presenta la Tabla N° 12 con los materiales utilizados en la voladura del slot, detallando las especificaciones necesarias para cada fase del proceso. Este enfoque asegura una ejecución eficiente y segura de las voladuras, garantizando el avance del proyecto de manera controlada.

Tabla 7. Voladura de slot positivo y negativo

Accesorios y explosivos	Unidad	Cantidad por Slot
ANFO	Kg.	4,375
Booster HDP 3	Und.	105
Detonadores electrónicos (46m)	m	70
Detonadores electrónicos (20m)	m	35
Cable arnés	m	200
Blaster 3000	Und.	1
Logger	Und.	2
Volumen Roto (m ³)	m ³	2,600
TMR (20 x 26 x 5 x 3)	Tm	7,800
Factor de potencia	Kg/Tm	0.37
Metros perforados	m	910
Índice perforación	Tm/m	12.86

Tomada del Departamento de Planeamiento

Como se puede observar, el factor de potencia es relativamente alto, mientras que el índice o rendimiento de perforación es bajo. Esto se debe principalmente a que, al abrir el slot, la malla de perforación utilizada es de 1.50 m x 1.50 m con taladros paralelos. En estos casos, es fundamental controlar la sección del slot, ya que esta representa una limitante importante para mejorar la eficiencia de la voladura.

Es crucial llevar a cabo una voladura adecuada y eficiente durante la ejecución del slot, ya que esta abertura se convertirá en la cara libre del tajo para la posterior voladura de la perforación radial. La correcta ejecución de este proceso impacta directamente en la efectividad de las voladuras subsiguientes, optimizando tanto el rendimiento como la seguridad en las operaciones mineras.

- **Chimenea VCR**

La voladura de los VCR negativos se realiza en secciones de 4 metros, utilizando una serie de accesorios y explosivos específicos, cuya cantidad está detallada en la tabla N°13. Actualmente, la ejecución de VCR negativos no es una práctica continua, ya que las chimeneas se están llevando a cabo principalmente con equipos de Raise Boring de Ø 2.1 metros. Este enfoque con equipos de mayor diámetro ha permitido optimizar el proceso de perforación y voladura, aunque la técnica de voladura de los VCR negativos sigue siendo utilizada de manera ocasional, dependiendo de las condiciones y los requerimientos específicos del tajo.

Tabla 8. Explosivos y accesorios utilizados en la voladura del VCR negativo

Accesorios y Explosivos	Unidad	Cantidad
ANFO	Kg.	114.4
Booster HDP3	Und.	12
Detonadores electrónicos (20 m)	Und.	12
Cable Arnés	m	100
Factor de potencia	Kg/Ton	0.75
Avance	m	4
Factor de potencia por avance	Kg/m	28.6

Tomada del Departamento de Planeamiento

La voladura de los VCR positivos se lleva a cabo de manera integral, pero su ejecución se realiza en etapas secuenciales. Esta sincronización está determinada por la altura del VCR, lo que requiere una planificación precisa para asegurar que cada etapa se realice de forma controlada y eficiente. La altura del VCR influye directamente en la cantidad de material a volar

en cada fase, lo que hace esencial ajustar la secuencia de la voladura para maximizar el rendimiento y minimizar los riesgos durante la operación.

Tabla 9. Explosivos y accesorios utilizados en la voladura del VCR positivo

Accesorios y explosivos	Unidad	Cantidad
ANFO	Kg.	1,500
Booster HDP3	Und.	68
Detonadores electrónicos (20m)	Und.	68
Cable arnés	m	100
Factor de potencia	Kg/Ton	2
Longitud	m	20

Tomada del Departamento de Planeamiento

- **Tajo**

La voladura de los anillos radiales se ejecuta de manera masiva en un proceso de retirada, lo que permite optimizar la eficiencia de la voladura. Para garantizar su efectividad, es esencial trabajar con los planos de perforación para conocer los parámetros de cada taladro y calcular de manera precisa la cantidad de carga explosiva necesaria por perforación. Además, se debe llevar a cabo una limpieza exhaustiva de los taladros, eliminando cualquier acumulación de agua y asegurando una correcta distribución tanto de los retardos como de la carga explosiva. Es crucial tener un control riguroso sobre la carga operante para minimizar el impacto de las ondas expansivas y evitar daños estructurales. Para la voladura, se utilizan Booster HDP3, detonadores electrónicos con longitudes de 20 y 40 metros, cable arnés de disparo y ANFO. El factor de potencia se establece en 0,22 kg/TM, lo que resulta en una eficiencia promedio de 17,5 TM por metro perforado. El costo asociado es de 0,28 \$/TM, y la generación de bancos para voladura secundaria se sitúa en un 8%. Con este enfoque, se logra una voladura controlada y eficiente, maximizando la seguridad y la productividad del proceso.

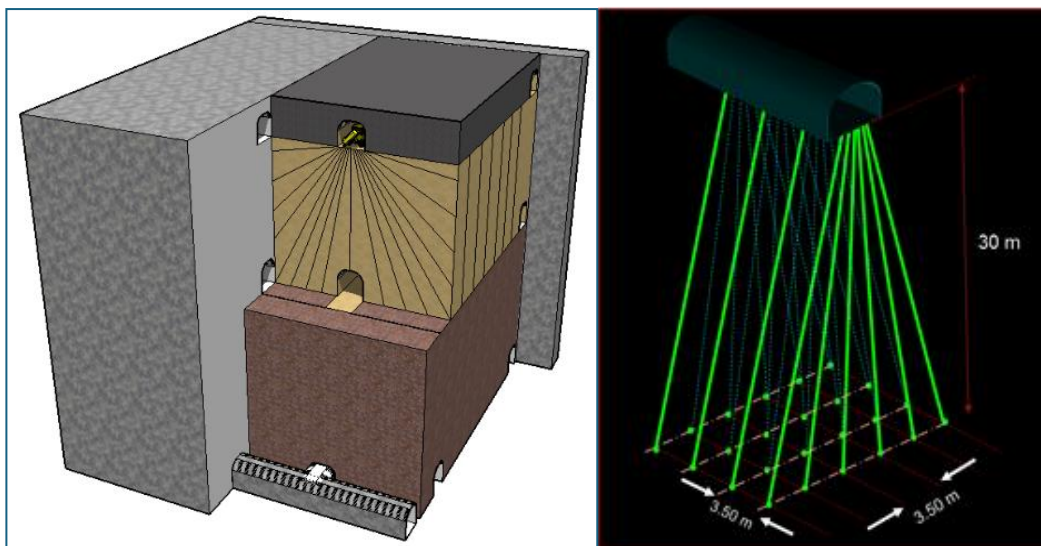


Figura 8. Voladura de anillos radiales
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

d) Equipos de perforación

En minería subterránea, los equipos ITH (*in the hole*) son taladros diseñados para perforaciones largas, el cual opera con martillos de fondo (DTH - *down the hole*) impulsados por aire comprimido o agua. Su capacidad para perforar roca competente con diámetros de 76 mm a 254 mm y alcanzar profundidades de hasta 60 metros los convierte en equipos necesarios para realizar una producción a gran escala, como los métodos *sublevel caving* (SLC) y *sublevel stoping* (SLS). Sin embargo, su operación demanda un consumo energético elevado y requiere un mantenimiento frecuente debido al desgaste de martillos y tuberías de aire. Equipos como el Sandvik DL421, Epiroc Simba E7 y M7 operan actualmente en diversas minas de Perú y Chile.

Por otro lado, los DL (*drill longhole*) emplean martillo en cabeza (*top hammer*), permitiendo perforaciones de menor diámetro, generalmente entre 51 mm y 127 mm, con taladros que pueden alcanzar profundidades de hasta 40 metros. Son preferidos en operaciones subterráneas que requieren perforaciones precisas en áreas de difícil acceso, garantizando menor desviación y mayor control del diseño de voladuras. Su sistema hidráulico elimina la necesidad de compresores externos, optimizando costos operativos y mejorando la eficiencia energética. Son ampliamente utilizados en *sublevel stoping* (SLS), donde aseguran una distribución uniforme de la voladura y una fragmentación controlada del mineral. Entre los beneficios de los equipos DL se encuentran su operatividad sencilla, menor deterioro en las barras de perforación y un alto grado de automatización, lo que contribuye a optimizar la seguridad y el rendimiento en las operaciones mineras. En cuanto a su uso, los ITH se destinan principalmente a la perforación de producción en áreas de gran volumen de extracción, mientras que los DL son preferidos en

sectores donde se requiere mayor precisión y barrenos de menor diámetro. La selección del equipo más adecuado dependerá de las características geológicas del macizo rocoso, las necesidades de fragmentación y los costos operativos de la explotación minera.

Tabla 10. Equipos de perforación – UM Cerro Lindo

Modelo	Tipo	Descripción
ITH - Simba 009	Simba	Equipo de perforación ITH.
Simba 010	Simba	Equipo de perforación estándar.
ITH - Simba 011	Simba	Equipo de perforación ITH.
Simba 012	Simba	Equipo de perforación estándar.
ITH - Simba 005	Simba	Equipo de perforación ITH.
ITH - Simba 013	Simba	Equipo de perforación ITH.

Tomada del Departamento de Planeamiento

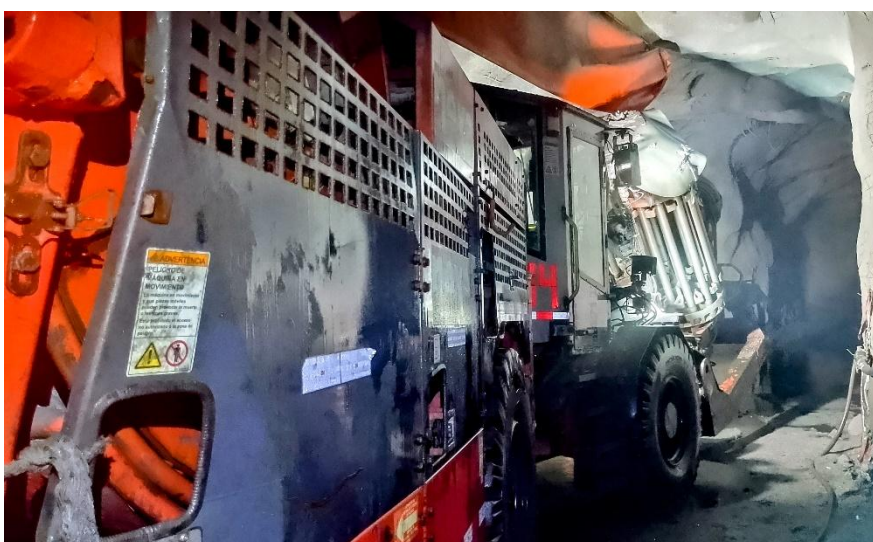


Figura 9. Perforadora Sandvik DL 421
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

e) Limpieza

La remoción del material se efectúa con Scooptrams Cat R 3000 G (11.0 yd³) y Cat R 2900 G (9.0 yd³). Durante la fase de voladura, la limpieza se lleva a cabo sin el uso de control remoto hasta generar el espacio suficiente para continuar con el ciclo de minado. Es fundamental señalar que está estrictamente prohibido exponer al operador en áreas amplias sin un techo estructuralmente seguro. Una vez concluida la voladura y cuando la limpieza convencional con operador a bordo ya no es viable, se emplea un sistema de control remoto. De esta forma, solo el equipo teleoperado accede al tajo para la remoción del material, mientras el operador permanece en una ubicación segura. Esto evidencia una de las principales ventajas del método *sublevel stopping*: la seguridad. En efecto, esta estrategia garantiza que la extracción se realice

en retirada, evitando que el personal vuelva a ingresar a zonas previamente explotadas o en proceso de explotación.

f) Carguío

El carguío se realiza utilizando Scooptrams que transportan el material directamente a los volquetes ubicados en las cámaras de carguío. Estas cámaras están equipadas con áreas de acumulación de mineral, lo que mejora la eficiencia operativa de los Scooptrams y aumenta la velocidad de carguío. Como resultado, se optimiza el rendimiento de los volquetes, lo que se traduce en una alta productividad. La producción diaria alcanza un total de 17.0 ktpd, lo que refleja el rendimiento eficiente y constante del sistema de carguío.

g) Transporte

El transporte del mineral se lleva a cabo mediante una flota de 38 volquetes SCANIA G 540, con capacidad de 45 toneladas, operados por la empresa Saturno. El ciclo promedio de transporte dentro de la mina, desde las cámaras de carguío hasta la parrilla del *ore pocket*, es de aproximadamente 35 minutos. Desde allí, el mineral se transporta a la chancadora primaria y se traslada por faja transportadora a lo largo de 1,600 metros hasta llegar a la planta de procesamiento. Este sistema de transporte asegura una operación fluida y continua, manteniendo altos niveles de eficiencia y productividad en todas las etapas del proceso minero.

Tabla 11. Parámetros de los equipos de limpieza, carguío y transporte

Parámetros	Scooptrams		Volquetes
Modelo	CAT R2900G	CAT R3000G	SCANIA G540
Cap. (m ³)	7.2	8.8	18
Cap. (t)	9	11	45
Rendimiento (t/h)	320	320	70
Costo (\$/h)	118.25		32

Tomada del Departamento de Planeamiento



Figura 10. Volquete Scania G540 - B8X4 (izquierda) y faja transportadora N°3 salida de mina a superficie (derecha)

Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

2.2.2 Detonadores electrónicos

Los detonadores electrónicos han emergido como una de las tecnologías más avanzadas en la industria minera, revolucionando los procesos de voladura. A diferencia de los detonadores convencionales que funcionan mediante sistemas mecánicos o químicos, los detonadores electrónicos utilizan circuitos electrónicos y códigos de activación para detonar explosivos de manera precisa y controlada. Este tipo de tecnología ha permitido una mayor precisión en la temporización de las detonaciones, lo que no solo optimiza la energía utilizada en las voladuras, sino que también reduce los impactos negativos como las vibraciones, los ruidos excesivos y otros efectos secundarios que afectan tanto la seguridad como el entorno.

Los detonadores electrónicos, como el I-KON III, ofrecen una gran flexibilidad y eficiencia en la ejecución de las voladuras. Gracias a su capacidad para programar retardos en milisegundos, estos sistemas permiten realizar una secuenciación de las detonaciones que responde mejor a las condiciones geológicas del terreno, lo que resulta en un aprovechamiento más eficiente de la energía liberada. Además, la tecnología que los acompaña permite gestionar remotamente la voladura, lo que mejora significativamente la seguridad y el control durante la operación.

2.2.2.1 Componentes del sistema electrónico I-KON III

El sistema I-KON III es una tecnología avanzada en la iniciación de voladuras electrónicas que permite un control preciso de los tiempos de retardo en las detonaciones. Los componentes principales de este sistema incluyen el detonador I-KON III, el cable arnés, el Logger II, el Blaster 3000 y el software SHOTPlus. El detonador I-KON III es el dispositivo que se encarga de realizar la detonación en el momento exacto programado, utilizando un sistema electrónico

que garantiza alta precisión. El Cable arnés es un conjunto de cables que conecta los detonadores a los dispositivos de control, facilitando la distribución y la programación de las detonaciones. El Logger II es un sistema de registro de datos que permite supervisar y verificar el proceso de detonación, asegurando la integridad y efectividad del sistema. Finalmente, el Blaster 3000 es el equipo encargado de controlar y gestionar las secuencias de detonación de forma remota, permitiendo realizar voladuras con gran seguridad y flexibilidad.



Figura 11. Componentes del sistema electrónico de voladura I-KON III
Tomada de Ficha Técnica I-KON III. 2025

a) Detonador I-KON™ III

El detonador I-KON™ III es un sistema avanzado utilizado en minería para la iniciación precisa y controlada de voladuras. Este detonador cuenta con un ID único de fábrica compuesto por 8 dígitos alfanuméricos, lo que permite una identificación exclusiva y un control riguroso de cada dispositivo. El sistema también ofrece un código de color y un indicador de longitud de cable, lo que facilita su manejo y permite personalizar la configuración de las detonaciones. Los componentes del sistema están diseñados para asegurar que la comunicación entre los detonadores y los dispositivos de control, como el Logger y Blaster, se realice de manera bidireccional a través de señales digitales cifradas, garantizando alta seguridad en su utilización. Además, la temperatura de operación del detonador varía entre -20°C y 80°C, lo que permite su uso en diversas condiciones ambientales.

En términos de precisión, el detonador I-KON™ III ofrece un control altamente preciso de los tiempos de retardo, con una desviación de solo +/- 0.005%, lo que minimiza las probabilidades de una detonación fuera de secuencia y mejora la sincronización de las voladuras. La programación de los tiempos de retardo varía desde 0 hasta 30,000 milisegundos, lo que permite realizar voladuras complejas que antes no eran posibles. Esta precisión es crucial para mejorar la eficiencia de la fragmentación y minimizar los riesgos operacionales. Además,

la cápsula bimetálica del detonador ofrece una alta resistencia a la corrosión y shock dinámico, lo que lo hace ideal para su uso en terrenos difíciles y condiciones adversas, garantizando una mayor fiabilidad frente a los impactos y la corrosión.



*Figura 12. Características del detonador I-KON™ III
Tomada de Ficha Técnica I-KON III. 2025*

b) Logger II

El Logger II es un dispositivo electrónico utilizado en la minería, especialmente en el banco de voladura, para gestionar y registrar los detonadores del sistema I-KON™ III. Su principal función es verificar el estado de los detonadores, leer y escribir el ID único del detonador en su memoria, y asignar tiempos de retardo para la detonación. Este dispositivo es inherentemente seguro al operar a 6 voltios, lo que lo hace adecuado para su uso en ambientes de alto riesgo.

Además de sus funciones de registro y verificación, el Logger II actúa como una "libreta electrónica" que facilita la asignación, cambio y almacenamiento de los tiempos de retardo. Ofrece una funcionalidad de prueba que permite detectar errores, como problemas de comunicación, caída de tensión o detectores intrusos. Es capaz de aceptar hasta 24 mA de fuga y tiene una capacidad de registro de hasta 500 detonadores en su memoria. Además, presenta un diseño robusto y fácil de usar, con características como conexiones USB para descarga de datos y panel de control intuitivo para facilitar su operación. Su capacidad para realizar cambios en tiempo real y verificar el estado de cada detonador lo convierte en una herramienta esencial para optimizar la seguridad y eficiencia en las voladuras controladas.



Figura 13. Aplicación del Logger II en campo
Tomada de Ficha Técnica I-KON III. 2025

c) Blaster 3000

El Blaster 3000 es un dispositivo fundamental en el sistema de voladuras electrónicas I-KON™ III, diseñado para iniciar de manera precisa y segura las detonaciones de los detonadores electrónicos. Este equipo se utiliza para gestionar la secuencia de disparo de los detonadores, permitiendo la conexión y control de los dispositivos *loggers* y otros componentes de la voladura. Entre sus funciones clave, se incluye la sincronización de las detonaciones a través de cables y de señales de radio, lo que asegura una detonación eficaz y controlada.

Entre las características principales del Blaster 3000 se encuentran su capacidad de ofrecer energía suficiente para iniciar los detonadores I-KON™ III, así como la conexión de terminales de salida para los *loggers* y cables de disparo. Además, el Blaster cuenta con un puerto de antena para la comunicación remota, un conector LAN para la conexión a redes, y una alimentación eléctrica segura, que refuerza su fiabilidad en entornos exigentes.

El sistema también integra una serie de medidas de seguridad como la verificación de las conexiones y la utilización del Master Dongle, que solo se conecta cuando el área de voladura ha sido completamente evacuada, asegurando así que no se realicen disparos accidentales. El Blaster 3000 permite realizar voladuras de forma remota mediante un sistema de comunicación bidireccional con los *loggers*, con un alcance de hasta 2.5 km, y garantiza la seguridad del proceso mediante la encriptación de las señales enviadas.

d) Cable de arnés

El cable de arnés es un componente esencial en los sistemas de detonación electrónica, diseñado para conectar diferentes dispositivos como detonadores y cables de disparo. Este cable está compuesto por un conductor de cobre de $0,6 \text{ mm} \pm 0,013 \text{ mm}$ de diámetro, con un aislamiento de $1,05 \text{ mm} \pm 0,075 \text{ mm}$ de diámetro, lo que lo hace resistente y seguro para su uso en voladuras. La resistencia total por metro es de aproximadamente $0,07 \Omega$ por conductor, lo que equivale a 140Ω por kilómetro, lo que ayuda a garantizar una adecuada conductividad eléctrica y una mínima caída de voltaje en el sistema. Este tipo de cable se utiliza principalmente en conexiones que requieren una alta resistencia y eficiencia en la transmisión de señales para la correcta ejecución de las voladuras.

El cable de arnés debe ser manejado cuidadosamente, utilizando equipos como el tester de cable de disparo, el cual permite verificar la continuidad de corriente en los cables.

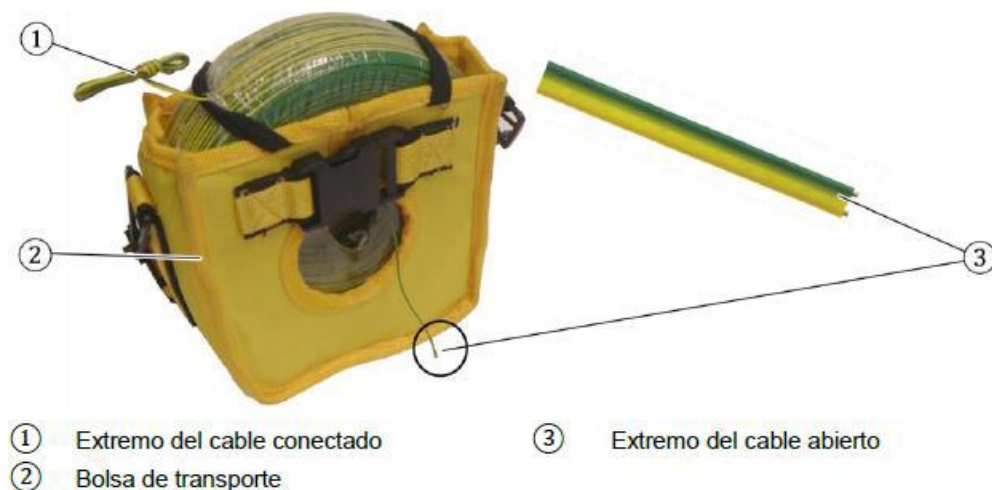


Figura 14. Partes del cable de arnés
Tomada de Ficha Técnica I-KON III. 2025

e) ShotPlus 5

ShotPlus 5 Professional es una herramienta especializada en el diseño de voladuras para minería, que permite generar planes de voladura detallados para optimizar el proceso de registro. Entre sus funcionalidades se incluyen simulaciones de voladuras, análisis de tiempos de voladura (como acoples, iso tiempos y burden de alivio), y la simulación de desplazamiento de material. Además, facilita la carga y descarga de diseños y datos a los loggers, lo que mejora la precisión en el monitoreo y control de las voladuras, optimizando la seguridad y la eficiencia operativa.



Figura 15. Voladura con ShotPlus 5
Tomada de Ficha técnica ShotPlus 5. 2025

2.2.2.2 Beneficios de los detonadores electrónicos

Los detonadores electrónicos proporcionan un control exacto de los tiempos de retardo, lo que permite una liberación más eficiente de la energía en las voladuras, reduciendo vibraciones, ruidos excesivos y el impacto ambiental en las cercanías.

La sincronización precisa de las detonaciones mejora la distribución de la energía, lo que resulta en una fragmentación más consistente de la roca, lo que facilita los procesos de trituración y transporte, y reduce los costos operativos por fragmentos más pequeños.

Gracias a la capacidad de operar de manera remota, se reduce la exposición directa al riesgo, asegurando que las voladuras se realicen sin que el personal esté cerca del área de impacto. Además, el sistema de verificación antes de la detonación garantiza la correcta programación, minimizando los errores y riesgos operacionales.

La posibilidad de ajustar los retardos de las detonaciones según las condiciones del terreno mejora la liberación de energía, permitiendo una mayor eficiencia de las voladuras y optimizando el uso de los explosivos.

La mejora en la fragmentación y la precisión de las voladuras reduce la carga sobre los equipos de trituración y transporte, disminuyendo el consumo de energía y los costos operativos. También mejora el uso de explosivos, lo que contribuye a una mayor rentabilidad y eficiencia en la operación minera.

2.2.3 Comportamiento dinámico del macizo rocoso

El comportamiento dinámico del macizo rocoso en minería subterránea durante las voladuras masivas involucra la interacción entre la explosión y las propiedades físicas de la roca. Cuando se utilizan explosivos para fragmentar grandes volúmenes de roca, se generan ondas de choque y vibraciones que viajan a través del macizo rocoso. Estas ondas pueden tener efectos significativos en las rocas cercanas, induciendo fracturas adicionales que afectan tanto la resistencia de la roca como la estabilidad de las excavaciones subterráneas. La intensidad y propagación de las ondas de choque dependen de diversos factores, como la cantidad y tipo de explosivo, el diseño de la voladura y la profundidad de la labor.

La evaluación de este comportamiento dinámico es fundamental para entender cómo las fuerzas generadas por las explosiones pueden afectar la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras. Un factor crítico es el tipo de fractura que se induce en la roca, ya que las explosiones pueden generar fracturas tanto superficiales como profundas que alteran la integridad del macizo. La propagación de estas fracturas no solo depende de las propiedades mecánicas de la roca, como su resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, sino también de la distribución de las tensiones generadas por la voladura. Los efectos de las fracturas y deformaciones pueden ser locales, afectando únicamente el área cercana a la voladura, o pueden extenderse a mayores distancias si las explosiones son de gran magnitud.

Otro aspecto clave del comportamiento dinámico es la propagación de vibraciones. Las vibraciones generadas por las voladuras pueden tener un impacto negativo en las excavaciones cercanas, haciendo que se produzcan deslizamientos o fallas en las paredes de la labor. Además, las vibraciones pueden ser transmitidas a la superficie, afectando las estructuras cercanas, como viviendas, caminos y otras instalaciones. Por ello, es esencial controlar la magnitud de estas vibraciones utilizando métodos de monitoreo y control adecuados. La medición y análisis de las vibraciones durante y después de las voladuras permite ajustar las técnicas de voladura y los parámetros operacionales para reducir riesgos y optimizar los resultados.

Para gestionar estos impactos, se emplean modelos numéricos y simulaciones que permiten predecir la respuesta del macizo rocoso ante las voladuras masivas. Estos modelos permiten simular cómo se propagarán las ondas de choque y cómo las fracturas se desarrollarán en la roca. Las simulaciones también ayudan a optimizar los parámetros de la voladura, como la cantidad de explosivo, el tipo de detonación y la disposición de los agujeros de voladura. De este modo, se puede maximizar la eficiencia en la fragmentación de la roca, reducir el riesgo de daños a las excavaciones y garantizar la seguridad de los trabajadores. Estos modelos son

herramientas clave para la planificación y ejecución de voladuras, ya que permiten ajustar las operaciones mineras de manera precisa y controlada.

