

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

**Modelamiento y análisis de vibraciones en campo cercano para reducir los
efectos adversos generados por voladura de un sector del Tajo Colquijirca –
Pasco – 2022**

Para optar por el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Emerson Eyson BALDEON VEGA

Asesor:

Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO

Cerro de Pasco - Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

Modelamiento y análisis de vibraciones en campo cercano para reducir los efectos adversos generados por voladura de un sector del Tajo Colquijirca – Pasco – 2022

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Floro Pagel ZENTENO GOMEZ

PRESIDENTE

Mg. Joel Enrique OSCUVILCA TAPIA

MIEMBRO

Mg. Luis Alfonso UGARTE GUILLERMO

MIEMBRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

“Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana”



Firmado digitalmente por CONDOR SURICHACUI Santa Silvia FAU 20154905040 soft
Muevo Soy el autor del documento 08.2025 11:32:49 -05:00



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 029-2025

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. BALDEON VEGA Emerson Eyson

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo
“Modelamiento y análisis de vibraciones en campo cercano para reducir los efectos adversos generados por voladura de un sector del Tajo Colquijirca – Pasco – 2022”

Asesor:
Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO

Índice de Similitud: **2%**

Calificativo
APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 26 de agosto de 2025.

Sello y Firma del responsable
de la Unidad de Investigación

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con profundo amor y gratitud a mi familia, en especial a mis padres, Ramón Donato Baldeón Poma y Clariza Vega Panez, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar metas profesionales que, sin ellos, habrían parecido inalcanzables. También dedico esta tesis con especial cariño a mi querida abuela Macedonia Poma Gamarra, quien desde el cielo ilumina mi camino y guía cada uno de mis pasos. Su recuerdo vive en mí como una fuente constante de fuerza y motivación.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Agustín Aguirre Aduato, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta tesis. Su experiencia y acompañamiento académico han sido fundamentales para la culminación de este trabajo. Del mismo modo, agradezco profundamente a mi querida Facultad de Ingeniería de Minas, por la formación integral brindada a lo largo de mi carrera. Gracias a la calidad de su enseñanza y al esfuerzo de sus docentes, he podido desenvolverme con solvencia en el ámbito de la minería, enfrentando con éxito los retos de la profesión.

El Autor

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la Unidad Minera El Brocal, operada por la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., ubicada en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Pasco. Esta unidad ejecuta operaciones a cielo abierto en el Tajo Norte Colquijirca. El objetivo fue modelar y analizar las vibraciones en campo cercano en un sector del Tajo Colquijirca – 2022. La metodología desarrollada fue tipo básica, cuantitativa, nivel descriptivo-exploratorio y no experimental de corte transversal, cuya población fue la zona de inestabilidad de la fase 13 del "Tajo Colquijirca" de la Unidad Minera El Brocal. Entre los resultados obtenidos, se logró establecer una velocidad promedio de onda P de 1390.55 m/s, además de calcular la velocidad pico de partícula crítica (PPVc), basándose en las propiedades elásticas del macizo rocoso. Con estos datos, se desarrolló un modelo predictivo utilizando el enfoque de Holmberg & Persson, el cual presentó un coeficiente de correlación del 90%, permitiendo así estimar con gran precisión el comportamiento vibracional del terreno. Además, se definieron parámetros ajustados para la perforación y la carga explosiva dentro de los límites permisibles, y se identificó que un tiempo de retardo de 9 milisegundos entre taladros resulta ser óptimo para evitar la superposición destructiva de ondas sísmicas. La conclusión fue que el análisis y modelamiento realizado permitió un control más preciso de las vibraciones por voladuras, mejorando la estabilidad del macizo rocoso. Esto contribuyó a optimizar el diseño operativo de los frentes de minado, aumentando la seguridad y eficiencia de las operaciones.

Palabras claves: Vibraciones, voladura, velocidad de onda, macizo rocoso.

ABSTRACT

The research was carried out at the El Brocal Mining Unit, operated by Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., located in the district of Tinyahuarco, province of Pasco. This unit executes open pit operations in the Colquijirca North Pit. The objective was to model and analyze near-field vibrations in a sector of the Colquijirca Pit - 2022. The methodology developed was basic, quantitative, descriptive-exploratory and non-experimental cross-sectional, whose population was the instability zone of phase 13 of the “Colquijirca Pit” of El Brocal Mining Unit. From the results obtained, an average P-wave velocity of 1390.55 m/s was established, in addition to calculating the critical peak particle velocity (PPVc), based on the elastic properties of the rock mass. With these data, a predictive model was developed using the Holmberg & Persson approach, which presented a correlation coefficient of 90%, thus allowing to estimate with high accuracy the vibrational behavior of the terrain. In addition, adjusted parameters for drilling and explosive charge were defined within the permissible limits, and it was identified that a delay time of 9 milliseconds between drill holes is optimal to avoid destructive superposition of seismic waves. The conclusion was that the analysis and modeling performed allowed a more precise control of blasting vibrations, improving the stability of the rock mass. This contributed to optimize the operational design of the mining faces, increasing the safety and efficiency of the operations.

Key words: Vibrations, blasting, wave velocity, rock mass.

INTRODUCCIÓN

En las operaciones mineras, uno de los procesos más importantes para fragmentar el macizo rocoso es la voladura, ya que permite liberar grandes volúmenes de material de manera eficiente. Sin embargo, este proceso también genera ondas sísmicas que viajan a través del terreno y provocan vibraciones, las cuales pueden afectar estructuras cercanas, taludes y otras infraestructuras sensibles. Por ello, entender y controlar las vibraciones es esencial para garantizar tanto la estabilidad geotécnica como el buen desarrollo de las actividades mineras.

El comportamiento del macizo rocoso frente a las voladuras depende en gran medida de sus características geomecánicas, como la resistencia, elasticidad y grado de fracturación. Al conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, especialmente la onda P, se pueden identificar límites críticos de vibración que ayuden a prever posibles daños. Estos umbrales, definidos por la velocidad pico de partícula, son cruciales para evaluar los riesgos, sobre todo en las áreas cercanas a las detonaciones, donde las vibraciones suelen ser más fuertes.

Con el uso de tecnologías avanzadas, como geófonos triaxiales y la técnica *cross-hole*, es posible medir con precisión cómo responde el terreno a las detonaciones. Estos datos son fundamentales para crear modelos matemáticos que simulan cómo se comporta el macizo rocoso en distintas situaciones de voladura, como los propuestos por Holmberg & Persson. Estos modelos no solo permiten comprender la distribución de los esfuerzos, sino también optimizar variables clave, como la carga explosiva, la disposición de la malla de perforación y los tiempos de retardo.

Dado lo complejo que es controlar las vibraciones en zonas cercanas a las fuentes sísmicas, es fundamental desarrollar estrategias que logren equilibrar la eficiencia del arranque del material con la seguridad del entorno. Analizando cómo se comportan las

vibraciones en un área representativa del tajo, se pueden hacer recomendaciones prácticas para diseñar voladuras que garanticen una operación más segura, predecible y respetuosa con la integridad del macizo rocoso y las infraestructuras cercanas.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la Investigación.....	3
1.3. Formulación del Problema	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Formulación de Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Justificación de la investigación	4
1.6. Limitaciones de la investigación.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	7
2.2. Bases teóricas- científicas	15
2.2.1. Diseño de voladura.....	15
2.2.2. Voladuras de contorno	15

2.2.3. Voladuras amortiguadas	16
2.2.4. Taladro	16
2.2.5. Diámetro de taladro	16
2.2.6. Longitud de taladro	17
2.2.7. Burden	17
2.2.8. Espaciamiento	18
2.2.9. Tipo de explosivos	19
2.2.10. Mecanismo de fragmentación de la roca por explosivos	19
2.2.11. Vibraciones	21
2.2.12. Tipos de onda en una voladura.....	22
2.2.13. Amortiguamiento	24
2.2.14. Medición de vibraciones	24
2.2.15. Control de vibraciones	26
2.2.16. Modelo de vibraciones en campo cerca por Holberg and Persson.....	31
2.3. Definición de términos básicos	33
2.4. Formulación de hipótesis	34
2.4.1. Hipótesis general	34
2.4.2. Hipótesis Específica	34
2.5. Identificación de Variables	34
2.6. Definición Operacional de variables e indicadores.....	35

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	36
3.2. Nivel de Investigación	36
3.3. Métodos de Investigación	37

3.4. Diseño de Investigación	37
3.5. Población y Muestra.....	37
3.5.1. Población.....	37
3.5.2. Muestra.....	38
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	38
3.6.1. Técnica de Observación Directa	38
3.6.2. Instrumento	38
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	38
3.8. Tratamiento Estadístico.....	39
3.9. Orientación ética, filosófica y epistémica	39

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	40
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados	46
4.3. Prueba de hipótesis.....	69
4.4. Discusión de resultados.....	70

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipo de ondas	24
Figura 2 Ubicación del proyecto	41
Figura 3 Mapa de operaciones de ubicación	41
Figura 4 Zona de prueba fase 9	47
Figura 5 Configuración de prueba especial	48
Figura 6 Ondas registrada por sismógrafo	49
Figura 7 Resumen de parámetros Poisson y Young.....	54
Figura 8 Comparativo de velocidades	54
Figura 9 Máximas Amplitudes de Ondas en los tres ejes y Vector Suma.....	56
Figura 10 Zona Regresión Lineal (Modelo H&P) Fase 9E Nv 4252	60
Figura 11 Prueba 01- arribo de la primera onda, registro de la detonación de taladro P5	62
Figura 12 Prueba 02- arribo de la segunda onda, registro de la detonación de taladro P4	63
Figura 13 Prueba 03- arribo de la tercera onda, registro de la detonación de taladro P3	64
Figura 14 Secuencia de Detonación de Taladros de Prueba	65
Figura 15 Perfil de diseño de malla.....	66
Figura 16 Abaco de diseño como función de carga explosiva	67
Figura 17 Configuración de malla.....	67
Figura 18 Configuración de carga	67
Figura 19 Análisis de daño	68
Figura 20 Análisis amplificación de vibraciones y frecuencia en función del retardo .	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que influyen para generar vibraciones	22
Tabla 2. Velocidad Pico Partícula Máxima	28
Tabla 3. Efectos de la Vpp sobre el Macizo Rocosó	28
Tabla 4. Valores de Prevención propuestos por la USBM (1980)	30
Tabla 5. Valores límites del Criterio de Prevención de Daños UNE 22.381-93	31
Tabla 6. Criterio de daño Mckenzie	46
Tabla 7. Ubicación de taladros de prueba y geófonos	47
Tabla 8. Constantes de elasticidad.....	53
Tabla 9. Parámetros de resistencia de la fase 9E	53
Tabla 10. Constantes elásticas	53
Tabla 11. Mapeo estructural	53
Tabla 12. Calidad de macizo rocos respecto al índice de velocidad relativa	55
Tabla 13. Rango de velocidades de partícula crítica	55
Tabla 14. BD de configuración de los taladros de Prueba.....	59
Tabla 15. Constantes de atenuación	59
Tabla 16. Resultado de velocidad de onda	65
Tabla 17. Carga mínima y Abaco de diseño según la carga explosiva	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Datos de campo utilizados para la prueba de hipótesis	83
Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables	84
Anexo 3: Matriz de consistencia	85
Anexo 4: Datos utilizados para la prueba de regresión lineal (Hipótesis general)	87
Anexo 5: Datos utilizados para la prueba t (Hipótesis específica 1)	87
Anexo 6: Datos para prueba t de muestras emparejadas (Hipótesis específica 2)	88
Anexo 7: Datos para regresión (Hipótesis específica 3)	88
Anexo 8: Ficha de Observación Técnica – Monitoreo de Voladuras	89
Anexo 9: Delimitación del área de estudio	91
Anexo 10: Configuración de sismógrafos.....	91
Anexo 11: Demarcación topográfica de Blast Hole – GTX	92
Anexo 12: Ensamble de geófonos.....	93
Anexo 13: Carguío de explosivos	94
Anexo 14: Lectura sismográfica	95

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La extracción global en minerales creció a un ritmo sin precedentes en las últimas décadas, causando una amplia gama de impactos sociales y ambientales en todo el mundo (Maus et al., 2020). En particular, la minería a cielo abierto presenta desafíos significativos, especialmente en lo que respecta a mantener la estabilidad de las paredes del tajo. Este desafío se intensifica con la ubicación de los recursos minerales y la profundización de los frentes de explotación. Por esta razón, es crucial encontrar soluciones que minimicen los impactos causados por las voladuras en áreas cercanas (Utili et al., 2022).

En nuestro país, el sector minero es esencial para el desarrollo en aspectos diversos, y es aún atractivo a las inversiones extranjeras por la ubicación estratégica geográfica y el potencial geológico existente (Castillo & Roa, 2021). En ese sentido, en minería a tajo abierto, la voladura en un medio circundante de un banco o macizo rocoso causa perturbaciones que con el tiempo pueden convertirse en eventos de inestabilidad en las paredes del tajo abierto. Se estima

que la zona de disturbancia, donde el macizo rocoso puede perder su integridad debido a la voladura, se encuentra a una distancia de 10 a 30 metros o 10 veces la altura de carga del taladro con mayor carga operante. Durante la detonación del explosivo, se generan ondas de choque y un alto volumen de gases a gran presión, producto del cambio termoquímico del explosivo, lo que provoca mecanismos de daño en la roca circundante (Guerra et al., 2022).

Uno de los factores clave que podrían crear conflictos y reclamos sociales es la percepción de las comunidades circundantes que se hallan en contacto con las actividades industriales. La voladura es un proceso de minería externa puede tener un gran impacto en esta percepción debido a la alta energía utilizada, generando polvo, vibraciones, eyección de material, ruido y ondas de aire. Por ello, este proceso está normado y regulado, debiéndose cumplir los límites máximos permisibles para la disipación del polvo y las normativas que regulan las vibraciones para evitar daños estructurales en zonas cercanas (Guerra et al., 2022).

En el contexto local, la UM Brocal, en su unidad de extracción a Tajo Colquijirca, siendo esta una explotación a cielo abierto y debido a la profundización de la mineralización no está exenta de esta problemática de estabilidad de paredes.

Por ende, minimizar los daños al macizo rocoso en su entorno con la generación mínima de daños por vibración, elección del tiempo adecuado de retardo y configuración de carga explosiva para proteger la integridad de taludes como la estabilidad de las paredes de la Fase 13B, disminuyendo así el riesgo a exposición a personal y equipos o maquinarias, es un reto principal que enfrenta la UM Brocal.

1.2. Delimitación de la Investigación

Delimitación Espacial: Esta indagación se desarrolló en la ciudad - Cerro de Pasco, distrito- Colquijirca, de departamento de Pasco.

Delimitación Temporal: Esta indagación se realizó entre octubre y noviembre del 2022.

Delimitación del Universo: Esta investigación se desarrolló en un sector del Tajo Colquijirca- Unidad Minera el Brocal, ubicada en la provincia de Cerro de Pasco, específicamente en el distrito de Tinyahuarco.

Delimitación de Contenido: Esta investigación se desarrolló en el dominio geológico de mayor presencia en un sector del tajo Colquijirca.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema general

¿En qué medida es posible modelar y analizar las vibraciones en campo cercano para reducir los efectos vibracionales adversos generados por voladuras en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco, durante el año 2022?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la velocidad de propagación de la onda P (V_p) y la velocidad de partícula crítica (PPV_c) según las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco, 2022?
- b. ¿Qué parámetros de perforación y voladura permiten reducir los efectos vibracionales adversos generados por las voladuras en un sector del Tajo Colquijirca?

- c. ¿Qué tiempos de retardo entre taladros resultan más efectivos para minimizar los efectos adversos de las vibraciones en un sector del Tajo Colquijirca?

