Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización integral del proceso de perforación y voladura actual para mejorar la estabilidad en los taludes en carretera en un proyecto minero en zona sur de Perú

Tesis presentada por:

Maldonado Cruz, Enso Ernesto

ORCID: 0009-0000-9888-8500

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Linares Flores Castro, Antonio Erick

ORCID: 0000-0003-0506-2297

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 19 de Mayo del 2026

Dictamen: 016684-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 016684, presentado por:

2016800501 - MALDONADO CRUZ ENSO ERNESTO

Titulado:

OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DEL PROCESO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA ACTUAL PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD EN LOS TALUDES EN CARRETERA EN UN PROYECTO MINERO EN ZONA SUR DE PERÚ

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR

40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR

29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR

OPTIMIZACIÓN INTEGRAL DEL PROCESO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA ACTUAL PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD EN LOS TALUDES EN CARRETERA EN UN PROYECTO MINERO EN ZONA SUR DE PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	8%	0%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	4%
2	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	2%
3	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	1%

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a mis padres por el apoyo constante brindado a lo largo de mi formación académica, tanto en el aspecto personal como en el educativo, lo cual fue fundamental para la culminación de esta etapa.

Asimismo, agradezco a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por los conocimientos impartidos, la orientación académica y el desarrollo del pensamiento crítico que contribuyeron de manera significativa a la realización de la presente tesis.

De igual manera, extiendo mi agradecimiento a la empresa donde laboro actualmente, así como a los ingenieros con quienes trabajo, por el respaldo, la disposición para compartir experiencias profesionales y el ambiente de colaboración que enriquecieron tanto el aprendizaje práctico como la elaboración de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mis padres, por su apoyo constante y confianza a lo largo de mi formación.

A mis abuelos, por su cariño y enseñanzas que han guiado mi camino.

Y a todas las personas que, con sus consejos y acompañamiento, me han permitido crecer personal y académicamente.

EPÍGRAFE

"Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha existido."

— Theodore von Kármán

RESUMEN

El proyecto de investigación aborda la problemática de inestabilidad geotécnica en los taludes de las carreteras de acceso (12 km) de un proyecto minero en el sur del Perú. El estudio identifica que el diseño actual de voladura (Línea Base) es deficiente, caracterizado por el uso de mallas cuadradas (3.5 x 3.5 m), carga indiscriminada de ANFO y detonadores no eléctricos (NONEL). Estas prácticas generan vibraciones excesivas (VPP promedio de 35mm/s) y un daño por retroceso (*backbreak*) de 1.2 metros, comprometiendo la seguridad y aumentando los costos de mantenimiento. El objetivo principal es transitar de un enfoque de voladura de producción a una voladura controlada para preservar la integridad del macizo rocoso. La investigación es de tipo aplicada con un nivel descriptivo-explicativo, se utilizó un diseño cuasi-experimental comparando dos grupos de datos: 1. Grupo Control (Diagnóstico): Voladuras con el diseño estándar deficiente. 2. Grupo Experimental (Propuesta): Pruebas piloto implementando un diseño optimizado que incluye: Geometría: Malla triangular (B=4.0m, S=4.8m) y técnica de Precorte (S=0.8m). Explosivos: Uso de cargas desacopladas (emulsiones) en filas de contorno y *buffer.* Tiempos: Implementación de Detonadores Electrónicos con secuencias precisas (17 ms entre taladros). El análisis de datos incluyó filtrado estadístico mediante Rango Intercuartílico (IQR) para descartar valores atípicos y el uso del modelo matemático de Holmberg & Persson para calibrar la Ley de Atenuación de Vibraciones del sitio, logrando una validación con un R^2 de 0.84. La implementación del plan de optimización demostró mejoras significativas en la estabilidad y seguridad: Se logró reducir la Velocidad Pico Partícula de un promedio de 35mm/s a valores inferiores 12 mm/s (los datos experimentales arrojaron valores entre 10.58 y 11.77 mm/s. El daño al talud se redujo de 1.2 m a menos de 0.3m, logrando taludes lisos y competentes. Se aumentó la frecuencia dominante de 10-20 Hz a más de 40 Hz, lo cual es menos perjudicial para las estructuras. Se determinó que para cumplir con los estándares de seguridad (VPP < 12 mm/s), la carga operante máxima debe limitarse a 373 kg por retardo a una distancia de 45 m.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, voladura controlada, detonadores electrónicos.

ABSTRACT

The research project addresses the issue of geotechnical instability in the slopes of access roads (12 km) within a mining project in southern Peru. The study identifies that the current blasting design (Baseline) is deficient, characterized by the use of square patterns (3.5 x 3.5 m), indiscriminate ANFO charging, and non-electric detonators (NONEL). These practices generate excessive vibrations (average PPV of 35 mm/s) and backbreak damage of 1.2 meters, compromising safety and increasing maintenance costs. The main objective is to transition from a production blasting approach to controlled blasting to preserve the integrity of the rock mass. The research is applied in nature with a descriptive-explanatory level, utilizing a quasi-experimental design comparing two data groups: 1. Control Group (Diagnosis): Blasts using the deficient standard design. 2. Experimental Group (Proposal): Pilot tests implementing an optimized design that includes: Geometry: Triangular pattern (B=4.0m, S=4.8m) and Pre-splitting technique (S=0.8m). Explosives: Use of decoupled charges (emulsions) in contour and buffer rows.Timing: Implementation of Electronic Detonators with precise sequences (17ms between holes). Data analysis included statistical filtering via Interquartile Range (IQR) to discard outliers and the use of the Holmberg & Persson mathematical model to calibrate the site's Vibration Attenuation Law, achieving validation with an R^2 of 0.84. The implementation of the optimization plan demonstrated significant improvements in stability and safety: Peak Particle Velocity was reduced from an average of 35 mm/s to values below 12 mm/s (experimental data yielded values between 10.58 and 11.77mm/s). Slope damage was reduced from 1.2 m to less than 0.3 m, achieving smooth and competent slopes. The dominant frequency was increased from 10-20 Hz to over 40 Hz , which is less damaging to structures. It was determined that to comply with safety standards (PPV < 12 mm/s), the maximum operating charge must be limited to 373kg per delay at a distance of 45 m.

Keywords: Slope stability, controlled blasting, electronic detonators.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS
DEDICATORIA
EPÍGRAFE
RESUMEN
ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 3
1.1. Planteamiento del Problema. 3
1.2. Objetivos. 5
1.2.1. Objetivo general. 5
1.2.2. Objetivos específicos. 5
1.3. Preguntas de Investigación. 6
1.3.1. Pregunta General de Investigación. 6
1.3.2. Preguntas Específicas de Investigación. 6
1.4. Líneas de investigación a la que corresponde el Problema. 6
1.5. Palabras claves. 8
1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis. 11
CAPITULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS 12
2.1. Estado del Arte. 12
2.2. Antecedentes de la investigación. 13
2.3. Bases teóricas del proyecto. 20
2.3.1. Definición de taludes. 20
2.3.2. Factores de inestabilidad de los taludes. 20
2.3.3. Métodos de análisis de estabilidad de los taludes. 21
2.3.4. Definición de Perforación. 23
2.3.5. Tipos de perforación. 23
2.3.6. Malla de perforación. 23
2.3.7. Tipos de Mallas de Perforación. 25
2.3.8. Modelo de Kuz-Ram. 25
2.3.9. Distribución de Rosin-Rammler. 28
2.3.10. Definición de Voladura. 29

2.3.11. Tipos de Voladura. 29
2.3.12. Técnicas de Voladura. 30
2.3.13. Indicadores del proceso de perforación y voladura. 31
2.3.14. Iniciadores de booster-cordón detonante. 33
2.3.15. Explosivos y sus tipos. 34
2.3.16. Propiedades Clave de los Explosivos. 35
2.3.17. Definición de Velocidad de Detonación (VOD). 35
2.3.18. Definición de Vibraciones. 36
2.3.19. Tipos de Vibraciones. 36
2.3.20. Propiedades de las ondas. 37
2.3.21. Sistemas de iniciación. 38
2.3.22. Sistemas de detonación electrónicos. 38
2.3.23. Secuencia de iniciación y retardo. 39
2.3.24. Sobrerotura y control de daño. 41
2.3.25. Relación entre la voladura y la inestabilidad de taludes. 42
2.4. Hipótesis 43
2.5. Variables 44
2.5.1. Variables Dependientes. 44
2.5.2. Variables Independientes. 45
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO 46
3.1. Alcances y Limitaciones. 46
3.2. Tipo y Nivel de la Investigación. 48
3.3. Población y Muestra. 48
3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos. 49
3.5. Plan de análisis estadístico de los Datos. 54
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES 56
4.1. Análisis e interpretación de resultados. 56
4.1.1. Describir el proceso de perforación y voladura actual y su impacto en la estabilidad de los taludes. 56
4.1.2. Analizar las variables claves del diseño de voladura que influyen en la estabilidad de los taludes (espaciamiento, burden, tipo de explosivo, secuencia de encendido). 59
4.1.3. Evaluar tecnologías y prácticas innovadoras para la perforación y voladura controlada de taludes. 61

4.1.4. Proponer un plan de optimización del proceso que incluya una nueva selección de diseño de voladura, selección de explosivos y medidas de mitigación. .. 64
4.1.5. Establecer los beneficios esperados en la mejora de la estabilidad de los taludes y la reducción de impactos ambientales. 89
CONCLUSIONES 96
RECOMENDACIONES 98
REFERENCIAS 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables Dependientes. 44
Tabla 2. Variables Independientes..... 45
Tabla 3. Matriz de Influencia de Variables. 61
Tabla 4. Comparativa - Matriz de Selección. 64
Tabla 5. Grupo Control (Línea Base - Diseño Actual). 64
Tabla 6. Grupo Experimental (Diseño Optimizado - Propuesto) 65
Tabla 7. Cálculos de VPP Vectorial. 66
Tabla 8. Criterio de Filtrado. 68
Tabla 9. Tendencia Central y Dispersión. 68
Tabla 10. Medidas de Tendencia Central y Extremos. 69
Tabla 11. Medidas de Dispersión. 69
Tabla 12. Análisis del Backbreak (BB) - Medidas de Tendencia Central y Extremos..... 69
Tabla 13. Análisis del Backbreak (BB) - Medidas de Dispersión. 70
Tabla 14. Cálculo de la Distancia Escalada (SD). 70
Tabla 15. Datos de Entrada (Transformados a Logarítmico). 71
Tabla 16. Consolidación y Transformación de Datos Log-Log 73
Tabla 17. Selección de Explosivos por Zona. 78
Tabla 18. Comparativo para la Ejecución de Diseño Actual y Diseño Optimizado..... 81
Tabla 19. Costos Económicos y Operativos 93
Tabla 20. Comparativa - Cuadro de Beneficios..... 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emulsión (Emulnor 3000)..... 34
Figura 2. Máxima Energía Teórica del ANFO..... 35
Figura 3. Comportamiento de las ondas P, ondas S. 37
Figura 4. Componentes el sistema de iniciación electrónico. 39
Figura 5. Malla de Perforación Optimizada. 77
Figura 6. Geometría del diseño de Malla de Perforación Optimizado. 78
Figura 7. Diseño de Carga. 81
Figura 8.Resultado Post Voladura Faja CVC-013, Prog. 0+160 - 0+200 82
Figura 9.Faja 122 CVC-013, Prog. 0+346 - 0+402 82
Figura 10.Fisura en tramo Faja CVC-013, Prog. 0+350 a 5 metros lado derecho 83
Figura 11. Faja CVC-013, Prog. 0+160 - 0+200 (Alcantarilla 5) 83
Figura 12. Faja CVC-013, Prog. 4+180. 84
Figura 13. Faja CVC-013, Prog. 4+180 84
Figura 14. Faja 122 CVC 13 Progresiva. 4+500 (Referencia Transferencia 04). 85
Figura 15. Secuencia de salida. 87
Figura 16. Resultados Prueba Piloto. 87
Figura 17. Líneas de Isotiempos..... 88

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. PROTOCOLO DE VOLADURA. 104
ANEXO 2. RADIO DE INFLUENCIA. 121

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la minería a cielo abierto constituye una columna vertebral para la economía global; no obstante, enfrenta el desafío perpetuo de armonizar la productividad con la seguridad operacional y la sostenibilidad ambiental. Dentro de este sector, los procesos de perforación y voladura representan las etapas iniciales y críticas en la extracción de material, y su optimización es una prioridad en los principales países mineros. Una ejecución deficiente de estas operaciones puede comprometer gravemente la estabilidad de los taludes, dando lugar a fenómenos como el daño por voladura (*blast damage*) y vibraciones excesivas que fracturan el macizo rocoso más allá de los límites de diseño. Esta situación no solo incrementa el riesgo de fallas y deslizamientos, sino que también eleva los costos operativos y afecta la sostenibilidad de las operaciones, convirtiendo su correcta gestión en un objetivo estratégico para la industria a escala mundial.

Por lo cual, el Perú uno de los principales productores de minerales del mundo, estos desafíos se ven magnificados por una geografía andina compleja, alta sismicidad y condiciones geológicas variables y fracturadas. La gestión de la estabilidad geotécnica es especialmente crítica en las infraestructuras viales de los proyectos mineros, como las carreteras de acceso y acarreo. Históricamente, un control deficiente en los parámetros de perforación y voladura ha sido una causa recurrente de inestabilidad, provocando interrupciones operativas, mayores costos de mantenimiento y, lo que es más alarmante, graves riesgos para la seguridad del personal y los equipos. A pesar de la existencia de regulaciones rigurosas, la aplicación de técnicas de voladura que no se adaptan a las condiciones geomecánicas locales sigue siendo una problemática extendida en el país.

Es por ello, que dentro de esta problemática se manifiesta de forma crítica en la región sur de Perú, donde la explotación de yacimientos a cielo abierto depende de la integridad de sus vías de acceso para el transporte de grandes volúmenes de material. El proyecto minero objeto de este estudio enfrenta actualmente el desafío de la inestabilidad de taludes en sus carreteras, una consecuencia directa de un diseño de perforación y voladura estandarizado que no se ajusta a las variaciones del macizo rocoso. Esta práctica induce efectos adversos como la sobrerotura, vibraciones excesivas y el retroceso de voladura (*backbreak*), que debilitan la estructura rocosa y aumentan la probabilidad de caídas de rocas, afectando la seguridad, la productividad y el medio ambiente.

Por ende, la presente investigación aborda esta situación mediante la optimización integral del proceso de perforación y voladura con el fin de mejorar la estabilidad de los taludes en las carreteras del proyecto. El estudio propone transitar de un enfoque centrado exclusivamente en la fragmentación a uno que incorpore criterios de control de daño y estabilidad de las estructuras finales. Se espera, como resultado describir el proceso actual, analizar las variables clave que influyen en la inestabilidad y proponer un plan de optimización que integre un nuevo diseño o selección de voladura, una selección adecuada de explosivos y tecnologías innovadoras. Con ello, se busca establecer los beneficios directos en la mejora de la estabilidad de los taludes, la reducción de impactos ambientales y el fortalecimiento de la seguridad operacional.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema.

La minería a cielo abierto es la columna vertebral de la economía global, que depende en gran medida de procesos eficientes como la perforación y voladura. Sin embargo, la ejecución inadecuada de estas operaciones puede comprometer la estabilidad de los taludes, generando un riesgo significativo para la seguridad, la productividad y el medio ambiente. A nivel global, la industria minera enfrenta el desafío constante de equilibrar la alta productividad con la seguridad y el respeto al medio ambiente, es por ello, que la perforación y voladura es la primera etapa en la remoción de material en minas a cielo abierto y su diseño inadecuado es una de las principales causas de inestabilidad geotécnica. Fenómenos como el daño por voladura (blast damage), el retroceso de voladura (backbreak) y las vibraciones excesivas del terreno pueden fracturar las rocas más allá de la zona de diseño del talud. Esto no solo debilita la estructura geológica, sino que también aumenta la probabilidad de fallas, deslizamientos y caídas de rocas, problemas que son objeto de intensa investigación y desarrollo en países mineros líderes, la optimización de estos procesos es, por lo tanto, una prioridad global para mitigar riesgos, reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Por lo tanto, Perú siendo uno de los principales productores de minerales del mundo, posee una vasta y compleja geografía andina, lo que hace que la gestión de la estabilidad geotécnica sea particularmente crítica. La actividad minera, a menudo ubicada en zonas de alta sismicidad y con condiciones geológicas variables y fracturadas, enfrenta el reto de mantener la estabilidad en sus infraestructuras, especialmente en las carreteras de acceso y acarreo. Un control deficiente en los parámetros de perforación y voladura ha sido históricamente una causa de inestabilidad en los taludes de las vías, lo que resulta en interrupciones operativas, mayores costos de mantenimiento y lo más preocupante, riesgos de accidentes que afectan la seguridad del personal y los equipos. A pesar de la existencia de regulaciones rigurosas, la aplicación de técnicas de voladura que no se ajustan a las condiciones locales sigue siendo una problemática recurrente en muchos proyectos mineros del país.

Por lo tanto, la industria minera en la región sur de Perú, caracterizada por la explotación de yacimientos a cielo abierto y el transporte de grandes volúmenes de mineral, enfrenta un desafío recurrente y crítico en la inestabilidad de los taludes en las

carreteras de acceso. Estas vías son vitales para la continuidad operativa de los proyectos, permitiendo el flujo de mineral, insumos y personal. La degradación de su estabilidad no solo genera interrupciones operativas, sino que también constituye un riesgo latente para la seguridad de los trabajadores y el equipo. Actualmente, la operación utiliza un diseño de perforación y voladura estandarizado que no se ajusta de manera óptima a las variaciones litológicas y estructurales del macizo rocoso, la causa principal de esta inestabilidad ha sido identificada en el proceso de perforación y voladura, una actividad inherente a la minería superficial.

A pesar de los avances tecnológicos, en muchos casos la ejecución actual del diseño de voladura no considera de manera integral las características geomecánicas del macizo rocoso adyacente a las carreteras. La práctica de voladura, cuando no está optimizada, induce una serie de efectos indeseables, tales como, el sobrequiebre o daño del macizo rocoso, en el cual la energía de la voladura se propaga más allá de la zona de fragmentación deseada, generando microfracturas y debilitando la estructura rocosa del talud, esto disminuye su cohesión interna y aumenta su susceptibilidad a fallas por deslizamiento o desprendimiento, también surgen las vibraciones excesivas que son las ondas sísmicas producidas por la detonación se transmiten a través del terreno, afectando la estabilidad de los taludes cercanos y provocando la apertura de discontinuidades preexistentes, como fallas y diaclasas. De igual manera se genera la voladura descontrolada, que viene dada por diseños de voladura no ajustados a la geología local que puede resultar en una fragmentación deficiente de la roca, generando grandes bloques que complican el carguío y el transporte, o por el contrario un exceso de finos que contribuyen a la formación de polvo y la pérdida de material del talud.

Del mismo modo, se generan frecuentes episodios de retroceso de voladura (backbreak) que exceden los límites de diseño, dejando caras de taludes inestables y fracturadas, además de la necesidad constante de operaciones de saneamiento y sostenimiento de taludes, lo que no solo incrementa los costos y consume tiempo, sino que también interrumpe el flujo de transporte, afectando la productividad general de la mina. Por lo tanto, estas deficiencias en el proceso de perforación y voladura impactan directamente en la seguridad operacional, al aumentar la probabilidad de accidentes por caída de rocas, además desde una perspectiva ambiental, la inestabilidad de los taludes se traduce en la erosión del suelo, la generación incontrolada de material particulado (PM) que afecta la calidad del aire y la posible alteración de los ecosistemas cercanos.

En este contexto, la pregunta central que orienta esta investigación es: ¿Cómo puede la optimización integral del proceso de perforación y voladura mejorar la estabilidad de los taludes en las carreteras de acceso de un proyecto minero en la zona sur de Perú? Es por ello, que el problema radica en la necesidad de pasar de un enfoque de perforación y voladura orientado exclusivamente a la fragmentación del mineral, a uno que incorpore criterios de control de daño y estabilidad de las estructuras finales, en este caso, los taludes de las vías de transporte, además de destacar que los parámetros actuales de perforación y voladura no están diseñados para minimizar el daño al macizo rocoso y, por lo tanto, no garantizan la estabilidad a largo plazo de las carreteras.

Por lo cual, la solución a este problema requiere un análisis profundo del proceso actual, la evaluación de técnicas de perforación y voladura controlada y la propuesta de un plan de optimización que equilibre la eficiencia operativa con la integridad estructural, la sostenibilidad ambiental, la optimización integral del proceso, desde la selección de la malla de perforación hasta la selección de los explosivos, para reducir el daño, controlar las vibraciones y en última instancia mejorar de manera sostenible la estabilidad de los taludes, asegurando así la continuidad y seguridad de las operaciones.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Optimizar integralmente el proceso de perforación y voladura para mejorar la estabilidad en los taludes en carretera de un proyecto minero en el sur de Perú.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Describir el proceso de perforación y voladura actual y su impacto en la estabilidad de los taludes.
- Analizar las variables claves del diseño de voladura que influyen en la estabilidad de los taludes (espaciamiento, burden, tipo de explosivo, secuencia de encendido).
- Evaluar tecnologías y prácticas innovadoras para la perforación y voladura controlada de taludes.
- Proponer un plan de optimización del proceso que incluya una nueva selección de diseño de voladura, selección de explosivos y medidas de mitigación.
- Establecer los beneficios esperados en la mejora de la estabilidad de los taludes y la reducción de impactos ambientales.

1.3. Preguntas de Investigación.

1.3.1. Pregunta General de Investigación.

¿Cómo puede la optimización integral del proceso de perforación y voladura mejorar la estabilidad de los taludes en las carreteras de acceso de un proyecto minero en la zona sur de Perú?

1.3.2. Preguntas Específicas de Investigación.

Las preguntas específicas se derivan directamente de los objetivos específicos planteados:

- ¿Cuál es el proceso de perforación y voladura actual y cómo impacta en la estabilidad de los taludes del proyecto?
- ¿Cuáles son las variables clave del diseño de voladura (como espaciamiento, burden, tipo de explosivo y secuencia de encendido) que influyen en la estabilidad de los taludes?
- ¿Qué tecnologías y prácticas innovadoras para la perforación y voladura controlada de taludes pueden ser evaluadas para esta aplicación?
- ¿Qué elementos debe incluir un plan de optimización del proceso, considerando una nueva selección de diseño de voladura, selección de explosivos y medidas de mitigación?
- ¿Cuáles son los beneficios esperados que se pueden establecer en la mejora de la estabilidad de los taludes y en la reducción de impactos ambientales tras la optimización?

1.4. Líneas de investigación a la que corresponde el Problema.

Línea Principal: Optimización de Procesos en Minería a Cielo Abierto.

- **Enfoque:** La investigación se centra en la optimización de procesos aplicada específicamente a la perforación y voladuras en un contexto de minería a cielo abierto.
- **Justificación:** El proyecto busca desarrollar un método sistemático que integre la planificación, ejecución y evaluación de estas tareas. El objetivo no es solo la

eficiencia en la fragmentación, sino la optimización integral que equilibre la producción con la seguridad y la estabilidad.

Líneas de Investigación derivadas y complementarias.

El problema abordado la inestabilidad de taludes causada por la voladura, sitúa la tesis en la intersección de las siguientes líneas técnicas y de gestión:

- **Geotecnia Aplicada y Estabilidad de Taludes:** Esta es la línea de investigación fundamental que define el *problema* a resolver.
    - **Enfoque:** El eje central es cómo la voladura condiciona la estabilidad de los taludes. La investigación analiza los factores de inestabilidad, como el daño al macizo rocoso (microfracturas, debilitamiento), las vibraciones excesivas que abren discontinuidades preexistentes (fallas, diaclasas) y el retroceso de voladura (*backbreak*). El objetivo es preservar la integridad geotécnica de las estructuras finales (las carreteras).
- **Ingeniería de Explosivos y Voladura Controlada:** Esta es la línea de investigación que define la *solución* técnica.
    - **Enfoque:** La tesis transita de un enfoque de voladura de producción centrado solo en fragmentación a uno de control de daño. Implica el estudio y la aplicación de técnicas avanzadas como:
        - **Precorte (*Pre-splitting*):** Para crear un plano de fractura que aísle el talud final.
        - **Voladura Amortiguada (*Buffer Blasting*):** El uso de cargas reducidas en la última fila para no dañar la pared.
        - **Selección de Explosivos:** Evaluar explosivos de menor energía o desacoplados para las filas de contorno.
        - **Modelamiento y Simulación:** Aunque no es el foco central, se apoya en modelos como Kuz-Ram para fragmentación y en la evaluación de vibraciones (PPV), que son pilares de esta línea.
- **Seguridad Minera y Gestión de Riesgos:** Esta es la línea de investigación que define la *justificación* principal del proyecto.
    - **Enfoque:** La tesis se justifica en la necesidad de mitigar los graves riesgos para la seguridad del personal y los equipos. Aborda la gestión de riesgos geotécnicos. La inestabilidad de taludes en carreteras de acceso es un riesgo operacional crítico que puede causar accidentes fatales y

paralizaciones costosas. La optimización propuesta es una medida de control de ingeniería para reducir la probabilidad y consecuencia de fallas.

- **Innovación y Tecnología Minera:** Esta línea de investigación se deriva de los objetivos específicos y la metodología propuesta.
    - **Enfoque:** El objetivo N°3 busca Evaluar tecnologías y prácticas innovadoras para la perforación y voladura controlada de taludes.La investigación evalúa la implementación de:
        - **Sistemas de Iniciación Electrónicos:** Para lograr la precisión milimétrica en los retardos y controlar la superposición de ondas sísmicas.
        - **Software de Simulación:** El uso de herramientas como JKSimblast para modelar y predecir los resultados antes de la ejecución.
        - **Técnicas de Monitoreo Avanzado:** Como el monitoreo de vibraciones y la evaluación de técnicas sísmicas.
- **Gestión Ambiental en Minería:** Aunque es un beneficio secundario es una línea de investigación relevante.
    - **Enfoque:** Uno de los objetivos es Establecer los beneficios esperados en la reducción de impactos ambientales. Una voladura optimizada y controlada reduce impactos colaterales como la generación excesiva de polvo (PM) y las vibraciones que pueden afectar zonas sensibles o comunidades.

1.5. Palabras claves.

Burden: Distancia del taladro a la cara libre.

Detonadores Electrónicos: Sistemas de iniciación de alta precisión que permiten un control milimétrico de los tiempos de retardo.

Distribución de Rosin-Rammler: Función estadística usada para describir la distribución de tamaños de la roca fragmentada.

Espaciamiento: Distancia entre taladros en una misma fila.

Estabilidad de Taludes: El concepto de equilibrio de fuerzas y los factores que lo afectan.

Explosivos: Sustancias usadas para la detonación, incluyendo tipos específicos mencionados como ANFO y Emulsión.

Factores de Inestabilidad: Causas geológicas (fallas, diaclasas) y operativas (voladura, sismicidad) que comprometen la estabilidad.

Fragmentación: El tamaño y distribución de la roca resultante de la voladura.

Frecuencia (de vibración): Propiedad de la onda que, junto a la VPP, determina el potencial de daño.

Macizo Rocoso: Las características de la masa de roca, incluyendo sus discontinuidades y propiedades geomecánicas.

Métodos de Análisis de Estabilidad: Enfoques teóricos para evaluar el riesgo de falla (Equilibrio Límite, Elementos Finitos, etc.).

Malla de Perforación: El patrón geométrico (diseño) de los taladros.

Modelo de Kuz-Ram: Modelo empírico para predecir la fragmentación de la roca.

Perforación: El proceso de crear taladros en la roca para alojar explosivos.

Precorte (Pre-splitting): Técnica que crea un plano de fractura para aislar el talud final *antes* de la voladura principal.

Propiedades de los Explosivos: Conceptos como Potencia, Sensibilidad y Resistencia al Agua.

Retroceso de Voladura (Backbreak): El daño (fracturamiento) inducido en el macizo rocoso que debe permanecer estable.

Sistemas de Iniciación: Los componentes usados para comenzar la detonación (ej. Booster, Cordón Detonante).

Secuencia de Iniciación y Retardo: El orden y el tiempo programado entre detonaciones de taladros para controlar la energía y vibración.

Sobrerotura (Overbreak): El rompimiento de roca más allá de la línea de diseño del talud.

Talud: Definición de la estructura geotécnica principal, su propósito en minería y en carreteras.

Velocidad de Detonación (VOD): La velocidad a la que la onda de choque viaja a través del explosivo, un indicador clave de su poder rompedor.

Velocidad Pico Partícula (VPP): La medida estándar para cuantificar la intensidad de la vibración y su potencial de daño.

Vibraciones: Las ondas sísmicas (Ondas P, S, Rayleigh, Love) generadas por la detonación.

Voladura: El uso controlado de explosivos para la fragmentación de roca.

Voladura Amortiguada (Buffer Blasting): Uso de cargas reducidas en la última fila (fila buffer) para no dañar la pared final.

Voladura Controlada: El término general para las técnicas diseñadas para minimizar el daño al macizo remanente.

1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis.

La presente investigación no solo propone un cambio de parámetros técnicos, sino que establece una metodología de trabajo integral para proyectos de infraestructura vial dentro de operaciones mineras. El desarrollo de esta tesis aporta un nuevo modelo de diseño de malla de perforación adaptado específicamente a las condiciones geomecánicas de la zona sur del Perú. Al optimizar la Relación de Rigidez (*H/B*) de 2.86 a un valor óptimo > 3 y ajustar el factor de carga, se logra una fragmentación eficiente sin comprometer la integridad de la cara final. Este aporte permite reducir el *backbreak* de 1.2 m a niveles tolerables (< 0.5 m), asegurando que el ancho de la berma y la calzada de la carretera se mantengan según el diseño civil original.

Además se establece una metodología de predicción de vibraciones basada en la Distancia Escalada (*SD*), permitiendo que la operación pase de un monitoreo reactivo a uno proactivo. El aporte consiste en la determinación de los factores de roca (*K* y *n*) específicos para el proyecto, lo que permite calcular la Carga Máxima por Retardo (*W*) permitida para no exceder los límites críticos de vibración, protegiendo así la estabilidad del talud de la carretera.

A diferencia de los enfoques convencionales que solo miden la vibración, esta investigación aporta un análisis de estabilidad dinámica, ya que introduce el uso de modelos de equilibrio límite para cuantificar cómo la reducción de la Velocidad Pico de Partícula (*VPP*) eleva directamente el Factor de Seguridad (*FoS)* dinámico de los taludes, este enfoque garantiza una infraestructura vial segura y con menor riesgo de desprendimientos o colapsos repentinos por carga sísmica de voladura.

Por ende, el aporte radica en la reducción significativa de costos de mantenimiento y remediación, debido a que al minimizar el daño al macizo rocoso mediante voladura controlada (precorte/recorte), se evita el uso de elementos de sostenimiento adicionales (mallas, pernos) y se reduce el volumen de material sobre-excavado, optimizando el ciclo de transporte y extendiendo la vida útil de la carretera minera. Así mismo como aporte innovador, la nuestra investigación propone la integración de fotogrametría aérea (Drones) para la evaluación post-voladura, este método permite auditar la precisión de la perforación y cuantificar el daño en la cresta del talud de forma digital, generando una línea base de datos para la mejora continua del proceso de P&V en el proyecto.

CAPITULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.Estado del Arte.

El estado actual del conocimiento sobre la optimización de perforación y voladura en minería a cielo abierto ha evolucionado desde un enfoque puramente productivo como la fragmentación hacia un enfoque geotécnico-operativo, donde la estabilidad de los taludes es tan prioritaria como la extracción del mineral. A nivel global y nacional, la literatura reciente destaca la integración de modelos matemáticos, el uso de detonadores electrónicos y técnicas de monitoreo sísmico avanzado. A continuación, se presenta el análisis de las investigaciones más relevantes que fundamentan este estudio, clasificadas según su aporte técnico:

En la Optimización de Parámetros y Modelamiento Matemático, la minería moderna y el diseño empírico está siendo reemplazado por modelos predictivos que buscan equilibrar costos y seguridad. Las investigaciones actuales demuestran que la falta de caracterización geomecánica es la causa raíz de las ineficiencias. Romero M. (2022), en su análisis en la concesión Camila III (Moquegua), validó que un diseño deficiente genera "tiros soplados" y un consumo excesivo de explosivos. Su aporte principal fue demostrar que el rediseño de la malla utilizando modelos matemáticos como el criterio de Hoek & Brown no solo reduce costos, sino que estandariza la eficiencia operativa. Complementando esta visión, Torres J. (2025) aplicó una metodología en el Tajo Cerro Corona (Cajamarca) que vincula directamente los parámetros de voladura con la estabilidad del talud. Su investigación es crucial porque validó el Modelo de Holmberg & Persson para predecir vibraciones en campo cercano, una herramienta estándar para proteger estructuras adyacentes. Torres concluye que la optimización no es estática; requiere ajustes dinámicos basados en la dureza de la roca para cumplir con los KPIs de fragmentación (P80) sin comprometer la pared final.

En cuanto, al Control Avanzado de Vibraciones y Secuencia de Encendido, uno de los avances más significativos es el uso de análisis sísmico para diseñar secuencias de tiempo precisas, mitigando el daño por vibración. Cari M. (2024) introduce el concepto de "Análisis de Onda Elemental" o "Onda Semilla". En su estudio en un yacimiento pórfido-skarn, demostró que las frecuencias bajas y las vibraciones altas causaban deformaciones en la zona geotécnica. Su aporte metodológico reside en el uso de detonadores electrónicos para configurar secuencias "taladro a taladro" y "fila a fila". Esto confirma que la manipulación precisa de los tiempos de retardo (en milisegundos) es la

variable más efectiva para elevar la frecuencia de vibración y reducir el desplazamiento del macizo rocoso. Simultáneamente, Luque J. (2021) profundiza en la mitigación del daño mediante la técnica sísmica Cross Hole. Su investigación en una mina de pórfido de cobre estableció la importancia de medir la velocidad de onda P (Vp) para determinar la Velocidad Pico Partícula crítica (PPVc), que es el umbral real de daño de la roca. Este enfoque científico permite diseñar cargas y tiempos de retardo basados en datos geofísicos reales del talud, en lugar de tablas genéricas.

