



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Modelamiento de vibraciones en campo cercano en litología ignimbrita
para probar vibraciones con explosivos de control de baja densidad en una
mina al sur de Perú**

Tesis presentada por:

Polanco Pinto, Tamara Milagros

ORCID: 0009-0001-9528-8494

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0002-4761-8911

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 14 de Agosto del 2026

Dictamen: 019443-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 019443, presentado por:

2018243642 - POLANCO PINTO TAMARA MILAGROS

Titulado:

**MODELAMIENTO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO EN LITOLOGÍA IGNIMBRITA PARA
PROBAR VIBRACIONES CON EXPLOSIVOS DE CONTROL DE BAJA DENSIDAD EN UNA MINA AL
SUR DE PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título 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**



MODELAMIENTO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO EN LITOLOGÍA IGIMBRITA PARA PROBAR VIBRACIONES CON EXPLOSIVOS DE CONTROL DE BAJA DENSIDAD EN UNA MINA AL SUR DE PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unam.edu.pe	8%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	4%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.continental.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.uchile.cl	1%
	Fuente de Internet	
5	oa.upm.es	<1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.unsch.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria	<1%
	Trabajo del estudiante	
8	www.slideshare.net	<1%
	Fuente de Internet	
9	repositorio.undac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	repositorio.uni.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.unc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to Universidad Continental	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	qdoc.tips	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada, en primer lugar, a mi madre, Emma Pinto, por ser el pilar más importante de mi vida. Gracias por tu amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba, por alentarme en cada desafío y por enseñarme, con tu ejemplo, que la constancia, el esfuerzo y la perseverancia siempre tienen su recompensa. Este logro también es tuyo.

A mi querida abuelita, Benita Fernández, quien, aunque ya no se encuentra físicamente a mi lado, sigue viviendo en mi corazón y en cada uno de mis recuerdos. Gracias por el inmenso amor, el cariño y los cuidados con los que me rodeaste mientras estuviste conmigo. Tu ternura, tus enseñanzas y la forma en que siempre velaste por mi bienestar dejaron una huella imborrable en mi vida y fueron el impulso para esforzarme cada día por ser una mejor persona. Este logro también es para ti, con la esperanza de que, desde el cielo, te sientas orgullosa de la nieta que tanto amaste.

A toda mi familia, por acompañarme durante este camino, por ser mi refugio en los momentos difíciles y por brindarme siempre su cariño, confianza y apoyo incondicional. Gracias por recordarme que nunca debía rendirme y por celebrar conmigo cada pequeño avance hacia esta meta.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que formaron parte de mi vida durante mi formación profesional. De cada una aprendí algo valioso que contribuyó a mi crecimiento personal y académico. Llevo conmigo cada enseñanza, cada experiencia y cada recuerdo que hicieron posible llegar hasta este momento.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía en cada etapa de este camino, por darme la fortaleza para enfrentar cada desafío y por bendecirme con la oportunidad de culminar esta importante meta. Su amor y su presencia han sido el sostén que me permitió no perder la fe y continuar adelante.

A mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por creer siempre en mí, por acompañarme en los momentos de incertidumbre y celebrar conmigo cada logro alcanzado. Su apoyo, comprensión y palabras de aliento fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante cuando el camino parecía difícil. Este logro también les pertenece.

Mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Omar Paredes, por su orientación, paciencia y valioso acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por compartir sus conocimientos, por sus observaciones y por incentivar en mí el deseo de seguir aprendiendo y creciendo profesionalmente. Su asesoría fue fundamental para culminar con éxito este trabajo.

Quiero expresar un agradecimiento muy especial al Ingeniero Anthony Saldaña, por la confianza que depositó en mí desde el primer momento y por brindarme la oportunidad de demostrar mis capacidades en el ámbito profesional. Gracias por creer en mi trabajo, por impulsarme a asumir nuevos retos y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia. Su liderazgo, sus consejos y el apoyo constante que me brindó no solo fortalecieron mi desarrollo como profesional, sino que también me motivaron a confiar más en mí misma y a buscar siempre la excelencia en cada desafío.

A quien ha ocupado un lugar importante en mi vida, por estar siempre para mí y brindarme su apoyo incondicional a lo largo de este camino. Gracias por permanecer a mi lado incluso en los momentos más difíciles, por escucharme, comprenderme y darme fuerzas cuando sentía que las mías no eran suficientes. Gracias por nunca soltarme, por confiar en mí y por recordarme que era capaz de seguir adelante. Tu compañía, cariño y apoyo han significado mucho para mí y han sido parte importante para llegar hasta este momento.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso y dejaron una enseñanza en mi vida. Cada consejo, experiencia y muestra de apoyo contribuyó a mi crecimiento personal y profesional y me permitió llegar hasta este momento tan importante.

EPÍGRAFE

"Cada desafío fue una oportunidad para aprender; cada obstáculo, una lección para crecer; y cada logro, la prueba de que la fe, la perseverancia y el esfuerzo convierten los sueños en realidad."

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de vibraciones en campo cercano para la litología ignimbrita y evaluar el desempeño de un explosivo de control de baja densidad frente al HA73G en una mina ubicada al sur del Perú. El estudio fue aplicado, cuantitativo y explicativo, con diseño cuasiexperimental de campo, y se ejecutó en la Fase 02 Norte, nivel 3735. Se realizó una prueba Cross-Hole con seis taladros y tres geófonos triaxiales. Asimismo, se detonaron doce taladros comparativos: seis cargados con explosivo de control de $0,80 \text{ g/cm}^3$ y seis con HA73G de $1,15 \text{ g/cm}^3$. Los registros permitieron calcular la velocidad de propagación de la onda P, la velocidad pico de partícula crítica (VPPc) y las constantes del modelo de Holmberg-Persson; además, se simularon los diseños A-A', B-B' y C-C' en Paradigm Advanced. Se obtuvo una velocidad media de propagación de 1866 m/s y una VPPc de 872 mm/s . El ajuste produjo $K = 381,31$ y $\alpha = 0,7242$ para la curva de 50 % de confianza, y $K = 595,59$ para la envolvente de 98 %. El diseño A-A' presentó el mayor alcance del umbral crítico, con 5,0 m hacia el talud y 9,0 m hacia el banco inferior; el C-C' redujo el alcance hacia el talud a 2,4 m y el B-B' registró el menor alcance hacia el banco, con 3,8 m. El explosivo de control generó, en promedio, cerca de 40 % menos vibraciones que el HA73G, con reducciones puntuales de hasta 64 %. Se concluye que el modelo representa las condiciones de la ignimbrita estudiada y sustenta el uso del explosivo de baja densidad en las filas Buffer 1 y Buffer 2 para disminuir el daño inducido por voladura.

Palabras clave: Modelamiento de vibraciones, campo cercano, ignimbrita.

ABSTRACT

This research aimed to develop a near-field vibration model for ignimbrite and to evaluate the performance of a low-density control explosive against the standard HA73G explosive at a mine in southern Peru. It was an applied, quantitative, explanatory study with a field-based quasi-experimental design. The test campaign was conducted in Phase 02 North, at the 3735 level. To characterize the dynamic response of the rock mass, a Cross-Hole test was carried out using six blastholes and three triaxial geophones. In addition, twelve comparison blastholes were fired: six loaded with the 0.80 g/cm³ control explosive and six with HA73G at 1.15 g/cm³. The records were used to calculate P-wave velocity, critical peak particle velocity (PPV_c), and the Holmberg-Persson model constants. Charge designs A-A', B-B', and C-C' were also simulated in Paradigm Advanced. The mean wave propagation velocity was 1866 m/s, and the critical PPV was 872 mm/s. The near-field fit yielded $K = 381.31$ and $\alpha = 0.7242$ for the 50% confidence curve, while $K = 595.59$ was obtained for the 98% envelope. Design A-A' showed the greatest reach of the critical threshold, extending 5.0 m toward the slope and 9.0 m toward the lower bench. Design C-C' reduced the reach toward the slope to 2.4 m, whereas design B-B' achieved the shortest reach toward the lower bench, at 3.8 m. In the field comparison, the control explosive generated approximately 40% lower vibration levels than HA73G on average, with individual reductions of up to 64%. It is concluded that the developed model represents the conditions of the ignimbrite in the study area and supports the use of the low-density explosive in Buffer 1 and Buffer 2 rows to reduce blast-induced damage.

Keywords: Vibration modelling, near field, ignimbrite.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 Determinación del problema.....	4
1.2 Objetivo del proyecto.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Preguntas de investigación.....	6
1.3.1 Pregunta principal	6
1.3.2 Preguntas específicas	6
1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema	7
1.5 Palabra clave	7
1.6 Justificación e importancia	8
CAPÍTULO II	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1 Estado del arte.....	11
2.1.1 Antecedentes de la investigación	11
2.2 Bases teóricas de la investigación.....	26
2.2.1 Propagación de ondas en el macizo rocoso.....	26
2.2.1 Campo cercano de una carga explosiva	27
2.2.2 Velocidad pico de partícula.....	28
2.2.3 Método Cross-Hole y velocidad de la onda P.....	29
2.2.4 Modelo de atenuación de Holmberg-Persson	29
2.2.5 Velocidad pico de partícula crítica y niveles de perturbación.....	30
2.2.6 Densidad del explosivo y distribución de la carga.....	31
2.2.7 Diseño de carga y control del daño en taludes.....	32
2.2.8 Aplicación del marco teórico a la ignimbrita estudiada.....	32
2.3 Hipótesis	33
2.3.1 Variable dependiente	33

2.3.2	Variable independiente.....	33
CAPÍTULO III.....		35
3.	ALCANCES Y LIMITACIONES	36
3.1	Alcances y limitaciones	36
3.2	Tipo y nivel de investigación	38
3.2.1	Tipo de investigación	38
3.2.2	Nivel de investigación.....	39
3.3	Población y muestra.....	39
3.3.1	Población.....	40
3.4	Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
3.4.1	Procedimiento y técnica de recolección de datos	41
3.4.2	Técnicas de recolección de datos	43
3.4.3	Instrumentos de medición:.....	43
3.4.4	Plan de análisis estadístico de los datos	44
3.5	Lugar de desarrollo de investigación	46
3.6	Diagrama de flujo de procedimientos de zona de prueba	47
3.7	Modelo de atenuación de vibraciones en campo cercano	48
3.8	Implementación de pruebas para Cross Hole en F02N 3735 Ignimbrita.....	49
3.8.1	Marco teórico, amplitud de vibración y determinación de onda propagación.....	50
3.8.2	Implementación de pruebas para cross hole en F02N 3735 ignimbrita.....	53
3.8.3	Registro de vibración para la velocidad de propagación entre G2 –G3	57
3.8.4	Modelo de atenuación de vibraciones en campo cercano G2 y G3	58
3.8.5	Velocidad de propagación de la onda en el medio rocoso	60
3.9	Análisis de resultados obtenidos.....	61
3.9.1	Cálculo de velocidad pico partícula crítica Ignimbrita	61
3.9.2	Criterios del nivel de perturbación litología ignimbrita.....	62
3.9.3	Simulaciones de perturbación en límites de taludes y nivel de banco	63
3.9.4	Prueba de vibraciones con explosivo de control de baja densidad	73
3.9.5	Diferencia de vibraciones entre explosivos de baja densidad y HA73G	76
CAPÍTULO IV.....		82
4.	CONCLUSIONES.....	83
REFERENCIAS.....		88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	34
Tabla 2 Parámetros geotécnicos de la ignimbrita.....	49
Tabla 3 Criterios de daño por niveles de perturbaciones de vibraciones	53
Tabla 4 Registro de PVS y factor H&P en G2 a G3	59
Tabla 5 Valores estadísticos para el cálculo de velocidad de propagación	61
Tabla 6 Velocidad pico partícula crítica (Vppc).....	61
Tabla 8 Criterio de daño en roca intacta.....	62
Tabla 10 Diferencia de niveles de vibraciones entre ambos explosivos	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de flujo de procedimientos de zona de prueba	47
Figura 2	Plano parámetros geotécnicos de la zona de prueba	48
Figura 3	Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte	50
Figura 4	Distribución geométrica para estimación de vibración por H&P.....	51
Figura 5	Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte	54
Figura 6	Esquema de perforación para pruebas.....	55
Figura 7	Esquema tiempos detonación y kilogramos de explosivo para ambas pruebas	55
Figura 8	Instalación de geófonos	56
Figura 9	Instalación de las cajas de conexión y sismógrafos Pro6.....	57
Figura 10	Registro de vibraciones entre G2 y G3	58
Figura 11	Modelo de atenuación en campo cercano de G2 – G3	60
Figura 12	Criterio de daño para macizo rocoso	62
Figura 13	Rangos admisibles de vibraciones en roca intacta	63
Figura 14	Onda semilla del registro.....	64
Figura 15	Diseño de malla de F02N 3735 con BXS de 8.7x10 m.....	65
Figura 16	Diseño de carga en A-A', B-B' y C-C' para buffer 1, buffer 2 y Prod1	66
Figura 17	Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga A-A'	67
Figura 18	Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco	67
Figura 19	Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga B-B'	68
Figura 20	Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco	69
Figura 21	Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga C-C'	70
Figura 22	Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco	70
Figura 23	Comparativo entre los tres diseños de carga A-A', B-B' y C-C'	71
Figura 24	Niveles de vibraciones en taladros de producción en F02N	73
Figura 25	Registros de vibraciones en función a la profundidad	73
Figura 26	Configuración de la prueba de diferencia de vibraciones	74
Figura 27	Secuencia detonación y kilos por tipo de explosivo.....	74
Figura 28	Pulsos de vibración de 12 taladros por G1	75
Figura 29	Pulsos de vibración de 12 taladros por G2	76
Figura 30	Diferencia de nivel de vibraciones en dos taladros	78
Figura 31	Diferencia de longitud de carga entre tipo de explosivo	78
Figura 32	Pico vector suma de los registros de Geófono 01	79

Figura 33 Pico vector suma de los registros de Geófono 02	79
Figura 34 Diferencia niveles de vibraciones explosivo control vs estándar (mm/s)	80
Figura 35 Post voladura zona con explosivo estándar.....	80
Figura 36 Post voladura zona con explosivo de control	81

INTRODUCCIÓN

En la minería a cielo abierto, la perforación y la voladura son procesos indispensables para fragmentar el macizo rocoso y mantener la continuidad operativa. Sin embargo, parte de la energía liberada se propaga como ondas capaces de abrir discontinuidades, originar nuevas fracturas y deteriorar los taludes. En campo cercano, esta respuesta depende de la geometría de la carga, la distancia y las propiedades del medio; por ello, la velocidad pico de partícula (VPP) es un indicador fundamental para controlar el daño.

En la Fase 02 Norte, nivel 3735, de una unidad minera ubicada al sur del Perú, fue necesario conocer la respuesta dinámica de la ignimbrita. El diseño estándar con HA73G podía transmitir vibraciones elevadas hacia el talud y el banco inferior, y no se contaba con un modelo calibrado para esta litología. Por ello, se planteó evaluar un explosivo de control de baja densidad como alternativa para reducir la energía transmitida.

La investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de vibraciones en campo cercano y emplearlo para evaluar configuraciones de carga. Se determinó la velocidad de la onda P mediante el método Cross-Hole, se calculó la VPP crítica y se ajustaron las constantes del modelo de Holmberg-Persson. Se analizaron seis taladros Cross-Hole y doce taladros comparativos con ambos explosivos. Los registros de los geófonos triaxiales se complementaron con simulaciones de los diseños A-A', B-B' y C-C' en Paradigm Advanced.

Los resultados establecieron una velocidad media de propagación de 1866 m/s y una VPP crítica de 872 mm/s. El explosivo de control redujo las vibraciones alrededor de 40 % respecto del HA73G y mostró un mejor control del daño hacia el talud, lo que sustenta su uso en las filas Buffer

1 y Buffer 2. La tesis comprende cuatro capítulos: planteamiento del problema, fundamentos teóricos, metodología y análisis de resultados, y conclusiones; al final se presentan las referencias.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

Las operaciones de perforación y voladura desarrolladas en minería superficial generan inevitablemente vibraciones que se propagan a través del macizo rocoso. La magnitud de estas vibraciones depende de diversos factores, entre ellos el tipo de explosivo, la distribución de carga, el diseño de la malla de perforación, la secuencia de iniciación y las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. Cuando dichos parámetros no son adecuadamente controlados, las vibraciones pueden producir daños acumulativos en los taludes, incrementar el fracturamiento del macizo, reducir la estabilidad de los bancos y afectar la continuidad operacional de la mina.

En la unidad minera al sur del Perú, específicamente en la litología Ignimbrita, existe la necesidad de conocer con mayor precisión el comportamiento de las vibraciones generadas durante las voladuras, debido a que los diseños convencionales de carga pueden producir niveles elevados de velocidad pico de partícula (VPP), incrementando el riesgo de daño en las paredes finales del tajo y en los bancos inferiores. Esta situación hace necesario disponer de modelos de predicción confiables que permitan estimar la propagación de las vibraciones y evaluar diferentes alternativas de diseño antes de su implementación en campo.

Asimismo, resulta necesario analizar el desempeño de explosivos de control de baja densidad como alternativa para disminuir la energía transmitida al macizo rocoso sin afectar significativamente la eficiencia del proceso de voladura. La ausencia de información específica sobre el comportamiento dinámico de la litología Ignimbrita dificulta la toma de decisiones orientadas a optimizar los diseños de carga y reducir los niveles de perturbación generados por las detonaciones.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de desarrollar un estudio que permita modelar las vibraciones en campo cercano, determinar los parámetros dinámicos del macizo rocoso y evaluar el efecto del empleo de explosivos de control de baja densidad sobre la propagación de las vibraciones, con la finalidad de establecer criterios técnicos que contribuyan al diseño de voladuras con menor impacto sobre la estabilidad de los taludes.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de vibraciones en campo cercano en litología ignimbrita para probar las vibraciones con explosivo de control de baja densidad.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la velocidad de propagación de la onda primaria (Onda P) con el método Cross hole.
- Determinar la velocidad de pico partícula crítico y niveles de perturbación en litología Ignimbrita.
- Hallar el modelo de atenuación en campo cercano para la litología Ignimbrita.
- Estimar el daño por vibraciones con el diseño actual en Ignimbrita en los límites del talud y cresta del nivel inferior.
- Proponer diseños de carga óptimos para control de daño generado por las perturbaciones de vibraciones en Ignimbrita en los límites del talud y cresta de banco.

- Evaluar la diferencia niveles de vibraciones del explosivo de control de baja densidad versus explosivo estándar.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿Cómo el desarrollo de un modelo de vibraciones en campo cercano en litología ignimbrita permite evaluar el comportamiento de las vibraciones generadas por el uso de explosivos de control de baja densidad durante las operaciones de perforación y voladura?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cuál es la velocidad de propagación de la onda primaria (Onda P) en la litología ignimbrita determinada mediante el método Cross Hole?
- ¿Cuál es la velocidad pico de partícula crítica (VPP crítica) y cuáles son los niveles de perturbación que presenta la litología ignimbrita frente a las vibraciones inducidas por voladura?
- ¿Cuál es el modelo de atenuación de vibraciones en campo cercano que representa el comportamiento dinámico de la litología ignimbrita?
- ¿Cuál es el nivel de daño por vibraciones que genera el diseño de carga actual en los límites del talud y en la cresta del banco inferior de la litología ignimbrita?
- ¿Qué diseño de carga permite reducir el daño ocasionado por las perturbaciones de vibraciones en los límites del talud y en la cresta del banco de la litología ignimbrita?

- ¿Cuál es la diferencia en los niveles de vibraciones generadas entre el empleo de explosivos convencionales y explosivos de control de baja densidad en la litología ignimbrita?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

El presente proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación de optimización de proyectos mineros ya que la perforación y voladura estudia el comportamiento de las vibraciones generadas durante la detonación de explosivos y su interacción con el macizo rocoso. Asimismo, incorpora criterios de geomecánica aplicada mediante la determinación de parámetros dinámicos de la roca y el análisis de la estabilidad de taludes, buscando optimizar los diseños de carga para reducir el daño inducido por las vibraciones y mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

1.5 Palabra clave

- Modelamiento de vibraciones.
- Litología.
- Método Cross Hole.
- Explosivo de control de baja densidad.

1.6 Justificación e importancia

El desarrollo de las operaciones de perforación y voladura en minería a cielo abierto requiere un adecuado control de las vibraciones generadas por la detonación de explosivos, debido a que estas constituyen uno de los principales factores que influyen en la estabilidad del macizo rocoso y en la conservación de los taludes finales del tajo. Cuando los niveles de vibración superan los valores admisibles pueden producir la apertura de discontinuidades, generación de nuevas fracturas, pérdida de calidad del macizo rocoso y condiciones que comprometen la seguridad de las operaciones y la continuidad del proceso productivo.

En este contexto, el presente proyecto se justifica desde el punto de vista técnico porque permitirá desarrollar un modelo de vibraciones en campo cercano específico para la litología ignimbrita, utilizando información obtenida mediante pruebas Cross Hole y registros de vibración en campo. La obtención de parámetros como la velocidad de propagación de la onda P, la velocidad pico de partícula crítica y el modelo de atenuación proporcionará herramientas confiables para estimar el comportamiento de las vibraciones antes de ejecutar una voladura, permitiendo optimizar los diseños de carga y reducir el riesgo de daño en los taludes.