1.4. Formulación de Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Modelar y analizar las vibraciones en campo cercano para reducir los efectos vibracionales adversos generados por voladuras en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco, durante el año 2022.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar la velocidad de la onda P (V_p) y la velocidad de partícula crítica (PPVc) en función de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en el sector evaluado del Tajo Colquijirca.
- b. Establecer parámetros óptimos de perforación y voladura que contribuyan a reducir los efectos vibracionales adversos en dicho sector.
- c. Identificar los tiempos de detonación más eficaces para disminuir la superposición constructiva de ondas vibratorias en el Tajo Colquijirca.

1.5. Justificación de la investigación

Justificación Teórica:

A partir de la óptica teórica, esta indagación se sustenta en la necesidad de enriquecer el acervo de conocimientos en la comunidad minera. Proporcionó información sobre las metodologías y conceptos actuales de modelamiento de vibraciones en el contexto minero, contribuyendo así a la expansión de la comprensión teórica en este campo.

Justificación Social:

Socialmente, esta investigación es crucial porque aborda un problema que afecta directamente el bienestar y la calidad de vida de las comunidades cercanas a actividades de voladura, así como la protección del medio ambiente. Al reducir los riesgos asociados a la inestabilidad del talud en el Tajo Colquijirca, se promueve la seguridad y el bienestar de estas comunidades.

Justificación Práctica:

La construcción de un modelo en campo cercano es esencial para proteger estructuras críticas, como taludes y paredes finales del tajo abierto, de posibles daños. Esto asegura la continuidad de las operaciones mineras, evitando costos de interrupciones y trabajos adicionales de sostenimiento de paredes, y permite mantener el ángulo óptimo de los bancos. Por tanto, esta investigación tiene una justificación práctica sólida

Justificación Metodológica:

La metodología propuesta utiliza tecnología avanzada para medir con precisión las ondas vibracionales generadas en voladuras del área proximal, garantizando la recopilación de datos confiables y una comprensión exacta de la magnitud y frecuencia de las vibraciones. Además, se emplearán modelos matemáticos para simular y predecir el comportamiento de las vibraciones, permitiendo una representación precisa de las condiciones del terreno e identificación de las variables clave que afectan las vibraciones adversas. La metodología de esta tesis se justifica por su enfoque práctico y basado en evidencia para abordar el problema de las ondas vibracionales generadas en voladuras del área proximal.

1.6. Limitaciones de la investigación

Esta indagación no enfrentó limitantes significativas, porque tuvo un desarrollo práctico y la obtención de datos serán realizados personalmente, sin necesidad de personal externo. Además, la unidad minera priorizó urgentemente el desarrollo y obtención de los datos, facilitando así el proceso de indagación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Antecedentes Internacionales

Algunos estudios previos han abordado el tema del modelamiento de vibraciones generadas por fuentes de liberación de energía producto de una voladura.

Heras y Guijarro (2020) en su estudio “Análisis de la implementación de cámaras de aire en las voladuras de canteras urbanas”, tuvieron el objetivo de mitigar la percepción negativa de las explosiones en zonas urbanas mediante una investigación descriptiva y comparativa con enfoque cuantitativo, desarrollada en cuatro etapas metodológicas: obtención de data, registro de parámetros operativos, análisis estadístico y técnico. El diseño observacional y no de gabinete se centró en un taladro único dentro de una malla cuadrada, empleando diferentes diámetros de 4.5”, 4”, 3.5”, 3” y con 12 metros de altura de banco fijo, y evaluando indicadores como la velocidad de oscilación, consumo específico y carga de columna. Las resultantes revelaron que las cámaras de aire redujeron las

vibraciones en un 50%, con factor de carga 0.32 kg/m^3 , superados en todos los diámetros. Así, los investigadores llegaron a concluir que el uso de cámaras de aire es efectivo para minimizar vibraciones, además de recomendar dimensionar el taco del taladro entre el 60% y 80% del burden y seleccionar tamaños de partícula adecuados al diámetro para prevenir proyecciones de rocas (fly rocks).

Olivia y Fort (2019), en su investigación "Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real", tuvieron el objetivo de predecir el nivel vibratorio que se generan en explosiones mineras y evaluar su impacto en construcciones adyacentes, contrastándolos con los umbrales regulatorios para prevenir daños. Mediante un enfoque cuantitativo y analítico, emplearon un diseño experimental basado en detonaciones piloto, utilizando sismógrafos para registrar parámetros cinéticos (velocidad/aceleración de partículas) y software de modelación dinámica para simular la respuesta del terreno. El estudio destacó que, históricamente, las fórmulas analíticas predecían vibraciones usando correlaciones entre carga explosiva, distancia y velocidad máxima de partícula, pero ignoraban la dinámica detallada del suelo. Con modelos numéricos, se logró calcular velocidades, aceleraciones y desplazamientos en cualquier punto del terreno, integrando su respuesta estructural. Los resultados confirmaron que la velocidad de partícula es el criterio clave para establecer límites seguros, validando la metodología al comparar datos simulados con normativas. Los autores concluyeron que la modelación numérica optimiza la precisión predictiva, permitiendo diseñar medidas de mitigación efectivas, como ajustes en cargas explosivas o distancias críticas, para cumplir con estándares de protección estructural y humana.

En su indagación nombrada "Análisis estadístico de la vibración inducida por explosiones cerca de una mina a cielo abierto", **Lopes et al.** (2023) se propusieron aplicar técnicas de estadística multivariada para predecir los niveles de vibración y su potencial para causar daño estructural y malestar humano. Para ello, llevaron a cabo una exhaustiva campaña de monitoreo sísmico de, mina de hierro a cielo abierto próxima a una pequeña aldea, con el fin de recopilar un conjunto de datos para un análisis predictivo multivariado. A partir de diez voladuras que generaron un conjunto de datos compuesto por 158 mediciones válidas, se establecieron tres clases de velocidad máxima de vibración conforme a normativas legales, las cuales fueron empleadas para el análisis de conglomerados. Posteriormente, se compararon estas clases con un análisis discriminante para determinar su correspondencia. Se procedió entonces a realizar un "principal component análisis" (PCA) utilizando la base de datos original. Los resultados del PCA mostraron una considerable capacidad para explicar la variabilidad de los datos. Además, se observó una similitud notable entre las tres clases derivadas del análisis de conglomerados y las establecidas según los estándares de vibración. Estos hallazgos demostraron la viabilidad de aplicar técnicas de estadística multivariada en la gestión de la vibración inducida por explosiones y sus efectos perjudiciales, con mínimos ajustes y una alta potencialidad de automatización.

Nguyen (2019) publicó un artículo de investigación titulado "Evaluación y predicción de la vibración del suelo inducida por explosiones en una mina a cielo abierto utilizando ANN: un estudio de caso en Vietnam". Su objetivo era evaluar y prever con precisión el Pico de Partículas de Vibración (PPV) inducido por explosiones, un desafío significativo para las minas a cielo abierto. El estudio

utilizó varios modelos de Redes Neuronales Artificiales (ANN) para predecir el PPV en mina a tajo abierto de carbón en Vietnam, utilizando 68 eventos de voladura para desarrollar los modelos ANN. El conjunto de datos se dividió en un 80 % (aproximadamente 56 observaciones) para entrenamiento y un 20 % restante (12 observaciones) para pruebas. Se exploraron cinco modelos ANN con variaciones en el número de capas ocultas: RNA 2-5-1; ANA 2-8-6-1; ANA 2-5-3-1; ANA 2-8-6-4-1; y el modelo ANN 2-10-8-5-1. Además, se empleó una técnica empírica para estimar el PPV y se comparó con los modelos ANN. La evaluación del rendimiento de los modelos se realizó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE). Los resultados destacaron que el modelo ANN 2-10-8-5-1 (con 10 neuronas en la primera capa oculta, 8 neuronas en la segunda y 5 en la tercera) presentó el mejor rendimiento, con un RMSE de 0,738 y un R^2 de 0,964. Por otro lado, la técnica empírica mostró el peor rendimiento, con un RMSE de 2,670 y un R^2 de 0,768. Este estudio ofreció un nuevo enfoque para predecir el PPV inducido por explosiones a tajo abierto, con el objetivo de mitigar los impactos adversos en el entorno circundante. Se sugirió que los modelos ANN con una sola capa oculta no sean utilizados para estas predicciones debido a su inexactitud. En cambio, se propuso el uso de modelos ANN con tres capas ocultas, apoyándose en los resultantes de esta indagación. Se recomendó además explorar modelos de ANN con múltiples capas ocultas en futuras investigaciones sobre la predicción del PPV inducido por explosiones.

En su investigación titulada "Análisis del riesgo de vibración del suelo en infraestructuras mineras: integrando un modelo de medida basado en holgura difusa y un análisis de los efectos de falla", Bakhtavar y Yousefi (2019) se

propusieron introducir un enfoque híbrido innovador que combinara el modo de falla difuso y el análisis de efectos con el análisis envolvente de datos del modelo de medida difuso basado en holgura. Este enfoque tenía como objetivo prioritario analizar los riesgos de vibración del suelo en infraestructuras mineras a cielo abierto. El enfoque desarrollado utilizó un algoritmo especial de priorización de riesgos que combinaba de efectos de falla y análisis de modos con el análisis envolvente de datos en condiciones difusas. En la parte basada en la medida difusa de holgura, se aplicó el método de corte de nivel α para preparar los datos necesarios. Para ilustrar este enfoque, se utilizó como ejemplo una mina de cobre a cielo abierto, donde se analizó el riesgo de vibración del suelo. Los posibles modos de falla, que incluían infraestructuras y fuentes de voladura, se identificaron en un mapa de la zona minera. Los resultados destacaron que la voladura en el punto 3 representaba el mayor riesgo de vibración del suelo en el sitio industrial, ubicado dentro de los límites finales del pozo. Otros modos de falla, como los relacionados con el sitio de tratamiento de agua, la trituradora, la gasolinera, el almacenamiento de explosivos, la apartamenta, el sitio de espesamiento, la central eléctrica y la planta de procesamiento, tenían diferentes prioridades en términos de riesgo.

Antecedentes Nacionales

Huanca (2019) en su tesis de pregrado titulada "Análisis de vibraciones producidas por voladura para reducir daños al macizo rocoso en BP. 1200E – U.P. Andaychagua - Volcan Compañía Minera S.A.A.", propuso determinar hasta qué punto es posible analizar las vibraciones resultantes de las voladuras y minimizar los daños en el macizo rocoso del By pass 1200E. Los resultados preliminares indicaron que el análisis de estas vibraciones podía, efectivamente, reducir de

manera significativa los daños en el mencionado sector. Su indagación se basó en el método científico, y fue de carácter aplicado y experimental. La población de estudio consistió en las operaciones del Nivel 1200, seleccionando específicamente el By pass 1200E como muestra y su labor. Respecto a los resultantes recopilados acerca de las oscilaciones del By pass 1200E en el Campo Cercano, fue constatado que las elevadas vibraciones, asociadas a la elevada carga operante, dieron lugar a un desplazamiento máximo de partículas significativo. No obstante, no sobrepasaron los parámetros establecidos en la normativa USBM RI 8507, dichas vibraciones fueron mantenidas dentro de los rangos permitidos, tal como quedó demostrado en los registros sísmicos obtenidos durante los cuatro ensayos realizados.

Ollero (2021) en su tesis "Reducción de vibraciones en el Municipio de Santo Domingo con la aplicación de un nuevo diseño de voladura en el tajo 333 – 311 Mina Jabalí", buscó minimizar las vibraciones en dicha localidad mediante un diseño innovador de explosiones en el área mencionada. La investigación empleó un enfoque aplicativo y correlacional con metodología cuantitativa, combinando análisis lógicos y empíricos. El diseño descriptivo se aplicó a una población seleccionada bajo criterios técnicos, focalizando la muestra en los tajos occidentales de la mina, específicamente el 311-333, mediante muestreo probabilístico. Los datos se recolectaron mediante observaciones in situ y entrevistas estructuradas. Los resultados demostraron una reducción significativa de vibraciones: con 11.08 mm/s (máximo) disminuyendo a 2.73 mm/s (mínimo) para Vpp en “Casa de Doña Ester” – Punto 2: en el “Campamento CIS” - Punto 1, la Vpp bajó de 2.451 mm/s a 0.453 mm/s. Sin embargo, debido al número limitado de detonaciones evaluadas (cinco), se evidenció un incremento de

vibraciones en la última prueba, lo que llevó a los autores a recomendar ensayos adicionales para validar la consistencia del método.

Pérez (2019) abordó la necesidad de minimizar los daños causados por las voladuras. El estudio se centró en el registro y monitoreo de vibraciones para obtener datos sísmicos que reflejen la interacción entre roca y el explosivo, realizando para ello una extensa recolección de datos de campo. A través de aplicar la "Ley de atenuación de vibración de la partícula", que integra variables como velocidad pico de partícula, distancia y carga operante, se logró desarrollar la función de regresión y curva exponencial. La data resultante permitió calcular la V_p en el entorno inmediato a las voladuras. Los resultados clave incluyen una reducción del daño caracterizado por un intenso fracturamiento desde 40 cm a 25 cm en las zonas cercanas a la voladura. Asimismo, la sobre excavación disminuyó del 31% al 12%, y la eficiencia de la voladura alcanzó hasta un 98%. En términos de consumo de explosivos, la carga operante por retardo disminuyó desde 4.89 hasta 3.96 kg y el factor de carga fue reducido desde 1.30 hasta 1.16 kg/m³. Además, el factor de energía se ajustó de 1.59 a 1.42 Megajulios por tonelada.

Luque (2021) en su indagación "Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de *Cross Hole*", se enfocó en simular las vibraciones en zonas adyacentes a detonaciones en un yacimiento de pórfido cuprífero, con el fin de reducir su impacto en la estabilidad de taludes. La investigación, de enfoque experimental y aplicado, empleó ensayos *Cross Hole* para implementar el modelo predictivo de Holmberg y Persson, definiendo umbrales de daño estructural y diseñando secuencias de carga y tiempos de detonación optimizados. El diseño metodológico se aplicó voladuras en formaciones de andesita intrusiva silíceas, localizada en la parte honda de una

mina a cielo abierto con 650 metros de profundidad, seleccionando como muestra la malla de producción N° 3100-0634 mediante muestreo no probabilístico. Para el análisis, se priorizó la fase 6B2 en el fondo minero, donde se midió la Vp mediante *Cross Hole* y estableciendo los criterios de daños basado en la PPV, utilizando cuatro taladros aislados para un modelo de campo cercano. Los resultados permitieron ajustar los intervalos de detonación entre filas y taladros, proponiendo secuencias que inician en el talud y avanzan hacia la cara libre, lo que redujo significativamente la propagación de vibraciones.

Huamán (2023) en su estudio "Análisis de control de voladura para reducir la sobrerrotura de rocas en la mina Tangana – 2022", analizó la eficacia de técnicas de detonación controlada para minimizar la fragmentación excesiva de rocas en el nivel 4600 de la galería Tangana durante 2022. La investigación, de enfoque aplicado y metodología científica, comparó dos escenarios operativos: el inicial, con 42 perforaciones y dos taladros de alivio, que generaba un 16.16% de sobreexcavación promedio, y el modificado, que incorporó presplitting (perfilado previo) con 52 perforaciones y cuatro taladros de alivio. Esta adaptación redujo la sobrerrotura a 14.43%, logrando una disminución del 1.73% y mejorando la estabilidad geomecánica de las operaciones. Además, el análisis del índice RMR (Rock Mass Rating) reveló un valor promedio de 42.63, clasificando la roca como calidad regular (tipo III), lo que respaldó la necesidad de ajustes técnicos. Las conclusiones destacaron que el control de voladuras optimiza la precisión en la fragmentación, reduciendo riesgos operativos, y sugirieron replicar el método en contextos con características geológicas similares.