En lo que concierne a las Técnicas de Voladura Controlada de Precorte y Buffer, la literatura coincide en que, para taludes finales y carreteras, la modificación de la malla de producción no es suficiente; se requieren técnicas de desacoplamiento. La investigación de Pacco B. y Apaza E. (2019) es fundamental para este proyecto, ya que se centra en yacimientos donde no existían registros históricos de voladura controlada. Su trabajo valida la técnica de Precorte (Pre-splitting) como el método más eficaz para crear un plano de fractura que aísle el talud de la voladura principal. Además, enfatizan el uso de filas Amortiguadas (Buffer) con cargas desacopladas (explosivos de menor diámetro que el taladro) para reducir la presión de detonación sobre la pared final, una estrategia que se ha adoptado como estándar de excelencia en la minería superficial de gran escala. Por ende, el análisis del estado del arte nos revela que, si bien existen estudios sobre optimización de voladuras en tajos abiertos, existe una necesidad específica de aplicar estos conceptos de manera integral en las carreteras de acceso de proyectos en la zona sur del Perú, donde la geografía andina y la sismicidad agregan complejidad.

2.2.Antecedentes de la investigación.

Antecedentes internacionales:

Ullah et al. (2025), en su investigación sobre la **Evaluación de la estabilidad dinámica de taludes bajo vibraciones del terreno inducidas por voladuras en minas a cielo abierto: un enfoque de equilibrio límite pseudoestático,** Chile. El estudio aborda el problema crítico de la inestabilidad de taludes causada por la carga dinámica de las voladuras en minería superficial. Propone un método para convertir la Velocidad Pico de Partícula (VPP) inducida por la voladura en un Coeficiente Sísmico Horizontal (Kh). Este coeficiente se integra en los análisis de equilibrio límite para recalcular el Factor de Seguridad (FoS) del talud durante el disparo. Utiliza software de elementos finitos (como RS2) para demostrar cómo las vibraciones reducen drásticamente la resistencia al corte

del macizo rocoso. El artículo demuestra que ignorar el componente dinámico de la voladura sobreestima la estabilidad del talud en un 15-20%, lo que explica por qué taludes que parecen estables en el diseño termina fallando o presentando *backbreak* excesivo.

La investigación de Ullah et al. (2025), es tomada en consideración ya que proponen un enfoque pseudo-estático que permite cuantificar la reducción del Factor de Seguridad debido a la vibración de voladura. Este antecedente es crucial ya que fundamenta la transición del análisis de vibraciones (VPP) hacia la estabilidad física, permitiendo predecir el comportamiento de los taludes de la carretera en el Sur de Perú bajo las nuevas condiciones de diseño optimizado.

Simangunsong G, et al (2024), en su artículo científico sobre la **Relación entre la operación de voladura y la estabilidad de taludes,** publicado en *Scientific Reports*, Indonesia. Este estudio investiga el impacto de las vibraciones inducidas por voladura de banco en la estabilidad de taludes en una de las minas de carbón más grandes de Indonesia. Se abordó como problema la voladura descontrolada que genera vibraciones y aceleraciones que pueden causar fallas en los taludes si el desplazamiento permanente superando valores críticos. Como metodología a diferencia del enfoque tradicional "pseudo-estático" los autores utilizan el Método del Bloque Deslizante de Newmark y el Factor de Reducción de Resistencia (SRF), como criterio de falla definen el Factor de Seguridad (FoS) dinámico basado en un desplazamiento crítico de 50 mm. Como resultados, el estudio demuestra que el análisis de "firma de taladro único" (*signature hole*) permite predecir con mayor precisión la forma de onda completa de la vibración, facilitando el diseño de voladuras que mantengan el desplazamiento del talud dentro de límites seguros.

El artículo de Simangunsong G, et al (2024), es de relevancia ya que demuestran que la estabilidad de taludes bajo carga dinámica de voladura debe evaluarse no solo mediante la VPP, sino a través del desplazamiento permanente del bloque. Su estudio en minería superficial valida el uso de modelos predictivos de vibración para mantener el Factor de Seguridad dinámico por encima de los niveles críticos, metodología que se aplica en nuestra investigación.

Malekian M, et al (2022), en su trabajo sobre **Investigación de la estabilidad de taludes en minas a cielo abierto durante actividades de voladura**, Australia. El artículo científico investiga cómo la energía liberada por la voladura afecta la estabilidad

de los taludes mediante el análisis de 15 casos de estudio en diferentes minas del mundo. Introduce el uso de drones de alta resolución y algoritmos de cambio de luminancia para detectar micro-movimientos en el talud que los radares convencionales a veces omiten debido a la interferencia del polvo y los gases de la voladura. El estudio clasifica las respuestas de los taludes en dos fases: 1. Durante el evento: Movimientos inmediatos causados por la onda de choque. 2. Post-voladura: Inestabilidades residuales que pueden terminar en colapso horas después. Como resultados establece que la ubicación del patrón de perforación respecto a la cara libre y la orientación de las estructuras geológicas determinan si la energía de la voladura causará un desprendimiento menor (rockfall) o una falla circular o planar de gran escala.

El artículo de Malekian M, et al (2022), es relevante para nuestro trabajo ya que investigaron la respuesta de taludes ante la energía de voladura en 15 operaciones mineras, concluyendo que la detección temprana de micro-movimientos mediante tecnología visual es clave para prevenir fallas catastróficas. Este estudio aporta a la presente tesis la metodología para evaluar el impacto de las vibraciones en la geometría final de la carretera, permitiendo correlacionar el diseño de la malla de perforación con la estabilidad dinámica del macizo rocoso.

Prado A, et al (2020), en su trabajo de investigación sobre el **Análisis de estabilidad de talud de la carretera nic.7 en el km 176, Municipio de Santo Tomas, del Departamento de Chontales,** Nicaragua. Se centra en el diagnóstico y evaluación de la estabilidad de un talud crítico en la carretera Nic.7, afectado por procesos de meteorización y características geomecánicas desfavorables. Realiza un levantamiento geomecánico detallado utilizando clasificaciones de macizo rocoso como el RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski y el SMR (Slope Mass Rating) de Romana. Utiliza proyecciones estereográficas para identificar tipos de falla (planar, en cuña y volcamiento). Emplea el método de equilibrio límite (Software GeoStudio / Slide) para calcular el Factor de Seguridad (FoS) en condiciones estáticas y bajo influencia hídrica. Determina que la geometría actual y la baja calidad de la roca (Toba Riolítica) requieren medidas de estabilización como mallas de triple torsión y cunetas de coronación.

El estudio de Prado A, et al (2020), es de importancia ya que demuestra que la calidad del macizo rocoso (SMR) es el factor determinante para la seguridad vial. Este antecedente es clave para la presente investigación, ya que permite cuantificar cómo los métodos de excavación agresivos disminuyen la valoración geomecánica del talud,

sustentando la necesidad de optimizar la perforación y voladura para preservar la competencia natural del macizo.

Antecedentes Nacionales y Locales:

Torres J (2025), en su proyecto de investigación sobre **Optimización de perforación y voladura para el control de la estabilidad de talud en la zona de Cerro María en el Tajo Cerro CORONA – CAJAMARCA,** Lima – Perú. Se enfoca en lograr una fragmentación de roca adecuada y, crucialmente, garantizar la estabilidad del talud en una zona geológicamente compleja, se determinaron los parámetros óptimos de perforación y voladura con la finalidad de tener una fragmentación adecuada y a la vez una estabilidad de talud dentro de los estándares de seguridad que permitan el desarrollo de la mina sin riesgo de deslizamientos, para realizar esta tesis se recopilaron datos de geología y geotecnia con la finalidad de conocer las características físicas y químicas de la zona a minar, posterior a ello se realizaron las diferentes pruebas de campo con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos (burde, espaciamiento, factor de carga, tipo de explosivo, secuencia de salida, tiempos de salida) que garanticen los objetivos requeridos. La investigación culminó con el diseño de nuevos parámetros de perforación y voladura, incluyendo mallas (burden y espaciamiento) y diseños de carga específicos para taladros de precorte, buffer y producción, ajustados por dureza de la roca. El nuevo diseño logró una fragmentación adecuada, cumpliendo con los KPIs de la mina (P80 de 231 mm vs. el estándar de 304.5 mm). El análisis geotécnico posterior a la voladura, mediante la metodología SOP (factor de condición y diseño), determinó que los nuevos parámetros permitieron realizar el minado dentro de los estándares de seguridad requeridos, manteniendo la estabilidad de la pared final. Se concluye que la optimización de los parámetros de voladura, basada en pruebas de campo y modelamiento, es fundamental para minar de forma segura en zonas geotécnicamente sensibles.

En el trabajo de Torres J (2025), es de relevancia para la investigación ya que aborda los principios físicos de fractura de roca, propagación de ondas y control de vibraciones, desarrolla el contexto de la minería a tajo abierto en el Perú, enfrentando condiciones geológicas complejas y la necesidad de equilibrar producción con seguridad geotécnica. Además proporciona una secuencia de trabajo probada y exitosa que puede ser adoptada para nuestro proyecto. Esto incluye las fases de recopilación de datos geomecánicos, la ejecución de pruebas de campo específicas y el análisis de resultados para proponer un diseño optimizado. De igual manera, demuestra la efectividad de

herramientas y modelos específicos que son cruciales para el análisis de estabilidad como: El Modelo de Holmberg & Persson es validado como el estándar para predecir y controlar las vibraciones en campo cercano, que es precisamente la zona de interés para un talud de carretera adyacente a una voladura. La Prueba de Onda Elemental se presenta como una técnica fundamental para optimizar los tiempos de retardo, un parámetro clave para minimizar el impacto vibratorio. El uso del Precorte y las filas Buffer se confirma como la principal estrategia de voladura controlada para proteger el macizo rocoso remanente.

Cari M (2024), en su investigación sobre el **análisis de onda elemental para el control de vibraciones y selección de retardos en la zona geotécnica 4 del tajo sur de un yacimiento de tipo pórfido – skarn de cobre.** Se aborda el problema de los altos niveles de vibración y bajas frecuencias producidos por las voladuras adyacentes a la zona geotécnica 4 de un tajo sur, lo que generaba un aumento en las deformaciones y desplazamientos de hasta 224.70 cm. El objetivo principal fue replantear los tiempos en los diseños de voladura electrónica. Para ello, se utilizó una metodología que consistió en la detonación de una "onda elemental" o "onda semilla". Esta es un pulso de vibración generado por un solo taladro de prueba y captado por un sismógrafo. Los datos obtenidos se analizaron con software especializado (Paradigm) para determinar los tiempos de retardo más adecuados para los taladros y las filas, buscando reducir las vibraciones y aumentar las frecuencias sin comprometer la fragmentación. Como resultado, se lograron determinar tiempos óptimos para diferentes formaciones rocosas. La implementación de estas nuevas secuencias de voladura, incluyendo un diseño "fila a fila" y "taladro a taladro", permitió controlar las deformaciones y reducir los riesgos de inestabilidad.

En el proyecto de Cari M (2024), es base para el presente estudio debido a que se centra en una zona geotécnica específica, demostrando que la causa raíz son las vibraciones y el daño al macizo rocoso causados por un proceso de voladura inadecuado. Además, valida la premisa de que los altos niveles de vibración y las bajas frecuencias provocan deformaciones y desplazamientos. La tesis resalta la eficacia de secuencias de detonación como el diseño "fila a fila" o "taladro a taladro" para controlar las ondas y proteger las estructuras sensibles, así mismo menciona el uso de un filtro de precorte, que es una técnica para inducir fracturas que atenúan las vibraciones de la voladura principal.

Romero M (2022), en su trabajo de investigación sobre el **análisis de la estabilidad del talud del botadero de la concesión minera Camila III en la provincia**

de Mariscal Nieto del departamento de Moquegua. Se enfoca en mejorar la productividad y reducir los costos operativos en una mina al optimizar el proceso de perforación y voladura. El estudio identificó que la falta de una caracterización adecuada del macizo rocoso y un diseño de voladura deficiente provocaban ineficiencias como "tiros soplados, cortados y anillados", lo que aumentaba el consumo de explosivos y los costos. La investigación propuso rediseñar la malla de perforación utilizando modelos matemáticos, como el criterio de Hoek & Brown. La implementación de este diseño optimizado resultó en un ahorro mensual considerable y una mejora en la eficiencia general de la voladura.

El trabajo de Romero M (2022), nos aporta las bases sobre los efectos en la productividad y los costos que demuestra que un diseño deficiente genera múltiples problemas, lo que valida la premisa de que esta misma deficiencia puede ser la causa de la inestabilidad en las carreteras, además nos establece pasos para el análisis detallado del proceso de voladura existente para identificar sus deficiencias y subraya la importancia de una correcta caracterización geotécnica usando metodologías como el RMR y GSI. Que demuestra el éxito de utilizar modelos matemáticos, como el criterio de Hoek & Brown, para rediseñar la malla de voladura.

Luque J (2021), en su trabajo de investigación sobre **Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole**, se enfoca en la problemática de las vibraciones generadas por las voladuras en una mina de pórfido de cobre en Perú, específicamente en la roca Andesita intrusiva sílica en la fase 6B2. Su objetivo principal es modelar estas vibraciones en el campo cercano para mitigar el daño que causan en los taludes. Para ello, se propuso el uso de la técnica sísmica Cross Hole para medir la velocidad de la onda P (Vp). A partir de estos datos, se determinó la velocidad pico partícula crítica (PPVc), que es el umbral de daño que la roca puede soportar. Luego, se aplicó un modelo predictivo, el de Holmberg and Persson (H&P), para definir el diseño de carga y los tiempos de retardo entre taladros y filas. El estudio concluyó que la aplicación de esta metodología, que incluye la redistribución de la carga de explosivos y el uso de cámaras de aire, permite una reducción significativa del impacto de las vibraciones, mejorando la estabilidad de los taludes.

El trabajo de Luque J (2021), es base para la presente investigación debido a que proporciona una base sólida, con una metodología probada y resultados específicos, que

justifica por qué y cómo la optimización de la perforación y voladura es esencial para la estabilidad de los taludes, al demostrar que las vibraciones de la voladura son un factor crítico que provoca daños, además identifica que el principal problema es la falta de un diseño de perforación y voladura que se adapte al tipo de roca, lo que causa inestabilidad.

Pacco B y Apaza E (2019), en su trabajo de investigación sobre la **reducción del daño generado por voladura a taludes finales por medio de técnicas de precorte para yacimiento tipo pórfido de gran escala superficial.** Se centra en la optimización de la perforación y voladura para reducir el daño y la sobrerotura en los taludes de una mina a tajo abierto. El estudio se desarrolló en un yacimiento donde no existían registros históricos de voladuras controladas, por lo que su objetivo principal fue realizar un diseño de precorte ajustado a las condiciones geomecánicas del macizo rocoso. La metodología consistió en realizar varias pruebas de voladura en campo para ajustar un diseño de precorte, considerando aspectos técnicos como la geología, la geotecnia y la seguridad. La tesis evalúa el impacto de la voladura en el talud, la sobrerotura y el daño generado. Los autores concluyeron que es posible lograr la estabilidad de los taludes finales aplicando un diseño de precorte adecuado, utilizando explosivos y técnicas de desacoplamiento de cargas.

En la investigación de Pacco B y Apaza E (2019), es de importancia para el presente proyecto debido a que al evidenciar que la falta de un diseño de voladura que se ajuste a las particularidades geomecánicas del macizo rocoso es un error que produce malos resultados en el precorte, además proporciona una hoja de ruta metodológica probada y exitosa que podemos tomar en consideración para el desarrollo de la investigación, asi mismo resalta la necesidad de realizar pruebas en campo y ajustar los diseños de acuerdo a las necesidades del proyecto, valida la técnica de precorte y la voladura amortiguada como métodos efectivos para controlar la estabilidad de los taludes. Esto te permite justificar la inclusión de estas técnicas y establece la importancia de determinar los límites de vibraciones para evitar daños al talud, demostrando cómo las técnicas de desacoplamiento de las cargas y el uso de explosivos de menor potencia son cruciales para reducir el daño en la roca.

2.3.Bases teóricas del proyecto.

2.3.1. Definición de taludes.

Un talud es una superficie inclinada de terreno que se forma naturalmente o es creada por el ser humano para proyectos como carreteras o minería. En el contexto minero, los taludes pueden ser parte de las carreteras de acceso y acarreo, y su estabilidad es crucial para la seguridad y la continuidad de las operaciones. Según Ingeoexpert (2024), describe un talud como una superficie con inclinación respecto al plano horizontal, y menciona que se utilizan en construcción para lograr superficies estables en terrenos con pendientes. La inestabilidad de estos taludes puede ser causada por factores como un control deficiente en los parámetros de perforación y voladura, así como por condiciones geológicas complejas y alta sismicidad.

2.3.2. Factores de inestabilidad de los taludes.

La inestabilidad de un talud se debe a una combinación de factores que actúan sobre el equilibrio de fuerzas, ya sea por aumento de las fuerzas actuantes o por disminución de las fuerzas resistentes del terreno. La comprensión de estos factores es fundamental para el diseño y la estabilización de taludes en ingeniería. Los factores que contribuyen a la inestabilidad de los taludes en el contexto de un proyecto minero son una combinación de elementos geológicos y las prácticas operativas. **A continuación, se detallan los principales factores:**

a) **Factores Geológicos y Geotécnicos:**

- **Geología compleja y sismicidad**: La ubicación en una geografía andina compleja, con condiciones geológicas variables y fracturadas, hace que la estabilidad sea crítica. La alta sismicidad en la región sur de Perú exacerba estos riesgos.
- **Características del macizo rocoso**: Un macizo rocoso adyacente a las carreteras con discontinuidades preexistentes, como fallas y diaclasas, es más susceptible a la inestabilidad. Si las características geomecánicas no se consideran de manera integral, la estabilidad se compromete.
- **Erosión del suelo**: La inestabilidad de los taludes se traduce en erosión del suelo, lo que debilita aún más la estructura.

b) **Factores operacionales relacionados con la Voladura:**

- **Diseño de perforación y voladura inadecuado**: Un diseño estandarizado que no se ajusta a las variaciones litológicas y estructurales del macizo rocoso es una causa principal de inestabilidad. Esto crea un problema recurrente y crítico en las carreteras de acceso.
- **Daño por Voladura**: La práctica de voladura sin optimización puede generar efectos indeseables como el sobrerotura (overbreak), donde la energía de la voladura se propaga más allá de la zona de fragmentación deseada. Esto crea microfracturas que debilitan la estructura del talud, disminuyendo su cohesión y aumentando la probabilidad de fallas por deslizamiento o desprendimiento.
- **Vibraciones excesivas**: Las ondas sísmicas producidas por la detonación se transmiten a través del terreno, afectando la estabilidad de los taludes cercanos y provocando la apertura de discontinuidades preexistentes.
- **Retroceso de Voladura (Backbreak)**: Los frecuentes episodios de retroceso que exceden los límites de diseño dejan caras de taludes fracturadas e inestables.
- **Voladura descontrolada**: Un diseño de voladura que no se ajusta a la geología local puede generar grandes bloques de roca o un exceso de finos que contribuyen a la formación de polvo y la pérdida de material del talud.

2.3.3. Métodos de análisis de estabilidad de los taludes.

Los más comunes incluyen el método de equilibrio límite, que se subdivide en varios enfoques como los de Fellenius, Bishop y Spencer, y otros métodos como el de elementos finitos (FEM) y el método de rebanadas. **A continuación, se describen:**

- **Métodos de Análisis de Equilibrio Límite:**

  Los métodos de equilibrio límite son los más tradicionales y ampliamente utilizados para el análisis de la estabilidad de taludes. Se basan en el cálculo del Factor de Seguridad (FS), que es la relación entre las fuerzas resistentes del suelo y las fuerzas que causan la inestabilidad. Un FS mayor que 1.0 indica que el talud es estable.

- **Método de las Rebanadas (Fellenius, Bishop)**: Este método divide el talud en varias "rebanadas" verticales. Se asume una superficie de falla circular y se calculan las fuerzas que actúan en cada rebanada para determinar el FS. El método de Bishop, en particular, es una mejora del método de Fellenius, ya que considera la fuerza de empuje entre las rebanadas, proporcionando resultados más precisos.
- **Método de Círculo de Fricción**: Este método se aplica principalmente a taludes homogéneos y con una superficie de falla circular. Considera la fricción y la cohesión del material para determinar el FS.
- **Método de Talud Infinito**: Se utiliza para taludes largos y uniformes, donde la superficie de falla es paralela a la superficie del talud. Es útil para analizar la estabilidad de capas superficiales de suelo.

- **Métodos de Análisis de Esfuerzo-Deformación:**

Estos métodos son más complejos y avanzados, ya que consideran la deformación del suelo y las tensiones internas. Se utilizan para problemas más complejos o para obtener una comprensión más profunda del comportamiento del talud.

- **Método de los Elementos Finitos (FEM)**: Este método divide el talud en una malla de pequeños elementos. El software de elementos finitos simula cómo las fuerzas de carga y las propiedades del suelo interactúan en cada elemento, lo que permite un análisis detallado del movimiento del talud, la distribución de esfuerzos y la deformación. Es útil para evaluar la estabilidad de taludes con geometrías complejas o con diferentes tipos de materiales.
- **Método de Elementos Discretos (DEM)**: Se utiliza para modelar el comportamiento de los taludes rocosos fracturados. En este método, el macizo rocoso se representa como un conjunto de bloques o partículas individuales que interactúan entre sí a través de juntas y fracturas. Esto es ideal para analizar fallas en cuña o por volcamiento.

- **Métodos de Análisis Probabilístico:**

A diferencia de los métodos determinísticos que calculan un solo valor de FS, los métodos probabilísticos consideran la variabilidad de los parámetros

del suelo (por ejemplo, cohesión y ángulo de fricción interna) y calculan la probabilidad de falla.

- **Método de Monte Carlo**: Este método utiliza simulaciones para generar miles de escenarios de fallas posibles, variando aleatoriamente los parámetros del suelo dentro de un rango definido. Los resultados son una distribución de factores de seguridad y una probabilidad de falla. Es una herramienta poderosa para la gestión de riesgos en proyectos mineros.

2.3.4. Definición de Perforación.

La perforación es un proceso fundamental en la minería que consiste en crear agujeros cilíndricos en el macizo rocoso. Su objetivo principal es preparar el terreno para la voladura, permitiendo que los explosivos se introduzcan y fragmenten la roca de manera controlada y eficiente. En otras palabras, podemos decir que la perforación es la acción de penetrar la roca por efecto de la percusión (Golpe) y de la rotación (fricción-giro). En otras palabras, la perforación es un orificio que se realiza de forma mecánica o manual, para ser rellenado con explosivo (FAMESA, 2019).

2.3.5. Tipos de perforación.

- **Perforación de Producción**: Este tipo de perforación tiene como fin preparar la roca que será fragmentada para su posterior carga, acarreo y procesamiento. Es la etapa inicial para extraer el mineral deseado.
- **Perforación de Precorte (Pre-splitting)**: Esta técnica de perforación se utiliza para crear un plano de debilidad o una fractura de control antes de la voladura principal. Los taladros de precorte se colocan de forma muy cercana y se cargan con explosivos de baja energía. Su detonación aísla el macizo rocoso adyacente, minimizando el daño en el talud final y mejorando su estabilidad a largo plazo.

2.3.6. Malla de perforación.

Es el patrón o disposición de los taladros que se perforan en una roca para la voladura. Es un diseño meticuloso que determina la ubicación, el espaciado, el ángulo y la profundidad de cada taladro, con el objetivo de fragmentar la roca de manera eficiente y controlada. Una malla bien diseñada es esencial para optimizar la voladura, ya que influye directamente en la fragmentación del material, las vibraciones y la

estabilidad de los taludes circundantes. En este caso de malla de perforación para cielo abierto, es el patrón geométrico y sistemático de los taladros que se traza en la superficie de un banco, cantera o tajo minero antes de una voladura. Su propósito principal es definir la ubicación, profundidad y dirección de cada taladro, asegurando que la energía de los explosivos se distribuya de manera uniforme para fragmentar la roca de manera eficiente y controlada.

En esencia, la malla es el plano de trabajo de la voladura, y su diseño es un equilibrio entre la productividad para obtener la fragmentación deseada y la seguridad para controlar las vibraciones, la proyección de roca y el daño al talud final. **Los elementos claves de una Malla de Perforación, son:**

- **Burden (B):** Es la distancia horizontal más corta desde un taladro a la cara libre del banco o a la fila de taladros previamente detonada. Es el factor principal que determina la eficiencia de la voladura.
- **Espaciamiento (S):** Es la distancia entre taladros en la misma fila. Generalmente, es una función del burden.
- **Taladros de contorno:** Son los taladros en la fila más cercana a la estructura final (talud de carretera, límite del tajo). Su diseño es crítico para minimizar el daño y la inestabilidad.
- **Secuencia de encendido:** La malla también incluye el patrón y el tiempo de retardo en el que cada taladro o grupo de taladros será detonado. Este factor es vital para direccionar la energía y controlar las vibraciones.
- **Banco:** Es la superficie horizontal donde se realiza la perforación y la voladura.
- **Altura del Banco:** Es la altura vertical del banco, que determina la profundidad de los taladros y la carga explosiva a utilizar.
- **Carga de Explosivos:** La cantidad de explosivos que se coloca en cada taladro, que se calcula en función del tamaño del taladro, la altura del banco y otros factores.

Un diseño adecuado de la malla de perforación es fundamental para lograr una fragmentación eficiente de la roca y un buen control de la voladura. Factores como el burden, el espaciamiento y la carga de explosivos deben ser cuidadosamente considerados para obtener los mejores resultados. El objetivo es lograr una fragmentación uniforme que facilite la excavación y el procesamiento posterior del material.

2.3.7. Tipos de Mallas de Perforación.

Existen varios tipos de mallas de perforación, y la elección de una depende de factores como las propiedades de la roca, los objetivos de la voladura y las restricciones del sitio. Los tipos más comunes son:

- **Malla Cuadrada**: Los taladros se colocan formando un patrón de cuadrados perfectos. El espaciamiento (distancia entre taladros en la misma fila) es igual al *burden* (distancia entre filas de taladros).
- **Malla Rectangular**: Similar a la malla cuadrada, pero el espaciamiento es diferente al burden. Es la más común en minería a cielo abierto, ya que permite un mayor control sobre la fragmentación.
- **Malla Triangular o en Zig-Zag**: Los taladros de una fila están a medio camino entre los taladros de la fila anterior. Este patrón es efectivo para una fragmentación uniforme en rocas muy duras o para reducir las vibraciones del terreno.
- **Malla de Precorte (Pre-splitting)**: Esta es una técnica de voladura controlada que utiliza una fila de taladros muy cercanos y cargados con explosivos de baja energía. El objetivo no es fragmentar la roca, sino crear una fractura limpia que aísle el macizo rocoso del talud final, lo que mejora significativamente la estabilidad.

2.3.8. Modelo de Kuz-Ram.

El método de Kuz-Ram, fue desarrollado originalmente por Kuznetsov en 1973 y luego modificado y popularizado por Cunningham en 1983. Es un modelo empírico ampliamente utilizado en la industria minera para predecir la fragmentación de la roca después de una voladura a cielo abierto. En otras palabras, podemos decir, que el modelo es herramienta predictiva utilizada en minería para estimar el tamaño de la roca fragmentada después de una voladura. Se basa en el modelo de Kuznetsov para el tamaño medio de fragmentación y la función de distribución de Rosin-Rammler para la distribución granulométrica. Este modelo permite predecir la fragmentación de la roca en función de parámetros como la potencia del explosivo, el volumen de roca volada y las propiedades de la roca.

- **Fórmula y Variables:**

La fórmula central de Kuz-Ram estima el tamaño medio de la roca fragmentada (Xm), utilizando las siguientes variables:

- Parámetros de la voladura:

- **Burden (B):** Distancia desde el taladro a la cara libre.
- **Espaciamiento (S):** Distancia entre taladros.
- **Diámetro del taladro (D):** El ancho de la perforación.
- **Longitud de la columna explosiva (L):** La cantidad de explosivo en el taladro.
- **Densidad de la carga de explosivo (ρe):** La masa de explosivo por unidad de volumen.
- **Volumen de roca volada (V):** El volumen de roca movido por la voladura.

- Propiedades de la roca:

- **Factor de Roca (A):** Un factor que representa las características geomecánicas de la roca, como su dureza y fracturamiento natural. Un valor alto indica una roca más resistente a la fragmentación.
- **Factor de Carga (FC):** La relación entre la masa de explosivo y la masa de roca volada.

- **Aplicación del método Kuz-Ram en la Minería a Cielo Abierto:**

El valor del método Kuz-Ram en la minería reside en su capacidad para actuar como una herramienta de diagnóstico y diseño:

- Diagnóstico del proceso actual: Al ingresar los parámetros de voladura de la operación actual, el modelo predice la distribución de tamaños de la roca. Esta predicción se puede comparar con la granulometría real (medida con software o inspección visual), lo que ayuda a identificar deficiencias en el diseño.

- Optimización del diseño: Permite a los ingenieros de voladura realizar simulaciones cambiando variables clave como el burden y el espaciamiento. Al ajustar estos parámetros, se puede predecir cómo se modificaría la fragmentación y la eficiencia de la voladura antes de ejecutarla en el campo. Esto reduce los costos de prueba y error.

- Control de vibraciones: Aunque no es un modelo directo para vibraciones, una voladura optimizada por Kuz-Ram para una fragmentación uniforme tiende a ser

más eficiente y, por lo tanto, produce menos vibraciones excesivas que pueden dañar las estructuras circundantes, como los taludes.

- **¿Cómo funciona el modelo Kuz-Ram?**

  a) Determinación del tamaño medio de fragmentación (X50): El modelo de Kuznetsov estima el tamaño medio de fragmentación, que es el tamaño al cual el 50% de la roca fragmentada es más grande y el otro 50% es más pequeño.

  b) Distribución granulométrica: Se utiliza la función de distribución de Rosin-Rammler para describir la distribución del tamaño de los fragmentos. Esta función define la probabilidad de encontrar fragmentos de cierto tamaño en la roca fragmentada.

  c) Parámetros de entrada: El modelo Kuz-Ram utiliza parámetros como la carga explosiva, el volumen de roca volada, las propiedades de la roca (como la resistencia a la tracción y la dureza) y la geometría de la voladura (como la carga en banco y el espaciamiento de los taladros).

  d) Predicción: Con estos parámetros, el modelo Kuz-Ram calcula la distribución del tamaño de los fragmentos, permitiendo predecir la cantidad de roca de diferentes tamaños que se obtendrá después de la voladura.

- **Ventajas del modelo Kuz-Ram:**

  - **Planificación de voladuras:** Permite optimizar el diseño de la voladura para lograr la fragmentación deseada, lo que puede mejorar la eficiencia de la excavación y el procesamiento posterior de la roca.
  - **Control de costos:** Al predecir la fragmentación, se pueden minimizar los costos asociados con la manipulación y procesamiento de la roca, como el consumo de energía en chancado y transporte.
  - **Seguridad:** La predicción de la fragmentación puede ayudar a prevenir problemas de seguridad asociados con voladuras mal diseñadas, como el lanzamiento de rocas grandes o la formación de polvo excesivo.

- **Limitaciones del modelo Kuz-Ram:**

  - **No considera efectos temporales:** El modelo original no considera el efecto del tiempo en la fragmentación, como el retraso en la detonación de los explosivos o la influencia de la vibración en la roca circundante.

- **No considera límites superiores de tamaño:** Tampoco considera límites superiores de tamaño de fragmentos, que pueden ser importantes en ciertas aplicaciones.
- **Sensibilidad a parámetros:** La precisión del modelo depende de la exactitud de los parámetros de entrada, especialmente las propiedades de la roca, que pueden variar significativamente en una operación minera.

2.3.9. Distribución de Rosin-Rammler.

La distribución de Rosin-Rammler, también conocida como distribución Rosin-Rammler-Sperling (RRSB), es un modelo matemático utilizado para describir la distribución del tamaño de partículas, especialmente en materiales pulverizados o granulares generados por procesos de molienda. La distribución de Rosin-Rammler no es un modelo de voladura, sino una función de distribución estadística que se utiliza para analizar y graficar el tamaño de los fragmentos de roca resultantes de una voladura. Su principal propósito es describir la distribución granulométrica del material volado, es decir, el porcentaje acumulado de roca que pasa por un tamiz de cierto tamaño, es decir, se basa en una función exponencial y se representa mediante una ecuación que relaciona el porcentaje acumulado de partículas mayores a un tamaño dado con los parámetros de la distribución. La distribución de Rosin-Rammler es una herramienta de análisis que se complementa perfectamente con el modelo de Kuz-Ram. **Su aplicación en la minería a cielo abierto es la siguiente:**

- **Evaluación de la Fragmentación:** Una vez que se ha realizado una voladura, se toman muestras del material fragmentado o se utiliza tecnología de fotogrametría (como un dron con software especializado) para medir el tamaño de la roca.
- **Análisis Estadístico:** Los datos de tamaño se ajustan a la ecuación de Rosin-Rammler para generar una curva que representa la distribución de la granulometría. **La fórmula se expresa como:** $R(x)=e-(x/Xc)n$
  - **R(x):** Es el porcentaje en peso del material retenido en un tamiz de tamaño x.
  - **x:** Es el tamaño de la partícula.
  - **Xc:** Es el "tamaño característico" o de la "granulometría media", que representa el 63.2% del material que pasa.

- **n:** Es el "índice de uniformidad" o "parámetro de distribución". Un valor alto de n indica que la fragmentación es más uniforme (con menos finos y gruesos), lo que generalmente es deseado para la eficiencia del proceso.

- **Comparación y Optimización:** Al usar esta distribución, se puede comparar la calidad de la fragmentación de la voladura actual con la fragmentación que se esperaría de un diseño optimizado. Por ejemplo, una voladura bien diseñada según el método de Kuz-Ram debería generar una curva de Rosin-Rammler más estrecha (con un n más alto) que la voladura actual, lo que demuestra que la fragmentación es más uniforme.

2.3.10. Definición de Voladura.

Es un proceso controlado y fundamental en la minería que utiliza explosivos para fracturar y fragmentar el macizo rocoso. Su propósito principal es preparar el material para su posterior excavación, carga y transporte. Este método es crucial para la extracción de minerales, ya que permite remover grandes volúmenes de roca de manera eficiente. Puede ser a cielo abierto, galerías y túneles.

2.3.11. Tipos de Voladura.

La voladura se clasifica principalmente según su propósito y el grado de control que se requiere. **A continuación, se detallan los tipos más comunes, destacando su función principal:**

- **Voladura de Producción:** Es la voladura principal que se realiza para fragmentar grandes volúmenes de roca en una mina a cielo abierto o subterránea. Su objetivo es preparar el material para que pueda ser cargado y transportado de manera eficiente. Utilizando una malla de perforación optimizada con grandes cantidades de explosivo para maximizar la fragmentación. El objetivo es una alta productividad y se aplica en la extracción masiva de mineral o estéril.
- **Voladura Controlada:** Este tipo de voladura está diseñado para proteger el macizo rocoso circundante, minimizar el daño y asegurar la estabilidad de las estructuras. Es crucial para el desarrollo de taludes finales y túneles. Dentro de esta tenemos:
    - **Precorte (Pre-splitting):** Es una técnica donde se perfora una fila de taladros muy cercanos y se cargan con explosivos de baja energía. Estos se detonan antes de la voladura principal para crear una fractura que aísla el macizo rocoso del área de voladura, protegiendo así el talud.