2.2.3.1 Propiedades del macizo rocoso

- Densidad: indicador del grado de dificultad para fragmentar una roca.
- Resistencia mecánica: se obtiene evaluando la tracción y compresión simple de la roca con pruebas de laboratorio.
- Velocidad de propagación de las ondas sísmicas: es la velocidad con la que se propaga una onda de choque a través del macizo rocoso y afecta la distribución de las tensiones en el interior del sólido rocoso. Es una medida de la elasticidad de la roca.
- Impedancia: es igual al producto de la densidad de la roca por la velocidad de propagación de las ondas de choque y nos permite analizar la transferencia de energía de la onda en el macizo rocoso.
- Absorción de energía o capacidad de deformación plástica: da cuenta de la elasticidad de la roca y expresa la capacidad de ésta para resistir un impulso y recuperar su forma y fricción original, sin ser colapsada.
- Control estructural: se analiza la presencia de diaclasas, fracturas y tipos de fallas propias de la geología del macizo, para establecer el grado de orientación preferencial y el grado de concentración de estos accidentes estructurales, importante en la disposición de la malla de perforación y en la secuencia de salida del disparo.

2.2.3.2 Monitoreo de vibraciones

La señal de vibraciones producida por una voladura consta de un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de ellos corresponde a cargas o grupo de cargas detonando en un determinado tiempo.

La forma y amplitud de las ondas de vibración, nos otorga la efectividad relativa de la detonación, es así que la amplitud es una medición de la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso, con la cual es posible determinar el tiempo real de detonación de una o varias cargas, velocidad de partícula, detonación de cargas de baja eficiencia o no detonadas,

detonación instantánea y detonación de cargas por simpatía; a la vez que podemos calcular desplazamiento, aceleración y frecuencia de las partículas de la roca.



Figura 16. Monitoreo de vibraciones en campo

a) Vibraciones generadas por voladura

Cuando se realiza una voladura, se producen distintos efectos, como vibraciones, ondas aéreas y la dispersión de fragmentos de roca. Estos fenómenos pueden generar impactos en las estructuras cercanas. La fragmentación del material se debe principalmente a las ondas de choque, por lo que en este apartado se analizará su propagación y los diferentes tipos de vibraciones involucrados en el proceso. Las variables que influyen en la propagación de las vibraciones son prácticamente las mismas que condicionan el proceso de tronadura. A continuación, se detallan:

- **Condiciones geológicas y características del terreno:** cuando las ondas atraviesan formaciones rocosas homogéneas, su propagación se da en todas las direcciones. Sin embargo, en terrenos con estructuras geológicas complejas, la dirección de propagación puede cambiar, lo que influye en la VPP y la frecuencia de las vibraciones. Además, a medida que la distancia aumenta, la energía de las vibraciones disminuye debido a la disipación de energía en forma de fricción entre partículas, lo que es relevante en estudios de impacto a gran escala.
- **Cantidad de carga operante:** la intensidad de las vibraciones está directamente relacionada con la carga detonada y su ubicación. En voladuras con múltiples detonadores, la cantidad de carga empleada por retardo es mayor, lo que influye en la amplitud de las vibraciones generadas.

- **Distancia al epicentro de la voladura:** la propagación de las vibraciones se ve afectada por la distancia entre el punto de detonación y el área de impacto. A mayor distancia, menor será la intensidad de las vibraciones. Adicionalmente, el macizo rocoso actúa como un filtro que atenúa las frecuencias más altas, por lo que, a distancias más largas, predominan frecuencias bajas.
- **Consumo específico de explosivos:** la reducción de la cantidad de explosivo utilizado no garantiza una disminución de las vibraciones. En ciertos casos, una disminución del 20% respecto al consumo óptimo ha generado un incremento en la intensidad vibratoria debido a un confinamiento excesivo y una distribución inadecuada del material explosivo.

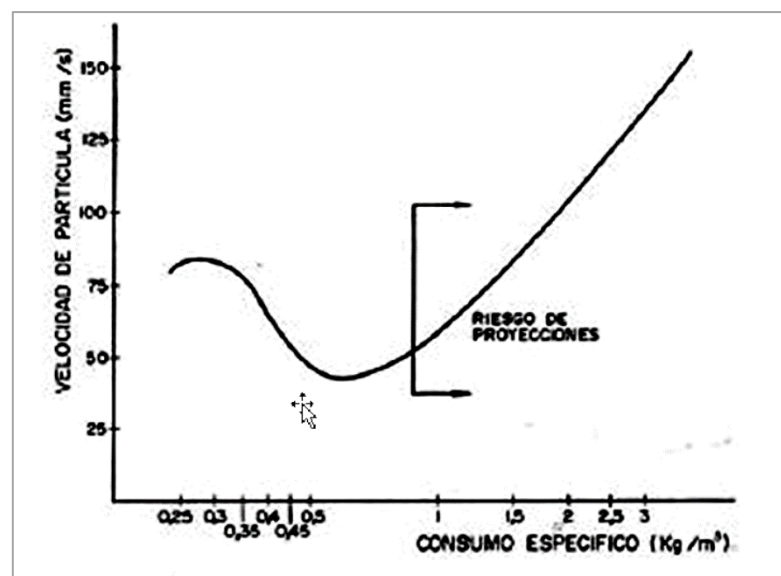


Figura 17. Consumo de explosivos vs VPP.

Tomada de Modelo predictivo de daño producido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en minera Los Pelambres, por Díaz. 2021, p. 16

- **Tiempo de retardo entre detonaciones:** el intervalo de tiempo entre las detonaciones de distintos taladros puede expresarse de dos formas: nominal o efectivo. El tiempo nominal corresponde a la diferencia entre los tiempos teóricos de activación, mientras que el tiempo efectivo se calcula con base en la llegada real de los pulsos de detonación.
- **Factores geométricos de la voladura:** las dimensiones de la perforación y su disposición influyen en la propagación de las vibraciones. Un mayor diámetro de perforación implica el uso de una mayor cantidad de explosivos, lo que puede aumentar la intensidad vibratoria. Además, factores como la sobre perforación y el desacoplamiento (uso de tacos de aire y material de amortiguación como grava) contribuyen a mitigar la propagación de las vibraciones en el entorno.

- **Clasificación de los explosivos y su impacto en las vibraciones:** según los estudios de Hagan y Kennedy (1981), los explosivos que generan presiones más bajas tienden a producir vibraciones de menor intensidad. Un caso representativo ANFO, ampliamente utilizado en minería y construcción. Comparado con los hidrogeles, este explosivo puede reducir la magnitud de las vibraciones hasta en un 50%, lo que lo convierte en una opción más adecuada para minimizar los efectos sísmicos de las detonaciones.

b) Componentes de una onda

La señal de vibraciones generada durante una voladura masiva en minería subterránea consiste en una serie de ondas, cada una asociada a una carga detonando en un tiempo específico. El primer paso en el análisis es identificar qué carga corresponde a cada paquete de vibración, ya que la amplitud de la señal refleja la efectividad de la detonación y la energía transferida al macizo rocoso.

- **Amplitud:** la amplitud de una onda es el máximo nivel de esfuerzo o desplazamiento que experimenta el medio (roca) durante la vibración. Está relacionada con la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso, causando el movimiento de las partículas. Cuanto mayor es la amplitud, mayor es la intensidad de la vibración, lo que puede generar fracturas y afectar la estabilidad de las excavaciones subterráneas.
- **Frecuencia:** la frecuencia es el número de ciclos u oscilaciones que una partícula realiza por segundo, medida en Hertz (Hz). En voladuras, describe cómo se distribuye la energía a lo largo del tiempo. Las ondas de alta frecuencia afectan más a materiales frágiles, mientras que las de baja frecuencia viajan mejor a través de rocas densas, influyendo en la propagación de las vibraciones.
- **Duración:** la duración es el tiempo total que el medio está expuesto a la vibración. Depende de la cantidad de explosivo y el diseño de la voladura. Una mayor duración puede causar efectos estructurales más significativos, como la propagación de fracturas o alteraciones en las propiedades mecánicas de la roca.
- **Velocidad de propagación:** es la rapidez con la que la onda de energía se transmite a través del medio rocoso, distinta al movimiento de las partículas. Depende de las propiedades del material, como densidad y elasticidad, y afecta cómo las vibraciones se dispersan en el macizo rocoso.

- **Longitud de onda:** la longitud de onda es la distancia que la onda recorre en un ciclo completo de compresión y expansión. Depende de la frecuencia y la velocidad de propagación. Las ondas de mayor longitud viajan más lejos y afectan de manera diferente a los materiales, influyendo en la propagación de las fracturas.

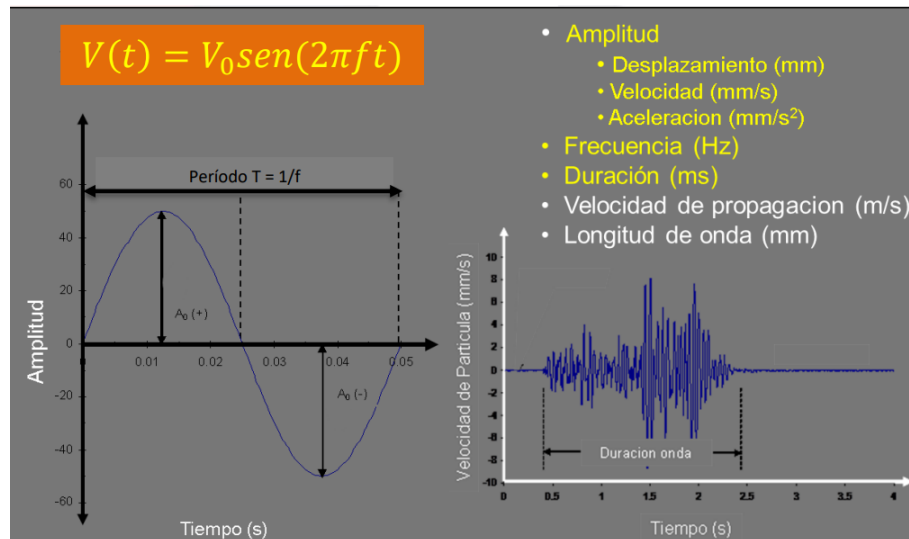


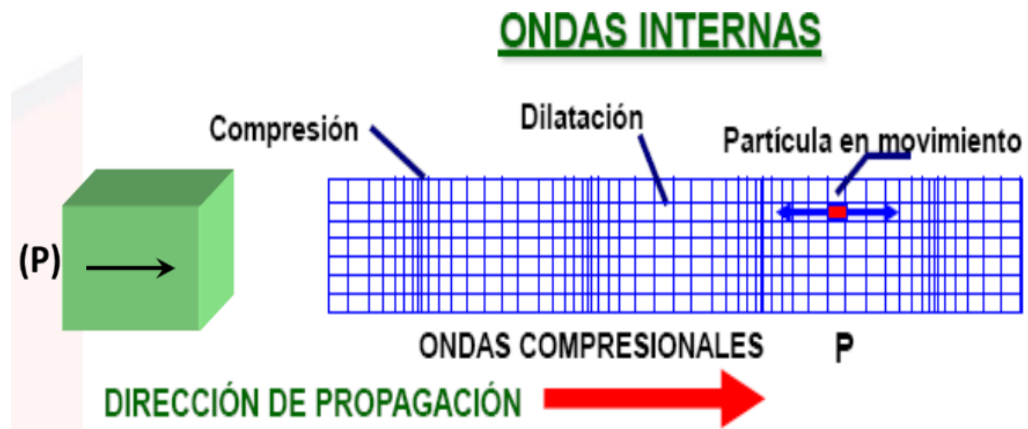
Figura 18. Componentes de una onda

Tomada del Manual de instrumentación y medición de control de vibraciones de Enaex. 2018

c) Ondas generadas por voladura

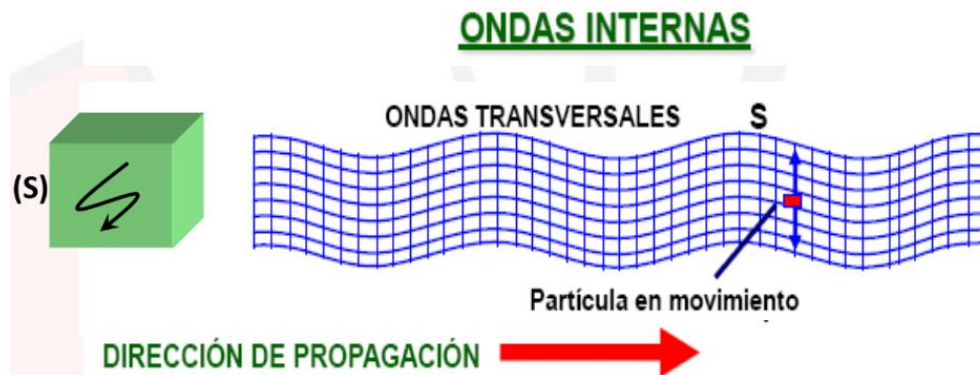
La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas crea tensiones que producen el fracturamiento en la roca. Esta además se propaga en forma esférica (en todos los sentidos) y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso que es transmitida por una combinación de mecanismos que se representa fundamentalmente a través de:

- **Onda P de compresión o primaria:** conocida también como onda P o primaria, consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión en el cual el movimiento de oscilación de la partícula va en la misma dirección de propagación de la onda, son ondas internas.



*Figura 19. Onda P de compresión o primaria.
Tomada del Manual de tronadura de Enaex. 2018*

- **Onda S transversal, de corte o secundaria:** conocido como onda transversal, de corte o secundaria y consiste en oscilaciones de la partícula en forma transversal a la dirección de propagación de la onda. Al igual que las ondas primarias, las ondas de corte son ondas internas.



*Figura 20. Onda S transversal, de corte o secundaria.
Tomada del Manual de tronadura de Enaex. 2018*

- **Onda R Rayleigh o superficial:** son generadas en superficie en respuesta a la interacción de las ondas body con la superficie. Tiene alguna semejanza con las ondas del océano en las cuales el movimiento de la partícula es elíptico mientras su energía se propaga a lo largo de la superficie.

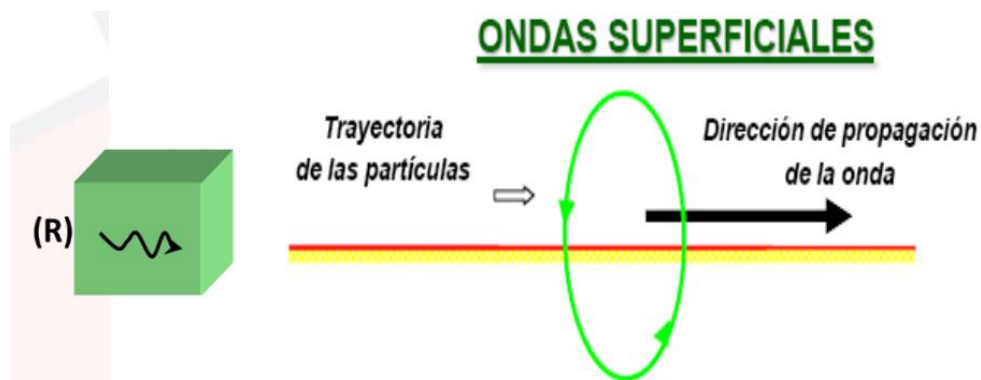


Figura 21. Onda R Rayleigh o superficial.
Tomada del Manual de Tronadura de Enaex. 2018.

d) Equipos de monitoreo y análisis de vibraciones

El equipo encargado del monitoreo y análisis de vibraciones consta de diversos componentes interconectados que colaboran para detectar las vibraciones generadas durante una voladura. En primer lugar, se utilizan transductores, como geófonos y acelerómetros, que se instalan en lugares estratégicos para convertir las vibraciones del terreno en señales eléctricas. Estas señales se transmiten a través de un sistema de cables al equipo de monitoreo, que se encarga de recibirlas y almacenarlas en su memoria interna. Posteriormente, un computador con software especializado procesa y analiza los datos, permitiendo la identificación de patrones y la evaluación de las vibraciones.

- **Sensores o transductores:** Los sensores, como geófonos y acelerómetros, son esenciales para medir las vibraciones. los geófonos miden la velocidad de partícula (PPV), que es un parámetro crítico para evaluar el daño causado por las vibraciones. Los geófonos funcionan mediante una bobina fija alrededor de un imán móvil, generando un voltaje proporcional a la velocidad de la partícula que se mueve debido a la vibración. Su rango de medición abarca desde 1 mm/s hasta 2000 mm/s. Estos sensores son particularmente útiles para detectar movimientos a baja frecuencia, lo que los hace adecuados para evaluar la intensidad de las vibraciones causadas por voladuras en minería. Por otro lado, los acelerómetros miden la aceleración de las partículas, proporcionando datos adicionales sobre la fuerza que genera la vibración.
- **Sistema de cables:** los cables son fundamentales para transmitir las señales eléctricas desde los transductores hasta el monitor de adquisición de datos. Estos cables deben ser de alta calidad y resistencia para asegurar una transmisión precisa de las señales sin interferencias ni pérdidas de datos. Además, en situaciones donde el equipo de monitoreo no está

directamente conectado al sistema central, los cables de extensión aseguran que las señales lleguen a su destino sin importar la distancia.

- **Equipos de monitoreo:** este equipo recibe las señales generadas por los sensores (geófonos o acelerómetros) y las convierte en información digital. Se encarga de registrar y almacenar estos datos para su análisis posterior. Además, muchos de estos monitores permiten amplificar las señales si es necesario, para garantizar que las vibraciones más pequeñas sean detectadas de manera eficiente. La precisión de estos monitores es crucial para obtener datos fiables sobre la magnitud de las vibraciones y garantizar que se mantengan dentro de los límites seguros.
- **Un computador:** la computadora se utiliza para procesar, almacenar y analizar los datos recibidos por el monitor de adquisición. El software asociado permite bajar la información registrada y visualizarla de forma detallada. Además, el software permite realizar análisis en tiempo real, identificar patrones de vibración y generar informes de los datos. Estos informes son vitales para evaluar el impacto de las vibraciones y tomar decisiones informadas sobre las voladuras. El software también facilita la calibración de los equipos y la gestión de los datos a lo largo de las operaciones mineras.

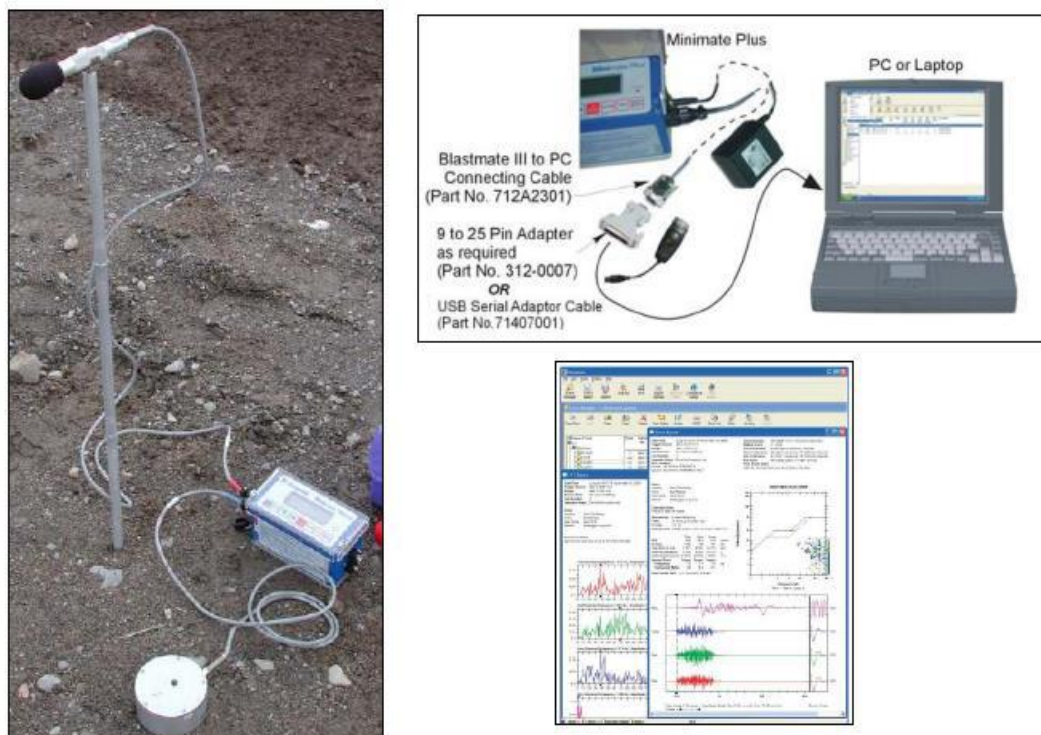


Figura 22. Equipos de monitoreo para análisis de vibraciones.
Tomada del Manual de instrumentación y medición de control de vibraciones de Enaex. 2018

e) Instalación y operación del sismógrafo y geófono

El éxito en la recopilación de datos de vibración en entornos de campo lejano depende en gran medida de una instalación adecuada y de una correcta orientación de los geófonos. La calidad de los datos obtenidos está directamente influenciada por la técnica utilizada, la ubicación precisa de los geófonos y el contacto adecuado con la roca, de tal forma que se transmita de manera eficiente la vibración producida durante la voladura.

En sistemas triaxiales, los tres componentes del sismógrafo deben disponerse de manera ortogonal sobre las superficies opuestas de un soporte rígido. Para el registro de vibraciones en campo lejano, los sismógrafos emplean tres geófonos que captan las ondas en las direcciones vertical, radial y transversal. Cada sensor mide la velocidad máxima de la partícula en su respectiva dirección. Es importante precisar que el valor máximo de la VPP puede presentarse en cualquiera de estas tres direcciones, por lo que es fundamental diferenciar entre el vector suma de las mediciones y la velocidad máxima individual de la partícula, a fin de evitar errores en la interpretación de los datos. El proceso de instalación debe seguir los siguientes pasos:

- **Nivelación del piso:** antes de colocar los geófonos, se debe asegurar que el piso esté nivelado, libre de agua, fracturas para garantizar la precisión de las mediciones.
- **Inmovilización del geófono:** se debe usar un perno expansivo y sacos de arena para inmovilizar el geófono y asegurar un contacto firme y estable con la roca.
- **Colocación de los geófonos:** los geófonos deben colocarse en la dirección de la voladura, con una separación de aproximadamente 10 metros entre ellos. Para lograr esta distancia, se utilizarán cables de extensión, los cuales permiten una distancia de entre 25 y 100 metros entre los sensores.
- **Ubicación del sismógrafo:** el sismógrafo debe instalarse en refugios adecuados, de tal forma que esté protegido de la proyección de la roca y de otros posibles daños derivados de la voladura.
- **Distancia de los geófonos a la zona de voladura:** la distancia entre los geófonos y la zona de voladura debe registrarse para poder correlacionar correctamente los datos.

- **Tiempos de retardo:** es necesario tener en cuenta los tiempos de retardo para obtener la VPP según su ubicación espacial en la malla de voladura.
- **Carga operante:** la carga operante también debe ser registrada para comprender el comportamiento de las ondas generadas por la voladura.



Figura 23. Instalación de sismógrafo y geófono en campo

f) Métodos de predicción de vibraciones y evaluación de daños

Actualmente, el propósito principal de la tronadura es lograr una fragmentación eficiente. Esto implica diseñar un proceso que maximice el arranque de material con el menor costo posible, obteniendo así una fragmentación adecuada para la continuidad de las operaciones posteriores. No obstante, en las áreas perimetrales de la voladura, lo ideal es minimizar el impacto negativo. Un caso representativo de esta situación es la implementación de voladuras de producción con una mayor carga explosiva o potencia optimizada, lo que permite obtener un tamaño de partícula adecuado sin comprometer el rendimiento del equipo de carga. Asimismo, se busca reducir el deterioro de los taludes, ya que su afectación podría interrumpir la operatividad del sistema minero. En la mayoría de los casos, un aumento en los daños dentro de las operaciones mineras conlleva un incremento en los costos, ya que se requiere llevar a cabo labores adicionales de limpieza en taludes y rampas.

Para mitigar estos daños, es fundamental aplicar estrategias de predicción y optimización del diseño de voladura. En este sentido, se desarrollan modelos de vibraciones enfocados en anticipar la velocidad máxima de partícula generada por futuras voladuras. Estos modelos deben contar con un adecuado proceso de calibración y verificación para garantizar su efectividad.

g) Análisis de vibraciones en campo lejano

El estudio de los registros de vibraciones en campo lejano permite determinar la velocidad con la que se desplazan las partículas debido a cada carga o conjunto de cargas. En este contexto, Devine (1966) desarrolló un modelo que considera explosivos en forma cilíndrica para estimar la velocidad máxima de partícula. Este modelo se representa en la Ecuación, la cual se usa ampliamente en la predicción de vibraciones en campo lejano.

$$PPV = k \times \left(\frac{D}{W} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

PPV = Velocidad de partícula (*mm/s*).

k y α = Parámetros que caracterizan el comportamiento del terreno.

D = Distancia entre la fuente de detonación y el geófono (*m/kg*).

W = Masa del explosivo.

El modelo propuesto por Devine (1966) asume que la disipación de energía por fricción está integrada en el término α .

Además, el modelo introduce la expresión D/W como una distancia escalar que refleja la relación entre el centroide de la configuración de la malla de tronadura y la cantidad de explosivo utilizada.

Desde una perspectiva teórica, la metodología de Devine (1966) es una de las más adecuadas para describir la propagación de vibraciones en campo lejano. Se define la distancia como cinco veces la longitud de la carga explosiva, aunque en ciertos escenarios se utiliza tres veces la altura del banco, permitiendo así una aplicación simplificada.

Cuando se trabaja con cargas cilíndricas, es necesario aplicar un análisis adimensional que ajusta las distancias mediante la raíz cuadrada de la carga, lo que permite definir con mayor precisión la geometría de la tronadura. En la ecuación de Devine (1966), el parámetro α está condicionado por la forma de propagación de la onda expansiva y por la capacidad de atenuación de la roca. Por otro lado, el coeficiente K está determinado principalmente por las propiedades del explosivo y la eficiencia con la que la onda de choque transfiere energía a la roca circundante.

Factores que afectan la transferencia de energía del explosivo a la roca, la forma en que la energía del explosivo se transmite a la roca depende de factores como la densidad del explosivo

y su velocidad de detonación (VOD), que es la rapidez con la que el frente de onda de choque se propaga a través del material en proceso de detonación. Este fenómeno está relacionado con la impedancia del medio, que define cómo interactúa la onda de choque entre el explosivo y la roca. Según esta teoría, se pueden presentar distintos escenarios:

- a) Cuando la impedancia de la roca y del explosivo son equivalentes, la totalidad de la energía se transfiere como una onda de choque sin que se refleje energía de retorno.
- b) Si la impedancia de la roca es superior a la del explosivo, la energía reflejada genera un esfuerzo compresivo en las paredes de la roca.
- c) Si la impedancia de la roca es menor que la del explosivo, la energía reflejada en las paredes provoca un esfuerzo de tensión, y la cantidad de energía absorbida por la roca disminuye.