2.2. Bases teóricas- científicas

2.2.1. Diseño de voladura

Es una técnica utilizada para la ruptura controlada de roca mediante el uso de explosivos. Un explosivo es una sustancia reactiva que contiene una gran cantidad de energía potencial, la cual puede liberar de manera repentina, produciendo una explosión acompañada de luz, calor, sonido y presión. Cuando se utiliza adecuadamente, la voladura se convierte en una herramienta útil para la fragmentación intencional de rocas (Roy, 2021).

Para Taiwo et al. (2022), la voladura es una técnica habitual en la minería, la excavación de grandes masas de tierra y piedra, y en diversos proyectos de descarga. Las minas de acero y no acero, así como otras grandes iniciativas de excavación, emplean procedimientos de voladura y voladura de agujero profundo para fragmentar formaciones rocosas. Una operación de voladura ideal debe producir fragmentos del tamaño requerido, garantizar la seguridad, ser económica y respetuosa con el medio ambiente.

2.2.2. Voladuras de contorno

Técnica de voladura controlada utilizada en construcción y minería con el fin de crear superficies precisas y minimizar el daño a la roca adyacente que no se desea fragmentar. En esta se busca mantener la estabilidad de las estructuras cercanas y reducir los efectos adversos como las vibraciones y la proyección de fragmentos (Brantson et al., 2023).

Esta técnica se caracteriza por ser empleados para voladora y perforación, su fin no es la fragmentación del volumen específico de formación pétreo, sino lograr un corte limpio y preciso de la misma, incluso extrayéndola, sin ocasionar daño a la roca remanente. Estas prácticas se emplean para prevenir o minimizar

los riesgos que se producen después de las perforaciones a fin de maximizar la extracción de material. El éxito de estas operaciones, que se utilizan tanto en proyectos de tajo a cielo como subterráneos, está fuertemente influenciado por la geología del macizo rocoso sobre el cual se desarrollan (López, 2020).

2.2.3. Voladuras amortiguadas

La voladura amortiguada es una técnica esencial en la industria minera, especialmente en operaciones de excavación en minas a cielo abierto ubicadas en regiones áridas y con terreno complejo. Su principal objetivo asegurar la seguridad en operaciones y prevenir la inestabilidad ocasionada por las vibraciones generadas durante la voladura. Para lograr esto, se implementan diversas estrategias, como el uso de cargas pre-split, la perforación de agujeros inclinados y la conexión de detonadores con una red de voladura (Chen et al., 2020).

2.2.4. Taladro

La perforación es esencial tanto en la minería subterránea como en la de superficie, utilizándose para extraer minerales mediante la creación de agujeros de voladura en rocas duras mediante métodos de perforación de percusión rotativa. Se emplea una broca de botones con pistón para facilitar la fractura de la roca, aunque pueden surgir anomalías como desgaste de los botones y desviación del trayecto del agujero, lo que reduce la eficiencia y aumenta los costos (Senjoba et al., 2021).

2.2.5. Diámetro de taladro

El diámetro del taladro para la perforación a cielo abierto puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo de material que se está perforando, el equipo utilizado y los objetivos de la perforación. Por lo general, los diámetros

de taladro más comunes para la perforación a cielo abierto suelen estar en el rango de varios centímetros hasta varios metros. Esto se debe a que las operaciones a cielo abierto pueden implicar la perforación de agujeros para diferentes propósitos, como voladuras, exploración geológica o extracción de minerales (Navarro et al., 2021).

En las minas a cielo abierto, el ajuste de los lados a la posición final en los bancos rocosos se realiza mediante el método de voladura de contorno. La ranura se crea mediante la voladura instantánea de una serie de barrenos de voladura de 244.5 a 250.8 mm de diámetro perforados con un ángulo de 55 a 75°. Los barrenos de voladura de contorno son perforados por equipos perforadores SBSH-190/250-60 (Hussan et al., 2021).

2.2.6. Longitud de taladro

La longitud del taladro se refiere a la distancia desde el punto inicial de contacto hasta que la punta del taladro alcanza la superficie posterior de la pieza. Durante la operación de perforación, la velocidad de corte es cercana a cero en el centro del taladro y varía respecto al centro del taladro. En cuanto al ángulo de ataque también varía, y el borde de corte tiene la velocidad de corte más alta, llamada velocidad de corte periférica. Esta variación de velocidad de corte hace que la eliminación del material ocurra como un proceso de extrusión (Kumar et al., 2020).

2.2.7. Burden

Se refiere a la distancia entre el fondo de un taladro y el techo de la roca sobre él. En los trabajos de perforación y voladura, la velocidad del burden es crucial para determinar el tiempo retardante de taladros y las filas de taladros, lo que influye en la fragmentación efectiva de la roca y en la prevención de

problemas como vibraciones excesivas y fallas en la voladura (Himanshu et al., 2024).

Autores como Zhang et al. (2021) refieren que la velocidad del burden también juega un papel importante en la determinación del burden y en la predicción de varios aspectos relacionados con la voladura, como el control de vibraciones, la predicción del tamaño de los fragmentos y la formación de pilas de escombros. Dado que la relación entre el burden y la velocidad del burden puede variar según diversos factores, como la energía explosiva y las propiedades de la roca, es importante desarrollar relaciones empíricas precisas para optimizar las operaciones de perforación y voladura.

2.2.8. Espaciamiento

Varios estudios han demostrado que un espaciado adecuado entre los taladros mejora la fragmentación de la roca y reduce los costos de explosivos. Sin embargo, la implementación de esta técnica enfrenta varios desafíos técnicos, como la profundidad de perforación limitada de los equipos convencionales, la resistencia adicional en el frente del banco y el aumento del consumo de explosivos. Además, la respuesta dinámica de la roca a la carga explosiva debe ser cuidadosamente analizada para minimizar las vibraciones y maximizar la eficiencia de la voladura. Los estudios numéricos y de simulación, junto con pruebas de campo, son fundamentales para determinar los parámetros óptimos de voladura y garantizar un efecto de voladura efectivo y rentable (Yin et al., 2021).

En el trabajo en minas a cielo abierto a menudo, se decide la geometría de perforación con el fin de resistir las eyecciones de roca dentro de límites seguros y obtener el tamaño de fragmento deseado de la roca volada. Una regla práctica para el diseño de la geometría de perforación de una mina a cielo abierto sugiere

que el diámetro de los taladros de voladura debe ser 15 veces la altura del banco. La carga debe mantenerse entre 25 y 40 veces el diámetro del taladro y el espaciamiento debe ser 1.15 veces la carga. A veces, se requiere perforación en el subsuelo para lograr la voladura hasta la profundidad deseada. La perforación en el subsuelo debe hacerse de 3 a 15 veces el diámetro del taladro (Himanshu et al., 2024).

2.2.9. Tipo de explosivos

El 95% de las labores mineras se ejecuta mediante perforación y voladura, lo que subraya la necesidad de mejorar y crear nuevas técnicas para calcular los parámetros relacionados con estas operaciones. Se ha observado que la diversidad de explosivos utilizados en la minería ha generado la formulación de numerosos métodos para calcular dichos parámetros. No obstante, se ha identificado una falta de métodos que consideren las propiedades energéticas de los explosivos en emulsión, los cuales son reconocidos por ser más seguros, económicos y respetuosos con el medio ambiente en comparación con otras opciones explosivas disponibles (Kononenko et al., 2019).

2.2.10. Mecanismo de fragmentación de la roca por explosivos

Este sucede en los diferentes tiempos de “durante y después” al detonar la carga confinada, se pueden identificar cuatro etapas distintas que se describen de la siguiente manera:

- a) Detonación: La detonación de rocas en la minería se realiza con explosivos de emulsión, seguros y prácticos. Estos explosivos, exentos de iniciadores tradicionales, se componen de una mezcla emulsionada. Se emplean dos teorías para describir su detonación: la hidrodinámica y la del "punto caliente". Aunque ambas son útiles, la primera es más apropiada. Se han

desarrollado ecuaciones de estado para predecir el comportamiento de los productos de la explosión, siendo la de Jones-Wilkins-Lee comúnmente usada. Esta ecuación se basa en la premisa de que el explosivo condensado está en un estado altamente comprimido en la zona de la reacción química (Afanasev & Makhmudov, 2021).

b) Propagación de ondas de choque y/o esfuerzo

La fragmentación de rocas mediante explosivos el sector minero se ve condicionado de propagación de ondas de choque. Estas ondas, generadas por la detonación de explosivos, provocan la formación de grietas radiales alrededor del pozo de voladura y, al reflejarse en la superficie libre, generan grietas paralelas que contribuyen al proceso de fragmentación. La interacción de estas ondas es fundamental para cuantificar el grado de fragmentación y daño en la roca. Estudios experimentales y teóricos han investigado el efecto del tiempo de retardo entre la iniciación de explosiones adyacentes en la interacción de estas ondas, buscando optimizar la fragmentación de rocas en la minería (Hashemi & Katsabanis, 2020).

c) Expansión de gas a presión

Tras la detonación del explosivo, los productos de la detonación generan una elevada presión de gas que ejerce fuerza sobre las estructuras circundantes de la roca. Esta presión, contribuye a la creación de nuevas fracturas al ejercer fuerza sobre la roca, especialmente en áreas donde ya existen defectos o fisuras preexistentes; también, impulsa los fragmentos de roca fracturada, facilitando su desplazamiento y distribución en el entorno circundante. La combinación de estas dos acciones resulta en una fragmentación más efectiva de la roca y en una mayor dispersión de los

fragmentos, lo que facilita su manipulación y transporte durante las operaciones mineras (Wang et al., 2019).

d) **Movimiento del material**

El movimiento del material después de una voladura es esencial en la excavación de rocas con perforación y voladura. La presión del gas en el taladro afecta directamente la fragmentación de la roca. Un relleno adecuado ayuda a mantener esta presión y mejorar la fragmentación. Se han desarrollado métodos para determinar la longitud óptima del relleno, pero existen limitaciones en los estudios actuales. Este trabajo propone un análisis teórico del mecanismo del relleno del taladro, un nuevo principio de optimización y un método de cálculo. Se ha demostrado la fiabilidad de este enfoque en pruebas de campo (Chen et al., 2021).

2.2.11. Vibraciones

Según Bernaola et al. (2013), estas son resultado de la detonación de una combinación explosiva se trata de una liberación de energía no deseada, que se distingue por su movimiento ondulatorio y se ven supeditadas o condicionadas a una serie de secuencias geotécnicas o factores, que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores que influyen para generar vibraciones

Operacionales: Voladura	Operacionales: Perforación	Geotécnicos
Energía real aportada	Cantidad de taladros por fila	Angulo de la cara libre
Tipos de iniciación	Tipos de taladros	Densidad del Macizo rocoso
Retardos y secuencia	Tipo de malla	Porosidad del Macizo rocoso
Densidad del explosivo	Diámetro del taladro	Resistencia de la Roca
Confinamiento del explosivo	Altura de la columna	Presencia de Fallas
Esparcimiento	Angulo del taladro	Presencia de discontinuidades
Burden	Cantidad de taladros por fila	Tipo de Roca

Adaptado de KONYA (1990), pp. 231-274.

2.2.12. Tipos de onda en una voladura

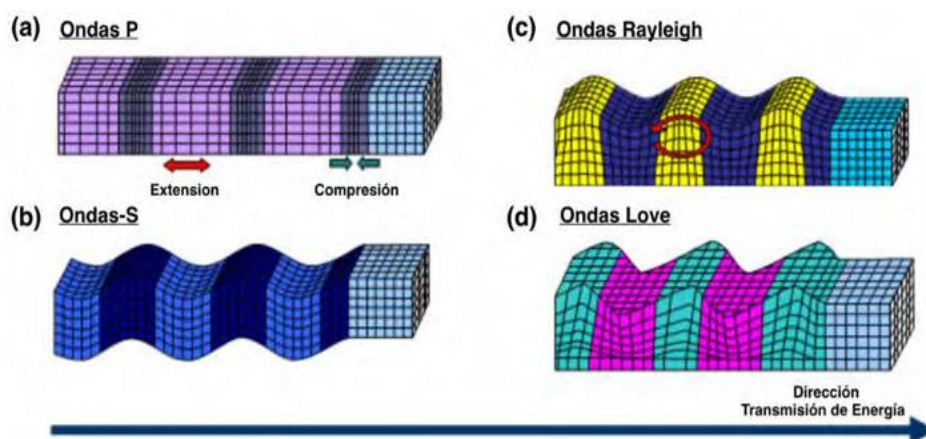
Las ondas son vibraciones que exhiben un movimiento oscilatorio y se caracterizan por un desplazamiento, velocidad y aceleración específicos. Cuando se propagan a través de un medio no elástico, como la roca, se atenúan en función del medio de disipación. Cuando se detona un explosivo confinado, las vibraciones creadas atraviesan el medio (tierra) de manera esférica o forma circundante y su intensidad disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia que recorren (Cornejo & Huamán, 2020).

Desde Bernaola et al. (2013), las vibraciones se componen de dos ondas, divididas en: superficiales e internas; las ondas internas son las principales y las que más perturban la roca. Entre ellas, las Ondas “P” se propagan longitudinalmente en el terreno, causando la oscilación de las partículas en la

misma dirección de la onda. Son principalmente compresionales, tienen una gran amplitud y velocidad, y son las que causan el mayor movimiento y se registran en los monitoreos con geófonos. La onda S se caracteriza por desplazarse perpendicularmente al vector de movimiento de las partículas. Bajo las denominaciones de ondas de corte o de cizallamiento términos que aluden a su potestad para inducir deformaciones en el sustrato rocoso se constata que tanto su amplitud como su velocidad son notablemente inferiores en comparación con las ondas P, a las cuales sucede como segunda fase en los registros sísmicos y cuya transmisión es impedida en medios líquidos debido a la ausencia de módulo de corte en estos. Además, se ha observado que la relación entre la velocidad de las ondas P y S puede emplearse para inferir propiedades elásticas del subsuelo y estimar su contenido de fluido.

La onda superficial es complementada por la onda interna, dado que su velocidad y su potencial de daño han sido reducidos. Una clase única ha sido identificada: la onda Rayleigh, así como una clase singular: la Love. Estas inducen un movimiento elíptico de cada partícula es inducido en la dirección paralela a su avance, tanto en un plano vertical como en uno horizontal. Su rápida atenuación en la superficie se observa conforme a la resistencia del sustrato rocoso y a las capas geológicas. Estas cuatro ondas se presentan en la Figura 1 (Bernaola et al., 2013).

Figura 1. Tipo de ondas



Obtenido de Sáez (2016).

2.2.13. Amortiguamiento

También denominados buffers, los taladros son perforados inmediatamente tras la última hilera de producción (desde la cresta hasta el pie del talud) y antes de la hilera de pre-corte, y se les asigna una carga operativa reducida. Esto permite que la malla reduzca la carga y el espaciamiento, sin embargo, mantiene el diámetro (Cornejo & Huamán, 2020).

Estos taladros se perforan en dos hileras al paralelo: la primera que interactúa con la línea de producción y la segunda con el fin de disipar las vibraciones a medida que se acercan al área de pre-corte. Se fija en el reducir la energía a medida que acercan al talud final, por lo que la voladura sigue la secuencia, ocurriendo al fin del disparo. Además, contribuyen a fragmentar el material (Cornejo & Huamán, 2020).

2.2.14. Medición de vibraciones

➤ Sismógrafo

El sismógrafo es un dispositivo especializado empleado para medir las vibraciones producidas de voladuras. Tres partes

principales lo componen: un equipo receptor, un geófono triaxial, y un micrófono. De estos, el geófono triaxial es el más crucial, ya que mide las vibraciones en tres dimensiones (transversal, longitudinal y vertical) mediante impulsos eléctricos. Las señales electrodinámicas que se emiten a partir de las bobinas del geófono son recepcionadas por el equipo para obtener la Velocidad Pico de Partícula (Vpp). Además, se utiliza un micrófono para monitorear la onda sónica; este dispositivo debe ser calibrado anualmente para garantizar su funcionamiento correcto. Además, es importante seguir los procedimientos adecuados para su uso, incluyendo la configuración correcta en función de los límites que puede soportar y tipo de geófono (Cornejo & Huamán, 2020).