Desde el punto de vista operativo, la investigación permitirá comparar el comportamiento de un explosivo de control de baja densidad frente a un explosivo convencional, determinando las diferencias en los niveles de vibración generados y evaluando su capacidad para disminuir la energía transmitida al macizo rocoso. Los resultados servirán como base para establecer configuraciones de carga más eficientes que contribuyan a mejorar el control de daño sin afectar el desempeño de la voladura.

Asimismo, la investigación posee importancia económica, ya que la disminución del daño inducido por vibraciones favorece la conservación de los taludes, reduce la necesidad de trabajos correctivos, minimiza pérdidas asociadas a sobreexcavaciones y contribuye a optimizar los costos relacionados con las operaciones de perforación y voladura.

Finalmente, el estudio presenta importancia científica y tecnológica porque desarrolla un modelo representativo para la litología ignimbrita de la unidad minera al sur del Perú, el cual podrá servir como referencia para futuras investigaciones y para la implementación de metodologías de diseño de voladuras basadas en parámetros dinámicos propios del macizo rocoso, promoviendo operaciones más seguras, eficientes y sostenibles.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes de la investigación

Antecedentes nacionales

En la tesis titulada "Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole", publicado en el año "2021", Jesús Edwin Luque Muñoz desarrolló una investigación en la Universidad Católica de Santa María, en Arequipa, orientada a analizar y controlar las vibraciones generadas por las voladuras en una mina de pórfido de cobre. El estudio surgió ante la necesidad de reducir los efectos negativos que las operaciones de perforación y voladura pueden producir sobre los taludes de una explotación minera. Aunque estas actividades son necesarias para fragmentar y remover el macizo rocoso, una distribución inadecuada de la carga explosiva o una selección incorrecta de los tiempos de retardo puede ocasionar elevados niveles de vibración, formación de nuevas fracturas, apertura de discontinuidades preexistentes y deterioro progresivo de las paredes del talud. Estas condiciones pueden afectar la estabilidad geotécnica de la mina y aumentar los riesgos operacionales.

El objetivo principal de la investigación fue elaborar un modelo de vibraciones de campo cercano que permitiera determinar los parámetros adecuados para mitigar el daño ocasionado por las voladuras en el talud. Para ello, el autor evaluó las características dinámicas del macizo rocoso y la manera en que las ondas sísmicas producidas por la detonación se propagaban a través de este. Asimismo, buscó establecer valores críticos de velocidad pico partícula, distancias mínimas de seguridad y tiempos de retardo que pudieran utilizarse como criterios técnicos para mejorar el diseño de las voladuras. De esta manera, la investigación no se limitó a medir las vibraciones, sino

que relacionó su comportamiento con las condiciones geológicas y geomecánicas de la zona analizada.

Metodológicamente, el estudio fue de tipo aplicado y presentó un nivel experimental, debido a que se realizaron mediciones directas en campo y se analizaron los cambios producidos por las voladuras en el macizo rocoso. La investigación se desarrolló en la malla de producción N.º 3100-0634, ubicada en la fase 6B2 de la operación minera, cuya composición correspondía principalmente a una andesita intrusiva con presencia de sílice. Para obtener información sobre la propagación de las ondas, se aplicó el método Cross Hole, procedimiento que permitió estimar la velocidad de las ondas compresionales u ondas P dentro del terreno. Esta información fue complementada con registros obtenidos mediante geófonos instalados en puntos estratégicos próximos al área de voladura, con los cuales se midieron las vibraciones generadas durante la detonación.

Las mediciones permitieron comparar el comportamiento de la roca intacta con el del macizo rocoso presente en el talud. En la roca intacta se obtuvo una velocidad de onda P de 3508,23 m/s, mientras que en el macizo rocoso la velocidad registrada fue de 2459,61 m/s. La diferencia entre ambos valores evidenció una degradación geotécnica aproximada del 30 %, asociada con la presencia de fracturas, discontinuidades y otras alteraciones que reducen la capacidad del macizo para transmitir las ondas. Este resultado mostró la importancia de evaluar las condiciones reales de la masa rocosa, ya que utilizar únicamente las propiedades de muestras intactas podría conducir a estimaciones poco representativas del comportamiento del talud frente a una voladura.

A partir de las propiedades dinámicas determinadas mediante el ensayo Cross Hole, se calculó una velocidad pico partícula crítica de 751,8 mm/s para la matriz rocosa. Sin embargo, al considerar el nivel de alteración y fracturamiento del macizo rocoso, se estableció un valor crítico

menor, equivalente a 527,1 mm/s. Esta diferencia indicó que el macizo rocoso alterado posee una menor resistencia frente a las vibraciones y, por lo tanto, requiere límites de control más conservadores. La determinación de estos valores permitió definir umbrales de daño que pueden utilizarse para evaluar si las vibraciones generadas por una voladura se encuentran dentro de condiciones aceptables o si representan un riesgo para la estabilidad del talud.

Posteriormente, los registros de campo fueron procesados mediante el modelo predictivo de Holmberg y Persson, utilizado para estimar el comportamiento de las vibraciones producidas por cargas explosivas en zonas cercanas a la fuente de detonación. El modelo relacionó variables como la cantidad de explosivo, la distancia entre la carga y el punto de medición, la velocidad pico partícula y las características del macizo rocoso. Su aplicación permitió construir curvas de predicción y establecer criterios de diseño para controlar la energía liberada durante la voladura. El modelo final alcanzó una confiabilidad del 90 %, lo que indicó una correspondencia favorable entre los valores calculados y los registros obtenidos en campo.

Entre los principales resultados, se determinaron distancias mínimas de seguridad comprendidas entre 7 y 9 metros, dependiendo de las características y del estado de conservación de la roca. En las zonas donde el macizo rocoso presentaba una mayor alteración o fracturamiento, se recomendó mantener una distancia más amplia para evitar que las vibraciones superaran el límite de daño establecido. Además, se propusieron tiempos de retardo de entre 20 y 23 milisegundos entre las cargas detonadas. La selección adecuada de estos retardos permite distribuir la liberación de energía, evitar la superposición desfavorable de las ondas y disminuir la intensidad de las vibraciones que llegan hasta las paredes del talud.

La investigación concluyó que la aplicación conjunta del método Cross Hole, el monitoreo mediante geófonos y el modelamiento predictivo de las vibraciones constituye una alternativa

efectiva para mejorar el diseño de las voladuras en minería superficial. El conocimiento de la velocidad de propagación de las ondas y de la velocidad pico partícula crítica permite ajustar la cantidad de explosivo, las distancias y los tiempos de detonación de acuerdo con las condiciones reales del macizo rocoso. De esta forma, es posible lograr una fragmentación adecuada del material sin producir daños innecesarios en las paredes finales del talud. (Luque Muñoz, 2021)

En la tesis titulada "Diseño de perforación voladura de precorte mediante las características de macizo rocoso para evitar desprendimiento de bolones de la pared en banco de producción en U.M. Tacaza - CIEMSA", publicado en el año "2018", Christian Cesar Condori Burgos desarrolló una investigación en la Universidad Nacional del Altiplano, en Puno, con el propósito de diseñar una voladura de precorte basada en las características geomecánicas del macizo rocoso. El trabajo se realizó en el banco de producción 4330S-4325S del tajo central de la Unidad Minera Tacaza, perteneciente a la empresa CIEMSA y ubicada en la comunidad de Choroma, distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, departamento de Puno. La investigación surgió como respuesta a los problemas ocasionados por la presencia de bolones y bloques de roca que permanecían colgados en las paredes de los bancos después de las voladuras de producción.

El autor explicó que las operaciones de extracción en la Unidad Minera Tacaza se desarrollan mediante el método de explotación a tajo abierto. En este tipo de operación, la perforación y la voladura cumplen una función fundamental en la fragmentación del macizo rocoso; sin embargo, cuando el diseño no considera adecuadamente las propiedades de la roca y la orientación de sus discontinuidades, pueden quedar bloques inestables adheridos a la pared del banco. Estos bloques, algunos de los cuales superaban un metro de diámetro, representaban un riesgo para los trabajadores y los equipos, debido a que podían desprenderse de manera inesperada y caer hacia el pie del talud.

Además del riesgo para la seguridad, el desprendimiento de los bolones arrastraba una cantidad considerable de material fragmentado, produciendo acumulaciones de roca en el piso y al pie del banco. Esta situación dificultaba el desplazamiento de los equipos de carguío y transporte, podía ocasionar daños en los neumáticos de los camiones y obligaba a realizar labores adicionales de desatado, reducción de tamaño, perfilamiento y limpieza. En consecuencia, la operación asumía mayores costos y sufría interrupciones que afectaban el desarrollo normal del ciclo productivo. Frente a esta problemática, la investigación planteó la voladura de precorte como una alternativa para formar una superficie de separación controlada entre la roca que debía fragmentarse y el macizo rocoso que debía conservarse.

El objetivo general del estudio fue diseñar la perforación y voladura de precorte mediante la determinación de las características geomecánicas del macizo rocoso del banco 4330S-4325S. Como objetivos específicos se consideraron la caracterización geomecánica de la zona de estudio y la definición de los parámetros de perforación y carga explosiva necesarios para evitar el desprendimiento de bolones. La propuesta se sustentó en que un diseño de voladura controlada no debe establecerse únicamente a partir de parámetros generales, sino que debe responder a la resistencia, calidad, grado de fracturamiento y condiciones estructurales de la roca existente en el área de intervención.

La investigación presentó un enfoque cuantitativo y una orientación aplicada, debido a que utilizó mediciones de campo, ensayos de laboratorio y cálculos técnicos para solucionar un problema concreto de la operación minera. Su alcance comprendió componentes exploratorios, descriptivos y correlacionales, puesto que primero se reconocieron las condiciones del macizo rocoso, luego se describieron sus propiedades y finalmente se relacionaron estas características con los parámetros del diseño de precorte. El trabajo se desarrolló en dos fases: una etapa de

recopilación y procesamiento de información geomecánica, y otra de evaluación y aplicación del diseño propuesto.

La población estuvo constituida por las mediciones de las propiedades físico-mecánicas de la roca intacta y del macizo rocoso, así como por la información litológica y estructural obtenida en el banco de producción. Para la caracterización se realizó un mapeo geomecánico mediante una línea de detalle de 13 metros, con una orientación azimutal de 236° y una inclinación de 3° respecto de la horizontal. A lo largo de esta línea se registraron 83 discontinuidades, las cuales fueron agrupadas en cuatro familias principales. La primera familia presentó 22 discontinuidades con una orientación de 66/238; la segunda, 23 discontinuidades con orientación de 72/290; la tercera, 19 discontinuidades con orientación de 47/030; y la cuarta, 19 discontinuidades con orientación de 78/091. Esta información fue analizada mediante el programa Dips 5.0 para reconocer el dominio estructural y la distribución de las familias de discontinuidades.

La caracterización también consideró parámetros como la resistencia a la compresión uniaxial, el índice RQD, el espaciamiento, la persistencia, la apertura, la rugosidad, el relleno, la meteorización y la presencia de agua subterránea. Los ensayos de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano. Como resultado, se determinó que la roca predominante correspondía a una andesita porfírica, con una densidad seca de $2,73 \text{ g/cm}^3$ y una resistencia a la compresión uniaxial de 66,41 MPa.

El índice RQD fue calculado a partir de la frecuencia de discontinuidades observadas en la línea de detalle. Al registrarse 83 diaclasas en una longitud de 13 metros, se obtuvo una frecuencia aproximada de 6,38 discontinuidades por metro. Mediante la expresión propuesta por Priest y Hudson se determinó un RQD de 86 %, valor que corresponde a una roca de buena calidad.

Posteriormente, aplicando la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski de 1989, se obtuvo un RMR básico de 65. Este resultado permitió clasificar el macizo rocoso dentro de la clase II, correspondiente a una roca de calidad buena. También se estimó un índice Q de Barton de 10,27 a partir de su correlación con el RMR.

La clasificación geomecánica fue importante porque permitió identificar las condiciones que influían en la formación y caída de los bolones. Aunque el macizo fue clasificado como roca buena, presentaba cuatro familias de discontinuidades, distintos grados de apertura, rellenos duros, meteorización y planos de debilidad capaces de formar bloques. La orientación de estas discontinuidades respecto de la pared del banco condicionaba la estabilidad del talud, debido a que algunos bloques podían desplazarse siguiendo dichas superficies. Por esta razón, la investigación sostuvo que la calidad global del macizo no era suficiente para definir el diseño y que también debía considerarse su configuración estructural.

Para complementar la evaluación se utilizó el programa RockData 3.0, mediante el cual se estimaron parámetros del macizo rocoso aplicando los criterios de falla de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb. En el análisis se consideró una resistencia de la roca intacta de 66,41 MPa, un índice GSI de 54, un parámetro (m_i) de 27 y un factor de alteración (D) igual a 1. Los cálculos proporcionaron una resistencia a la compresión del macizo de aproximadamente 1,39 MPa, una resistencia global cercana a 8,79 MPa, una cohesión de 0,164 MPa, un ángulo de fricción de 62,47° y un módulo de deformación estimado en 5129,64 MPa. Estos valores sirvieron de base para relacionar la resistencia de la roca con la presión generada por el explosivo y definir la geometría del precorte.

El principio del diseño consistió en perforar una fila de taladros alineados y con menor espaciamiento que los utilizados en la voladura convencional. Al detonarse antes que la voladura

principal o con una anticipación controlada, los taladros generan una grieta continua que actúa como plano de separación. Esta fractura permite aislar la roca destinada a la fragmentación del macizo que forma la pared del banco, disminuyendo la transmisión de las ondas de compresión y facilitando la disipación de los gases. De esta manera, se reduce el daño más allá del límite de excavación y se obtiene una pared más uniforme, con menor presencia de bloques colgados y descostramientos.

Para determinar el espaciamiento entre los taladros de precorte se compararon tres procedimientos de cálculo: la formulación de la empresa, la propuesta y el criterio de Sutherland. Los resultados variaron aproximadamente entre 0,6 y 1,2 metros; sin embargo, considerando las características del macizo, el diámetro de perforación y la experiencia operativa, se adoptó un espaciamiento de 1,00 metro. Este valor buscó garantizar la interacción de las grietas producidas por los taladros adyacentes y formar una fractura continua a lo largo de la pared. El diseño mantuvo un diámetro de taladro de 3,5 pulgadas, equivalente a 88,9 milímetros, tanto para el precorte como para la voladura de producción.

La geometría propuesta consideró una altura de banco de 5 metros, taladros de la misma longitud, una carga explosiva distribuida a lo largo de 4 metros y un taco de material inerte de 1 metro. También se contempló una sobreperforación esporádica de 0,5 metros. La precisión de la perforación fue señalada como un aspecto determinante, ya que los taladros debían mantenerse alineados, paralelos y dentro del plano correspondiente al perfil final del banco. Una desviación excesiva podía impedir la unión de las fracturas o producir daños fuera del contorno planificado.

Para calcular la cantidad de explosivo se utilizó el área del taladro, la longitud de la columna de carga y la densidad del agente explosivo. El área calculada para un taladro de 3,5 pulgadas fue de 9,62 pulgadas cuadradas. Se consideró una longitud cargada de 4 metros y una

densidad de $0,80 \text{ g/cm}^3$ para el Examon P o ANFO utilizado. Como resultado, se obtuvo una carga teórica de 30,78 kilogramos por taladro, valor que fue redondeado a 31 kilogramos. Para la iniciación se consideraron cebos y detonadores no eléctricos, mientras que la elección entre productos resistentes o no resistentes al agua dependía de las condiciones de humedad de los taladros.

El diseño fue evaluado mediante una prueba en una línea de 13 taladros de precorte, colocados a un metro de distancia. Según el cálculo teórico, el consumo total debía ser de 403 kilogramos de explosivo. Durante la prueba se emplearon 405,1 kilogramos, con un promedio de 31,16 kilogramos por taladro. La diferencia entre el consumo calculado y el consumo real fue de aproximadamente 2,1 kilogramos, lo cual mostró una correspondencia cercana entre el diseño formulado y la cantidad utilizada durante la aplicación en campo.

Antes de implementar el precorte, en las paredes del banco se observaban bolones y estructuras rocosas colgadas, así como procesos de descostramiento y acumulación de bloques en el pie del talud. Después de la prueba, las observaciones mostraron una pared sin bloques colgados y sin señales importantes de descostramiento. La línea de precorte logró delimitar la excavación y conservar la roca ubicada detrás del contorno diseñado. Por ello, el autor calificó los resultados como satisfactorios para una andesita porfírica de RMR 65 y con cuatro familias de discontinuidades.

La investigación concluyó que la caracterización geomecánica del macizo rocoso permitió establecer parámetros de perforación y voladura adaptados a las condiciones reales del banco 4330S-4325S. La resistencia a la compresión uniaxial de 66,41 MPa, el RQD de 86 % y el RMR básico de 65 fueron los principales datos empleados para definir el espaciamiento, la longitud de carga, el taco y la cantidad de explosivo. La aplicación del diseño redujo la presencia de bolones

en la pared y permitió obtener un perfil más uniforme, disminuyendo la necesidad de ejecutar labores posteriores de desatado, perfilamiento y limpieza. (Condori Burgos, 2018)

Antecedentes internacionales

En la tesis titulada "Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres", publicado en el año "2021", Mauricio Alejandro Díaz Leiva desarrolló una investigación en la Universidad de Chile con la finalidad de estudiar el efecto de las vibraciones generadas por las tronaduras sobre el macizo rocoso de Minera Los Pelambres. El trabajo fue elaborado como memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas y se enfocó en las fases 7, 9, 10 y 11 de la explotación minera. Para el análisis del campo cercano se consideraron específicamente las unidades geotécnicas UGT 1, 2, 3, 5, 6 y 9. La investigación partió de la necesidad de mejorar la capacidad de la mina para anticipar el daño que las tronaduras pueden ocasionar en las paredes de los bancos y en los taludes, debido a que una predicción poco precisa puede generar fracturamiento no deseado, inestabilidad, retrasos operacionales, disminución de la productividad y mayores riesgos para el personal y los equipos.

El autor señaló que la perforación y tronadura constituye la primera etapa de reducción del tamaño del material en una explotación a cielo abierto. Sin embargo, solo una parte de la energía liberada por el explosivo se utiliza efectivamente en la fragmentación y el desplazamiento de la roca, mientras que otra parte se transmite al entorno en forma de ondas sísmicas. Estas ondas producen vibraciones que pueden abrir discontinuidades existentes, generar nuevas fracturas o provocar un intenso fracturamiento en la roca que se desea conservar. Por esta razón, el estudio de la velocidad pico de partícula, conocida como PPV, se consideró uno de los principales medios para evaluar los efectos de las voladuras. El valor de PPV previsto por los modelos fue comparado

con la velocidad pico de partícula crítica, o PPV_c, que representa el límite empleado para estimar el grado de daño que puede soportar el macizo rocoso.

La problemática abordada estuvo relacionada con la elevada variabilidad de las predicciones de daño existentes para el campo cercano y con la falta de un modelo suficientemente desarrollado para el campo lejano. En la investigación, el campo cercano fue entendido como la zona comprendida dentro de una distancia aproximada de cinco veces la longitud de la carga explosiva, mientras que el campo lejano correspondió a las distancias superiores a dicho límite. Esta diferenciación fue importante porque las variables que controlan la propagación de las ondas y el tipo de modelo que representa su comportamiento cambian de acuerdo con la proximidad a la fuente de detonación. En consecuencia, la investigación analizó ambos campos por separado, aunque posteriormente integró sus resultados dentro de una propuesta general de evaluación del daño.

El objetivo principal fue estudiar las vibraciones producidas por las tronaduras y determinar cómo estas afectaban al macizo rocoso circundante. Entre los objetivos específicos se planteó identificar las variables de perforación y tronadura responsables del daño en las paredes cercanas; evaluar el posible daño en el campo lejano; proponer un criterio de daño sustentado en la bibliografía y en las características geotécnicas de la roca; y verificar el comportamiento de los modelos que se utilizaban previamente en Minera Los Pelambres. De esta manera, el trabajo buscó pasar de una evaluación general basada en valores promedio a una predicción más representativa de las condiciones particulares de cada unidad geotécnica.

La metodología se organizó en cuatro etapas principales. Primero, se identificaron los factores relevantes y medibles que intervienen en la generación y propagación de las vibraciones,

entre los que se encontraban la calidad del macizo rocoso, el tipo de explosivo, la cantidad y altura de la carga, la distancia hasta el punto de interés y los tiempos de retardo. En segundo lugar, se recopiló la información histórica procedente de la empresa y del área de geotecnia de minera Los Pelambres. Esta base de datos incluyó registros obtenidos mediante geófonos, información sobre las fases y bancos explotados, características de las mallas, tipos de tronadura, diámetro y profundidad de los taladros, explosivos empleados, carga por retardo, distancia entre la tronadura y el instrumento, frecuencia, PPV y ubicación espacial de los puntos de medición. Los datos fueron revisados y depurados para retirar mediciones incompletas, registros con dispersión excesiva y observaciones que no contribuían adecuadamente a la construcción de los modelos.