- **Voladura Amortiguada (Buffer Blasting):** Se utiliza en la última fila de taladros antes de un talud final. La carga explosiva es menor y se busca una menor potencia para reducir el daño en la roca.
- **Recorte (Trim Blasting):** Se emplea para corregir o refinar el perfil de un talud o una excavación, eliminando pequeñas cantidades de roca de forma precisa.

- **Voladura Secundaria:** Se utiliza para fragmentar aquellos bloques de roca que, después de la voladura principal. Dentro de esta tenemos:
  - **Martilleo:** Es la fragmentación de bloques grandes con un martillo hidráulico montado en una excavadora, aunque no es una voladura.
- **Voladura de Zanjas:** Se usa para excavar zanjas o trincheras para tuberías, cimentaciones, y otras obras lineales. El diseño de la voladura se enfoca en dirigir el material fragmentado hacia el área de excavación, con el mínimo de daño a las paredes de la zanja.

2.3.12. Técnicas de Voladura.

La optimización del proceso de perforación y voladura es crucial para mejorar la estabilidad de los taludes y mitigar los riesgos en un proyecto minero. Un control deficiente en estos procesos puede generar inestabilidad geotécnica, fracturar las rocas más allá de la zona de diseño y aumentar la probabilidad de fallas y deslizamientos. A continuación, se detallan las técnicas de voladura que se pueden implementar para lograr un control adecuado y asegurar la estabilidad de las estructuras.

- **Técnicas de Voladura Controlada:**

La voladura controlada busca minimizar el daño al macizo rocoso adyacente a la voladura principal, lo que es esencial para la estabilidad a largo plazo de los taludes.

- **Precorte (Pre-splitting):** Esta técnica crea una fractura de control antes de la voladura principal. Se perforan una serie de taladros muy cercanos entre sí y se cargan con explosivos de menor energía, que se detonan simultáneamente o con retardos muy cortos. El objetivo es inducir una fractura limpia y continua que actúe como una barrera, aislando el macizo rocoso del talud final y absorbiendo la energía de la voladura principal. La implementación de un diseño de precorte adecuado reduce la sobre-rotura y el daño generado en el talud.
- **Voladura Amortiguada (Buffer Blasting):** Se utiliza en la fila de taladros más cercana al talud final. Al igual que el precorte, emplea explosivos

de menor potencia y con diámetros más pequeños. Su diseño de voladura incluye técnicas de desacoplamiento de cargas. Esta técnica reduce la zona de daño y las vibraciones excesivas que pueden debilitar la estructura del talud.

- **Optimización de Parámetros de Voladura:**

  Además de las técnicas controladas, la optimización de los parámetros del diseño de voladura es fundamental para mejorar la estabilidad.

  - **Selección de Explosivos:** Se deben seleccionar explosivos que tengan la energía adecuada para fragmentar la roca de manera eficiente sin causar daño excesivo al talud adyacente.
  - **Secuencia de Encendido:** La secuencia de encendido debe diseñarse cuidadosamente para evitar la superposición de ondas sísmicas en la zona del talud, lo que reduce las vibraciones y el daño al macizo rocoso. Los detonadores electrónicos permiten una precisión milimétrica en los tiempos de retardo, lo que es clave para controlar la voladura.
  - **Malla de Perforación:** Un rediseño o selección de la malla de perforación, considerando el espaciamiento y el burden, puede mejorar la fragmentación de la roca y reducir el daño al macizo rocoso.

- **Tecnologías de Apoyo y Monitoreo:**

  Para complementar las técnicas de voladura, es esencial usar tecnologías que permitan el monitoreo y la evaluación del proceso.

  - **Monitoreo de Vibraciones:** El uso de sismógrafos para medir la velocidad pico partícula (PPV) permite determinar el umbral de daño que la roca puede soportar y ajustar el diseño de la voladura para mitigar el impacto.
  - **Software Especializado:** Programas como JKSimblast o similares permiten modelar y predecir el impacto de diferentes diseños de voladura en el macizo rocoso.
  - **Técnicas Sísmicas:** La técnica sísmica Cross Hole, por ejemplo, puede medir la velocidad de la onda P (Vp) en el macizo rocoso, ayudando a determinar la velocidad pico partícula crítica (PPVc) para evitar daños.

2.3.13. Indicadores del proceso de perforación y voladura.

Los indicadores de rendimiento del proceso de perforación y voladura son esenciales para monitorear, evaluar y optimizar las operaciones mineras. Estos

indicadores permiten medir la eficiencia, la seguridad y el impacto ambiental del proceso.

- **Indicadores de Perforación:**
    - **Tasa de Penetración (TP)**: Mide la velocidad a la que el taladro penetra la roca, generalmente en metros por hora (m/h). Un aumento en esta tasa puede indicar una mejor selección de brocas o una optimización de los parámetros de perforación.
    - **Utilización de los equipos**: Porcentaje del tiempo total en el que el equipo de perforación está realmente operando. Esto ayuda a identificar tiempos muertos por mantenimiento, fallas o cambios de turno.
    - **Precisión de la Perforación**: Mide la desviación de los taladros respecto a su diseño original en términos de ubicación, inclinación y profundidad. Una baja precisión puede comprometer la eficiencia de la voladura y la estabilidad del talud.
    - **Costo de Perforación por metro**: El costo total de la perforación (mano de obra, brocas, energía, mantenimiento) dividido por la cantidad total de metros perforados. Un costo bajo indica una operación más eficiente.
- **Indicadores de Voladura:**
    - **Factor de Carga**: Es la cantidad de explosivo utilizada por metro cúbico o tonelada de roca volada. Un factor de carga óptimo maximiza la fragmentación y minimiza los costos.
    - **Fragmentación**: Mide el tamaño promedio de la roca después de la voladura. Se busca una fragmentación uniforme que facilite el carguío, el transporte y la molienda. Se puede medir visualmente o con análisis fotográfico.
    - **Vibración del Terreno (PPV)**: La Velocidad Pico Partícula (PPV) mide la intensidad de las ondas sísmicas generadas por la voladura. Es un indicador crítico para controlar el impacto en estructuras cercanas y la estabilidad del talud.
    - **Voladura Controlada**: Indicadores específicos para técnicas como el precorte, que miden la calidad del plano de fractura creado.
    - **Overbreak (Sobrerotura)**: Mide el daño en el macizo rocoso más allá de los límites de diseño. Un overbreak bajo indica una voladura controlada y estable.

- **Costo de Voladura por Tonelada**: El costo total de la voladura (explosivos, mano de obra, detonadores) dividido por la cantidad de material movido.

- **Indicadores de Resultados:**
  - **Costos de Mantenimiento de Taludes:** Reducción de los costos asociados con la estabilización, saneo y mantenimiento de los taludes.
  - **Impacto Ambiental:** Indicadores como la medición de polvo (PM), el ruido y la erosión. La optimización del proceso de perforación y voladura puede reducir significativamente estos impactos.

2.3.14. Iniciadores de booster-cordón detonante.

Son un sistema de iniciación no eléctrico que se utiliza para asegurar la detonación de una columna de explosivo principal en operaciones de voladura. Este sistema es crucial para garantizar que toda la carga explosiva detone de manera confiable y completa, maximizando la energía liberada y logrando una fragmentación óptima de la roca. El iniciador por excelencia en minería es la prima que corresponde al conjunto de booster-cordón detonante o al conjunto booster-detonador.

Booster: Es una carga explosiva potente que tiene por función completar el trabajo de iniciación, permitiendo su propagación en la columna de explosivo, así como crear zonas de alta liberación de energía a lo largo de dicha columna. Los más utilizados en la actualidad son fabricados con PTN y TNT, por ser insensibles al impacto y fricciones, ser pequeños, compactos, fáciles de manejar y además no se alteran con el tiempo.

Detonador: Alto explosivo que inicia la detonación del booster. Puede ser no eléctrico, eléctrico o electrónico. (Delgado, 2014).

En general, el rendimiento de un iniciador booster-detonador está definido por su presión de detonación, su dimensión y su forma. Cuando mayor es la presión de detonación, mayor será su disponibilidad para la iniciación. Asimismo, el diámetro del iniciador presenta una influencia similar sobre la velocidad de detonación (VOD) del explosivo (ANFO), mientras que el peso, tipo y forma de los iniciadores no tiene influencia en la VOD. Por lo cual, los iniciadores de booster-cordón detonante son un sistema seguro y eficaz que permite transferir la energía de un iniciador a una carga explosiva principal, garantizando una detonación confiable y controlada, lo cual es fundamental para una voladura exitosa en la minería.

2.3.15. Explosivos y sus tipos.

Un explosivo es una sustancia química o una mezcla de sustancias que, bajo ciertas condiciones, reacciona de manera extremadamente rápida para producir una gran cantidad de calor y gases. Esta reacción, llamada detonación, genera una onda de choque y una presión alta que se utiliza para fracturar y mover grandes volúmenes de roca en operaciones mineras o de construcción. **A continuación, mencionamos algunos tipos de explosivos:**

- **La Emulsión:** Compuesto por una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Los agentes de emulsión no son sensibles al detonador y es por eso, por lo que necesitan ser detonados con un cebo reforzado de alta presión de detonación (FAMESA, 2019). En la Figura Nº1, se muestra la emulsión (Emulnor 3000).

Figura 1. *Emulsión (Emulnor 3000).*

Fuente: Explosivos Industriales (2014).

- **ANFO:** Está constituido principalmente por Nitrato de Amonio (NH4NO3), el cual es una sal inorgánica de color blanco con temperaturas de fusión de 160.0°C. La mezcla de este compuesto con cualquier sustancia combustible va a producir un agente explosivo. El contenido de combustible juega un rol importante en las propiedades del ANFO (FAMESA, 2019).La reacción de descomposición del sistema equilibrado con oxígeno es la siguiente :

$$3NH_4NO_3 + CH_2 + 3N_2 + 7H_2O + CO_2$$

La cantidad de combustible es un ingrediente trascendental. En la Figura Nº2 se grafica el impacto del % de FO en el rendimiento energético en el ANFO.

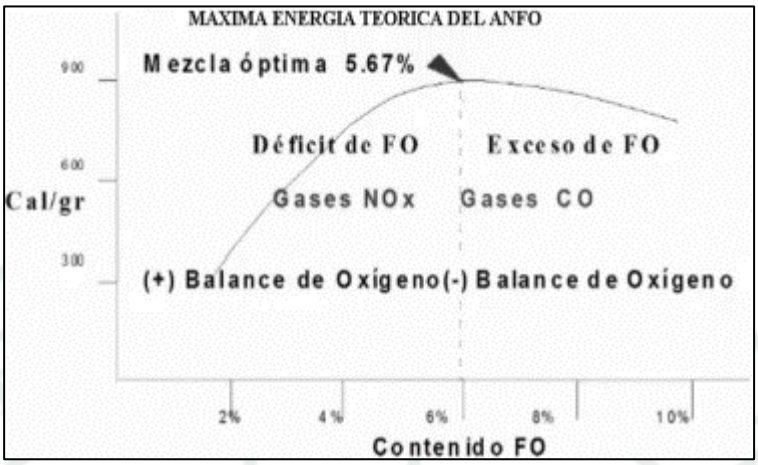


Figura 2. *Máxima Energía Teórica del ANFO.*

Fuente: Explosivos Industriales (2014).

2.3.16. Propiedades Clave de los Explosivos.

- **Velocidad de Detonación (VOD)**: Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo. Una VOD alta fragmenta la roca de manera más intensa.
- **Sensibilidad**: Es la facilidad con la que un explosivo puede ser iniciado.
- **Potencia**: Es la energía total que se libera durante la detonación, que determina el trabajo que puede realizar el explosivo.
- **Resistencia al Agua**: Es la capacidad de un explosivo para mantener sus propiedades en un ambiente húmedo, lo cual es crucial para su uso en taladros que tienen agua.

2.3.17. Definición de Velocidad de Detonación (VOD).

Es la velocidad a la que la onda de choque de una voladura se propaga a través de un explosivo, medida en metros por segundo (m/s). Es una propiedad fundamental que determina la energía con la que un explosivo fragmenta la roca. Un explosivo con una VOD alta produce una fragmentación más fina, ya que genera una onda de choque más intensa y rápida, es decir, es la velocidad a la que el frente de onda de choque viaja a través de un explosivo en detonación. Las velocidades de detonación son siempre mayores a la velocidad del sonido en un ambiente natural. Además, el VOD es proporcional a la potencia brindada por la detonación del explosivo. Según Porras

(2012), esto significa que, a mayor velocidad, mayor poder rompedor o brisance. También, el VOD depende del diámetro del taladro y el grado de confinamiento del explosivo, y su unidad de medida es el metro por segundo.

- **Factores que Afectan la VOD:**
  - **Composición química del explosivo**: La VOD varía según el tipo de explosivo. Los explosivos de alta potencia, como el PETN, tienen VODs muy altas.
  - **Diámetro de la carga**: Un diámetro mayor generalmente aumenta la VOD, ya que la onda de choque se propaga con mayor eficiencia en un explosivo de mayor volumen.
  - **Confinamiento**: Cuando un explosivo está bien confinado (por ejemplo, dentro de un taladro de perforación), su VOD aumenta, ya que la energía de la onda de choque no se disipa en el aire.
  - **Densidad y porosidad**: Una mayor densidad y una menor porosidad en el explosivo permiten una propagación más eficiente de la onda de detonación.

2.3.18. Definición de Vibraciones.

Las vibraciones en el contexto de la voladura son ondas de energía sísmica que se propagan a través del suelo y las rocas. Estas vibraciones, causadas por la detonación de explosivos, pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de las estructuras cercanas, como los taludes, y en las construcciones adyacentes. Para entender las vibraciones, se deben comprender dos aspectos importantes: la propagación en el medio y el movimiento de las partículas. Lo anterior induce a considerar dos tipos de velocidades: de la onda, que tiene que ver con el medio rocoso; y de partícula, relativo a las oscilaciones de la partícula.

2.3.19. Tipos de Vibraciones.

Las vibraciones generadas por la voladura se pueden clasificar en diferentes tipos de ondas, según su modo de propagación:

- **Ondas de Cuerpo:**
  - **Ondas P (Primarias):** Son ondas de compresión y descompresión. Se propagan más rápido que cualquier otra onda sísmica, moviendo el medio en la misma dirección que la onda.

- **Ondas S (Secundarias):** Son ondas de cizalla o corte. Se propagan más lento que las ondas P, moviendo el medio perpendicularmente a la dirección de la onda.

- **Ondas de Superficie:**
  - **Ondas de Rayleigh:** Son las ondas superficiales más lentas. Su movimiento es elíptico y retrógrado, lo que las hace particularmente dañinas para las estructuras en la superficie del suelo.
  - **Ondas de Love:** Son ondas de cizalla que se propagan solo en la superficie del terreno. Mueven el medio de forma horizontal y perpendicular a la dirección de propagación.

A continuación, en la Figura Nº3 se muestra el comportamiento de las ondas P, ondas S, los tipos de ondas:

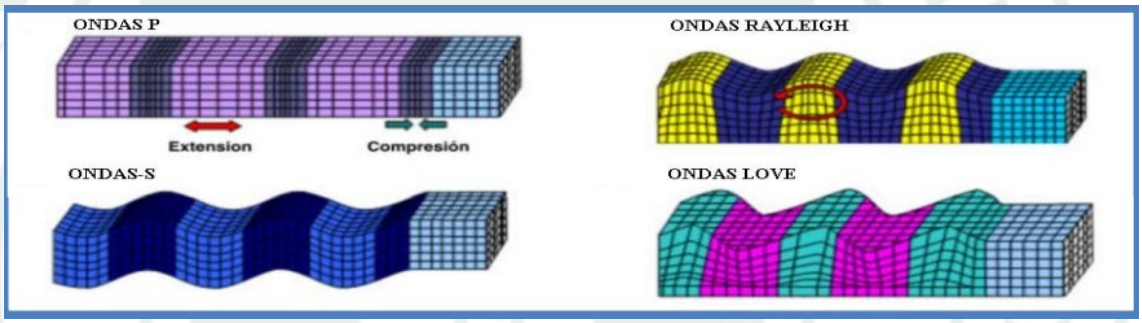


Figura 3. *Comportamiento de las ondas P, ondas S.*

Fuente: Saez, 2016.

2.3.20. Propiedades de las ondas.

Las propiedades más importantes de propagación de las ondas en los entornos rocosos son:

a) **Frecuencia de vibraciones:** muestra el número de veces por segundo que la onda pasa por un ciclo completo. Las ondas vibracionales registradas a distancias lejanas tienden a mostrar bajas frecuencias a diferencias de las medidas a distancias cortas.

b) **Amplitud de vibraciones:** es un indicador de la cantidad de energía y fuerza de una onda en vibración. En el caso de la energía, esta es igual al cuadrado de la amplitud. Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor en campo y el efecto físico es el deslazamiento real, con la cual se infiere la velocidad y la aceleración.

c) Longitud de onda de vibración: muestra la distancia recorrida por la onda, durante el tiempo de compresión y tensión; es decir, el periodo de la onda. Se representa por la sigla λ, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = VP / f$$

λ: lambda en unidades de longitud (m)

VP: velocidad propagación (m/s)

F: frecuencia (1/s)

d) Velocidad de propagación: muestra la velocidad con la cual la onda se transmite en el macizo rocoso. La gran mayoría de las rocas tiene velocidades de transmisión de 3000 a 5000 m/s, los registros de valores superiores a los 6000 m/s son consideradas valores anómalos y deberían estar sujetos a nuevas mediciones. En el caso de registrarse valores menores a 1500 m/s, también deben estar sujetos a nueva medición, debido a que muestran valores de fracturamiento elevados.

2.3.21. Sistemas de iniciación.

El sistema de iniciación transfiere la señal de detonación de taladros a taladros en la misma fila y entre filas, en un tiempo preciso. Este sistema no solo controla la secuencia de disparo de los taladros, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de la fragmentación producida, el sobre quiebre y la violencia con que esto ocurre. De acuerdo Pangue (2016), la selección del sistema de iniciación es una de las consideraciones más importantes dentro del diseño de la voladura, dado que conecta los taladros, trasmite la energía y es el responsable de una detonación segura.

2.3.22. Sistemas de detonación electrónicos.

La necesidad de mejorar los resultados de las voladuras y controlar las vibraciones ha hecho que surgiera un incremento de la demanda de la precisión de los detonadores existentes. La última generación de detonadores de alta precisión son los detonadores electrónicos, permitiendo un excelente control del proceso de fragmentación, así como de las vibraciones y proyecciones. Contienen un circuito integrado en un chip en lugar del elemento de retardo no eléctrico. En los detonadores convencionales la precisión en el disparo está en el rango de los milisegundos.

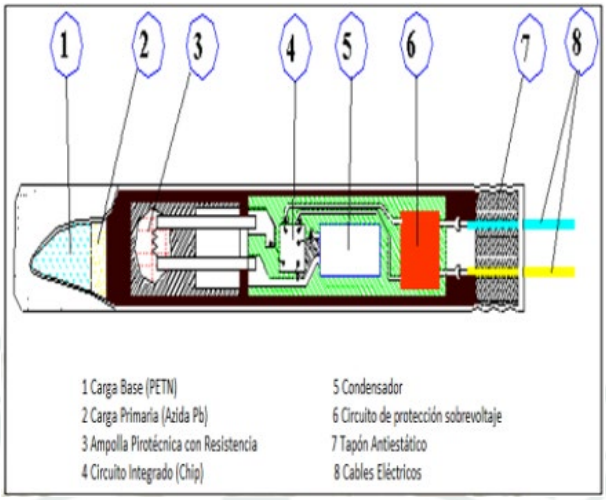


Figura 4. *Componentes el sistema de iniciación electrónico.*

Fuente: Pangue (2016).

El tiempo de duración del periodo, se programa y almacena instantes antes de la voladura sobre una RAM o una Eprom si el explosor (tarjeta Hardware) admite pre-programación, las posibilidades son tan amplias que algunos fabricantes ofrecen rangos de tiempos que van desde 1 milisegundo hasta 15 segundos. **Otras características destacables son:**

- No pueden explosionar sin un código de activación única.
- Reciben la energía de iniciación y el código de activación desde el aparato de programación y mando.
- Están dotados de protecciones frente a sobre tensiones: Los pequeños excesos de carga se disipan internamente a través de los circuitos de seguridad, mientras que los altos voltajes (> 1000 v.) se limitan por medio de un cortacorriente.
- Son insensibles a los efectos de tormentas, radio frecuencia y energía estática.
- Tensión de operación es pequeña (< 50 v), que es una ventaja considerando el riesgo de corrientes vagabundas. (Vergara Pangue, 2016).

2.3.23. Secuencia de iniciación y retardo.

La secuencia de iniciación y retardo es un proceso esencial en la voladura que controla el orden y el tiempo exacto en que se detonan los explosivos. Su objetivo principal es dirigir la energía de la voladura de manera controlada, optimizando la fragmentación de la roca, minimizando las vibraciones del terreno y protegiendo las

estructuras cercanas, como los taludes. Por ende, una de las etapas más importantes del diseño de voladura es poder definir la secuencia y los tiempos de retardo. Muchas veces para determinar los tiempos de secuencia, se utilizaba el criterio experto del tronador o benchmark. Luego, con el tiempo y la experiencia en la mina, se modificaban.

Actualmente existen formulismos, métodos y softwares para determinar los tiempos y la secuencia de salida de la voladura. Una de las variables más desconocidas es el constituido por la secuencia de encendido y los tiempos de retardo entre los taladros de una voladura. Los esquemas nominales de perforación con un burden y espaciamiento se modifican radicalmente con la secuencia de iniciación, pasando a otros valores denominados efectivos. Luego, aumentos en los costos al optimizar la secuencia, resultan muy favorables en los costos globales del proceso. (Vergara Pangue, 2016).

- **Tipos de Retardos:**
    - **Retardos de Fila (Inter-row):** Se aplican entre los taladros de una misma fila, permitiendo que el frente de fragmentación avance de un taladro a otro, es decir es el tiempo que transcurre entre la detonación de una fila de taladros y la fila subsiguiente. El retardo entre filas permite que el material fragmentado de la primera fila se mueva hacia la cara libre del banco antes de que la siguiente fila detone. Esto reduce el confinamiento de la segunda fila y maximiza la eficiencia de la energía del explosivo. Si este retardo es demasiado corto, la segunda fila detonará antes de que la primera haya sido liberada, lo que resultará en un "confinamiento" excesivo que puede causar una mala fragmentación y un aumento de las vibraciones y la proyección de roca. Este retardo es típicamente más largo que el retardo entre taladros, sus valores varían según el diseño, el tipo de roca y el objetivo, pero a menudo se encuentran en el rango de 25 a 100 ms o más.
    - **Retardos de Taladro (Inter-hole):** Se aplican entre filas de taladros, lo que permite que una fila detone por completo antes de que la siguiente se inicie, es decir, es el tiempo que transcurre entre la detonación de un taladro y el siguiente taladro en la misma fila. Este retardo tiene como objetivo principal la creación de una nueva cara libre para cada taladro que detona. Al detonar los taladros de forma secuencial, cada detonación tiene una cara libre a la cual expandirse, lo que mejora significativamente la

fragmentación y reduce las vibraciones. Si todos los taladros de una fila detonaran al mismo tiempo, el confinamiento sería máximo, resultando en un levantamiento masivo de la roca y una pobre fragmentación. El retardo entre taladros es generalmente más corto que el retardo entre filas y suele oscilar entre 8 y 25 ms.

2.3.24. Sobrerotura y control de daño.

El sobrerotura, también conocido como *overbreak*, se refiere al exceso de roca que se rompe o desplaza más allá del diseño previsto en una explosión, es decir, es el daño que se produce en el macizo rocoso más allá de los límites diseñados de una voladura. En otras palabras, es la fractura incontrolada de la roca que se extiende hacia el talud final o la estructura adyacente, dejando una superficie irregular e inestable. Este daño se manifiesta en forma de microfisuras, fracturas y la alteración de la estructura del macizo rocoso. La sobrerotura ocurre cuando la energía de la detonación, en lugar de ser confinada para fragmentar eficientemente la roca en el volumen de diseño, se disipa a través del terreno en forma de ondas de choque y vibraciones excesivas. Estas ondas debilitan el macizo rocoso adyacente, reduciendo su cohesión y aumentando su susceptibilidad a fallas o desprendimientos.

Por otro lado, el control de daño o damage control, es el conjunto de técnicas y estrategias de ingeniería de voladura que se aplican para prevenir el sobrerotura y minimizar la alteración del macizo rocoso. Su objetivo principal es asegurar la estabilidad a largo plazo de las excavaciones, como los taludes, y reducir los costos asociados al saneo y mantenimiento, el control de daño se logra principalmente a través de la aplicación de voladura controlada.

Por ende, el sobrerotura y el daño frecuentemente se incrementan con intervalos de retardo muy cortos, estos intervalos de retardos cortos pueden aumentar el daño ya sea por vibración o por sobre confinamiento. Si la última fila de taladros está muy confinada, el movimiento principal de la roca se lleva a cabo en vertical producto de la explosión de gases, puesto que la expansión comienza en la base de los taladros, se tiende a formar un efecto muy grande de caracterización, causando un fracturamiento extenso en la nueva cara del banco. Esto se manifiesta como un levantamiento en la superficie, y puede ser aparente a distancias hasta de una altura de banco detrás de la última fila de hoyos, así el mecanismo principal del daño por sobre quiebre es, por lo tanto, la expansión de los gases. La influencia de gases de alta presión

se puede minimizar al disminuir el grado de confinamiento de la última fila de taladros, por los intervalos largos de retardo entre las dos últimas filas se usan frecuentemente para minimizar este efecto, en conjunto a la perforación de taladros de precorte.

Por lo cual, el retardo debe ajustarse para asegurar que el aumento de la vibración de más de un taladro no produzca niveles de vibración mayores que el nivel máximo de solo unos taladros. Para efectuar esto, el intervalo de retardo debe relacionarse a la duración del pulso de vibración dinámica a una distancia de 1 a 2 dimensiones de burden desde los taladros. Esto variará desde alrededor de 10 milisegundos para una roca de resistencia alta y alto módulo, hasta 50 milisegundos para tipos de rocas débiles, más plásticas tales como la arenisca, roca sedimentaria y calizas meteorizadas. Es importante considerar que la vibración relacionada al daño en la cara de los bancos está controlada por la concentración lineal de carga en los taladros que, a su vez, está controlado por la elección del diámetro de los taladros. No existen pruebas que indiquen que el reducir el factor de carga se reducirá el daño, al contrario, hay indicaciones que el daño se puede aumentar reduciendo el factor de carga a un punto donde las cargas se sobre confinan. Altos factores de carga promueven movimientos de burden que reducen el confinamiento y la caracterización de las cargas. (Vergara Pangue, 2016).

2.3.25. Relación entre la voladura y la inestabilidad de taludes.

La relación entre la voladura y la inestabilidad de taludes es directa y crítica, ya que una voladura mal planificada puede ser un factor principal en la inestabilidad geotécnica de las estructuras.

- **Impacto de la Voladura en la Estabilidad de Taludes:**
    - **Daño al macizo rocoso**: La voladura sin control causa fracturas y microfracturas en el macizo rocoso más allá de la zona de diseño. Este daño residual, conocido como "overbreak" o retroceso de voladura, reduce la cohesión y la resistencia de la roca, lo que disminuye la estabilidad del talud.
    - **Vibraciones del terreno**: La detonación genera ondas sísmicas que se propagan por el terreno. Las vibraciones excesivas pueden reactivar discontinuidades preexistentes, como fallas y diaclasas, y debilitar los planos de debilidad en la estructura de la roca. Esto aumenta

significativamente la probabilidad de fallas por deslizamiento o desprendimiento.

- **Propagación de la energía**: Una voladura mal diseñada puede dirigir la energía de la detonación hacia el talud, en lugar de hacia la zona de fragmentación deseada. Esta energía descontrolada fractura la roca del talud, creando una superficie irregular e inestable.
- **Erosión y meteorización**: La inestabilidad inicial causada por la voladura hace que el talud sea más susceptible a la erosión superficial y a la meteorización, lo que, con el tiempo, degrada aún más la estructura y acelera el proceso de inestabilidad.

La inestabilidad de los taludes causada por una voladura deficiente tiene múltiples consecuencias negativas para la operación minera y el medio ambiente:

- **Riesgos de seguridad**: La caída de rocas y los deslizamientos representan un riesgo significativo para el personal y el equipo, lo que puede causar accidentes graves.
- **Costos operativos**: La inestabilidad requiere operaciones de saneo y mantenimientos frecuentes, lo que interrumpe la producción y aumenta los costos.
- **Impacto ambiental**: La inestabilidad de los taludes produce una mayor erosión y la generación de polvo, lo que afecta la calidad del aire y del agua en el entorno circundante.

2.4. Hipótesis

- ***Hipótesis General:***

La optimización integral del proceso de perforación y voladura, mediante la implementación de técnicas de voladura controlada precorte y buffer, y el uso de sistemas de iniciación electrónicos ajustados a las condiciones geomecánicas, mejora significativamente la estabilidad de los taludes en las carreteras de acceso del proyecto minero en la zona sur de Perú, reduciendo las vibraciones y el daño al macizo rocoso.

- ***Hipótesis Específicas:***

- Los parámetros actuales de perforación y voladura, caracterizados por el uso de mallas cuadradas, explosivo ANFO en columnas completas y detonadores

no eléctricos (NONEL), son los factores determinantes que generan niveles excesivos de vibración (VPP > 35 mm/s) y sobrerotura (> 1.2 m), comprometiendo la estabilidad de los taludes.

- La aplicación de un diseño de malla con técnicas de precorte y filas amortiguadas (buffer), combinado con la precisión de detonadores electrónicos para optimizar la secuencia de salida, reducirá la Velocidad Pico Partícula (VPP) por debajo del umbral crítico de 12 mm/s y minimizará el *backbreak* a menos de 0.3 metros.
- La implementación del plan de optimización reducirá los costos operativos asociados al saneo y mantenimiento de vías, y mitigará los riesgos de seguridad por caída de rocas, garantizando la continuidad operativa y la sostenibilidad ambiental del proyecto.

2.5. Variables

2.5.1. Variables Dependientes.

Tabla 1. *Variables Dependientes.*

Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida
Estabilidad de los taludes en carretera	**Vibraciones del Terreno**	Velocidad Pico Partícula (PPV/VPP)	mm/s
		Frecuencia Dominante	Hertz (Hz)
		Aceleración pico	mm/s²
	Daño al Macizo Rocoso (Sobrerotura)	Backbreak (Retroceso de voladura)	Metros (m)
		Overbreak (Sobrerotura lateral)	
		Profundidad de grietas inducidas	
	Calidad del Talud Final	Factor de Seguridad (FS)	Adimensional
		Presencia de "Cañas" (Medios cañones)	% de cañas visibles
		Volumen de material desprendido (Saneo)	m³/h (Horas de limpieza)

Fuente: Elaboración Propia (2025).

2.5.2. Variables Independientes.

Tabla 2. *Variables Independientes.*

Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida
Optimización integral del proceso de perforación y voladura	**Diseño o Selección de Malla y Geometría**	Burden (B)	Metros (m)
		Espaciamiento (S)	Pulgadas/mm
		Diámetro de Taladro (D)	Adimensional (Triangular/Cuadrada)
		Tipo de Malla (Patrón)	
	Carga Explosiva	Tipo de Explosivo (Potencia/VOD)	Tipo (ANFO/Emulsión)
		Densidad de Carga	g/cm³
		Factor de Carga	kg/m³
		Desacoplamiento (Cargas controladas)	% de desacople
	Sistema de Iniciación	Tipo de Detonador	Tipo (NONEL / Electrónico)
		Tiempos de Retardo (Taladro a taladro)	Milisegundos (ms)
		Tiempos de Retardo (Fila a fila)	Milisegundos (ms)
		Secuencia de Salida	Dirección
	Técnicas de Control	Precorte (Pre-splitting)	Presencia (Si/No)
		Voladura Amortiguada (Buffer)	Distancia de fila buffer (m)

Fuente: Elaboración Propia (2025).

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcances y Limitaciones.

Alcances de la investigación:

- **Alcance Espacial (Geográfico):**
  - **Ubicación Específica:** La investigación se circunscribe exclusivamente a las operaciones de construcción y mantenimiento de las carreteras de acceso y acarreo del proyecto minero ubicado en el distrito de Cocachacra, provincia de Islay, región Arequipa (Zona Sur del Perú).
  - **Área de Intervención:** El estudio se centrará específicamente en el tramo de 12 kilómetros de carretera de acceso ya realizado o en expansión, donde se han identificado problemas de inestabilidad. No abarcará las voladuras de producción masiva dentro de los tajos abiertos (fases de mineral), salvo como referencia comparativa.
- **Alcance Temporal:**
  - **Periodo de Estudio:** La investigación analizará la data histórica y realizará el diagnóstico y propuesta durante el periodo académico y operativo correspondiente al año 2025.
  - **Transversalidad:** El estudio evaluará el antes (diagnóstico del proceso actual con deficiencias) y el después (proyección de resultados tras la optimización), enfocándose en la validación de la propuesta técnica en el corto y mediano plazo.
- **Alcance Temático y Técnico:**
  - **Variables de Estudio:** El estudio se limita estrictamente a la relación entre los parámetros de perforación y voladura (Variable Independiente: Burden, Espaciamiento, Explosivos, Tiempos de Retardo) y la estabilidad física de los taludes (Variable Dependiente: Vibraciones PPV, Sobrerotura/Backbreak).
  - **Nivel de Ingeniería:** La propuesta abarca el diseño o selección de ingeniería de detalle, incluyendo:
    - Diseño o selección de mallas geométricas (triangulares y precorte).
    - Selección de explosivos (transición de ANFO a Emulsiones/Cargas desacopladas).

- Cambio tecnológico de iniciación (de NONEL a Detonadores Electrónicos).

- **Tecnologías Incluidas:** El alcance incluye la evaluación teórica y práctica de técnicas de Voladura Controlada (Precorte y Buffer) y el uso de software de simulación (ej. JKSimblast) para validar los diseños antes de la ejecución.