Es por lo anterior, que se puede hacer el siguiente análisis sobre las implicaciones prácticas de estas relaciones:

- a) El aumento de la densidad del explosivo y/o VOD incrementará el esfuerzo inducido en la roca circundante.
- b) El aumento del esfuerzo inducido en la roca incrementará el valor de K usado en la ecuación de Devine (1966).
- c) Si una tronadura contiene diferentes tipos de explosivos, entonces se deberían usar valores diferentes de K para estimar los niveles de vibración producidos por pozos individuales.

Tabla 12. Parámetros del modelo vibracional de campo lejano (modelo de Devine) de diferentes macizos rocosos

Factor de amplitud (k)	Factor de atenuación (α)	Factor de amplitud 2 (k)	Factor de atenuación 2 (α)
597	-2.34	99	-2.33
500	-2.11	227	-1.6
321	-2.39	499	-2.01
495	-2.12	175	-1.63
262	-2.22	112	-1.94
284	-1.72	428	-2.49
481	-1.74	168	-1.54

299	-2.48	703	-2.21
597	-2.32	177	-2.04
k máximo	703	α máximo	-2.49
k mínimo	99	α mínimo	-1.54
k promedio	357	α promedio	-2.07

Tomada de la plataforma Geoblast

h) Criterio de daño basado en la PPV Crítica

Las vibraciones de alta intensidad pueden provocar daños en la roca expuesta a estas ondas, generando nuevas fracturas o ampliando las ya existentes. Debido a esto, la vibración es considerada un factor clave en la deformación de la roca.

Cuando la vibración es baja o se encuentra a mayor distancia de la fuente de la voladura, el nivel de deformación es mínimo y no alcanza la intensidad suficiente para causar fracturamiento. Sin embargo, en zonas intermedias, las vibraciones pueden ser lo suficientemente intensas como para extender fracturas previas, aunque sin producir nuevos puntos de ruptura.

En áreas cercanas a la carga explosiva, la vibración alcanza niveles suficientemente elevados como para afectar la estructura rocosa y provocar distintos grados de fracturamiento en su entorno.

La velocidad de vibración de las partículas se asocia frecuentemente con la capacidad de inducir fracturas, ya que existe una relación directa entre la velocidad de la partícula y la deformación que sufre el material. Por esta razón, el análisis de la velocidad de partícula se considera una herramienta efectiva para estimar el nivel de fracturamiento generado por la tronadura.

- **Roca intacta**

El estudio de la velocidad de partícula es una herramienta útil para evaluar el nivel de fracturamiento generado por la tronadura. Sin embargo, este modelo no es completamente preciso, ya que asume que la deformación del material es elástica, lo que implica que la onda se propaga a través de la roca bajo condiciones controladas de laboratorio. En consecuencia, la estimación obtenida puede diferir del comportamiento real en el terreno. Aun así, es un método aceptado y ampliamente aplicado en la industria minera.

La siguiente ecuación define la velocidad peak de partícula crítica, utilizada como un indicador para estimar el daño estructural en la roca.

$$PPV_{crit} = \frac{T_s \times V_p}{E_s}$$

Donde:

$PPV_{critico}$ = Velocidad de partícula crítica (mm/s).

T_s = Resistencia a la tracción de la roca (MPa).

V_p = Velocidad con la que se propaga la onda sísmica (mm/s).

E_s = Módulo de Young asociado a la roca en estado intacto (MPa).

Para determinar el nivel de afectación en la roca, Holmberg & Persson (1994) propuso una escala basada en $PPV_{critico}$, la cual se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 13. Escala de daño según PPV crítico

Criterio de daño	Tipo de daño
Mayor 4* $PPV_{critico}$	Intenso fracturamiento.
Mayor 1 * $PPV_{critico}$	Creación de nuevas fracturas.
Mayor $\frac{1}{4}$ * $PPV_{critico}$	Leve propagación fracturas pre – existentes.

Tomada del modelo de Holmberg & Persson

2.3 Definición de términos

- **Burden:** también se conoce como piedra, se refiere a la distancia longitudinal del centroide del taladro a la cara libre.
- **Diseño:** el término diseño se utiliza a menudo en relación con el arte, la ingeniería, arquitectura y otras disciplinas, el diseño involucra la representación mental de dicha idea y su futura expresión en algún formato gráfico que permite mostrar cómo funcionará el trabajo que se tiene planeado. En tal sentido un diseño puede incluir un boceto o dibujo que muestra las principales características de un proyecto.
- **Densidad de roca:** peculiaridad significativa y decisiva de los minerales y roca relacionados a su referida configuración molecular, se relaciona por la mezcla del componente y su capacidad, forma un coeficiente considerablemente manejado como señal común de la menor o mayor obstáculo que puede obtenerse para quebrar la roca.

- **Desacoplamiento:** es el método y/técnica de carguío en donde el explosivo se desacopla reduciendo el diámetro de carga. Un menor espesor ayuda inicialmente al objetivo de acortar la fuerza práctica del estallido (mínimo rotura), con disminución de la fuerza peak de taladro. La disminución en la fuerza es más que la evaluada en eficacia del motivo del desacoplamiento del producto es reducir la velocidad de detonación (VOD) y la relación de presión de la detonación PD.
- **Emulsión:** son explosivos ecológicos se forman a partir de una solución saturada de nitrato y otra fase de aceite mineral. Las emulsiones, que normalmente se sensibilizan con microesferas de vidrio o burbujas de aire en base al nitrito de sodio son denominadas emulsiones gasificadas, suelen clasificarse como oxidantes y sensibles al detonador. Las emulsiones pueden tener un balance de oxígeno equilibrado o tener un balance de oxígeno positivo.
- **Espaciamiento y espaciamiento efectivo:** acción de espaciar de taladro de voladura se describe a la magnitud recto entre taladros de voladura contigua que constituyen una línea, y se tiene comúnmente semejante a la cara libre. El vocablo conocido es el espaciamiento del taladro. El vocablo espaciamiento efectivo es la magnitud recta entre taladro que estallan continuamente, y requiere en atención la trayectoria de la cara libre.
- **Explosivos:** los explosivos son sustancias químicas que, bajo ciertas condiciones o bajo la acción de fuerzas externas, se descomponen violentamente y liberan grandes cantidades de energía. Los explosivos son la fuente principal de energía para el proceso de voladura. El propósito principal de los explosivos es dañar, destruir y debilitar materiales duros y elásticos.
- **Factor de potencia:** dicho término es empleado para describir la cantidad de explosivo utilizado para fraccionar un determinado tonelaje de mineral. Por lo tanto, las unidades de este término son kg/tM.
- **Iniciadores:** el vocablo iniciador se utiliza en el relleno que empieza en la fila, mientras que el vocablo "reforzador" es una sustancia a la fila para sostener una rapidez de alto estallido. Para que el iniciador estalle, la fila del detonante en que se cala debe producir harta fuerza de colisión para empezar un estallido a través del corte íntegro de la fila del detonante, se recomienda emplear un alto explosivo para producir una correcta iniciación y asegurar que la columna explosiva mantenga un régimen adecuado en la VOD.

- **Mallas:** una malla es una disposición regular de barrenos colocados en planos y secciones transversales. La distribución espacial de los taladros está acorde a los diversos parámetros como los son el tipo de roca, explosivos en ello se considera dos parámetros esenciales como es el espaciamiento que es la longitud lateral entre los taladros y el burden que es distancia entre una fila de perforaciones y la cara libre.
- **Perforación:** la perforación de rocas es la primera etapa en los procesos de la minería. Su finalidad es perforar un conjunto de taladros en el macizo rocoso, estas poseen una distribución geométrica adecuada para su posterior encendido. Aquí se almacenan los explosivos y detonadores que complementa la voladura de rocas.
- **Presión de detonación:** la presión de detonación sucede durante el sector fundamental en la repulsión, es restringida por un borde del frontis en la colusión y siguiente del croquis Chapman Jouguet (C-J) atrás del croquis C-J se encuentran sus resultados de resistencia; e incluso otros resultados aún soportan resistencia, actuada de una resistencia pequeña, se denomina tal resistencia del estallido, o resistencia peak del taladrado.
- **Taco:** el taco es un material inerte puede ser de arcilla, concreto o simplemente detritus esto se inserta en la parte final del taladro para retener los gases producidos por efecto de la voladura, con una correcta aplicación del taco se puede retener hasta un 20% de la energía de gases.
- **Voladura:** la voladura es un proceso de interacción de explosivo - roca, es la presión que se genera por los explosivos almacenados en los taladros perforados en la roca denominado (frente de perforación) en estas zonas hay alta concentración de energía que permiten fracturar, fragmentar y desplazar la roca removida.
- **Daño por voladura:** se refiere a los efectos ocasionados por la detonación de explosivos, los cuales pueden generar vibraciones o material proyectado. La magnitud del daño depende de la energía liberada, y su impacto es más notorio en el área circundante. Estos daños pueden ser causados por una ejecución deficiente en la perforación y el proceso de voladura.
- **Sobre dilución:** la sobre dilución es un fenómeno que ocurre cuando la voladura produce un daño excesivo a la roca encajonante. Esto sucede cuando la energía liberada durante la detonación supera ampliamente la VVP crítica, lo que genera un volumen de material

adicional y no deseado. Este exceso de material produce una contaminación entre el mineral y el desmonte, lo que disminuye el valor del mineral.

- **Vibraciones por voladura:** son las ondas sísmicas que se originan cuando se libera energía durante la detonación de explosivos en una voladura. Estas vibraciones se propagan a través de la roca, provocando el movimiento de las partículas cercanas. La magnitud y el alcance de las vibraciones dependen de varios factores, como la cantidad de explosivo utilizado, la profundidad de la voladura, las características geológicas del área y la distancia desde la detonación hasta las estructuras o zonas sensibles. Si no se controlan adecuadamente, pueden generar daños a las infraestructuras cercanas y afectar la estabilidad de las excavaciones.
- **Campo lejano:** Se refiere a la zona donde el nivel de vibración se puede calcular mediante una ecuación simple basada en el peso de la carga de explosivo. En esta área, las vibraciones pueden considerarse elásticas o inelásticas. A medida que nos acercamos al taladro de la voladura (campo cercano), las vibraciones deben describirse con ecuaciones más complejas, que consideran la longitud de la columna de explosivos. En el campo lejano, los daños a las estructuras rocosas suelen ser causados por deslizamientos a lo largo de las diaclasas existentes.
- **Velocidad peak de partícula y velocidad de la onda P:** la PPV mide la velocidad de las partículas dentro de la roca durante una vibración o onda de choque. Se puede medir en tres direcciones ortogonales, y depende de la energía de la fuente, la distancia y las características de la roca. La Vp es la velocidad de propagación de la onda en la roca y es controlada por las propiedades estructurales del medio, siendo independiente de la fuente de vibración. PPV y Vp están relacionados en un medio elástico y homogéneo mediante una ecuación matemática.
- **Detonadores electrónicos:** son dispositivos utilizados en voladuras que se activan mediante señales eléctricas. A diferencia de los detonadores convencionales, que emplean mecanismos mecánicos o químicos, los detonadores electrónicos permiten un control exacto del momento de la detonación. Estos dispositivos ofrecen la capacidad de programar los tiempos de retardo, lo que facilita una secuencia de iniciación precisa de las voladuras. Su alta fiabilidad mejora la seguridad y optimiza los resultados de las voladuras como la estabilidad de la roca y la fragmentación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcances de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

La presente investigación empleó un método mixto, el cual combina enfoques cuantitativos y cualitativos para obtener una visión integral del fenómeno en estudio. En ese sentido, Hernández y Mendoza (13), mencionan que este método es la suma de conocimientos estructurados, empíricos y críticos que conllevan a la recopilación y la posterior evaluación de los datos obtenidos, así como su unificación y discusión en conjunto, a fin de realizar deducciones utilizando toda la información disponible para comprender mejor al fenómeno en estudio.

3.1.2. Tipo de investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un tipo de investigación aplicada, ya que busca resolver un problema específico dentro de un contexto real. La investigación permitió evaluar el impacto de las voladuras masivas con detonadores electrónicos en el macizo rocoso mediante la recopilación de datos en campo, como vibraciones en campo lejano, la PPV crítica y la distancia escalar, utilizando instrumentos de medición especializados. Por ende, Valderrama (14), menciona que esta investigación depende estrechamente de los hallazgos y teorías generadas por la investigación básica, cuyo objetivo principal es traducir estos descubrimientos en beneficios tangibles para la sociedad. Para lograrlo, se basa en conocimientos teóricos y se enfoca en desarrollar normas y procedimientos tecnológicos que permitan controlar y mejorar situaciones o procesos reales.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación fue explicativo, ya que se busca establecer la relación causa-efecto entre la voladura masiva con detonadores electrónicos y el comportamiento dinámico del macizo rocoso. Este nivel permitió profundizar en el entendimiento de cómo las variables asociadas a las voladuras (como la secuencia de detonación, la energía liberada y el tiempo de retardo) influyen en la respuesta del macizo rocoso. Según Hernández (15), este tipo de estudio busca proporcionar explicaciones detalladas sobre el surgimiento de un fenómeno, las condiciones bajo las cuales se presenta, y las relaciones causales entre diferentes elementos.

3.1.4. Diseño de investigación

Esta investigación empleó un diseño experimental, del tipo cuasiexperimental, ya que permite analizar de manera directa y controlada el impacto de las voladuras masivas en el macizo rocoso. Para ello, se seleccionó el tajo 821G-OB6A donde se realizaron voladuras con detonadores electrónicos y se monitorearon variables claves como vibraciones en campo lejano, PPV crítica y la distancia escalar mediante instrumentos especializados (sismógrafos y geófonos). Se establecieron dos grupos: un grupo experimental (con voladura) y un grupo de control (sin voladura) con el fin de comparar los efectos en el macizo rocoso. Además, se recopilaron datos antes, durante y después de las detonaciones, lo que permitió un análisis detallado de los cambios en su comportamiento dinámico. En tal sentido, Hernández (15) menciona que, este diseño de investigación se caracteriza porque el investigador no puede alterar deliberadamente la variable independiente, que para este caso es la voladura masiva con detonadores electrónicos. Sin embargo, el investigador puede medir el impacto de una variable en la otra, que es el comportamiento dinámico del macizo rocoso.

3.2. Población

Según Carrasco (16), la población se define como el conjunto de individuos u objetos que comparten características observables y se delimitan en un espacio y tiempo específicos. En el contexto del presente estudio, la población está constituida por la totalidad de los tajos presentes en la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2024.

3.3. Muestra

Como lo señala Valderrama (14), el muestreo no probabilístico intencional se caracteriza por la selección de la unidad de estudio basada en el juicio experto del investigador. En concordancia con este enfoque, el tajo 821G-OB6A se seleccionó debido a que, según nuestro criterio, representa de manera óptima las características relevantes para los objetivos de la presente investigación.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.2. Técnicas de recolección de datos

Para recopilar información relevante sobre el tajo en estudio 821G-OB6A, se utilizó las siguientes técnicas:

- **Monitoreo y medición**

Registro del monitoreo de vibraciones generadas por voladuras empleando sismógrafos.

Cálculo de la VPP crítica (velocidad de partícula pico) de la roca.

Estudio de vibraciones en campo lejano aplicando el Método de Devine para determinar los parámetros k y α .

Predicción del daño potencial al macizo rocoso utilizando el modelo de Cameron Mackenzie.

Análisis de la fragmentación de la roca (P80).

Levantamiento topográfico de tajos vacíos.

- **Análisis de datos existentes:**

Recopilación de información sobre los parámetros de las voladuras (cantidad de explosivo / taladro, tipo de detonadores, secuencia de iniciación y diseño de la malla de perforación).

Evaluación del tamaño y la distribución de los fragmentos de roca resultantes de las voladuras.

Revisión de informes geotécnicos previos sobre el macizo rocoso, incluyendo datos sobre la geología, la resistencia de la roca y las discontinuidades.

- **Observación directa**

Observación visual del comportamiento del macizo rocoso durante y después de las voladuras, incluyendo la presencia de discontinuidades, desprendimientos y otros signos de inestabilidad.

Registro de las observaciones en el cuaderno de campo.

- **Entrevistas:**

Entrevistas con ingenieros de perforación y voladura de Cía. Minera Cerro Lindo involucrados en la planificación de voladuras y el monitoreo del macizo rocoso.

3.4.3. Instrumentos de recolección de datos

Para asegurar la disponibilidad de los datos necesarios para este proyecto de investigación, se recurrió a los siguientes instrumentos de recolección:

- Registros de monitoreo de vibraciones
- Registros de voladuras.
- Informes geotécnicos.
- Bitácora o cuaderno de campo.
- Cámara de alta resolución y velocidad.

3.4.4. Formato de validación de contenido por juicio de expertos

a) Validador N°01

UNIVERSIDAD CONTINENTAL

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

Formato de validación de contenido del instrumento de recolección de datos

I. Título de la investigación:

Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Nombre de los tesistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Eleiving

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025

II. Datos del experto evaluador:

- Nombres y apellidos: Edwar Rubén Moreano Panti
- Especialidad: Gerente General
- Grado académico: Magister
- Años de experiencia: 13 años
- Institución de procedencia: EPC ANDINA SAC

III. Criterios de evaluación del instrumento

N°	Criterio	Valoración (Marque con X)	Observaciones / Sugerencias
1	Claridad en la redacción de los ítems	[X]	
2	Coherencia entre dimensiones, indicadores e ítems	[X]	

3	Pertinencia de los indicadores respecto a la variable investigada	[X]	
4	Adecuación técnica según el área de minería y geotecnia	[X]	
5	Suficiencia del contenido para medir la variable	[X]	

IV. Conclusión del evaluador

En mi calidad de experto, considero que el instrumento de recolección de datos:

☒ Es válido

☐ Requiere ajustes

☐ No es válido


Ing. Edwar Rubén Moreano Panti
 INGENIERO DE MINAS
 CIP 193017



Ing. EDWAR RUBEN MOREANO PANTI
 DNI: N° 45239679

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

Constructo: Voladura masiva con detonadores electrónicos

N°	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El uso de detonadores electrónicos permite un control preciso en la secuencia de iniciación durante voladuras masivas.	Diseño y precisión
2	La programación electrónica de los retardos mejora la distribución de la energía en la voladura.	Eficiencia energética
3	La voladura masiva con detonadores electrónicos reduce la superposición destructiva de ondas sísmicas.	Sincronización
4	El empleo de este tipo de voladura mejora la eficiencia en la fragmentación de la roca.	Fragmentación

5	El sistema electrónico permite registrar y auditar con mayor precisión cada evento de disparo.	Trazabilidad
---	--	--------------

Constructo: Comportamiento dinámico del macizo rocoso

Nº	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El control de vibraciones mediante sincronización electrónica reduce el daño en zonas críticas del macizo.	Vibraciones
2	La voladura electrónica permite minimizar la aparición de nuevas fracturas no deseadas.	Integridad estructural
3	La respuesta dinámica del macizo puede predecirse mejor cuando se usa un diseño de voladura electrónica.	Predictibilidad
4	El comportamiento dinámico del macizo mejora en zonas de transición litológica cuando se usan detonadores electrónicos.	Control geotécnico
5	El monitoreo de PPV y aceleración ha demostrado menor impacto dinámico en zonas sensibles con uso de voladura electrónica.	Medición del impacto

- I. Informe de juicio de expertos
- II. Nombre de los tesisas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Elevation
- III. Título de la tesis: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo.

IV. Del instrumento

Matriz de validación de contenido del instrumento

Investigación: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Ítems	Contenido	Deficiente				Regular				Buena				Muy buena				Excelente			
		0	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	91	96
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Claridad	Está formulado con lenguaje adecuado y preciso																		X		
Objetividad	Está expresado en preguntas observables																		X		
Pertinencia	Adecuado al avance de la ciencia																		X		
Organización	Tiene una organización lógica																	X			
Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad																	X			
Adecuación	Adecuado para valorar el constructo o variable a medir																		X		
Consistencia	Está basado en aspectos teóricos, técnicos y científicos																		X		
Coherencia	Entre las dimensiones, indicadores, preguntas e índices																		X		
Metodología	Responde a la hipótesis de la investigación																	X			
Significatividad	Es útil y adecuado para la investigación																		X		

V. Criterio del validador:

Informe sobre la aplicabilidad

Muy baja	Baja	Regular	Alta	Muy alta
10 - 17	18 - 26	27 - 34	35 - 42	43 - 50
Instrumento observado			Instrumento apto para aplicar	

Procede su aplicación:	Si
No procede su aplicación	

VI. Constancia de juicio de experto

Nombres y apellidos	Edwar Rubén Moreano Panti
Título profesional/Especialidad	Ingeniero de Minas/Perforación y Voladura
Grado académico	Magister

Fecha: Huancayo, 07 de julio de 2025.



Ing. EDWAR RUBEN MOREANO PANTI
DNI: N° 45239679

b) Validador N°2

UNIVERSIDAD CONTINENTAL

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

Formato de validación de contenido del instrumento de recolección de datos

I. Título de la investigación:

Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Nombre de los tesisistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Eleving

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025

II. Datos del experto evaluador:

- Nombres y apellidos: Fredy Gaspar Canturín
- Especialidad: Perforación y Voladura
- Grado académico: Titulado/Colegiado/Habilitado
- Años de experiencia: 15 años
- Institución de procedencia: MAXAM PERÚ

III. Criterios de evaluación del instrumento

N°	Criterio	Valoración (<i>Marque con X</i>)	Observaciones / Sugerencias
1	Claridad en la redacción de los ítems	[X]	
2	Coherencia entre dimensiones, indicadores e ítems	[X]	
3	Pertinencia de los indicadores respecto a la variable investigada	[X]	
4	Adecuación técnica según el área de minería y geotecnia	[X]	
5	Suficiencia del contenido para medir la variable	[X]	

IV. Conclusión del evaluador

En mi calidad de experto, considero que el instrumento de recolección de datos:

- ☒ Es válido
- ☐ Requiere ajustes
- ☐ No es válido




Fredy Gaspar Canturín
INGENIERO DE MINAS
REG. CIP N° 183167

Ing. FREDY GASPAR CANTURÍN
DNI: N° 42412924

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025.

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

Constructo: Voladura masiva con detonadores electrónicos

Nº	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El uso de detonadores electrónicos permite un control preciso en la secuencia de iniciación durante voladuras masivas.	Diseño y precisión
2	La programación electrónica de los retardos mejora la distribución de la energía en la voladura.	Eficiencia energética
3	La voladura masiva con detonadores electrónicos reduce la superposición destructiva de ondas sísmicas.	Sincronización
4	El empleo de este tipo de voladura mejora la eficiencia en la fragmentación de la roca.	Fragmentación
5	El sistema electrónico permite registrar y auditar con mayor precisión cada evento de disparo.	Trazabilidad

Constructo: Comportamiento dinámico del macizo rocoso

Nº	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El control de vibraciones mediante sincronización electrónica reduce el daño en zonas críticas del macizo.	Vibraciones
2	La voladura electrónica permite minimizar la aparición de nuevas fracturas no deseadas.	Integridad estructural
3	La respuesta dinámica del macizo puede predecirse mejor cuando se usa un diseño de voladura electrónica.	Predictibilidad
4	El comportamiento dinámico del macizo mejora en zonas de transición litológica cuando se usan detonadores electrónicos.	Control geotécnico
5	El monitoreo de PPV y aceleración ha demostrado menor impacto dinámico en zonas sensibles con uso de voladura electrónica.	Medición del impacto

- I.** Informe de juicio de expertos
- II.** Nombre de los tesisistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Eleving
- III.** Título de la tesis: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo.

IV. Del instrumento

Matriz de validación de contenido del instrumento

Investigación: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Ítems	Contenido	Deficiente				Regular				Buena				Muy buena				Excelente			
		0	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	91	96
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Claridad	Está formulado con lenguaje adecuado y preciso																		X		
Objetividad	Está expresado en preguntas observables																		X		
Pertinencia	Adecuado al avance de la ciencia																		X		
Organización	Tiene una organización lógica																		X		
Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad																		X		
Adecuación	Adecuado para valorar el constructo o variable a medir																	X			
Consistencia	Está basado en aspectos teóricos, técnicos y científicos																		X		
Coherencia	Entre las dimensiones, indicadores, preguntas e índices																			X	
Metodología	Responde a la hipótesis de la investigación																	X			
Significatividad	Es útil y adecuado para la investigación																		X		

V. Criterio del validador:

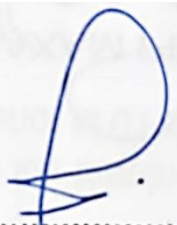
Informe sobre la aplicabilidad

Muy baja	Baja	Regular	Alta	Muy alta
10 - 17	18 - 26	27 - 34	35 - 42	43 - 50
Instrumento observado			Instrumento apto para aplicar	

Procede su aplicación:	Si
No procede su aplicación	

VI. Constancia de juicio de experto

Nombres y apellidos	Fredy Gaspar Canturín
Título profesional/Especialidad	Ingeniero de Minas/Perforación y Voladura
Grado académico	Titulado/Colegiado/Habilitado




Fecha: Huancayo, 07 de julio de 2025.

c) Validador N°3

UNIVERSIDAD CONTINENTAL
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS
Formato de validación de contenido del instrumento de recolección de datos

I. Título de la investigación:

Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Nombre de los tesistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Elevation

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025

II. Datos del experto evaluador:

- Nombres y apellidos: José Luis Quezada Gil
- Especialidad: Geomecánica
- Grado académico: Titulado/Colegiado/Habilitado
- Años de experiencia: 10 años
- Institución de procedencia: Compañía Minera Condestable

III. Criterios de evaluación del instrumento

N°	Criterio	Valoración (Marque con X)	Observaciones / Sugerencias
1	Claridad en la redacción de los ítems	[X]	
2	Coherencia entre dimensiones, indicadores e ítems	[X]	
3	Pertinencia de los indicadores respecto a la variable investigada	[X]	
4	Adecuación técnica según el área de minería y geotecnia	[X]	
5	Suficiencia del contenido para medir la variable	[X]	

IV. Conclusión del evaluador

En mi calidad de experto, considero que el instrumento de recolección de datos:

- ☒ Es válido
- ☐ Requiere ajustes
- ☐ No es válido



Ing. JOSÉ LUIS QUEZADA GIL
CIP: N° 203028
DNI: N° 44031295

Fecha: Huancayo 07 de julio de 2025.