En la tercera etapa se implementaron modelos predictivos diferentes para cada zona de análisis. En el campo cercano se utilizó el modelo de Holmberg y Persson, mediante el cual se relacionaron la geometría de la carga explosiva, la distancia y la respuesta vibratoria de cada unidad geotécnica. En el campo lejano se empleó el modelo de Devine, basado en la relación entre la PPV y la distancia escalar. Los modelos de campo lejano fueron analizados considerando la fase de explotación, la unidad geotécnica y el tipo de explosivo. Además, se construyeron curvas con un nivel de confianza del 95 %, con la finalidad de disponer de un límite superior que representara las situaciones más desfavorables y permitiera adoptar decisiones conservadoras en el diseño de las tronaduras.

La cuarta etapa estuvo orientada a mejorar el cálculo de la PPVc. Para ello, se consideraron como variables de entrada el módulo de deformación de Young, la resistencia a la tracción y la velocidad de propagación de las ondas en la roca. El autor comprobó la ubicación y asignación de estos datos mediante el software Vulcan, eliminó registros duplicados y construyó un modelo de bloques con dimensiones de 25 metros de ancho, 25 metros de profundidad y 16 metros de altura.

Posteriormente, elaboró variogramas para las distintas unidades geotécnicas y aplicó métodos de estimación como kriging o inverso de la distancia, según la cantidad, distribución y comportamiento de los datos disponibles. Este procedimiento permitió regionalizar las propiedades geotécnicas, es decir, asignar valores más cercanos a las condiciones reales de cada sector, en lugar de utilizar únicamente promedios generales para toda una unidad.

Los resultados del campo cercano mostraron diferencias importantes entre las unidades geotécnicas. La UGT 6 presentó la mayor amplificación de la velocidad pico de partícula, mientras que las UGT 5 y 9 mostraron, en términos generales, los niveles de amplificación más bajos. Los coeficientes de determinación obtenidos con el modelo de Holmberg y Persson fueron de 68,33 % para la UGT 1; 97,13 % para la UGT 2; 98,21 % para la UGT 3; 79,42 % para la UGT 5; 87,72 % para la UGT 6; y 99,44 % para la UGT 9. Por tanto, el modelo presentó un ajuste especialmente favorable en las UGT 2, 3, 6 y 9, mientras que la UGT 1 mostró una mayor dispersión y la UGT 5 alcanzó un nivel cercano al límite de confiabilidad adoptado en el estudio. La comparación con los modelos empleados por la empresa colaboradora mostró resultados semejantes, lo que llevó al autor a indicar que una parte importante del problema no se encontraba en el modelo de propagación de vibraciones, sino en la variabilidad de los parámetros utilizados para definir el daño.

En cuanto al campo lejano, el modelo general elaborado para toda la mina presentó un error cuadrático medio de 20,17 mm/s respecto a las mediciones posteriores y registró ocho valores por encima de la curva correspondiente al 95 % de confianza. Al separar los datos según el explosivo utilizado, se obtuvo un mejor comportamiento predictivo. Los coeficientes de determinación fueron de 78,18 % para Blendex 930; 88,48 % para Blendex 950; 86,00 % para Vertex 950; y 88,78 % para Vertex 970. Las curvas indicaron que Blendex 930 produjo los menores niveles de

vibración, mientras que Vertex 970 presentó la mayor amplificación de PPV. Al evaluar los resultados por fase, se observó que la fase 7 generaba los mayores niveles de vibración, seguida de las fases 9, 10 y 11. No obstante, los modelos agrupados por explosivo mostraron un mejor ajuste que los construidos únicamente por fase, por lo que el autor consideró que el tipo de explosivo era una variable especialmente relevante para predecir el comportamiento de las vibraciones en campo lejano.

Respecto al criterio de daño, se encontró una elevada variabilidad en el módulo de Young, la resistencia a la tracción y la velocidad de propagación de las ondas dentro de una misma unidad geotécnica. Por ejemplo, la PPVc promedio fue estimada en 500 mm/s para la UGT 1; 691 mm/s para la UGT 2; 808 mm/s para la UGT 3; 909 mm/s para la UGT 5; 612 mm/s para la UGT 6; y 434 mm/s para la UGT 9. Sin embargo, los valores mínimos y máximos presentaron diferencias considerables, lo que demostró que la utilización de un solo promedio podía ocultar las condiciones particulares de los diferentes sectores del macizo rocoso. Después de cruzar las tres variables necesarias para calcular la PPVc, el modelo pasó de aproximadamente cinco millones de bloques iniciales a cerca de cuatrocientos mil bloques que contaban con información suficiente. Aunque esta reducción disminuyó la cobertura, permitió trabajar con valores geotécnicos compatibles y espacialmente relacionados.

A partir de los modelos de campo cercano y de la PPVc regionalizada se elaboraron ábacos de diseño para las UGT 1, 2, 3, 5, 6 y 9. Estos ábacos relacionaron la longitud de la carga y la distancia entre la columna explosiva y la pared con diferentes rangos de daño. Se consideró que una vibración inferior a una cuarta parte de la PPVc tenía una baja probabilidad de producir nuevas fracturas; los valores comprendidos entre un cuarto de la PPVc y la PPVc podían generar fracturas nuevas; y los valores ubicados entre la PPVc y cuatro veces la PPVc podían causar un

fracturamiento más intenso. Los resultados mostraron que las UGT 3 y 6 eran especialmente sensibles, debido a que podían alcanzar valores cercanos o superiores a 2000 mm/s con los diseños analizados. Para la UGT 9 también se identificaron condiciones capaces de superar cuatro veces la PPVc cuando se combinaban distancias reducidas con cargas de diez metros o más.

Al comparar los ábacos con los diseños de tronadura utilizados en la operación, el autor determinó que en varias unidades existía la posibilidad de generar nuevas fracturas o un intenso fracturamiento en las paredes. En la UGT 2 se estimó una PPV cercana a 1000 mm/s; en la UGT 3, alrededor de 2000 mm/s; en la UGT 5, aproximadamente 600 mm/s; en la UGT 6, valores superiores a 2000 mm/s; y en la UGT 9, cerca de 600 mm/s. Estos resultados evidenciaron que una misma configuración de carga no debía aplicarse de manera uniforme, debido a que cada unidad geotécnica respondía de forma diferente ante la energía liberada por los explosivos. Por consiguiente, se consideró necesario ajustar la altura de la columna explosiva y la distancia de las líneas buffer respecto a la pared que se pretendía proteger.

La investigación concluyó que la predicción del daño inducido por las tronaduras debe integrar las mediciones de vibración con las características geotécnicas reales y espacialmente variables del macizo rocoso. Los modelos de Holmberg y Persson y de Devine permitieron representar de manera razonable el comportamiento de las vibraciones en campo cercano y lejano, pero su utilidad dependió de la calidad y cantidad de la información disponible. Por ello, se recomendó ampliar la base de datos, realizar nuevas pruebas para calibrar continuamente los modelos y evaluar variables adicionales como la presencia de agua, el grado de meteorización, el tipo de explosivo y los tiempos de retardo entre taladros. También se propuso estudiar el efecto de los precortes como barreras que pueden disipar parte de las ondas y analizar conjuntamente el control del daño y la fragmentación requerida, debido a que una disminución excesiva de la carga

podría proteger la pared, pero afectar negativamente el resultado productivo de la tronadura. (Díaz Leiva, 2021)

2.2 Bases teóricas de la investigación

La voladura es un proceso de liberación rápida de energía que busca fragmentar y desplazar el macizo rocoso. Cuando el explosivo detona dentro del taladro, la presión de los gases actúa sobre sus paredes y genera una onda de esfuerzo que se propaga por la roca. Una parte de la energía se emplea en triturar la zona inmediata, extender grietas y movilizar el material; otra parte se transmite fuera del volumen que se desea excavar en forma de vibraciones, onda aérea, proyecciones y calor. Por ello, el resultado de una voladura no depende únicamente de la cantidad total de explosivo, sino también de la forma en que la energía se concentra y se distribuye a lo largo de la columna de carga (Jimeno et al., 1995; Persson et al., 1994).

En minería superficial, las vibraciones adquieren especial importancia cerca de las paredes finales del tajo. Si la energía transmitida supera la capacidad del macizo para deformarse sin generar daño, puede producirse la apertura de discontinuidades, la formación de nuevas grietas, el desprendimiento de bloques o un deterioro progresivo de la calidad geotécnica. El control de estas consecuencias exige relacionar los parámetros de perforación y voladura con la respuesta dinámica de la litología en la que se trabaja, debido a que una misma configuración de carga puede comportarse de manera distinta en rocas con diferente resistencia, fracturamiento o velocidad de propagación.

2.2.1 *Propagación de ondas en el macizo rocoso*

La perturbación producida por una detonación se propaga mediante ondas de cuerpo y ondas superficiales. Las ondas P o primarias generan un movimiento de las partículas paralelo a la

dirección de propagación y, por su carácter compresional, suelen constituir el primer arribo identificado en un registro. Las ondas S producen un movimiento perpendicular a esa dirección, mientras que las ondas superficiales se desarrollan en las proximidades de los límites del medio. Un sismógrafo triaxial registra la respuesta en tres componentes ortogonales —longitudinal, transversal y vertical—, lo que permite reconocer la amplitud máxima y revisar la forma temporal de cada pulso.

La amplitud de la vibración disminuye conforme aumenta la distancia recorrida. Esta atenuación se debe a la expansión geométrica del frente de onda y a la disipación de energía dentro del material. Sin embargo, el macizo rocoso no es un medio homogéneo: las discontinuidades, cambios litológicos, alteración, humedad y orientación de las estructuras pueden reflejar, refractar o canalizar las ondas. En consecuencia, los coeficientes de un modelo de vibraciones deben obtenerse para el dominio geotécnico y la dirección de interés, y no trasladarse de manera automática desde otra zona de la mina (Onederra & Esen, 2004).

2.2.1 Campo cercano de una carga explosiva

El campo cercano corresponde a la zona en la que la distancia entre la fuente y el punto de análisis es comparable con la longitud de la columna explosiva. En esta condición, la carga no puede representarse adecuadamente como un punto, porque cada tramo del explosivo se encuentra a una distancia y una posición diferente respecto del geófono o de la pared que se desea proteger. Por este motivo, el análisis considera la carga como una fuente cilíndrica distribuida y suma la contribución de sus elementos a lo largo del taladro (Holmberg & Persson, 1980).

Esta diferencia es relevante para la presente investigación, pues los puntos de interés se ubican en el talud, el pie de este y la cresta del banco inferior, es decir, dentro de distancias en las

que la geometría de la columna influye directamente en la VPP. Los modelos convencionales de distancia escalada son útiles cuando la separación es grande en comparación con la carga, pero pueden perder representatividad en las proximidades del taladro. El modelo de campo cercano permite evaluar con mayor detalle cómo cambian las vibraciones a lo largo de la profundidad y alrededor de la columna explosiva.

2.2.2 Velocidad pico de partícula

La velocidad pico de partícula (VPP) es la máxima velocidad instantánea que alcanza una partícula del terreno al paso de la onda vibratoria. Se expresa habitualmente en milímetros por segundo y no debe confundirse con la velocidad de propagación de la onda P: la primera describe la intensidad del movimiento local, mientras que la segunda indica la rapidez con la que el frente de onda viaja por el medio. La VPP es uno de los parámetros más utilizados para caracterizar vibraciones por voladura porque puede medirse directamente, compararse entre eventos y vincularse con criterios de daño (Siskind et al., 1980).

Para interpretar un registro es necesario identificar el pulso que corresponde a cada taladro, revisar el nivel de ruido y seleccionar la componente o el vector suma que represente el propósito del análisis. Los valores atípicos no deben excluirse solo por ser altos o bajos; su retiro requiere una causa técnica verificable, como saturación, interferencia, pérdida de acople o falta de correspondencia con la secuencia de iniciación. En este estudio, la trazabilidad entre taladro, carga, tiempo y señal permite comparar los productos explosivos y ajustar el modelo con los registros válidos.

2.2.3 Método Cross-Hole y velocidad de la onda P

El método Cross-Hole determina la velocidad de propagación entre puntos separados por una distancia conocida. Una fuente genera el pulso y dos receptores registran sus tiempos de arribo; la velocidad se calcula dividiendo la distancia entre los geófonos entre la diferencia de dichos tiempos. La norma ASTM D4428/D4428M-25 establece que la interpretación se basa en los primeros arribos o en los tiempos de intervalo medidos sobre una distancia conocida, y destaca la necesidad de documentar la geometría, el sistema de adquisición y las condiciones que pueden modificar la trayectoria de la onda (ASTM International, 2025).

La velocidad de onda P obtenida en campo representa el comportamiento dinámico del sector ensayado. Un valor menor que el correspondiente a una muestra intacta puede asociarse con discontinuidades, porosidad, alteración o pérdida de continuidad del macizo. En la tesis, este parámetro cumple dos funciones: caracteriza la ignimbrita de la F02N 3735 y participa en el cálculo de la VPP crítica. Por ello, su determinación constituye un enlace entre la medición sísmica y la evaluación del daño potencial.

2.2.4 Modelo de atenuación de Holmberg-Persson

El modelo de Holmberg-Persson fue desarrollado para estimar la VPP producida por una carga cilíndrica en las proximidades de una excavación. Su formulación integra la carga lineal y la geometría existente entre cada elemento de la columna y el punto de observación. En la forma utilizada en esta investigación, el término geométrico H&P reúne la carga lineal, la longitud cargada, el taco y las distancias horizontal y vertical; posteriormente se aplica una relación potencial de la forma $VPP = K(H\&P)^\alpha$. De este modo, la respuesta no depende únicamente de los kilogramos totales, sino también de la ubicación espacial de la carga (Holmberg & Persson, 1980).

La constante K representa de manera empírica la eficiencia con la que la combinación explosivo-roca transmite la vibración, mientras que α describe la rapidez con la que la amplitud se atenúa en el dominio analizado. Ambas constantes son específicas del sitio, de la dirección de medición y del producto explosivo. Por esta razón, deben obtenerse mediante registros de campo y un ajuste de regresión, indicando el número de datos, la dispersión y el nivel de confianza de la curva. Onederra y Esen (2004) señalan, además, que la anisotropía y el cambio de explosivo pueden modificar las constantes, por lo que la calibración debe responder a condiciones comparables.

Iverson et al. (2008) revisaron el planteamiento original y propusieron una modificación del procedimiento para corregir inconsistencias matemáticas en la integración de las cargas elementales. Esta observación no elimina la utilidad práctica del modelo, pero obliga a reconocer sus supuestos: detonación idealizada, suma de contribuciones, representación simplificada del medio y necesidad de calibración local. En la presente tesis, el modelo se utiliza como herramienta predictiva de ingeniería y sus resultados se interpretan dentro del ámbito específico de la ignimbrita estudiada.

2.2.5 Velocidad pico de partícula crítica y niveles de perturbación

La VPP crítica (VPPc) es un umbral teórico asociado al inicio del fracturamiento por tracción. Se obtiene a partir de la resistencia a la tracción de la roca, la velocidad de la onda P y el módulo de Young. Su fundamento parte de relacionar la deformación dinámica con la velocidad de partícula y, luego, aplicar la ley de Hooke hasta que el esfuerzo alcanza la resistencia a la tracción. La expresión $VPPc = \sigma Vp/E$ permite convertir propiedades geomecánicas en un criterio de comparación para la vibración calculada o registrada (Persson et al., 1994; Onederra & Esen, 2004).

Este valor no debe entenderse como una frontera absoluta entre una roca intacta y una roca dañada. El macizo contiene discontinuidades, presenta anisotropía y puede responder de forma distinta según la frecuencia, el confinamiento y la duración del pulso. Por ello, la VPPc funciona como referencia para clasificar niveles de perturbación. En el criterio empleado en la investigación, un cuarto de la VPPc se asocia con la dilatación de fracturas existentes; la VPPc, con la aparición de nuevas grietas; cuatro veces la VPPc, con fracturamiento intenso; y ocho veces la VPPc, con pulverización.

El empleo de estos múltiplos permite transformar un mapa de VPP en una representación comprensible del posible efecto sobre la roca. No obstante, la interpretación debe ser conservadora porque el cálculo se sustenta en propiedades de roca intacta. La validación mediante inspecciones posteriores a la voladura y nuevas mediciones es necesaria para ajustar los umbrales al comportamiento real del macizo.

2.2.6 Densidad del explosivo y distribución de la carga

La densidad del explosivo influye en la masa contenida por unidad de volumen y, junto con la velocidad de detonación y la energía específica, condiciona la presión aplicada sobre las paredes del taladro. Si se mantiene la geometría, una reducción de densidad disminuye la masa lineal de explosivo y puede reducir la energía transmitida al macizo. Sin embargo, el efecto final también depende del diámetro, la longitud cargada, el grado de acoplamiento, la confinación, la presencia de agua y el desempeño real del producto (Jimeno et al., 1995; Persson et al., 1994).

Un explosivo de control de baja densidad busca producir una entrega de energía compatible con la función de las filas próximas al talud. Estas filas no solo deben fragmentar el material, sino también limitar la perturbación en la roca que permanecerá como pared. Por ello, la evaluación no

puede reducirse a comparar densidades nominales: debe considerar cargas equivalentes, señales registradas en puntos comparables y la geometría completa del diseño. Esta es la razón por la que la prueba de la tesis enfrenta pares de carga y analiza la VPP producida por el explosivo de control frente al HA73G.

2.2.7 Diseño de carga y control del daño en taludes

Las filas buffer actúan como transición entre la voladura de producción y el límite de excavación. El diseño de estas cargas debe equilibrar dos exigencias: lograr una fragmentación que pueda ser excavada y evitar que la vibración alcance niveles capaces de deteriorar el talud. Entre los parámetros que intervienen se encuentran el diámetro del taladro, la carga lineal, la longitud de columna, el taco, la sobreperforación, la separación entre filas y la secuencia de iniciación. Una modificación aislada puede desplazar el problema; por ejemplo, reducir demasiado la carga puede proteger la pared, pero dejar material difícil de fragmentar.

El modelamiento permite comparar alternativas antes de ejecutar una prueba a escala operacional. En este trabajo, los diseños A-A', B-B' y C-C' representan diferentes combinaciones de explosivo estándar, explosivo de control y diámetro de las filas buffer. La evaluación se realiza observando la magnitud de la VPP y la distancia hasta la que se proyectan los umbrales de perturbación hacia el talud y el banco inferior. Este criterio es coherente con los hallazgos de Díaz Leiva (2021), quien concluyó que el control del daño exige ajustar la carga y la ubicación de las filas próximas a la pared según la unidad geotécnica.

2.2.8 Aplicación del marco teórico a la ignimbrita estudiada

La ignimbrita de la F02N 3735 constituye el dominio para el cual se calibran e interpretan los resultados. La secuencia teórica de la investigación comienza con la medición de la velocidad

de onda P mediante Cross-Hole; continúa con el cálculo de la VPPc a partir de las propiedades geotécnicas; prosigue con el ajuste de K y α del modelo Holmberg-Persson; y culmina con la simulación de los diseños de carga y la comparación entre explosivos. Cada etapa aporta un parámetro necesario para la siguiente y mantiene la trazabilidad entre la medición de campo y la decisión de diseño.

Los antecedentes de Luque Muñoz (2021) y Díaz Leiva (2021) muestran que un modelo de vibraciones adquiere utilidad cuando se calibra con información propia del macizo y se vincula con un criterio de daño. A su vez, Condori Burgos (2018) evidencia que la conservación de las paredes depende de adaptar los parámetros de perforación y voladura a las condiciones geomecánicas reales. Sobre esta base, la tesis no pretende establecer una ecuación universal para toda la mina; busca obtener una herramienta de decisión para la ignimbrita analizada y sustentar técnicamente el uso del explosivo de control en las filas buffer.

2.3 Hipótesis

La aplicación de un diseño de carga con explosivo de control de baja densidad, evaluado mediante un modelo de vibraciones de campo cercano calibrado para la litología ignimbrita, genera menores niveles de VPP y reduce el alcance de los umbrales de daño hacia el talud y la cresta del banco inferior en comparación con el diseño que emplea explosivo estándar HA73G.

2.3.1 *Variable dependiente*

- Nivel de vibración y daño inducido en la ignimbrita.

2.3.2 *Variable independiente*

- Tipo y configuración de la carga explosiva.

Tabla 1
Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Técnica e instrumento
Dependiente: Nivel de vibración y daño inducido en la ignimbrita	Respuesta dinámica de la roca ante la detonación, expresada por la VPP y por el grado y alcance de la perturbación.	Registros triaxiales, cálculo de Vp y VPPc, ajuste H&P y simulaciones A-A', B-B' y C-C'.	Propagación y amplitud	Vp (m/s); VPP por geófono (mm/s); K, α y R ² ; diferencia de VPP (%).	Monitoreo instrumental: geófonos G1-G3, sismógrafos Pro6 y fichas de campo. Cálculo analítico: parámetros geotécnicos y matriz de procesamiento. Simulación: Paradigm Advanced y perfiles A-A', B-B' y C-C'.
			Umbral de daño	VPPc (mm/s); 1/4, 1, 4 y 8 × VPPc; nivel de perturbación.	
			Alcance espacial	Distancia con VPP ≥ VPPc hacia el talud y banco (m); VPP simulada.	
Independiente: Tipo y configuración de la carga explosiva	Características del explosivo y distribución de la carga que controlan la energía liberada y transmitida al macizo.	Comparación de explosivo de control (0,80 g/cm ³) y HA73G (1,15 g/cm ³), más los diseños A-A', B-B' y C-C'.	Características del explosivo Geometría y distribución	Tipo; densidad (g/cm ³); carga nominal por taladro (kg). Diámetro; longitud y distribución de carga; fila Buffer/Producción; configuración.	Registro de carguío y fichas técnicas de los explosivos. Planos de P&V, fichas de campo y parámetros de simulación.