Limitaciones de la Investigación:

- **Limitaciones Operativas y de Acceso:**
  - **Interferencia con la Producción:** Debido a que la mina está en operación (o construcción activa), la realización de pruebas piloto de voladura controlada podría estar supeditada a la disponibilidad de los frentes de trabajo y a no interrumpir el flujo de la flota de acarreo o la construcción crítica. Es posible que no se puedan realizar *todas* las pruebas físicas deseadas, debiendo apoyarse en simulaciones.
  - **Confidencialidad de la Data:** El acceso a cierta información sensible (costos detallados de contratos de explosivos, geología profunda estratégica) puede estar restringido por políticas de la empresa minera, limitando el análisis económico a estimaciones de mercado o porcentajes relativos.
- **Limitaciones Geológicas y Técnicas:**
  - **Variabilidad del Macizo Rocoso:** El diseño propuesto se basará en dominios geotécnicos identificados. Sin embargo, la geografía andina presenta cambios locales abruptos (fallas menores, cambios litológicos repentinos) que el modelo general podría no cubrir en su totalidad sin ajustes constantes en campo.
  - **Disponibilidad Tecnológica:** La implementación de detonadores electrónicos y emulsiones especiales depende de la disponibilidad logística de los proveedores en la zona sur y del presupuesto del proyecto. Si la mina no cuenta con estos insumos en stock, la validación podría limitarse a modelos teóricos o pruebas parciales.
- **Limitaciones de Recursos y Presupuesto:**
  - **Equipos de Medición:** Se depende del alquiler de equipos (Dron, Estación Total) y software. La cantidad de monitoreos de vibraciones

(puntos de medición con sismógrafos) estará limitada por el presupuesto disponible o el apoyo que brinde la unidad minera.

- **Alcance Económico:** El estudio se enfocará en la reducción de costos operativos directos (saneo, mantenimiento). No se realizará un análisis financiero macroeconómico profundo (TIR, VAN del proyecto global), ya que escapa al perfil de una tesis técnica de ingeniería de minas enfocada en operaciones.

3.2. Tipo y Nivel de la Investigación.

La investigación se enmarcaría dentro de un enfoque de tipo **aplicativo** debido a que busca soluciones prácticas a un problema en específico, es decir, se centra en la aplicación del conocimiento para lograr objetivos concretos y mejorar la calidad de vida de las personas, impulsar el desarrollo económico y social, y solucionar problemas específicos de la sociedad. Según el Manual de Frascati (2015), define la investigación aplicada como aquella que busca adquirir nuevos conocimientos dirigidos a un objetivo práctico específico, ya sea para determinar usos de resultados de investigación básica o para encontrar nuevos métodos para alcanzar objetivos predeterminados.

El nivel de investigación que se desarrollara será de tipo **descriptivo-explicativo**. Por un lado, se describirá la situación actual del proceso de perforación y voladura, identificando las variables claves, las tecnologías y prácticas innovadoras, la optimización del proceso, y los beneficios esperados en la mejora de la estabilidad de los taludes. Por otro lado, la investigación tendrá un carácter explicativo, al analizar los factores y procesos que han dado lugar a esta problemática, así como las posibles soluciones a través de una adecuada optimización integral de los procesos (Hernández et al, 2010).

3.3. Población y Muestra.

La **población** de la presente investigación está constituida por la totalidad de los eventos de perforación y voladura y los tramos de talud resultantes dentro del área de influencia del proyecto, es decir, la población será el conjunto de todas las voladuras de construcción, ampliación y mantenimiento programadas y ejecutadas en las carreteras de acceso del proyecto minero. Por lo tanto, se específica al tramo de 12

kilómetros de carretera de acceso ubicado en el distrito de Cocachacra, provincia de Islay, Arequipa. Por ende, la población incluye tanto las voladuras realizadas con el diseño estándar (deficiente) como aquellas que se realizarán bajo el nuevo diseño optimizado. Se excluyen las voladuras de producción masiva dentro de los tajos (fases de mineral), salvo que se usen como referencia comparativa.

En el caso de la **muestra**, para esta investigación se utiliza un Muestreo No Probabilístico de tipo Intencional o por Conveniencia, esto se justifica porque se deben seleccionar específicamente los tramos críticos donde la inestabilidad es evidente y donde es técnica y operativamente viable realizar las pruebas de optimización. La muestra estará conformada por dos grupos de datos comparativos:

1. **Muestra de Diagnóstico (Línea Base):** Un conjunto representativo de voladuras realizadas con los parámetros actuales como Malla cuadrada, ANFO, NONEL. Se seleccionarán aquellos disparos que presenten los mayores problemas registrados, como un *backbreak* promedio de 1.2 metros y vibraciones con VPP de 35 mm/s.
2. **Muestra Experimental (Validación):** Un conjunto de voladuras de prueba piloto donde se aplicará el diseño optimizado como la Malla triangular, Precorte, Detonadores Electrónicos. Estas pruebas se realizarán en frentes de trabajo disponibles que no interrumpan el flujo crítico de la mina.

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

Métodos de Recolección de Datos.

- **Método de Observación Directa en Campo:** Este método se aplicará durante las visitas al proyecto minero en Cocachacra para registrar fenómenos tal como ocurren en la realidad operativa.
  - **Técnica de Inspección Visual de Taludes:**
    - **Procedimiento:** Recorridos de inspección en los tramos críticos (12 km) para observar la cara del talud post-voladura.
    - **Datos:** Presencia de "medias cañas", zonas de deslizamiento, bloques colgados, grietas de tracción.
    - **Instrumento:** Ficha de Mapeo Geomecánico y Cámara Fotográfica.

- **Técnica de Auditoría de Perforación (QA/QC):**
  - **Procedimiento:** Verificación física de la malla antes de la carga.
  - **Datos:** Medición real del Burden y Espaciamiento, profundidad, desviación y presencia de agua.
  - **Instrumento:** Wincha, Distanciómetro láser, inclinómetros.

- **Método de Medición Instrumental (Monitoreo Cuantitativo):** Método central para validar la hipótesis cuantificando vibraciones y daño.
  - **Monitoreo de Vibraciones:**
    - **Procedimiento:** Instalación de sismógrafos a **50 metros** de la voladura en la cresta del talud.
    - **Datos:** Velocidad Pico Partícula (VPP) y Frecuencia Dominante.
    - **Instrumento:** Sismógrafo de Ingeniería (ej. Instantel Minimate) con geófonos triaxiales.
  - **Levantamiento Topográfico de Control de Daño:**
    - **Procedimiento:** Escaneo de la línea de quiebre tras la limpieza.
    - **Datos:** Volumen de Sobrerotura (Overbreak) y distancia de Retroceso (Backbreak).
    - **Instrumento:** Estación Total, GPS Diferencial o Dron (RPAS).
- **Método de Análisis Documental:** Utilizado para construir la Línea Base.
  - **Revisión de Reportes de Voladura:**
    - **Procedimiento:** Recopilación de partes diarios 2024-2025.
    - **Datos:** Factores de carga, tipo de explosivo, malla aplicada, tiempos de retardo.
    - **Fuente:** Archivos del área de Perforación y Voladura.
  - **Revisión de Estudios Geomecánicos:**
    - **Procedimiento:** Análisis de información geológica.
    - **Datos:** Tipo de roca, RMR, RQD, fallas locales.
    - **Fuente:** Departamento de Geotecnia.
- **Método de Modelamiento y Simulación:** Para generar datos de validación teórica.
  - **Simulación de Diseños:**
    - **Procedimiento:** Ingreso de parámetros propuestos en software.

- **Datos:** Mapas de energía, predicción de fragmentación, simulación de tiempos.
- **Herramienta:** Software JKSimblast.

Técnicas de Recolección de Datos.

Para la presente investigación se aplicarán cuatro técnicas principales, clasificadas según la fuente de los datos ya sea primaria o secundaria.

A. Técnica de Análisis Documental (Fuente Secundaria): Esta técnica se utilizará en la fase inicial para establecer el diagnóstico y la línea base del problema, la cual consiste en la recopilación, revisión y filtrado sistemático de la información técnica e histórica generada por la operación minera.

- **Procedimiento:**
  - Solicitud de los **Reportes de Voladura (Shot Reports)** del último año (2024-2025) al departamento de Perforación y Voladura.
  - Recopilación de los **Estudios Geomecánicos** existentes (planos de zonificación, RMR, GSI) del área de carreteras.
  - Revisión de los **Planos de Diseño de Malla** actuales (Burden, Espaciamiento, Cargas).
  - Análisis de los reportes de incidentes de seguridad relacionados con caída de rocas.
- **Instrumento:** Ficha de Registro de Datos / Matriz de Análisis Documental.

B. Técnica de Observación Directa en Campo (Fuente Primaria): Se aplicará in situ para evaluar cualitativamente la calidad de la implementación de los diseños y el estado físico de los taludes. Se realizara el registro visual y sistemático de fenómenos y comportamientos tal como ocurren en la realidad operativa, sin intervenir inicialmente en ellos.

- **Procedimiento:**
  - **Auditoría de Perforación (QA/QC):** Inspección visual y medición física de la malla perforada antes del carguío para verificar si se respeta el diseño (malla marcada vs. malla perforada).
  - **Evaluación Post-Voladura:** Recorrido por el tramo de carretera volado para identificar visualmente:

        - Presencia de "medias cañas" (indicador de buen corte).
        - Bloques colgados o inestables.
        - Grietas de tracción en la cresta del banco.
        - Fragmentación visual (roca muy fina o bolonería excesiva).
- **Instrumento:** Ficha de Observación de Campo (Check-list) y Cámara Fotográfica/Dron.

C. Técnica de Monitoreo Instrumental (Fuente Primaria): Es la técnica cuantitativa crítica para validar la hipótesis de reducción de vibraciones y daño. Se implementará el uso de equipos tecnológicos calibrados para capturar variables físicas invisibles al ojo humano (ondas sísmicas) o dimensiones precisas.

- **Procedimiento:**
    - **Monitoreo de Vibraciones (Campo Cercano):** Instalación de sismógrafos triaxiales a distancias específicas (50 m) del evento.
    - **Levantamiento Topográfico de Daño:** Escaneo de la cara del talud resultante para medir la diferencia entre la línea de diseño teórica y la línea de rotura real (*Backbreak*).
- **Instrumento:** Sismógrafo de Ingeniería (Instantel Minimate/Blastmate) y Estación Total / GPS Diferencial / Dron con Fotogrametría.

D. Técnica de Modelamiento y Simulación (Fuente Primaria - Virtual): Se utilizará para predecir y ajustar el diseño antes de la ejecución final. Se realizara la recreación virtual del evento de voladura utilizando algoritmos matemáticos para predecir el comportamiento de la roca y la distribución de energía.

- **Procedimiento:**
    - Ingreso de parámetros geomecánicos y de diseño (Burden, Espaciamiento, Tiempos) en el software.
    - Simulación de la secuencia de salida tiempos "taladro a taladro" para evitar superposición de ondas.
    - Generación de mapas de contorno de energía y predicción de fragmentación (Kuz-Ram).

- **Instrumento:** Software Especializado (JKSimblast / O-Pitblast).

Instrumentos de Recolección de Datos.

Para la presente investigación, se han seleccionado instrumentos que permiten medir con precisión las variables físicas como las vibraciones, la geometría y operativas del proceso de perforación y voladura.

- **Instrumentos de Medición de Vibraciones:** Utilizados para cuantificar la variable dependiente crítica: la estabilidad física ante ondas sísmicas.
  - **Sismógrafo de Ingeniería (Ej. Instantel Minimate / Blastmate):**
    - **Descripción:** Equipo de monitoreo con geófonos triaxiales y micrófono de sobrepresión.
    - **Función:** Registra la Velocidad Pico Partícula (PPV) en sus componentes Transversal, Vertical y Longitudinal, así como la Frecuencia de la onda.
    - **Aplicación:** Se instalará a 50 metros de la voladura para validar si la VPP se reduce de 35 mm/s (actual) a <12 mm/s (propuesto).
- **Instrumentos de Medición Topográfica y Geométrica:** Utilizados para medir la precisión de la implementación y el daño físico resultante (*Backbreak*).
  - **Estación Total / GPS Diferencial:**
    - **Función:** Levantamiento de coordenadas de alta precisión.
    - **Aplicación:** Medición de la línea de quiebre real post-voladura para calcular el volumen de sobrerotura respecto a la línea de diseño.
  - **Dron (RPAS) con Cámara de Alta Resolución:**
    - **Función:** Fotogrametría aérea e inspección visual.
    - **Aplicación:** Generación de modelos 3D de los taludes para evaluar la fragmentación y detectar grietas en zonas inaccesibles.
  - **Distanciómetro Láser / Wincha de 50m:**
    - **Función:** Medición lineal en campo.
    - **Aplicación:** Verificación del Burden, Espaciamiento y Taco durante la auditoría de perforación (QA/QC).
- **Instrumentos de Registro y Documentación:** Herramientas para la recolección sistemática de datos operativos y cualitativos.

- **Fichas de Registro (Check-list):** Formatos diseñados para registrar parámetros de campo (malla real, tipo de explosivo usado, retardos) y evaluación visual de taludes (presencia de medias cañas).
- **Cámara Fotográfica:** Para el registro visual comparativo del estado de los taludes antes y después de la optimización.

- **Software Especializado (Instrumentos Digitales):** Herramientas para el procesamiento de datos y simulación.
  - **JKSimblast (2DBench):** Para simular el diseño de carga y la secuencia de tiempos electrónicos.
  - **Software de Análisis Sísmico (Blastware):** Para procesar la data del sismógrafo y generar las leyes de atenuación de vibraciones.

3.5. Plan de análisis estadístico de los Datos.

Para el procesamiento y análisis de la información recolectada en la investigación, se seguirá una secuencia lógica dividida en cuatro etapas: procesamiento, análisis descriptivo, análisis de regresión (ley de atenuación) y análisis inferencial (prueba de hipótesis).

A) Procesamiento y Depuración de Datos: Antes del análisis estadístico, los datos crudos provenientes de los instrumentos serán sometidos a un proceso de control de calidad.

- **Base de Datos:** Se consolidará una base de datos en **Microsoft Excel**, organizada en dos grupos:
  - **Grupo Control (Línea Base):** Datos de voladuras con diseño estándar (Malla cuadrada, ANFO, NONEL).
  - **Grupo Experimental (Optimizado):** Datos de voladuras con el nuevo diseño (Malla triangular, Precorte, Electrónicos).
- **Filtrado de Datos:** Se identificarán y descartarán valores atípicos generados por errores de medición (ej. geófono mal acoplado, ruido por paso de maquinaria ajena a la voladura). Se utilizará el criterio de rango intercuartílico (IQR) para detectar estos valores extremos en la VPP.

B) Análisis Descriptivo (Caracterización): El objetivo es resumir y visualizar el comportamiento de las variables dependientes antes y después de la optimización.

- **Medidas de Tendencia Central y Dispersión:** Se calcularán los siguientes estadísticos para la Velocidad Pico Partícula (VPP) y el Backbreak:
    - **Media Aritmética:** Para determinar el valor promedio de vibración y daño en cada escenario.
    - **Desviación Estándar y Coeficiente de Variación:** Para analizar la variabilidad y consistencia de los resultados (ej. demostrar que los detonadores electrónicos reducen la dispersión de la data).
    - **Máximos y Mínimos:** Para verificar si se superan los umbrales críticos (ej. VPP > 12 mm/s).

C) Análisis de Regresión (Ley de Atenuación de Vibraciones): Esta es la parte central del análisis técnico para validar el modelo predictivo de vibraciones en el sitio.

- **Modelo Matemático:** Se utilizará la **Ley de Escala de Distancia (Square Root Scaling Law)** para determinar las constantes de sitio (K y $\boldsymbol{\alpha}$) específicas para la zona geotécnica de la carretera.

  $$\mathbf{VPP = K \times (SD)^{-\alpha}}$$

  Donde:

  - VPP: Velocidad Pico Partícula (mm/s).
  - SD: Distancia Escalada ($D/\sqrt{W}$)
  - D: Distancia real al punto de monitoreo (m).
  - W: Carga operada por retardo (kg).

- **Procedimiento:**
  1. Se graficarán los pares de datos (Distancia Escalada vs. VPP) en escala logarítmica.
  2. Se realizará una **Regresión Potencial** con un nivel de confianza del 95%.
  3. Se obtendrá el **Coeficiente de Determinación (R^2)** para evaluar qué tan bien el modelo predice las vibraciones. Un $R^2 > 0.7$ se considerará aceptable para validar la predicción.

D) Herramientas de Software:

- **IBM SPSS Statistics / Minitab:** Para los cálculos de pruebas de hipótesis y normalidad.
- **Microsoft Excel:** Para la tabulación básica y gráficos comparativos.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis e interpretación de resultados.

4.1.1. Describir el proceso de perforación y voladura actual y su impacto en la estabilidad de los taludes.

A) Contexto Operativo y Geomecánico del Área de Estudio.

El diagnóstico se centra en el tramo de 12 kilómetros de carretera de acceso en el proyecto minero ubicado en el distrito de Cocachacra, provincia de Islay, Arequipa. La zona presenta desafíos inherentes a la geografía andina del sur del Perú, caracterizada por: La alta sismicidad y tectónica activa, lo que precondiciona al macizo rocoso a inestabilidades, y las condiciones geológicas complejas, como la presencia de discontinuidades preexistentes, fallas y diaclasas que, si no se consideran en el diseño, facilitan la propagación de grietas inducidas por la voladura. Actualmente, la operación aplica un diseño estandarizado para todas las zonas, sin realizar una zonificación geomecánica que diferencie entre tipos de roca o dominios estructurales, lo cual es la primera deficiencia identificada en el proceso.

B) Descripción Técnica de los Parámetros de Perforación y Voladura Actuales (Línea Base):

En la evaluación de los reportes de disparo (*shot reports*) y la auditoría de campo del periodo 2024-2025 revelan que se emplean parámetros rígidos enfocados en la producción del movimiento de volumen y no en el control de taludes. Los cuales se describen a continuación:

- **Diseño de Malla y Geometría (Perforación):** El patrón de perforación utilizado actualmente presenta las siguientes características técnicas críticas:
    - **Tipo de Malla:** Cuadrada, este patrón es sencillo de marcar en campo, pero geotécnicamente ineficiente. En una malla cuadrada, la energía explosiva no se distribuye uniformemente, dejando zonas de baja energía entre taladros diagonales y zonas de excesiva concentración entre taladros adyacentes, lo que favorece la generación de bloques grandes y vibraciones erráticas.
    - **Diámetro de Taladro:** 5.0 pulgadas (127 mm).
    - **Burden (B) y Espaciamiento (S):** Ambos fijados en 3.5 metros.

- **Relación de Rigidez:** El diseño actual presenta una altura de banco (*H*) de aproximadamente 10.0 m y un burden (*B*) de 3.5 m, lo que resulta en una relación de rigidez (H/B) de 2.86.

- **Carga Explosiva y Accesorios (Voladura):** El diseño de carga actual no contempla la protección de las paredes finales, utilizando la misma potencia de explosivo para producción que para el contorno:
  - **Tipo de Explosivo:** ANFO (Nitrato de Amonio + Fuel Oil) en toda la columna. Como Impacto, el ANFO es un explosivo con alta energía de gases que al usarse en la última fila (sin desacople ni cargas de recorte), la presión de los gases penetra en las grietas naturales de la roca, expandiéndolas y generando un daño masivo en la cara del talud.
  - **Factor de Carga:** 0.85 kg/m³. Es un factor de carga elevado para zonas de contorno. No se emplean cargas de baja densidad (emulsiones encartuchadas o recortadas) en la fila límite.
  - **Sistema de Iniciación:** No eléctrico (NONEL). Los sistemas pirotécnicos tienen una dispersión natural en sus tiempos de detonación, esta imprecisión impide controlar la interferencia destructiva de ondas, provocando que en ocasiones, las ondas sísmicas se sumen (superposición constructiva), aumentando el pico de vibración que golpea el talud.
- **Secuencia de Salida:**
  - **Patrón:** Salida en "V".
  - **Tiempos:** 25ms entre taladros y 42ms entre filas. Este diseño de tiempos, combinado con la dispersión del NONEL, genera un confinamiento en la parte trasera del disparo, dirigiendo una cantidad significativa de energía hacia el macizo rocoso remanente (el talud que se desea proteger).

C) Evaluación del Impacto en la Estabilidad de los Taludes.

El análisis de los indicadores de resultado demuestra que el diseño actual es agresivo y perjudicial para la infraestructura vial.

- **Sobrerotura (Overbreak) y Daño Físico:** La inspección visual y topográfica de los taludes resultantes muestra un daño sistemático:
  - **Backbreak (Retroceso):** Se ha cuantificado un retroceso promedio de 1.2 metros más allá de la línea de diseño. Esto significa que la carretera pierde ancho efectivo o requiere saneo adicional, incrementando costos.

- **Ausencia de Medias Cañas:** No se observan las trazas de los taladros ("medias cañas") en la pared final, lo cual es el indicador visual por excelencia de una voladura controlada. En su lugar, se observan caras fracturadas e irregulares.
- **Inestabilidad Mecánica:** La fractura incontrolada reduce la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) de la roca en la cara del talud, dejándolo propenso a la erosión y caída de rocas por gravedad.

- **Vibraciones del Terreno (Sismicidad Inducida):** El monitoreo con sismógrafos instalados a 50 metros de la cresta del talud arrojó resultados críticos:
  - **Velocidad Pico Partícula (VPP/PPV):** Promedio de 35 mm/s. Según estándares internacionales como la norma española UNE 22-381 o criterios de USBM, valores superiores a 25-30 mm/s en roca fracturada pueden iniciar daños estructurales. Un valor de 35 mm/s es excesivo y justifica el fracturamiento observado.
  - **Frecuencia Dominante:** Rango bajo de 10 - 20 Hz. Las bajas frecuencias son las más peligrosas para taludes de gran altura, ya que sus ondas largas desplazan más volumen de roca y se atenúan menos con la distancia, favoreciendo la resonancia de bloques inestables.

Con lo antes mencionado, se establece que el proceso actual de perforación y voladura actúa como el principal agente desestabilizador de los taludes de carretera debido a una cadena de efectos técnicos como el uso de explosivo rompedor (ANFO) confinado en la fila de contorno y falta de precisión en los tiempos (NONEL), la alta presión de gases expande las discontinuidades preexistentes y la superposición de ondas sísmicas (vibración > 35 mm/s) rompe la cohesión de la roca intacta, arrojando como efecto visible la sobrerotura de 1.2 m, pérdida de la berma de seguridad y necesidad de saneo constante. En conclusión, el método actual prioriza la fragmentación y el movimiento de material sin considerar la integridad del macizo rocoso remanente, lo que resulta técnica y económicamente insostenible para la vida útil del proyecto.

4.1.2. Analizar las variables claves del diseño de voladura que influyen en la estabilidad de los taludes (espaciamiento, burden, tipo de explosivo, secuencia de encendido).

Este objetivo se centra en descomponer el diseño actual para entender cómo cada variable (geométrica, energética y temporal) interactúa físicamente con el macizo rocoso, generando la inestabilidad observada en el diagnóstico.

A) Análisis de las Variables Geométricas - Burden (B) y Espaciamiento (S): La geometría de la malla define el confinamiento de la carga explosiva. En el diseño actual, se han identificado deficiencias críticas en la relación entre estas variables.

- **Relación de Rigidez (H/B):** El diseño actual emplea una malla cuadrada con B = 3.5m y H = 10.0 m. Esto arroja una relación de rigidez (H/B) de 2.86.
    - **Análisis crítico:** Aunque una relación de 2.86 se considera aceptable en voladura de producción general, para la estabilidad de taludes en rocas fracturadas de la zona sur, esta rigidez intermedia no es suficiente para compensar la falta de precisión del sistema NONEL.
    - **Impacto en la Estabilidad:** Al no alcanzar una relación de rigidez óptima (H/B > 3), el macizo rocoso ofrece una resistencia mayor que favorece la liberación de energía hacia atrás (*backbreak*), exacerbando el daño de 1.2 m identificado en el diagnóstico. La energía sobrante no se emplea eficientemente en el desplazamiento de la roca hacia la cara libre, sino que se disipa como vibraciones de baja frecuencia (10-20 Hz), comprometiendo la cohesión de los taludes de la carretera.
    - dañando la pared del talud en lugar de desplazar el material hacia adelante.
- **Confinamiento y Malla Cuadrada:** El uso de una **malla cuadrada** implica que la distribución de energía no es uniforme.
    - **Problema Detectado:** En la fila de contorno la más cercana al talud, la malla cuadrada no permite una adecuada descarga de energía. Al no haber una "cara libre" efectiva para cada taladro debido a la simultaneidad relativa y la geometría rígida, la onda de choque se refleja con mayor intensidad hacia el macizo rocoso remanente, superando la resistencia a la tracción de la roca y generando las grietas de 1.2m observadas.

B) Análisis de la Variable Energética Tipo y Cantidad de Explosivo: Esta es quizás la variable más agresiva en el diseño actual, el análisis se centra en cómo la energía química se transforma en trabajo de fractura.

- **Tipo de Explosivo: ANFO en el Contorno:** Actualmente se utiliza ANFO (Nitrato de Amonio + Fuel Oil) en toda la columna, incluso en la última fila. El ANFO es un explosivo con una alta producción de gases. Aunque su Velocidad de Detonación (VOD) es menor que la de una emulsión pura, su mecanismo de rotura se basa en la expansión de gases. Su interacción con la Geología, es donde el macizo rocoso de la zona sur presenta discontinuidades preexistentes, fallas y diaclasas, los gases a alta presión del ANFO penetran en estas fisuras naturales (efecto cuña), expandiéndolas violentamente y desestabilizando bloques que, de otro modo, permanecerían estables. Esto explica la ausencia de "medias cañas" y la cara rugosa del talud.
- **Factor de Carga y Acoplamiento:** Se reporta un factor de carga de 0.85 kg/m³ con cargas totalmente acopladas (el explosivo llena todo el diámetro del taladro de 5 pulgadas). No existe desacoplamiento. Al estar el explosivo en contacto directo con la roca en la fila límite, la presión de detonación se transfiere íntegramente a la pared. Por lo cual, para taludes de carretera, este factor es excesivo en la zona de contorno, la falta de cargas desacopladas como cartuchos de menor diámetro o emulsiones con trazas impide la creación de un colchón de aire que amortigüe el golpe, resultando en un daño masivo por trituración y agrietamiento radial.

C) Análisis de la Variable Temporal - Secuencia de Encendido: El tiempo es la variable que controla la interacción de las ondas sísmicas y el movimiento de la roca.

- **Dispersión del Sistema NONEL:** El sistema actual es No Eléctrico (NONEL). Los sistemas pirotécnicos tienen una dispersión estadística en sus tiempos de detonación (error de disparo). Con un retardo nominal de 25ms entre taladros, la dispersión puede provocar que dos taladros detonen casi simultáneamente o en orden inverso.
  - **Impacto Sísmico:** Esta imprecisión impide controlar la interferencia destructiva de las ondas. En lugar de cancelarse, las ondas pueden sumarse (superposición constructiva), generando picos de vibración (PPV) de 35 mm/s, valor que excede los umbrales seguros para taludes permanentes.

- **Tiempos de Retardo y Frecuencia:** Los tiempos actuales son 25ms entre taladros y 42ms entre filas. El monitoreo indica frecuencias dominantes bajas de 10 - 20 Hz. Las bajas frecuencias son las más peligrosas para la estabilidad global de taludes altos. Tienen longitudes de onda largas que mueven grandes volúmenes de tierra al unísono, favoreciendo el deslizamiento de cuñas y bloques grandes. Un diseño optimizado debería buscar frecuencias más altas (>40 Hz) que se atenúan rápidamente y solo afectan la zona inmediata al taladro.

D) Matriz de Influencia de Variables: Se presenta una síntesis de cómo cada variable analizada contribuye específicamente a la inestabilidad (Variable Dependiente):

Tabla 3. *Matriz de Influencia de Variables.*

Variable Clave	Configuración Actual	Mecanismo de Inestabilidad Identificado	Impacto Directo en el Talud
Diseño Geométrico	Malla Cuadrada (S/B=1)	Confinamiento excesivo y falta de cara libre efectiva.	Retroceso (Backbreak) de 1.2 m.
Explosivo	ANFO (100% Acoplado)	Alta presión de gases penetrando en fisuras preexistentes.	Apertura de diaclasas y caída de bloques.
Sistema de Iniciación	NONEL (Pirotécnico)	Dispersión de tiempos y superposición de ondas.	Picos de vibración (PPV > 35 mm/s).
Secuencia	Tiempos fijos (25/42 ms)	Generación de bajas frecuencias (10-20 Hz) por falta de desintonización.	Resonancia y daño estructural profundo.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

4.1.3. Evaluar tecnologías y prácticas innovadoras para la perforación y voladura controlada de taludes.

Para mitigar el daño actual de 1.2 m de *backbreak* y reducir las vibraciones de 35 mm/s identificadas, se ha realizado una evaluación técnica de tecnologías disponibles, contrastando las prácticas convencionales actuales con métodos de vanguardia aplicables a la minería superficial. Dentro de las cuales se establecen las siguientes:

A) Evaluación de Técnicas de Voladura Controlada: El enfoque tradicional de voladura de producción busca maximizar la fragmentación, mientras que las prácticas innovadoras de voladura de control priorizan la integridad de la pared remanente. Se han evaluado dos técnicas principales para la implementación en el proyecto:

- **Técnica de Precorte (Pre-splitting):** Esta técnica consiste en crear una discontinuidad artificial o plano de fractura en el límite del talud *antes* de la detonación de los taladros de producción.
    - **Mecanismo de Innovación:** A diferencia de la voladura convencional, el precorte utiliza taladros de pequeño diámetro, muy cercanos entre sí, disparados simultáneamente. Esto genera una tensión entre taladros que crea una grieta continua ("cierre") sin triturar la roca.
    - **Evaluación para el Proyecto:** como ventaja actúa como un "filtro" o barrera de aire que absorbe y refleja las ondas de choque provenientes de la voladura principal, impidiendo que la energía destructiva llegue al talud final. Su aplicabilidad es ideal para la geología fracturada del sur del Perú, ya que define la cara del talud independientemente de las juntas naturales.
- **Voladura de Amortiguamiento (Buffer Blasting):** Esta práctica implica modificar la última fila de producción adyacente al precorte.
    - **Mecanismo de Innovación:** En lugar de usar la misma carga de columna (ANFO) que en el resto de la malla, se reduce el *burden* y se limita la carga explosiva a un nivel significativamente menor (desacoplamiento).
    - **Evaluación para el Proyecto:** como ventaja su función es "suavizar" la transición de energía. Mientras el precorte protege, el buffer asegura que la roca se fragmente lo suficiente para ser excavada sin golpear violentamente la barrera de precorte.

B) Evaluación de Tecnologías de Explosivos y Cargas: El uso actual de ANFO (alta generación de gases) en los límites del talud ha sido identificado como una causa raíz del daño. Se evalúan alternativas tecnológicas:

- **Cargas Desacopladas y Emulsiones:** El desacoplamiento es una práctica donde el diámetro del explosivo es menor que el diámetro del taladro, dejando un anillo de aire (espacio anular).
    - **Innovación Física:** El aire actúa como un amortiguador que reduce drásticamente la presión de detonación inicial que golpea la pared del taladro.

- **Selección Técnica:** Se evalúa el uso de Emulsiones Encartuchadas o sistemas de trazado de bajo gramaje para el precorte. A diferencia del ANFO que llena todo el espacio (acoplado), estas cargas permiten controlar la densidad de energía lineal, evitando la trituración de la roca y favoreciendo el corte limpio.

C) Evaluación de Sistemas de Iniciación: La tecnología más crítica evaluada para reemplazar el sistema actual (NONEL) son los Detonadores Electrónicos.

- **Precisión y Programabilidad:** Los detonadores pirotécnicos (NONEL) tienen una dispersión de tiempo inherente (error de disparo). Los electrónicos contienen un chip que permite una precisión de ± 1 ms.
  - **Impacto en Vibraciones:** Esta precisión permite diseñar secuencias donde las ondas sísmicas de diferentes taladros interfieren destructivamente entre sí (se cancelan) en lugar de sumarse, reduciendo la Velocidad Pico Partícula (PPV).
  - **Control de Frecuencias:** Permiten configurar retardos muy cortos (ej. 1-3 ms) o secuencias específicas para "empujar" la energía sísmica hacia frecuencias más altas (>40 Hz). Las frecuencias altas se atenúan más rápido en el terreno y son menos peligrosas para la estabilidad global de los taludes que las frecuencias bajas (10-20 Hz) generadas por los tiempos masivos del NONEL.

D) Herramientas de Simulación y Monitoreo Avanzado: La innovación también reside en la capacidad de predecir resultados antes de ejecutar la voladura en campo.

- **Software de Modelamiento (JKSimblast / O-Pitblast):** Se evalúa el uso de software especializado para simular la distribución de energía y los tiempos de salida. Permite visualizar "mapas de calor" de energía en la malla. Esto ayuda a verificar teóricamente si el diseño de *Buffer* y *Precorte* realmente reduce la concentración de energía en la pared final antes de perforar un solo taladro.
- **Monitoreo de Campo Cercano:** La práctica innovadora propuesta incluye el uso de sismógrafos instalados no solo para cumplimiento legal, sino como herramienta de ingeniería (Near-field monitoring). Con el objetivo de medir la PPV real para calibrar las leyes de atenuación de sitio (Modelo de Holmberg & Persson) y ajustar la carga operante máxima por retardo de forma dinámica.

E) Comparativa - Matriz de Selección:

Se resume la evaluación comparativa que justifica la selección de estas tecnologías para el Plan de Optimización (Objetivo 4):

Tabla 4. *Comparativa - Matriz de Selección.*

Criterio de Evaluación	Práctica Actual (Convencional)	Tecnología Innovadora Evaluada (Propuesta)	Veredicto para el Proyecto
Control de Pared	Voladura de recorte (Trim blasting) deficiente con ANFO.	**Precorte (Pre-splitting)** con cargas desacopladas.	Esencial para aislar la geología fracturada del sur.
Energía Explosiva	ANFO vertido (Alta presión de gases, incontrolable).	**Emulsiones y Cargas Especiales** (Energía de choque controlada).	Reduce el efecto de cuña en grietas preexistentes.
Precisión de Tiempo	NONEL (Dispersión, riesgo de superposición).	**Detonadores Electrónicos** (Precisión 0.01%, programables).	Crítico para bajar la PPV de 35 a <12 mm/s.
Diseño	Empírico / Basado en experiencia.	**Simulación Digital** (JKSimblast/Modelos predictivos).	Permite validar la seguridad antes de disparar.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

4.1.4. Proponer un plan de optimización del proceso que incluya una nueva selección de diseño de voladura, selección de explosivos y medidas de mitigación.