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

Constructo: Voladura masiva con detonadores electrónicos

Nº	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El uso de detonadores electrónicos permite un control preciso en la secuencia de iniciación durante voladuras masivas.	Diseño y precisión
2	La programación electrónica de los retardos mejora la distribución de la energía en la voladura.	Eficiencia energética
3	La voladura masiva con detonadores electrónicos reduce la superposición destructiva de ondas sísmicas.	Sincronización
4	El empleo de este tipo de voladura mejora la eficiencia en la fragmentación de la roca.	Fragmentación
5	El sistema electrónico permite registrar y auditar con mayor precisión cada evento de disparo.	Trazabilidad

Constructo: Comportamiento dinámico del macizo rocoso

Nº	Ítem	Categoría: Voladura masiva con detonadores electrónicos
1	El control de vibraciones mediante sincronización electrónica reduce el daño en zonas críticas del macizo.	Vibraciones
2	La voladura electrónica permite minimizar la aparición de nuevas fracturas no deseadas.	Integridad estructural
3	La respuesta dinámica del macizo puede predecirse mejor cuando se usa un diseño de voladura electrónica.	Predictibilidad
4	El comportamiento dinámico del macizo mejora en zonas de transición litológica cuando se usan detonadores electrónicos.	Control geotécnico
5	El monitoreo de PPV y aceleración ha demostrado menor impacto dinámico en zonas sensibles con uso de voladura electrónica.	Medición del impacto

- I. Informe de juicio de expertos
- II. Nombre de los tesisistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Elevation
- III. Título de la tesis: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo.

IV. Del instrumento

Matriz de validación de contenido del instrumento

Investigación: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

Ítems	Contenido	Deficiente				Regular				Buena				Muy buena				Excelente			
		0	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76	81	86	91	96
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Claridad	Está formulado con lenguaje adecuado y preciso																	X			
Objetividad	Está expresado en preguntas observables																	X			
Pertinencia	Adecuado al avance de la ciencia																	X			
Organización	Tiene una organización lógica																	X			
Suficiencia	Comprende los aspectos en calidad y cantidad																		X		
Adecuación	Adecuado para valorar el constructo o variable a medir																	X			
Consistencia	Está basado en aspectos teóricos, técnicos y científicos																	X			
Coherencia	Entre las dimensiones, indicadores, preguntas e índices																		X		
Metodología	Responde a la hipótesis de la investigación																	X			
Significatividad	Es útil y adecuado para la investigación																		X		

V. Criterio del validador:

Informe sobre la aplicabilidad

Muy baja	Baja	Regular	Alta	Muy alta
10 - 17	18 - 26	27 - 34	35 - 42	43 - 50
Instrumento observado			Instrumento apto para aplicar	

Procede su aplicación:	Si
No procede su aplicación	

VI. Constancia de juicio de experto

Nombres y apellidos	José Luis Quezada Gil
Título profesional/Especialidad	Ingeniero de Minas/Geomecánica
Grado académico	Titulado/Colegiado/Habilitado



Ing. JOSÉ LUIS QUEZADA GIL
CIP: N° 203028
DNI: N° 44031295

Fecha: Huancayo, 07 de julio de 2025.

3.4.5. Ficha de validez y confiabilidad del instrumento

- Título del estudio:

Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo.

I. Validez del instrumento

Tipo de validez	Descripción	Procedimiento empleado	Resultado esperado
Validez de contenido	Evalúa si los ítems o indicadores representan adecuadamente las dimensiones y variables del estudio.	Se elaboraron los instrumentos (fichas técnicas, registros de monitoreo, plantillas de evaluación post-voladura) con base en literatura especializada, normas técnicas (DS-024-2016-EM) y se sometieron a juicio de expertos en geotecnia minera y voladura.	Alta correspondencia entre dimensiones, indicadores y contenidos. Recomendaciones validadas por mínimo tres expertos (con más de 5 años de experiencia).
Validez de criterio	Evalúa si los resultados del instrumento se correlacionan con un criterio externo validado.	Se compararán los resultados del comportamiento dinámico con registros sísmicos históricos de voladuras similares y con modelos numéricos calibrados.	Correlación significativa entre los datos medidos y los registros o modelos de referencia.
Validez de constructo	Evalúa si el instrumento realmente mide el constructo teórico planteado (comportamiento dinámico, secuencia de voladura.).	Se establecieron relaciones lógicas entre los indicadores de las dimensiones, según teorías del comportamiento del macizo rocoso (Hoek-Brown, teoría de vibraciones, control de daño por voladura).	Coherencia lógica entre variables e indicadores; consistencia teórica comprobada.

II. Confiabilidad del instrumento

Criterio	Descripción	Técnica empleada	Resultado esperado
Estabilidad (test-retest)	Evalúa si el instrumento arroja resultados consistentes en diferentes momentos.	Se realizarán mediciones repetidas (por ejemplo, velocidad de partícula) en eventos de voladura similares bajo condiciones controladas.	Resultados con variación $\leq 10\%$ entre registros sucesivos.
Consistencia interna	Verifica si los ítems que miden una misma dimensión están correlacionados entre sí.	Se aplicará el coeficiente Alfa de Cronbach (solo si se aplican escalas de evaluación en formularios o encuestas geotécnicas complementarias).	Alfa de Cronbach ≥ 0.8 .
Equivalencia interevaluador	Evalúa si diferentes observadores obtienen resultados similares al aplicar el instrumento.	Se usará evaluación cruzada entre tres profesionales en geotecnia y voladura para revisar mapas geomecánicos, registros post-disparo y análisis de vibraciones.	Índice de concordancia $\geq 85\%$.

III. Participantes en la validación de contenido

Nombre	Especialidad	Institución	Experiencia
Fredy Gaspar Canturín	Voladura y fragmentación	MAXAM PERÚ	15 años
José Luis Quezada Gil	Geomecánica subterránea y superficial.	COMPAÑÍA MINERA CONDESTABLE	10 años
Edwar Rubén Moreano Panti	Control sísmico y diseño de voladuras.	EPC ANDINA	10 años

INFORME FINAL DE VALIDEZ DEL INSTRUMENTO

Informe final de validación de contenido del instrumento de investigación

Título de la tesis: Influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo

UNIVERSIDAD CONTINENTAL

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

Nombre de los tesisistas: Bachilleres: Araujo Zurita, Jeyson Diomenes / Polino Puente, Eleving

Fecha: Huancayo 02 de julio de 2025

I. Introducción

El presente informe tiene por finalidad dar cuenta del proceso de validación de contenido del instrumento de recolección de datos, diseñado para medir las variables: voladura masiva con detonadores electrónicos y comportamiento dinámico del macizo rocoso, en el contexto de una operación minera a tajo abierto.

II. Procedimiento de validación

El instrumento fue evaluado por tres expertos con reconocida trayectoria en ingeniería de minas, geotecnia y voladura, quienes revisaron la claridad, coherencia, pertinencia, suficiencia y adecuación técnica del mismo. Se utilizó una escala de valoración cualitativa: Deficiente, Regular, Buena, Muy buena, Excelente

III. Resultados

Los tres expertos coincidieron en que:

El contenido es pertinente y técnicamente adecuado.

La relación entre dimensiones, indicadores y variables es clara.

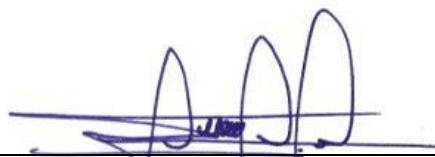
Nivel de acuerdo entre expertos:

Índice de concordancia: 95%

IV. Conclusiones

Se concluye que el instrumento cuenta con validez de contenido satisfactoria, y está listo para su aplicación en campo, siempre que se realicen los ajustes menores sugeridos.

Firma de los investigadores



Araujo Zurita, Jeyson Diómenes
Tesisista



Polino Puente, Eleving
Tesisista



Mtro. Julio Fredy Porras Mayta
Asesor

Fecha: Huancayo, 07 de julio de 2025.

3.5. Técnicas de procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos de la presente tesis, se empleó principalmente Excel y Power BI, aprovechando sus capacidades complementarias. En Excel, se realizó la limpieza y organización inicial de los datos recopilados de las mediciones sísmicas, geotécnicas y topográficas. Se utilizó funciones y fórmulas para calcular parámetros como la velocidad pico de partícula (VPP), la frecuencia de las ondas sísmicas y las deformaciones del macizo rocoso. Además, se generaron tablas y gráficos para visualizar las tendencias iniciales.

Posteriormente, se importaron los datos procesados en Excel a Power BI para un análisis más profundo y la creación de visualizaciones interactivas. En Power BI, se desarrolló paneles de control que permitieron explorar la relación entre los parámetros de voladura y el comportamiento del macizo rocoso. Además, se usaron gráficos avanzados, mapas y segmentaciones para identificar patrones y tendencias significativas. Asimismo, se aprovechó las capacidades de Power BI para crear informes dinámicos que facilitaron la comunicación de los resultados de la investigación.

3.6. Materiales

Tabla 14: Materiales usados en la investigación

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Sismógrafo Instantel	1
2	Geófonos	2
3	Blaster 3000	1
4	Logger II	1
5	Detonadores Electrónicos	500
6	Distanciómetro	1
7	Libreta de Campo	1
8	Software Blastware	1
9	Software WipFrag	1
10	Office 365	1
11	JKSimBlast	1
12	Laptop	2

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. Aspectos generales de la UM Cerro Lindo

4.1.1.1. Ubicación

La unidad minera Cerro Lindo se encuentra ubicada en el distrito de Chavín, provincia de Chincha, en el departamento de Ica, Perú. Está situada aproximadamente a 175 km al SE de Lima y a 62 km del mar, a una altitud de 1820 m.s.n.m.

4.1.1.2. Accesibilidad

Desde la ciudad de Lima, la ruta hacia la unidad minera es la siguiente:

Tabla 15. Acceso a la UM Cerro Lindo

Ruta	Tramo	Vía	Distancia (km)	Tiempo (h)
1	Lima – Jahuay	Asfaltada	175	3.0 horas
2	Jahuay - Mina	Afirmada	62	2.5 horas
Total			237	5.5 horas



Figura 24. Ubicación de la UM Cerro Lindo
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.1.3. Geología regional

El yacimiento de Cerro Lindo se encuentra en una zona de rocas marinas de origen volcánico y sedimentario, con un tamaño aproximado de 30 km de largo por 10 km de ancho y una orientación noroeste. Estas rocas pertenecen a la formación Huaranguillo, cuya antigüedad se remonta al Cretácico medio, específicamente entre las épocas Albiano medio y Senoniense. Esta formación es parte del grupo Casma y está rodeada por rocas intrusivas más jóvenes, del Terciario, pertenecientes al batolito costero.

El grupo Casma está compuesto principalmente por rocas volcánicas llamadas andesitas porfídicas. Estas rocas se formaron en una cuenca ubicada detrás de un arco volcánico, sobre un basamento rocoso más antiguo que no se puede ver en la superficie. Este proceso ocurrió

debido a movimientos de la corteza terrestre conocidos como tectónica extensional, mientras la placa oceánica se deslizaba por debajo de la placa continental. Las rocas volcánicas y sedimentarias del grupo Casma se encuentran a lo largo de una extensa franja de 1.600 km en la costa del océano Pacífico, desde Ica en el sur de Perú hasta Piura en el norte. El batolito costero, una gran masa de rocas intrusivas que data del Cretácico superior al Terciario, se extiende a través del grupo Casma en gran parte de su longitud. En la región de Cerro Lindo, este cinturón intrusivo está formado por granodioritas, monzogranitos y dioritas, todas ellas con afinidad calco-alcalina. El batolito se emplazó durante un extenso período de 64 millones de años, entre 101 Ma y 37 Ma, en múltiples eventos intrusivos. El batolito costero está compuesto por tres superunidades principales: Catahuasi, Incahuasi y Tiabaya. Estas superunidades se superponen a rocas volcánicas y generalmente tienen una composición que varía de granodiorítica a tonalítica, con un tamaño de grano variable. Diques de pórfido andesítico, con una orientación general de norte a sur, cortan a través de todas las unidades.

La intrusión del batolito resultó en un metamorfismo de contacto significativo en las rocas volcánicas sedimentarias adyacentes. En el área de Cerro Lindo, este metamorfismo se manifestó como un metamorfismo regional de grado medio, caracterizado por la presencia de los minerales andalucita y cordierita.

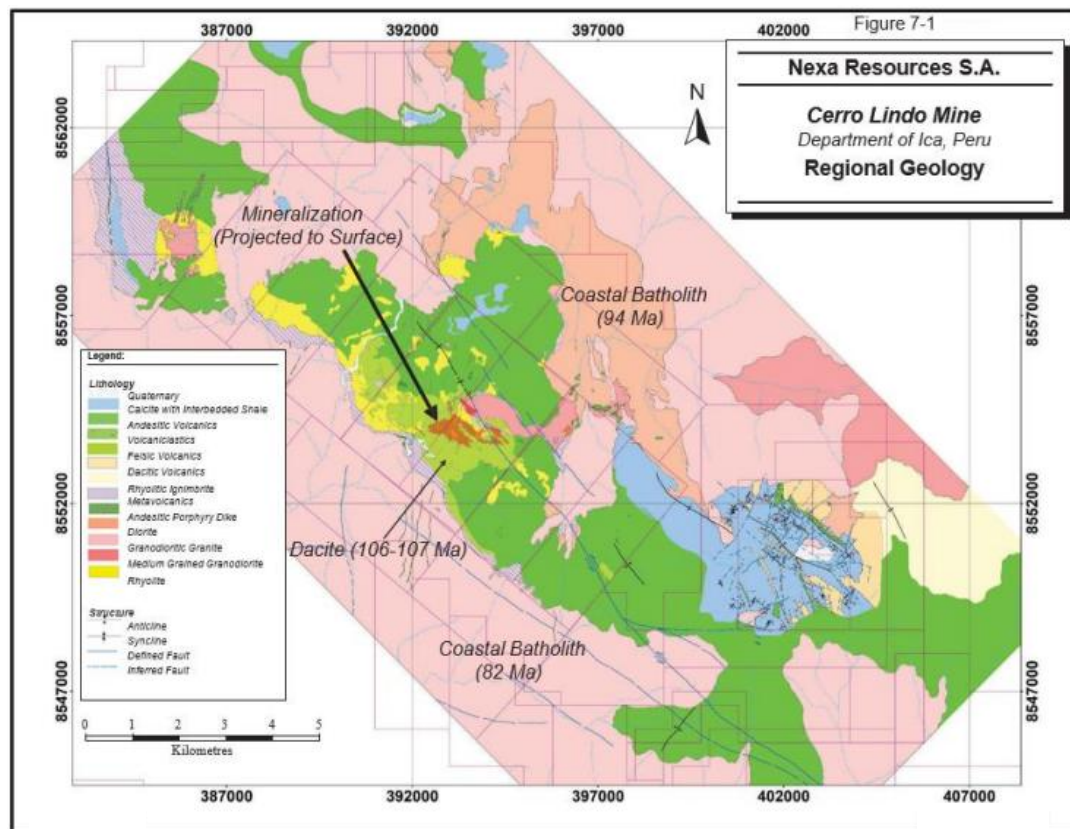


Figura 25. Plano geológico regional – UM Cerro Lindo
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.1.4. Geología local

El yacimiento de Cerro Lindo es un depósito de sulfuros masivos de origen volcánico. Está situado en el grupo Casma, cuyas rocas se formaron durante el período Cretácico en una cuenca marina durante un proceso de subducción. Estas rocas, pertenecientes a la formación Huaranguillo del Cretácico inferior (hace unos 110 millones de años), se dividen en tres secuencias: inferior, superior y techo. La secuencia volcánico-sedimentaria está compuesta por lavas y rocas piroclásticas félsicas. Posteriormente, el batolito de la costa intrusionó esta secuencia, generando una aureola de rocas metamórficas. El yacimiento presenta una orientación NW en planta y un buzamiento promedio de 65° hacia el SW en sección.

El yacimiento mineralizado está atravesado por diques de andesita. Asimismo, está rodeado por rocas intrusivas del batolito de la costa, que se compone de tres unidades principales: Catahuasi, Incahuasi y Tiabaya. Estas unidades se formaron durante el Cretáceo superior, hace aproximadamente 95 a 80 millones de años. La secuencia geológica concluye con la formación Tantará, que contiene rocas volcánicas continentales.

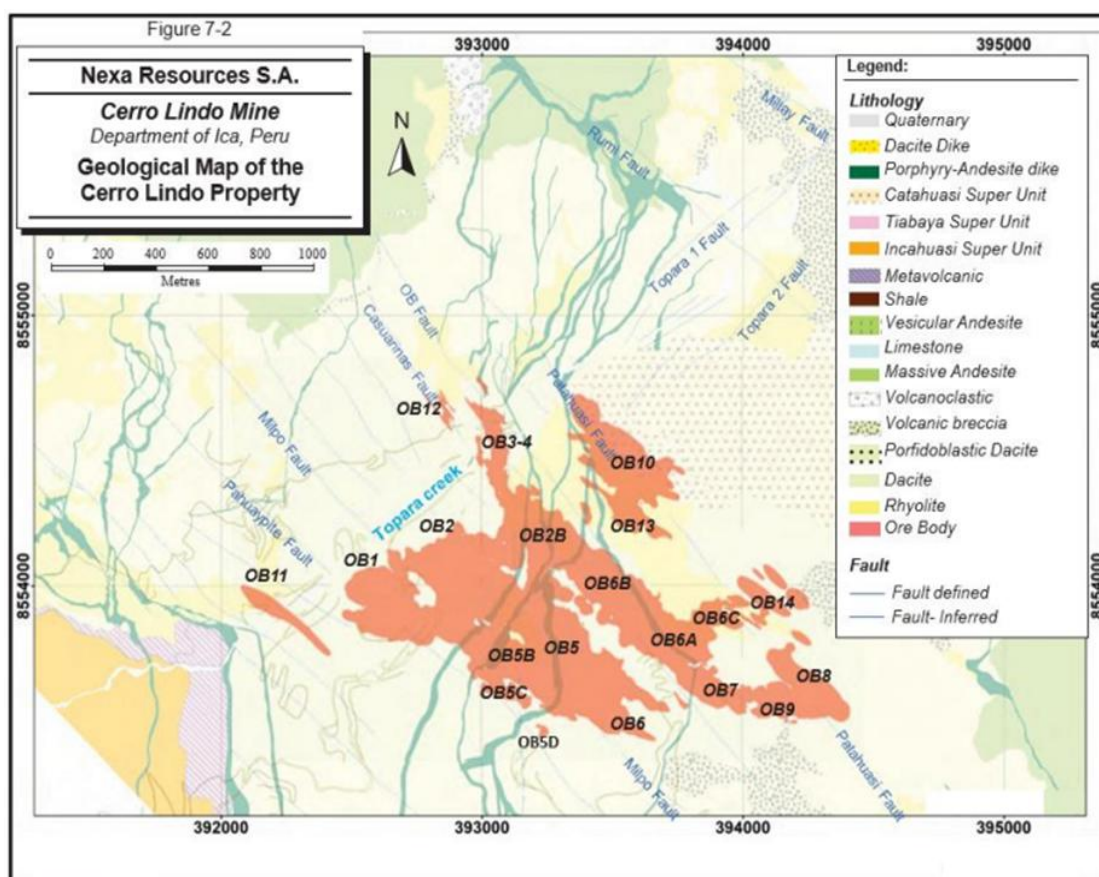


Figura 26: Plano geológico con ubicación de cuerpos mineralizados – UM Cerro Lindo.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025.

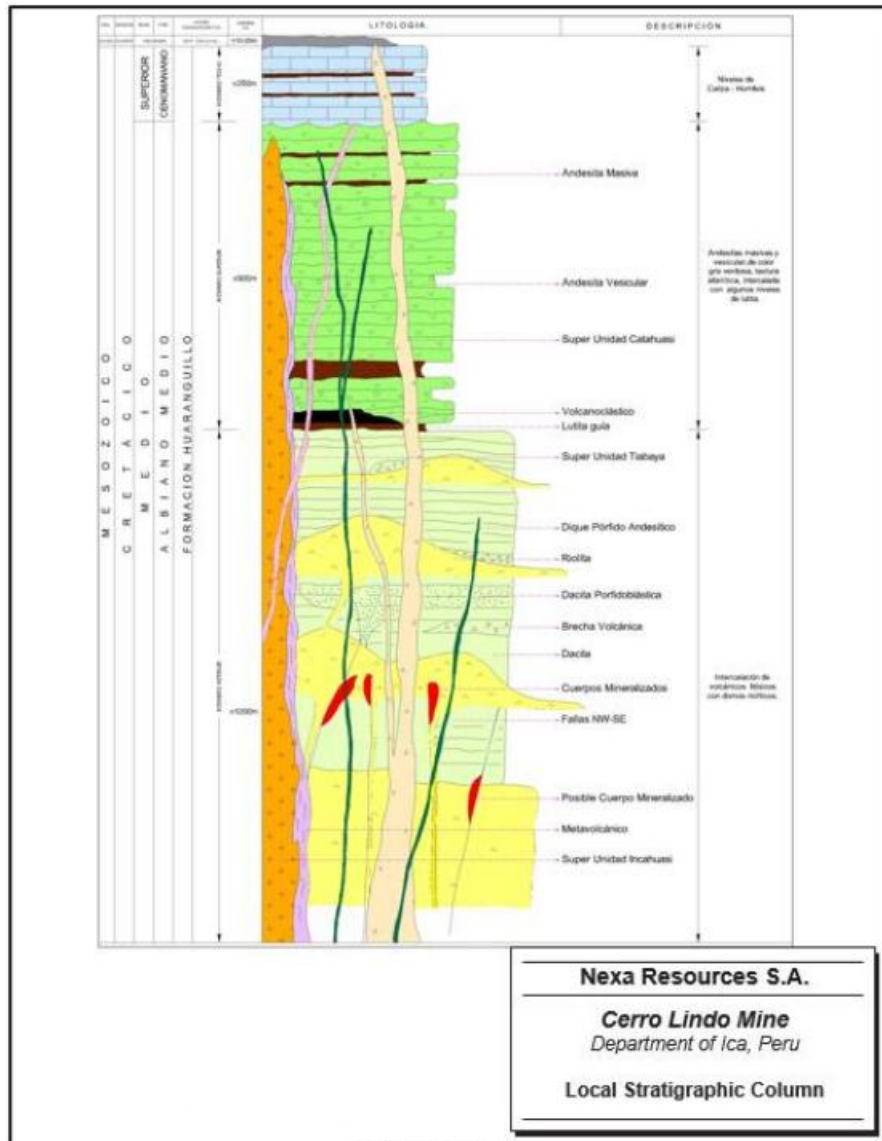


Figura 27: Columna estratigráfica local – UM Cerro Lindo.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025.

El depósito de Cerro Lindo está formado por cuerpos de sulfuros masivos con forma de lente y apilados. Los principales minerales que lo componen son la pirita (en gran cantidad, entre el 50 % y el 95 %), la esfalerita, la calcopirita y la galena (estos tres últimos en menor proporción). Además, contiene cantidades importantes de baritina (entre el 10 % y el 60 %), la cual se encuentra principalmente en las partes superiores de los cuerpos mineralizados.

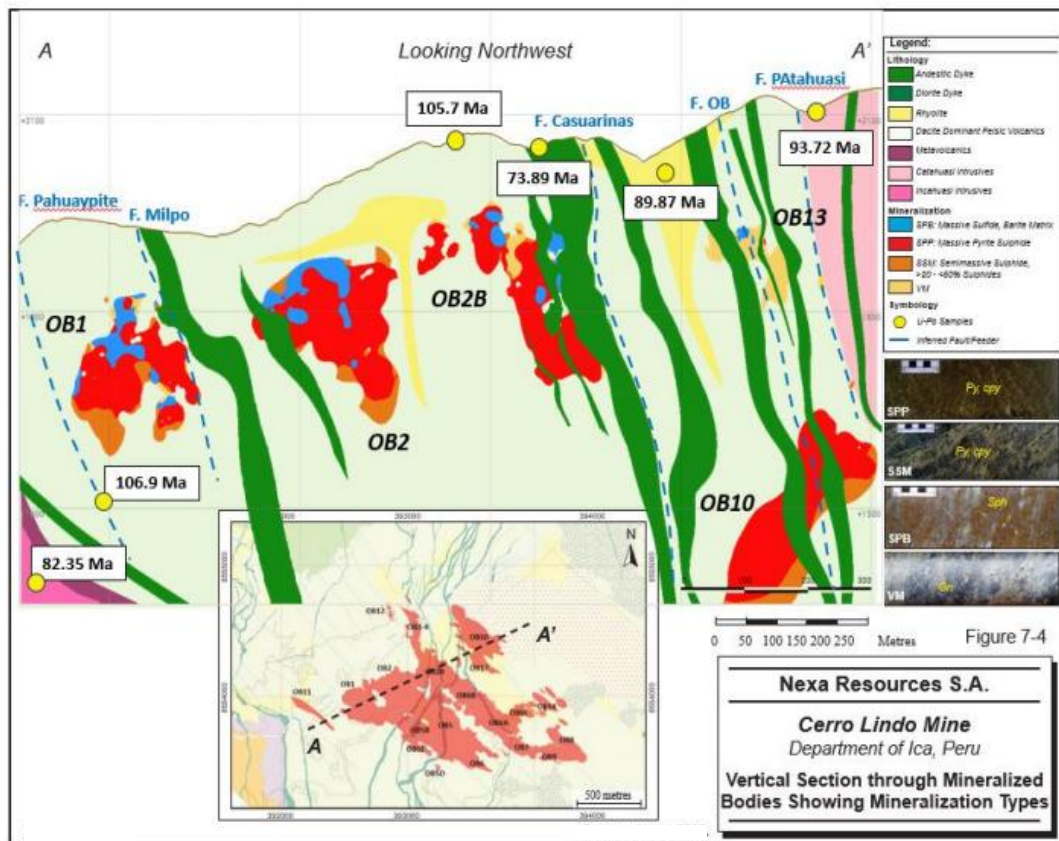


Figura 28: Sección transversal del yacimiento - UM Cerro Lindo.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025.

4.1.1.5. Mineralización

En el depósito Cerro Lindo se han encontrado ocho formas distintas de mineralización, los cuales se detallan a continuación:

- Sulfuro masivo primario pirítico, homogéneo (SPP): esta unidad está compuesta casi en su totalidad por pirita, con menos del 10 % de barita y cantidades aún menores de calcopirita intersticial. Su textura es uniforme en cuanto al tamaño de grano, predominando los granos gruesos (3 mm a 6 mm), aunque también se observan zonas con granos más finos (0,4 mm a 2 mm).
- Sulfuros primarios baríticos homogéneos ricos en cobre (Cu-SPB): esta unidad se caracteriza por una alta concentración de sulfuros, incluyendo barita, que supera el 50 % del total. La barita, presente en más del 10%, se encuentra íntimamente asociada a los sulfuros debido a su formación simultánea a partir de la misma solución. La unidad presenta una estructura homogénea compuesta por una variedad de sulfuros como pirita, pirrotita, calcopirita y esfalerita marrón, además de la barita. Estos sulfuros se presentan en forma de intercrecimientos y parches, con la esfalerita marrón incluida en los granos de calcopirita. La pirita es menos

abundante en comparación con la unidad Zn-SPB. Por lo general, la unidad Cu-SPB se localiza dentro o cerca del contacto con las unidades Zn-SPB y SPP.