Nota. Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como base al modelamiento de vibraciones en campo cercano en litología

ignimbrita

CAPÍTULO III

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

Alcances

La investigación se centró en el comportamiento de las vibraciones generadas en campo cercano por cargas explosivas dentro de la litología ignimbrita de la Fase 02 Norte, nivel 3735, de una unidad minera ubicada al sur del Perú. El trabajo comprendió la caracterización dinámica del medio rocoso, el desarrollo de un modelo de atenuación y la evaluación del efecto que produce un explosivo de control de baja densidad frente al explosivo estándar HA73G. Por lo tanto, sus resultados son representativos de las condiciones geotécnicas, geométricas y operacionales observadas en el sector estudiado.

El alcance técnico incluyó la determinación de la velocidad de propagación de la onda P mediante el método Cross-Hole, el cálculo de la velocidad pico de partícula crítica (VPPc) y de los niveles de perturbación de la roca, así como la obtención de las constantes K y alfa del modelo de Holmberg-Persson. A partir de esta información se estimó el daño asociado al diseño de carga vigente y se simuló tres configuraciones, denominadas A-A', B-B' y C-C', para analizar el alcance de las vibraciones hacia el talud y la cresta del banco inferior.

La comparación experimental se efectuó con doce taladros de 12 1/4 pulgadas de diámetro: seis cargados con explosivo de control de 0.80 g/cm³ y seis con HA73G de 1.15 g/cm³. Las cargas fueron detonadas de manera secuencial y sus señales se registraron en los geófonos G1 y G2. De forma complementaria, la prueba Cross-Hole consideró seis taladros de 6.5 pulgadas y los registros de los geófonos G2 y G3. Esta disposición permitió construir el modelo de campo cercano y comparar los niveles de vibración producidos por ambos tipos de explosivo en condiciones controladas de campo.

Los resultados del estudio permiten sustentar técnicamente el uso del explosivo de control en los taladros Buffer 1 y Buffer 2, además de establecer valores de referencia para la planificación de voladuras en sectores de ignimbrita con condiciones semejantes. El modelo obtenido constituye una herramienta de apoyo para anticipar la VPP, delimitar zonas con probabilidad de dilatación o generación de fracturas y seleccionar configuraciones de carga que reduzcan la energía transmitida al macizo rocoso.

Limitaciones

La principal limitación corresponde al ámbito de validez del modelo. La investigación se desarrolló en una sola litología, un nivel y un sector de la operación; por ello, las constantes de atenuación y los umbrales obtenidos no deben extrapolarse de manera directa a otras fases, litologías o minas sin una calibración previa con información local. Asimismo, la cantidad de observaciones estuvo condicionada por una campaña específica de pruebas y por la disponibilidad operativa del área.

Durante el procesamiento de las señales, los registros longitudinales de los taladros P1 y P2 no fueron considerados debido a la presencia de ruido. Además, el valor de 138.7 mm/s fue identificado como atípico y se excluyó de la regresión de campo cercano. En consecuencia, el modelo se ajustó con siete observaciones válidas y la velocidad de propagación se resumió a partir de cuatro datos, lo cual obliga a interpretar los coeficientes obtenidos dentro del contexto de la prueba y no como parámetros universales.

Otra limitación se relaciona con la representación del macizo rocoso. El cálculo de la VPPc utilizó parámetros de roca intacta proporcionados por el área de geotecnia, mientras que las simulaciones realizadas en Paradigm Advanced constituyen una aproximación estática. Estas simulaciones no incorporan de manera explícita todas las fallas principales, estratificaciones, discontinuidades, variaciones de alteración ni la anisotropía presente en el

macizo rocoso. Por esta razón, los niveles de daño estimados deben contrastarse y ajustarse con nuevas mediciones de campo.

Finalmente, la investigación evaluó el control de vibraciones y el alcance del daño inducido, pero no realizó una validación integral de la fragmentación, la productividad ni los costos asociados a cada configuración. En particular, el diseño C-C' mostró un buen control del daño hacia el talud; sin embargo, su efecto sobre la fragmentación en las filas de control deberá comprobarse mediante pruebas operacionales posteriores.

3.2 Tipo y nivel de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, porque la respuesta del macizo rocoso fue estudiada mediante mediciones numéricas de tiempo de arribo, velocidad de propagación, velocidad pico de partícula, carga explosiva, distancia y parámetros geotécnicos. El análisis relacionó estas mediciones con el tipo y la densidad del explosivo, la geometría de carga y la ubicación del punto de control.

3.2.1 Tipo de investigación

Por su finalidad, la investigación fue de tipo aplicada. El trabajo no se limitó a describir las vibraciones, sino que utilizó los resultados para resolver un problema concreto de la operación minera: reducir el daño inducido por voladura en los límites del talud y en la cresta del banco inferior. Para ello se construyó un modelo específico para la ignimbrita, se evaluó el diseño de carga actual y se propusieron configuraciones con explosivo de control de baja densidad.

La fuente principal de información fue de campo. Los datos se obtuvieron durante pruebas de voladura diseñadas para la investigación, mediante instrumentación instalada en el sector F02N 3735. También se empleó información secundaria correspondiente a los

parámetros geotécnicos de la roca intacta y a los diseños de perforación y voladura proporcionados por las áreas técnicas de la operación.

3.2.2 Nivel de investigación

El nivel principal fue explicativo, debido a que se buscó establecer cómo el tipo de explosivo, su densidad y la configuración de carga influyen sobre la velocidad pico de partícula y el alcance del daño por vibraciones. Para llegar a esta explicación se desarrollaron etapas descriptivas y correlacionales: primero se caracterizaron los registros de campo y la velocidad de propagación; luego se relacionó la VPP con el factor geométrico de Holmberg-Persson mediante una regresión potencial; finalmente se comparó la respuesta del explosivo de control con la del HA73G.

El diseño fue cuasiexperimental de campo y de corte transversal. Se compararon dos condiciones de carga previamente definidas —explosivo de control de 0.80 g/cm³ y explosivo estándar HA73G de 1.15 g/cm³— en taladros ejecutados dentro del mismo sector de ignimbrita. Se considera cuasiexperimental porque la asignación de los tratamientos respondió a la configuración técnica de la prueba y no a una selección aleatoria; no obstante, se mantuvieron pares de carga nominal comparables y una secuencia electrónica que permitió identificar cada pulso de vibración.

3.3 Población y muestra

En esta investigación la población no estuvo constituida por personas, sino por eventos de detonación y registros de vibración asociados a cargas explosivas ejecutadas en la ignimbrita del sector F02N 3735. La unidad experimental fue cada taladro cargado y detonado de manera secuencial; la unidad de análisis fue cada señal de vibración identificada por el taladro de origen y por el geófono que la registró.

Debido a que se trató de una campaña de prueba delimitada, se trabajó con la totalidad de las unidades experimentales programadas. En ese sentido, la muestra fue censal respecto de la población accesible y, al mismo tiempo, no probabilística e intencional respecto de todas las posibles voladuras de la unidad minera. La selección del sector y de los taladros respondió a la presencia de la litología ignimbrita, a los objetivos del estudio y a las condiciones técnicas y de seguridad necesarias para instalar la instrumentación.

3.3.1 Población

La población accesible estuvo conformada por dieciocho taladros de prueba y sus respectivos registros de vibración. Doce taladros correspondieron al ensayo comparativo entre explosivos: seis se cargaron con producto de control de baja densidad y seis con HA73G. Estos eventos fueron monitoreados por los geófonos G1 y G2, por lo que se obtuvieron veinticuatro valores de VPP para la comparación directa entre ambos productos.

Los otros seis taladros se destinaron a la prueba Cross-Hole y fueron monitoreados por los geófonos G2 y G3. De este arreglo se obtuvieron ocho observaciones candidatas para la regresión de campo cercano; después del control de calidad se retiró el registro atípico de 138.7 mm/s y el modelo se ajustó con siete observaciones válidas. Para el cálculo descriptivo de la velocidad de propagación se dispuso de cuatro diferencias de tiempo de arribo consideradas confiables.

3.4 Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se siguió el método científico con una lógica hipotético-deductiva y empírico-analítica. A partir de los fundamentos de propagación de ondas y del modelo de Holmberg-Persson se planteó que la reducción de la densidad y la modificación de la configuración de carga disminuirían la VPP transmitida al macizo rocoso. Esta proposición se contrastó mediante

pruebas instrumentadas, cálculos matemáticos, regresión y simulaciones aplicadas al diseño de perforación y voladura.

La recolección integró datos primarios y secundarios. Los datos primarios fueron las formas de onda, los tiempos de arribo y las velocidades pico de partícula registradas durante las detonaciones. Los datos secundarios comprendieron la resistencia a la compresión uniaxial, la resistencia a la tracción, el módulo de Young, la densidad de la ignimbrita y la información geométrica y operacional de las mallas de perforación y voladura.

3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

El procedimiento se inició con la revisión de los antecedentes técnicos del sector F02N 3735 y con la recopilación de los parámetros geotécnicos de la ignimbrita. Se consideraron una resistencia a la compresión uniaxial de 18.11 MPa, una resistencia a la tracción de 2.01 MPa, un módulo de Young de 4.3 GPa y una densidad de 2.1 g/cm³. También se revisaron la malla de perforación, las filas buffer, las longitudes de carga y la geometría del talud que serían utilizadas posteriormente en las simulaciones.

A continuación, se delimitó el área de pruebas y se ejecutaron dos arreglos de perforación. El primer arreglo estuvo compuesto por doce taladros de 12 1/4 pulgadas de diámetro y se destinó a comparar el explosivo de control de 0.80 g/cm³ con el HA73G de 1.15 g/cm³. Se emplearon seis taladros por producto y cargas nominales comprendidas entre 200 y 450 kg. El segundo arreglo comprendió seis taladros de 6.5 pulgadas para la prueba Cross-Hole.

Se instalaron tres geófonos triaxiales, identificados como G1, G2 y G3, en una disposición lineal respecto de los arreglos de prueba. Los sensores fueron empotrados para asegurar un acoplamiento adecuado con el terreno y se conectaron a dos sismógrafos Pro6 mediante cajas de conexión. Antes de la voladura se verificaron la orientación de los sensores,

la continuidad de las conexiones, la identificación de los canales y la correspondencia entre cada taladro, su carga y su tiempo de iniciación.

Las cargas se detonaron secuencialmente mediante un sistema de iniciación electrónico. Esta separación temporal permitió reconocer el pulso producido por cada taladro. Para la prueba comparativa se analizaron los registros de G1 y G2; para la prueba Cross-Hole se utilizaron los registros de G2 y G3. Las formas de onda fueron descargadas y revisadas para identificar los tiempos de arribo y la VPP correspondiente a cada evento.

La velocidad de propagación de la onda P se determinó dividiendo la distancia conocida entre los geófonos entre la diferencia de sus tiempos de arribo: $V_p = d / (TG2 - TG1)$. Con el promedio de V_p y los parámetros de resistencia a la tracción y módulo de Young se calculó la velocidad pico de partícula crítica mediante $VPP_c = (\sigma_T \times V_p) / E$. Posteriormente se obtuvieron los umbrales de perturbación correspondientes a un cuarto, una, cuatro y ocho veces la VPP_c .

Para construir el modelo de atenuación se calculó el factor H&P de cada registro a partir de la carga lineal y de la posición del punto de monitoreo respecto de la columna explosiva. Los valores válidos de VPP y H&P se ajustaron mediante una regresión potencial, de la forma $VPP = K(H\&P)^\alpha$. De este proceso se obtuvieron los parámetros utilizados en las curvas de 50 % y 98 % de confianza para la ignimbrita.

El modelo, la V_p , la VPP_c , los parámetros geotécnicos y una onda semilla se ingresaron en Paradigm Advanced. Con esta información se simuló los diseños A-A', B-B' y C-C' y se estimó el alcance de los niveles de perturbación hacia el talud y el banco inferior. Finalmente, los registros de los doce taladros comparativos se ordenaron por pares de carga nominal y se calculó la diferencia porcentual de VPP entre el explosivo de control y el HA73G para los geófonos G1 y G2.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

- **Análisis documental.** Se revisaron los parámetros geotécnicos entregados por el área de geotecnia, los planos del sector, los diseños de perforación y voladura, las fichas de los explosivos y la secuencia electrónica de iniciación. Esta información permitió definir las condiciones de la prueba y proporcionó las variables necesarias para calcular la VPPc y configurar las simulaciones.
- **Observación directa y medición instrumental.** Durante la instalación y ejecución de las pruebas se registraron la geometría de los taladros, el tipo y la cantidad de explosivo, el tiempo de detonación y la posición de los geófonos. Las señales sísmicas fueron medidas directamente en campo para obtener los tiempos de arribo y las velocidades pico de partícula.
- **Experimentación y comparación de campo.** Se aplicaron dos tratamientos operacionales, representados por el explosivo de control de baja densidad y el HA73G, y se comparó su respuesta para pares de carga nominal. La prueba Cross-Hole se empleó de forma complementaria para determinar la velocidad de propagación y calibrar el modelo de campo cercano.
- **Modelamiento matemático y simulación.** Los registros fueron transformados mediante las ecuaciones de propagación, VPP crítica y Holmberg-Persson. Después, los parámetros obtenidos se utilizaron en Paradigm Advanced para representar el efecto de distintas configuraciones de carga sobre el talud y el banco inferior.

3.4.3 Instrumentos de medición:

Los instrumentos principales fueron tres geófonos triaxiales de campo cercano, identificados como G1, G2 y G3, y dos sismógrafos Pro6. Los geófonos registraron las

componentes longitudinal, transversal y vertical de la vibración, mientras que los sismógrafos almacenaron las formas de onda y los valores asociados a cada pulso. Las cajas de conexión, el cableado y los elementos de empotramiento formaron parte del sistema de adquisición.

Como instrumentos de registro se emplearon fichas de campo y matrices de datos en las que se consignaron el identificador del taladro, el tipo y densidad del explosivo, la carga en kilogramos, el tiempo de iniciación, la ubicación del geófono, la distancia, el tiempo de arribo y la VPP. Estas matrices permitieron conservar la trazabilidad entre cada detonación y la señal analizada.

El sistema electrónico de iniciación se utilizó como medio de control experimental para asignar retardos independientes y reconocer los pulsos de cada carga. Los taladros, los explosivos de control y estándar y sus accesorios constituyeron los materiales de ensayo; aunque no son instrumentos de medición, fueron indispensables para producir las condiciones comparables evaluadas en campo.

Para el procesamiento se emplearon el software de descarga y lectura de los sismógrafos, una hoja de cálculo para depurar y resumir los registros y Paradigm Advanced para las simulaciones de vibración. El modelo de Holmberg-Persson y las ecuaciones de V_p y V_{PPc} se utilizaron como instrumentos analíticos.

3.4.4 Plan de análisis estadístico de los datos

El análisis comenzó con la organización de una base de datos única. Cada fila se identificó por taladro, geófono, tipo de explosivo, carga, tiempo de iniciación y distancia al punto de medición. Antes de realizar los cálculos se revisaron la integridad de las formas de onda, la correspondencia entre los pulsos y la secuencia de detonación y la presencia de ruido o valores anómalos.

Para la velocidad de propagación se aplicó estadística descriptiva. Se calcularon el número de observaciones, el valor mínimo, el valor máximo, la media aritmética y la desviación estándar. Los cuatro registros válidos produjeron valores entre 1642 y 2083 m/s, una media de 1866 m/s y una desviación estándar de 180.8 m/s. La media se utilizó en el cálculo de la VPPc.

La VPPc se determinó con la resistencia a la tracción, la Vp media y el módulo de Young. A partir del valor obtenido, 872 mm/s, se establecieron cuatro categorías de perturbación: dilatación de fracturas existentes a partir de 218 mm/s, aparición de nuevas grietas a partir de 872 mm/s, fracturamiento intenso a partir de 3489 mm/s y pulverización alrededor de 6978 mm/s. Estos valores funcionaron como criterios de comparación para las simulaciones.

El modelo de campo cercano se estimó mediante regresión potencial entre la VPP y el factor H&P. De las ocho observaciones inicialmente disponibles se excluyó el registro de 138.7 mm/s, previamente identificado como atípico, y se trabajó con siete datos válidos. Se obtuvieron las ecuaciones $VPP = 381.31(H\&P)^{0.7242}$ para la curva de 50 % de confianza y $VPP = 595.59(H\&P)^{0.7242}$ para la envolvente de 98 % de confianza. El coeficiente de determinación se utilizó para valorar la correspondencia entre la curva y los registros de campo.

La comparación entre explosivos se realizó por pares de carga nominal. Para cada geófono se calculó la variación porcentual mediante: $\text{diferencia de VPP (\%)} = [(VPP \text{ de baja densidad} - VPP \text{ de HA73G}) / VPP \text{ de HA73G}] \times 100$. Los porcentajes se resumieron por par, geófono y componente de vibración. La interpretación consideró tanto el signo como la magnitud de la diferencia; en el conjunto de la prueba, el explosivo de control presentó una reducción promedio cercana al 40 % respecto del producto estándar.

Finalmente, se contrastaron los valores simulados de los diseños A-A', B-B' y C-C' con los umbrales de perturbación y se midió la distancia de alcance hacia el talud y el banco inferior. Debido al tamaño reducido de la campaña, a la selección intencional de las unidades y a la ausencia de aleatorización, no se planteó una generalización inferencial hacia toda la mina. Las conclusiones se sustentaron en estadística descriptiva, ajuste de regresión, magnitud de las diferencias y coherencia técnica con las condiciones observadas.

3.5 Lugar de desarrollo de investigación

La investigación se desarrolló en una unidad minera a tajo abierto ubicada al sur del Perú. El trabajo de campo se concentró en la Fase 02 Norte, nivel 3735, dentro de un sector caracterizado por la presencia de ignimbrita. Esta zona fue seleccionada porque permitía instalar los arreglos de prueba y evaluar las vibraciones que alcanzaban el talud de diseño y la cresta del banco inferior.

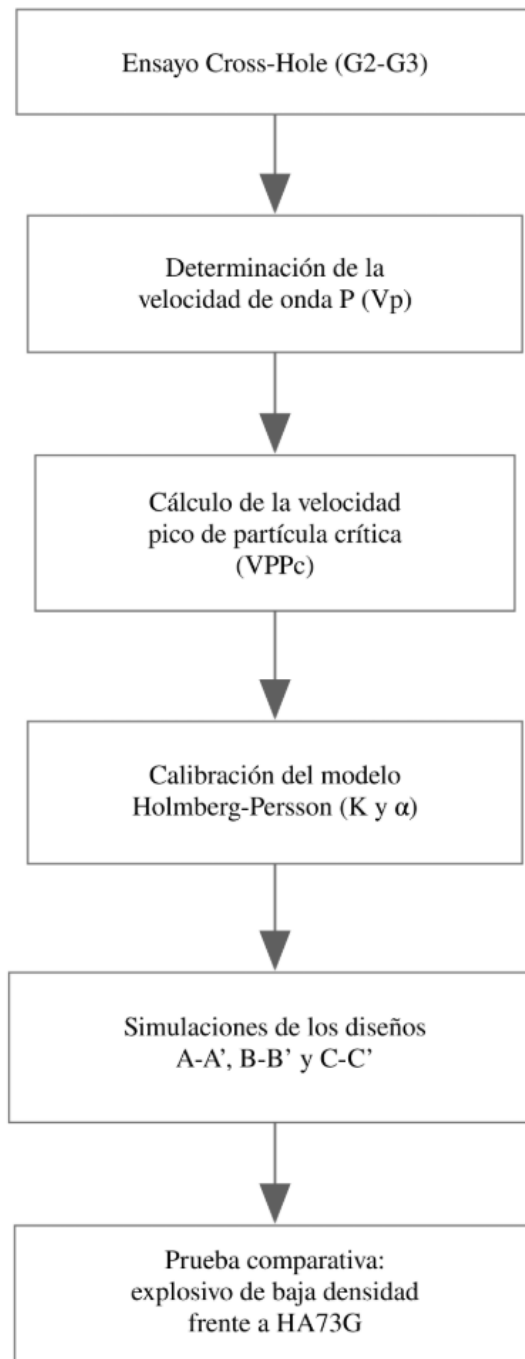
El área experimental comprendió tres espacios funcionales: la zona destinada a la prueba Cross-Hole, el sector cargado con explosivo estándar HA73G y el sector cargado con explosivo de control de baja densidad. Los tres geófonos se ubicaron de manera lineal en relación con los taladros, de modo que G1 y G2 registraran la comparación entre explosivos y G2 y G3 permitieran calcular la velocidad de propagación y construir el modelo de atenuación.