➤ Monitoreo de vibraciones

En el ámbito del análisis de fenómenos vibratorios, se distinguen dos técnicas fundamentales para su evaluación. La primera implica el cálculo de la velocidad del desplazamiento de las ondas mecánicas a través de un medio, haciendo especial énfasis en aquellas que generan compresión en los materiales. Este enfoque se centra en la dinámica de propagación energética, donde las perturbaciones viajan en forma de pulsos longitudinales. La segunda estrategia, por otro lado, se orienta hacia la observación localizada, midiendo con precisión cómo varía el movimiento instantáneo de las partículas en una ubicación predefinida del sistema. Este último método permite analizar in situ las oscilaciones microscópicas, proporcionando datos sobre la respuesta específica de un punto bajo condiciones vibratorias. Ambos

procedimientos, aunque metodológicamente distintos, conservan el objetivo común de cuantificar parámetros dinámicos para interpretar el comportamiento mecánico de estructuras o materiales (Bernaola et al., 2013).

Para un seguimiento efectivo de las vibraciones, se determinan los lugares para colocar sismógrafos y geófonos. Estos deben estar en un terreno nivelado y dependiendo de la compactación del suelo, los geófonos deben estar confinados o empotrados con bolsa de arena. Se deben tener en cuenta los registros previos de vibraciones para calibrar los límites de inicio para el registro de frecuencia y la velocidad de partícula. Los lugares de seguimiento se eligen para proteger las estructuras y se realizan mediciones periódicas para asegurarse de no sobrepasar los límites de la norma. Es necesario establecer relaciones entre la información recopilada y el espectro de oscilaciones asociado al desplazamiento energético producido por una detonación. Posteriormente, al integrar los registros previos de actividad vibratoria, es factible diseñar un sistema de pronóstico preciso que permita minimizar parámetros de esfuerzo y mejorar la eficacia de las detonaciones mediante ajustes estratégicos (Cornejo & Huamán, 2020).

2.2.15. Control de vibraciones

Para gestionar las vibraciones causadas por las voladuras, es crucial considerar el entorno geográfico y demográfico donde se origina la emisión. En primer lugar, es necesario identificar las frecuencias predominantes de estas ondas. En el sector de la minería, los rangos de oscilación reducidos suelen

descartarse debido a su capacidad para sincronizarse con la frecuencia crítica inherente de las formaciones rocosas. Esto conlleva adaptaciones en los parámetros operativos para favorecer la generación de vibraciones con oscilaciones más elevadas. Posteriormente, al identificar el espectro de frecuencias dominantes, se establecen los valores máximos de velocidad permitida para las partículas, los cuales garantizan la integridad de las estructuras expuestas bajo dichas condiciones. Para ello, se aplican normativas técnicas basadas en tablas de referencia que definen los umbrales de vibración aceptables según las propiedades de las edificaciones o infraestructuras ubicadas en las inmediaciones de la zona de detonación.

➤ Norma Peruana

En el marco normativo oficial del país, el MINEM en 1995, únicamente reconoce como referencia la Guía Técnica-Ambiental para Perforación y Voladuras en Minería. En su capítulo II, este documento establece parámetros máximos de vibraciones permitidas, considerando variables como los tipos de suelos, características constructivas y antigüedad de las edificaciones. Alineándose con los fundamentos de la Ley de Transmisividad, la guía introduce el concepto de distancia escalada (D_s), un indicador empleado como criterio técnico para restringir las cargas explosivas utilizables en ausencia de sistemas de control sísmico. Los valores aplicables se detallan en la Tabla 2 adjunta.

Tabla 2. Velocidad Pico Partícula Máxima

Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico (Ds)	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibración de tierra en pulgadas/segundo	Distancia (D) desde el área de voladura en pies
65	0,75	5001 a más
55	1,00	301 a 5000
50	1,25	0 a 300

Tomado del Ministerio de Energía y Minas (1995), pp. 23.

El documento regulatorio enfatiza además las modificaciones técnicas requeridas en la distancia escalada (Ds) cuando se emplean sistemas de medición triaxial para evaluar vibraciones. Este enfoque busca evitar afectaciones en construcciones próximas y remotas, garantizando el cumplimiento de los umbrales definidos mediante la combinación de la Velocidad Máxima de Partícula (VMP) y la rapidez de transmisión de las ondas primarias (P) en el sustrato rocoso. Para una revisión exhaustiva de los criterios aplicables, la Tabla 3 contiene las especificaciones técnicas detalladas.

Tabla 3. Efectos de la Vpp sobre el Macizo Rocos

Efectos en masa roca	Velocidad de Partícula Pico (pulgadas/segundo)
Roturas completas de masas de rocas	Más de 100
100 rajaduras tensionales fuertes y cierta rajadura; fracturas	De 25 a 100
Puede ocurrir rebanado tensional menor; pueden ocurrir algunas caídas de rocas	De 10 a 15
No hay fracturas de rocas intactas	Menos de 10

Tomado de Ministerio de Energía y Minas (1995), pp. 24.

Esta norma asume que todos los tipos de roca sufren el mismo daño, sin considerar su velocidad de propagación verdadera y mucho menos los límites de elasticidad. Además, los límites de vibración, expresados en pulgadas por segundo, resultan en valores muy altos cuando se convierten a milímetros por segundo, la unidad más comúnmente utilizada. Estos límites no toman en cuenta el material de las construcciones cercanas. Por estas razones, se considera que la guía está desactualizada y necesita ajustes más acordes a la actualidad minera a tajo abierto del Perú.

➤ Norma Internacional

Se han establecido límites internacionales para las vibraciones generadas por detonaciones mineras, siendo regulaciones de aplicación extendida en el sector. Estos marcos normativos se fundamentan en parámetros de evaluación estructural que integran tanto la frecuencia dominante como los umbrales máximos de la Velocidad Máxima de Partícula (VMP), con la finalidad de incrementar la supervisión técnica durante las explosiones y asegurar la mitigación de afectaciones en edificaciones adyacentes. Entre las muchas normas internacionales existentes, tres son particularmente relevantes para la investigación: las de Estados Unidos, España y Alemania. En U.S.A la norma USBM RI 8507, propuesta por la oficina de aspectos de minería, fue pionera en la investigación del daño causado por las vibraciones. Mediante el uso de equipos sismográficos de alta precisión diseñados para evaluar explosiones, se establecieron en estudios técnicos los umbrales máximos admisibles para la Velocidad Máxima de Partícula (VMP). Estos parámetros, inicialmente elevados, fueron recalibrados mediante una clasificación por intervalos de frecuencia. Posteriormente, se adaptaron

considerando las particularidades de cada tipología constructiva a resguardar, hasta consolidarse en 1980 los estándares vigentes en la actualidad. La normativa categoriza tres clases de edificaciones vulnerables, asociando cada una a rangos de oscilación específicos que podrían comprometer su estabilidad. Resulta relevante señalar que las vibraciones con oscilaciones rápidas raramente generan impactos significativos, razón por la cual los límites de VMP para estos casos son considerablemente más flexibles. En consecuencia, las detonaciones planificadas bajo criterios técnicos priorizan la generación de ondas con frecuencias altas, estrategia que minimiza riesgos estructurales (Cornejo & Huamán, 2020).

Tabla 4. *Valores de Prevención propuestos por la USBM (1980)*

Estructuras	PPV máx. (mm/s)	Frecuencia (Hz)
Sin restricción	50,8	+ 40
Casas modernas con interiores de yeso prefabricado	19	4 - 12
Casas con paredes de escayola	12,7	2,7 – 7

Tomado de United States Bureau of Mines (1980).

En el ámbito regulatorio español, la Norma UNE 22.381.93, cuya aplicación se detalla en la Tabla 5 establece un sistema de clasificación para construcciones sujetas a protección especial. Este marco técnico divide las edificaciones en tres grupos diferenciados, definidos por su diseño arquitectónico y relevancia cultural: la primera categoría incluye estructuras defensivas o fortificadas; la segunda abarca inmuebles residenciales, comerciales y áreas arqueológicas con bajo riesgo de deterioro; mientras que

la tercera corresponde exclusivamente a yacimientos arqueológicos de alto valor patrimonial.

Tabla 5. *Valores límites del Criterio de Prevención de Daños UNE 22.381-93*

Valores límites del criterio	Frecuencia (Hz)		
	>75 Velocidad (mm/s)	15 - 75 Desplazamiento (m)	2-15 Velocidad (mm/s)
Grupo III	20	0.042	4
Grupo II	45	0.095	9
Grupo I	100	0.212	20

Tomado de Norma Española UNE 22381 (1993). pp. 7.

2.2.16. Modelo de vibraciones en campo cerca por Holberg and Persson

Las voladuras, que implican la detonación de explosivos, son la principal fuente de impactos ambientales debido a las vibraciones generadas. Estas vibraciones son ondas de tensión, propagándose a lo largo de la roca, y pueden clasificarse en dos categorías: las que afectan a la roca cercana al lugar de la explosión y las que pueden dañar estructuras cercanas (Luque, 2021).

El deterioro inherente en formaciones rocosas durante procesos explosivos se origina en dos etapas críticas. Durante la fase inicial, caracterizada por fuerzas dinámicas intensas, las vibraciones generadas pueden provocar el desplazamiento de masas pétreas, induciendo la formación de fracturas nuevas o la propagación de discontinuidades geológicas previamente existentes. Posteriormente, en la etapa de liberación gaseosa cuasiestática, los fluidos a alta presión derivados de la explosión penetran activamente en las redes de fisuras y fracturas del macizo rocoso. Este fenómeno se intensifica en zonas donde los conductos de perforación intersectan planos de debilidad estructural, facilitando

la migración de gases a través de las rutas de menor resistencia mecánica (Luque, 2021).

De acuerdo con estudios técnicos respaldados por la ASIEX (2018), el enfoque predictivo para estimar la rapidez de las partículas en función del tipo de explosivo utilizado y su localización respecto al punto de detonación se fundamenta en metodologías de análisis multivariable de regresión. Este modelo, al prescindir de la consideración de configuraciones geométricas particulares de las cargas explosivas, emplea un enfoque matemático basado en correlaciones estadísticas, representadas formalmente mediante ecuaciones predefinidas.

Donde:

- W: Peso de la carga explosiva (kg)
- d: Distancia de medición, desde la carga (m)
- β, α : Factor de decaimiento
- K: Factor de amplitud
- PPV: Velocidad de Partícula Peak (mm/s)

En áreas próximas a las cargas detonantes, donde se concentra la mayor densidad de fracturamiento, el modelo matemático puede ser modificado para incorporar variables asociadas a la configuración cilíndrica de las cargas. Esta adaptación metodológica permite analizar con mayor precisión los patrones vibratorios en el entorno inmediato de las explosiones. Para tales fines, se emplean tanto la ecuación de Holmberg & Persson (H&P) —diseñada específicamente para evaluar efectos de proximidad— como su marco teórico de campo cercano. Según la formulación (3), las constantes K, α y β , cuyos valores actúan como parámetros empíricos asociados a las propiedades geomecánicas del

material, determinan la existencia de los factores operativos y la respuesta dinámica de la roca durante la detonación (ASIEX, 2018).

2.3. Definición de términos básicos

Vibraciones

Estas son reconocidas como un de movimiento ondulatorio que se propaga a través de un medio y posee alto potencial de perturbación, en esencia es un fenómeno de transmisión de energía.

Voladura

“Proceso operativo con el cual se busca lograr una granulometría adecuada (fragmentación)”.

Modelamiento

“Proceso de crear representaciones simplificadas de sistemas o fenómenos complejos del mundo real. Estos modelos pueden ser físicos, matemáticos, computacionales o conceptuales. El propósito del modelamiento es capturar las características más importantes de un sistema para comprender su comportamiento, predecir resultados futuros o tomar decisiones informadas”.

Análisis

“Proceso de examinar detenidamente los componentes de un sistema o fenómeno para comprender su estructura, funcionamiento y relaciones internas. El análisis implica descomponer un problema en partes más pequeñas, identificar patrones o tendencias, y extraer conclusiones significativas a partir de los datos recopilados.”

Efectos Adversos

“Los efectos adversos es principalmente el daño causado en la roca circundante podemos decir que es la degradación geotécnica”.

Sector de un tajo

“El sector de un tajo se define con el propósito de organizar y gestionar la operación minera de manera eficiente. Esta división puede basarse en varios criterios, para este estudio definido por dominio geotécnico”.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Hi: El análisis de vibraciones en campo cercano generadas por voladura permite determinar el umbral de daño permisible en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco – 2022.

H0: El análisis de vibraciones en campo cercano generadas por voladura no permite determinar el umbral de daño permisible en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco – 2022.

2.4.2. Hipótesis Específica

- a. La velocidad de propagación de la onda P (V_p) y la velocidad de partícula crítica (PPVc) obtenidas reflejan las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en un sector del Tajo Colquijirca, Cerro de Pasco – 2022.
- b. Los parámetros optimizados de perforación y voladura aplicados en el sector de estudio permiten reducir significativamente las vibraciones generadas por la voladura.
- c. Los tiempos de detonación efectivos oscilan en un rango de 25ms-30ms, que ayudarán a minimizar la superposición constructiva de ondas de vibración, en un sector del Tajo Colquijirca- Pasco 2022.

2.5. Identificación de Variables

Variable Dependiente: Análisis de vibración

Variable Independiente: Voladura

2.6. Definición Operacional de variables e indicadores

En la presente investigación, se consideró como variable independiente a la *voladura*, entendida como el conjunto de parámetros técnicos (carga explosiva, tiempos de retardo, distancia entre taladros, etc.) que influyen en la generación de vibraciones. Por otro lado, la variable dependiente fue el *análisis de vibraciones*, el cual se evaluó a partir de la velocidad pico de partícula (PPV), la velocidad de onda P (V_p) y otros indicadores relacionados al umbral de daño en el macizo rocoso.

Para operacionalizar estas variables, se establecieron dimensiones específicas como: velocidad de propagación de ondas, carga explosiva, distancia a estructuras sensibles, tiempos de detonación, entre otras. Cada una de estas dimensiones fue evaluada a través de indicadores cuantificables, obtenidos mediante instrumentos como geófonos triaxiales y sismógrafos, así como mediante simulaciones y cálculos en software especializado.

La matriz detallada de operacionalización de variables e indicadores se encuentra en el Anexo 2.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de **tipo aplicada**, ya que se orienta a la solución de un problema concreto relacionado con el control de vibraciones generadas por voladuras en un entorno minero real. Como lo indican Hernández y Mendoza (2018), este tipo de investigación se caracteriza por emplear conocimientos teóricos para dar respuesta a necesidades específicas dentro de un contexto determinado, como es el caso del sector minero en estudio.

El enfoque que se empleó fue cuantitativo; porque los datos que se obtuvieron fueron cuantificables, representados numéricamente, modelados analizados e interpretados (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación fue descriptivo–exploratorio, según explica Ñaupas et al. (2018), el nivel descriptivo como la obtención de la data de sucesos, características, dimensiones, acciones de un lugar en específico; por su parte el exploratorio ya que se refiere a una fase inicial en el proceso de investigación en

la que se busca explorar un fenómeno o problema sin pretender establecer inferencias causales.

3.3. Métodos de Investigación

En el campo académico, la metodología adecuada y pertinente es la científica, pues se destaca como el proceso más confiable para obtener conocimiento validado, siendo considerado un marco fundamental en la indagación sistemática (Ñaupas et al., 2018).