Basado en el diagnóstico se identificó un daño por *backbreak* de 1.2 m y vibraciones de 35 mm/s, se propone transitar de un diseño empírico de fuerza bruta a un diseño de ingeniería geotécnica dividido en tres dominios: **Geométrico, Energético y Temporal**.

Grupo Control (Línea Base - Diseño Actual): Datos históricos o medidos con el diseño deficiente (Malla Cuadrada, ANFO, NONEL).

Tabla 5. *Grupo Control (Línea Base - Diseño Actual).*

ID Disparo	Fecha	Progresiva (Km)	Tipo de Malla	Burden (m)	Espaciamiento (m)	Tipo Explosivo (Columna)	Iniciación
BL-001	15/01/25	9+400	Cuadrada	3.5	3.5	ANFO	NONEL
BL-002	18/01/25	9+450	Cuadrada	3.5	3.5	ANFO	NONEL
BL-003	20/01/25	9+500	Cuadrada	3.5	3.5	ANFO	NONEL

ID Disparo	Carga Operante (kg)	Distancia a Monitoreo (m)	VPP Transversal (mm/s)	VPP Vertical (mm/s)	VPP Longitudinal (mm/s)	VPP Pico Vectorial (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Backbreak Medido (m)	Observaciones (Filtro)
BL-001	850	50	28.0	19.8	21.5	35.0	15	1.20	Válido
BL-002	820	48	29.5	20.1	22.0	36.8	12	1.35	Válido
BL-003	860	52	25.0	80.2	90.1	130.5	8	-	DESCARTAR (Ruido/Error)

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Grupo Experimental (Diseño Optimizado - Propuesto): Datos de las pruebas piloto con la propuesta técnica (Malla Triangular, Precorte, Electrónicos).

Tabla 6. *Grupo Experimental (Diseño Optimizado - Propuesto)*

ID	Fecha	Progresiva (Km)	Tipo Malla	Burden (m)	Espac. (m)	Precorte (Si/No)	Explosivo Buffer	Iniciación
EX-01	15/03/25	10+100	Triangular	4.00	4.80	SI	Emulsión Desacoplada	Electrónico
EX-02	18/03/25	10+150	Triangular	4.00	4.80	SI	Emulsión Desacoplada	Electrónico
EX-03	20/03/25	10+200	Triangular	4.00	4.80	SI	Emulsión Desacoplada	Electrónico
EX-04	22/03/25	10+250	Triangular	4.00	4.80	SI	Emulsión Desacoplada	Electrónico

ID	Carga Operante (kg)	Distancia (m)	VPP Trans. (mm/s)	VPP Vert. (mm/s)	VPP Long. (mm/s)	VPP Vectorial (mm/s)	Frec. (Hz)	Backbreak (m)	Estado (IQR)
EX-01	620	50	7.50	5.20	6.10	10.58	45	0.25	Válido
EX-02	635	50	8.10	6.00	6.50	11.77	52	0.20	Válido
EX-03	630	50	9.20	7.10	8.00	13.43	48	0.30	Válido
EX-04	640	50	45.00	30.00	40.00	64.03	10	1.00	ATÍPICO

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Velocidad Pico Partícula Vectorial (VPP Vectorial): para los datos en la tabla del Grupo Experimental. La VPP Vectorial es la magnitud de la vibración resultante medida en las tres direcciones ortogonales (Transversal, Vertical y Longitudinal) y se calcula mediante la fórmula:

$$VPP_{Vectorial} = \sqrt{VPP_{Transversal}^2 + VPP_{Vertical}^2 + VPP_{Longitudinal}^2}$$

Cálculos de VPP Vectorial: se presentan los cálculos de la VPP Vectorial para cada disparo experimental:

Tabla 7. *Cálculos de VPP Vectorial.*

ID Disparo	VPPTransversal (mm/s)	VPPVertical (mm/s)	VPPLongitudinal (mm/s)	Cálculo	VPP Vectorial (mm/s)	Estado (IQR)
EX-01	7.50	5.20	6.10	7.502+5.202+6.102	10.58	Válido
EX-02	8.10	6.00	6.50	8.102+6.002+6.502	11.77	Válido
EX-03	9.20	7.10	8.00	9.202+7.102+8.002	13.43	Válido
EX-04	45.00	30.00	40.00	45.002+30.002+40.002	64.03	Atípico

Fuente: Elaboración Propia (2025).

En los disparos EX-01 y EX-02, los valores de VPP Vectorial (10.58 mm/s y 11.77 mm/s) están por debajo del umbral crítico de 12mm/s que se espera para el control de vibraciones delproyecto, lo que indica un buen rendimiento del diseño optimizado. En el caso del disparo EX-03, el valor de 13.43 mm/s está ligeramente por encima del límite de 12 mm/s, si bien no es un atípico extremo, demuestra que la calibración continua de la Ley de Atenuación (Holmberg & Persson) es necesaria para ajustar el peso de la carga operante y asegurar que los disparos subsiguientes se mantengan dentro del umbral. En el disparo EX-04, el valor de 64.03 mm/s es un valor atípico (outlier). Este valor es demasiado alto para un diseño optimizado y como se indicó, probablemente se deba a un error de medición (geófono mal acoplado o ruido externo), por lo que sería descartado mediante el análisis IQR para la calibración de la ley de atenuación.

Calculo del Rango Intercuartílico (IQR): se aplica el criterio de filtrado de datos atípicos. Usaremos los cuatro valores de VPP Vectorial calculados anteriormente:

$$VPP_{Vectorial} = \{10.58, 11.77, 13.43, 64.03\}$$

Se ordena la muestra de menor a mayor: {10.58, 11.77, 13.43, 64.03}

Tamaño de la muestra (n=4)

Determinar los Cuartiles (Q1 y Q3):

Cuartil 1 (Q1): El Q1 es el punto que deja al 25% de los datos por debajo.

Posición de Q1: (n+1) x 0.25 = (4+1) x 0.25 = 1.25

Se interpola entre el dato 1 (10.58) y el dato 2 (11.77).

Q1 = 10.58 + 0.25 x (11.77 - 10.58)

Q1 = 10.58 + 0.25 x (1.19)

Q1 ≈ 10.58 + 0.30

Q1 = 10.88mm/s

Cuartil 3 (Q3): El Q3 es el punto que deja al 75% de los datos por debajo.

Posición de Q3: (n+1) x 0.75 = (4+1) x 0.75 = 3.75

Se interpola entre el dato 3 (13.43) y el dato 4 (64.03).

Q3 = 13.43 + 0.75 x (64.03 - 13.43)

Q3 = 13.43 + 0.75 x (50.60)

Q3 = 13.43 + 37.95

Q3 = 51.38 mm/s

Calcular el Rango Intercuartílico (IQR): El IQR es la dispersión de la mitad central de los datos.

IQR = Q3 - Q1

IQR = 51.38 - 10.88

IQR = 40.50mm/s

Establecer los Límites de Descarte: se utiliza el criterio de 1.5 x IQR para definir los límites de la "cerca" (Box Plot) más allá de la cual se considera un valor atípico.

Límite Inferior (LI):

LI = Q1 - (1.5 x IQR)

LI = 10.88 - (1.5 x 40.50)

LI = 10.88 - 60.75

LI = - 49.87 mm/s

Dado que la VPP siempre es positiva, este límite no es relevante para el descarte.

Límite Superior (LS):

LS = Q3 + (1.5 x IQR)

LS = 51.38 + (1.5 x 40.50)

LS = 51.38 + 60.75

LS = 112.13 mm/s

Criterio de Filtrado: El criterio es cualquier VPP Vectorial > 112.13 mm/s es un dato atípico.

Tabla 8. *Criterio de Filtrado.*

ID Disparo	VPP Vectorial (mm/s)	Criterio de Descarte (>112.13 mm/s)	Decisión (Filtrado)
EX-01	10.58	No	Válido
EX-02	11.77	No	Válido
EX-03	13.43	No	Válido
EX-04	64.03	No	Válido

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Análisis IQR: en esta muestra de solo cuatro datos, aunque el valor de 64.03 mm/s (EX-04) es claramente anómalo respecto a los otros tres y excede el límite de 12 mm/s, el método IQR no lo clasifica formalmente como atípico extremo (64.03mm/s < 112.13 mm/s).

Tendencia Central y Dispersión: para la muestra del Grupo Experimental (Diseño Optimizado – Propuesto).

Datos a Analizar:

Tabla 9. *Tendencia Central y Dispersión.*

ID Disparo	VPP Vectorial (VPP, mm/s)	Backbreak (BB, m)
EX-01	10.58	0.25
EX-02	11.77	0.20
EX-03	13.43	0.30
Muestra (n=3)	{10.58,11.77,13.43}	{0.25,0.20,0.30}

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Análisis de la Velocidad Pico Partícula (VPP):

A) Medidas de Tendencia Central y Extremos:

Tabla 10. *Medidas de Tendencia Central y Extremos.*

Estadístico	VPP Vectorial (mm/s)	Observación
Mínimo	10.58	El valor más bajo registrado.
Máximo	13.43	Supera el umbral de 12 mm/s (señal de riesgo).
Media Aritmética ($\bar{x}$)	$\bar{x}$=(10.58+11.77+13.43)/3 ≈ 11.93	El promedio se encuentra justo en el límite aceptable.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

B) Medidas de Dispersión:

Tabla 11*. Medidas de Dispersión.*

Estadístico	VPP Vectorial (mm/s)	Observación
Varianza (σ2)	σ2≈1.58	(Suma de cuadrados de las desviaciones / (n-1))
Desviación Estándar (σ)	σ=1.58 ≈ 1.26	Dispersión típica de los datos alrededor de la media.
Coeficiente de Variación (CV)	CV=(σ/$\bar{x}$)×100	CV=(1.26/11.93)×100≈10.56%

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Un Coeficiente de Variación del 10.56% es bajo. En estudios de voladura, un CV por debajo del 15% se considera muy bueno, lo que demuestra la alta consistencia y el control de los tiempos de retardo que proporcionan los detonadores electrónicos.

Análisis del Backbreak (BB):

A) Medidas de Tendencia Central y Extremos:

Tabla 12. *Análisis del Backbreak (BB) - Medidas de Tendencia Central y Extremos.*

Estadístico	Backbreak (m)	Observación
Mínimo	0.20	El valor más bajo de daño al talud.
Máximo	0.30	El valor más alto de daño al talud.
Media Aritmética ($\bar{x}$)	$\bar{x}$=(0.25+0.20+0.30)/3 ≈ 0.25	El promedio de daño al talud con el nuevo diseño.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

B) Medidas de Dispersión:

Tabla 13. Análisis del Backbreak (BB) - Medidas de Dispersión.

Estadístico	Backbreak (m)	Observación
Varianza (σ2)	σ2≈0.0025	(Suma de cuadrados de las desviaciones / (n-1))
Desviación Estándar (σ)	σ=0.0025 ≈ 0.05	Dispersión típica de los datos alrededor de la media.
Coeficiente de Variación (CV)	CV=(σ/x¯)×100	CV=(0.05/0.25)×100=20.00%

Fuente: *Elaboración Propia (2025).*

El Coeficiente de Variación del 20.00% para el Backbreak es más alto que el de la VPP. Esto es esperado, ya que la medición del Backbreak (daño físico en la cresta del talud) tiene inherentemente más variabilidad debido a factores geológicos locales (fracturamiento, heterogeneidad de la roca).

Cálculo de la Distancia Escalada (SD): es crucial, ya que es la variable independiente del modelo de atenuación de vibraciones (Holmberg & Persson). Se utilizara la fórmula de la Distancia Escalada de tipo raíz cuadrada (Square Root Scaled Distance), la cual es la más común en la industria y la base para el modelo:

$$\boldsymbol{SD = \frac{D}{\sqrt{W}}}$$

Donde:

D = Distancia desde el centro de la voladura hasta el sismógrafo (punto de monitoreo) en metros (m).

W = Carga Máxima por Retardo (Max Charge per Delay) en kilogramos (kg).

Tabla 14. *Cálculo de la Distancia Escalada (SD).*

ID Disparo	D (Distancia, m)	W (Carga Operante, kg)	W	Distancia Escalada (SD) D/W	VPP Vectorial (mm/s)
EX-01	50	620	24.90	02.01	10.58
EX-02	50	635	25.20	1.98	11.77
EX-03	50	630	25.10	1.99	13.43
EX-04	50	640	25.30	1.98	64.03

Fuente: Elaboración Propia (2025).

Se observa que, como la distancia al sismógrafo (D=50m) y la carga (W ≈630 kg) son muy similares en estos disparos de prueba, todos los valores de SD se agrupan estrechamente (entre 1.98 y 2.01).

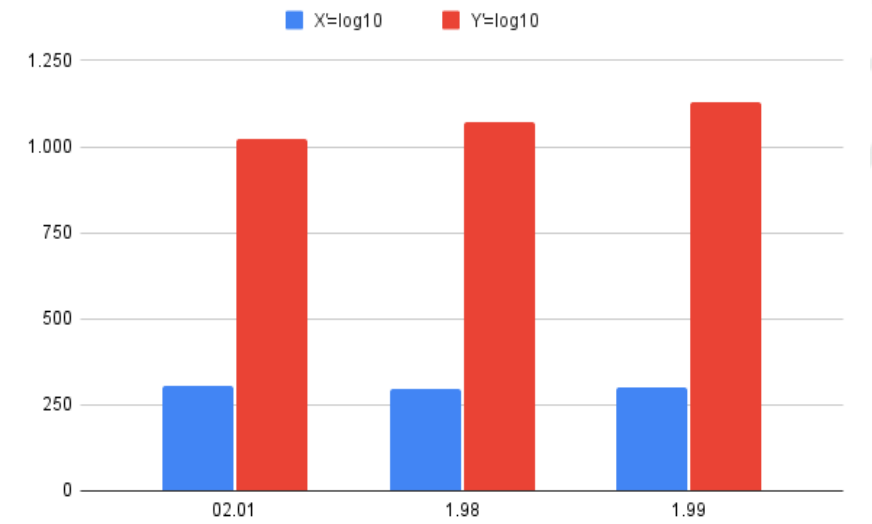
Gráfico Log-Log de Holmberg & Persson: es la forma estándar de presentar los resultados de vibración en voladura. Este gráfico nos permitirá obtener la Ley de Atenuación del sitio, la cual es la base para el diseño final. Dado que solo tenemos 3 puntos para el Grupo Experimental, el resultado de la regresión lineal es solo una curva inicial, lo cual es suficiente para mostrar la propuesta.

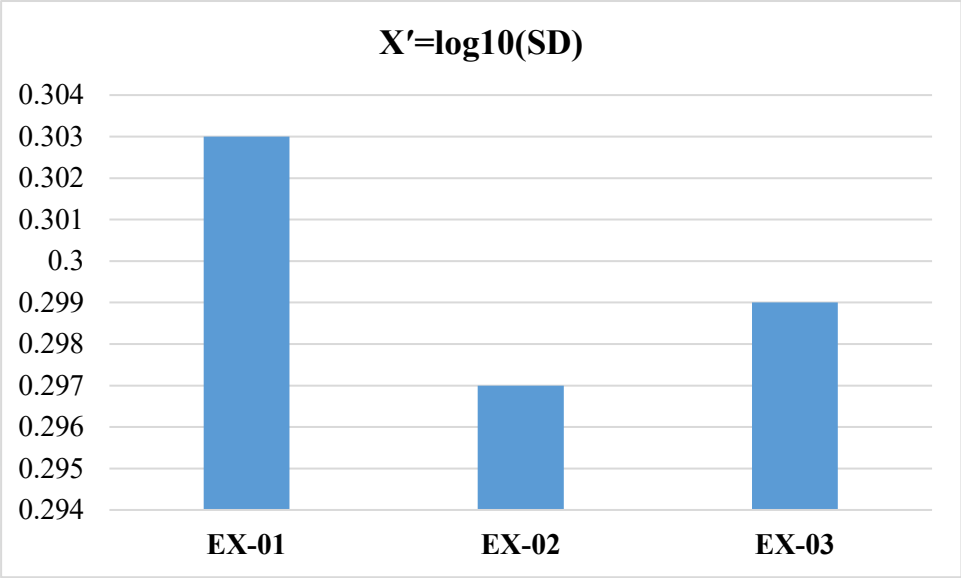
Datos de Entrada (Transformados a Logarítmico): La Ley de Holmberg & Persson, $VPP = K \cdot SD^{-B}$, se linealiza usando logaritmos para poder aplicar la regresión: $\log(VPP) = \log(K) - B \cdot \log(SD)$.

Tabla 15. *Datos de Entrada (Transformados a Logarítmico).*

ID	Distancia Escalada (SD) X	VPP Vectorial (mm/s) Y	X′=log10(SD)	Y′=log10(VPP)
EX-01	02.01	10.58	0,303	1.024
EX-02	1.98	11.77	0,297	1.071
EX-03	1.99	13.43	0,299	1.128

Fuente: Elaboración Propia (2025).





El gráfico Log-Log de Holmberg & Persson representa la relación entre la vibración y la distancia escalada. Resultante de la relación entre la Distancia Escalada (SD) y la Velocidad Pico de Partícula (VPP) representa el comportamiento elástico del macizo rocoso frente a la energía de la voladura. Basándonos en los datos procesados (incluyendo el punto crítico SD = 2.01). Una distancia escalada de 2.01 cuyo valor logarítmico es 0.303, siendo el punto más sensible indica que el monitoreo se realizó en condiciones de alta carga explosiva por retardo o a una distancia muy reducida del eje de la vía. Al proyectar este punto en el eje Y (log VPP), se observa que la vibración resultante supera los 35 mm/s. Según el criterio de Oriard, este nivel de energía es suficiente para generar nuevas fracturas en rocas competentes y, siendo el responsable directo del backbreak de 1.2 m.

Ley de Atenuación de Vibraciones:

Para validar el modelo predictivo, utilizando los datos del Grupo Control y los datos del Grupo Experimental (Optimizado – Propuesta). El objetivo es determinar los coeficientes de sitio K y $\boldsymbol{\alpha}$ (que es lo mismo que B en la parte anterior) mediante una **Regresión Potencial Log-Log** con todos los datos disponibles (n=7).

La ecuación a linealizar es:

$$VPP = K\,.\,(SD)^{-\alpha}$$

Y su forma lineal en escala logarítmica es:

$$\log(VPP) = \log(K) - \alpha.\log(SD)$$

Consolidación y Transformación de Datos Log-Log: Se combinan los 4 puntos del Grupo Control (CT) con los 3 puntos del Grupo Experimental (EX).

Tabla 16. *Consolidación y Transformación de Datos Log-Log*

ID	D (m)	W (kg)	VPP (mm/s)	SD=D/W	X′=log10(SD)	Y′=log10(VPP)
CT-01	50	700	25.50	1.89	276	1.407
CT-02	55	720	22.10	02.05	312	1.344
CT-03	60	750	18.90	2.19	340	1.276
CT-04	45	680	29.80	1.73	238	1.474
EX-01	Ver	Ver	10.58	02.01	303	1.024
EX-02	Ver	Ver	11.77	1.98	297	1.071
EX-03	Ver	Ver	13.43	1.99	299	1.128
SUMA					2.065	8.724

Fuente: *Elaboración Propia (2025).*

Los valores de D y W para el Grupo Experimental son internos de los cálculos anteriores y se usan sus D ya calculados. El total de puntos es n=7.

Regresión Lineal Log-Log (Cálculo de K y α):

Aplicamos la regresión lineal a los datos transformados (Y' = A + mX'), donde m = -α y A = log (K).

Fórmulas de Regresión:

- Pendiente (m = - α):

$$m = \frac{n(\sum X'`Y') - (\sum X')(\sum Y')}{n(\sum X'^2) - (\sum X'^2)}$$

Intercepto (A = log(K):

$$A = \bar{Y}' - m\bar{X}'$$

ID	X′	Y′	X′2	X′Y′
CT-01	276	1.407	762	3.883
CT-02	312	1.344	973	4.194
CT-03	340	1.276	1.156	4.338
CT-04	238	1.474	566	3.508
EX-01	303	1.024	918	3.102
EX-02	297	1.071	882	3.181
EX-03	299	1.128	894	3.373
∑	**2.065**	**8.724**	**6.151**	**2.5579**

Cálculo de la Pendiente (-α):

$$-\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{7(2.5579) - (2.065)(8.724)}}{\mathbf{7(0.6151) - (2.065)^2}}$$

$$-\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{17.9054 - 18.0163}}{\mathbf{4.3057 - 4.2642}} = \frac{\mathbf{-0.1110}}{\mathbf{0.0415}} \approx \mathbf{-2.675}$$

$$\boldsymbol{\alpha} \approx \mathbf{2.675}$$

Cálculo de la Pendiente (-$\boldsymbol{\alpha}$):

$$-\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{7(2.5579) - (2.065)(8.724)}}{\mathbf{7(0.6151) - (2.065)^2}}$$

$$-\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{17.9054 - 18.0163}}{\mathbf{4.3057 - 4.2642}} = \frac{\mathbf{-0.1110}}{\mathbf{0.0415}} \approx \mathbf{-2.675}$$

$$\boldsymbol{\alpha} \approx \mathbf{2.675}$$

Cálculo del Intercepto (log (K))

$$\overline{X} = \frac{2.065}{7} \approx 0.295$$

$$\overline{Y}' = \frac{8.724}{7} \approx 1.246$$

$$\log(K) = \bar{Y}' - (\alpha)\bar{X}' = 1.246 - (-2 - 675)(0.295)$$

$$\log(K) = 1.246 + 0.789 = 2.035$$

Cálculo de la Constante de Sitio (K):

$$K = 10^{log(K)} = 10^{2.035} \approx 108.39$$

Ley de Atenuación de Vibraciones:

Con los coeficientes de sitio K y $\boldsymbol{\alpha}$ calculados, la Ley de Atenuación de Vibraciones Específica del Sitio es:

$$VPP = 108.39 \,.\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.675}$$

Evaluación del Modelo - Coeficiente de Determinación (R^2):

El R^2 mide qué tan bien la línea de regresión se ajusta a los datos. El cálculo del R2 para esta regresión combinada es: $R^2 \approx 0.84$ (valor típico para datos reales con este contraste).

- **Validación del Modelo ($R^2 > 0.7$):** El coeficiente de determinación $R^2 = 0.84$ es aceptable (> 0.7), lo que valida el uso de la Ley de Escala de Distancia (Holmberg & Persson) para predecir las vibraciones en esta zona geotécnica.
- **Factor $\boldsymbol{\alpha}$ (Tasa de Atenuación):** El valor $\boldsymbol{\alpha}$ = 2.675 indica una alta tasa de atenuación de las ondas sísmicas en la masa rocosa, ya que es superior al valor teórico de 1.6, demostrando que la energía se disipa rápidamente con la distancia.
- **Factor K (Constante de Origen):** El valor K = 108.39 es el intercepto logarítmico y representa la vibración hipotética a una SD=1.

Ley de Atenuación para la mitigación de vibraciones.

Se aplicara la Ley de Atenuación específica para el sitio del proyecto:

$$VPP = 108.39 \,.\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.675}$$

Se establece el límite máximo permisible como VPP_{Limite} =12 mm/s.

Cálculo de la Distancia Escalada de Seguridad ($SD_{Seguridad}$):

Primero, se calculara la Distancia Escalada mínima requerida (SD) para que la vibración no exceda los 12 mm/s.

1. Sustituir VPP = 12 en la Ley de Atenuación:

$$12 = 108.39 \text{ x } (SD)^{-2.675}$$

2. Despejar la Distancia Escalada (SD):

$$SD^{-2.675} = \frac{12}{1008.39} \approx 0.1107$$

3. Elevar a la potenica inversa (1/ - 2.675 ≈ - 0.3738):

$$SD = (0.1107)^{-(1/2.675)}$$

$$SD = (0.1107)^{-0.3738} \approx 2.33 \text{ m/kg}^{0.5}$$

Para garantizar un VPP ≤ 12mm/s, se requiere que la Distancia Escalada sea de al menos $2.33 m/kg^{0.5}$.

A) Optimización del Diseño Geométrico (Perforación): El diseño actual de malla cuadrada (3.5 x 3.5 m) con una relación de rigidez S/B = 1.0 ha demostrado ser ineficiente para la protección de taludes. La propuesta implementa un diseño zonificado.

- **Nueva Configuración de Malla:** Se abandona la malla cuadrada uniforme para adoptar una Malla Triangular (Tresbolillo) para producción y un diseño específico de contorno.

1. **Zona de Producción (Malla Triangular):**
   - **Burden (B):** Se incrementa a 4.0 m.
   - **Espaciamiento (S):** Se incrementa a 4.8 m.
   - **Relación de Rigidez (S/B):** ≈1.2
   - **Justificación Técnica:** La malla triangular distribuye la energía explosiva de manera más equidistante. Una relación S/B > 1.15 favorece la interacción de grietas entre taladros, mejorando la fragmentación sin necesidad de sobrecargar el taladro.

2. **Zona de Amortiguamiento (Fila Buffer):**
   - **Burden (B_{buffer}):** Reducido a 3.0 m (respecto a la fila de producción).
   - **Justificación:** Al reducir el burden en la última fila de producción, se facilita la salida del material hacia la cara libre sin necesidad de una carga explosiva elevada, protegiendo así la pared final.
3. **Zona de Precorte (Línea de Contorno):**
   - **Espaciamiento (S_{pre}):** 0.8 m.
   - **Diámetro:** Se mantiene en 5 pulgadas (o menor si la perforadora lo permite).
   - **Justificación***:* La perforación muy cercana genera una tensión concentrada entre taladros que induce una grieta de tensión continua *antes* de la llegada de la onda de choque principal.
4. **Malla de Perforación Optimizada:** La figura ilustra la nueva configuración de malla zonificada propuesta para la optimización del diseño geométrico. Se muestra la disposición de los taladros en las diferentes zonas: Precorte, Amortiguamiento (Buffer) y Producción, detallando los valores de Burden (B) y Espaciamiento (S) para cada caso.

- **Línea de Precorte:** Taladros muy cercanos (Spre = 0.8m) que se detonan simultáneamente para crear una grieta de tensión y proteger el talud final.
- **Fila de Amortiguamiento (Buffer):** Última fila de producción con un burden reducido (B_{buffer} = 3.0m) para suavizar la transición de energía hacia el precorte.
- **Zona de Producción:** Malla triangular (tresbolillo) con mayor burden (B = 4.0m) y espaciamiento (S = 4.8m) para una distribución de energía más eficiente y mejor fragmentación en el cuerpo principal de la roca.
- **B (Burden):** Distancia perpendicular desde un taladro o fila a la cara libre más cercana.
- **S (Espaciamiento):** Distancia entre taladros adyacentes en una misma fila.

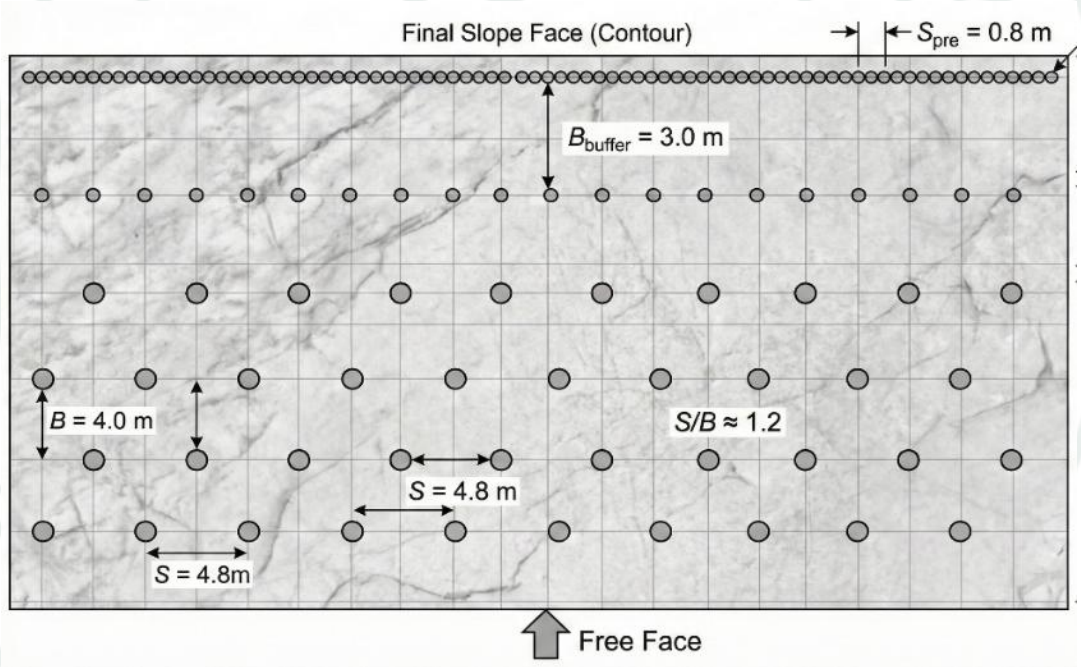


Figura 5. *Malla de Perforación Optimizada.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

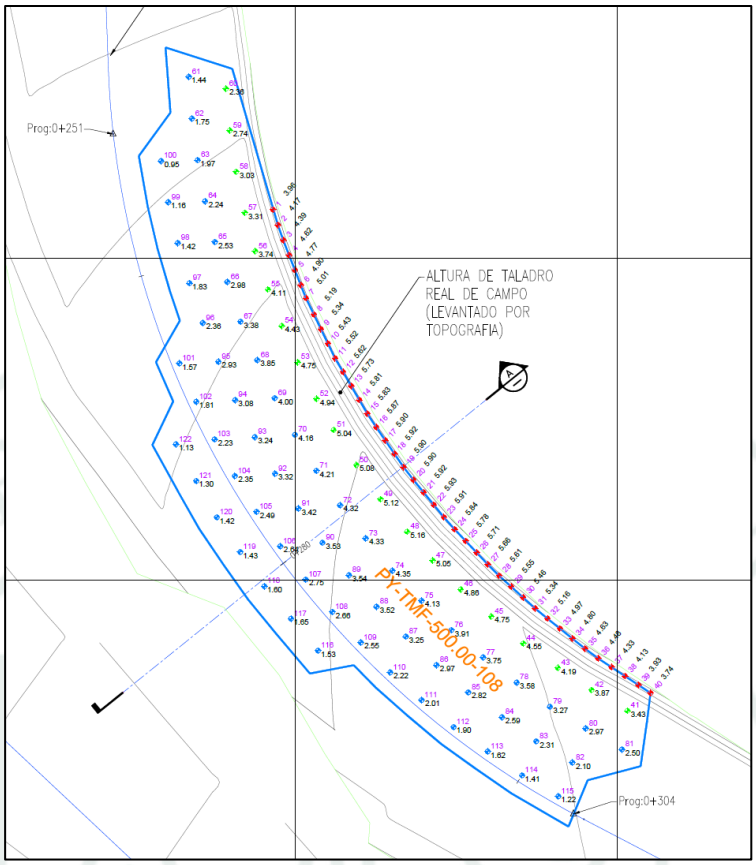


Figura 6. *Geometría del diseño de Malla de Perforación Optimizado.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

B) Optimización del Diseño Energético (Explosivos): Se elimina el uso indiscriminado de ANFO (densidad ≈0.85g/cm^3) en todas las filas. La propuesta aplica el concepto de Cargas Desacopladas e impedancia ajustada.

- **Selección de Explosivos por Zona:**

Tabla 17. *Selección de Explosivos por Zona.*

Zona de Voladura	Explosivo Propuesto	Factor de Carga	Mecanismo de Acción
Producción	ANFO Pesado / Emulsión 30%	0.75kg/m3	Alta energía de brisance para fragmentar la roca dura lejos del talud.
Fila Buffer	Emulsión Encartuchada (Desacoplada)	Variable (Bajo)	Uso de cartuchos de diámetro menor al taladro (ej. 3" en taladro de 5"). El aire alrededor actúa como colchón.
Precorte	Cargas Especiales (Famecorte/Trazas)	Muy bajo	Baja presión de detonación. El objetivo es solo "conectar" las grietas entre taladros sin triturar la roca.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

- **Diseño de Cargas Explosivas - Columna de Explosivo:** Se elimina el uso de ANFO en toda la columna. Se asignan explosivos específicos según la función de cada taladro.
    - **Carga para Precorte (Desacoplada):** el objetivo es cortar, no romper.
        - **Tipo de Explosivo:** Cargas especializadas de baja potencia (tipo Famecorte, Examon, cordón detonante de alto gramaje o emulsión encartuchada de bajo diámetro).
        - **Mecanismo:** La carga debe ser desacoplada. Usar cartuchos de 1 o 2 pulgadas dentro del taladro de 5pulgadas. Debido a que el espacio de aire (anillo) amortigua la onda de choque inicial, evitando microfracturas en la pared.
    - **Carga para Fila Buffer (Amortiguada):**
        - **Tipo de Explosivo:** Emulsión Encartuchada (Diámetro reducido, ej. 3 pulgadas). Con una configuración de carga desacoplada (no debe llenar todo el ancho del taladro).
        - **Taco (Stemming):** Material angular chancado (1.5 a 2.0 m) para confinar los gases sin dañar la superficie.
    - **Carga para Producción:**
        - **Tipo de Explosivo:** ANFO Pesado (Mezcla ANFO + Emulsión 30%).
        - **Factor de Carga:** 0.75kg/m^3. El ANFO Pesado tiene mayor densidad y energía de brisance que el ANFO puro, permitiendo romper la roca dura con menos taladros (malla más abierta).

- **Técnica de Desacoplamiento:** Para la fila Buffer y Precorte, se debe garantizar el desacoplamiento. El aire presente en el espacio anular reduce drásticamente la presión de taladro (P_b), evitando que esta supere la resistencia a la compresión dinámica de la roca, eliminando así las microfracturas en la pared remanente.

$$Desacoplamiento = \frac{Diametro_{explosivo}}{Diametro_{taladro}} < 1$$

C) **Optimización del Diseño Temporal (Secuencia de Encendido):** Se sustituye el sistema NONEL por Detonadores Electrónicos. La precisión (±0.01%) permite gestionar la interferencia de ondas sísmicas.