El procesamiento de los registros, los cálculos y las simulaciones se efectuaron con la información obtenida en este mismo sector y con los parámetros proporcionados por las áreas técnicas de la operación. En consecuencia, la F02N 3735 constituye el ámbito espacial y operacional de referencia para la interpretación de todos los resultados de la tesis.

3.6 Diagrama de flujo de procedimientos de zona de prueba

Figura 1

Diagrama de flujo de procedimientos de zona de prueba



Nota. Diagrama de procedimientos en zona de prueba comparativa de explosivos.

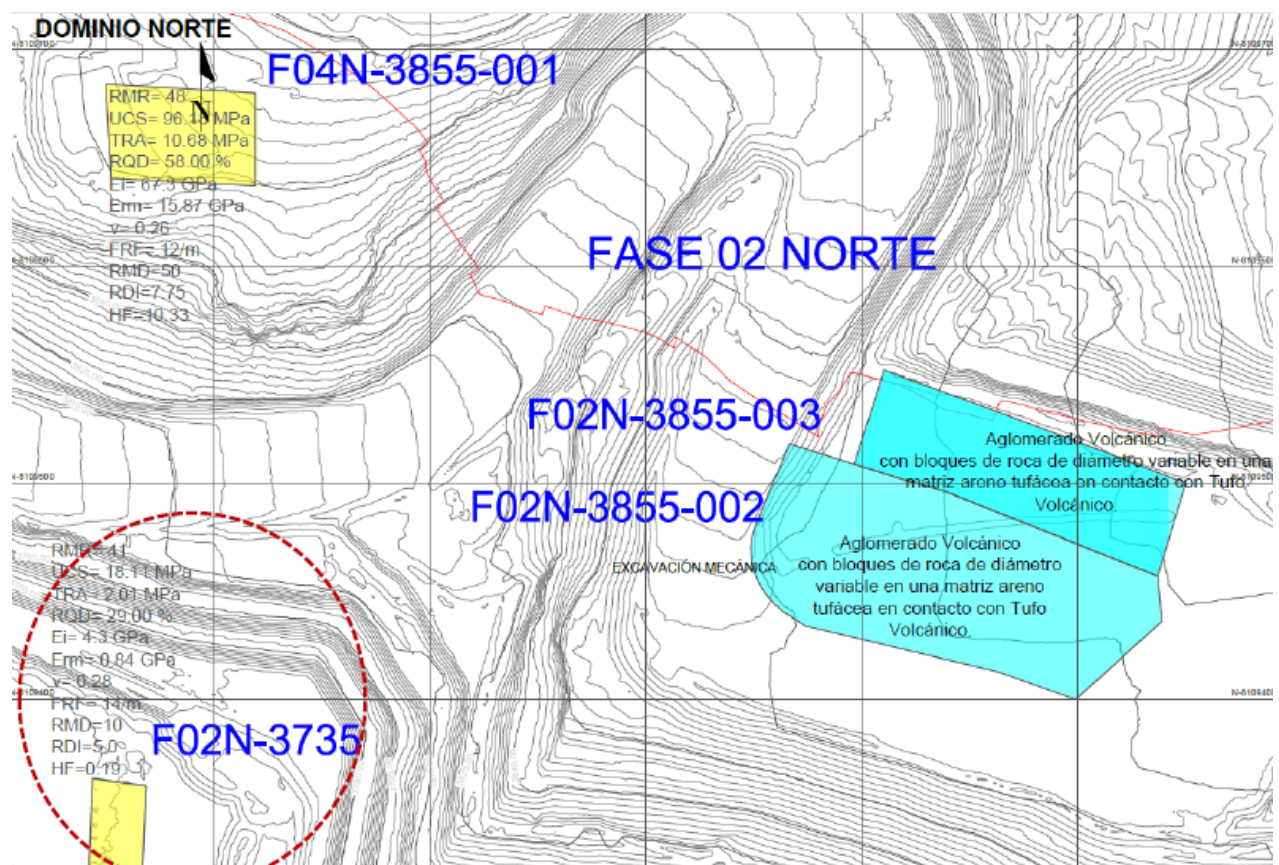
3.7 Modelo de atenuación de vibraciones en campo cercano

El estudio realizado contempló como actividad principal el desarrollo de una prueba de campo cercano para construir un modelo de estimación de velocidad pico partícula (Vpp) según los postulados de (Holmberg & Persson, 1980). El ensayo fue implementado en la zona denominada F02N 3735, específicamente en la unidad litológica Ignimbrita, mediante un arreglo de 03 geófonos triaxiales y la detonación secuenciada de cargas explosivas.

Dicha litología presenta los parámetros geotécnicos mostrados en la **Tabla 2** Parámetros geotécnicos de la ignimbrita valores entregados por el área de geotecnia para la litológica ignimbrita, correspondiente a roca intacta.

Figura 2

Plano parámetros geotécnicos de la zona de prueba



Nota. Plano de zona de prueba F02N 3735 ignimbrita.

Tabla 2*Parámetros geotécnicos de la ignimbrita*

Parámetros geotécnicos	Valor
UCS (Mpa)	18.11
Resistencia a tracción (Mpa)	2.01
Módulo de Young (Gpa)	4.3
Densidad (g/cc)	2.1

Nota. Parámetros geomecánicos de zona de prueba F02N 3735.

3.8 Implementación de pruebas para Cross Hole en F02N 3735 Ignimbrita

El estudio fue desarrollado en la litología Ignimbrita, en la *Figura 3* Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte se aprecia la ubicación de ambas pruebas dentro de fase 2 norte; en la siguiente figura 04 se aprecia el esquema de perforación de las pruebas. El ensayo consideró dos arreglos de perforación que consta la primera parte en 12 taladros perforados de 12 ¼” de Ø, de los cuales se cargaron 6. taladros con explosivo de control de baja densidad de 0.8 g/cc y 6. taladros cargados con explosivo estándar HA73G con densidad final de 1.15 g/cc, esta primera parte es para obtener la diferencia de niveles de vibraciones entre ambos explosivos, esto se logró con los geófonos G1 y G2. La segunda parte consiste el realizar la prueba de cross hole para determinar la velocidad de propagación esto se logró con soporte de los geófonos G2 y G3, la cual se perforó 6 taladros de 6.5” de Ø. Estas cargas fueron detonadas secuencialmente mediante el sistema de iniciación electrónico. La señal de cada onda sísmica generada por cada carga fue registrada por los tres geófonos triaxiales ubicados linealmente al centro de ambas pruebas.

Figura 3

Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte



Nota. Ubicación de prueba de Cross Hole, zona cargada con explosivo estándar y zona cargada con explosivo de control.

3.8.1 Marco teórico, amplitud de vibración y determinación de onda propagación

Para confeccionar el modelo de atenuación de vibraciones inducidas al macizo, ha sido utilizado el postulado de Holmberg & Persson (H&P). La Ecuación 01. Modelo de vibraciones H&P en campo cercano, indica la relación de la amplitud de vibraciones para campo cercano considerando el factor de H&P en función de la distancia y ubicación del punto estimado respecto de la fuente explosiva. Ecuación de modelo de vibraciones de campo cercano. (Holmberg & Persson, 1980)

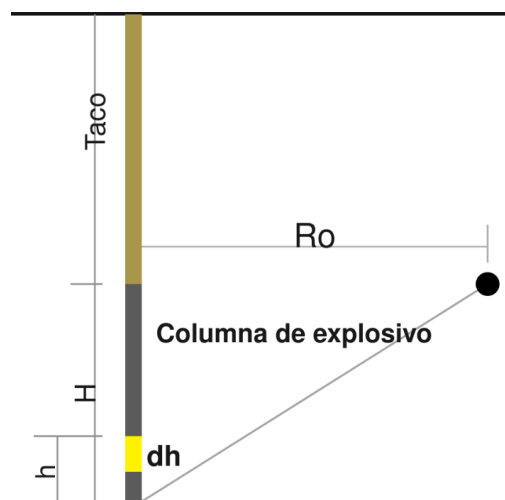
$$v = K(HP)^\alpha$$
$$v = K\left(\frac{q}{R_0}\right)^\alpha * \left[\tan^{-1} * \frac{Z}{R_0} - \tan^{-1} * \frac{z-h}{R_0} \right]^\alpha$$

Donde:

- v = Velocidad pico de partícula (m/s).
- q = Carga lineal (kg/m).
- h = Carga total en el taladro (m).
- x = Posición de la carga elemental desde el piso del taladro (m).
- R_o = Distancia horizontal desde la carga explosiva hasta el punto de monitoreo (m).
- Z = Distancia vertical desde el punto de monitoreo hasta el nivel de piso del taladro (m).
- K = Constante de eficiencia de transmisión del explosivo en el macizo rocoso.
- α = Factor de atenuación del macizo rocoso.

Figura 4

Distribución geométrica para estimación de vibración por H&P



Nota. Distribución geométrica de vibración.

Mediante la lectura de las señales de vibración generadas por cargas las explosivas es posible determinar la velocidad de la onda P del macizo rocoso según indica la Ecuación 02.

Cálculo de velocidad de propagación.

$$V_p = \left(\frac{T_{G2} - T_{G1}}{d} \right)$$

Donde:

- V_p = Velocidad de propagación (m/s).
- T_{G2} = Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en Geófono 2 (s).
- T_{G1} = Tiempo de arribo de señal de onda sísmica en Geófono 1 (s).
- d = Distancia entre sismógrafos (m).

Para poder estimar un rango de Velocidad de Pico Partícula Crítico (VPP crítico) fueron usados los parámetros geotécnicos de roca intacta. Cabe señalar que, el VPP crítico asume rotura antes que ocurra el fallamiento por tensión.

Como puede observarse en la Ecuación 03, la velocidad límite es una función directamente proporcional a la resistencia a la tracción de la roca e inversamente proporcional al módulo de Young; y, debido a que el macizo rocoso se presenta como un medio anisotrópico, las propiedades geotécnicas de la roca varían generando un rango de valores a trabajar. Por lo que, para trabajar en el rango antes mencionado, el escenario más desfavorable corresponderá a un menor valor de resistencia a la tracción y un mayor valor del módulo de Young. Análogamente, el caso más favorable, corresponde al mayor valor de resistencia a la tracción y menor valor del módulo de Young. (Holmberg & Persson, 1980)

$$VPP_{critico} = \frac{\sigma_T * V_p}{E}$$

Donde:

- σ_T = Resistencia a la tracción (Mpa).
- E = Modulo de Young (Gpa).

- V_p = Velocidad de la onda P (m/s)

Los niveles de daño están asociados al VPP crítico, por lo que, determinar su rango de acción es definido haciendo uso del mejor y peor escenario del VPP crítico.

Los criterios de daño se ven en la Tabla 3. Criterios de daño por niveles de perturbaciones de vibraciones son utilizados teóricamente, en base a ensayos de laboratorio, para relacionar el umbral de VPP con el impacto generado en la roca. La relación considera cuatro niveles; desde el grado de pulverización del macizo a la dilatación de las fracturas preexistentes y generadas por causa de la energía liberada por la detonación.

Tabla 3

Criterios de daño por niveles de perturbaciones de vibraciones

Nivel de perturbación	Relación VPP
Pulverización	$8 * VPP_c$
Fracturamiento intenso	$4 * VPP_c$
Aparición de nuevas grietas	VPP_c
Dilatación de fractura existente	$\frac{1}{4} * VPP_c$

Nota. Criterios de nivel de perturbación.

3.8.2 Implementación de pruebas para cross hole en F02N 3735 ignimbrita

El estudio fue desarrollado en la litología Ignimbrita, en la **Figura 4** Distribución geométrica para estimación de vibración por H&P se aprecia la ubicación de ambas pruebas dentro de fase 2 norte; en la siguiente **Figura 5** Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte se aprecia el esquema de perforación de las pruebas. El ensayo consideró dos arreglos de perforación que consta la primera parte en 12 taladros perforados de 12 ¼" de Ø, de los cuales se cargaron 6. taladros con explosivo de control de baja densidad de 0.8 g/cc y 6. taladros cargados con explosivo estándar HA73G con densidad final de 1.15 g/cc, esta primera parte es para obtener la diferencia de niveles de vibraciones entre ambos explosivos, esto se logró con los geófonos G1

y G2. La segunda parte consiste en realizar la prueba de cross hole para determinar la velocidad de propagación; esto se logró con soporte de los geófonos G2 y G3, la cual se perforó 6 taladros de 6.5" de Ø. Estas cargas fueron detonadas secuencialmente mediante el sistema de iniciación electrónico. La señal de cada onda sísmica generada por cada carga fue registrada por los tres geófonos triaxiales ubicados linealmente al centro de ambas pruebas.

Figura 5

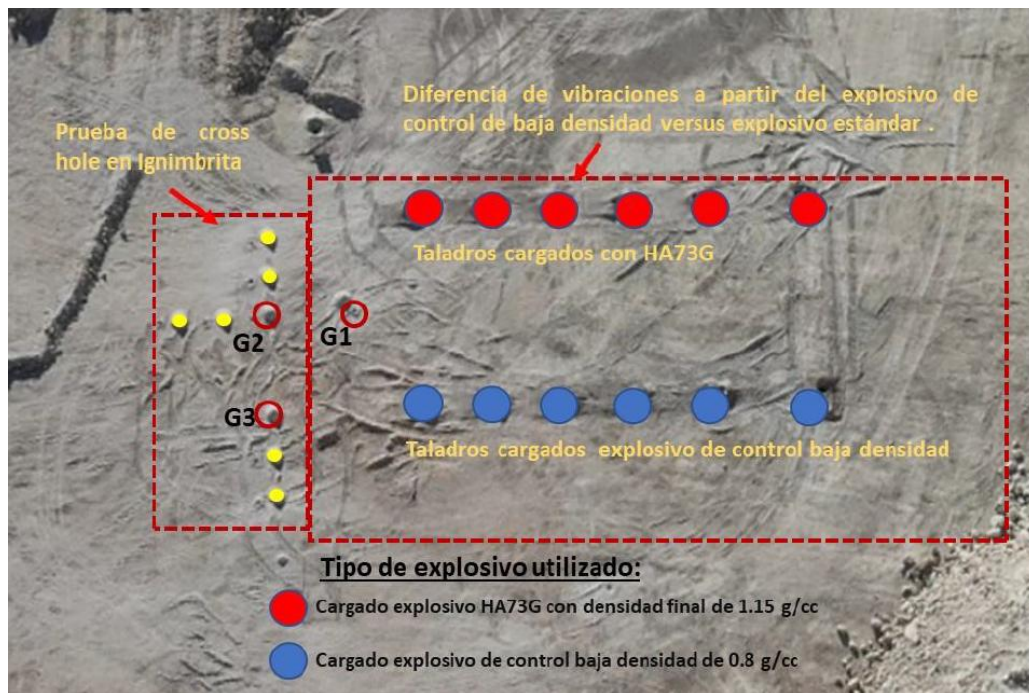
Ubicación del estudio de atenuación de vibraciones en fase 02 norte



Nota. Ubicación de zona de prueba de cross hole, pre-voladura, post voladura.

Figura 6

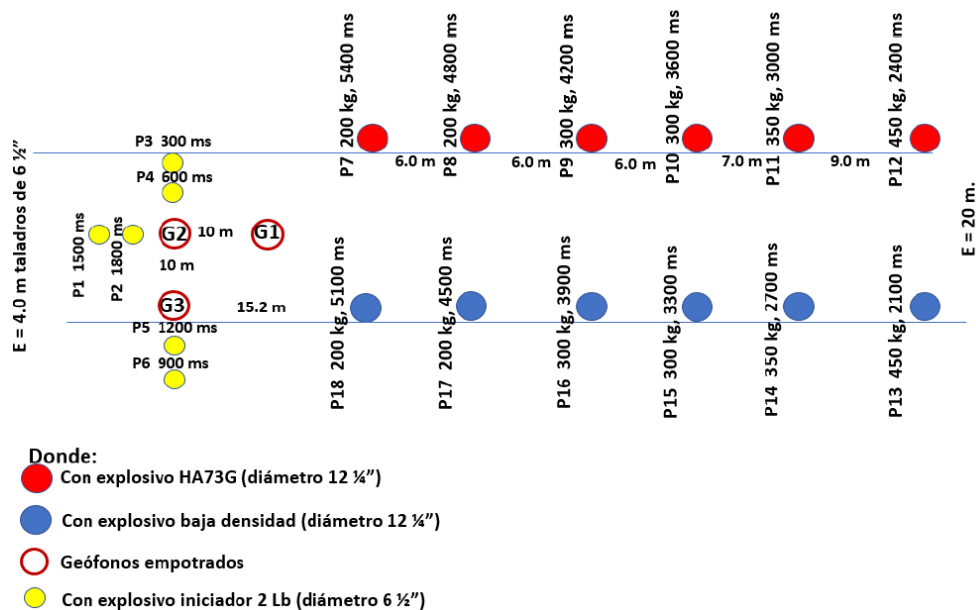
Esquema de perforación para pruebas



Nota. Explosivos utilizados HA73G, explosivo de control.

Figura 7

Esquema tiempos detonación y kilogramos de explosivo para ambas pruebas



Nota. Tiempos de detonación y cantidad de explosivos en kilogramos.

Esquema tiempos detonación y kilogramos de explosivo para ambas pruebas se muestra la posición espacial de las pruebas realizadas como la diferencia de vibraciones por tipo de explosivo y cross hole, también la instalación de los tres geófonos empotrados de campo cercano, a la vez resume la configuración de tiempo detonación de cada carga de explosivo para los registros de cada pulso de vibracional registrados en dos sismógrafos Pro6.

Figura 8*Instalación de geófonos*

Nota. Instalación de geófonos en área cercana de las pruebas.

Figura 9

Instalación de las cajas de conexión y sismógrafos Pro6



Nota. Instalación de cajas de conexión con los sismógrafos en área cercana a las pruebas.

3.8.3 Registro de vibración para la velocidad de propagación entre G2 –G3

La prueba realizada de cross hole genero las señales de vibración, estas ondas están dentro del umbral esperado e indican que la implementación para la prueba está dentro de los parámetros adecuados para su análisis de la onda P, junto con la instalación de equipos de medición, es apropiada para desarrollar un modelo representativo del macizo rocoso. La

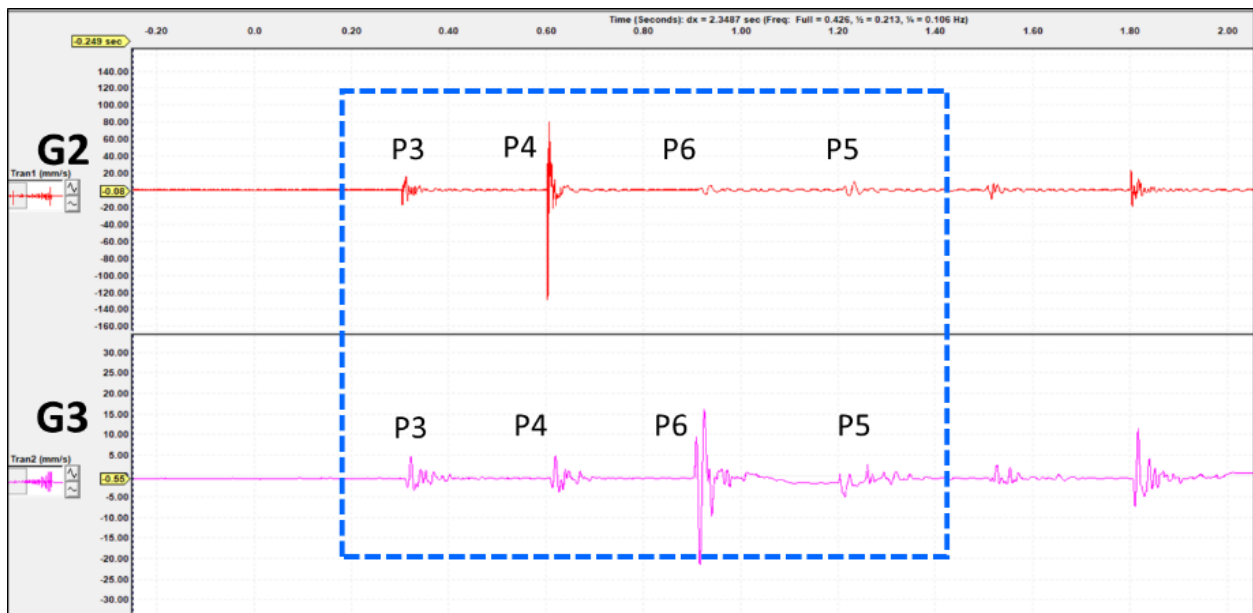
Figura

10

Registro de vibraciones entre G2 y G3 presenta el registro obtenido en ambos geófonos en su componente transversal; en éstas, se puede observar los 06 pulsos de cada geófono que fueron generados por las cargas explosivas, no se consideró el vector longitudinal del P1 y P2 por presentar ruido al momento del registro.

Figura 10

Registro de vibraciones entre G2 y G3



Nota. Registro de geófonos G2 y G3.