- c) Sulfuros primarios baríticos bandeados, ricos en zinc (Zn-SPB): la unidad Zn-SPB se caracteriza por contener más del 50% del total de sulfuros presentes, incluyendo la barita, y más del 10% de barita. Esta unidad está compuesta por proporciones variables de pirita, barita, esfalerita amarilla y galena. Además, presenta una textura bandeadada y un tamaño de grano grueso, que varía entre 3 mm y 6 mm.
- d) Sulfuros semimasivos (SSM): la unidad en cuestión contiene entre un 20 % y un 50 % de sulfuros, representados mayoritariamente por pirita estéril en diversas formas. Esta mineralización suele ser de grano fino, a diferencia de los sulfuros masivos. El SSM rodea los cuerpos de sulfuro masivo con un grosor variable de 20 a 80 metros, disminuyendo su proporción de sulfuro hacia el exterior y siendo más abundante en la pared inferior.
- e) Sulfuros oxidados piríticos (SOP): la unidad en cuestión está formada por los minerales bornita y covelita, y su ubicación principal se encuentra en la zona de producción minera OB2.
- f) Sulfuros oxidados baríticos (SOB): la unidad en cuestión se encuentra en la zona de producción minera OB2 y está compuesta por tres minerales distintos: bornita, covelita y zinc oxidado.
- g) Sulfuros masivos lixiviados (SLB) y sulfuros semimasivos lixiviados (SSL): las unidades mencionadas se encuentran en una posición cercana a la superficie dentro de la zona designada para la producción minera OB2.
- h) Rocas volcánicas mineralizadas (VM): esta unidad geológica está compuesta principalmente por rocas ígneas riolíticas y dacíticas, de origen volcánico. En ellas se encuentran minerales como galena, calcopirita y esfalerita, aunque en cantidades pequeñas y dispersas en forma de vetillas o parches. Estos minerales se ubican principalmente en los límites de las zonas mineralizadas.

Tabla 16. Dimensiones del ore bodies mineralizados en la zona de producción – UM Cerro Lindo

Descripción	Unidad	OB-1	OB-2	OB-2B	OB-3-4	OB-5	OB-5B	OB-5C	OB-5D	OB-6	OB-6A	OB-6B	OB-6C	OB-7	OB-8	OB-9	OB-10	OB-11	OB-12	OB-13	OB-14	OB-15
Longitud	m	350	450	420	150	350	635	200	40	200	460	200	100	170	350	300	400	250	150	500	270	250
Ancho	m	200	220	60	20	65	80	15	35	50	70	60	80	50	100	60	70	120	100	100	20	40
Espesor Promedio	m	100	200	80	40	45	70	35	15	80	80	65	25	60	45	70	85	3	4	50	12	25
Profundidad	m	360	330	260	330	400	245	90	110	450	260	245	70	210	70	190	380	25	70	275	275	100
Elevación Superior	m	1850	1970	1950	1950	2000	1805	1780	1640	2000	2020	1975	1995	1940	1700	1950	1670	1550	1960	1970	1990	1880
Elevación Inferior	m	1490	1640	1620	1620	1600	1560	1690	1530	1550	1760	1730	1925	1730	1440	1760	1290	1450	1840	1780	1520	1780

Tomada del Departamento de Planeamiento.

Cerro Lindo alberga 21 áreas de producción minera, cuyas lentes mineralizadas presentan una forma alargada e irregular, extendiéndose por casi 635 metros en dirección noroeste-sureste. Estos cuerpos mineralizados, de unos 300 metros de espesor y 220 de ancho, se inclinan hacia el suroeste, alcanzando su mayor tamaño cerca de la quebrada de Topará y disminuyendo hacia el sureste. La tabla adjunta detalla las dimensiones de cada cuerpo mineralizado dentro de las áreas de producción.

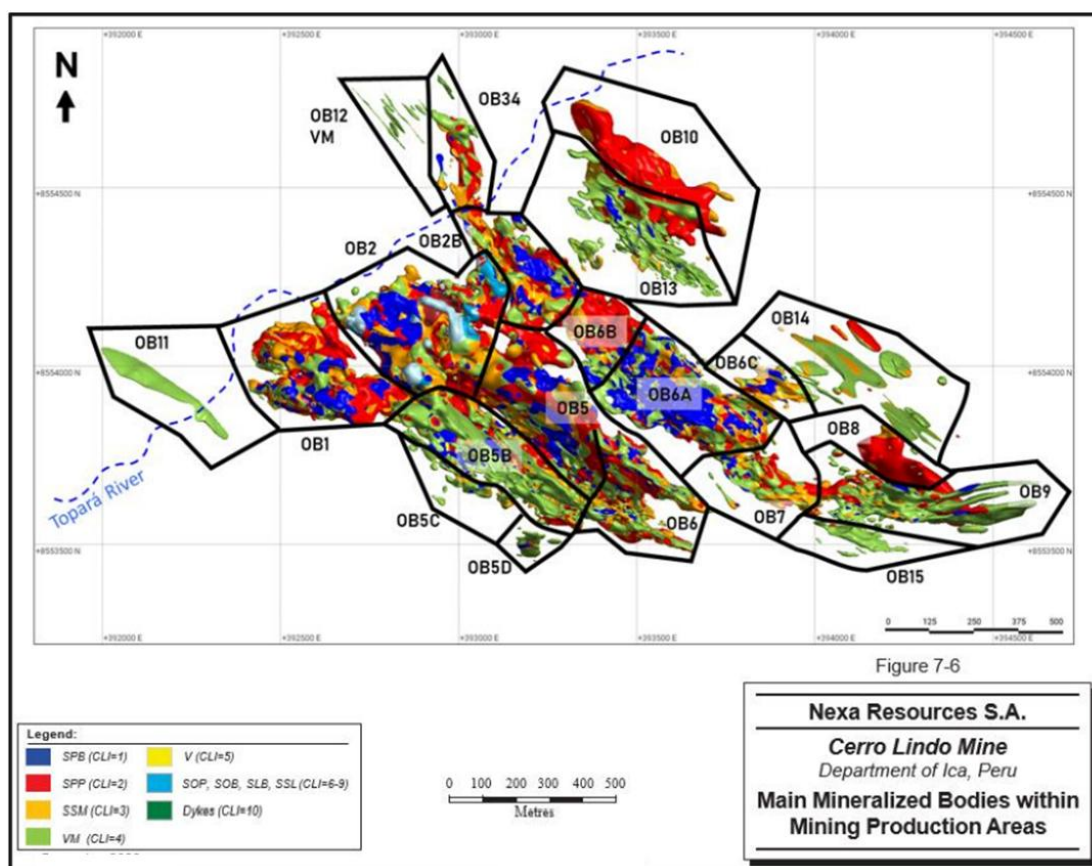


Figura 29. Plano de ubicación de los cuerpos mineralizados – UM Cerro Lindo
 Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.1.6. Planes de minado

4.1.1.6.1. Plan de minado 2024

En 2024, se planea extraer mineral de 11 cuerpos mineralizados distintos, destacando el OB1 como el principal proveedor de ROM (Run of Mine) durante ese año.

Tabla 17. Producción de tajos 2024 por ore bodie

Ore Bodie	Mineral Extraído (Ton)	Zn	Pb	Cu	Ag	Fe
OB1	1,429,568	0.93	0.04	0.97	0.43	33.19
OB2	274,667	0.86	0.10	1.07	0.74	33.33
OB2B	250,714	1.02	0.21	0.47	0.77	19.34
OB5	476,908	1.8	0.26	0.37	0.71	26.21
OB5B	739,343	1.58	0.32	0.25	0.9	16.74
OB5C	114,630	1.84	0.52	0.5	1.42	9.52

OB6	995,560	1.77	0.21	0.46	0.59	23.83
OB6A	387,748	0.87	0.23	0.52	0.96	20.04
OB6B	224,905	0.66	0.11	0.46	0.57	25.03
OB9	350,007	2.72	0.48	0.38	1.30	12.04
OB13	701,245	2.34	0.95	0.11	1.82	4.28
TOTAL	5,945,294	1.5	0.29	0.54	0.84	22.16

Tomada del Departamento de Planeamiento

4.1.1.6.2. Plan de minado 2025

En el año 2025, se planea llevar a cabo actividades de extracción minera en un total de 12 cuerpos mineralizados (Ore Bodies). De estos, el OB1 (Ore Body 1) se destaca como el principal proveedor de ROM (Run of Mine), lo que significa que aportará la mayor cantidad de material extraído y procesado durante ese año.

Tabla 18. Producción de tajos 2025 por ore bodie

Ore Bodie	Mineral extraído (t)	Zn	Pb	Cu	Ag	Fe
OB1	1,285,007	1.15	0.11	0.71	0.56	28.88
OB2	908,128	1.37	0.14	0.81	0.72	30.43
OB2B	267,987	1.26	0.25	0.44	0.69	19.29
OB5	389,193	2.09	0.31	0.41	1.00	22.39
OB5B	674,406	1.63	0.34	0.22	1.03	13.17
OB5C	90,187	2.13	0.57	0.36	1.29	10.85
OB6	490,640	1.07	0.14	0.45	0.58	21.99
OB6A	704,975	2.05	0.30	0.42	0.92	18.27
OB6B	164,517	1.48	0.16	0.44	0.45	23.55
OB9	699,128	2.03	0.50	0.37	1.59	8.34
OB13	53,988	1.56	0.93	0.12	3.04	3.66
OB15	81,665	1.64	0.63	0.09	1.39	3.71
TOTAL	5,809,822	1.55	0.26	0.51	0.89	21.06

Tomada del Departamento de Planeamiento

4.1.1.7. Geomecánica

El macizo rocoso de Cerro Lindo está compuesto por una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de la formación Huaranguillo, perteneciente al grupo Casma del Cretáceo. Se identifican cuatro familias de fallas regionales, de las cuales las dos primeras están relacionadas con la mineralización y fueron reactivadas durante el levantamiento de Los Andes. A continuación, se detallan estas fallas.

- a) Las fallas regionales orientadas al NO; son las que le dan la forma al paleorelieve, es el corredor principal donde se albergan los sulfuros masivos y litológicamente es la delimitación principal de la formación Huaranguillo.
- b) Las fallas orientadas al NE; son los conductos principales por donde los fluidos hidrotermales ricos en Cu y Fe reemplazan a la mineralización de Zn, Ag y Pb, finalmente estas estructuras son reemplazadas por diques andesíticos porfiríticos.
- c) Las fallas norte-sur; es un sistema de falla inversa posterior a la deposición de la mineralización.
- d) Las fallas este-oeste, corresponde a un sistema de falla secundario.

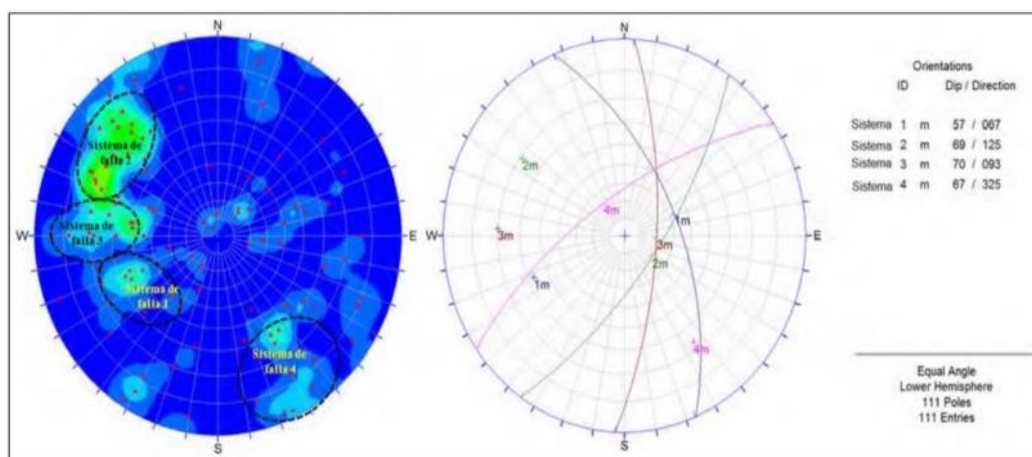


Figura 30: Sistema de falla de la UM Cerro Lindo.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025.

La clasificación geomecánica se lleva a cabo mediante parámetros geomecánicos específicos en las diferentes zonas estructurales de la unidad rocosa. La evaluación de la calidad de la masa de roca se realiza utilizando el índice RMR (*rock mass rating*) de Bieniawski.

Criterio para la Clasificación de la Masa Rocosa			
Tipo de roca	Rango RMR	Rango Q	Calidad según RMR
II	> 60	> 5.92	Buena
IIIA	51 – 60	2.18 – 5.92	Regular A
IIIB	41 – 50	0.72 – 1.95	Regular B
IVA	31 – 40	0.24 – 0.64	Mala A
IVB	21 – 30	0.08 – 0.21	Mala B
V	< 21	<0.08	Muy Mala

Figura 31: Comparación de clasificaciones RMR y Q de Barton
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

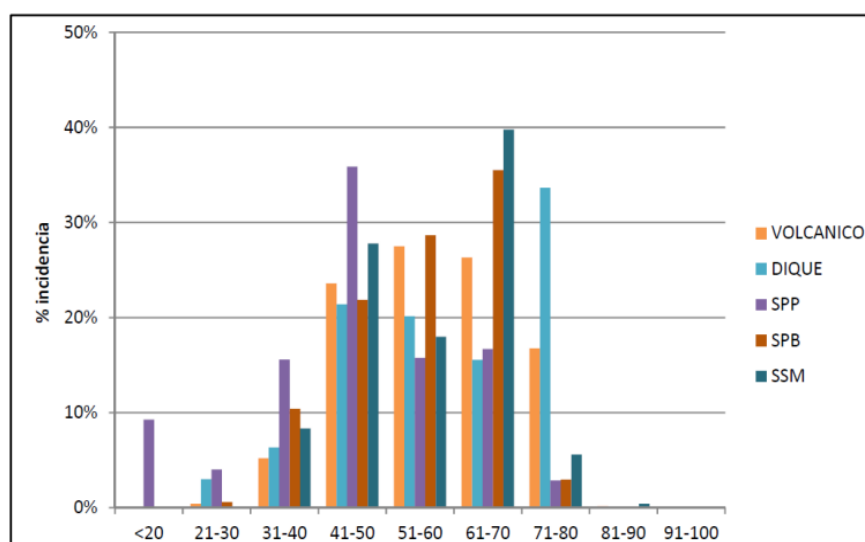


Figura 32. Incidencia de rangos de RMR.
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

Los análisis indican que la mayoría de las áreas (70%) tienen una calidad de roca regular, con un índice RMR entre 40 y 60. El resto (30%) presenta una calidad de roca superior, con un RMR mayor de 61. Las zonas donde se realizan trabajos de desarrollo y preparación tienen una calidad de roca clasificada como tipo IIIA o IIIB, también dentro del rango de calidad regular. Sin embargo, las áreas de minado muestran una mejor calidad de roca, clasificada como tipo IIIA o II, lo que asegura la estabilidad de las excavaciones para la producción.

Tabla 19. Zonificación de ore bodies por tipo de roca

Cuerpo	Litología	N° Datos	Promedio RMR89
OB1	Dique andesítico	171	52
	Enclave	1	75
	Falla	187	22

OB13	SPB (Sulfuro Primario barítico)	29	44
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	168	46
	SSM (Sulfuros semimasivos)	144	49
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	1	59
	Volcánico	2826	46
	Dique andesítico	468	54
	Falla	119	19
	SPB (Sulfuro primario barítico)	34	52
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	6	43
	SSM (Sulfuros semimasivos)	103	53
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	50	50
	Volcánico	1006	49
	Dique andesítico	32	49
OB14	Falla	10	22
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	15	59
	SSM (Sulfuros semimasivos)	120	54
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	32	57
	Volcánico	602	51
OB15	Dique Andesítico	16	46
	Falla	33	23
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	6	57

OB2	SSM (Sulfuros semimasivos)	1	81
	Volcánico	705	50
	Dique andesítico	216	44
	Falla	230	20
	SPB (Sulfuro primario barítico)	82	40
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	622	46
	SSM (Sulfuros semimasivos)	313	50
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	6	42
	Volcánico	1989	42
	Dique andesítico	190	48
OB2B	Enclave	9	47
	Falla	53	19
	SPB (Sulfuro primario barítico)	88	50
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	161	44
	SSM (Sulfuros semimasivos)	73	46
	Volcánico	535	46
	Dique andesítico	218	48
OB5	Falla	129	24
	SPB (Sulfuro primario barítico)	99	49
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	303	39
	SSM (Sulfuros semimasivos)	170	48
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	3	43

OB5B	Volcánico	950	46
	Dique andesítico	124	57
	Falla	98	21
	SPB (Sulfuro primario barítico)	138	50
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	140	42
	SSM (Sulfuros semimasivos)	116	50
	VM (Rocas volcánicas mineralizadas)	24	47
	Volcánico	1069	46
OB5C	Dique andesítico	23	58
	Falla	36	22
	SPB (Sulfuro primario barítico)	35	51
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	25	49
	SSM (Sulfuros semimasivos)	91	51
	Volcánico	439	48
	Dique andesítico	118	59
	Enclave	3	46
OB6	Falla	66	22
	SPB (Sulfuro primario barítico)	44	53
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	229	42
	SSM (Sulfuros semimasivos)	174	52
	Volcánico	1261	49
	Dique andesítico	37	53
	Falla	10	26
	SPB (Sulfuro primario barítico)	14	46
OB6A			

OB6B	SPP (Sulfuro primario pirítico)	30	52
	SSM (Sulfuros semimasivos)	10	62
	Volcánico	259	51
	Dique andesítico	128	46
	Falla	49	16
	SPB (Sulfuro primario barítico)	4	37
	SPP (Sulfuro primario pirítico)	160	36
	SSM (Sulfuros semimasivos)	17	47
	Volcánico	103	46
	Dique andesítico	52	53
	Falla	55	23
	SPB (Sulfuro primario barítico)	43	54

Tomada del Departamento de Planeamiento

4.1.1.8. Sostenimiento

Con el objetivo de caracterizar el macizo rocoso en la mina Cerro Lindo, se realiza un mapeo geomecánico en las excavaciones subterráneas en curso, abarcando desde el nivel base 1490 hasta el nivel 1970. El estudio está enfocado en los cuerpos mineralizados OB1, OB2, OB2B, OB5, OB5C, OB5B, OB6, OB7, OB9 y OB13, donde se miden sistemáticamente las discontinuidades, incluyendo parámetros como tipo de roca, sistema de discontinuidad, orientación, espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, tipo y espesor de relleno, intemperización y presencia de agua.

En primer lugar, para complementar la caracterización del macizo rocoso, se realiza un registro exhaustivo de los testigos de perforación diamantina. Durante este proceso, se registran minuciosamente todas las estructuras geológicas presentes a lo largo de los sondajes geotécnicos, incluyendo la orientación de las discontinuidades, así como las características de relleno, rugosidad y ondulación de las mismas.

En segundo lugar, para llevar a cabo la conversión de valores obtenidos mediante el sistema de clasificación RMR (rock mass rating) de Bieniawski (1989) a su equivalente en el sistema

"Q" de Barton (2002), se emplea una fórmula de correlación específica. Esta fórmula, propuesta por Bieniawski en 1984, es la siguiente: $RMR = 9 \times \ln Q + 44$.

En tercer lugar, el diseño del sistema de sostenimiento se fundamenta en el manual "Using the Q-system, 2022" publicado por el Instituto Geotécnico Noruego (NGI). Este manual representa una actualización del estudio original realizado por Barton en 1974, que introdujo el sistema Q para la clasificación y diseño de sostenimiento en macizos rocosos.

Finalmente, para el análisis de estabilidad de las excavaciones, se utiliza un factor de seguridad de entrada (ESR) de 1.6 para labores permanentes y un ESR de 3 para labores temporales. Asimismo, el SPAN utilizado en el dimensionamiento de las labores es de 6 metros. Este valor corresponde al mayor SPAN identificado dentro del dimensionamiento de las labores de la unidad, específicamente en las curvas de las rampas.

4.1.1.8.1. Sostenimiento primario en labores permanentes

Usando como base y sostenimiento mínimo el *handbook*: "Using the Q-system, 2022" se ha realizado la elección del sostenimiento para las labores permanentes. En ese sentido, se está utilizando un ESR de 1.6 y un SPAN de 6 m.

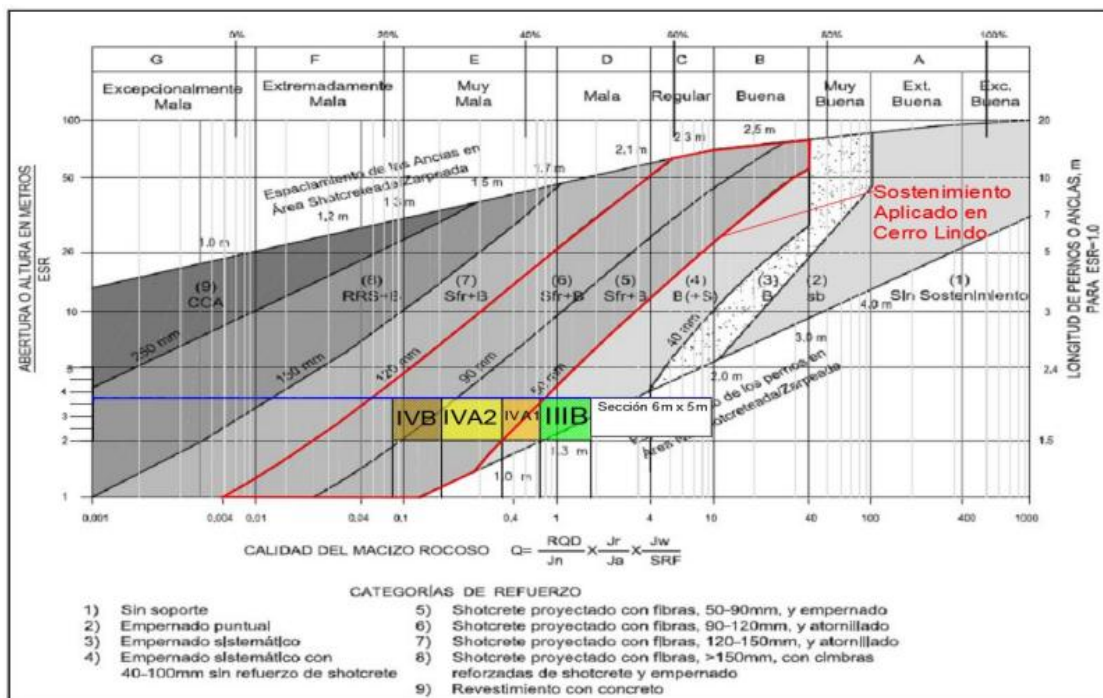


Figura 33. Ábaco de Barton para el sostenimiento de labores permanentes
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

TIPO DE ROCA	II	IIIA	IIIB	IVA1	IVA2	IVB	V
RMR	80 - 61	60 - 51	50 - 41	40 - 36	35 - 31	30 - 21	< 20
CLASIFICACION	Buena	Regular A	Regular B	Mala A1	Mala A2	Mala B	Muy mala

Figura 34. Clasificación geomecánica por RMR
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

Para labores permanentes el sostenimiento indicado por cada tipo de roca es el siguiente:

TIPO DE SOSTENIMIENTO - LABOR PERMANENTE	
II	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IIIA	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IIIB	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IVA1	Shotcrete (e= 3") + Pernos Expansivos 1.2 x 1.2 m (Revisar casos especiales)
IVA2	Shotcrete (e= 2") + Malla electrosoldada + Pernos expansivos + shotcrete (e=2")
IVB	Shotcrete (e= 2") + Malla electrosoldada + Pernos expansivos + shotcrete (e=2")
V	No se deben de ejecutar labores permanentes en este tipo de roca.

Figura 35. Tipo de sostenimiento para labores permanentes
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.1.8.2. Sostenimiento primario en labores temporales

Usando como base y sostenimiento mínimo el Handbook: "Using the Q-system, 2022" se ha realizado la elección del sostenimiento para las labores temporales. Se está utilizando un ESR de 3.0 y un SPAN de 6 m.

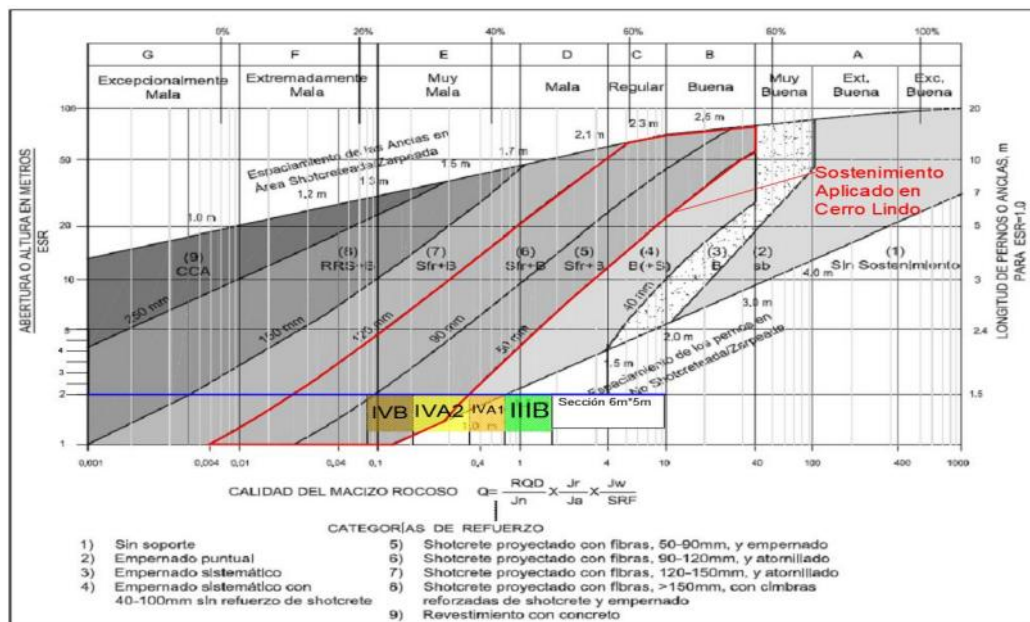


Figura 36. Ábaco de Barton para el sostenimiento de labores temporales
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

TIPO DE SOSTENIMIENTO - LABOR TEMPORAL	
II	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IIIA	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IIIB	Shotcrete (e= 2") + Pernos Helicoidales Sist 1.5 x 1.5 m
IVA1	Shotcrete (e= 2") + Pernos Expansivos 1.5 x 1.5 m (Revisar casos especiales)
IVA2	Shotcrete (e= 3") + Pernos Expansivos 1.2 x 1.2 m (Revisar casos especiales)
IVB	Shotcrete (e= 2") + Malla electrosoldada + Pernos expansivos + shotcrete (e=2")
V	Shotcrete (e= 2") + Malla electrosoldada+ Pernos expansivos + shotcrete (e=2"), + reforzamiento con Arcos Noruegos espaciados a 1.2 m. (Span máximo 1.2 m) Shotcrete (e= 2") + Cimbras 0.8 m a 1.2 m. (Span máximo 1.2 m)

Figura 37. Tipo de sostenimiento para labores temporales
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.1.8.3. Sostenimiento dinámico

Según el estudio de estabilidad global y modelo geomecánico numérico 3D de la mina Cerro Lindo, el sostenimiento adecuado para zonas de sismicidad son los siguientes casos 3, 4, 6 y 7:

Caso	Sostenimiento	Energía de absorción (KJ/m2)	Factor de seguridad	Comentario
1	Perno helicoidal + Cable bolting 4 m + shotcrete 3"reforzado	8.9	0.9	
2	Perno helicoidal +Cable + shotcrete 3" reforzado (doble malla)	11.9	1.3	
3	Perno helicoidal +Cable + shotcrete 3" reforzado +malla tejida	15.4	1.6	ok
4	Perno dinámico + Shotcrete 3" reforzado	14.9	1.6	ok
5	Perno dinámico + doble malla electrosoldada	14.9	1.6	
6	Perno dinámico + malla tejida	15.4	1.6	ok
7	Perno dinámico + Shotcrete 3" reforzado + malla tejida	21.4	2.3	ok

Figura 38. Sostenimiento recomendado para zonas sísmicas
Tomada de Compañía Minera Nexa Resources S.A. 2025

4.1.2. Comportamiento dinámico del macizo rocoso

La implementación de detonadores electrónicos en el tajo 821G-OB6A de la UM Cerro Lindo caracterizado por su notable profundidad y condiciones geotécnicas particulares requirió un estudio integral que incluyó: monitoreo sísmico mediante geófonos de alta sensibilidad, inspección visual sistemática post voladura, análisis de estabilidad mediante criterios geomecánicos y modelamiento numérico con software especializado. Los resultados obtenidos demuestran una influencia significativa y favorable en el comportamiento dinámico del macizo

rocoso, evidenciada por la reducción de vibraciones, la minimización de la zona de daño y la mejora en la fragmentación de la roca. A continuación, se detallan los aspectos más resaltantes:

4.1.2.1. Control de vibraciones y ondas de esfuerzo

- **Reducción de la *peak particle velocity* (PPV):**

La versatilidad en el uso de detonadores electrónicos ha permitido tomar el control en la secuencia de iniciación y tiempos de retardo. En las voladuras masivas, es de suma importancia la reducción de la *peak particle velocity* (PPV), esto básicamente por el gran volumen de explosivos que se detonan en cada voladura. El enfoque para la reducción de estos valores es manipular la carga operante. En este caso de estudio, se ha trabajado con taladros de rotura con una carga operante de 90 kg/retardo y para taladros de control, 35 kg/retardo.