El método Hipotético-Deductivo fue empleado en esta indagación, pues estuvo destinado a obtener conocimiento científico dentro del campo de las ciencias formales. Este método sigue una secuencia de pasos esenciales: observar el fenómeno bajo investigación, concebir una hipótesis explicativa, deducir conclusiones y verificar la precisión de las afirmaciones efectuadas. Para respaldar las afirmaciones de los investigadores, se utiliza el método a través de la evaluación de las hipótesis planteadas para determinar su aceptación o rechazo. En consecuencia, el método se emplea para validar o descartar la hipótesis propuesta (Cabezas et al., 2018).

3.4. Diseño de Investigación

El diseño de investigación fue no experimental y de corte transversal, ya que no se manipularon las variables y los datos se recogieron en un único momento del tiempo.

3.5. Población y Muestra

3.5.1. Población

Esta indagación se desarrolló desde octubre a noviembre del 2022 en la UM “Tajo Colquijirca” en la fase 13, específicamente en su zona de inestabilidad.

3.5.2. Muestra

La selección del área de estudio recayó en el Proyecto 100, ubicado a 4210 msnm, fase 13 del tajo Colquijirca. La muestra, de carácter no probabilístico, se definió basada en criterios específicos definidos por el equipo investigador, priorizando la litología característica del macizo rocoso. En este contexto, dicha zona destaca por ser la más representativa en términos de inestabilidad geomecánica dentro de la Fase 13, lo que justificó su elección para el análisis.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnica de Observación Directa

Respecto a la obtención de data, se empleó la observación directa en campo; a fin de cuantificar fallas y errores, haciendo empleo de herramientas y mecanismos para determinarlos.

3.6.2. Instrumento

En esta indagación se empleó el instrumento de fichas de observación; para recopilar información del área de planeamiento, diseño de banco, así como información de geología, información de laboratorio de rocas, diseño de mallas de voladura y perforación, y reportes de voladuras. Panel fotográfico y herramientas que midieron las vibraciones, entre los cuales se incluye sismógrafos, geófonos triaxiales.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Procesamiento se revisó la información procedente del área geotecnia, de igual manera los informes y reportes de voladura y perforación. Con ello se realizó un análisis comparativo de los parámetros de trabajos de voladura y perforación implementado, y los resultados.

Análisis Con la información obtenida de la instrumentación sismográfica se realizó el modelamiento de vibraciones para poder estimar el umbral de daño del macizo rocoso instrumentado, se realizaron simulaciones de los parámetros de voladura y perforación a través del software especializado de voladura, gráficas y cuadros para la interpretación adecuada de la data resultante.

3.8. Tratamiento Estadístico

Se efectuó un procesamiento estadístico de los datos recopilados, comprobando la comparación entre variables y aplicando las pruebas correspondientes para su correcta interpretación. Además, se analizó la información derivada de la post-voladura, fundamentándose en principios de estadística descriptiva, organizando las observaciones y utilizando herramientas de apoyo que permitieron visualizar, explorar y confrontar los resultados obtenidos en el Tajo Colquijirca.

3.9. Orientación ética, filosófica y epistémica

El estudio se realizó siguiendo principios éticos, informando a la jefatura de Perforación y Voladura de la UM Tajo Colquijirca sobre los objetivos de la investigación, y garantizando la confidencialidad de la información obtenida.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

Ubicación

La Unidad Minera el Brocal, Tajo Norte Colquijirca se ubica en el distrito de Tinyahuarco, centros poblados de Colquijirca (aledaño a la operación minera a cielo abierto), Smelter (aledaño a la operación minera subterránea) y Huaraucaca (planta de procesamiento de minerales). Ubicadas aguas arriba de la laguna Chinchaycocha.

Está ubicada en la jurisdicción provincia de Pasco, en el departamento de Pasco. La distancia aproximada desde la ciudad de Lima comprende 300 km, comprendidos por un tránsito complejo atravesando regiones geográficas accidentadas.

Figura 2. Ubicación del proyecto



Figura 3. Mapa de operaciones de ubicación



Accesibilidad

El acceso a la unidad minera el Brocal – Tajo Norte para conectar el tránsito desde la ciudad de Lima, cuenta con dos alternativas de recorrido:

- Lima – Casapalca – La Oroya – Cerro de Pasco - Colquijirca: 298 km
- Vía totalmente asfaltada.

- Lima – La Viuda - Canta –Huayllay – Colquijirca: 266 km.
- Vía asfaltada en un 90%.

Características Del Tajo Colquijirca.

El tajo Colquijirca corresponde a una mina a cielo abierto. El yacimiento (Tajo Norte) se emplaza en pliegues asimétricos sinclinales y anticlinales, sus flancos se denominan La Pampa, La Llave, Chocayoc, Mercedes y Principal. Estratigráficamente, las rocas aflorantes pertenecen a los miembros medio y superior de la Formación Calera (Terciario inferior-Eoceno). La circunferencia externa mineralizada, de tipo cordillerano, está dominada por sulfuros de metales base (Zn + Pb-Ag) y constituye, por su gran volumen, el sector de mayor relevancia económica. La mena principal es esfalerita y galena, que se presentan rellenando fracturas y cavidades, así como reemplazamientos masivos y disseminaciones. La ganga se ve conformada por fluorita (menos frecuente), ankerita-dolomita, siderita, baritina, caolín, magnetita, especularita y pirita, todos ellos alojados en fisuras y cavidades. Cerca de la zona de transición se han observado filigranas de plata nativa en cavidades y asociadas a siderita, así como zonas de reemplazamiento y asociaciones de calcopirita-galena-dickita en fractura.

En la fase de minado, programamos barrenos de 6,5 m de profundidad y 6³/₄" de diámetro, colocados cada 4,3 m en una dirección y 5 m en la perpendicular para extracción de mineral, y cada 5,50 × 6,80 m cuando se trata de desmonte. Una vez terminados los taladros, se cargan los explosivos y se realiza la voladura para fragmentar la roca. El mineral fragmentado se selecciona con una excavadora y se transporta en volquetes de 35 t de capacidad útil hasta la planta concentradora, ubicada a 8 km; la carga de material es efectuado con una pala-

cuchara de 10 m³. Por otro lado, para el material estéril, se conduce hasta el depósito de desmonte a 1.800m de distancia en camiones con caja de 25 m³ de carga útil.

Instalación del geófono

La Instalación del geófono cumple un papel importante en una prueba sísmica, ya que una buena instalación tiene una buena correlación en la recopilación de datos sísmicos, por ello se debe cumplir los siguientes procedimientos.

Preparación del Terreno (Proyecto de Voladura): delimitación del terreno donde se instrumentarán los geófonos deben responder al dominio geotécnico que se desea estudiar de manera geodinámica, incluye la perforación de los taladros donde serán empotrados.

Perforación de Taladros: se deben perforar taladros acordes a la necesidad de los cuales serán al menos dos taladros comprendidos para la instalación de los geófonos dicha distancia entre pozos debe ser como mínimo 5 metros de acuerdo a la fuente sísmica.

Instalación del Geófono Triaxial:

Preparación del Geófono: el geófono triaxial debe ser adecuado en cuanto al rango de frecuencia y capacidad máxima de lectura, asegurándonos que se encuentre calibrado y cuente con un desplazamiento menor a 2mm según ficha técnica.

Colocación en el Taladro: se coloca el geófono a una distancia específica acorde al objetivo del estudio, posteriormente se inyecta cemento esto para que el geófono se encuentre sólido en esa posición.

Conexión de Geófonos: se verifica que los cables del geófono no se encuentren dañados y respondan a la frecuencia especificada en la ficha técnica.

Configuración del Equipo de adquisición de datos: conectar los geófonos al sistema recolector de datos realizar la configuración de acuerdo a la sensibilidad de geófono y realizar pruebas de revisión y monitoreo.

Ejecución de Prueba: contando con una correcta instalación y configuración del sistema de monitoreo, podemos proceder a realizar la prueba sísmica.

Determinación de la velocidad de la onda-p (V_p) y la velocidad partícula

La determinación de la velocidad de onda P se obtiene a partir de la diferencia en el tiempo de arribo del tren de onda generado por la fuente sísmica y los geófonos instalados. Para cada una de las fuentes sísmicas fue estimado un valor de velocidad, a la vez que el valor a utilizar corresponde a la media de los valores obtenidos.

Para proteger la estabilidad de la obra, en geotecnia se aplica el Criterio de Daño de la Velocidad Pico de Partícula Crítica (PPVc) como parámetro de diseño y control de vibraciones. La evaluación de riesgos sísmicos para determinar el potencial de daño a estructuras y materiales en función de las velocidades de desplazamiento de las partículas del suelo durante un evento sísmico producto de una voladura.

Velocidad Pico de Partícula (PPV): Es la máxima velocidad que alcanza una partícula del suelo durante un evento sísmico, que se mide en milímetros por segundo (mm/s). Esta velocidad es un indicador clave de la intensidad de las vibraciones y su posible efecto sobre las estructuras.

Utilizar la velocidad de partícula como indicador ofrece un método práctico para estimar el grado de fracturamiento generado por la voladura. C.K. McKenzie a partir de la Ley de Hooke, relaciona la velocidad de partícula con la deformación dinámica inducida por tronadura como:

Ecuación de deformación de Mckenzie

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma_t}{E}$$

Donde:

ε = Deformación lineal inducida [mm].

V_p = Velocidad de la onda de compresión P [mm/s].

PPV = Velocidad de partícula crítica [mm/s].

σ_t = Resistencia a la tracción [MPa].

E = Módulo de Young [GPa].

Umbral de Daño: El PPVc establece límites o umbrales para la velocidad de las partículas, por encima de los cuales se considera que existe un riesgo significativo de daño a estructuras, rocas o instalaciones. Dado que los umbrales varían con el material y la configuración estructural, se emplea la ecuación de deformación de McKenzie y la Ley de Hooke (para ondas monodimensionales) en el macizo rocoso para calcularlos, obteniendo así:

Relación de PPV crítico, criterio de daño:

$$PPV_c = \frac{\sigma_t * V_p}{E}$$

Partiendo de las propiedades elásticas del macizo, podemos extrapolar y referirnos entorno a un halo de daño el cual se encuentra por encima del PPV_c, encontramos un área en el cual se está sobrepasando el límite de elasticidad y se está induciendo a una fragmentación intensa.

Existen diferentes criterios de Daño como autores, encontrando el más representativo el de Mackenzie:

Tabla 6. Criterio de daño Mckenzie

McKenzie	
Zona	Nivel de daño
4*PPV crítico (mm/s)	Intenso fracturamiento
PPV crítico (mm/s)	Nuevas fracturas
PPV crítico/4 (mm/s)	Extender fracturas

Procedimiento para determinar parámetros de perforación, voladura y los tiempos de detonación.

La determinación de parámetros de p&v parten entorno a la optimización de voladura generada en el modelamiento de vibraciones reduciendo el umbral de daño, optimizando la distancia entre taladros de contorno y carga del explosivo en kg. Asegurando el cuidado y constructibilidad de la banqueta geotécnica.

La determinación de tiempos óptimos de detonación se realiza a través de la onda semilla, también conocida como onda elemental, proceso por el cual se simula la amplificación de la onda encontrando el tiempo de detonación en el cual la amplificación o superposición constructiva de ondas es menor o incluso las ondas tienden a destruirse entre ellas.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

A. Modelar y analizar las vibraciones en campo cercano en un sector del Tajo Colquijirca - 2022.

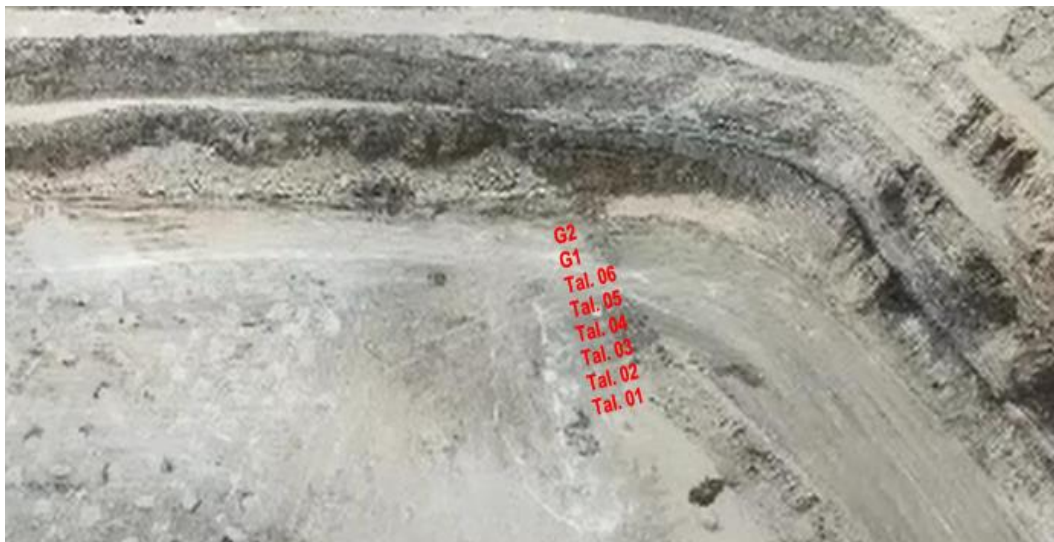
Ubicación de instrumentación y prueba

Uno de los primeros pasos en el desarrollo de este estudio de monitoreo de vibraciones y control de daño, es identificar la zona o dominio geotécnico de interés, donde las voladuras deberían tener mayor control, para lo cual, con el apoyo de los equipos de monitoreo, se determinó realizar en la Fase 9EC - nivel 4252.

Tabla 7. Ubicación de taladros de prueba y geófonos

ID	Diseño			Longitud del taladro	Kilos explosivo/tal.
	Este (m)	Norte (m)	Collar (m)		
Tal. 08	361625.453	8812116.65	4258	6	G02
Tal. 07	361625.504	8812111.64	4258	6.1	G01
Tal. 06	361625.555	8812106.62	4258	6.3	30
Tal. 05	361625.596	8812102.61	4258	6.5	50
Tal. 04	361625.642	8812098.1	4258	6.2	70
Tal.03	361625.688	8812093.58	4258	6.8	90
Tal.02	361625.739	8812088.57	4258	6.5	100
Tal. 01	361625.79	8812083.55	4258	6.8	120

Figura 4. Zona de prueba fase 9



Instrumentación y especificaciones técnicas:

GEÓFONO TRIAXIAL: INSTANTEL Minimate Pro.

RANGO MAXIMO DE MEDICIÓN: Hasta 2000mm/s.

FRECUENCIA NATURAL: 28Hz.

SENSIBILIDAD: 0.0016113 V/mm/s

Resistencia: 270 ohm.

Rango de Temperatura: -20°C / +70°C

Material: PVC

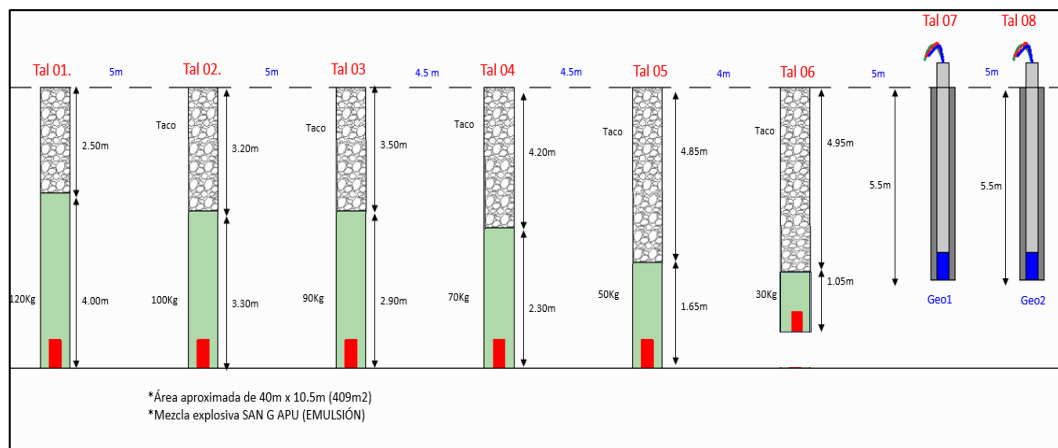
Longitud de Cable: 20 m.