3.8.4 Modelo de atenuación de vibraciones en campo cercano G2 y G3

El análisis de las ondas generadas por la detonación de los taladros de prueba, nos permiten generar un modelo matemático predictivo de las velocidades de partícula propias de la litología seleccionada. De la prueba se puede desprender un total de 08 datos para generar una regresión que represente adecuadamente las relaciones consideradas.

En la Tabla 4 Registro de PVS y factor H&P en G2 a G3 se muestran los valores de los taladros que fueron considerados dentro del modelamiento de campo cercano mostrando sus distancias, factor H&P y PVS respectivamente. Tabla 4 Registro de PVS y factor H&P en G2 a G3.

Tabla 4*Registro de PVS y factor H&P en G2 a G3*

Geófono Tal	Id. Profundidad del geófono (m)	Xo: Profundidad del geófono (m)	Xs + H: Profundidad del taladro (m)	H: Longitud de carga (m)	Ro: Distancia horizontal al geófono (m)	W: Carga (kg)	PVS (mm/s)	Xs: Taco (m)	Secuencia (ms)	H&P
G2	P3	10.5	10.5	0.026	8.0	0.907	19.6	10.47	300	0.014
G2	P4	10.5	10.5	0.026	4.0	0.907	*138.7	10.47	600	0.057
G3	P3	10.5	10.5	0.026	18.0	0.907	4.8	10.47	300	0.003
G3	P4	10.5	10.5	0.026	14.0	0.907	5.3	10.47	600	0.005
G3	P6	10.5	10.5	0.026	8.0	0.907	22.7	10.47	900	0.014
G3	P5	10.5	10.5	0.026	4.0	0.907	40.1	10.47	1200	0.057
G2	P6	10.5	10.5	0.026	18.0	0.907	5.9	10.47	900	0.003
G2	P5	10.5	10.5	0.026	14.0	0.907	9.6	10.47	1200	0.005

Nota. El valor PVS 138.7 mm/s, es un valor atípico fuera de rango por la cual no se considera para la regresión.

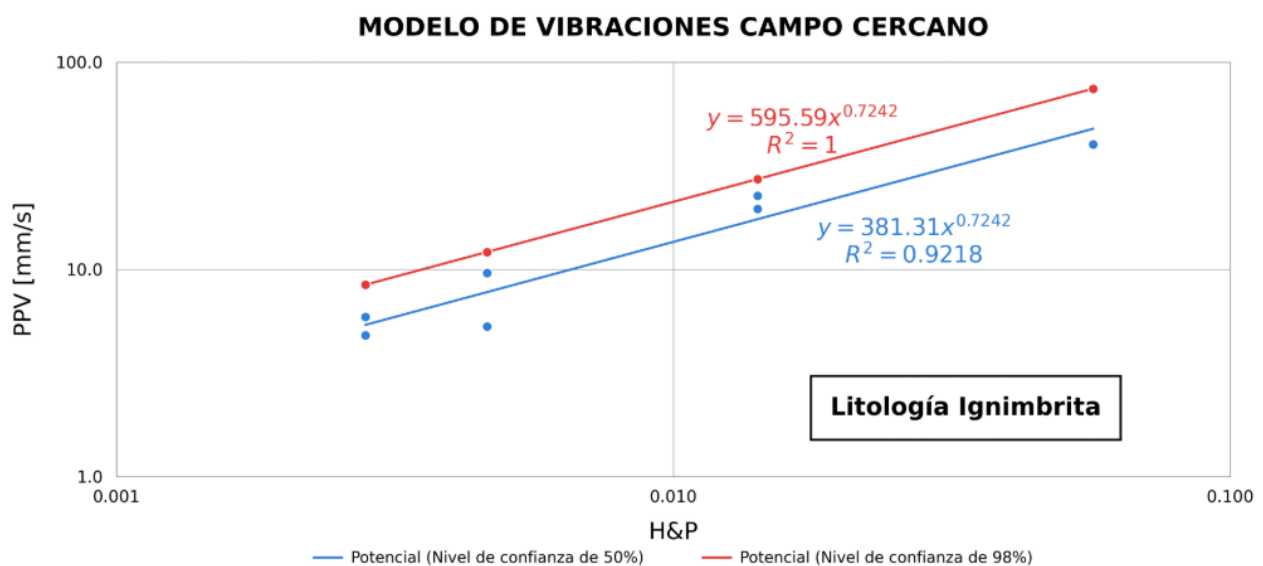
Luego, se confeccionó el modelo de vibraciones para litología correspondiente Ignimbrita con los valores de la tabla 03 por presentar valores de K y alfa más conservadores para el modelo de vibraciones en campo cercano, en la ecuación 04 muestra los valores encontrados para los datos con un nivel de confianza del 50% y la Ecuación 5. Modelo de vibraciones en campo cercano, 98% de confianza. Modelo de atenuación de campo cercano con 50 % de confianza. (Holmberg & Persson, 1980)

$$PVV = 381.31 * (H\&P)^{0.7242}$$

Modelo de atenuación de campo cercano con 98 % de confianza. (Holmberg & Persson, 1980)

$$PVV = 595.59 * (H\&P)^{0.7242}$$

Figura 11
Modelo de atenuación en campo cercano de G2 – G3



Nota. Modelo de vibración en campo cercano en litología ignimbrita.

3.8.5 Velocidad de propagación de la onda en el medio rocoso

El cálculo de la velocidad de propagación de la roca o Vp en el macizo rocoso se da por medio del arribo de la onda a dos transductores separados por una distancia conocida, esta

variación de tiempo corresponde a la velocidad que toma la onda en viajar por un medio con características singulares, por lo que dicho cálculo solo corresponderá a la litología definida para el estudio.

Tabla 5

Valores estadísticos para el cálculo de velocidad de propagación

Tolerancia	Cantidad
N.º de datos (unidad)	4
Valor máximo (m/s)	2083
Valor mínimo (m/s)	1642
Desviación estándar	180.8
Promedio (m/s)	1866

Nota. Velocidad de propagación.

3.9 Análisis de resultados obtenidos

En base a las mediciones y pruebas realizadas en campo fue posible obtener el modelamiento de campo cercano adecuado para la litología correspondiente Ignimbrita.

3.9.1 Cálculo de velocidad pico partícula crítica Ignimbrita

Para el análisis del VPP crítico, han sido utilizados los parámetros geotécnicos de la

Tabla

2

Parámetros geotécnicos de la ignimbrita, correspondiente a litología Ignimbrita. Tal como se mencionó anteriormente, la determinación del VPP crítico se realizará en concordancia de la Ecuación 03.

Tabla 6

Velocidad pico partícula crítica (V_{ppc})

Descripción	Cantidad	Unidad
VPP crítico	872	mm/s

Nota. Cálculo de VPP crítico con la ecuación 3.

3.9.2 Criterios del nivel de perturbación litología ignimbrita

Una vez definido el modelo de vibraciones en campo cercano, determinado la Velocidad de propagación (V_p) de la roca y la magnitud de VPP crítico se procederá a calcular las relaciones existentes entre el nivel de vibración o amplitud que se genera entre la interacción de las cargas de los taladros y el grado de perturbación que sufre el macizo rocoso.

Cabe señalar que estas relaciones han sido definidas en función de las propiedades de roca intacta entregadas por el área de geotecnia de Quellaveco. se pueden observar los niveles de daño asociados al VPP crítico.

Figura 12

Criterio de daño para macizo rocoso

CRITERIO DE DAÑO PPV cmr (mm/s)		
Criterio de daño (mm/s)	Roca de baja competencia (mm/s)	Descripcion de daño inducido
zona 1 > PPVc	872 >	Se supera la resistencia a la tracción de la roca intacta, por lo que se produce ruptura de la matriz de la roca y se generan nuevas fracturas
PPVc > zona 2 > PPV cmr	872 - 436	Se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso, por lo que se produce ruptura en el macizo rocoso, además de la apertura de estructuras pre-existentes.
zona 3 < PPV cmr	< 436	No se produce daño inducido en el macizo rocoso producto de la voladura.

Nota. Criterio de daño PPV – Descripción de daño inducido.

Tabla 7

Criterio de daño en roca intacta

Nivel de perturbación	Relación Vpp	Vibración (mm/s)
Pulverización	$8 \times V_{ppc}$	6978
Fracturamiento intenso	$4 \times V_{ppc}$	3489
Aparición de nuevas grietas	V_{ppc}	872
Dilatación de fracturas existentes	$1/4 \times V_{ppc}$	218

Nota. Nivel de perturbación roca intacta.

Figura 13

Rangos admisibles de vibraciones en roca intacta

Objetivo de vibración admisible		
Pulverización	> 6978	
Fracturamiento intenso	6978 - 3489	
Aparación de nuevas grietas	3489 - 872	
Dilatación de fracturas existentes	872 - 218	
Ningun daño	< 218	

Nota. Objetivo de vibración admisible.

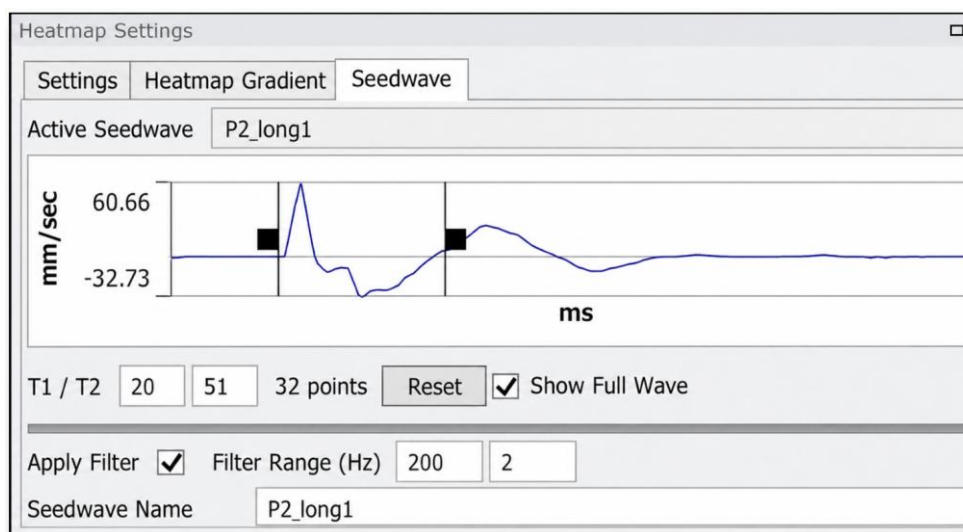
Con todos estos parámetros evaluados y mediante el apoyo del software especializado (Paradigm Advanced); se puede simular la condición de vibración generada por la configuración de perforación y voladura aplicada en Ignimbrita, enfocándose en los niveles de vibración que llegan al talud de diseño y al banco. Cabe mencionar que dicha simulación es una aproximación estática de lo que ocurre realmente, ya que deja de considerar fallas principales, estratificaciones del macizo rocoso y otras consideraciones geológicas estructurales; así mismo, es calculada con parámetros de roca intacta y considera el secuenciamiento detonación de los taladros. A pesar de lo mencionado, es una muy buena aproximación que permite definir un valor o nivel de aceptabilidad de vibración para poder empezar a tomar decisiones que permitan mitigar dicha energía entregada por el explosivo en la detonación. Los factores a los cuales se somete el VPP crítico puede variar a partir de este primer cálculo que se realiza y que debe ser confirmada con datos de campo o el ajuste necesario que requiera.

3.9.3 Simulaciones de perturbación en límites de taludes y nivel de banco

Una vez definido el modelo representativo de campo cercano, es decir, definiendo el valor de “k”, factor de eficiencia del explosivo en la roca y explosivo, y “alpha”, factor de atenuación definimos los VPP crítico que permiten establecer umbrales de perturbación referenciales, es posible realizar las simulaciones del efecto de las voladuras hacia los taludes y pisos que se generarán.

Para la evaluación de los niveles de vibración se hizo uso del software especializado “Paradigm Advanced”, en los que fue cargado el modelamiento de campo cercano, parámetros geotécnicos, Vp y Vpp crítico de la roca y onda semilla que generan los pulsos en la medición que es un parámetro primordial dentro de la simulación.

Figura 14
Onda semilla del registro

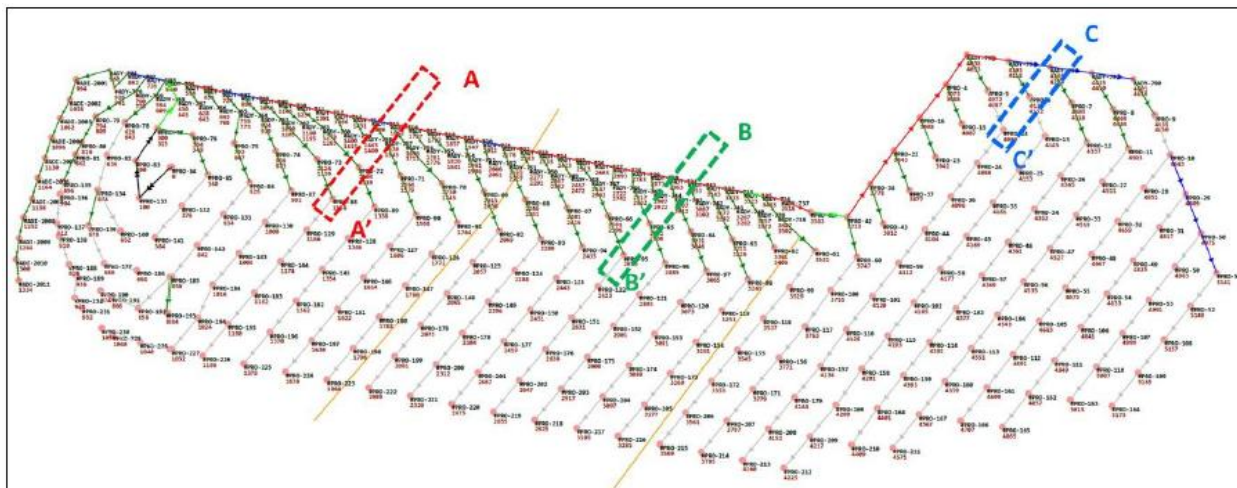


Nota. Medición de onda.

En este sentido, el primer paso es entender la configuración de carga actual en la fase 02 norte, zona de Ignimbrita. En la **Figura 15** Diseño de malla de F02N 3735 con BXS de 8.7x10 m se puede observar la configuración diseño del área de P&V de F02N; en ella se describe las configuraciones de malla pudiéndose diferenciar en zona de taladros de producción y filas de taladros buffer.

Figura 15

Diseño de malla de F02N 3735 con BXS de 8.7x10 m

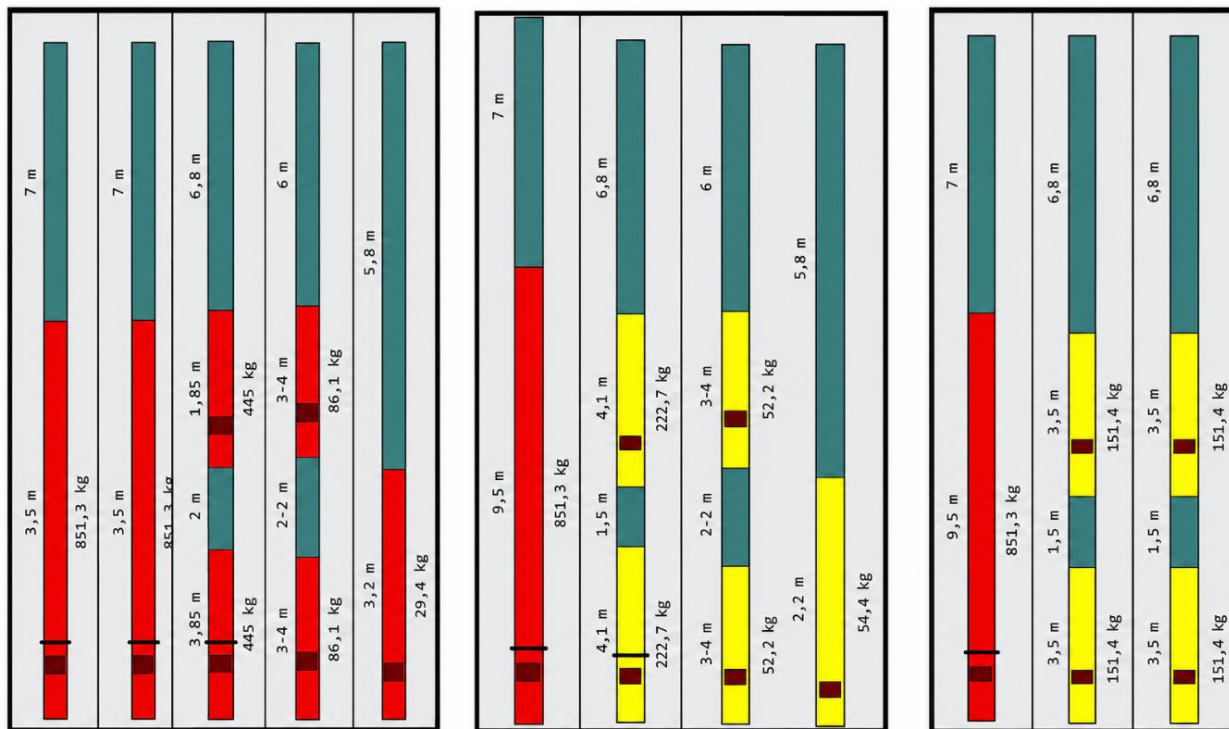


La malla de perforación analizada es la que actualmente se tiene como diseño en la zona de F02N 3735 en la cual se realizó el análisis del alcance del VPP crítico dentro del material Ignimbrita para tres tipos de diseño de carga, como A-A', B-B' y C-C'. de los cual el diseño de A-A' es simulado con el explosivo estándar siendo con el HA73G. Para el diseño B-B' se utilizó el explosivo de control de baja densidad en las dos líneas de buffer y 1ra de producción, y manteniendo el explosivo HA73 G en taladros de producción por último en la simulación C-C', se realizó la simulación con dos filas de buffer con diámetro de 10 5/8" cargados con explosivo de control y la 1ra de producción cargado con explosivo estándar.

Los análisis de vibraciones que se realizó a la voladura estándar y su impacto en el talud de diseño 48° de inclinación y un ancho de banqueta de 4.0 m y la línea de taladros denominados buffer1 se sitúa a 4.2 m del toe del talud con un under-drill de 6.0 m del banco. Para lo cual realizamos diferentes simulaciones de vibraciones generadas por los tres tipos de diseño de carga; A-A', B-B' y C-C' para simular impacto.

Figura 16

Diseño de carga en A-A', B-B' y C-C' para buffer 1, buffer 2 y Prod1



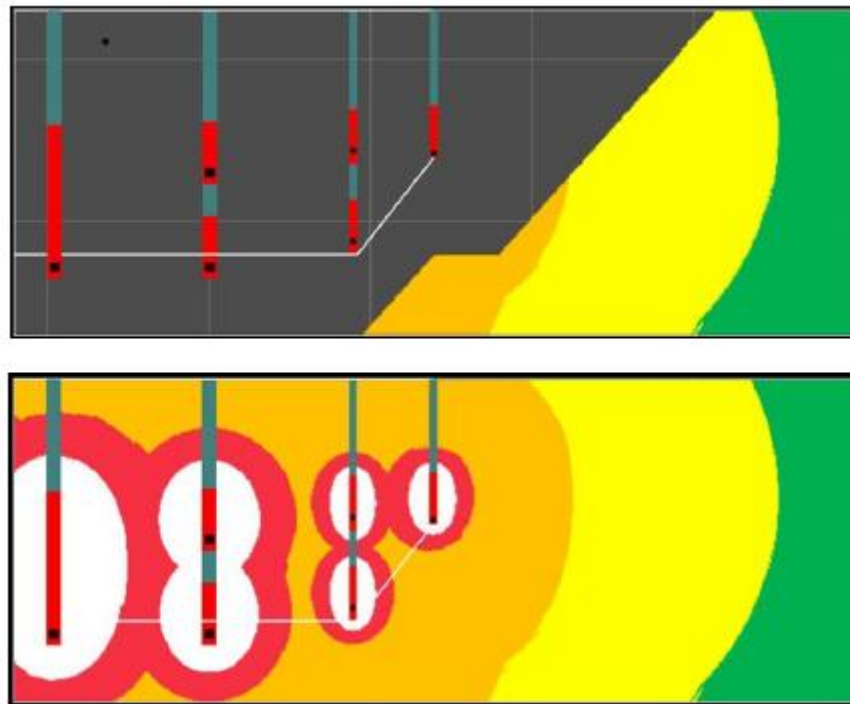
Nota. Diseño de carga para buffer.

Como se mencionó anteriormente primero analizaremos las vibraciones generadas en los límites del talud y los efectos provocados, considerando los niveles de perturbación descritos y los valores de VPP crítico para las características otorgadas por el área de geotecnia. Los valores de intensidad de vibración están en función a la **Figura 13** Rangos admisibles de vibraciones en roca intacta antes mencionada.

Los valores de Vpp critica generados en el talud, como se muestra en la **Figura 16** Diseño de carga en A-A', B-B' y C-C' para buffer 1, buffer 2 y Prod1. Presenta en la zona del toe del talud valores de 872 a 3489 mm/s, la cual se generan nuevas grietas y en la parte de la cresta del nivel inferior, si nos encontramos en un terreno fracturado podría poner en riesgo la estabilidad de los bancos superiores o por presencia de cuñas.