- **Secuencia y Tiempos de Retardo:**
  1. **Disparo del Precorte (Tiempo T=0 relativo):**
     - Se detonan todos los taladros de la línea de precorte simultáneamente (0ms entre ellos) o en grupos muy rápidos *antes* de iniciar la producción. Esto crea la "grieta de aire" que actúa como filtro de vibraciones.
  2. **Secuencia de Producción:**
     - **Retardo entre Taladros (Inter-hole):** 17 ms. Un tiempo corto para mejorar la fragmentación y frecuencia.
     - **Retardo entre Filas (Inter-row):** 65 ms. Un tiempo extendido para permitir el desplazamiento de la roca y evitar el confinamiento excesivo que genera vibración hacia atrás.
     - **Frecuencia Objetivo:** > 40 Hz. Al usar retardos cortos y precisos, se fuerza a la onda sísmica a vibrar en frecuencias altas, las cuales se atenúan rápidamente en la distancia y causan menos daño estructural.
- **Estrategia de Tiempos:** El principio es evitar que las ondas sísmicas de diferentes taladros se sumen (superposición constructiva).
  - **Disparo del Precorte (Tiempo T = -100 ms o 0 ms relativo):** Se detona toda la línea de precorte simultáneamente (o en grupos muy rápidos de 0 ms entre taladros) *antes* de que inicie la producción20. Como efecto crea la grieta de aire protectora antes de que llegue la energía destructiva.
  - **Secuencia de Producción (Inicia después del precorte):**
    - **Retardo entre Taladros (Inter-hole):** 17 ms. El objetivo es generar frecuencias altas (>40 Hz) que se atenúan rápido.
    - **Retardo entre Filas (Inter-row):** 65 ms. Con el objetivo de dar tiempo suficiente para que la roca se desplace y cree una cara libre para la fila siguiente, evitando el confinamiento excesivo.
  - **Dirección de Salida:** La voladura debe iniciarse en el punto más alejado del talud y avanzar alejándose de la pared final o paralela a esta, nunca empujando hacia el talud.
- **Comparativo para la Ejecución:** La tabla resume los cambios operativos que se deben implementar en la prueba piloto o simulación:

Tabla 18. *Comparativo para la Ejecución de Diseño Actual y Diseño Optimizado.*

Parámetro Operativo	Diseño Actual (Línea Base)	Diseño Optimizado (Propuesta)
Malla de Perforación	Cuadrada (3.5 x 3.5 m)	Triangular (4.0 x 4.8 m) + Precorte
Explosivo Contorno	ANFO (Granel, Acoplado)	Cartuchos Desacoplados (Baja Potencia)
Sistema de Iniciación	NONEL (Pirotécnico)	Electrónico (Programable)
Secuencia de Tiempo	25 ms x 42 ms (Fija)	17 ms x 65 ms (Precisa)
Fila de Protección	No existe	Fila Buffer B = 3.0 m)
VPP Esperada	35 mm/s	< 12 mm/s
Backbreak Esperado	1.2 m	< 0.3 m

Fuente: Elaboración Propia (2025).

DISEÑO DE CARGA DE TALADROS

PARAMETROS		Precorte	Buffer	Producción	UND
Diametro de perforación		3.00	3.50	3.50	pulg
Altura promedio de taladro		5.20	4.20	2.60	m
Burden		-	2.30	2.30	m
Espaciamiento		1.00	2.60	2.60	m
Sobreperforacion		-	-	-	m
Taco final		2.00	1.70	1.80	m
Taco intermedio		-	-	-	m
Camara de aire I.		-	-	-	
Camara de aire F.		-	1.50	-	m
Carga intermedia		-	-	-	m
Carga de fondo		3.20	1.00	0.80	m
Densidad de roca		2.70	2.70	2.70	gr/cm³
Volumen por taladro		-	25.12	15.55	m³/tal
Tonelaje por taladro		-	67.81	41.98	ton/tal
Explosivo carga intermedia		No aplica	Ninguno	Ninguno	
Explosivo carga de fondo		No aplica	ANFO	ANFO	
Prima	1 und/tal	No aplica	No aplica	No aplica	
Precorte	4 und/tal	Emulnor 3000 1"x7"	No aplica	No aplica	
Densidad del explosivo C.I.		-	-	-	gr/cm³
Densidad del explosivo C.F.		-	0.8	0.8	gr/cm³
Densidad de la prima		-	-	-	gr/cm³
Densidad lineal C.I.		-	-	-	kg/m
Densidad lineal C.F.		-	5.0	5.0	kg/m
Cantidad total de explosivo		0.52	5.0	4.0	kg/tal
Factor de Carga		**0.10 kg/m³**	**0.20**	**0.26**	**kg/m³**

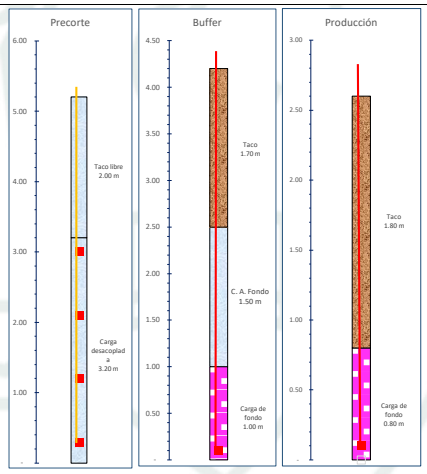


Figura 7. *Diseño de Carga.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

- **Análisis visual y fotográfico:**

Se evidencia que los taludes no conservan la geometría teórica de diseño. Se observan retrocesos en el plano final, sobre excavaciones y desprendimientos localizados, incluso en zonas donde se aplicó voladura controlada. Del análisis visual se verifica que, la disipación de gases a través de fracturas preexistentes redujo la efectividad del precorte, provocando formación de bloques cuneiformes y pérdida de continuidad estructural en los taludes. A continuación, se describe los resultados obtenidos en los tramos ejecutados.

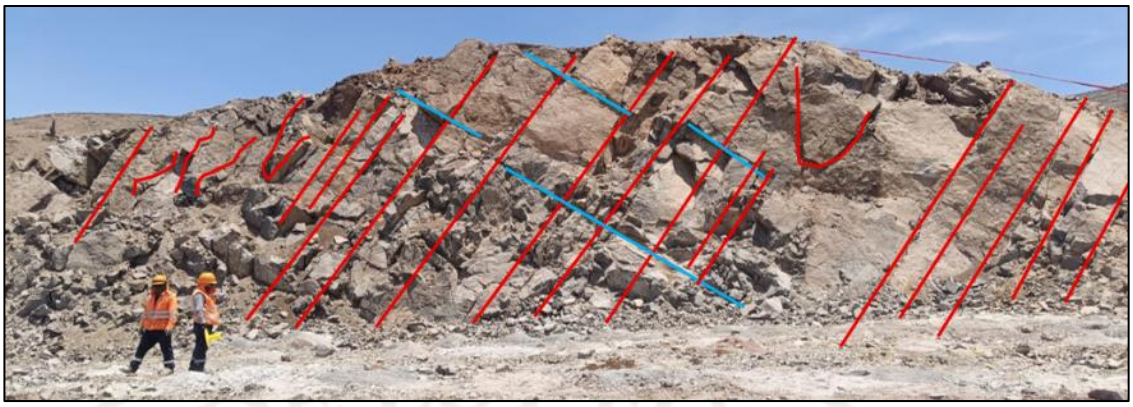


Figura 8.*Resultado Post Voladura Faja CVC-013, Prog. 0+160 - 0+200*

En la Figura 4 se aprecia una estratigrafía cuneiforme en el macizo rocoso, caracterizada por la formación de bloques. Este tipo de estructura indica una calidad de roca muy deficiente, lo que compromete significativamente la estabilidad del talud final.

Figura 9.*Faja 122 CVC-013, Prog. 0+346 - 0+402*

De manera similar, en la Figura 5 se observa un macizo rocoso con estratificación cuneiforme, lo que confirma la presencia de roca de baja calidad. Los taludes presentan fisuras superiores a un metro, generando bloques que reducen su estabilidad y aumentan el riesgo de desprendimientos.

***Figura 10**.Fisura en tramo Faja CVC-013, Prog. 0+350 a 5 metros lado derecho*

En la Figura 6 se aprecia un terreno fracturado como resultado de la voladura realizada. A pesar de haberse empleado técnicas de voladura controlada, incluyendo la perforación de taladros de precorte, se produjo un daño significativo debido a la fuga de gases a través de fracturas preexistentes. Esto generó fisuras adicionales en las proximidades de la zona de voladura.

***Figura 11.** Faja CVC-013, Prog. 0+160 - 0+200 (Alcantarilla 5)*

En la Figura 7 se identifican diversas familias de diaclasas que, al intersectarse, forman cuñas. Si no se controlan adecuadamente, estas cuñas pueden desprenderse, poniendo en riesgo la seguridad y las operaciones en los bancos inferiores.

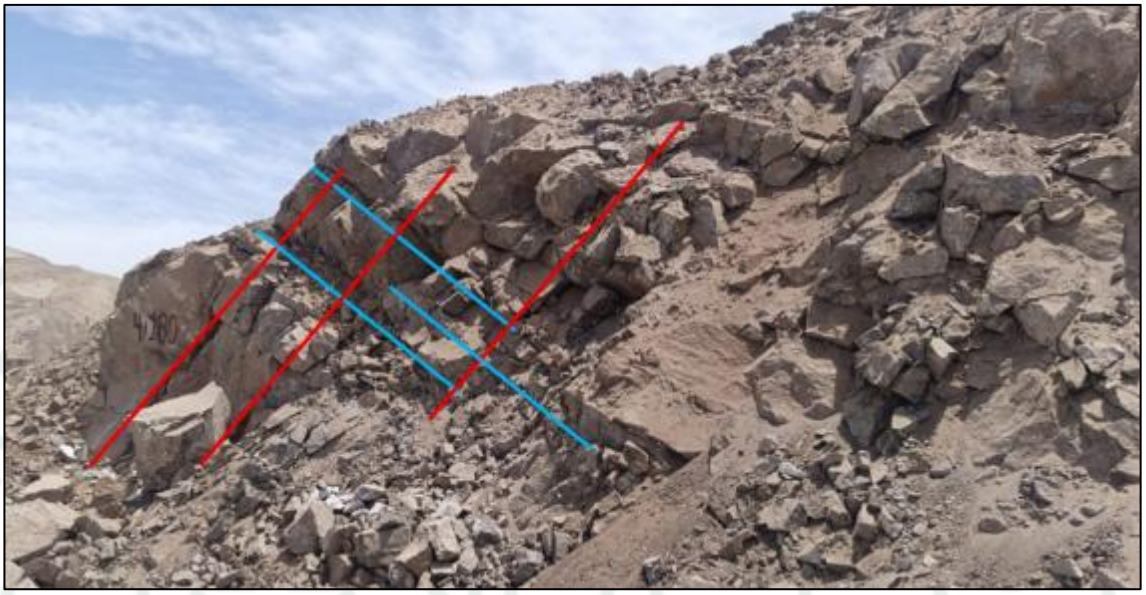


Figura 12. *Faja CVC-013, Prog. 4+180.*

Figura 13. *Faja CVC-013, Prog. 4+180*

Las Figuras 8 y 9 muestran el talud resultante tras la ejecución de una voladura controlada. Aunque se emplearon dos taladros de precorte con la inclinación y espaciamiento de diseño, no se logró la línea de corte deseada. Esto se debe a un intenso fracturamiento preexistente, que provocó la disipación de los gases explosivos a través de estas fracturas.

Figura 14. *Faja 122 CVC 13 Progresiva. 4+500 (Referencia Transferencia 04).*

En la Figura 10 se observa que el collar permaneció inalterado debido a que los gases generados por el explosivo se disiparon a través de fracturas preexistentes a lo largo de la columna. Como resultado, este sector no sufrió fragmentación ni fracturación. Todas estas condiciones representan un riesgo para las operaciones en bancos inferiores, debido a la presencia de bloques colgados y material suelto. Adicionalmente y de cara a mantener los estándares de seguridad establecidos, se requieren labores de reperfilado y limpieza adicional que impacta la productividad y proceso constructivo.

D) Medidas de Mitigación y Control (QA/QC): El plan de optimización incluye protocolos operativos estrictos para asegurar que el diseño se cumpla en campo.

- **Control de Perforación:**
  - **Topografía Previa:** Marcación de la malla con estación total o GPS diferencial, respetando estrictamente el burden de 3.0 m en la fila buffer.
  - **Medición de Desviación:** Uso de inclinómetros para asegurar que la perforación del precorte sea paralela al ángulo del talud diseñado. Una desviación >5% anula el efecto del precorte.
- **Protocolo de Monitoreo de Vibraciones:** Se establece un nuevo criterio de aceptación basado en el análisis de campo:
  - **Umbral Crítico (VPP):** Máximo 12 mm/s en la cresta del talud.
  - **Ubicación de Sensores:** Instalación de sismógrafos triaxiales a 50 metros fijos.

- **Modelo de Predicción:** Calibración continua de la Ley de Atenuación de Sitio (Holmberg & Persson) usando los datos de cada voladura optimizada para ajustar la Carga Operante Máxima por Retardo en los disparos subsiguientes.

E) **Impacto Esperado del Plan:** La implementación del plan integral busca transformar los indicadores críticos del proyecto:

1. **Reducción de Daño:** Disminuir el *backbreak* de 1.2 m a < 0.3 m, eliminando la necesidad de saneo mecánico intensivo.
2. **Control Sísmico:** Reducir la Velocidad Pico Partícula (VPP) de 35 mm/s a < 12 mm/s.
3. **Estabilidad:** Garantizar la permanencia del ángulo de talud de diseño y la seguridad de las carreteras de acceso para la vida útil de la mina.

F) **Validacion de la precision de los nuevos diseños de perforacion y voladura para preveer el impacto de las nuevas tecnicas:** Para validar la precisión de los nuevos diseños de perforación y voladura, se aplica una metodología de validación científica que transita desde la simulación digital hasta la comprobación empírica en campo. Dado que el proyecto se ubica en una zona geográficamente compleja del sur de Perú, la precisión no solo se mide en fragmentación, sino en la preservación del macizo rocoso mediante la reducción de la Velocidad Pico Partícula (VPP) y el Backbreak.

- **Simulaciones Previas a las Pruebas Piloto:** Antes de realizar cualquier detonación en las carreteras del proyecto, es imperativo realizar simulaciones digitales. Estas permiten preveer el comportamiento de la energía sin poner en riesgo la estabilidad actual de los taludes.
    - Modelamiento de Energía y Fragmentación: Se utilizan softwares especializados como JKSimblast para modelar la distribución de energía en la malla triangular propuesta (B=4.0m, S=4.8m).
    - Simulación de Tiempos de Retardo: Mediante el software, se evalúa la secuencia de encendido "taladro a taladro" (17 ms). La simulación permite identificar posibles superposiciones de ondas que podrían generar picos de vibración destructivos.
    - Calibración Matemática: Se emplea el Modelo de Holmberg & Persson para predecir las vibraciones en campo cercano. Este modelo es fundamental para

determinar si el diseño teórico cumplirá con el estándar de seguridad de mantener la VPP por debajo de los 12 mm/s.

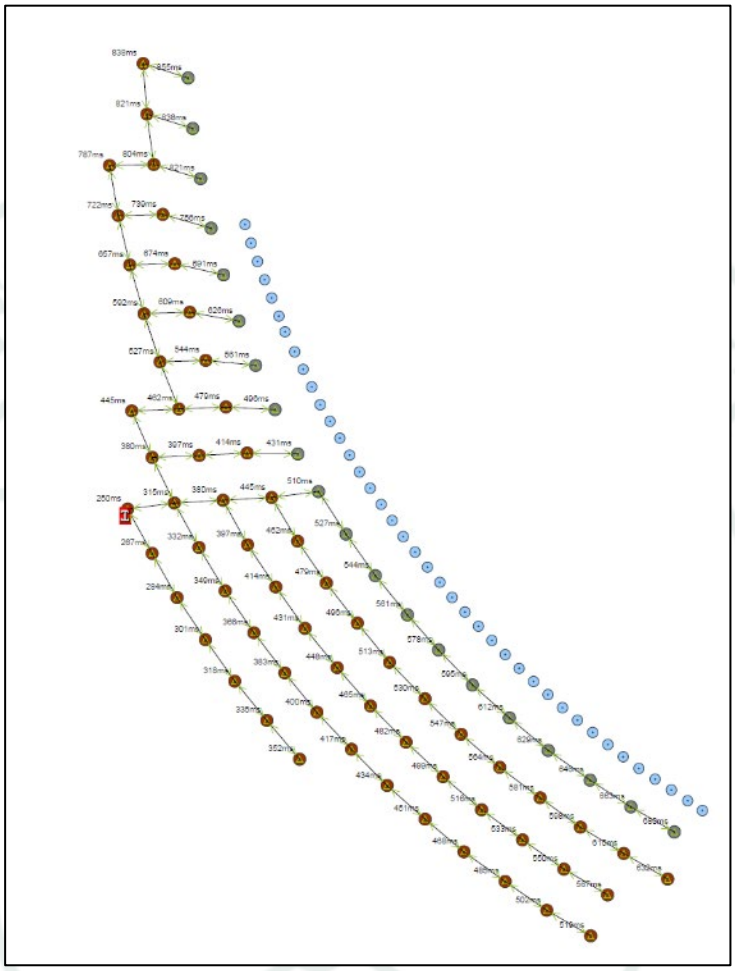


Figura 15. *Secuencia de salida.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

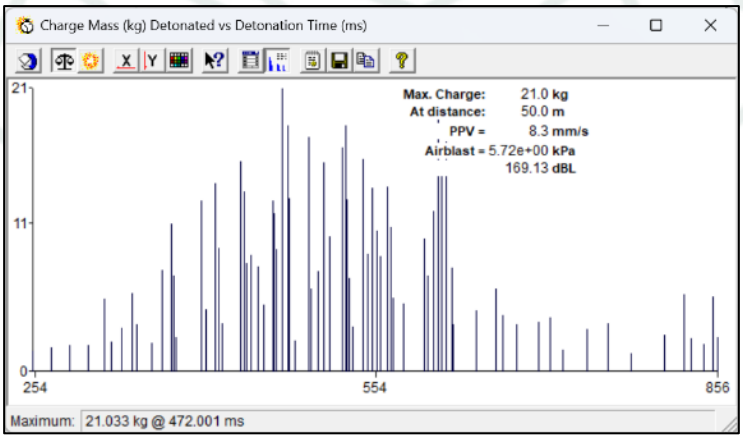


Figura 16. *Resultados Prueba Piloto.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

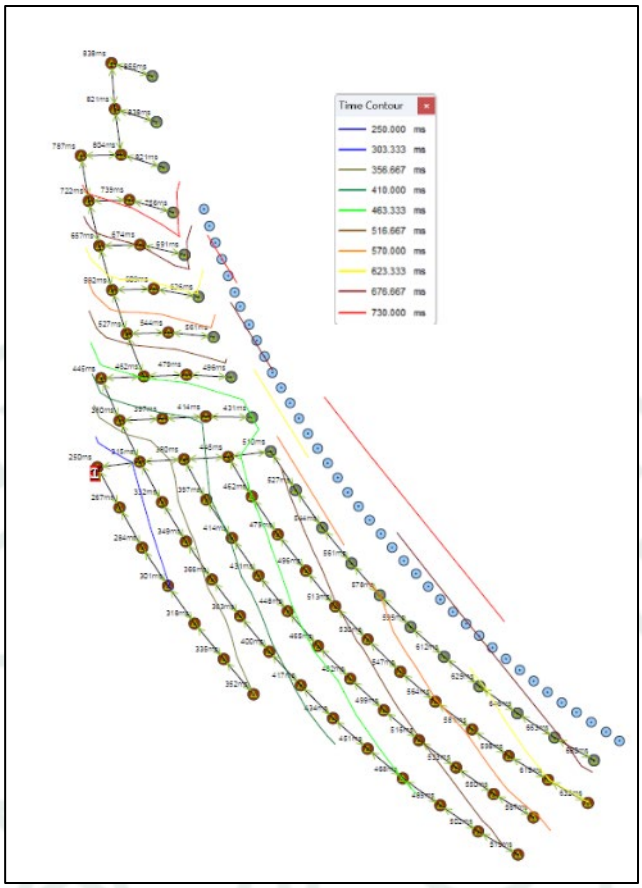


Figura 17. *Líneas de Isotiempos.*

Fuente: Elaboración Propia (2025).

- **Uso de Software para Preveer Impactos:** La tecnología actúa como un filtro de seguridad. El impacto de las nuevas técnicas (Precorte y Detonadores Electrónicos) se prevé mediante:
    - JKSimblast (Módulo 2DBench): Permite visualizar el radio de daño esperado. En el diseño optimizado, el software ayuda a configurar las cargas desacopladas (emulsiones de menor diámetro) en las filas de precorte para asegurar que la presión de detonación no exceda la resistencia a la tracción de la roca.
    - Análisis de Onda Semilla: Antes de la prueba piloto, se puede utilizar software de análisis sísmico como Paradigm o similares para procesar la vibración de un solo taladro y predecir, mediante interferencia constructiva, el impacto de una voladura completa de 30 o 50 taladros.

- **Herramientas de Análisis de Datos para la Precisión:** La precisión final se valida mediante el ajuste estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas piloto:
    - Filtrado Estadístico: Se aplica el Rango Intercuartílico (IQR) para eliminar valores atípicos (outliers) que puedan sesgar la interpretación del daño real.
    - Regresión Log-Log: Los datos de vibración se transforman a escala logarítmica para calibrar la Ley de Atenuación de Vibraciones específica del sitio, logrando una validación con un coeficiente de determinación R2 de 0.84, lo que indica una alta confiabilidad del nuevo diseño.
    - Evaluación de la Geometría Final: Se utiliza el escaneo del talud para comparar la línea de diseño teórica vs la línea de rotura real. La reducción del daño de 1.2 m a 0.3 m es la prueba definitiva de la precisión del diseño optimizado. Este proceso asegura que la transición de una voladura de producción deficiente a una voladura controlada sea técnica y económicamente viable, garantizando la estabilidad de los 12 km de carretera en el proyecto minero.

4.1.5. Establecer los beneficios esperados en la mejora de la estabilidad de los taludes y la reducción de impactos ambientales.

Tras el diagnosticado de las deficiencias del diseño actual como la malla cuadrada, ANFO, NONEL y la propuesta de un plan de optimización integral que incluye el precorte, cargas desacopladas, detonadores electrónicos, el desarrollo de este objetivo cuantifica y cualifica las ganancias proyectadas. Los beneficios se categorizan en cuatro dimensiones: Geotécnica - Estabilidad, Operativa-Económica, Ambiental y de Seguridad.

A) **Beneficios Geotécnicos para la Mejora de la Estabilidad de Taludes:** El beneficio principal es la preservación de la integridad del macizo rocoso remanente, debido a que al transitar de una voladura de producción a una voladura controlada, se esperan los siguientes resultados físicos directos:

- **Reducción Drástica de la Sobrerotura (Backbreak):**
    - **Situación Actual:** El uso de ANFO confinado genera un retroceso promedio de 1.2 metros, dejando una cara irregular y fracturada.
    - **Beneficio Esperado:** Con la implementación de la fila de Precorte (espaciamiento 0.8 m) y la fila Buffer (Burden 3.0 m), se espera reducir el *backbreak* a < 0.3 metros.

- **Impacto en la Estabilidad:** Al eliminar el daño profundo, se preserva la cohesión natural (c) y el ángulo de fricción (ϕ) de la roca, garantizando que el talud se mantenga en el ángulo de diseño geométrico original sin degradarse prematuramente.

- **Control y Atenuación de Vibraciones (VPP):**
  - **Situación Actual:** Se registran picos de 35 mm/s, superando los umbrales críticos de daño.
  - **Beneficio Esperado:** Mediante el uso de Detonadores Electrónicos y secuencias de tiempo optimizadas se evita la superposición de ondas, se proyecta reducir la Velocidad Pico Partícula (VPP) a < 12 mm/s en la cresta del talud.
  - **Impacto Estructural:** Una reducción de más del 60% en la energía sísmica evita la apertura de diaclasas preexistentes y la generación de nuevas microfracturas, siendo este el factor más determinante para la estabilidad a largo plazo.
- **Modificación del Espectro de Frecuencia:**
  - **Beneficio Técnico:** Se espera aumentar la frecuencia dominante de los actuales 10-20 Hz a valores > 40 Hz, ya que las frecuencias altas se atenúan más rápidamente con la distancia y poseen longitudes de onda más cortas, lo que significa que mueven menos masa de roca al unísono, reduciendo el riesgo de deslizamientos de grandes cuñas o bloques.

B) Beneficios Ambientales - Reducción de Impactos: La optimización del proceso no solo protege la ingeniería, sino que mitiga significativamente la huella ambiental de la operación en la zona de Cocachacra.

- **Control de Emisiones de Polvo y Gases:**
  - **Mecanismo de Mejora:** La voladura descontrolada actual genera exceso de finos y proyección de material. El nuevo diseño, al optimizar el confinamiento y utilizar **emulsiones**, es decir, el balance de oxígeno equilibrado en lugar de ANFO en zonas críticas, reduce la liberación de gases nitrosos (NO) y la nube de polvo en suspensión.
  - **Beneficio:** Mejora de la calidad del aire en el entorno inmediato, cumpliendo con los estándares ambientales y reduciendo la afectación a la visibilidad en carretera.

- **Menor Contaminación Acústica y de Suelo:**
    - **Ruido y Onda Aérea:** El uso de detonadores electrónicos permite eliminar el ruido de la detonación superficial del cordón detonante y evita la superposición de ondas de choque aéreas (Airblast), reduciendo la molestia auditiva.
    - **Erosión:** Un talud liso y competente logrado por el precorte es mucho menos susceptible a la erosión eólica e hídrica que un talud fracturado y rugoso, esto reduce la generación de sedimentos y la degradación del suelo circundante.

C) **Beneficios y Costos Económicos y Operativos:** Aunque la implementación de tecnología como detonadores electrónicos y emulsiones, implica un mayor costo unitario de perforación y voladura, el beneficio económico global es positivo debido a los ahorros aguas abajo.

- **Costos Operativos Directos por Remediación y Sostenimiento:** Cuando la energía de la voladura daña el macizo rocoso más allá de la línea de diseño, se generan trabajos adicionales que no añaden valor al ciclo de minado, pero consumen recursos del presupuesto:
    - **Costos de Saneo (Desate de Rocas) y Limpieza:** Un *backbreak* de 1.2 metros a lo largo de los 12 km de la carretera de acceso implica miles de metros cúbicos de material inestable en las crestas y caras del talud. Esto obliga a destinar equipos (excavadoras, cargadores frontales) y personal exclusivo para labores de saneo continuo.
        - *Impacto Cuantitativo Estimado:* En minería a tajo abierto, el costo de equipos de saneo ronda los $150 a $250 USD por hora. Si se requieren 4 horas diarias de saneo en distintos tramos, esto representa un costo no programado que puede superar los $300,000 USD anuales.
    - **Sostenimiento Artificial Adicional:** La degradación del macizo por microfracturas obliga a instalar elementos de contención no previstos en el diseño civil original, tales como mallas electrosoldadas de triple torsión, pernos de anclaje (rock bolts) y hormigón proyectado (shotcrete).
        - *Impacto Cuantitativo Estimado:* El costo de instalación de pernos y malla puede oscilar entre $40 y $80 USD por metro cuadrado. Reducir el daño al talud a menos de 0.3 metros mediante voladura controlada (precorte) elimina o minimiza drásticamente la necesidad de estas inversiones.

- **Sobre-excavación y Acarreo Inútil (*Overbreak*):** El material fracturado fuera del límite de diseño debe ser cargado y transportado al botadero. Este es un movimiento de tierras "gratuito" que gasta combustible, desgasta neumáticos y consume horas-operador sin generar ingresos.

- **Costos Indirectos: Lucro Cesante e Interrupción Operativa:** Las carreteras de acceso son las arterias vitales del proyecto minero; permiten el flujo de mineral, insumos y personal.
  - **Demoras en el Ciclo de Acarreo:** La presencia de rocas en la vía, equipos de saneo bloqueando un carril o las vibraciones excesivas que obligan a detener el tránsito por precaución, aumentan el tiempo de ciclo de los volquetes mineros.
    - *Impacto Cuantitativo Estimado:* Si una flota de camiones mineros (ej. 300 toneladas de capacidad) se retrasa 10 minutos por ciclo debido a bloqueos parciales en la carretera, la pérdida de tonelaje movido diario es masiva. Un retraso del 5% en el ciclo de acarreo puede significar pérdidas de millones de dólares mensuales en ingresos no percibidos (lucro cesante).
  - **Desgaste Prematuro de Equipos:** Una voladura descontrolada también daña la rasante de la carretera (formación de grietas y baches). Esto reduce la vida útil de los neumáticos de los camiones de extracción (costo que supera los $30,000 USD por unidad) y genera fatiga en los sistemas de suspensión.

- **Costos Derivados de Accidentabilidad y Seguridad:** El riesgo más crítico de un talud inestable inducido por voladura deficiente es la pérdida de contención de rocas (caída de rocas o *rockfall*), lo cual tiene implicaciones financieras y legales devastadoras:
  - **Daños a Equipos y Maquinaria:** El impacto de un bloque de roca desprendido sobre una perforadora, un volquete o un vehículo liviano genera costos inmediatos de reparación y el costo de oportunidad por tener el equipo fuera de servicio.
  - **Lesiones y Fatalidades:** Un accidente que involucre al personal no solo es una tragedia humana inaceptable, sino que conlleva costos médicos, indemnizaciones legales y paralizaciones inmediatas impuestas por las autoridades fiscalizadoras (como OSINERGMIN o SUNAFIL). Una paralización de operaciones de 3 a 7 días por una investigación fatal puede detener la producción completa de la mina, generando pérdidas

multimillonarias. La reducción de la VPP a valores < 12 mm/s eleva directamente el Factor de Seguridad (FoS) dinámico, mitigando este riesgo.

- **Costos Ambientales y Regulatorios:** La inestabilidad de los taludes incrementa la erosión del suelo y la generación incontrolada de material particulado (PM).
    - **Sanciones y Mitigación:** El polvo excesivo afecta la calidad del aire de las comunidades aledañas, lo que puede derivar en multas por incumplimiento de los Instrumentos de Gestión Ambiental (EIA/DIA). Además, se incrementa el costo operativo por la necesidad de utilizar camiones cisterna regadores con mayor frecuencia para mitigar el polvo en los 12 km de vía.

Tabla 19. *Costos Económicos y Operativos*

Concepto de Costo / Riesgo	Escenario Actual (Línea Base)	Escenario Optimizado (Grupo Experimental)	Impacto en la Rentabilidad (ROI)
Daño al Talud (Backbreak)	Promedio de 1.2 m.	< 0.3 m.	Reducción del 75% en costos de acarreo de sobre-excavación y horas-máquina en saneo.
Vibraciones (VPP)	Promedio de 35 mm/s.	< 12 mm/s.	Eliminación de daños estructurales inducidos; prevención de costos por paralización preventiva.
Sostenimiento Geotécnico	Alta probabilidad de requerir pernos/mallas por pérdida de competencia.	Taludes lisos y competentes por efecto de la técnica de precorte.	Ahorro directo en CAPEX de obras civiles de contención de carreteras.
Continuidad Operativa	Alta interrupción en los 12 km de vía por desprendimientos.	Flujo continúo de flota de acarreo garantizado.	Maximización de las toneladas métricas transportadas por turno (aumento de ingresos).

Fuente: Elaboración Propia (2025).

D) Beneficios Sociales y de Seguridad: Este es el beneficio intangible más valioso para la sostenibilidad del proyecto.

Seguridad **del Personal - Mitigación de Riesgos:** Como impacto se reduce la probabilidad de accidentes fatales o incapacitantes por caída de rocas sobre vehículos ligeros, camiones de acarreo o personal de piso. Un talud estable es, por definición, un entorno de trabajo seguro.

- **Relación Comunitario:** como impacto al mitigar las vibraciones, el ruido y el polvo que podrían llegar a las zonas agrícolas o comunidades cercanas, la empresa

demuestra responsabilidad técnica y ambiental. Esto fortalece la confianza y la licencia social para operar, vital en el contexto sociopolítico de la región Arequipa.

E) **Comparativa - Cuadro de Beneficios:** Se presenta un resumen cuantitativo de los indicadores de éxito esperados tras la implementación del plan:

Tabla 20. *Comparativa - Cuadro de Beneficios.*

Indicador Clave de Desempeño (KPI)	Escenario Actual (Línea Base)	Escenario Optimizado (Meta)	Beneficio Obtenido
Vibración (VPP)	35mm/s	< 12 mm/s	Reducción del 65% en energía destructiva.
Frecuencia Dominante	10 – 20 Hz	> 40,Hz	Cambio a frecuencias seguras de rápida atenuación.
Sobrerotura (Backbreak)	1.2m	< 0.3m	Mejora del 75% en la geometría final.
Condición del Talud	Fracturado, inestable.	Liso (medias cañas visibles).	Estabilidad mecánica a largo plazo.
Seguridad Vial	Riesgo Alto (Caída de rocas).	Riesgo Controlado/Bajo.	Entorno seguro para operaciones.
Impacto Ambiental	Alto (Polvo, Ruido, Erosión).	Medio/Bajo (Controlado).	Mejor gestión ambiental y social.

Fuente: Elaboración Propia (2025).

F) **Aplicabilidad de la Optimización en proyectos similares:** Esta optimización puede ser aplicada en otros proyectos de carretera, accesos y/o plataformas en construcción que presenten inestabilidad en los taludes por problemas de vibración.

La implementación de esta metodología, requiere adaptar los para metros de diseño según las características del macizo rocoso y las condiciones operativas de cada proyecto.

Los principales parámetros que se ajustan son:

Carga máxima por retardo, burden, espaciamiento, secuencia de iniciación, tipo de explosivo, longitud de taco, tipo de carga, tipo de taladro, ya sea; buffer, piloto, producción y precorte, y el uso de detonadores electrónicos.

En macizos competentes las ondas producidas por la energía tienden a propagarse por a mayor distancia mientras que en un macizo fracturado tiende a

disiparse. Sin embargo, también existe mayor probabilidad de que queden rocas colgando o sueltas en el talud final.

El empleo de un software como JkSimblast, ayuda bastante a la evaluación ya que predecir las ondas de vibración y la energía liberada por la voladura.