Sismógrafo: Minimate Pro 6

Caja Universal: Para modelo Minimate Pro6.

CONFIGURACIÓN DE PRUEBA ESPECIAL.

Figura 5. Configuración de prueba especial



INSTALACIÓN DE GEÓFONOS (TECNICA CROSS HOLE)

Los sensores (geófonos triaxiales), son instalados dentro del taladro con diámetro 6 3/4" adheridos mediante una mezcla de cemento, de tal forma que estos queden de forma sólida a la roca permitiendo que el pulso de vibración

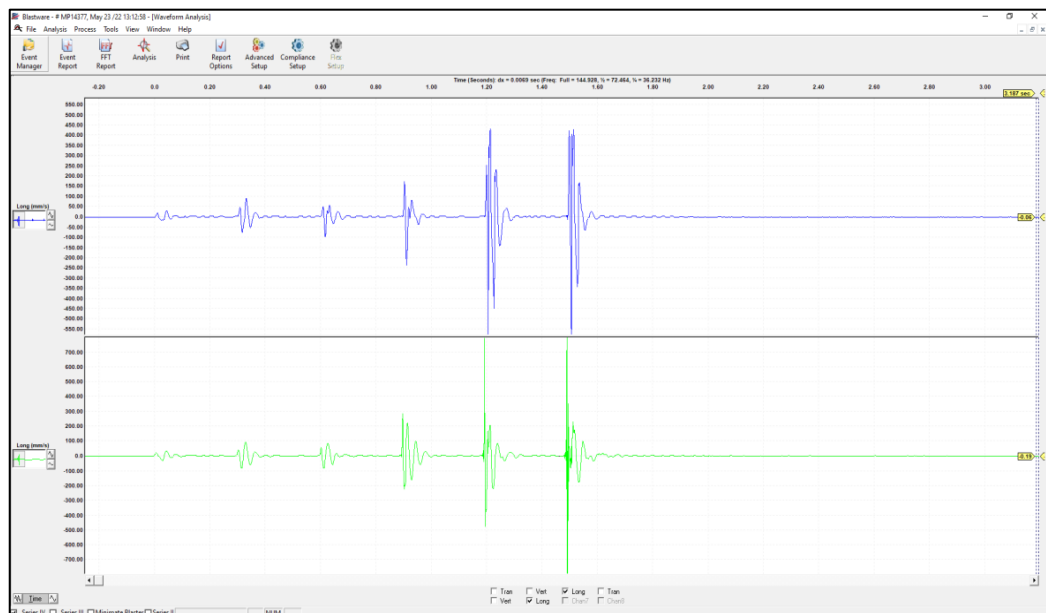
registrada refleje la calidad de onda que se requiere para ser analizado posteriormente.

MEDICIÓN Y RESULTADOS

El diseño consiste en la detonación de 6 taladros con fuentes sísmicas explosivas (Tal 01, Tal 02, Tal 03, Tal 04, Tal 05, Tal 06) y 02 taladros equipados con sensores triaxiales receptores (Tal 07, Tal 08).

A continuación, se muestra la identificación y análisis de vibraciones registradas producto de la detonación de las fuentes sísmicas explosivas.

Figura 6. Ondas registradas por sismógrafo



RESULTADO VECTO SUMA GEOFONO 01

RESULTADO VECTO SUMA GEOFONO 01

CALCULO DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DE CALERA MEDIO

Conociendo la velocidad a la que se propaga la Onda P (V_p), se puede obtener las velocidades de propagación de onda S (V_s); se estima en

aproximadamente 58% de la velocidad de onda V_p como se demuestra a continuación.

A partir de un estudio teórico del valor de velocidad V_p y V_s en un medio elástico, infinito isótropo y homogéneo, Udias (1986), toma de la segunda ley de Newton de la molécula para un medio continuo y obtiene las ecuaciones para obtener la velocidad de Ondas transversales S y longitudinales P .

$$V_p = ((\lambda + 2G)/\rho)^{1/2}$$

$$V_s = (G/\rho)^{1/2}$$

Donde:

ρ = es la densidad

λ = es la constante de Lamé

G = es el módulo de rigidez

Para los materiales que conforman nuestros planetas son aproximadamente igual ($\lambda = G$)

$$K = \lambda + (2/3)G$$

Por lo que se puede deducir que una disminución de este trae consigo una disminución mayor en la velocidad V_p que en la velocidad V_s .

$$V_p/V_s = ((\lambda + 2G)/G)^{1/2}$$

La velocidad V_p disminuye al reducirse este módulo.

Observase que para el caso de $\lambda = G$, reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$V_s = V_p/1.7321$$

$$V_p/V_s = 3^{1/2} = 1.7321$$

Usando el valor determinado en el cuadro resumen de velocidad de Onda P (1390.55 **$V_s = 1.4940 \text{ Km/s}$** m/s) reemplazando en la se obtiene la velocidad de la Onda S (VS)

Dado V_p , V_s y ρ , se procede al cálculo de las constantes elásticas: módulo de Young (E), módulo de corte (G) y razón de Poisson (ν), esenciales para modelar la respuesta del material:

Módulo de Bulk (K)

Módulo de Rigidez (G)

Módulo de Young de Macizo rocoso (E)

Relación de Poisson (ν)

Las constantes elásticas vinculan la magnitud de la deformación de un material con el esfuerzo que se le aplica, y resultan fundamentales porque aportan datos sobre la capacidad de las rocas para resistir cargas. Al ser propiedades cuantitativas, facilitan la proyección del comportamiento mecánico de los macizos rocosos y se incorporan directamente en el diseño de ingeniería: estas características alimentan los modelos matemáticos predictivos que permiten anticipar cómo responderán las estructuras construidas sobre o dentro de dichos macizos.

El coeficiente de Poisson (ν) cuantifica cómo varía la dimensión transversal de un cuerpo frente a su deformación longitudinal cuando se somete a una tensión perpendicular a esa sección. En esencia, describe la capacidad del material para acumular o liberar energía: un valor elevado de

ν implica un mayor almacenamiento energético, mientras que uno reducido favorece una fragmentación más eficaz bajo la misma carga.

Empleando las velocidades de las ondas sísmicas (V_p para ondas P y V_s para ondas S), ν puede obtenerse mediante la expresión:

$$\nu = \left(\frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right)} \right)$$

Módulo de Rigidez (G): Se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla.

A partir de las velocidades sísmicas se obtiene de la siguiente manera:

$$G = \rho V_s^2$$

El módulo de Young (E) cuantifica la rigidez de un material ante un esfuerzo de tracción: cuanto mayor es E, más oposición ofrecerá la roca a la compresión y dilatación generadas por los gases de la voladura. Mediante las velocidades sísmicas, su cálculo dinámico se expresa como:

$$E = 2 G (1 + \nu)$$

El módulo de compresibilidad o Bulk (K) cuantifica la rigidez del material frente a un esfuerzo volumétrico uniforme, y resulta clave para estimar cómo los gases generados en las discontinuidades impulsan la roca hacia el frente libre. Se calcula a partir de las velocidades sísmicas y la densidad según:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Tabla 8. Constantes de elasticidad

Estimación de Parametros Elástico (Dinamico)	
Realacion de Poisson (ν)	0.20
Modulo de Rigidez (G)	5.42 Gpa
Modulo de Young (E)	13.02 Gpa
Modulo de Bulk (K)	7.23 Gpa

Tabla 9. Parámetros de resistencia de la fase 9E

Parámetros de resistencia de la Fase 9E									
Tipo	Litología	Densidad Seca	RCU (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia al corte de estratos débiles		Resistencia de las discontinuidades		
		(g/cc)			cohesión (KP)	Fricción (°)	Tipo	Cohesión (KPa)	Fricción (°)
Roca	Caliza	2.43	60	3.1	-	-	Natural	92	29.5
Estrato débil	Limoarcilla	2.16	17	-	12	13	-	-	-

Tabla 10. Constantes elásticas

Constantes elásticas		RQD	RMR _B	GSI	Frecuencia de fracturamiento (f/m)	
Módulo de Young (Gpa)	C. Poisson					
21.04	0.24	25 a 50	31 a 40	26 a 35	6.4	14f/2.2m
-	-	<25	21 a 30	21 a 30	16.9	11f/0.65m

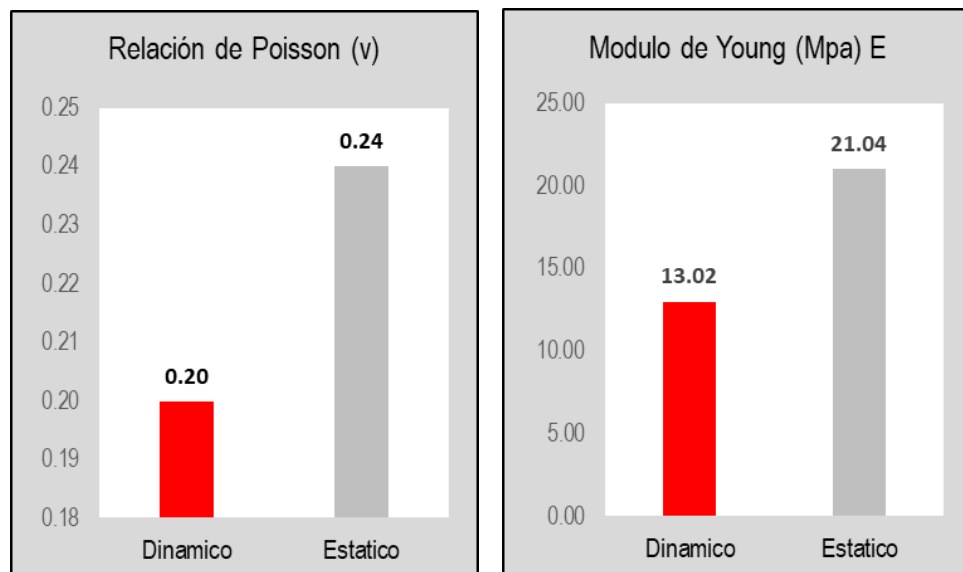
Tabla 11. Mapeo estructural

Mapeo estructural						
Sistema	Dip (°)	Dipdir (°)	Sistema	Comentario		
S-1	15°	120°	Principal	Estrato Débil, potencia de 0.3m espaciado al siguiente estrato 0.65m		
S-2	80°	5°	Secundario	Diaclasa		
S-3	75°	230°	Secundario	Diaclasa		

Fuente: Información de Roca Intacta (Minera Brocal)

RESUMEN DE PARAMETROS

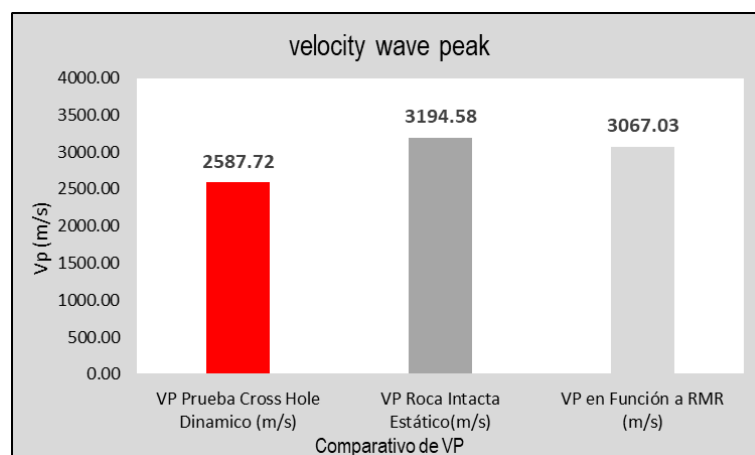
Figura 7. Resumen de parámetros Poisson y Young



CORRELACIÓN DE ÍNDICE DE VELOCIDAD RELATIVA

El efecto de las discontinuidades en un macizo puede estimarse comparando la velocidad de onda de compresión in situ con la velocidad sónica en laboratorio para un núcleo extraído de la misma roca. La diferencia entre estas velocidades se debe a las discontinuidades del macizo; el cociente de estas como criterio de calidad fue propuesto por Onodera en 1995 y se expresa de la siguiente manera.

Figura 8. Comparativo de velocidades



Por lo tanto, el índice de velocidad relativa es: 0.656

Tabla 12. *Calidad de macizo rocoso respecto al índice de velocidad relativa*

Calidad del macizo rocoso	RQD	Índice de velocidad relativa
Muy mala	0 - 25%	< 0.2
Mala	25 - 50%	0.2 - 0.4
Media	50 - 75%	0.4 - 0.6
Buena	75 - 90%	- 0.8
Muy buena	90 - 100%	>0.8

DETERMINACIÓN DE LA UMBRAL DE DAÑO

Se determinan las velocidades de las partículas a partir de V_p de la onda P, lo que permite elaborar una tabla con el rango de velocidad de partícula crítica y el tipo de daño asociado. Para ello se toma como referencia una resistencia a la tracción de 3,1 MPa y se calcula la velocidad de partícula pico crítico (PPVc), definida como el umbral a partir del cual comienza a producirse daño incipiente. Asimismo, para estimar el nivel de daño más severo, se utiliza habitualmente un valor aproximado de cuatro veces el PPVc ($4 \times \text{PPVc}$). De este modo, la tabla muestra tanto el PPVc como el umbral de daño intenso correspondiente.

Tabla 13. *Rango de velocidades de partícula crítica*

Criterio	Rango de Vibraciones (mm/s)	Efecto
< $1/4 \times \text{PPVc}$	77	No Genera Daño
$1/4 \times \text{PPVc}$	154	Extencion de Fracturas
PPVc	616	Creacion de Nuevas Fracturas
$4 \times \text{PPVc}$	2465	Intenso Fracturamiento
$8 \times \text{PPVc}$	4930	Fragmentación

Los valores de V_{pp} que aparecen en la tabla de rangos de velocidad crítica y tipo de daño pueden no coincidir con los que suelen citarse en la bibliografía técnica. Esta discrepancia evidencia la necesidad de definir, para cada macizo rocoso concreto, los umbrales de daño específicos, y dependen de las características geomecánicas del macizo, estas estimaciones deben realizarse de forma independiente en cada mina y en cada dominio geomecánico dentro de la misma.

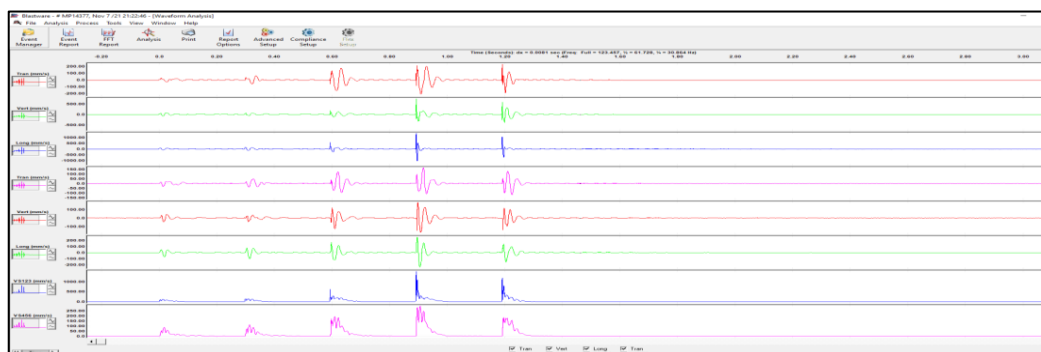
Los datos de Velocidad de Partícula Crítica aquí presentados deben tomarse como guía inicial y validarse con registros detallados en terreno (*in-situ*), para establecer con precisión la tolerancia del macizo rocoso a las vibraciones estimadas.