Figura 17

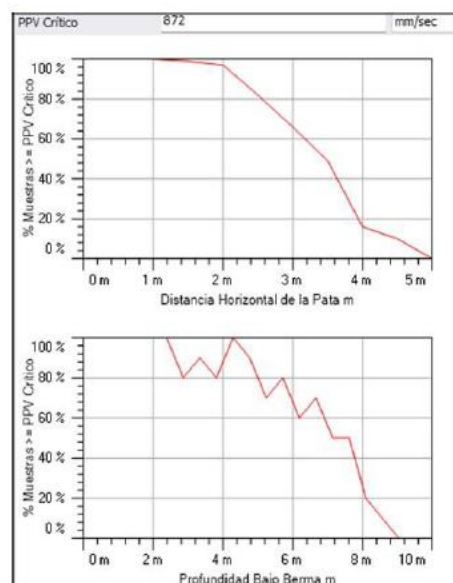
Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga A-A'



Nota. Niveles de vibración en banco inferior de diseño de carga.

Figura 18

Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco



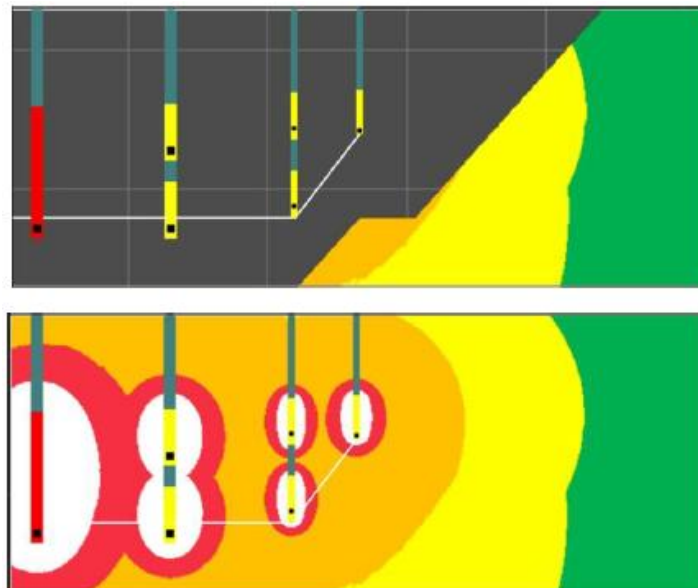
Nota. Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco.

En la **Figura 18** Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco. La parte superior de la figura presenta hasta un alcance de hasta 5.0 m. hacia el talud con una intensidad de vibración > 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 9.0 m. la intensidad de vibración mayor a 872 mm/s; estos alcances de Vpp critico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga A – A’.

Los valores de Vpp critica generados en el talud, como se muestra en la **Figura 17** Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga A-A’. Presenta en la zona del toe del talud valores de 872 a 3489 mm/s, siendo menor la zona en donde se generan nuevas grietas y en la parte banco inferior.

Figura 19

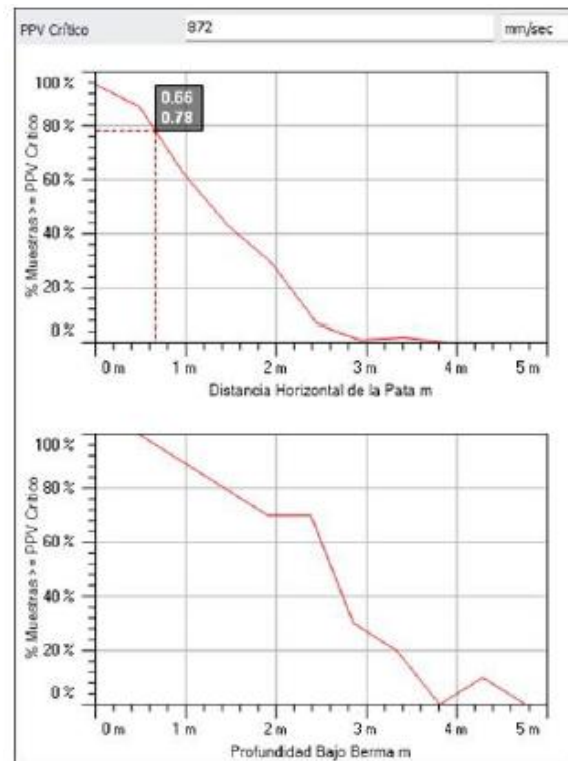
Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga B-B’



Nota. Niveles de vibración en talud y banco inferior con diseño de carga.

Figura 20

Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco



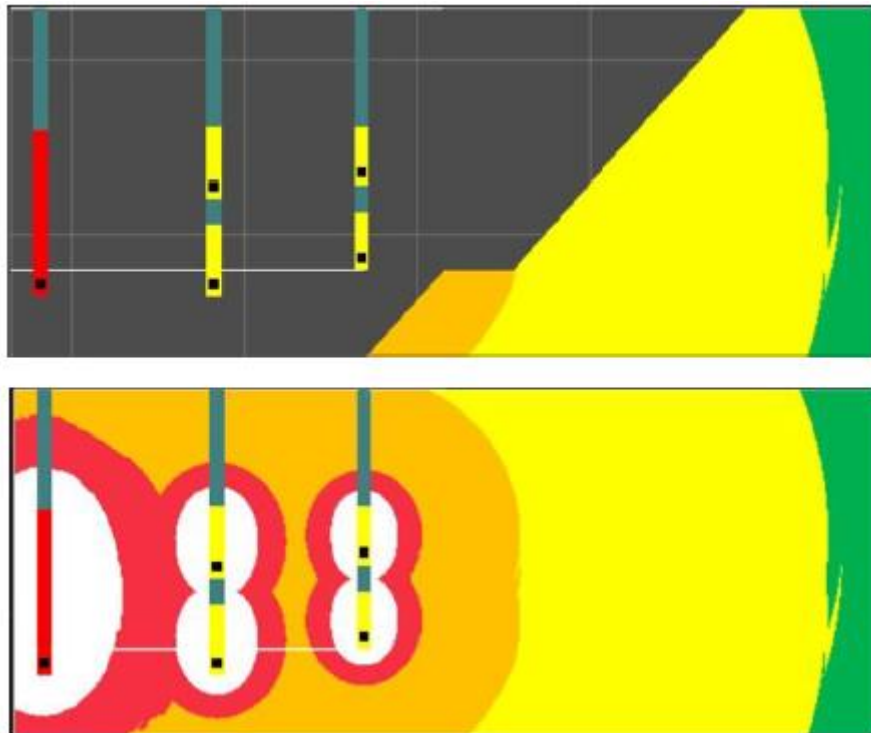
Nota. Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco.

En la **Figura 20** Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco. La parte superior de la figura presenta hasta un alcance de 2.9 m hacia el talud una intensidad de vibración superior a 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 3.8 m. la intensidad de vibración > 872 mm/s.; estos alcances de Vpp critico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga B –B’.

Los valores de Vpp critica generados en el talud, como se muestra en la Figura 17. Presenta en la zona del toe del talud valores de 872 a 3489 mm/s, siendo menor la zona de incidencia para la generación de nuevas grietas y en la parte banco inferior. Cabe indicar que los diámetros de las dos líneas buffer 1 y buffer 2, simulados con la Vpp critica fueron de Ø10 5/8”.

Figura 21

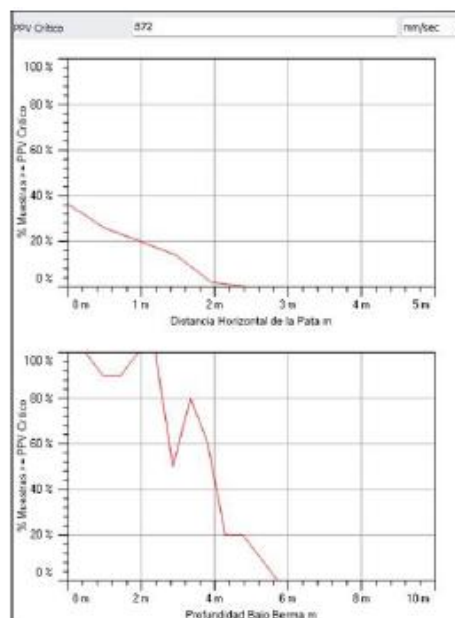
Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga C-C'



Nota. Niveles de vibraciones en talud y banco inferior con diseño de carga C-C.

Figura 22

Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco

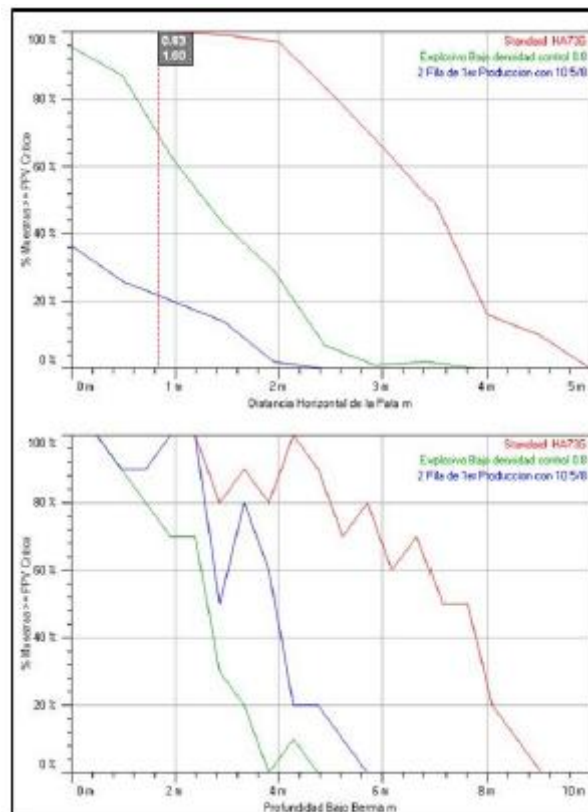


Nota. Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco.

En la **Figura 22** Distancias vs porcentajes de VPP critica hacia el talud y el banco. La parte superior de la figura presenta hasta un alcance de 2.4 m hacia el talud una intensidad de vibración superior a 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 5.6 m. la intensidad de vibración > 872 mm/s.; estos alcances de Vpp critico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga C –C’.

Figura 23

Comparativo entre los tres diseños de carga A-A’, B-B’ y C-C’



Nota. Comparativo entre los tres diseños de carga A-A’, B-B’ y C-C’.

Como se aprecia en la **Figura 23** Comparativo entre los tres diseños de carga A-A’, B-B’ y C-C’, el diseño A-A’ (línea roja); cargado con explosivo HA73G en zona de buffer 1, buffer 2 y 1ra de producción; se puede observar presenta la Vpp critica en un mayor alcance horizontal hacia el talud hasta 5.0 m, dentro del talud, comparado con los diseños B-B’ y C-C’ siendo el último de menor alcance en 2.4 m; el diseño con diámetro de 10 5/8” para las líneas

buffer 1, buffer 2 cargados con el explosivo de control de baja densidad (0.8 g/cc) obteniendo un mejor control de daño con el diseño de carga C-C'.

También en la parte inferior de la **Figura 23** Comparativo entre los tres diseños de carga A-A', B-B' y C-C', el diseño A-A' (línea roja); presenta mayor alcance hacia el banco inferior siendo hasta de 9.0 m le presencia de la Vpp crítica (872 mm/s); comparado con los diseños B-B' y C-C'. Como se aprecia en la figura inferior el diseño que genera menor alcance hacia el banco es con el diseño B-B' solo con 3.8 metros.

El diseño carga actual para taladros de producción en F02N 3735, presenta un sub drill de 1.5 m. se puede apreciar en la figura 20, la intensidad de vibraciones hasta más de 13 795 mm/s en los 16 metros, una generación pulverización e intenso fracturamiento; no solo genera demoras en la formación de los primeros metros de los taladros producción, si no también se genera una condición en el collarín del taladro, generando fragmentos de fácil desprendimiento en la boca de los taladros generando el riesgo de corte de líneas al momento del proceso de primado del banco del nivel inferior. Ver **Figura 25** Registros de vibraciones en función a la profundidad.

Figura 24

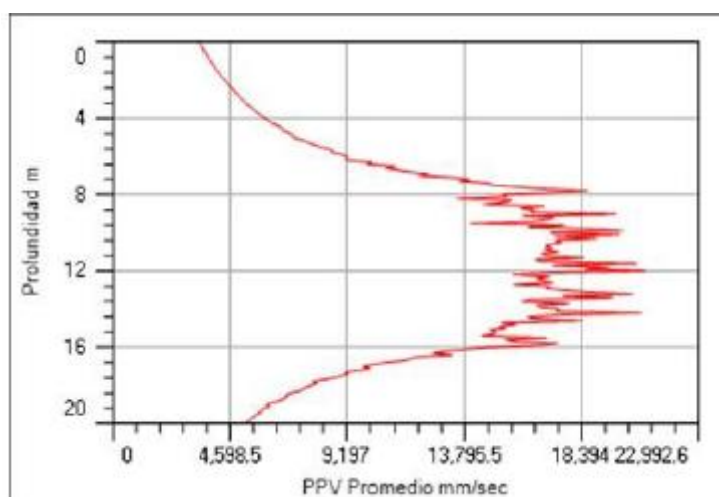
Niveles de vibraciones en taladros de producción en F02N



Nota. Niveles de vibraciones en taladros de producción en F02N a nivel de piso.

Figura 25

Registros de vibraciones en función a la profundidad



Nota. Registros de vibraciones en función a la profundidad.

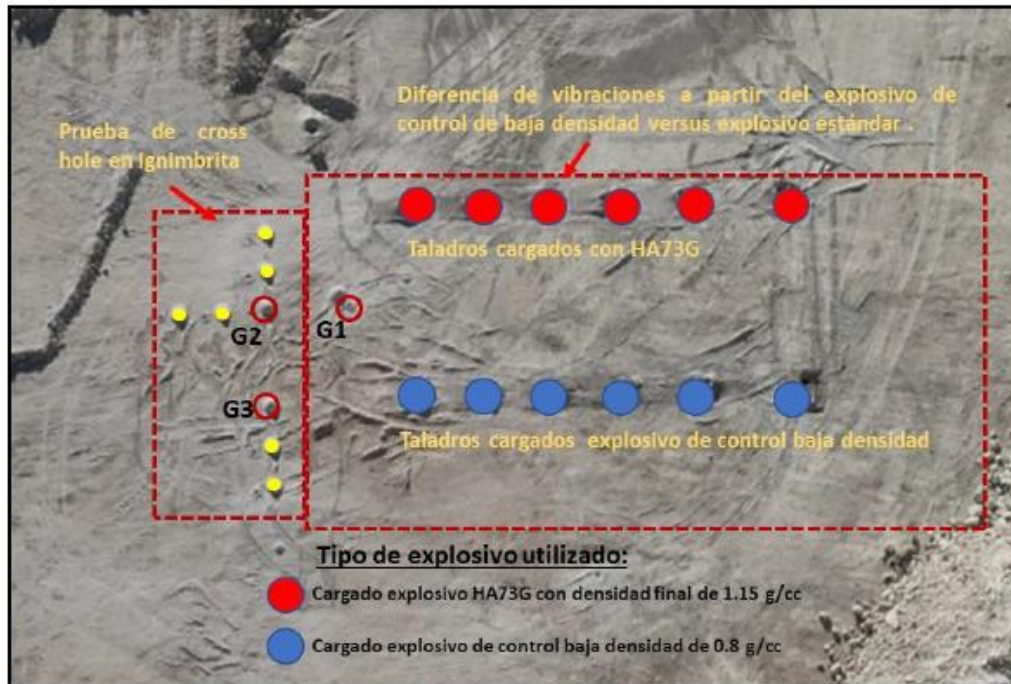
3.9.4 Prueba de vibraciones con explosivo de control de baja densidad

La prueba de vibraciones entre tipos de explosivos se realizó en fase 02 norte en el nivel 3735; el objetivo es, evaluar la diferencia de niveles de vibraciones obtenidos a partir del uso de explosivo de Control baja densidad de 0.8 g/cc versus explosivo estándar como el HA73G el último actualmente usado para el carguío de taladros buffer. La prueba consistió en detonar un total de 12 taladros de los cuales, la mitad de los taladros, 6.0 taladros con explosivo de

control de baja densidad y 6.0 taladros de con explosivo de HA73 gasificado. Configuración de la prueba de vibraciones.

Figura 26

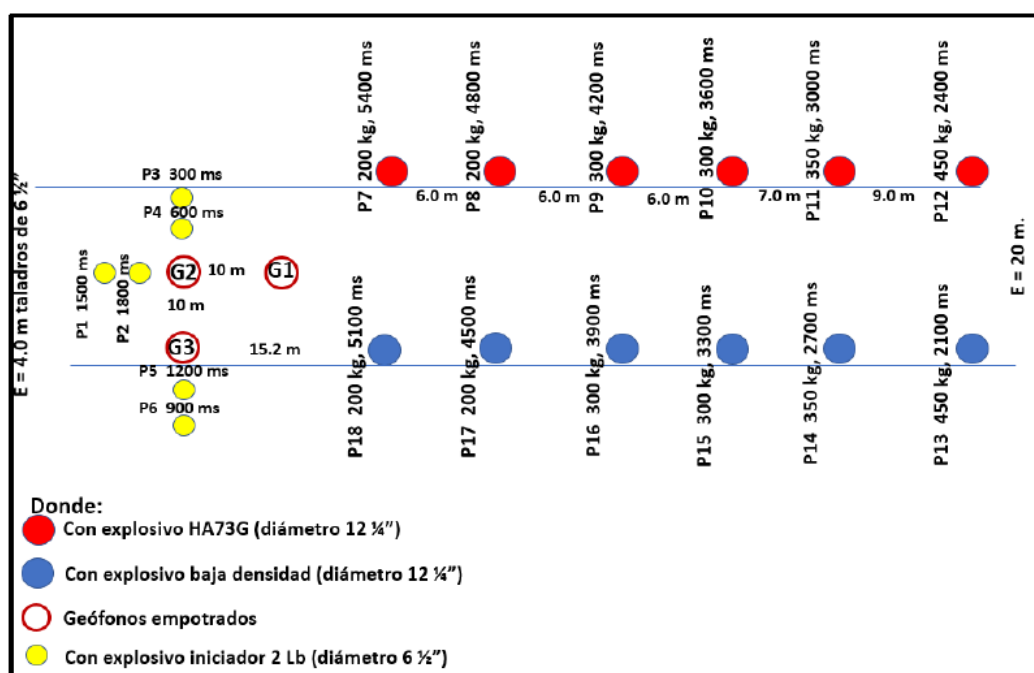
Configuración de la prueba de diferencia de vibraciones



Nota. Configuración de la prueba de diferencia de vibraciones.

Figura 27

Secuencia detonación y kilos por tipo de explosivo

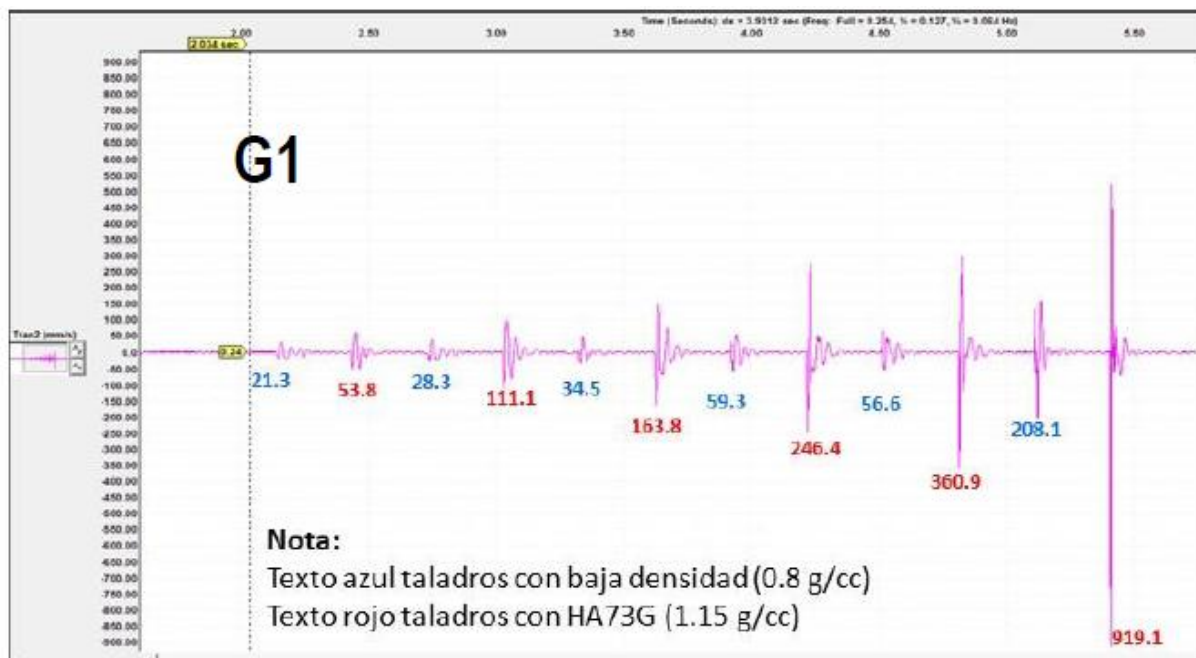


Nota. Secuencia detonación y kilos por tipo de explosivo.