Dichas voladuras, ejecutadas con detonadores electrónicos, han sido analizadas con equipos de monitoreo de vibraciones de última generación, como los sismógrafos Instantel Minimate Pro. Estos instrumentos de medición permiten obtener información como la *peak particle velocity* (PPV).

Analizando el sismograma de una voladura ejecutada con detonadores electrónicos, se observa una diferencia en los resultados respecto a la PPV obtenida. Dichos resultados son directamente proporcionales a la carga operante. Los valores obtenidos en las pruebas realizadas en el sitio a 40 metros de la voladura:

En los taladros de rotura cuya carga operante es de 90 kg/retardo, obtienen una PPV promedio de 79.77 mm/s. Por otro lado, en los taladros de control con carga operante de 35 kg/retardo, se obtiene una PPV promedio de 31.24 mm/s.

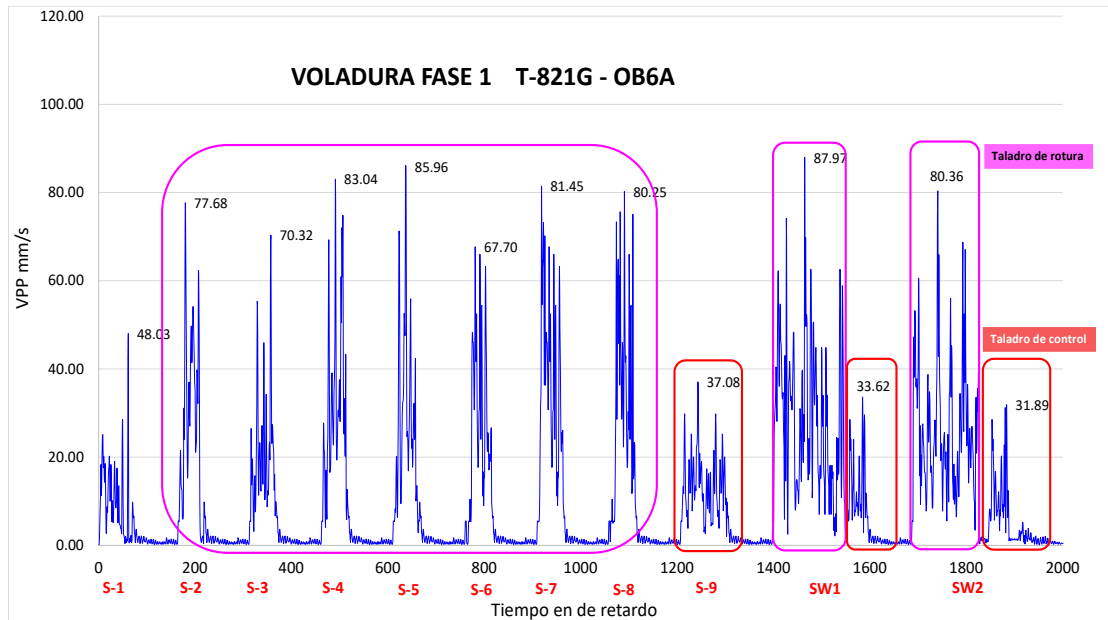


Figura 39: Sismograma de voladura con detonadores electrónicos – Fase 1

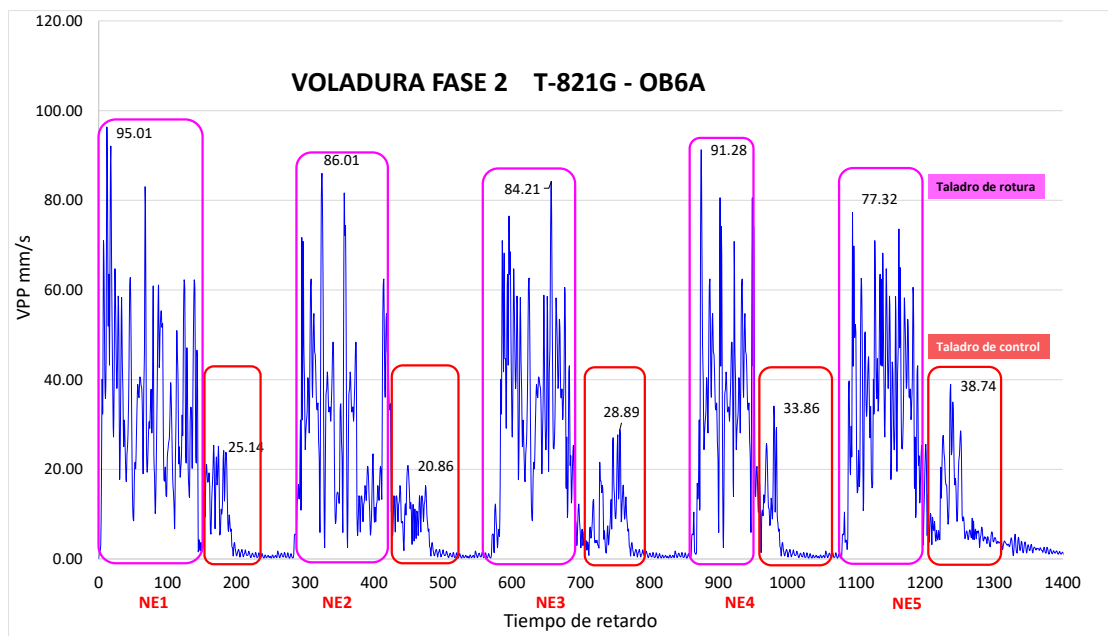


Figura 40: Sismograma de voladura con detonadores electrónicos – Fase 2.

Tabla 20. Resultados de la VPP obtenidos en taladros de rotura

VPP TALADROS DE ROTURA				
Taladros	Carga operante (kg/ret)	Tiempo de retardo (ms)	PPV (mm/s)	Distancia (m)
SLOT 1	90	63	48.03	40
SLOT 2	90	177	77.68	40
SLOT 3	90	361	70.32	40
SLOT 4	90	489	83.04	40
SLOT 5	90	638	85.96	40

SLOT 6	90	787	67.70	40
SLOT 7	90	915	81.45	40
SLOT 8	90	1092	80.25	40
SW 1	90	1467	87.97	40
SW 2	90	1742	80.36	40
NE 1	90	98	95.01	40
NE 2	90	359	86.01	40
NE 3	90	648	84.21	40
NE 4	90	867	91.28	40
NE 5	90	1093	77.32	40
Promedio			79.77	

Tabla 21. Resultados de la VPP obtenidos en taladros de control

VPP TALADROS DE CONTROL				
Taladros	Carga operante (kg/ret)	Tiempo de retardo (ms)	PPV (mm/s)	Distancia (m)
SLOT	35	1248	37.08	40
SW 1	35	1586	33.62	40
SW 2	35	1882	31.89	40
NE 1	35	175	25.14	40
NE 2	35	478	20.68	40
NE 3	35	753	28.89	40
NE 4	35	979	33.86	40
NE 5	35	1205	38.74	40
Promedio			31.24	

4.1.2.2. Reducción del daño al macizo rocoso remanente

- **Estudio de vibraciones campo lejano (Devine):**

El objetivo del monitoreo es medir y registrar la vibración de las partículas que conforman el macizo rocoso producto de las voladuras. La velocidad pico de partícula “VPP” (peak particle velocity – PPV) está considerada como el indicador más fiable y representativo para predecir el nivel de vibraciones generado por una voladura.

Para realizar una correcta toma de datos se debe tener en cuenta las tres variables principales que determinan cualquier estudio de vibraciones, la Q (carga operante), la D (distancia comprendida entre el disparo y el punto de monitoreo) y la PPV (velocidad pico partícula

medida por el sismógrafo). Estos parámetros han sido tomados en todos los disparos monitoreados.

- **Cálculo de la ley de atenuación del terreno**

Se realizará el cálculo de la predicción del nivel de velocidad pico partícula (PPV) inducido sobre la roca circundante por medio de la estimación de la ley de atenuación del terreno basada en el modelo de Devine (1962), United States Bureau of Mines (USBM), 1980.

En el monitoreo de vibraciones en 8 voladuras y con una recopilación de 34 datos registrados, se ha determinado mediante el Modelo de Devine. Al trazar la línea de tendencia de la distribución de los datos dispuestos sobre la gráfica de la velocidad pico partícula máxima (PPV_{máx}) respecto de la distancia escalar (DE), se obtiene la siguiente ley de atenuación:

$$PPV = K * (DE)^{\alpha}$$
$$PPV = K * \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{\alpha}$$

Dónde:

PPV: Velocidad pico-partícula máxima (mm/s).

DE: Distancia escalar cuadrática.

D: Distancia desde el frente de voladura (m).

Q: Carga máxima de explosivo por retardo (kg).

K: Factor de velocidad.

α : Factor de atenuación, valor comprendido entre 0,5 y 2.

Se tiene como datos de entrada del modelo el trio de valores (**PPVmax**, **Q**, **D**) obtenidos para cada uno de los 34 registros medidos en total. Los valores de **K** y **α** son estimados a partir de la realización de una regresión potencial para la representación gráfica de **PPV** respecto de **DE**.

- **Modelo de atenuación de taladro de rotura**

En la UM Cerro Lindo, específicamente en el T-821G – OB6A, entre el 23 de octubre de 2024 y el 05 de enero de 2025, se realizaron 13 registros de vibraciones generadas por voladuras. Con base en estos datos, se construyó un modelo de atenuación sísmica en taladros de rotura, con el objetivo de determinar dos parámetros fundamentales: el factor de amplitud (K) y el factor de atenuación (α). Estos parámetros son esenciales para estudios como la determinación de la carga operante, el valor máximo de la velocidad pico partícula (PPV_{máx}) y la predicción del daño inducido en el macizo rocoso.

Para ello, se utilizó instrumentación sismográfica, instalando geófonos a distintas distancias desde el frente de voladura. La distancia más cercana fue de 23 metros y la más alejada de 105 metros. A partir de estas mediciones se obtuvo la velocidad pico de partícula (VPP), registrándose valores máximos de 110.25 mm/s y mínimos de 5.55 mm/s. La carga explosiva empleada fue de 90 kg por retardo. Asimismo, se ha hallado la distancia escalar con el siguiente formulismo:

$$De = D/W^{1/2}$$

D = Distancia del geófono a la zona de voladura.

W = kg del explosivo máximo.

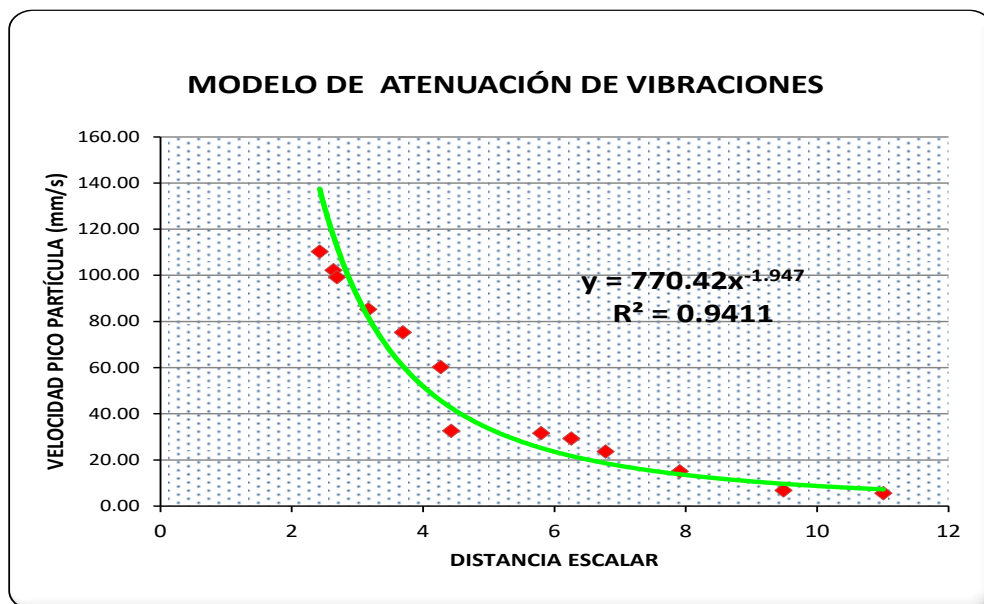


Figura 41. Modelo de atenuación de taladros de rotura tajo 821G-OB6A.

El diseño usual empleando detonadores electrónicos con una carga operante de 90 kg/retardo se obtiene el factor $K = 770.42$ y la constante de atenuación $(a) = -1.947$, para la evaluación de radio de daño en el contorno de la sección, con los valores obtenidos se procede a calcular la $PPV_{máx}$.

$$PPV_{máx} = 770.42 \left(\frac{40}{\sqrt{90}} \right)^{-1.947}$$

$$PPV_{máx} = 46.77 \text{ mm/s}$$

Tabla 22. Voladuras ejecutadas en taladros de rotura

				DEVINE		
				W (1/2)		
Datos de monitoreo		T - 821G - OB6A		Eje (x)	Eje (y)	OBSERVACIONES
Explosivos: Anfo, detonadores electrónicos		D (m)	W (Kg)	De = D/W ^{1/2}	VPP (mm/s)	
Disparo (Fecha)	Fila	Dist.Monitorio	(Peso max/retar)	Distancia escalar	Vel. Pico Partícula	
23/10/2024	SW1	23.00	90.00	2.42	110.25	Taladro de rotura
23/10/2024	SW1	25.00	90.00	2.64	102.14	Taladro de rotura
9/11/2024	SW2	25.50	90.00	2.69	99.18	Taladro de rotura
9/11/2024	SW2	30.00	90.00	3.16	85.22	Taladro de rotura
17/12/2024	NE1	35.00	90.00	3.69	75.20	Taladro de rotura
17/12/2024	NE1	40.50	90.00	4.27	60.22	Taladro de rotura
20/12/2024	NE2	42.00	90.00	4.43	32.56	Taladro de rotura
20/12/2024	NE2	55.00	90.00	5.80	31.54	Taladro de rotura
5/01/2025	NE3	60.00	92.00	6.26	29.20	Taladro de rotura
5/01/2025	NE3	65.00	92.00	6.78	23.56	Taladro de rotura
5/01/2025	NE4	75.00	90.00	7.91	14.98	Taladro de rotura
5/01/2025	NE4	90.00	90.00	9.49	6.73	Taladro de rotura
5/01/2025	NE5	105.00	91.00	11.01	5.55	Taladro de rotura

- **Modelo de atenuación de taladros de control**

En la UM Cerro Lindo, específicamente en el T-821G-OB6A, entre el 23 de octubre de 2024 y el 05 de enero de 2025, se tomaron 12 registros de vibraciones. Con base en estos datos, se construyó un modelo de atenuación en los taladros de control, con el objetivo de determinar el factor de amplitud (K) y el factor de atenuación (α), parámetros fundamentales para estudios como la determinación de la carga operante, el valor máximo de la velocidad pico de partícula (PPVmáx) y la predicción del daño al macizo rocoso. Para la obtención de los datos, se instalaron geófonos a distintas distancias, abarcando desde una distancia mínima de 22 metros hasta una máxima de 95 metros. A partir de estas mediciones sismográficas, se obtuvo la Velocidad Pico de Partícula (VPP) correspondiente a 12 registros de vibraciones en taladros de control, con un valor máximo de 36.45 mm/s y un mínimo de 2.22 mm/s. La cantidad de explosivos utilizada fue de 35 kg por retardo.

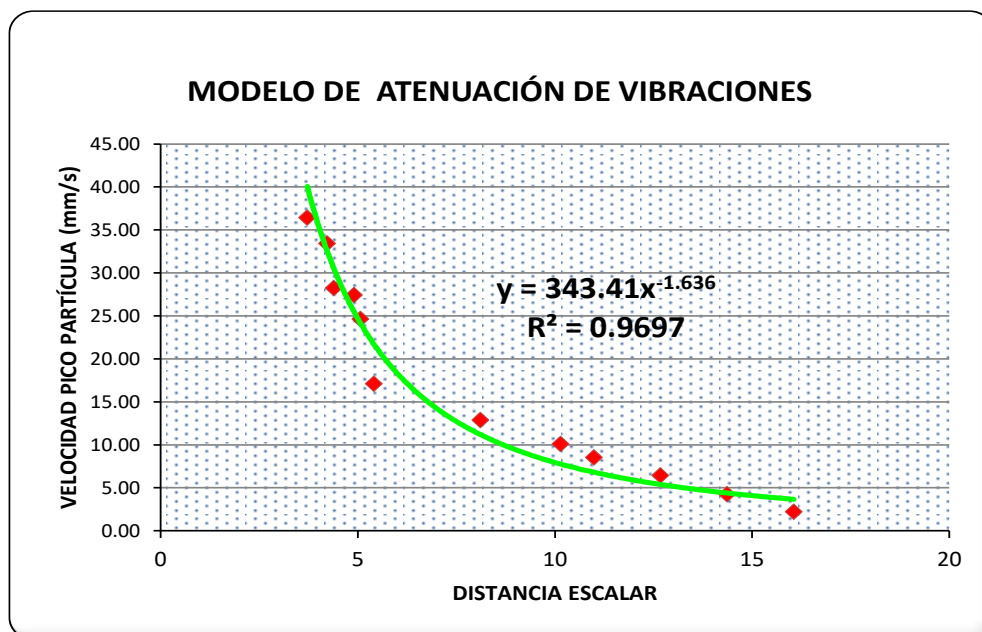


Figura 42: Modelo de atenuación en taladros de control bajo 821G-OB6A

El diseño usual empleando detonadores electrónicos con una carga operante de 35 kg/retardo se obtiene el factor $K = 343.41$ y la constante de atenuación $(a) = -1.636$, para la evaluación de radio de daño en el contorno de la sección y se calcula la $PPV_{m\acute{a}x}$.

$$PPV_{m\acute{a}x} = 343.41 \left(\frac{40}{\sqrt{35}} \right)^{-1.636}$$

$$PPV_{m\acute{a}x} = 15.06 \text{ mm/s}$$

Tabla 23. Voladuras ejecutadas en taladros de control

				DEVINE		
				W (1/2)		
Datos de monitoreo		T - 821G - OB6A		Eje (x)	Eje (y)	OBSERVACIONES
Explosivos: Anfo, detonadores electrónicos		D (m)	W (Kg)	De = D/W ^(1/2)	VPP (mm/s)	
Disparo (Fecha)	Fila	Dist.Monitoreo	(Peso max/retar)	Distancia escalar	Vel. Pico Particula	
23/10/2024	SW1	22.00	35.00	3.72	36.45	Taladro de control
23/10/2024	SW1	25.00	35.00	4.23	33.44	Taladro de control
9/11/2024	SW2	26.00	35.00	4.39	28.26	Taladro de control
9/11/2024	SW2	29.00	35.00	4.90	27.45	Taladro de control
17/12/2024	NE1	30.00	35.00	5.07	24.65	Taladro de control
17/12/2024	NE1	32.00	35.00	5.41	17.12	Taladro de control
20/12/2024	NE2	48.00	35.00	8.11	12.89	Taladro de control
20/12/2024	NE2	60.00	35.00	10.14	10.10	Taladro de control
5/01/2025	NE3	65.00	35.00	10.99	8.55	Taladro de control
5/01/2025	NE3	75.00	35.00	12.68	6.45	Taladro de control
5/01/2025	NE4	85.00	35.00	14.37	4.26	Taladro de control
5/01/2025	NE5	95.00	35.00	16.06	2.22	Taladro de control

- **Minimización del overbreak (%):**

Durante el proceso de reconciliación del tajo T-821G-OB6A, se evaluó el material minado fuera del diseño (overbreak) mediante los levantamientos topográficos 3D y el procesamiento de sólidos utilizando el software Deswik CAD. Se obtuvo una dilución controlada del 13 %, resultado de los controles implementados en el proceso de voladura. Este nivel de dilución, dentro de lo planeado, evidencia que las estrategias de control fueron efectivas, permitiendo mantener leyes de mineral por encima del *cut-off*, lo que garantiza un mineral más selectivo y contribuye a mejorar la rentabilidad en el proceso de beneficio. El levantamiento topográfico confirma que se respetaron tanto el diseño de malla como los límites de contorno planificados, minimizando la generación de material estéril y maximizando la recuperación de mineral útil.

El principal factor que permitió este control fue la reducción de la carga operante a 35 kg/retardo, lo que ocasionó una disminución de la velocidad pico de partícula (VPP), reduciendo el nivel de daño en la roca remanente y logrando una fragmentación más controlada. Esta medida fue determinante para preservar la estabilidad de la roca encajonante, reducir el *overbreak* y limitar el porcentaje de dilución operativa. De esta manera, se consolidó una operación de minado más eficiente, alineada con los parámetros de diseño y los objetivos de recuperación establecidos para el tajo.

Para la programación de los retardos se empleó el dispositivo Logger II, el cual permite leer y escribir el código de identificación único de cada detonador, verificar su estado y asignar los tiempos de retardo de forma individual. Se utilizaron tres intervalos clave: 7 milisegundos (ms) entre dos detonadores colocados en un mismo taladro; 14 ms entre taladro y taladro; y 100 ms entre filas.

En los taladros de rotura, donde la carga operante superó los 90 kg por retardo, se colocaron dos detonadores con un intervalo de 7 ms entre ellos. Para evitar que ambos se activen simultáneamente, se intercaló un deck de arena de 0.50 m entre las cargas. En el caso de los taladros de control, cuya carga operante fue de 35 kg por retardo, se instalaron hasta cuatro detonadores con el objetivo de optimizar el control de vibraciones en los taladros de rotura y taladros de control, tal cual se muestra en la figura 43.

- a) Fase 1: Voladura del Slot A, B, C y filas SW1 y SW2. Los tiempos de retardo variaron entre 0 ms y 1889 ms.

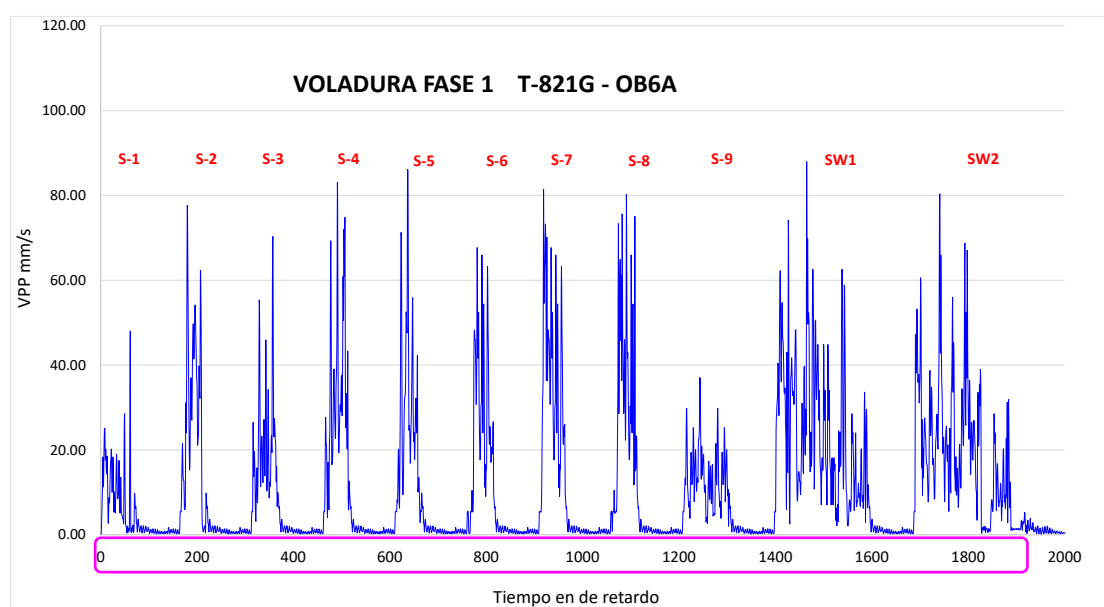


Figura 44. VPP vs tiempos de retardo en voladura fase 1 - tajo 821G-OB6A

- b) Fase 2: Voladura de las Filas NE1, NE2, NE3, NE4 y NE5. Los tiempos de retardo variaron entre 0 ms y 1889 ms.