MÁXIMA AMPLITUD

Los datos obtenidos generan gráficos de velocidad de partícula versus tiempo donde debería ser perfectamente identificable cada detonación. La amplitud de la onda, a diferencia de la V_p , se ve influenciada por el número de fracturas de la roca debido a los fenómenos de reflexión y refracción con resultado de una alta pérdida de energía en la transmisión.

De los 3 ejes grabados, el dato que se extraerá es el máximo peak obtenido.

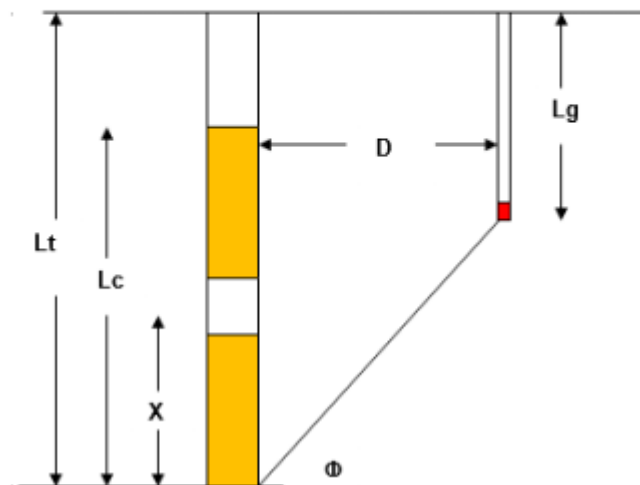
Figura 9. Máximas amplitudes de ondas en los tres ejes y Vector Suma



MODELO CAMPO CERCANO (HOLMBERG & PERSSON)

La velocidad vibracional de las partículas está vinculada con la capacidad de generar nuevas fracturas, pues existe una relación directa entre la velocidad de partícula y la deformación inducida. Este efecto es más notable en las inmediaciones de los taladros, donde el impacto de la voladura alcanza su máxima intensidad. En este marco, la vibración puede entenderse como deformación o esfuerzo aplicado al macizo rocoso. Se habla de “campo cercano” para referirse al área próxima a una columna de explosivo normalmente hasta unas cinco veces la longitud de carga, en la cual es muy probable que se produzca daño en la roca.

$$PPV = K\gamma^{\alpha} \left[\int_0^{L_c} \frac{dx}{\left[D^2 + (DTan\phi - x)^2 \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^{\alpha}$$



Dónde:	D:	Distancia del taladro al geófono.
	Lg:	Profundidad a la que se encuentra el geófono.
	Lt:	Profundidad del taladro
	Lc:	Longitud de carga explosiva.
	X:	Longitud de carga explosivo que ha detonado.
	Φ :	Angulo entre la horizontal, fondo del taladro y el geófono.
	We:	Peso de explosivo en el taladro

Con base en el estudio de la configuración de la voladura y la forma de onda, se desarrolla un modelo de vibraciones para el factor H&P con los niveles vibracionales vinculado al campo cercano. La constante K representa tanto la difusión de la presión de detonación y la intensidad del esfuerzo aplicado a la materia, como las propiedades del terreno, al depender de la impedancia conjunta roca-explosivo. Del mismo modo, K refleja la dispersión geométrica del frente de onda a medida que se propaga, considerando que las frecuencias altas se atenúan más rápidamente que las bajas mediante mecanismos inelásticos.

Del modelo presentado debemos hallar los coeficientes de intercepto (K), valor que depende de la geometría de la carga (β) y factor de decaimiento.

Se genera un diagrama log-log en el que el eje X recoge el logaritmo de la distancia escalada y el eje Y el logaritmo de la PPV medida in situ. A continuación, se traza una línea recta para describir la tendencia de cómo varía la PPV con la distancia.

El valor de K (intercepto) será el valor de la intersección de la recta con el eje de las Y.

El valor de a es la pendiente de la recta graficada.

$$\beta \approx 2 \alpha$$

Realizando una aproximación:

BASE DE DATOS DE PRUEBA ESPECIAL

A continuación, se muestra resumen de los parámetros aplicados en la prueba especial, de cuales se obtuvo base de datos para el análisis.

Tabla 14. BD de configuración de los taladros de Prueba

		Profundidad Geofono (m)	Profundidad Taladro (m)	Longitud Carga (m)	Distancia al Monitor (m)	Carga (kg)	PPV (mm/s)
G2	TAL. 06	6.00	6.30	1.05	10.0	30	856.51
	TAL. 05	6.00	6.50	1.65	14.0	50	682.09
	TAL. 04	6.00	6.20	2.31	18.5	70	249.17
	TAL. 03	6.00	6.80	2.96	23.0	90	129.25
	TAL. 02	6.00	6.50	3.30	28.0	100	116.8
	TAL. 01	6.00	6.80	3.94	33.0	120	31.92
G1	TAL. 06	6.10	6.30	1.05	5.0	30	2342.00
	TAL. 05	6.10	6.50	1.65	9.0	50	1540.00
	TAL. 04	6.10	6.20	2.31	13.5	70	493.00
	TAL. 03	6.10	6.80	2.96	18.0	90	102.00
	TAL. 02	6.10	6.50	3.30	23.0	100	91.00
	TAL. 01	6.10	6.80	3.94	28.0	120	39.00

Como se observa la calidad de ajuste es de 0.90% haciendo más confiable el modelo de campo cercano con 12 número de puntos.

MODELO DE CAMPO CERCANO FASE 9 E NV 4252

El modelo de campo cercano que se va a considera es para cuidar la zona estudiada

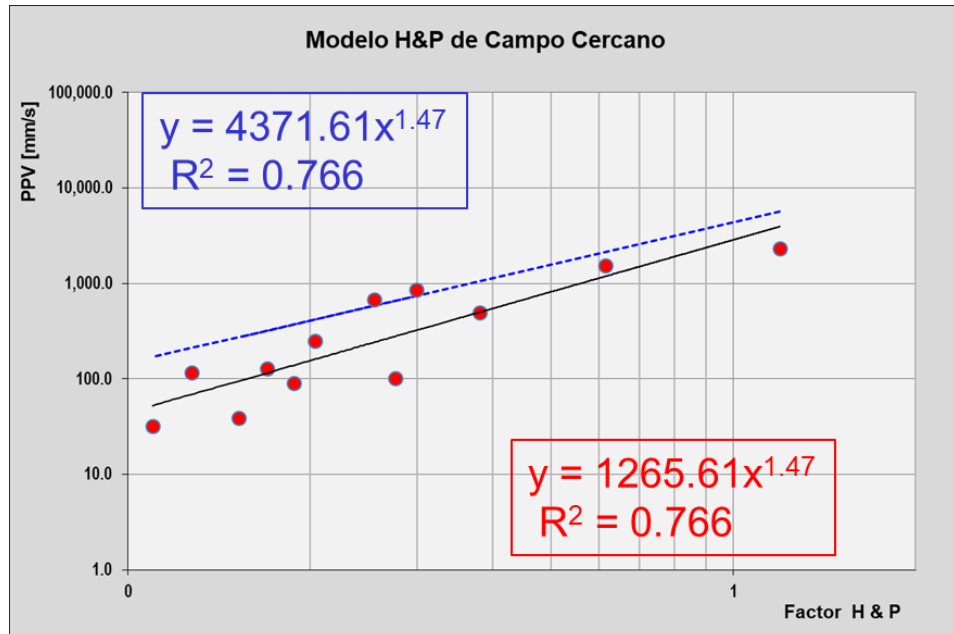
Tabla 15. Constantes de atenuación

K - 90%	4371.61
K - 50%	1265.61
Beta	-2.946
Alfa	1.473
(R^2)	0.77

Modelo Original: Con un 50% de Confianza $PPV_{(50\%)} = 1,265.61 (FH\&P)^{1.47}$
 $\alpha = 1.47$; $K = 1,265.61$

Modelo Ajustado: Con un 90% de Confianza $PPV_{(90\%)} = 4,371.61 (FH\&P)^{1.47}$
 $\alpha = 1.47$; $K = 1,265.61$

Figura 10. Zona Regresión Lineal (Modelo H&P) Fase 9E Nv 4252



En el grafico muestra el Modelo de Holmberg & Persson de la Fase 9E Nivel 4252, donde los datos de terreno se muestran como rombos azules, el Modelo Original con un 50 % de Confianza como Línea Azul, el Modelo Ajustado con un 80% de Confianza como Línea Punteada Roja; recordemos que este Modelo Ajustado podrá cubrir una mayor cantidad de datos de terreno haciendo más confiable y segura la estimación de vibraciones.

B. Determinar la velocidad de la onda-p (V_p) y la velocidad partícula crítica que responde a las propiedades geotécnicas del macizo rocoso en un sector del Tajo Colquijirca

Es importante conocer la velocidad de la onda-p ya que con esta información podemos encontrar el límite elástico al que podemos someter al macizo rocoso antes de un fallamiento o fracturamiento.

Por ello en el monitoreo realizado mediante un ensayo de cross hole en un sector del Tajo Colquijirca con la finalidad de obtener la medición V_p en el sector caracterizado.

Parte de la configuración de instrumentación y monitoreo se utilizó la técnica del cable trigger conocido como un interruptor que sincroniza la adquisición de datos con el instante exacto de la detonación.

La tabla indica la determinación - velocidad de onda p (V_p).

Los geófonos se instalaron a una distancia de 5.5m desde el collar del taladro, la cual ayuda a una mejor recepción de la onda en el eje radial, eje por el cual se realiza la estimación de V_p .

El registro del tiempo de arribo GTX1- GTX2 producto de la detonación de cada fuente sísmica (Tal 01, Tal 02, Tal 03, Tal 04) y la diferencia de llegada entre los dos geófonos, contando con la distancia entre geófonos se halló la velocidad de onda V_p .

Figura 11. Prueba 01- arribo de la primera onda, registro de la detonación de taladro P5

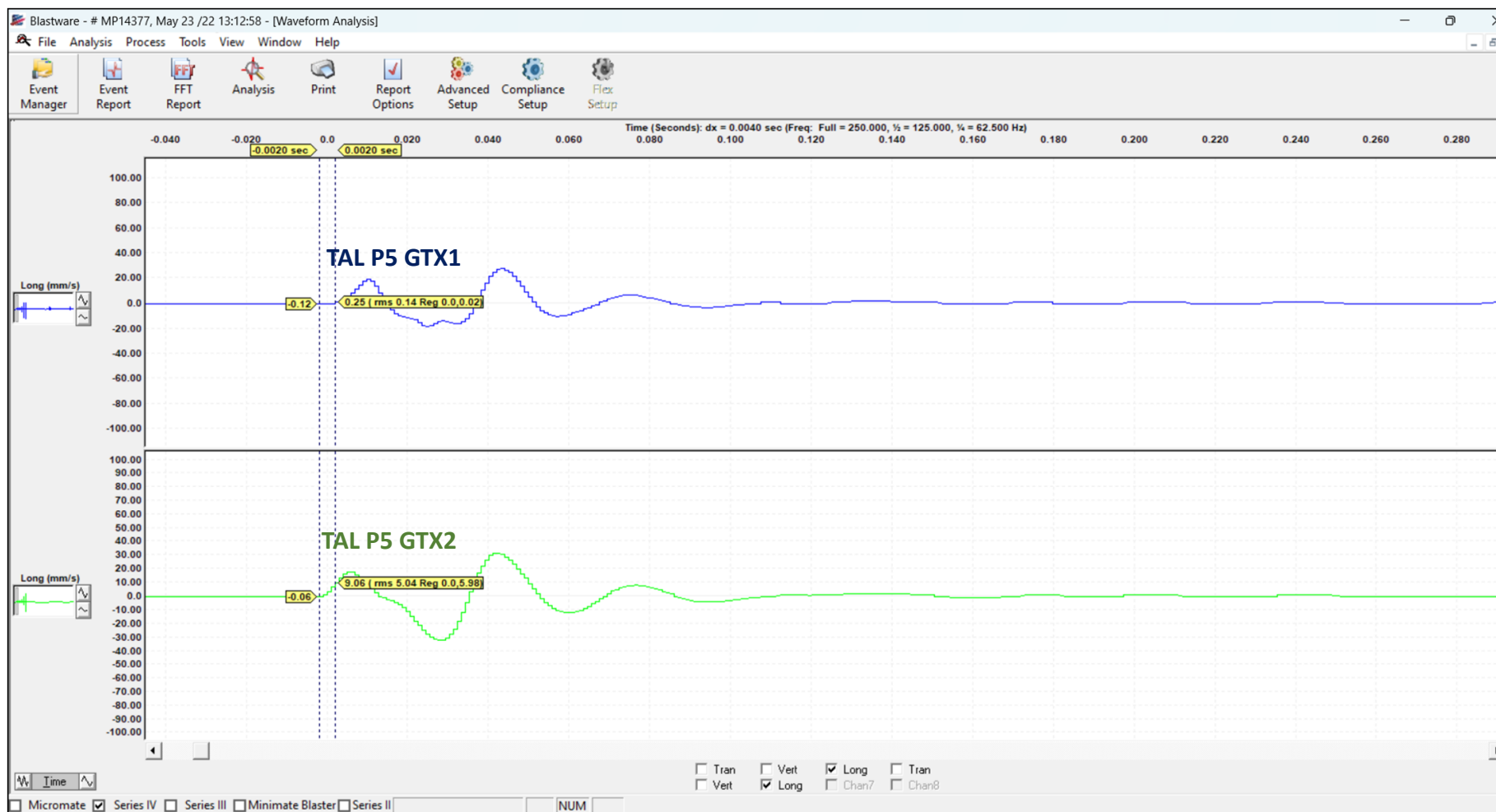


Figura 12. Prueba 02- arribo de la segunda onda, registro de la detonación de taladro P4

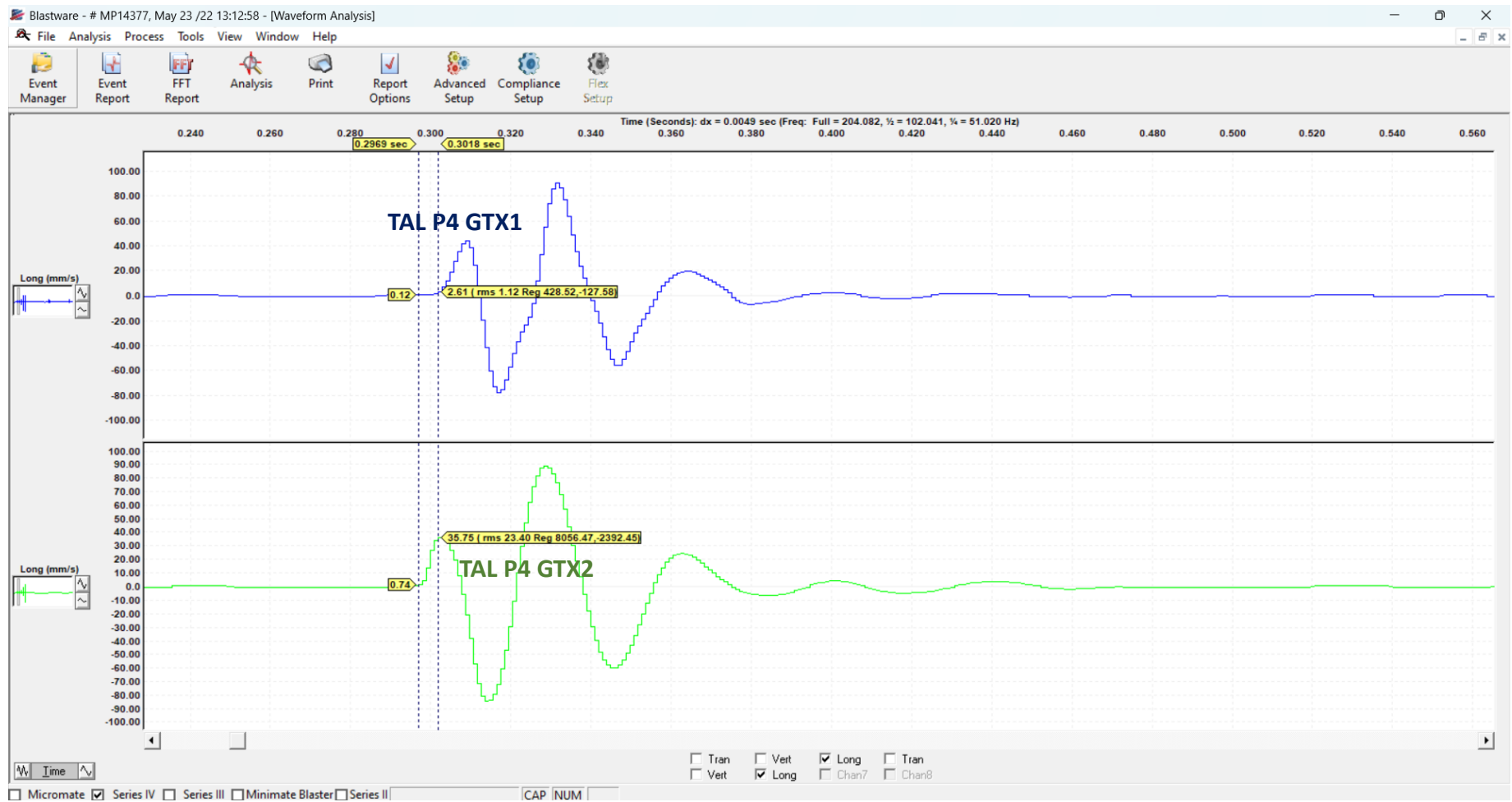


Figura 13. Prueba 03- arribo de la tercera onda, registro de la detonación de taladro P3