La prueba de diferencia de vibraciones entre explosivo de control de baja densidad de 0.8 g/cc, versus un explosivo estándar de uso cotidiano en la operación como es el HA73 un gasificado con densidad final de 1.15 g/cc, se logró con el uso de geófonos empotrados siendo, denominados el G1 y G2 los cuales registraron los pulsos de vibraciones de cada carga, para los análisis.

Figura 28

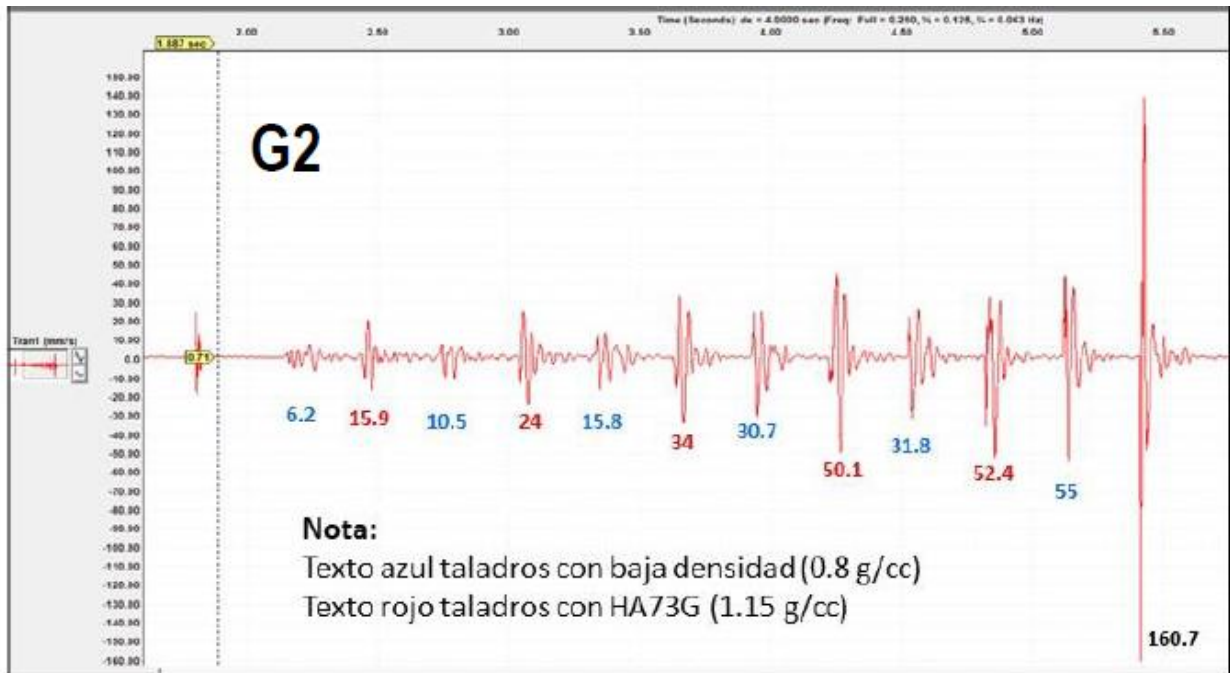
Pulsos de vibración de 12 taladros por G1



Nota. Pulso de vibración de 12 taladros por G1.

Figura 29

Pulsos de vibración de 12 taladros por G2



Nota. Pulsos de vibración de 12 taladros por G2.

3.9.5 Diferencia de vibraciones entre explosivos de baja densidad y HA73G

Se concluye, mediante la voladura de una prueba de vibraciones, se ha logrado evaluar la diferencia de niveles de vibraciones (mm/s) obtenidos a partir del uso de explosivo de Control de baja densidad 0.8 vs HA73G; Los resultados han entregado valores de vibraciones menores para el caso del uso del explosivo de Control baja densidad.

Con una disminución en el -40% como promedio las tres ondas de vibraciones, vertical, longitudinal y transversal. Con el uso de este explosivo de control.

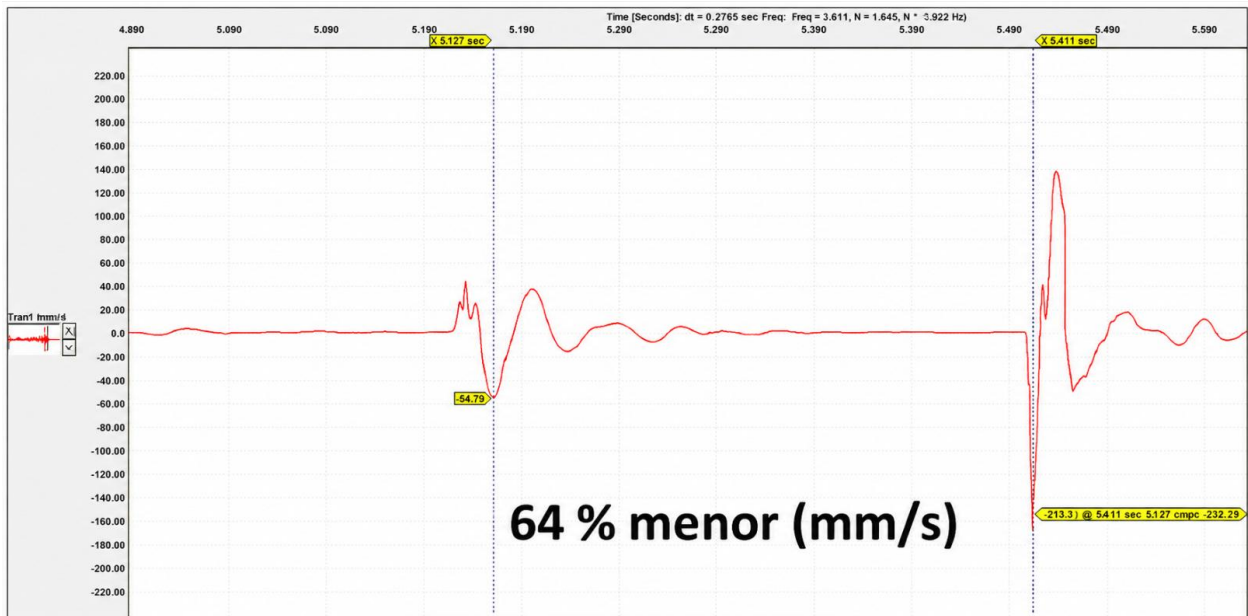
Tabla 8*Diferencia de niveles de vibraciones entre ambos explosivos*

Tipo de explosivo	Carga (kg)	Tiempo (ms)	Id. taladro	PPV G1 (mm/s)	PPV G2 (mm/s)	Diferencia G1	Diferencia G2	Promedio
Baja densidad 0.8	450	2100	P13	50.98	28.77	-24	-43	-34
HA73G	450	2400	P12	66.86	50.78			
Baja densidad 0.8	350	2700	P14	82.74	32.69	-27	-49	-38
HA73G	350	3000	P11	113.66	64.08			
Baja densidad 0.8	300	3300	P15	105.31	44.9	-36	-50	-43
HA73G	300	3600	P10	165.48	90.67			
Baja densidad 0.8	300	3900	P16	177.18	68.22	-37	-32	-34
HA73G	300	4200	P9	279.15	99.6			
Baja densidad 0.8	200	4500	P17	290.85	72.28	-21	-33	-27
HA73G	200	4800	P8	367.74	107.67			
Baja densidad 0.8	200	5100	P18	652.74	120.52	-29	-50	-39
HA73G	200	5400	P7	914.33	239.74			

Nota. Diferencia de niveles de vibraciones entre ambos explosivos.

Figura 30

Diferencia de nivel de vibraciones en dos taladros

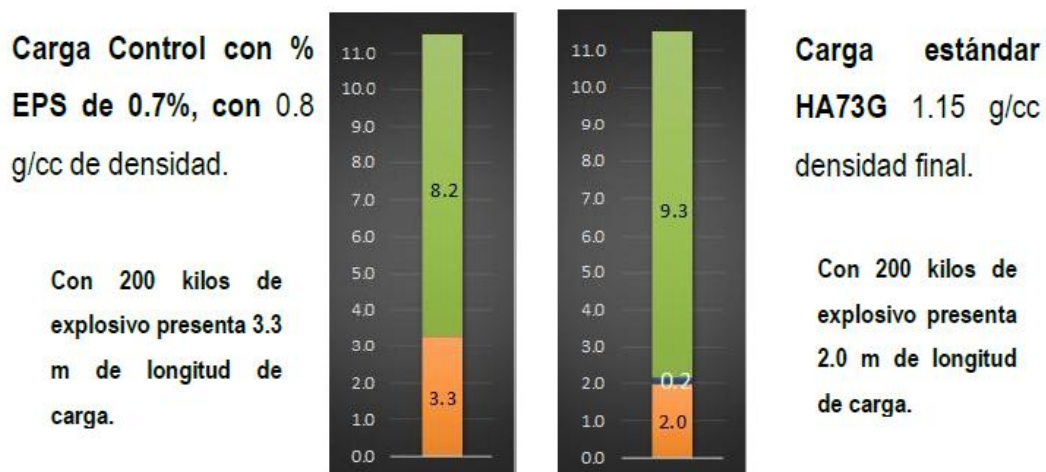


Nota. Diferencia de nivel de vibraciones en dos taladros.

Se presenta en el análisis inclusive comparativo de nivel de vibraciones explosivo de control vs explosivo estándar en vector transversal, se tiene vibraciones menores inclusive hasta un -64% menor en vibraciones.

Figura 31

Diferencia de longitud de carga entre tipo de explosivo



Nota. Carga de control y carga estándar HA73G.

Figura 32

Pico vector suma de los registros de Geófono 01



Nota. Pico vector suma de los registros de Geófono 01.

Figura 33

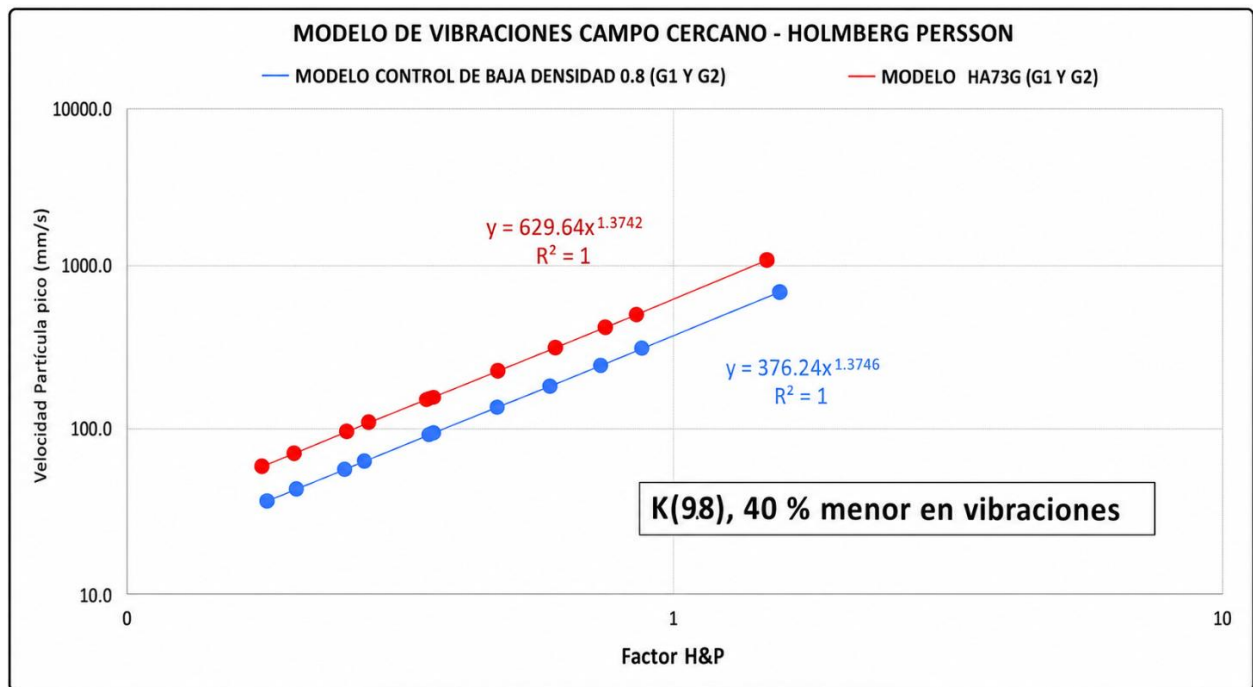
Pico vector suma de los registros de Geófono 02



Nota. Pico vector suma de los registros de Geófono 02.

Figura 34

Diferencia niveles de vibraciones explosivo control vs estándar (mm/s)



Nota. Diferencia niveles de vibraciones explosivo control vs estándar (mm/s).

Figura 35

Post voladura zona con explosivo estándar



Nota. Área de post voladura explosivo estándar.

Figura 36

Post voladura zona con explosivo de control



Nota. Área de post voladura zona con explosivo de control.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES

- Se considera que los resultados de la prueba voladura teórica obedecen al grado de caracterización del macizo rocoso a volar y de la calidad de implementación del proceso de perforación y voladura (P&V). Entendiendo que, en la optimización de cualquier proceso primero deben identificarse las principales desviaciones y/o fuentes de error para luego generar una operación o sistema controlado, de mejor calidad y reducida variabilidad que permita aplicar fidedignamente diseños de P&V según factores propios y característicos del medio evaluado. El área técnica de la empresa recomienda la evaluación de calidad de implementación del proceso de P&V y poder categorizar el nivel de aceptabilidad del proceso; puesto que, según la experiencia y resultados evaluados en diferentes proyectos, una causa común y gravitante en resultados inferiores a los esperados, como fragmentación, calidad de taludes y/o tasa de excavación está asociado a una implementación inadecuada o insuficiente como reflejo de un proceso de alta variabilidad.
- Para la determinación de velocidad de propagación, el cálculo promedio mostró la velocidad de la onda propagación de 1866 m/s en correspondencia a los parámetros geotécnicos entregados; mostrados en la Tabla 1. Con este cálculo y con lo que se definió en la Ecuación 3. Velocidad pico partícula crítico de la roca de 872 mm/s.
- El estudio de Cross Hole permitió obtener el modelamiento de vibraciones mostrado en la ecuación 01. Algoritmo para modelo de vibraciones H&P; obteniendo como valores de $K = 381.31$ y $\text{Alpha} = 0.7242$ a un nivel de confianza del 50%, y con un valor de $K = 595.59$ a un nivel de confianza del

98%; el cual es requerido por el software especializado, para poder obtener las simulaciones.

- En la figura 15 muestra la parte superior de la figura presenta hasta un alcance de hasta 5.0 m. hacia el talud con una intensidad de vibración > 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 9.0 m. la intensidad de vibración mayor a 872 mm/s; estos alcances de Vpp crítico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga A – A’.
- En la figura 17 muestra la parte superior de la figura presenta hasta un alcance de 2.9 m hacia el talud una intensidad de vibración superior a 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 3.8 m. la intensidad de vibración > 872 mm/s.; estos alcances de Vpp crítico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga B – B’.
- Las simulaciones de vibraciones con diseño de explosivo de control de baja densidad (densidad del explosivo de 0.8 g/cc), y diámetro de 10 5/8” para taladros buffer 1 y buffer 2, La parte superior de la figura 19, presenta hasta un alcance de 2.4 m hacia el talud una intensidad de vibración superior a 872 mm/s. También en la parte inferior de la figura muestra un alcance bajo la banqueta de hasta 5.6 m. la intensidad de vibración > 872 mm/s.; estos alcances de Vpp crítico simulados hacia el talud y banco se obtiene con el diseño de carga C – C’. Esta propuesta de utilizar dos filas de taladros de buffer 10 5/8” Ø con doble deck; muestra también buen control de daño sin embargo se tiene que evaluar

su efectividad en tema de fragmentación en zona de taladros de control hacia el talud.

- Se analizó la malla de taladros producción de B x S (8.7 x 10 m) con diseño de carga estándar (HA73G), presenta un sub drill de 1.5 m. la intensidad de vibraciones hasta más de 13 795 mm/s en los 16 metros de profundidad, una generación pulverización e intenso fracturamiento; esto no solo generar demoras en la formación de los primeros metros de los taladros producción, si no también se genera una condición en el collarín del taladro, generando fragmentos de fácil desprendimiento en la boca de los taladros generando el riesgo de corte de líneas al momento del proceso de primado del banco del nivel inferior.
- El explosivo de Control de baja densidad (0.8 g/cc), genera hasta un - 40% menos niveles de vibraciones a diferencia del explosivo gasificable siendo este un explosivo idóneo para ser utilizado en los taladros buffer hacia el talud.
- Los resultados mostrados hacen referencia en varios campos como: factor de energía (2490 Kj/kg), factor de potencia y VOD; rangos menores, primordial para utilizarlo como el explosivo de control para minimizar el daño hacia los taludes y banco de niveles inferiores.
- Presenta una mejor distribución de energía a lo largo de la columna del taladro.
- Operativamente recomendado para taladros con agua en su interior ya es posible utilizar densidades variables como 1.0 g/cc, según el porcentaje de EPS en la mezcla explosiva.

LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los resultados de la investigación deben interpretarse considerando que la campaña experimental se realizó en la litología ignimbrita de la Fase 02 Norte, nivel 3735, bajo condiciones geotécnicas, geométricas y operacionales específicas. La muestra fue seleccionada de manera intencional y estuvo limitada por la disponibilidad operativa del área. Asimismo, el modelo de vibraciones de campo cercano se ajustó con siete observaciones válidas, mientras que la velocidad de propagación de la onda P se determinó a partir de cuatro registros. Por esta razón, las constantes y la velocidad pico de partícula crítica y los niveles de perturbación obtenidos no deben extrapolarse directamente a otras fases, niveles o litologías sin una calibración previa con información local.

Otra limitación se relaciona con las simulaciones realizadas en Paradigm Advanced, las cuales representan una aproximación estática del comportamiento del macizo rocoso y utilizan principalmente parámetros de roca intacta. Por ello, no incorporan completamente la influencia de fallas, discontinuidades, estratificaciones, variaciones de alteración, presencia de agua y anisotropía. Del mismo modo, la comparación experimental se concentró en la reducción de las vibraciones, sin desarrollar una evaluación integral de la fragmentación, la productividad y los costos asociados a cada configuración de carga.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar la base de datos mediante nuevas campañas que incluyan un mayor número de taladros y repeticiones bajo diferentes condiciones operacionales. También será necesario validar y recalibrar el modelo de Holmberg–Persson en otros niveles, sectores y litologías, comparando las vibraciones estimadas con mediciones posteriores a la voladura. Asimismo, se propone realizar pruebas operacionales del diseño C–C', evaluar la influencia del agua, el grado de meteorización, los tiempos de retardo y las

discontinuidades del macizo rocoso, además de estudiar el efecto de los precortes como barreras para la propagación de las ondas.

Finalmente, las investigaciones posteriores deberán evaluar conjuntamente el control del daño y la fragmentación obtenida, considerando la distribución granulométrica, la generación de finos y sobredimensionados, la facilidad de excavación y los costos operativos. Esto permitirá determinar una configuración de carga que no solo reduzca las vibraciones transmitidas hacia el talud y el banco inferior, sino que también mantenga una fragmentación adecuada para la continuidad de la operación minera.

REFERENCIAS

- Alvis Cjuro, J. (2019). Modelamiento de vibraciones para la zona taller de camiones: Recomendaciones para el cuidado de taludes. Proyecto Quellaveco-SMI [Informe técnico]. Enaex Mining Technical Solutions.
- ASTM International. (2025). Standard test methods for crosshole seismic testing of soil and rock (ASTM D4428/D4428M-25).
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley.
- Condori Burgos, C. C. (2018). Diseño de perforación voladura de precorte mediante las características de macizo rocoso para evitar desprendimiento de bolones de la pared en banco de producción en U.M. Tacaza-CIEMSA [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12245>
- Díaz Leiva, M. A. (2021). Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180035>
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. En R. Hammah, W. Bawden, J. Curran, & M. Telesnicki (Eds.), *Proceedings of NARMS-TAC 2002* (Vol. 1, pp. 267-273). University of Toronto.
- Holmberg, R., & Persson, P.-A. (1980). Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*,

- Iverson, S., Kerkering, C., & Hustrulid, W. A. (2008). Application of the NIOSH-modified Holmberg-Persson approach to perimeter blast design. En Proceedings of the 34th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique (Vol. 2, pp. 1-33). International Society of Explosives Engineers.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. A. A. Balkema.
- Luque Muñoz, J. E. (2021). Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/11316>
- Onederra, I., & Esen, S. (2004). An alternative approach to determine the Holmberg-Persson constants for modelling near field peak particle velocity attenuation. Fragblast
- Persson, P.-A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). Rock blasting and explosives engineering. CRC
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting (Report of Investigations 8507). U.S. Bureau of Mines.