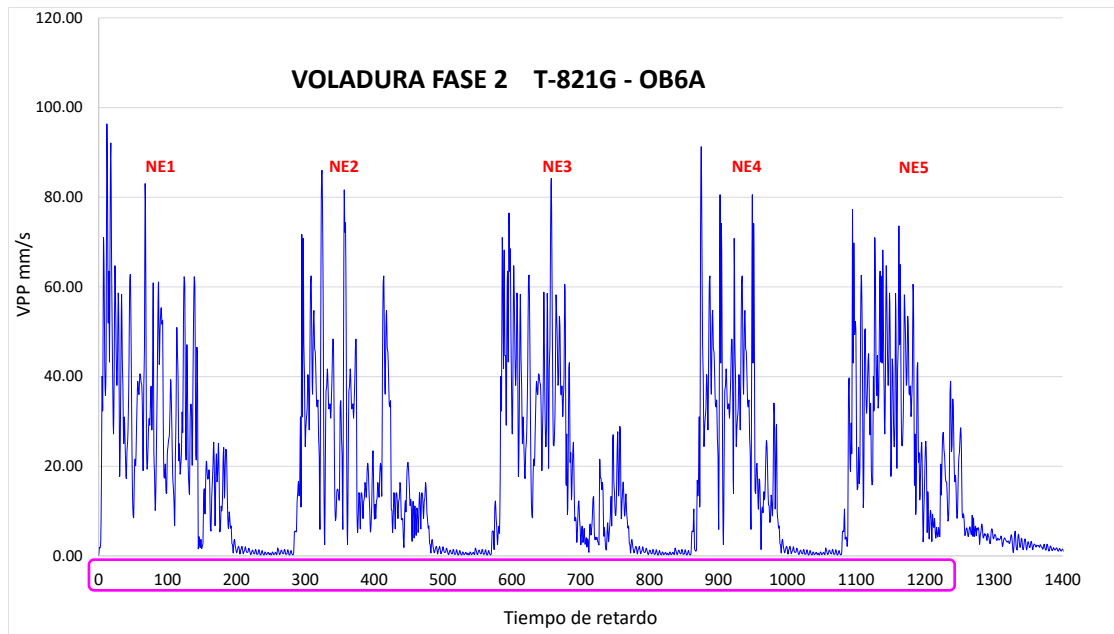


Figura 45. VPP vs tiempos de retardo en voladura fase 2 - tajo 821G-OB6A.

TIEMPOS DE RETARDO, SECUENCIA DE INICIACIÓN Y DISEÑO DE CARGA

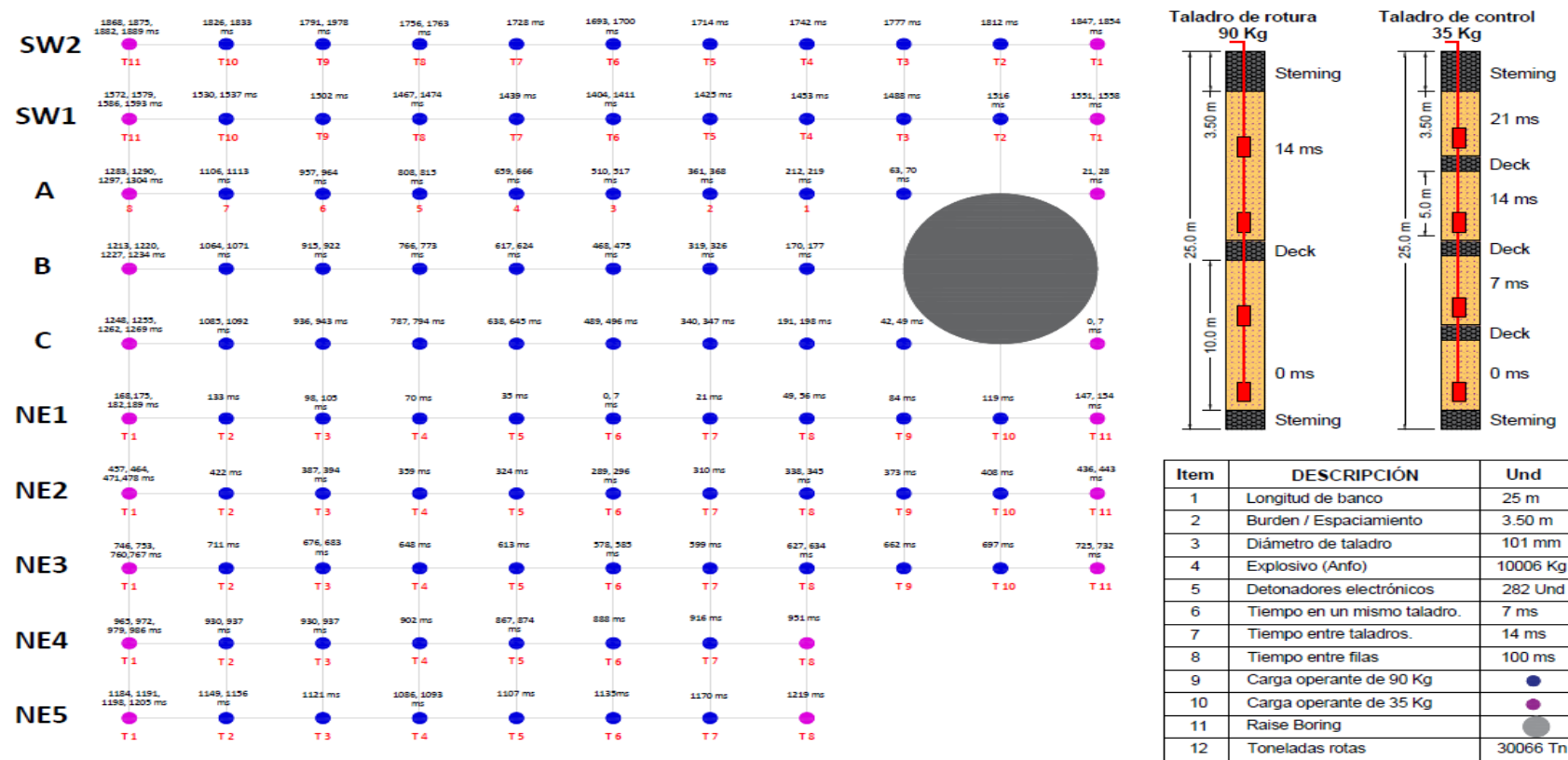


Figura 46. Detalle de tiempos de retardo, secuencia de iniciación y diseño de carga en el tajo 821G-OB6A

4.1.4. Niveles de fragmentación de la roca

La curva de fragmentación o curva de distribución granulométrica es una herramienta esencial para evaluar el resultado de una voladura, ya que permite cuantificar el tamaño y la distribución de los fragmentos generados. Estos datos son fundamentales para analizar la eficiencia del diseño de voladura y su impacto en las etapas posteriores del proceso minero, como la carga, el transporte, la trituración y la molienda.

En este estudio, se empleó el software Split-Desktop para realizar un análisis granulométrico preciso del material volado, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes que permiten identificar y medir los fragmentos visibles en fotografías tomadas en campo. Se monitorearon ocho disparos correspondientes a voladuras masivas, todas ejecutadas con detonadores electrónicos, los cuales ofrecen un control milimétrico de los tiempos de retardo, optimizando la secuencia de iniciación y mejorando la fragmentación. Uno de los principales logros fue la reducción del P80 de 15 a 10.86 pulgadas (27.58 cm), cumpliendo con el requerimiento de la planta que es de 30 cm.

Los resultados obtenidos a través del análisis con Split-Desktop mostraron una distribución más uniforme del tamaño de los fragmentos y una notable disminución de sobre tamaños. Esto confirma la aplicación de detonadores electrónicos con una correcta secuencia y temporización ayuda a optimizar proceso integral, beneficiando operaciones clave como el chancado primario, el transporte y la eficiencia energética del sistema global de producción.

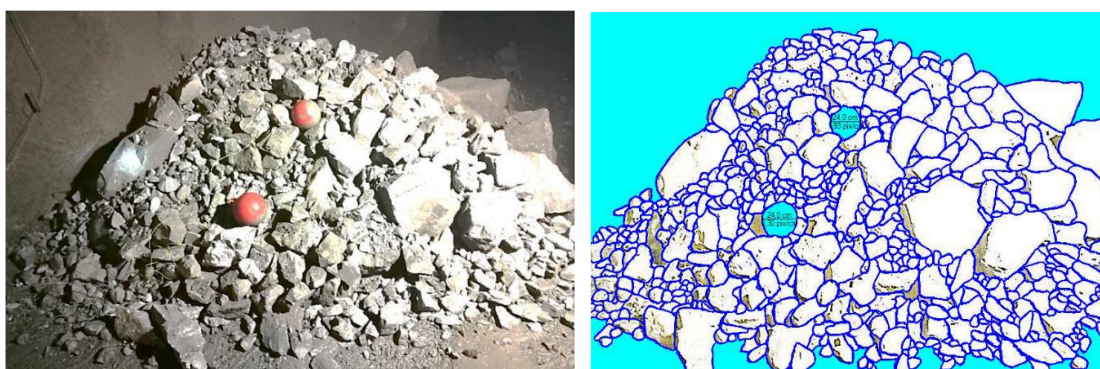


Figura 47. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop tajo 821G-OB6A

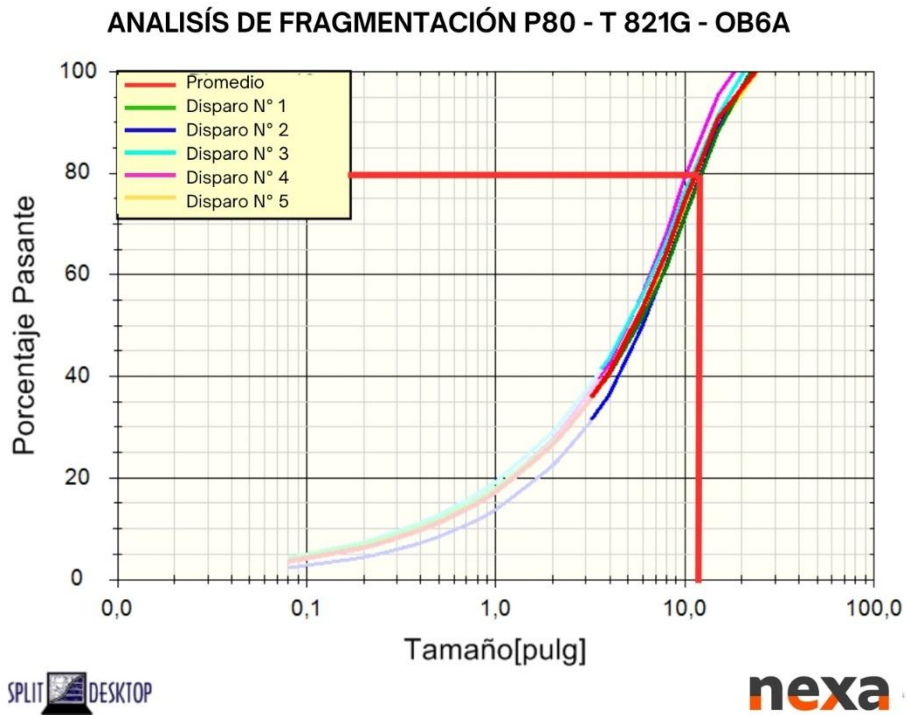


Figura 48. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop – Disparos 1, 2, 3, 4 y 5

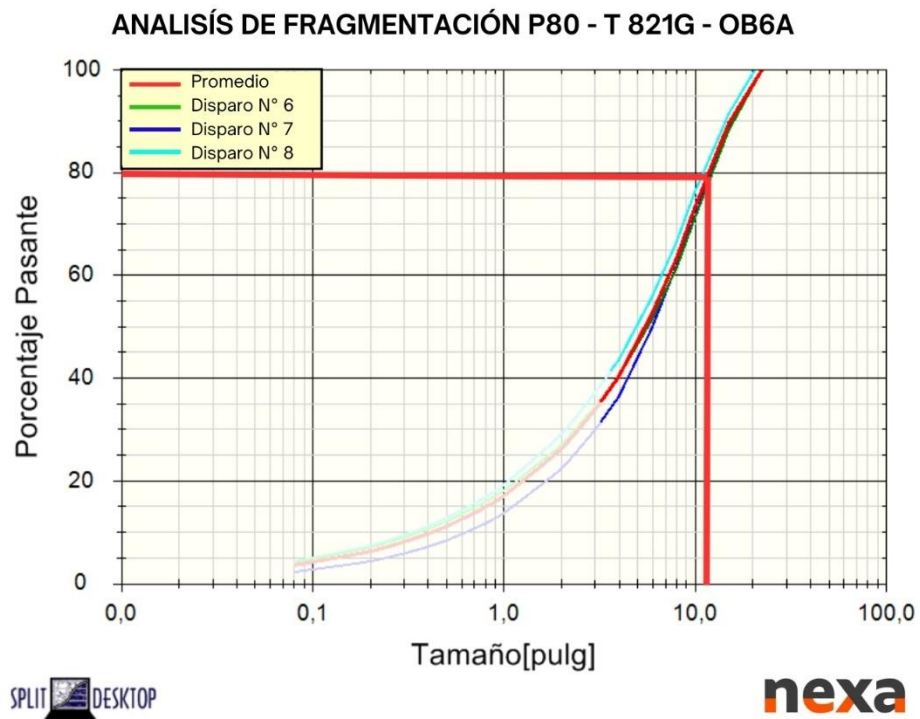


Figura 49. Análisis de la fragmentación con Split-Desktop – Disparos 6, 7 y 8

Tabla 24. Resultados de la granulometría obtenida con detonadores electrónicos

% Pasante	Promedio (Pulg)	Disparo 1 (pulg)	Disparo 2 (pulg)	Disparo 3 (pulg)	Disparo 4 (pulg)	Disparo 5 (pulg)	Disparo 6 (pulg)	Disparo 7 (pulg)	Disparo 8 (pulg)
F10	0.40	0.37	0.35	0.31	0.44	0.39	0.38	0.55	0.42
F20	1.29	1.18	1.62	1.15	1.2	1.29	1.16	1.52	1.22
F30	2.54	2.38	3.01	2.11	2.27	2.45	2.28	3.25	2.53
F40	3.96	3.99	4.57	3.44	3.5	3.79	4.22	4.55	3.61
F50	5.37	5.5	5.58	5.07	5.13	5.29	5.78	5.35	5.28
F60	7.15	7.72	7.69	6.81	6.67	6.56	7.12	7.88	6.75
F70	7.98	8.82	8.74	7.82	7.56	7.34	8.32	7.61	7.66
F80	10.86	10.18	10.33	10.82	10.38	12.14	11.36	11.25	10.44
F90	14.22	14.19	14.44	14.41	13.55	14.65	14.25	13.82	14.41
Topsite (99.95%)	20.40	20.32	20.4	20.52	18.31	22.07	20.45	20.75	20.36

Las curvas generadas no evidencian un grado de uniformidad adecuado, lo que indica la ausencia de un tamaño predominante de fragmento. Por el contrario, se observa una distribución heterogénea, con fragmentos que varían significativamente en tamaño, desde grandes hasta pequeños.

En cuanto a los indicadores clave de monitoreo (KPI's), el valor promedio del P80 es de 10.86" (27.58 cm), mientras que el P50 alcanza los 5.37" (13.64 cm).

Por otro lado, la variabilidad entre los KPI's es reducida. Por ejemplo, el P80 fluctúa en un rango estrecho, desde 10.18" (25.86 cm) hasta 12.14" (30.83 cm).

4.1.5. Modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso

4.1.5.1. Cálculo de la velocidad pico partícula crítica (PPVc) de la roca

Para desarrollar un modelo predictivo confiable del comportamiento dinámico del macizo rocoso ante eventos de voladura, es esencial determinar la velocidad pico de partícula crítica (PPVc). Este parámetro representa el umbral máximo de velocidad de vibración a partir del cual la roca inicia un proceso de daño estructural interno, manifestado en la creación de nuevas fracturas o la propagación de fracturas preexistentes.

Para su determinación, se utiliza el criterio de daño de Holmberg & Persson, que vincula las propiedades mecánicas de la roca. Esta metodología permite estimar con mayor precisión el umbral de daño, optimizando así los diseños de voladura y reduciendo el impacto sobre las estructuras cercanas.

$$PPV_c = \frac{\sigma_t \cdot V_P}{E_i} \approx \frac{0.1 \cdot \sigma_c \cdot V_P}{E_i}$$

Dónde:

PPV_c: Velocidad Pico Partícula crítica (mm/s).

σ_t: Resistencia a la tracción (MPa).

σ_c: Resistencia a la compresión uniaxial (MPa).

VP: Velocidad de propagación de la onda P (m/s).

E_i: Módulo de elasticidad de la roca intacta (GPa).

Según datos geomecánicos proporcionados por el Área de Geomecánica se tiene lo siguiente:

Tabla 25. Parámetros geomecánicos de la roca

Parámetros geomecánicos	RMR	60
	Resistencia a la compresión (MPa)	100
	Resistencia a la tracción (MPa)	15
	Módulo de Young (GPa)	12

Tomada del Área de Geomecánica – UM Cerro Lindo. 2025.

Q – Índice de calidad de Bieniawski (1979):

$$RMR = 9 \times \ln Q + 44$$

$$Q = \exp (60 - 44)/9) = 5.92$$

V_p - Velocidad de propagación de la onda P:

$$V_p = 3500 + 1000 \times \log (5.92) = 4272.32 \text{ m/s}$$

PPV_c – Velocidad Pico Partícula Crítica:

$$PPV_c = \frac{15 \times 4272.32}{12} = 5340 \text{ mm/s}$$

Dentro del criterio de daño de Holmberg & Persson, se define que el macizo rocoso sometido a un pulso vibratorio equivalente a:

Un cuarto del valor de la velocidad crítica (**1/4 x PPV_c**), la roca circundante al disparo experimenta la extensión y abertura de sus fracturas preexistentes.

Al valor de la velocidad crítica (**PPV_c**), la roca contigua a la voladura experimenta la creación de nuevas fracturas en su composición interna.

Cuatro veces el valor de la velocidad crítica ($4 \times PPV_c$), la roca adyacente al disparo experimenta un intenso fracturamiento.

En base a lo expuesto, para el caso del tajo 821G – OB6A se tendría lo siguiente para el tipo de zona:

Tabla 26. Criterio de daño según Holmberg & Persson

Tipo de zona	Descripción del daño	PPV crítico	
$PPV_c < \text{Zona 1} < 4 PPV_c$	Intenso fracturamiento.	21,362	mm/s
$PPV_c/4 < \text{Zona 2} \leq PPV_c$	Creación de nuevas fracturas.	5,340	mm/s
$\text{Zona 3} < PPV_c/4$	Leve propagación fracturas pre – existentes.	1,335	mm/s

4.1.5.2. Predicción de daño al macizo rocoso circundante en taladros de rotura

En el primer caso de estudio es referido a la predicción de daño al macizo rocoso en los taladros de producción y/o rotura. Con el modelo de atenuación construido se ha encontrado valores como el factor de amplitud (K) 770.42 y el factor de atenuación (α) -1.947.

A partir de ello, se ha calculado la carga operante máxima por retardo cuyo valor es de 90 kg explosivo/retardo, posterior a ello, con los parámetros geomecánicos de la roca se ha calculado la Velocidad Pico de Partícula crítica ($PPV_{\text{crítico}}$) cuyo valor es 5,340 mm/s que significa el punto de creación de nuevas fracturas, este valor nos servirá como umbral de daño, cuyo valor limite es la generación de nuevas fracturas.

Se construye un modelo predictivo donde demuestra la creación de nuevas fracturas se da a una distancia de 3.50 m lo que significa que la cantidad de explosivos máximo por retardo es de 90 kg, a partir de ello se empleará otro retardo de omitirse ello se estaría comprometiendo la estabilidad de las labores y la sobredilución del mineral.

TIPO DE ROCA	VOLCÁNICA
RMR	60
GSI	55
EXPLOSIVO	Anfo
K	770.4
Alfa	-1.947
Q (Kg)	90.00
Dist. (m)	VPP (mm/s)
0.80	95031
0.90	75557
1.00	61544
1.10	51120
1.20	43154
1.30	36926
1.40	31965
1.50	27947
1.60	24647
1.70	21903
1.80	19596
1.90	17638
2.00	15962
2.50	10337
3.00	7248
3.50	5369
4.00	4140
5.00	2681
6.00	1880
7.00	1392
8.00	1074
9.00	854
10.00	695
20.00	180
30.00	82

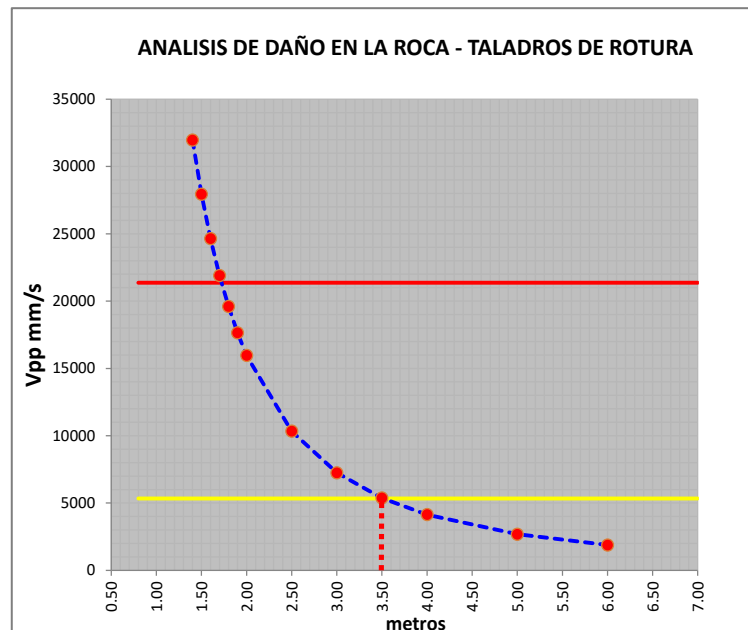


Figura 50: Modelo predictivo de daño al macizo rocoso en taladros de rotura Tajo 821G-OB6A

El segundo caso de estudio es referido a la predicción de daño al macizo rocoso en los taladros de control ubicados en la caja piso y la caja techo. Con el modelo de atenuación construido se ha encontrado valores como el factor de amplitud (K) 343.41 y el factor de atenuación (α) -1.636 a partir de ello se ha calculado la carga operante máxima por retardo cuyo valor es de 35 kg explosivo/retardo, posterior a ello, con los parámetros geomecánicos de la roca se ha calculado la velocidad pico de partícula crítico (PPVcrítico) cuyo valor es 5,340 mm/s que significa el punto de creación de nuevas fracturas. Este valor nos servirá como umbral de daño, cuyo valor limite es la generación de nuevas fracturas.

El modelo demuestra que la creación de nuevas fracturas se da a una distancia de 1.10 m, en taladros de control, de incrementarse la cantidad de explosivos por retardo la distancia de creación de nuevas fracturas se incrementaría lo cual impacta directamente en la estabilidad de del tajo.

TIPO DE ROCA	VOLCÁNICA
RMR	60
GSI	55
EXPLOSIVO	Anfo
K	343.4
Alfa	-1.636

Q (Kg)	35.00
Dist. (m)	VPP (mm/s)
0.20	87574
0.30	45112
0.40	28177
0.50	19559
0.60	14515
0.70	11279
0.80	9066
0.90	7477
1.00	6293
1.10	5384
1.20	4670
1.30	4097
1.40	3629
1.50	3242
1.60	2917
1.70	2641
1.80	2406
1.90	2202
2.00	2025
2.50	1405
3.00	1043
4.00	651
5.00	452
6.00	336
7.00	261

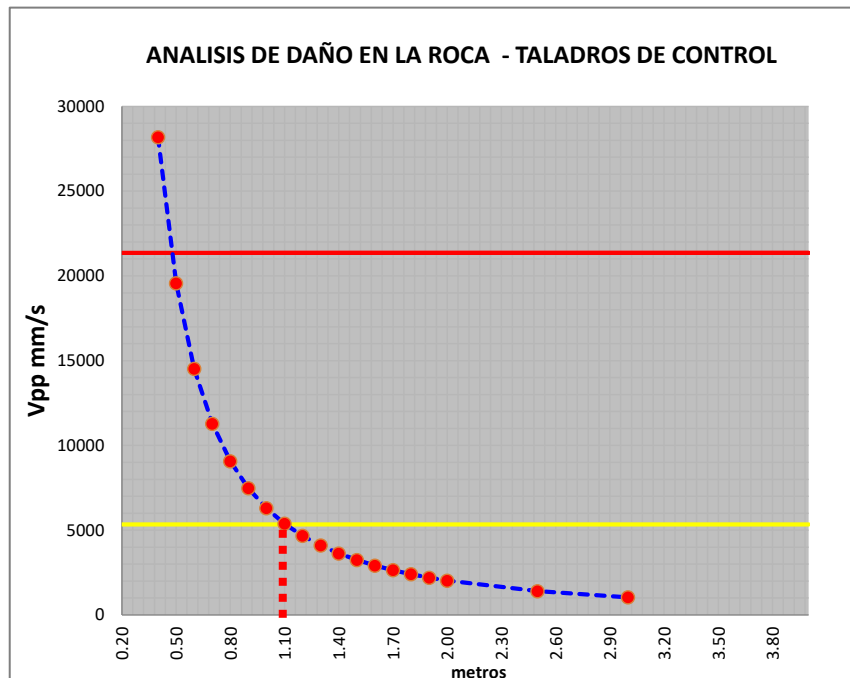


Figura 51. Modelo predictivo de daño al macizo rocoso en taladros de control Tajo 821G-OB6A

4.2. Discusión de resultados

Acerca del objetivo general: evaluar el grado de influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo 2025, los resultados obtenidos demuestran una influencia positiva y favorable en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, evidenciada por la reducción de vibraciones, la minimización de la zona de daño y la mejora en la fragmentación de la roca; datos que al ser comparados con lo encontrado por Ninaja (7) en su tesis titulada: «Implementación de detonadores electrónicos en la voladura para optimizar los costos unitarios en las operaciones de Mina Toquepala», quien concluyó que el uso de detonadores electrónicos en voladuras presenta ventajas significativas en comparación con los detonadores pirotécnicos, ya que reduce la fragmentación en un 11,14 % lo que disminuye la presencia de bolonería en un 36,99 %; además, reduce la vibración de las voladuras en un 14,05%. Con estos resultados se afirma que, el uso de detonadores electrónicos en voladuras masivas influye significativamente en el comportamiento dinámico del macizo rocoso.