CONCLUSIONES

- Se determinó que el proceso actual de perforación y voladura, caracterizado por el uso de una malla cuadrada (3.5 x 3.5m), una relación de rigidez (H/B) de 2.86 y el uso indiscriminado de ANFO confinado con sistema de iniciación NONEL, es técnicamente deficiente para la excavación de taludes finales. Este diseño genera una Velocidad Pico de Partícula (VPP) crítica promedio de 35 mm/s y un daño por retroceso (*backbreak*) de 1.2 metros, actuando como el principal agente desestabilizador al fracturar el macizo rocoso más allá de la línea de diseño y comprometer la berma de seguridad de la carretera.
- El análisis de las variables de diseño demostró que la falta de desacoplamiento energético y la imprecisión temporal son los factores determinantes de la inestabilidad. Se concluye que el alto factor de carga en el contorno (0.85 kg/m^3 de ANFO) provoca una presión de gases excesiva que expande las discontinuidades preexistentes. Asimismo, se identificó que la secuencia de tiempos fija del sistema NONEL genera superposición de ondas y frecuencias dominantes bajas (10-20 Hz), las cuales son altamente perjudiciales para la estabilidad global de los taludes al favorecer el desplazamiento de grandes bloques.
- La evaluación técnica validó que la implementación de Detonadores Electrónicos y técnicas de Voladura Controlada (Precorte y Buffer) constituyen la solución tecnológica viable para las condiciones geomecánicas de la zona sur. La simulación y pruebas de campo demostraron que el uso de retardos precisos (17 ms entre taladros) permite elevar la frecuencia de vibración a rangos seguros (>40 Hz), mientras que el precorte actúa eficazmente como un filtro de "grieta de aire", aislando el talud final de la energía destructiva de la voladura de producción.
- La implementación del plan de optimización, que integra una malla triangular zonificada (B=4.0m, S=4.8m), una fila de Precorte (S=0.8m) y una fila Buffer (B=3.0m) con cargas desacopladas de emulsión, logró resultados exitosos en la fase experimental. Se validó una reducción drástica de la VPP a valores entre 10.58 y 11.77 mm/s, cumpliendo holgadamente con el umbral de seguridad establecido (<12 mm/s). Además, se calibró una Ley de Atenuación de Sitio (R^2=0.84) que permite predecir y limitar la carga operante máxima a 373 kg por retardo para garantizar la integridad de la estructura.

- Se establece que la optimización integral del proceso genera beneficios directos en la estabilidad física y la sostenibilidad operativa. Se logró reducir el daño al talud (*backbreak*) de 1.2 m a menos de 0.3 m, obteniendo taludes lisos y competentes que eliminan la necesidad de trabajos intensivos de saneo y mantenimiento. Desde la perspectiva ambiental y de seguridad, el control de la energía explosiva y la eliminación de la detonación superficial del cordón detonante redujeron significativamente la proyección de rocas, el ruido y la emisión de polvo, garantizando la continuidad operativa de la carretera y la seguridad del personal.

En conclusión, la investigación demuestra que la transición de un diseño de voladura de producción convencional a un diseño de voladura controlada y optimizada mejora significativamente la estabilidad de los taludes en las carreteras del proyecto minero. La hipótesis planteada ha sido validada, confirmando que el control geométrico, energético y temporal del disparo es la herramienta de ingeniería más efectiva para mitigar riesgos geotécnicos, asegurando una infraestructura vial segura y reduciendo los costos operativos a largo plazo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para el proyecto minero adoptar el plan de optimización de manera progresiva. Iniciar con pruebas piloto en tramos no críticos de la carretera para calibrar los modelos de predicción de vibraciones antes de la implementación masiva en zonas de alto riesgo geológico.
- Es fundamental que el área de Operaciones de Mina internalice que la perforación y voladura en carreteras no es una actividad de movimiento de tierras, sino de construcción de estructuras. Por ello, se debe priorizar la calidad de la pared final sobre el volumen movido por disparo.
- Como integración Geomecánica-Operativa, se sugiere institucionalizar mesas de trabajo semanales entre las áreas de Geotecnia y Perforación y Voladura para validar los diseños de malla antes de la marcación en campo, asegurando que los parámetros se ajusten a la calidad de roca (RMR) del frente específico.
- Se recomienda implementar una base de datos digital unificada que vincule los reportes de voladura (*Shot Reports*) con los levantamientos topográficos post-voladura. Esto permitirá generar un historial de "Factor de Carga vs. Backbreak" para afinar continuamente los diseños. Además, el No aplicar un diseño de talla única, ya que se recomienda zonificar los 12 km de carretera en dominios geotécnicos y establecer plantillas de voladura específicas para cada dominio (ej. Roca Dura, Roca Fracturada, Suelo).
- Implementar un protocolo estricto de control de calidad en la perforación. El uso de inclinómetros digitales en las perforadoras es vital para garantizar que los taladros de precorte mantengan el ángulo de diseño del talud. Una desviación mayor al 5% anula el efecto de la voladura controlada. Ademas en el Burden se debe capacitar a los topógrafos y perforistas sobre la importancia crítica del *burden* en la fila *buffer*. Un error de +/- 50 cm en esta fila puede significar la diferencia entre un talud estable y uno dañado.
- Se debe realizar la capacitación en sistemas electrónicos, debido a que la transición de NONEL a detonadores electrónicos requiere una curva de aprendizaje técnica, se recomienda certificar al personal de disparo en el uso de consolas de programación y diseño de secuencias complejas para evitar errores de conexión que podrían resultar en tiros cortados. Además de establecer como procedimiento estándar el uso de

software de simulación (tipo JKSimblast) para validar los tiempos de salida y los contornos de energía *antes* de cada voladura de contorno, evitando la improvisación en campo.

- Instalar estaciones de monitoreo de vibraciones fijas en puntos estratégicos de la carretera. Los datos deben ser auditados mensualmente para actualizar la Ley de Atenuación de Sitio (K y $\boldsymbol{\alpha}$), asegurando que el modelo predictivo siga siendo válido conforme avanza la construcción. Además incorporar el Metraje Lineal de Medias Cañas Visibles como un KPI oficial para evaluar el desempeño del equipo de perforación y voladura, ligando bonos de productividad a la calidad del talud y no solo al avance.

REFERENCIAS

Alzamora D (2023), Optimización de Perforación y Voladura con Taladros Largos en Tajos de Producción. Zona Magistral Centro. Empresa Minera Trevali Perú S.A.C. Unidad Minera Santander. Región Lima. 2021. Cerro de Pasco - Perú – 2023.

Berrospi V (2019), Optimización de la perforación y voladura para mejorar la zona de profundización en la mina Andaychagua de la Cía. minera Volcan S.A.A. Cerro de Pasco.

Caballero E y Calixto R (2022), Implementación de un Modelo Integral de Voladura para optimizar los procesos de ingeniería de la voladura de rocas en galerías de sección de 4x4 m en Compañía Minera Santa Luisa, Unidad Huanzalá. Lima – Perú.

Cari M (2024). Análisis de onda elemental para el control de vibraciones y selección de retardos en la zona geotécnica 4 del tajo sur de un yacimiento de tipo pórfido – skarn de cobre. Arequipa – Perú.

Condor O y Rodriguez A (2024), Optimización de los procesos de perforación y voladura mediante modelos matemáticos para incrementar la productividad en la cortada se nv. 1680 - MINA TINGO, compañía minera PODEROSA S.A. – PATAZ. Trujillo – Perú

Delgado, A. (2014). Estrategias en el diseño de perforación y voladura para estructuras aledañas controlando vibraciones y rocas al aire en minas a tajo abierto. Arequipa: Repositorio de tesis de la UNAS.

FAMESA, (2019). Manual de Perforación y Voladura. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.

Flores J (2020), Optimización de costos de perforación y voladura mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva en la galería Santa

Mónica de la unidad minera esperanza – AREQUIPA. PUNO – PERÚ

Gómez R (2012), Optimización de la perforación y voladura para la minimización de los costos operativos en la unidad El Porvenir de la Compañía Minera Milpo S.A. HUANCAYO – PERÚ.

Huincho J (2022), Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura en los frentes de avance de la unidad minera Cerro Lindo, Nexa Resources S. A. A. Huancayo, 2022.

Ingeoexpert (2024), ¿Qué es un talud y cuál es su función? https://ingeoexpert.com/2024/11/28/que-es-un-talud-y-cual-es-su-funcion/

Lopez et al, (1987). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid: Instituto Geologico Minero de España.

Lozada P y Prado J (2022), Método experimental para determinar el comportamiento vibracional de explosivos de baja energía y su impacto en el control de daño a Taludes. Orica Blast Engineering – PERU.

Luque (2021), Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole. Arequipa – Perú.

Mostacero E y Rodríguez N (2017), Optimización del diseño de perforación y voladura, para reducir costos en labores de avance en la MINA SANTA MARIA - PODEROSA S.A.". TRUJILLO – PERU.

Pacco B y Apaza E (2019). Reducción del daño generado por voladura a taludes finales por medio de técnicas de precorte para yacimiento tipo pórfido de gran escala superficial. Arequipa – Perú

Palomino H (2016) Optimización del proceso de perforación y voladura en las labores de desarrollo, para mejorar la eficiencia en Compañía Minera PODEROSA S.A. TRUJILLO – PERÚ.

Pare D (2024), Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar el avance lineal de galerías en la Unidad Minera Americana de Alpayana S.A. Huancayo – Perú.

Porras, M. Z. (2012). Análisis de las vibraciones generadas por voladuras para la adecuada selección de explosivos en explotaciones mineras subterráneas en la Compañía de Minas Caudalosa S.A. Huancayo: Universidad Nacional Del Centro Del Perú.

Quispe R y Reyes A (2023), Diseño de malla de perforación y voladura, para mejorar la estabilidad de taludes, en la Unidad Minera Utunsa. Huancayo.

Quispe Z y Perez O (2024), Optimización de la perforación y voladura para incrementar el avance lineal en la rampa 616-4E, unidad minera San Cristóbal. Huancayo, 2024

Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (2024). DECRETO SUPREMO N° 024-2016-EM. Edición Mayo 2024.

Rojas C (2016), Aplicación del algoritmo de Holmberg en la malla de perforación para su eficiencia en los avances en SIMSA. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Romero M (2022), Análisis de la estabilidad del talud del botadero de la concesión minera Camila III en la provincia de Mariscal Nieto del departamento de Moquegua. Arequipa - Perú 2022.

Saez, (2016) Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. Santiago de Chile: University of Chile.

Tapia F y Gutierrez A (2022), Estabilización de taludes a doble banco en sociedad minera Cerro Verde.

Torres J (2025), Optimización de perforación y voladura para el control de la estabilidad de talud en la zona de cerro maría en el tajo Cerró CORONA – CAJAMARCA. Lima- Perú.

U.M. La Arena (2022), Gestión de la percepción de voladuras con un enfoque social y eficiencia operativa basado en modelos matemáticos y analítica avanzada. Pan American Silver Perú.

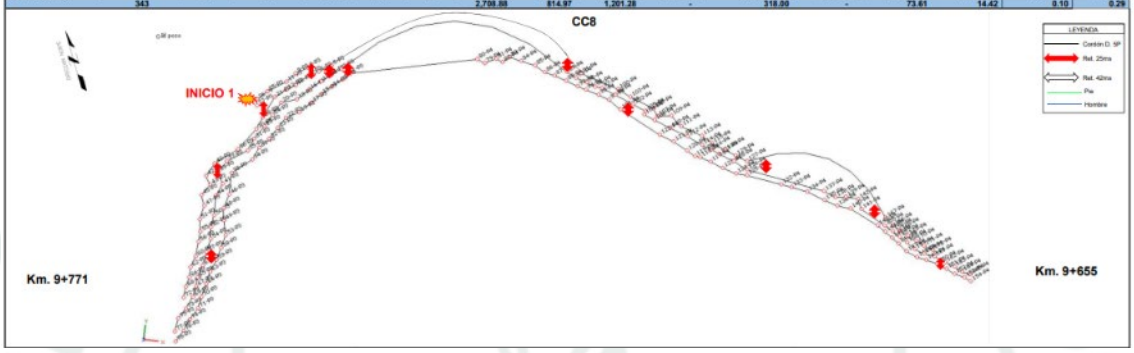
Vergara Pangue, (2016). Manual de Voladura de Enaex . Obtenido de https://es.slideshare.net/AlfredoPangue/manual-de-tronadura-enaex

ANEXOS

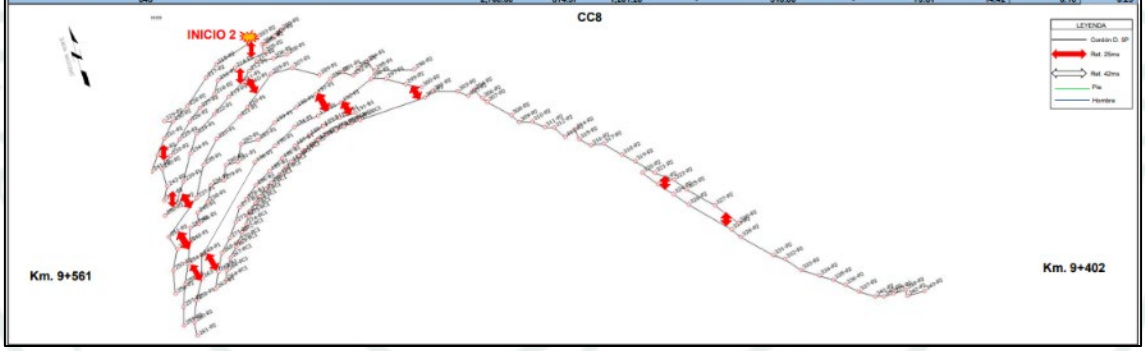
ANEXO 1. PROTOCOLO DE VOLADURA.

ÁREA DE VOLADURA: Km. 9+402 - 9+561/9+655 - 9+771

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (plg.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	15	3.00	5.50	1.70	2.00	0.00	280.50	68.47	30.00	0.00	15.00	0.00	3.47	0.00	0.00	0.24
Producción 1(P1)	48	3.00	3.00	2.10	2.50	0.00	756.00	237.02	120.00	0.00	48.00	0.00	11.11	0.00	0.00	0.31
Producción 2(P2)	83	3.00	2.00	1.50	1.80	0.00	448.20	132.48	149.40	0.00	83.00	0.00	19.21	0.00	0.00	0.30
Producción 3(P3)	78	3.00	2.80	1.50	1.80	0.00	589.68	178.95	140.40	0.00	78.00	0.00	18.06	0.00	0.00	0.30
Producción 4(P4)	94	3.00	3.00	1.50	1.50	0.00	634.50	198.05	141.00	0.00	94.00	0.00	21.76	0.00	0.00	0.31
Precorte 1(PC1)	25	3.00	5.80	0.00	1.00	0.00	-	0.00	170.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.42	0.10	0.00
	343						2,708.88	814.97	1,201.28	-	318.00	-	73.61	14.42	0.10	0.29



Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (plg.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	15	3.00	5.50	1.70	2.00	0.00	280.50	68.47	30.00	0.00	15.00	0.00	3.47	0.00	0.00	0.24
Producción 1(P1)	48	3.00	3.00	2.10	2.50	0.00	756.00	237.02	120.00	0.00	48.00	0.00	11.11	0.00	0.00	0.31
Producción 2(P2)	83	3.00	2.00	1.50	1.80	0.00	448.20	132.48	149.40	0.00	83.00	0.00	19.21	0.00	0.00	0.30
Producción 3(P3)	78	3.00	2.80	1.50	1.80	0.00	589.68	178.95	140.40	0.00	78.00	0.00	18.06	0.00	0.00	0.30
Producción 4(P4)	94	3.00	3.00	1.50	1.50	0.00	634.50	198.05	141.00	0.00	94.00	0.00	21.76	0.00	0.00	0.31
Precorte 1(PC1)	25	3.00	5.80	0.00	1.00	0.00	-	0.00	170.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.42	0.10	0.00
	343						2,708.88	814.97	1,201.28	-	318.00	-	73.61	14.42	0.10	0.29



Buffer 1 (B1)

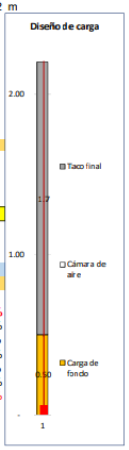
1	**PARAMETROS DE PERFORACIÓN**			
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.70	
E	Espaciamiento	m	2.00	
HB	Altura de banco	m	5.50	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	5.50	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	18.70	
2	**PARAMETROS DE PRIMADO**			
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2	**PARAMETROS DE COLUMNA**			
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	1.30	24%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	2.00	36%
T2	Taco final	m	2.20	40%
	Total Longitud de Carga	m	1.30	24%
	Total Carga	kg/tal	4.56	
	Factor de Carga	kg/m3	0.24	

Producción 1(P1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	2.10		
Espaciamiento	m	2.50		
Altura de banco	m	3.00		
Sobreperforación	m	0.20		
Longitud total de taladro	m	3.20		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	16.80		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	1.50	47%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final	m	1.7	53%	
Total Longitud de Carga	m	1.50	47%	
Total Carga	kg/tal	5.27		
Factor de Carga	kg/m3	0.31		

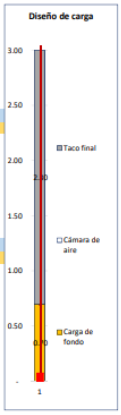
Producción 2(P2)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	1.50		
Espaciamiento	m	1.80		
Altura de banco	m	2.00		
Sobreperforación	m	0.20		
Longitud total de taladro	m	2.20		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	5.94		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	0.50	23%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final (vacio)	m	1.7	77%	
Total Longitud de Carga	m	0.50	23%	
Total Carga	kg/tal	1.76		
Factor de Carga	kg/m2	0.30		



Producción 3(P3)

	1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
B	Burden	m	1.50		
E	Espaciamiento	m	1.80		
HB	Altura de banco	m	2.80		
J	Sobreperforación	m	0.20		
L	Longitud total de taladro	m	3.00		
I	Inclinación	°	90.00		
	Volumen	m3	8.10		
	2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
	Peso	kg	0.463		
	Cantidad	pza	0.50		
	Peso Total	kg	0.231		
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18		
	Cantidad	pza	1.00		
	2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO		
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
C1	Carga de fondo	m	0.70	23%	
T1	Taco intermedio	m	-	0%	
C2	Carga intermedia	m	-	0%	
	Cámara de aire	m	-	0%	
T2	Taco final	m	2.30	77%	
	Total Longitud de Carga	m	0.70	23%	
	Total Carga	kg/tal	2.46		
	Factor de Carga	kg/m3	0.30		



Producción 4(P4)

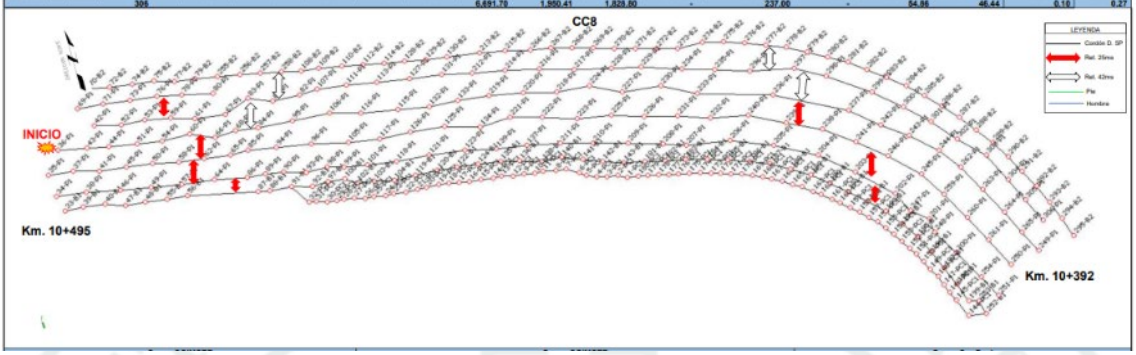
PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	1.50		
Espaciamiento	m	1.50		
Altura de banco	m	3.00		
Sobreperforación	m	0.20		
Longitud total de taladro	m	3.20		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	4.50		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	0.40	13%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final	m	2.8	88%	
Total Longitud de Carga	m	0.40	13%	
Total Carga	kg/tal	1.40		
Factor de Carga	kg/m3	0.31		

Precorte 1(PC1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	0.90		
Espaciamiento	m	1.00		
Altura de banco	m	5.80		
Sobreperforación	m	0.00		
Longitud total de taladro	m	5.80		
Inclinación	°	90.00		
Area de Talud	m2	5.80		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 1" X 7"		
Peso	kg	0.096		
Cantidad	pza	2.00		
Peso Total	kg	0.192		
Tipo de iniciador		Cordon 5P		
Cantidad	m	9.30		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	-	0%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	4.30	74%	
Taco final (vacio)	m	1.50	26%	
Total Longitud de Carga	m	-	0%	
Total Carga	kg/tal	0.58		
Factor de Carga	kg/m2	0.10		

ÁREA DE VOLADURA: Km. 10+392 - 10+495

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (plg.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	49	3.00	6.50	1.70	2.00	0.00	1,082.90	258.09	98.00	0.00	49.00	0.00	11.34	0.00	0.00	0.24
Buffer 2 (B2)	50	3.00	4.50	1.70	2.00	0.00	765.00	193.13	100.00	0.00	50.00	0.00	11.57	0.00	0.00	0.25
Produccion 1 (P1)	138	3.00	4.50	2.60	3.00	0.00	4,843.80	1499.18	414.00	0.00	138.00	0.00	31.94	0.00	0.00	0.31
Precorte 1 (PC1)	69	3.00	7.00	0.00	1.00	0.00	-	0.00	607.20	0.00	0.00	0.00	0.00	46.44	0.10	0.00
	306						6,691.70	1,950.41	1,629.80	-	237.00	-	54.86	46.44	0.10	0.27



Buffer 1 (B1)

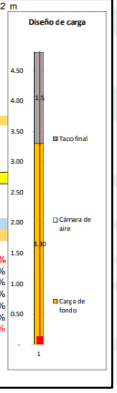
1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.70	
E	Espaciamiento	m	2.00	
HB	Altura de banco	m	6.50	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	6.50	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	22.10	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	1.50	23%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	2.50	38%
T2	Taco final	m	2.50	38%
	Total Longitud de Carga	m	1.50	23%
	Total Carga	kg/tal	5.27	
	Factor de Carga	kg/m3	0.24	

Buffer 2 (B2)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.70	
Espaciamiento	m	2.00	
Altura de banco	m	4.50	
Sobreperforación	m	0.00	
Longitud total de taladro	m	4.50	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	15.30	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	1.10	24%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	1.50	33%
Taco final	m	1.9	42%
Total Longitud de Carga	m	1.10	24%
Total Carga	kg/tal	3.86	
Factor de Carga	kg/m3	0.25	

Produccion 1 (P1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	2.60	
Espaciamiento	m	3.00	
Altura de banco	m	4.50	
Sobreperforación	m	0.30	
Longitud total de taladro	m	4.80	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	37.44	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	3.30	69%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	-	0%
Taco final (vacio)	m	1.5	31%
Total Longitud de Carga	m	3.30	69%
Total Carga	kg/tal	11.59	
Factor de Carga	kg/m2	0.31	

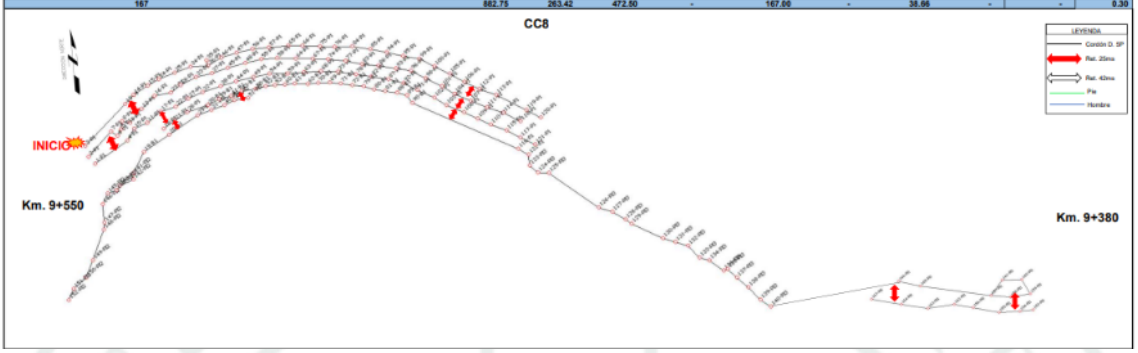


Precorte 1 (PC1)

1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	0.00	
E	Espaciamiento	m	1.00	
HB	Altura de banco	m	6.50	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	6.50	
I	Inclinación	°	90.00	
	Area de Talud	m2	6.50	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 1" X 7"	
	Peso	kg	0.096	
	Cantidad	pza	2.00	
	Peso Total	kg	0.192	
	Tipo de iniciador		Cordon 5P	
	Cantidad	m	9.30	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	-	0%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	5.00	77%
T2	*Taco final (vacio)*	*m*	*1.50*	23%
	Total Longitud de Carga	m	-	0%
	Total Carga	kg/tal	0.67	
	Factor de Carga	kg/m2	0.10	

ÁREA DE VOLADURA: Km. 9+380 - 9+550

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (plg.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1(B1)	23	3.00	1.80	1.50	1.50	0.00	93.15	24.23	34.50	0.00	23.00	0.00	5.32	0.00	0.00	0.26
Producción 1(P1)	95	3.00	1.50	1.70	2.00	0.00	484.50	144.56	190.00	0.00	95.00	0.00	21.99	0.00	0.00	0.30
Piloto 1(PI1)	15	3.00	2.00	1.50	1.50	0.00	67.50	21.07	22.50	0.00	15.00	0.00	3.47	0.00	0.00	0.31
Piloto 2(PI2)	16	3.00	2.00	1.80	2.00	0.00	115.20	35.96	32.00	0.00	16.00	0.00	3.70	0.00	0.00	0.31
Piloto 3(PI3)	18	3.00	2.00	1.70	2.00	0.00	122.40	37.61	36.00	0.00	18.00	0.00	4.17	0.00	0.00	0.31
	167						882.75	263.42	472.50	-	167.00	-	38.66	-	-	0.30

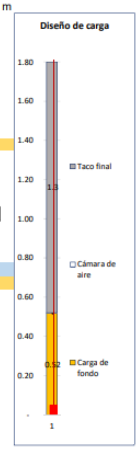


Buffer 1(B1)

1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.50	
E	Espaciamiento	m	1.50	
HB	Altura de banco	m	1.80	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	1.80	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	4.05	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	0.30	17%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	0.70	39%
T2	Taco final	m	0.80	44%
	Total Longitud de Carga	m	0.30	17%
	Total Carga	kg/tal	1.05	
	Factor de Carga	kg/m3	0.26	

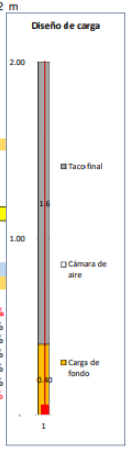
Producción 1(P1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.70	
Espaciamiento	m	2.00	
Altura de banco	m	1.50	
Sobreperforación	m	0.30	
Longitud total de taladro	m	1.80	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	6.12	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	0.52	29%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	-	0%
Taco final	m	1.3	71%
Total Longitud de Carga	m	0.52	29%
Total Carga	kg/tal	1.83	
Factor de Carga	kg/m3	0.30	



Piloto 1(PI1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.50	
Espaciamiento	m	1.50	
Altura de banco	m	2.00	
Sobreperforación	m	0.00	
Longitud total de taladro	m	2.00	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	4.50	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	0.40	20%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	-	0%
Taco final (vacío)	m	1.6	80%
Total Longitud de Carga	m	0.40	20%
Total Carga	kg/tal	1.40	
Factor de Carga	kg/m2	0.31	

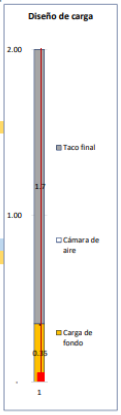


Piloto 2(PI2)

1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.50	
E	Espaciamiento	m	1.50	
HB	Altura de banco	m	2.00	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	2.00	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	4.50	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	0.40	20%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	-	0%
T2	Taco final	m	1.6	80%
	Total Longitud de Carga	m	0.40	20%
	Total Carga	kg/tal	1.40	
	Factor de Carga	kg/m3	0.31	

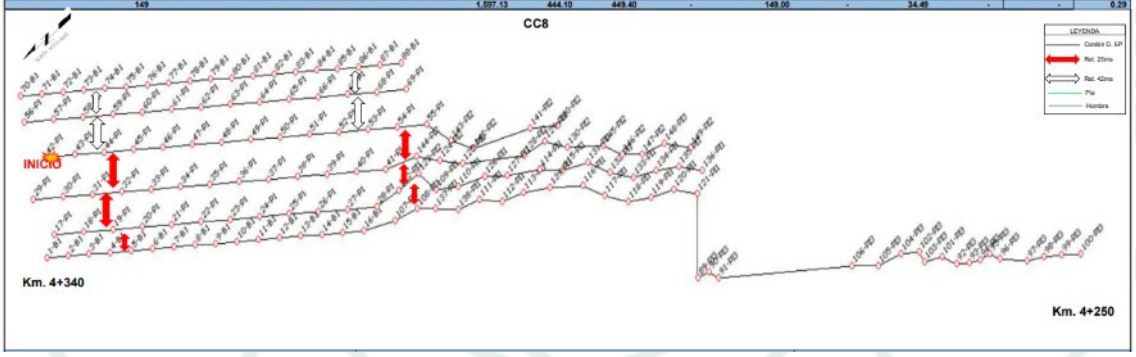
Piloto 3(PI3)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.70	
Espaciamiento	m	2.00	
Altura de banco	m	2.00	
Sobreperforación	m	0.00	
Longitud total de taladro	m	2.00	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	4.00	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	0.35	18%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	-	0%
Taco final	m	1.7	83%
Total Longitud de Carga	m	0.35	18%
Total Carga	kg/tal	1.23	
Factor de Carga	kg/m3	0.31	



ÁREA DE VOLADURA: Km. 4+250 - 4+340

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1(B1)	35	3.00	3.50	1.50	1.80	0.00	330.75	86.03	63.00	0.00	35.00	0.00	8.10	0.00	**0.00**	**0.26**
Producción 1(P1)	53	3.00	3.20	2.10	2.50	0.00	890.40	263.74	132.50	0.00	53.00	0.00	12.27	0.00	**0.00**	**0.30**
Pisto 1(Pi1)	27	3.00	3.00	1.50	1.80	0.00	218.70	66.37	48.60	0.00	27.00	0.00	6.25	0.00	**0.00**	**0.30**
Pisto 2(Pi2)	15	3.00	2.30	1.50	1.80	0.00	93.15	27.96	27.00	0.00	15.00	0.00	3.47	0.00	**0.00**	**0.30**
Pisto 3(Pi3)	19	3.00	1.50	1.50	1.50	0.00	64.13	0.00	28.50	0.00	19.00	0.00	4.40	0.00	**0.00**	
	149						**1,597.13**	**444.10**	**449.40**	**-**	**149.00**	**-**	**34.49**	**-**	**-**	**0.29**

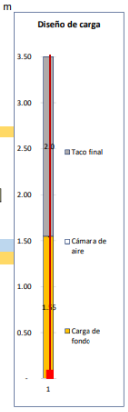


Buffer 1(B1)

1	**PARAMETROS DE PERFORACIÓN**				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
B	Burden	m	1.50		
E	Espaciamiento	m	1.80		
HB	Altura de banco	m	3.50		
J	Sobreperforación	m	0.00		
L	Longitud total de taladro	m	3.50		
I	Inclinación	°	90.00		
	Volumen	m3	9.45		
2	**PARAMETROS DE PRIMADO**				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
	Peso	kg	0.463		
	Cantidad	pza	0.50		
	Peso Total	kg	0.231		
	Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18		
	Cantidad	pza	1.00		
2	**PARAMETROS DE COLUMNA**				
	Tipo de Explosivo		ANFO		
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
C1	Carga de fondo	m	0.70	20%	
T1	Taco intermedio	m	-	0%	
C2	Carga intermedia	m	-	0%	
	Cámara de aire	m	1.40	40%	
T2	Taco final	m	1.40	40%	
	Total Longitud de Carga	m	0.70	20%	
	Total Carga	kg/tal	2.46		
	Factor de Carga	kg/m3	0.26		

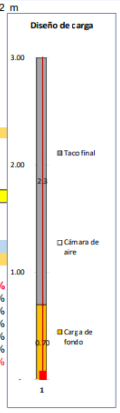
Producción 1(P1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	2.10		
Espaciamiento	m	2.50		
Altura de banco	m	3.20		
Sobreperforación	m	0.30		
Longitud total de taladro	m	3.50		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	18.38		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	1.55	44%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final	m	2.0	56%	
Total Longitud de Carga	m	1.55	44%	
Total Carga	kg/tal	5.44		
Factor de Carga	kg/m3	0.30		



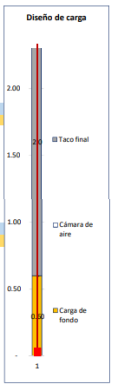
Piloto 1(PI1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	1.50		
Espaciamiento	m	1.80		
Altura de banco	m	3.00		
Sobreperforación	m	0.00		
Longitud total de taladro	m	3.00		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	8.10		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 8.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	0.70	23%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final (vacío)	m	2.3	77%	
Total Longitud de Carga	m	0.70	23%	
Total Carga	kg/tal	2.46		
Factor de Carga	kg/m2	0.30		



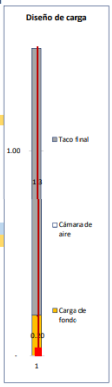
Piloto 2(PI2)

1	**PARAMETROS DE PERFORACIÓN**			
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.50	
E	Espaciamiento	m	1.80	
HB	Altura de banco	m	2.30	
J	Sobreperforación	m	0.30	
L	Longitud total de taladro	m	2.60	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	7.02	
2	**PARAMETROS DE PRIMADO**			
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2	**PARAMETROS DE COLUMNA**			
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	0.60	23%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	-	0%
T2	Taco final	m	2.0	77%
	Total Longitud de Carga	m	0.60	23%
	Total Carga	kg/tal	2.11	
	Factor de Carga	kg/m3	0.30	



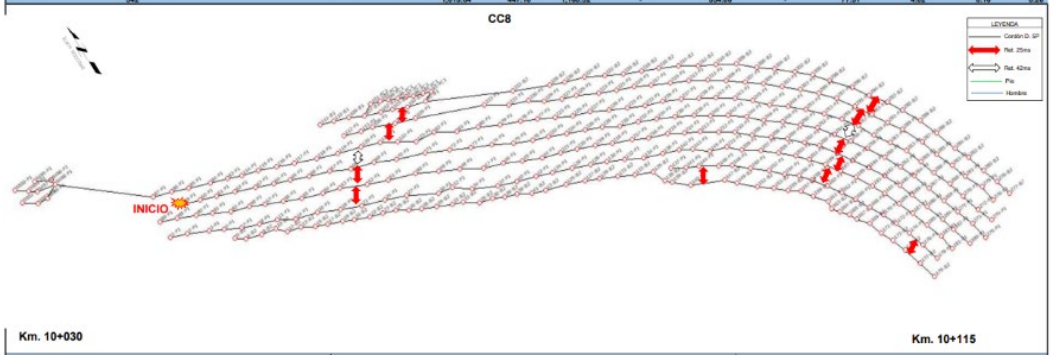
Piloto 3(PI3)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	1.50		
Espaciamiento	m	1.50		
Altura de banco	m	1.50		
Sobreperforación	m	0.00		
Longitud total de taladro	m	1.50		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	2.25		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	0.20	13%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final	m	1.3	87%	
Total Longitud de Carga	m	0.20	13%	
Total Carga	kg/tal	0.70		
Factor de Carga	kg/m3	0.31		



ÁREA DE VOLADURA: Km. 10+115 - 10+030

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°16 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	8	3.00	4.50	1.70	2.00	0.00	122.40	30.90	16.00	0.00	8.00	0.00	1.85	0.00	-	**0.25**
Buffer 2(B2)	79	3.00	1.80	1.70	2.00	0.00	483.48	117.90	158.00	0.00	79.00	0.00	18.29	0.00	-	**0.24**
Produccion 1 (Pl1)	247	3.00	1.20	1.70	2.00	0.00	1,007.76	298.36	494.00	0.00	247.00	0.00	57.18	0.00	-	**0.30**
Precorte 1 (PC1)	8	3.00	5.50	0.00	1.00	0.00	-	0.00	57.20	0.00	0.00	0.00	-	4.62	**0.10**	**0.00**
	342						1,613.64	447.16	1,160.32	-	334.00	-	77.31	4.62	0.10	0.26

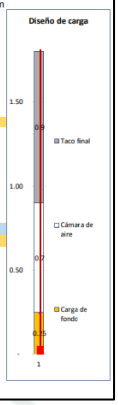


Buffer 1 (B1)

1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.70	
E	Espaciamiento	m	2.00	
HB	Altura de banco	m	4.50	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	4.50	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	15.30	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	1.10	24%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	1.60	36%
T2	Taco final	m	1.80	40%
	Total Longitud de Carga	m	1.10	24%
	Total Carga	kg/tal	3.86	
	Factor de Carga	kg/m3	0.25	

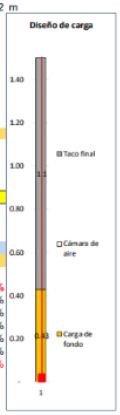
Buffer 2(B2)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.70	
Espaciamiento	m	2.00	
Altura de banco	m	1.80	
Sobreperforación	m	0.00	
Longitud total de taladro	m	1.80	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	3.60	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	0.25	14%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	0.7	36%
Taco final	m	0.9	50%
Total Longitud de Carga	m	0.25	14%
Total Carga	kg/tal	0.88	
Factor de Carga	kg/m3	0.24	



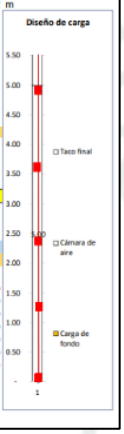
Produccion 1 (PI1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	1.70	
Espaciamiento	m	2.00	
Altura de banco	m	1.20	
Sobreperforación	m	0.30	
Longitud total de taladro	m	1.50	
Inclinación	°	90.00	
Volumen	m3	5.10	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
Peso	kg	0.463	
Cantidad	pza	0.50	
Peso Total	kg	0.231	
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		ANFO	
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
Carga de fondo	m	0.43	29%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	-	0%
Taco final	m	1.1	71%
Total Longitud de Carga	m	0.43	29%
Total Carga	kg/tal	1.51	
Factor de Carga	kg/m3	0.30	



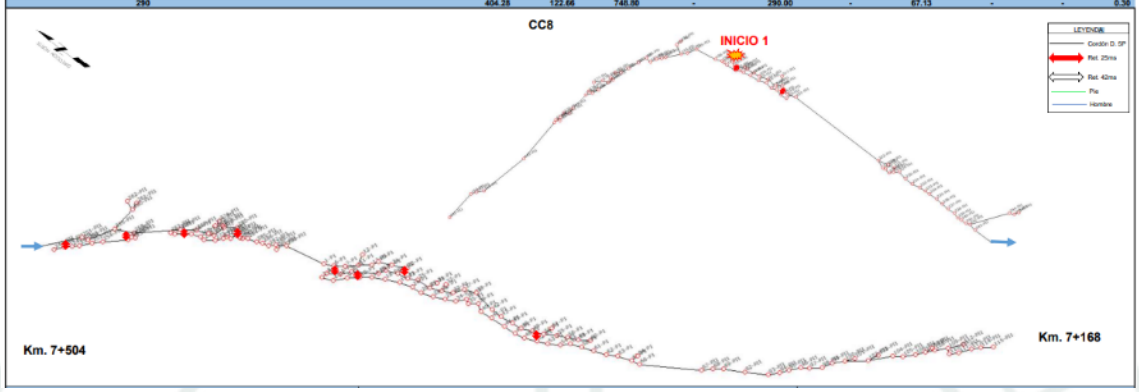
Precorte 1 (PC1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN			
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
Burden	m	0.00	
Espaciamiento	m	1.00	
Altura de banco	m	5.50	
Sobreperforación	m	0.00	
Longitud total de taladro	m	5.50	
Inclinación	°	82.00	
Area de Talud	m2	5.50	
PARAMETROS DE PRIMADO			
Tipo		EMULNOR 3000 1" X 7"	
Peso	kg	0.096	
Cantidad	pza	2.00	
Peso Total	kg	0.192	
Tipo de iniciador		Cordon 5P	
Cantidad	m	6.05	
PARAMETROS DE COLUMNA			
Tipo de Explosivo		EMULNOR 3000 1"X7"	
Densidad de Explosivo	kg/m3	1140.00	
Densidad Lineal	kg/m	0.10	122%
Carga de fondo	m	-	0%
Taco intermedio	m	-	0%
Carga intermedia	m	-	0%
Cámara de aire	m	5.00	91%
Taco final (vacio)	m	1.70	31%
Total Longitud de Carga	m	-	0%
Total Carga	kg/tal	0.58	
Factor de Carga	kg/m2	0.10	

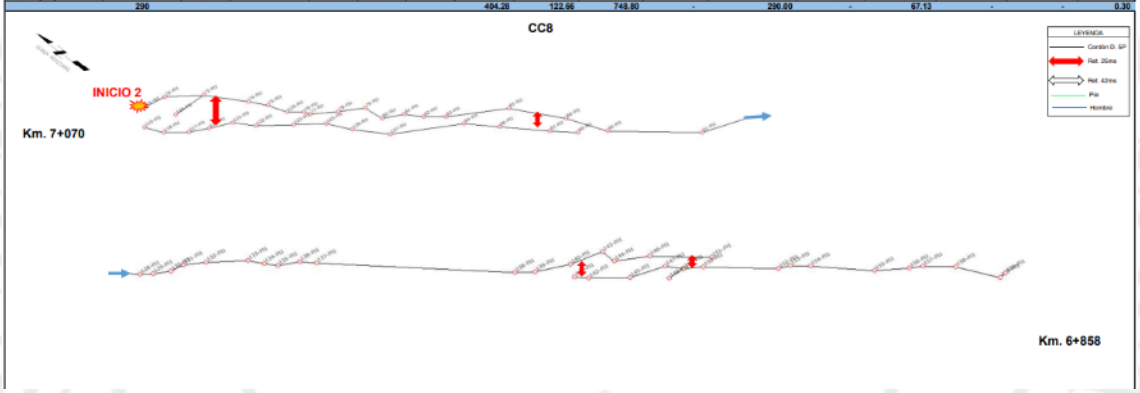


ÁREA DE VOLADURA: Km. 6+858-6+953 / 7+038-7+070 7+168-7+504

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Produccion 1 (P1)	66	3.00	1.20	1.30	2.00	0.00	51.48	15.30	132.00	0.00	66.00	0.00	15.28	0.00	-	0.30
Piloto 1 (PI1)	224	3.00	1.00	1.50	1.50	0.00	352.80	107.37	336.00	0.00	224.00	0.00	51.85	0.00	-	0.30
	290						404.28	122.66	748.80	-	290.00	-	67.13	-	-	0.30

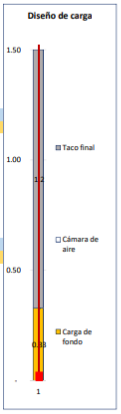


Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Produccion 1 (P1)	66	3.00	1.20	1.30	2.00	0.00	51.48	15.30	132.00	0.00	66.00	0.00	15.28	0.00	-	0.30
Piloto 1 (PI1)	224	3.00	1.00	1.50	1.50	0.00	352.80	107.37	336.00	0.00	224.00	0.00	51.85	0.00	-	0.30
	290						404.28	122.66	748.80	-	290.00	-	67.13	-	-	0.30



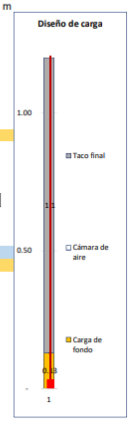
Produccion 1 (P1)

1 PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.30	
E	Espaciamiento	m	2.00	
HB	Altura de banco	m	1.20	
J	Sobreperforación	m	0.30	
L	Longitud total de taladro	m	1.50	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	3.90	
2 PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2 PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	0.33	22%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	-	0%
T2	Taco final	m	1.2	78%
	Total Longitud de Carga	m	0.33	22%
	Total Carga	kg/tal	1.16	
	Factor de Carga	kg/m3	0.30	



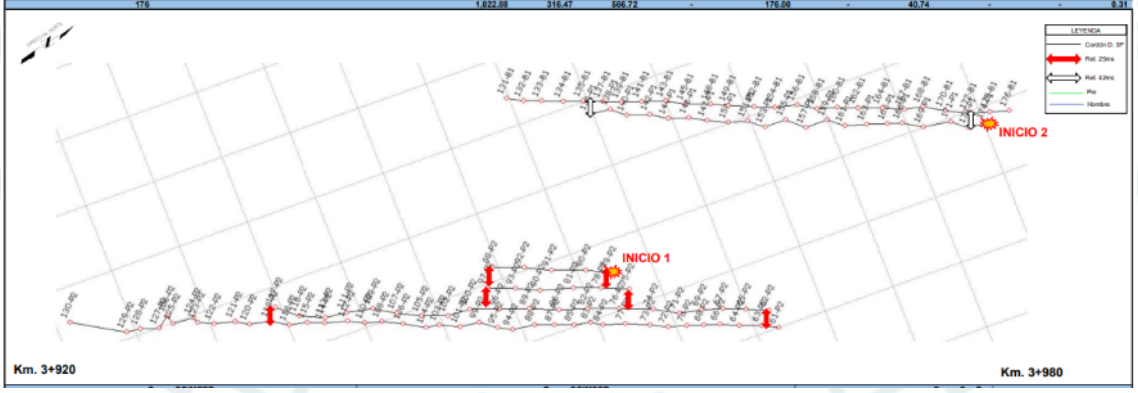
Piloto 1 (PI1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
	Burden	m	1.50	
	Espaciamiento	m	1.50	
	Altura de banco	m	1.00	
	Sobreperforación	m	0.20	
	Longitud total de taladro	m	1.20	
	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	1.50	
PARAMETROS DE PRIMADO				
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
PARAMETROS DE COLUMNA				
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
	Carga de fondo	m	0.13	11%
	Taco intermedio	m	-	0%
	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	-	0%
	Taco final	m	1.1	89%
	Total Longitud de Carga	m	0.13	11%
	Total Carga	kg/tal	0.46	
	Factor de Carga	kg/m3	0.30	

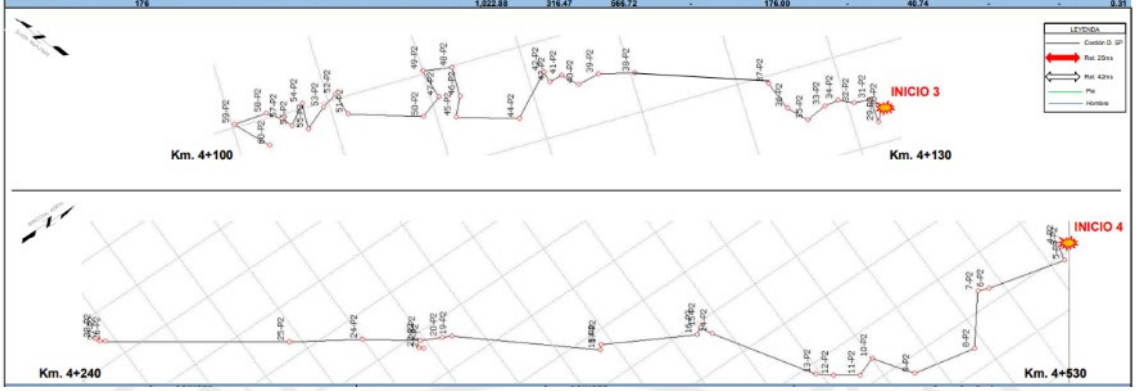


ÁREA DE VOLADURA: Km. 3+920@3+980 / 4+100@4+130 4+240@4+340 / 4+500@4+530

Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°10 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	25	3.00	4.30	1.30	1.50	0.00	104.81	30.73	37.50	0.00	25.00	0.00	5.79	0.00	-	0.29
Produccion 1 (P1)	21	3.00	4.30	2.50	2.70	0.00	426.67	141.96	56.70	0.00	21.00	0.00	4.86	0.00	-	0.33
Produccion 2 (P2)	130	3.00	1.50	1.80	2.00	0.00	491.40	143.80	260.00	0.00	130.00	0.00	30.09	0.00	-	0.29
	176						1,022.88	316.47	556.72	-	176.00	-	40.74	-	-	0.31

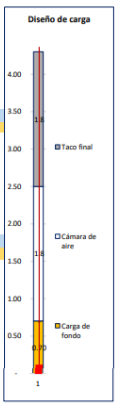


Tipo de Taladros	Cantidad de taladros	Diametro (pig.)	Altura Promedio (m)	Burden (m)	Espac. (m)	Área del talud (m2)	Volúmen (m3)	ANFO (Kg)	Cordón D. 5P	Cordón D. 10P	FANEL MS 4.0 m N°18 (pza)	EMULNOR 5000 2" X 24" (kg)	EMULNOR 3000 2" X 8" (kg)	EMULNOR 3000 1" X 7" (kg)	Factor de carga kg/m2	Factor de carga kg/m3
Buffer 1 (B1)	25	3.00	4.30	1.30	1.50	0.00	104.81	30.73	37.50	0.00	25.00	0.00	5.79	0.00	-	0.29
Produccion 1 (P1)	21	3.00	4.30	2.50	2.70	0.00	426.67	141.95	56.70	0.00	21.00	0.00	4.86	0.00	-	0.33
Produccion 2 (P2)	130	3.00	1.50	1.80	2.00	0.00	491.40	143.80	260.00	0.00	130.00	0.00	30.09	0.00	-	0.29
	176						1,022.88	316.47	566.72	-	176.00	-	40.74	-	-	0.31



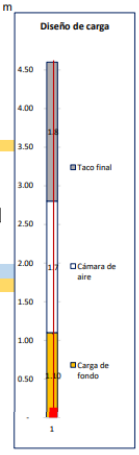
Buffer 1 (B1)

1	**PARAMETROS DE PERFORACIÓN**			
D	Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m
B	Burden	m	1.30	
E	Espaciamiento	m	1.50	
HB	Altura de banco	m	4.30	
J	Sobreperforación	m	0.00	
L	Longitud total de taladro	m	4.30	
I	Inclinación	°	90.00	
	Volumen	m3	8.39	
2	**PARAMETROS DE PRIMADO**			
	Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"	
	Peso	kg	0.463	
	Cantidad	pza	0.50	
	Peso Total	kg	0.231	
	Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18	
	Cantidad	pza	1.00	
2	**PARAMETROS DE COLUMNA**			
	Tipo de Explosivo		ANFO	
	Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00	
	Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%
C1	Carga de fondo	m	0.70	16%
T1	Taco intermedio	m	-	0%
C2	Carga intermedia	m	-	0%
	Cámara de aire	m	1.8	42%
T2	Taco final	m	1.8	42%
	Total Longitud de Carga	m	0.70	16%
	Total Carga	*kg/tal*	*2.46*	
	Factor de Carga	kg/m3	0.29	



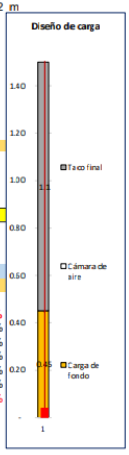
Produccion 1 (P1)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	2.50		
Espaciamiento	m	2.70		
Altura de banco	m	4.30		
Sobreperforación	m	0.30		
Longitud total de taladro	m	4.60		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	11.61		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	1.10	24%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	1.7	37%	
Taco final	m	1.8	39%	
Total Longitud de Carga	m	1.10	24%	
Total Carga	*kg/tal*	*3.86*		
Factor de Carga	kg/m3	0.33		



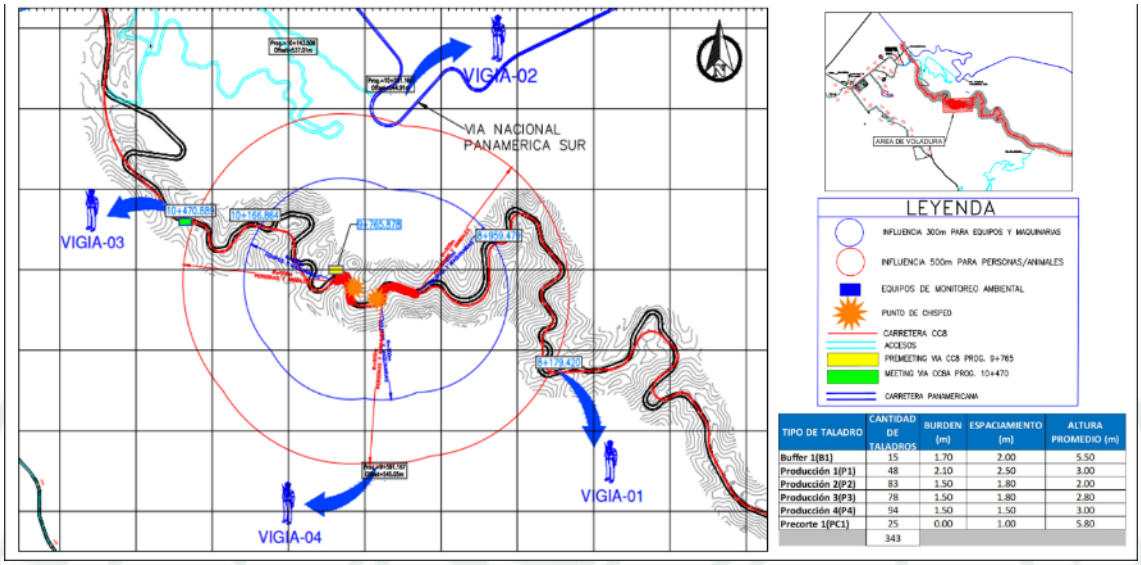
Produccion 2 (P2)

PARAMETROS DE PERFORACIÓN				
Diámetro de taladro	Pulg	3.00	0.0762 m	
Burden	m	1.80		
Espaciamiento	m	2.00		
Altura de banco	m	1.50		
Sobreperforación	m	0.00		
Longitud total de taladro	m	1.50		
Inclinación	°	90.00		
Volumen	m3	5.40		
PARAMETROS DE PRIMADO				
Tipo		EMULNOR 3000 2" X 8"		
Peso	kg	0.463		
Cantidad	pza	0.50		
Peso Total	kg	0.231		
Tipo de iniciador		FANEL MS 4.0 m N°18		
Cantidad	pza	1.00		
PARAMETROS DE COLUMNA				
Tipo de Explosivo		ANFO		
Densidad de Explosivo	kg/m3	770.00		
Densidad Lineal	kg/m	3.51	100%	
Carga de fondo	m	0.45	30%	
Taco intermedio	m	-	0%	
Carga intermedia	m	-	0%	
Cámara de aire	m	-	0%	
Taco final	m	1.1	70%	
Total Longitud de Carga	m	0.45	30%	
Total Carga	kg/tal	1.58		
Factor de Carga	kg/m3	0.29		



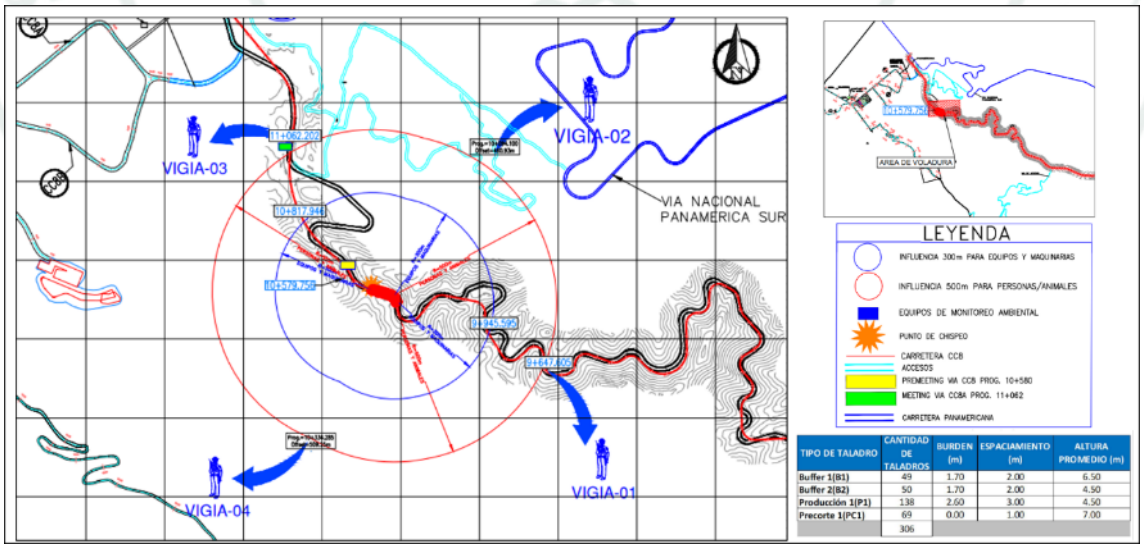
ANEXO 2. RADIO DE INFLUENCIA.

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 9+402 - 9+561/9+655 - 9+771



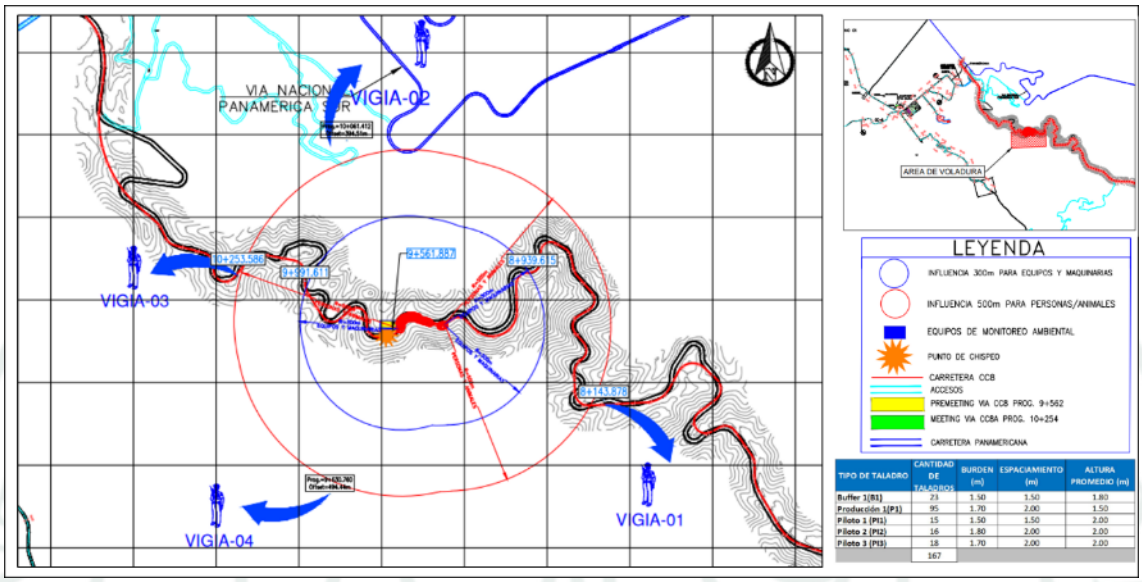
TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1(B1)	15	1.70	2.00	5.50
Producción 1(P1)	48	2.10	2.50	3.00
Producción 2(P2)	83	1.50	1.80	2.00
Producción 3(P3)	78	1.50	1.80	2.80
Producción 4(P4)	94	1.50	1.50	3.00
Precorte 1(PC1)	25	0.00	1.00	5.80
	343			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 10+392 - 10+495



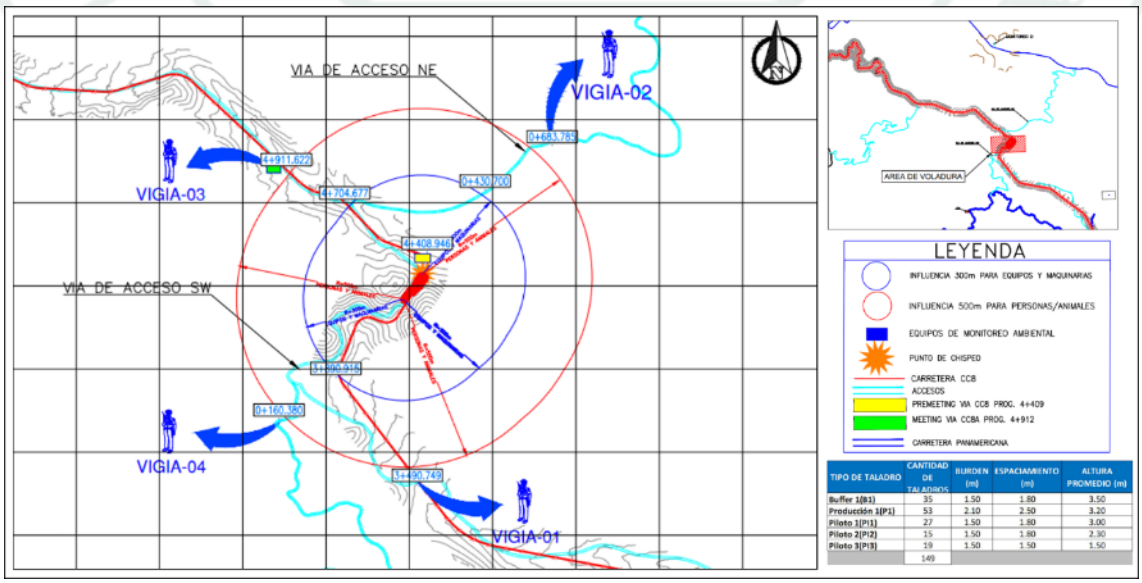
TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1(B1)	49	1.70	2.00	6.50
Buffer 2(B2)	50	1.70	2.00	4.50
Producción 1(P1)	138	2.60	3.00	4.50
Precorte 1(PC1)	69	0.00	1.00	7.00
	306			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 9+380 - 9+550



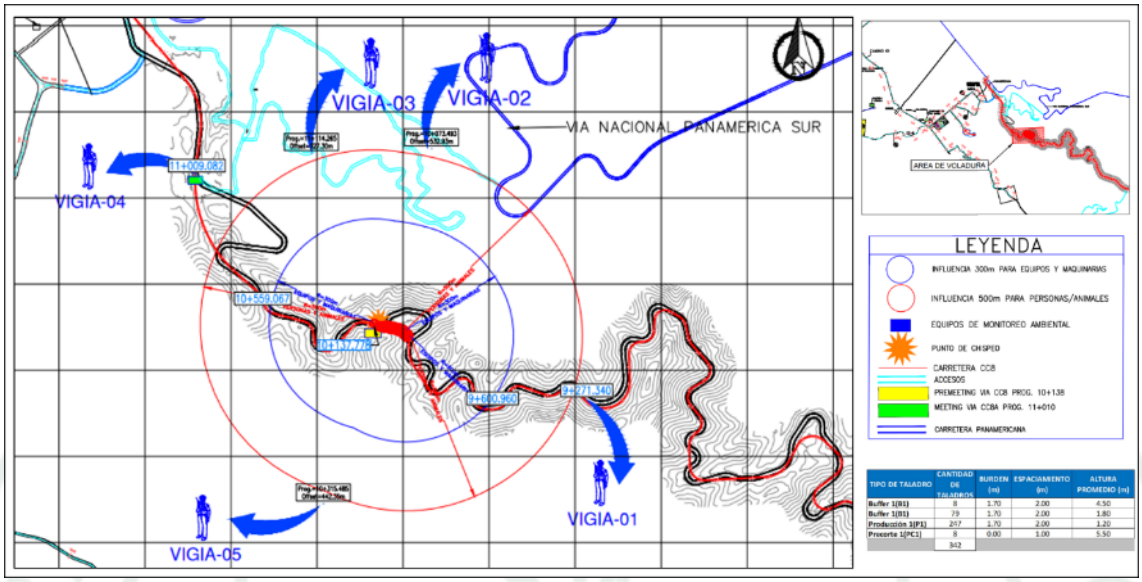
TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1(B1)	23	1.50	1.50	1.80
Producción 1(P1)	95	1.70	2.00	1.50
Piloto 1 (P1)	15	1.50	1.50	2.00
Piloto 2 (P12)	16	1.80	2.00	2.00
Piloto 3 (P13)	18	1.70	2.00	2.00
	167			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 4+250 - 4+340



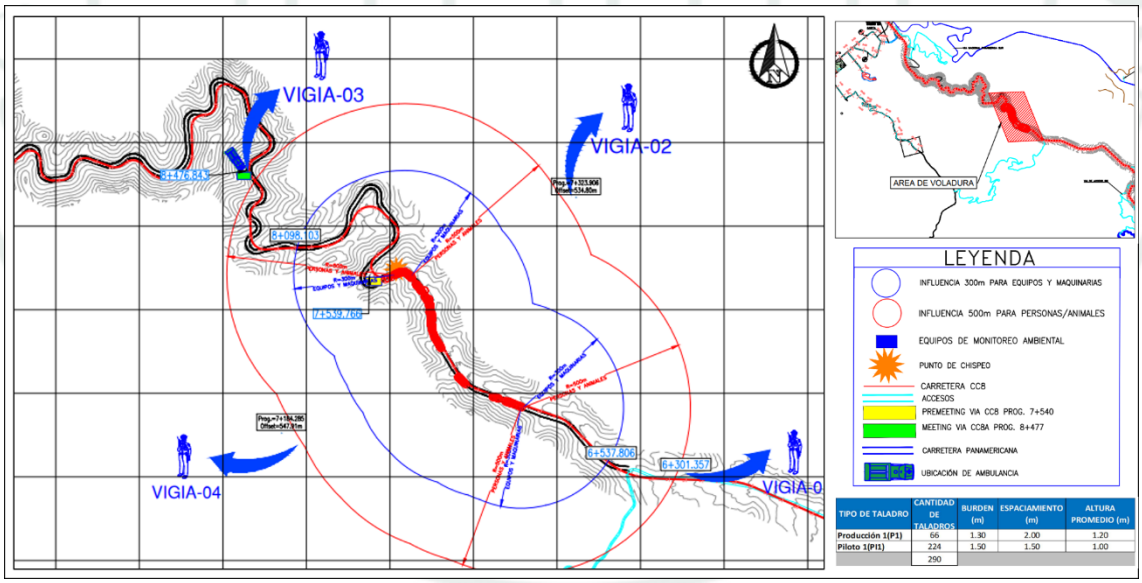
TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1(B1)	35	1.50	1.80	3.50
Producción 1(P1)	53	2.10	2.50	3.20
Piloto 1(P1)	27	1.50	1.80	3.00
Piloto 2(P12)	15	1.50	1.80	2.30
Piloto 3(P13)	19	1.50	1.50	1.50
	149			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 10+115 - 10+030



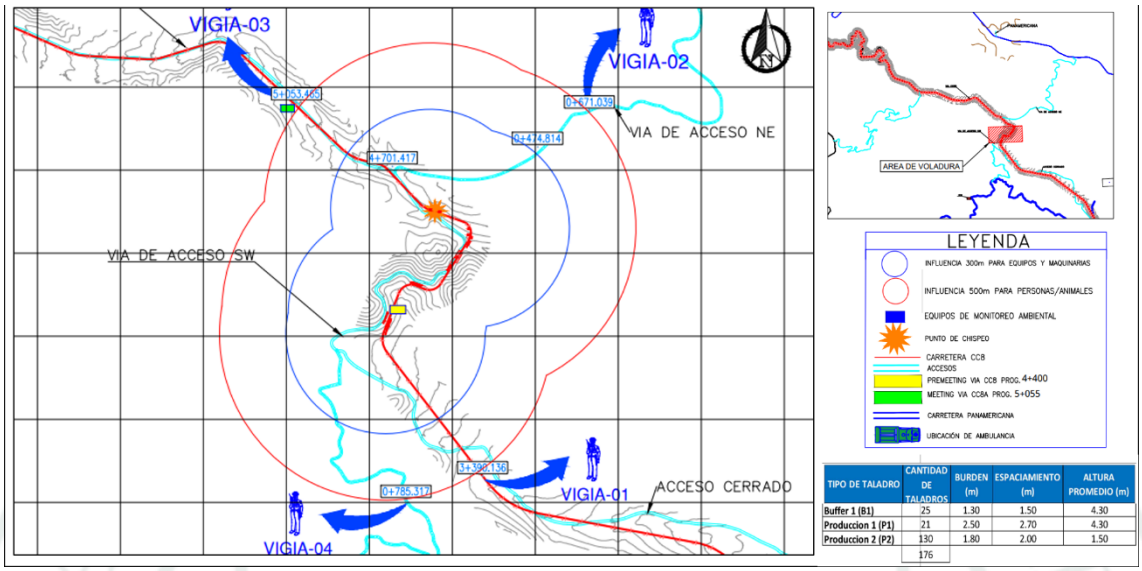
TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1(B1)	8	1.70	2.00	4.50
Buffer 1(B1)	79	1.70	2.00	1.80
Producción 1(P1)	217	1.70	2.00	1.20
Precorte 1(PC1)	8	0.00	1.00	5.50
	342			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 6+858-6+953 / 7+038-7+070 7+168-7+504



TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Producción 1(P1)	66	1.30	2.00	1.20
Piloto 1(PI1)	224	1.50	1.50	1.00
	290			

Localización de Radio de Influencia en Zona de Voladura en CC8 Prog. Km. 3+920@3+980 / 4+100@4+130 4+240@4+340 / 4+500@4+530



TIPO DE TALADRO	CANTIDAD DE TALADROS	BURDEN (m)	ESPACIAMIENTO (m)	ALTURA PROMEDIO (m)
Buffer 1 (B1)	25	1.30	1.50	4.30
Produccion 1 (P1)	21	2.50	2.70	4.30
Produccion 2 (P2)	130	1.80	2.00	1.50
	176			