Con respecto al objetivo específico 1: determinar en qué medida el uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización influye en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, los resultados obtenidos demuestran que la secuencia y sincronización de la voladura a través de 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. Asimismo, se observa una clara

correlación entre la carga operante por retardo y las vibraciones generadas en los taladros de rotura y en los taladros de control, datos que al ser contrastados con lo encontrado por Alvis (10) en su tesis titulada: «Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema de voladura electrónica Fametronic en la Unidad Minera Tacaza – Lampa – Puno» quien concluyó que el sistema de voladura electrónica ofrece ventajas significativas en comparación con el sistema de voladura no eléctrica convencional al proporcionar una mayor precisión en los tiempos de retardo y una dispersión casi nula, además permite optimizar la secuencia de salida de los taladros, lo que se traduce en una mejora notable en la fragmentación de la roca, una reducción en el consumo de explosivos y una disminución de los costos de voladura. Con estos resultados se afirma que, el empleo de detonadores electrónicos, implementados bajo una secuencia y sincronización optimizada, genera una influencia significativa en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, manifestándose en una reducción de la velocidad pico de partícula (PPV), una fragmentación más homogénea del material y una mayor estabilidad de las estructuras circundantes.

En relación con el objetivo específico 2: evaluar los efectos que produce la voladura masiva con detonadores electrónicos en la fragmentación de las rocas y comportamiento dinámico del macizo rocoso, los resultados obtenidos evidencian una optimización significativa en la fragmentación del macizo rocoso, evidenciada por una reducción sustancial del valor de P80 de 18 a 10.86 pulgadas que permite cumplir con los requerimientos granulométricos de la planta y la faja transportadora (30 cm), y la reducción de la generación de bancos producto de la inestabilidad de la roca encajonante; datos que al ser comparados con lo encontrado por Quispe (9) en su tesis titulada: «Influencia de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de voladura en la unidad minera Cerro Corona - Cajamarca, 2019», quien concluyó que la implementación de detonadores electrónicos influye notablemente en la mejora del proceso de voladura en la Unidad Minera Cerro Corona, ya que, inciden significativamente en la fragmentación de la roca reduciendo el tamaño del P80 de 8,74” a 2,96”, lo cual cumple con los estándares requeridos por la empresa. Con estos resultados se afirma que, la voladura masiva con detonadores electrónicos produce efectos positivos en la fragmentación de las rocas y el comportamiento dinámico del macizo rocoso.

Con respecto al objetivo específico 3: establecer de qué manera pueden integrarse los datos obtenidos de las voladuras masivas con detonadores electrónicos en modelos predictivos que evalúen el comportamiento dinámico del macizo rocoso, los resultados obtenidos corroboran que el desarrollo de un modelo predictivo basado en datos de voladuras masivas con detonadores electrónicos proporciona una evaluación precisa del comportamiento dinámico del macizo rocoso y permite anticipar con mayor certeza el intenso fracturamiento, la creación de

nuevas fracturas y la propagación de fracturas preexistentes, facilitando el ajuste de la carga operante, los tiempos de retardo y la secuencia de iniciación, datos que al ser comparados con lo encontrado por Díaz B. (6) en su tesis titulada: «Predicción de vibraciones producidas por tronaduras mediante redes neuronales artificiales», quien concluyó que la predicción del comportamiento dinámico del macizo rocoso permite modelar relaciones no lineales y complejas entre los parámetros de las voladuras y las vibraciones resultantes a través del ajuste de los tiempos de retardo y la secuencia de detonación. Con estos resultados se afirma que, los datos obtenidos en las voladuras masivas con detonadores electrónicos pueden integrarse eficazmente en modelos predictivos que evalúen el comportamiento dinámico del macizo rocoso.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se demostró que los resultados obtenidos en las voladuras masivas del tajo 821G-OB6A influyen significativamente en el comportamiento dinámico del macizo rocoso. En ese sentido, la disminución de las vibraciones (VPP), la minimización del daño en el entorno circundante y la optimización de la fragmentación de la roca, corroborados por el análisis de vibraciones en campo lejano y la evaluación fotográfica posvoladura, establecen a los detonadores electrónicos como una solución superior a los pirotécnicos convencionales para este tipo de operaciones.
- 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%.
- Se evidenció una optimización significativa en la fragmentación del macizo rocoso, evidenciada por una reducción sustancial del valor de P80 de 18 a 10.86 pulgadas, el cual permite cumplir con los requerimientos granulométricos de la planta y la faja transportadora

(30 cm). El análisis mediante el software Split-Desktop confirmó una distribución más uniforme del tamaño de los fragmentos y una disminución de material sobredimensionado. Adicionalmente, el control preciso de la secuencia y temporización inherente a los detonadores electrónicos contribuyó a un mejor control del comportamiento dinámico del macizo rocoso, reduciendo efectos indeseados como la generación de bancos producto de la inestabilidad de la roca encajonante. En conjunto, estos resultados no solo aseguran una fragmentación óptima, sino que también impulsan la eficiencia de las etapas posteriores como el chancado primario, el transporte del material y la eficiencia energética de todo el sistema de producción.

- Se corroboró que el desarrollo de un modelo predictivo basado en datos de voladuras masivas con detonadores electrónicos proporciona una evaluación precisa del comportamiento dinámico del macizo rocoso. Al integrar la velocidad pico de partícula crítica (PPV crítica) de 5340 mm/s como umbral de fractura, el modelo arrojó parámetros de atenuación específicos para dos configuraciones de carga: con 90 kg/retardo ($K=770.42$, $\alpha=-1.947$, radio de daño = 3.50 m) y con 35 kg/retardo ($K=343.41$, $\alpha=-1.636$, radio de daño = 1.10 m). La capacidad predictiva de este modelo permite anticipar con mayor certeza el intenso fracturamiento, la creación de nuevas fracturas y la propagación de fracturas preexistentes, facilitando el ajuste de la carga operante, los tiempos de retardo y la secuencia de iniciación. En última instancia, su aplicación conduce a una mejora significativa en la estabilidad del macizo rocoso y a una reducción sustancial de los impactos geomecánicos adversos en el entorno.

5.2. Recomendaciones

- Tras haberse constatado los resultados favorables alcanzados en las voladuras masivas del tajo 821G-OB6A, se recomienda la adopción continua y preferente de detonadores electrónicos sobre los pirotécnicos convencionales. Asimismo, mantener y mejorar los parámetros de monitoreo de vibraciones en campo lejano y la evaluación fotográfica post voladura como herramientas esenciales para la verificación continua de la optimización de la fragmentación y la minimización del impacto dinámico en el macizo rocoso circundante.
- Dado que se comprobó la influencia positiva de la secuencia y sincronización de la voladura mediante detonadores electrónicos y retardos específicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, se recomienda mantener y optimizar estos parámetros de diseño (retardos de 7 ms, 14 ms y 100 ms). Asimismo, continuar con la diferenciación de la carga operante por retardo entre los taladros de rotura y control (manteniendo aproximadamente 90

kg/retardo y 35 kg/retardo respectivamente) para seguir minimizando las vibraciones generadas en el entorno circundante.

- Considerando la optimización significativa en la fragmentación lograda mediante el uso de detonadores electrónicos, evidenciada en la reducción del P80 y la mejora en la distribución del tamaño de fragmentos, se recomienda mantener la implementación de esta tecnología y los parámetros de diseño de voladura asociados. Además, se recomienda continuar utilizando el software Split-Desktop para el análisis post voladura, permitiendo así un monitoreo constante de la calidad de la fragmentación y la identificación de posibles ajustes para mejorar aún más los resultados.
- Habiéndose corroborado la precisión del modelo predictivo basado en datos de voladuras con detonadores electrónicos para evaluar el comportamiento dinámico del macizo rocoso, se recomienda su implementación sistemática para la planificación de futuras voladuras. En ese sentido, es crucial continuar alimentando y actualizando el modelo con datos de cada nueva voladura para refinar sus parámetros de atenuación (K y α) y su umbral de fractura (PPV crítica). Asimismo, se recomienda optimizar las capacidades predictivas del modelo para anticipar el fracturamiento inducido, la generación y propagación de fracturas, y así ajustar proactivamente la carga operante, los tiempos de retardo y la secuencia de iniciación. Finalmente, se recomienda integrar las predicciones del modelo en los protocolos de diseño de voladura para optimizar la estabilidad del macizo rocoso y minimizar los impactos geomecánicos adversos, utilizando los radios de daño estimados (3.50 m para 90 kg/retardo y 1.10 m para 35 kg/retardo) como guías para la definición de zonas de exclusión y la evaluación de riesgos potenciales.
- A partir de los resultados generales obtenidos, se recomienda capacitar y entrenar al personal operativo y de supervisión, mediante programas de capacitación y entrenamiento exhaustivos. Es fundamental que el equipo ejecutor domine el control de la carga operante, la secuencia de iniciación y la temporización precisa inherentes al uso efectivo de los detonadores electrónicos. De igual manera, se requiere que el personal de supervisión desarrolle la capacidad de analizar e interpretar los datos emanados del monitoreo de vibraciones y del análisis granulométrico (P80), permitiendo una toma de decisiones acertada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DÍAZ, M. Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres. Tesis (Título de Ingeniero Civil de Minas). Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2021. 98 pp. [fecha de consulta: 02 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180035>.
2. BÁEZ, Á. Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones de tronadura frente a cambios en el burden, el espaciamiento y tipo de explosivo: Aplicación a fases 7 y 10 en minería Los Pelambres. Tesis (Título de Ingeniero Civil de Minas). Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2021. 91 pp. [fecha de consulta: 01 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180438>.
3. MUÑOZ, M. Simulación de explosiones y voladuras mediante una formulación acoplada del método de los elementos finitos y el método de los elementos discretos. Tesis (Máster en Ingeniería del Terreno y Minas). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. 2020. 144 pp. [fecha de consulta: 01 de mayo de 2025]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357199/Simulaci%F3n%20de%20explosiones%20y%20voladuras%20mediante%20una%20formulaci%F3n%20acoplada%20del%20m%20E9todo%20de%20los%20elementos%20finitos%20y%20el%20m%20E9todo%20de%20los%20elementos%20discretos.pdf;jsessionid=D069F6EDEE7E83C9317195646AAD24AB?sequence=1>.
4. DE COSPEDAL, J. Utilización de la medida de vibraciones en voladura para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental. Tesis (Doctorado en Ingeniería Minera y Civil). Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2019. 207 pp. [fecha de consulta: 30 de abril de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10317/7809>.
5. GALLARDO, P. Propuesta de diseño de diagrama de tronadura en avance de túneles en Mina Paraíso, verificando bajo nivel de vibraciones. Tesis (Título de Ingeniero Civil en Minas). Chile: Universidad Andrés Bello, 2020. 109 pp. [fecha de consulta: 01 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/c6d81239-1ad7-4e45-a386-3b3451b280a1/content>.

6. DÍAZ, R. Predicción de vibraciones producidas por tronaduras mediante redes neuronales artificiales. Tesis (Título de Ingeniero Civil de Minas). Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2024. 78 pp. [fecha de consulta: 02 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203059>.
7. NINAJA, E. Implementación de detonadores electrónicos en la voladura para optimizar los costos unitarios en las operaciones de Mina Toquepala. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2022. 200 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/4667>.
8. CONTRERAS, W. Implementación del sistema electrónico de voladura para mejorar la dilución, sobre excavación, avance por disparo y flujo económico en labores horizontales en minería subterránea. Tesis (Maestro en Gestión Minera). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2023. 150 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14076/26914>.
9. QUISPE, M. Influencia de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de voladura en la unidad minera Cerro Corona - Cajamarca, 2019. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Abancay: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, 2023. 121 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1309>.
10. ALVIS, E. Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema de voladura electrónica Fametronic en la Unidad Minera Tacaza – Lampa – Puno. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2024. 119 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12918/9338>.
11. RUIZ, W. Aplicación del Sistema de Iniciación Electrónica para la mitigación de efectos adversos de voladuras controladas en zona urbana – Terminal Multipropósito Megapuerto de Chancay. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2024. 187 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14414/22133>.

- 12.SOLIS, A. Uso de los detonadores electrónicos Fametronic para evaluar la fragmentación de la roca en compañía minera Condestable S. A. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Huancayo: Universidad Continental, 2021. 100 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12026>.
- 13.HERNÁNDEZ, R, y MENDOZA, C. *Metodología de la investigación – Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education. 2018. 714 pp. ISBN: 978-1-4562-6096-5.
- 14.VALDERRAMA, S. *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica cualitativa, cuantitativa y mixta*. 2da ed. Perú: Editorial San Marcos. 2019. 496 pp. ISBN: 978-612-302-878-7.
- 15.HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. *Metodología de la investigación*. 4ta ed. Perú: Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education. 2016. 882 pp. ISBN: 970-10-5753-8.
- 16.CARRASCO, S. *Metodología de la investigación científica*. 1ra ed. Perú: Editorial San Marcos. 2005. 476 pp. ISBN: 978-9972-34-242-4.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES.	METODO Y DISEÑO
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE	MÉTODO:
¿Cómo influye la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo 2025?	Evaluar el grado de influencia de la voladura masiva utilizando detonadores electrónicos en el comportamiento dinámico del macizo rocoso, tajo 821G-OB6A, Unidad Minera Cerro Lindo 2025.	Ho: La voladura masiva utilizando detonadores electrónicos influye significativamente en el comportamiento dinámico del macizo rocoso del tajo 821G-OB6A en la Unidad Minera Cerro Lindo 2025, optimizando el control de vibraciones, mejorando la fragmentación y reduciendo los impactos negativos sobre la estabilidad del macizo.	INDEPENDIENTE: Voladura masiva con detonadores electrónicos.	Mixto.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE:	TIPO:
a) ¿En qué medida el uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización influye en el comportamiento dinámico del macizo rocoso?	a) Evaluar en qué medida el uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización influye en el comportamiento dinámico del macizo rocoso.	H1: a) El uso de detonadores electrónicos bajo una secuencia y sincronización controlada influye significativamente en la reducción de la energía sísmica transmitida al macizo rocoso, optimizando su	Comportamiento dinámico del macizo rocoso.	Aplicada.
b) ¿Qué efectos produce la voladura masiva con detonadores electrónicos en la fragmentación de las rocas?	b) Evaluar los efectos que produce la voladura masiva con detonadores electrónicos en la			DISEÑO: Cuasi Experimental.
c) ¿Cómo se integran los datos de la voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso?				NIVEL: Explicativo.
				LA POBLACIÓN: Está constituida por la totalidad de los tajos presentes en la Unidad Minera Cerro Lindo durante el año 2024.
				LA MUESTRA: No probabilística Intencional. En concordancia con este enfoque, el tajo 821G-OB6A se seleccionó debido a que, según nuestro criterio, representa de manera óptima las características relevantes para los objetivos de la presente investigación.

fragmentación de las rocas. comportamiento dinámico durante la voladura.

- c) Establecer cómo se integran los datos de la voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos del comportamiento dinámico del macizo rocoso.
- b) La aplicación de voladuras masivas con detonadores electrónicos mejora significativamente la uniformidad y el tamaño promedio de fragmentación de las rocas.
- c) La integración de datos de voladura masiva con detonadores electrónicos en modelos predictivos mejora sustancialmente la precisión en la estimación del comportamiento dinámico del macizo rocoso, permitiendo una planificación geotécnica más confiable.

INSTRUMENTOS:

- a) Registro de monitoreo de vibraciones.
- b) Registro de voladuras.
- c) Informes geotécnicos.
- d) Bitácora.
- e) Cámara de alta resolución y velocidad.

PROCESAMIENTO DE DATOS:

Para el procesamiento de datos se empleó principalmente Excel y Power BI.

Para visualizar los datos analizados, se utilizaron las siguientes técnicas:

- a) Segmentaciones.
- b) Dashboards.

Anexo 2

Matriz de operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas de medición	Instrumentos
Voladura masiva con detonadores electrónicos	Técnica de fragmentación de roca que utiliza múltiples taladros y detonadores electrónicos programables para controlar la secuencia y sincronización de la detonación a gran escala.	Es el conjunto de parámetros técnicos aplicados durante la ejecución de una voladura masiva que emplea detonadores electrónicos, como parte de una estrategia para optimizar resultados geotécnicos.	• Parámetros de diseño de voladura • Secuencia y sincronización electrónica • Tipo y cantidad de explosivo	• Diámetro y profundidad de taladros • Interrelación temporal entre detonaciones • Precisión de sincronización • Energía por taladro • Tipo de detonador electrónico	• Observación directa • Revisión de reportes técnicos • Monitoreo digital del sistema de iniciación	• Ficha técnica de voladura • Software de diseño (ShotPlus, i-kon™) • Reporte técnico del disparo • Videos de alta velocidad
Comportamiento dinámico del macizo rocoso	Respuesta del macizo rocoso a la energía inducida por las detonaciones, observada en términos de vibraciones, desplazamientos, daños estructurales y redistribución de esfuerzos.	Son los efectos físicos medibles que manifiesta el macizo rocoso luego de la voladura, evaluados mediante monitoreo geotécnico, análisis sísmico y observación de patrones de fracturamiento.	• Vibraciones inducidas • Daño estructural • Reacomodo de esfuerzos	• Velocidad de partícula (PPV) • Aceleración sísmica • Zonas de sobre fracturamiento • Cambios en esfuerzos en zonas críticas • Apertura de juntas preexistente	• Factor de amplitud “K” • Exponente de atenuación “α”	• Sismógrafo. • Geófono triaxial. • Software Blastware. • Registro de Unidades de Adquisición de Datos (DAQ).

Anexo 3
Fotografías de las pruebas en campo



Fotografía 1. Toma de evidencias para el análisis del P80 - T- 821G-OB6A.



Fotografía 2. Detonación con el Blaster 3000 del Tj 821G-OB6A.



Fotografía 3. Toma de muestra de registro de vibraciones con sismógrafo Instantel – 1ra parte.



Fotografía 4. Toma de muestra de registro de vibraciones con sismógrafo Instantel – 2da parte.



Fotografía 5. Proceso de testeo con el Logger II - Tj 821G-OB6A – 1ra parte.



Fotografía 6. Proceso de testeo con el Logger II - Tj 821G-OB6A – 2da parte.

Date/Time Long2 at 18:42:29 October 23, 2024
Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 10.0 sec at 1024 sps
Job Number: 8003

Serial Number BE15895 V 10.72-8.17 MiniMate Plus/8
Battery Level 6.2 Volts
Unit Calibration January 20, 2023 by Instatel
File Name Q895KRVN.YT0

Notes

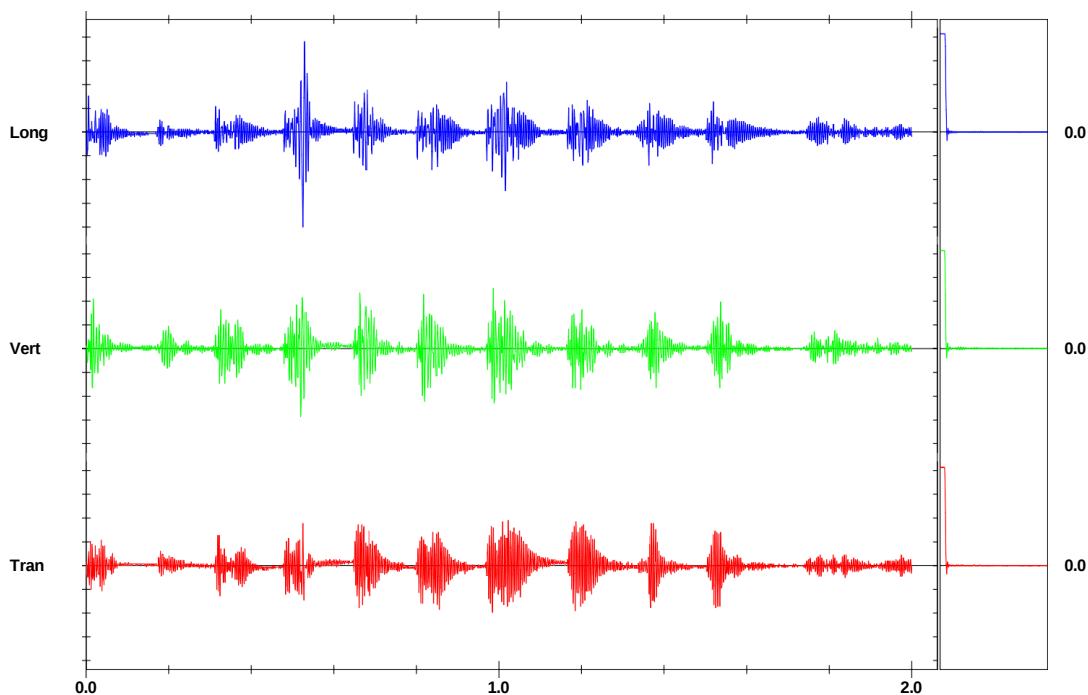
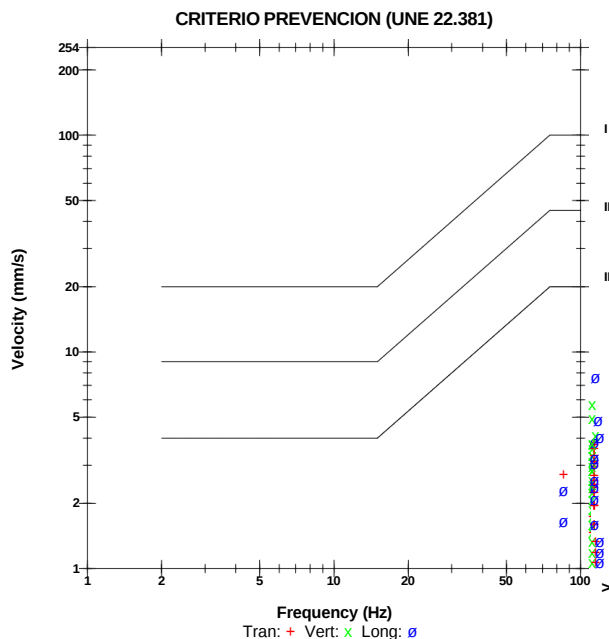
Location: CERRO LINDO
Client: NEXA RESOURCES
User Name: BLASTRONIX PERU S.A.C.
General:

Extended Notes

Offset correction event recorded with all channels at 8x gain.

	Tran	Vert	Long	
PPV	3.937	5.715	8.001	mm/s
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.984	0.520	0.525	sec
Peak Acceleration	0.490	0.597	0.689	g
Peak Displacement	0.003	0.005	0.011	mm
Sensor Check	Check	Check	Check	
Frequency	29.3	41.0	27.7	Hz
Overswing Ratio	0.0	1.0	2.0	

Peak Vector Sum 9.153 mm/s at 0.525 sec



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record
Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.000 mm/s/div

Sensor Check



Event Report

Date/Time Tran2 at 18:44:23 January 05, 2025
Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 10.0 sec at 1024 sps
Job Number: 8003

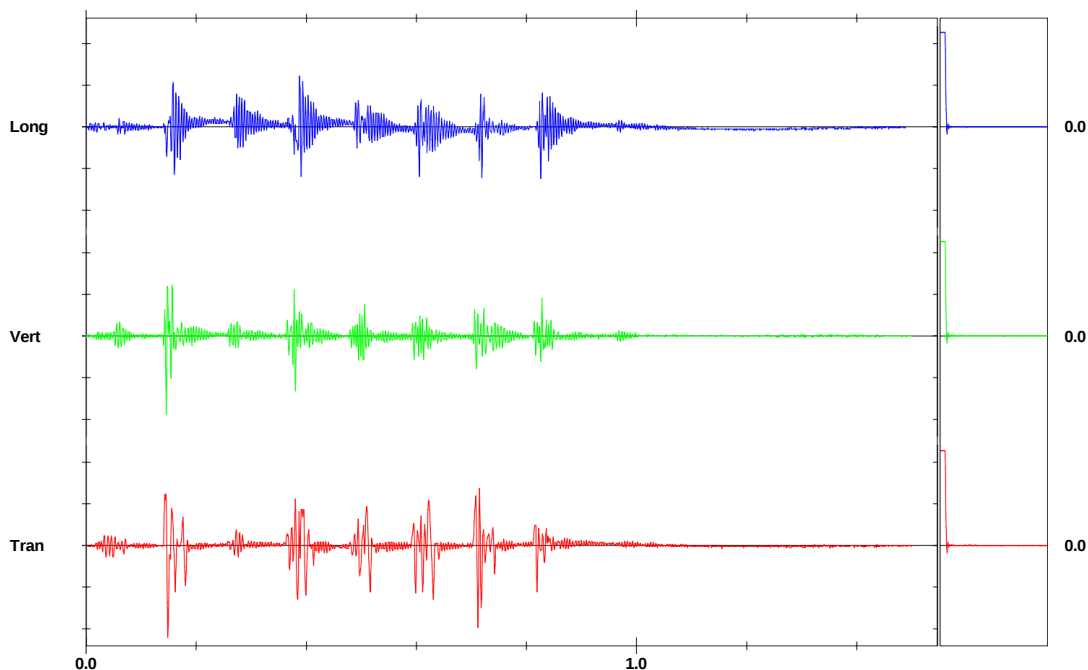
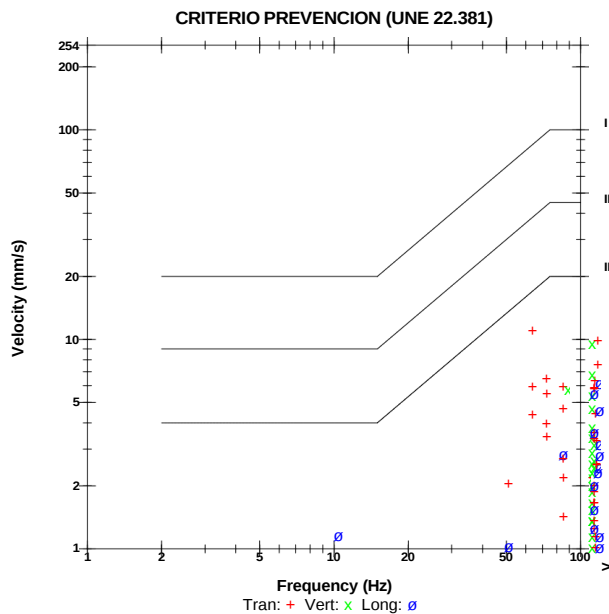
Serial Number BE15895 V 10.72-8.17 MiniMate Plus/8
Battery Level 6.2 Volts
Unit Calibration January 20, 2023 by Instatel
File Name Q895KTXQ.PZ0

Notes
Location: CERRO LINDO
Client: NEXA RESOURCES
User Name: BLASTRONIX PERU S.A.C.
General:

Extended Notes
Offset correction event recorded with all channels at 8x gain.

	Tran	Vert	Long	
PPV	11.05	9.398	6.223	mm/s
ZC Freq	64	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.148	0.146	0.826	sec
Peak Acceleration	0.862	1.047	0.716	g
Peak Displacement	0.017	0.007	0.020	mm
Sensor Check	Check	Check	Check	
Frequency	146.3	13.3	68.3	Hz
Overswing Ratio	0.0	1.0	1.0	

Peak Vector Sum 12.44 mm/s at 0.148 sec



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record
Time Scale: 0.20 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.000 mm/s/div

Sensor Check

Printed: January 11, 2025 (V 10.74)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation

Figura 53. Reporte de evento sismográfico Tj 821G-OB6A – enero 2025.