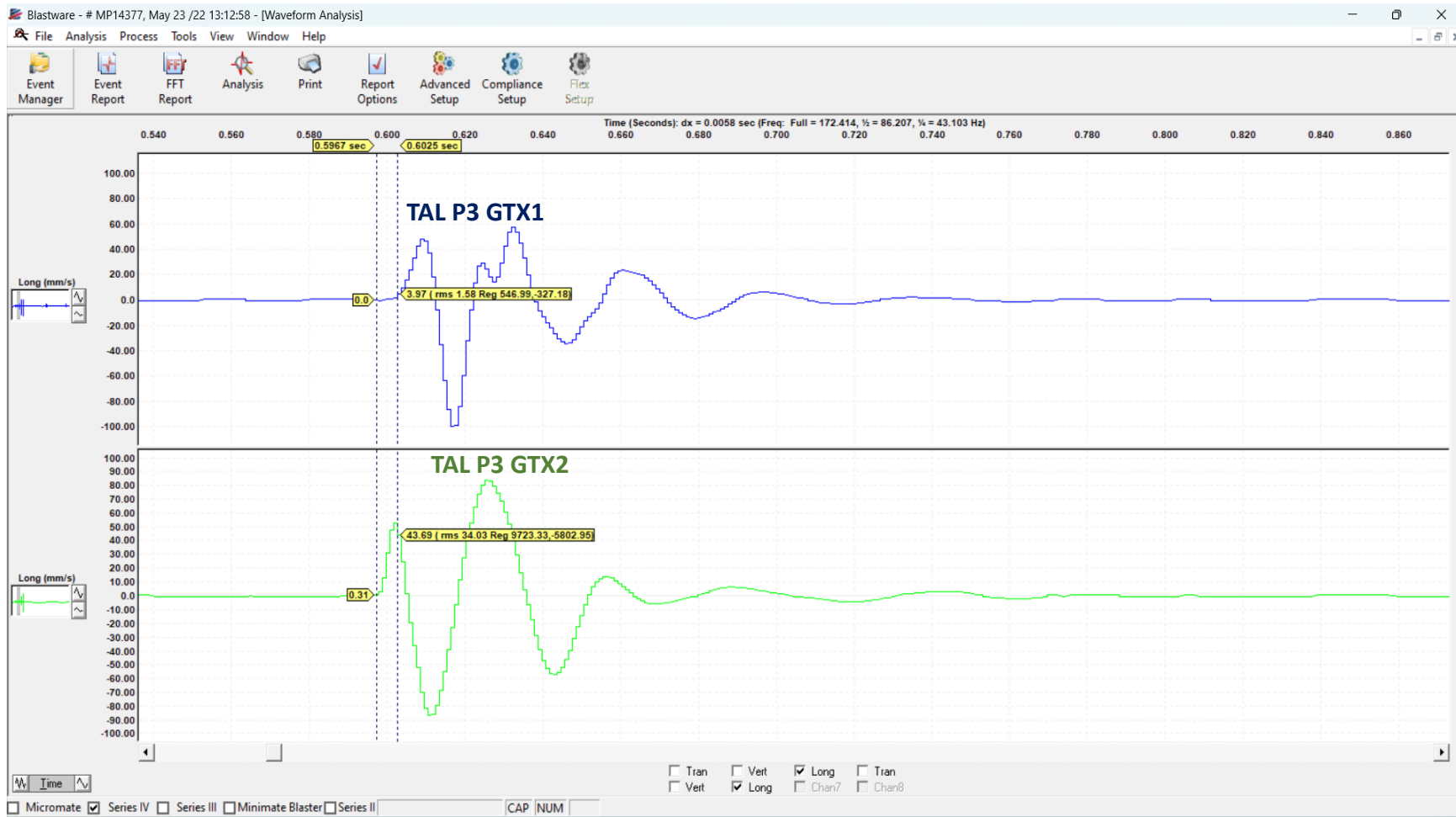


Figura 14. *Secuencia de Detonación de Taladros de Prueba*



Tabla 16. *Resultado de velocidad de onda*

# Prueba	Tiempo Onda 01 (seg.)	Tiempo Onda 02 (seg.)	Tiempo de Arribo (seg.)	Distancia (m.)	Onda P (m/s)
Tal. 01	-0.0010	0.0010	0.0020	5.0	2500.00
Tal. 02	0.2979	0.2998	0.0019	5.0	2631.58
Tal. 03	0.5977	0.5996	0.0019	5.0	2631.58
Velocidad de Onda (Vp)					2587.72

C. Determinar parámetros de perforación y voladura alternativos que reducirán los efectos adversos de Vibraciones en un sector del Tajo Colquijirca

Gracias al desarrollo de estos modelos se diseñaron ábacos prácticos que permiten, de manera sencilla, establecer los límites de vibración admisibles para dimensionar las cargas explosivas en función de la distancia, basándose en los hallazgos obtenidos durante la fase de evaluación del daño al macizo rocoso.

Para un mayor entendimiento del fenómeno se recomienda realizar simulaciones que tomen en consideración los tiempos de detonación.

A continuación, se muestra grafico que representa un ábaco parametrado de las cantidades de carga explosiva, además las magnitudes que pueden servir de referencia o límite máximo de vibraciones al talud.

Tabla 17. Carga mínima y Abaco de diseño según la carga explosiva

	Tal. AM Carga Max	Tal. AT Carga Min	Tal. PP Carga Min	Tal. PP Carga Max.
Distancia [m]	San G APU @ 1.3033m Carga en 6 3/4 pulg.	San G APU @ 1.635m Carga en 6 3/4 pulg.	San G APU @ 2.916m Carga en 6 3/4 pulg.	San G APU @ 3.23m Carga en 6 3/4 pulg.
3.00	10822	15126	32435	125419
4.00	4718	6593	14642	57380
5.00	2465	3444	7790	30760
6.00	1447	2022	4621	18333
7.00	922	1287	2962	11784
8.00	623	870	2011	8017
9.00	441	616	1427	5698
10.00	323	452	1049	4195
11.00	244	341	794	3178
12.00	189	264	616	2465
13.00	150	209	487	1951
14.00	120	168	392	1570
15.00	98	137	320	1283
16.00	81	113	265	1062
Longitud de Carga	1.30	1.64	2.92	3.23
Kg / Taladro	39.66	49.76	88.74	98.30

Figura 15. Perfil de diseño de malla

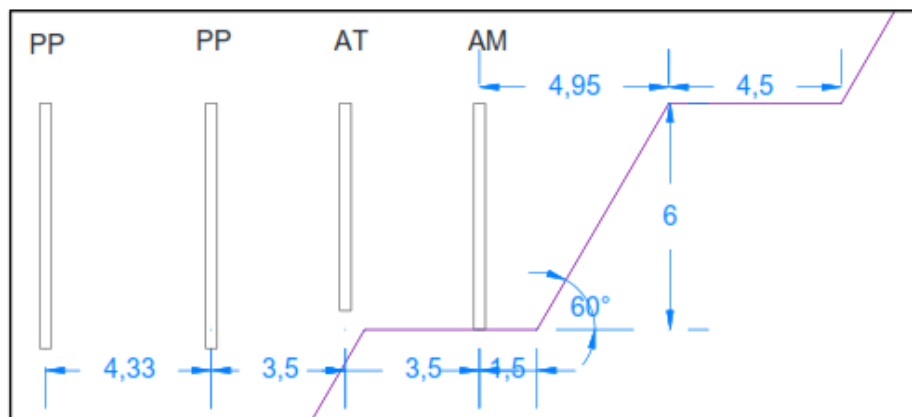


Figura 16. Abaco de diseño como función de carga explosiva

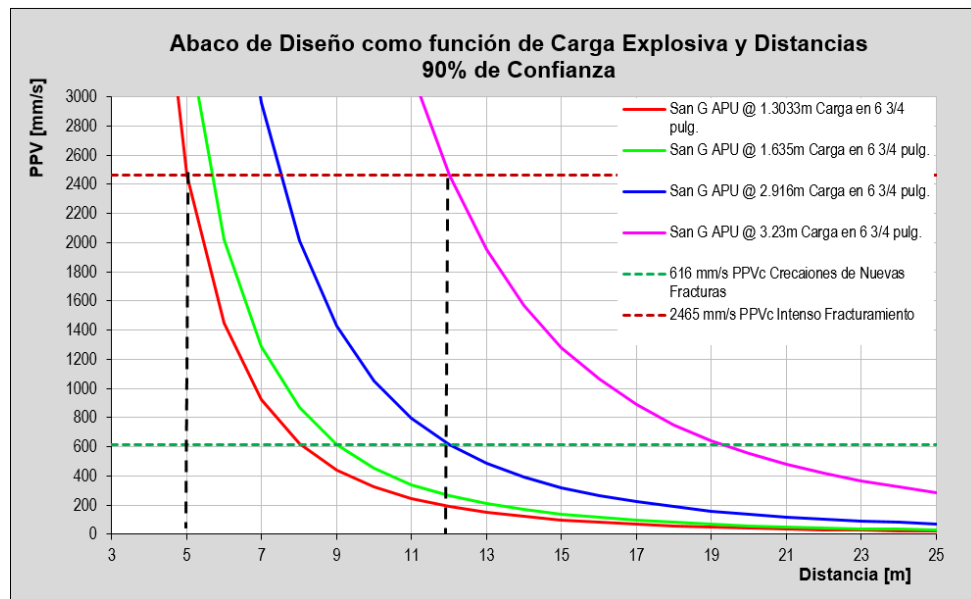


Figura 17. Configuración de malla

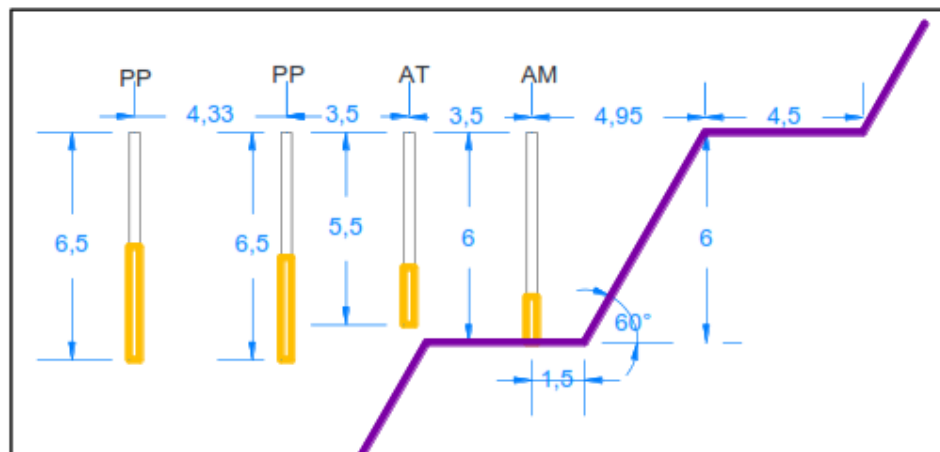


Figura 18. Configuración de carga

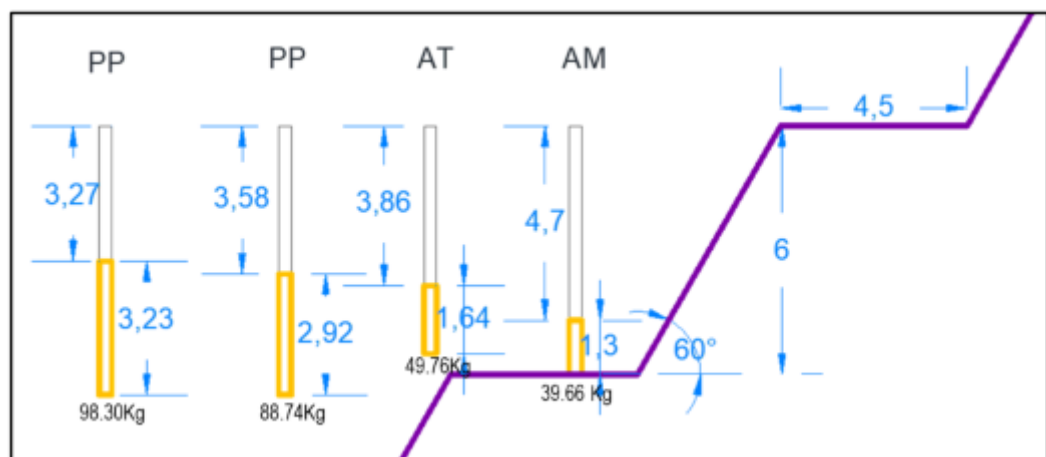
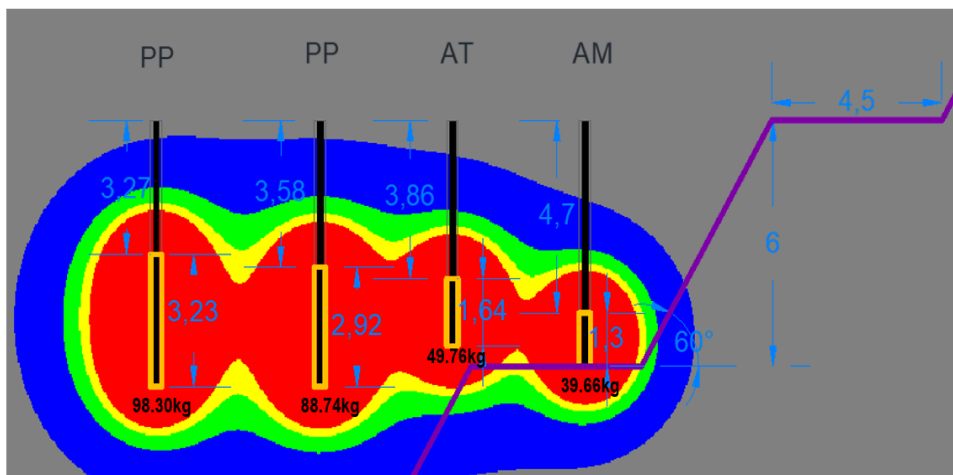


Figura 19. Análisis de daño

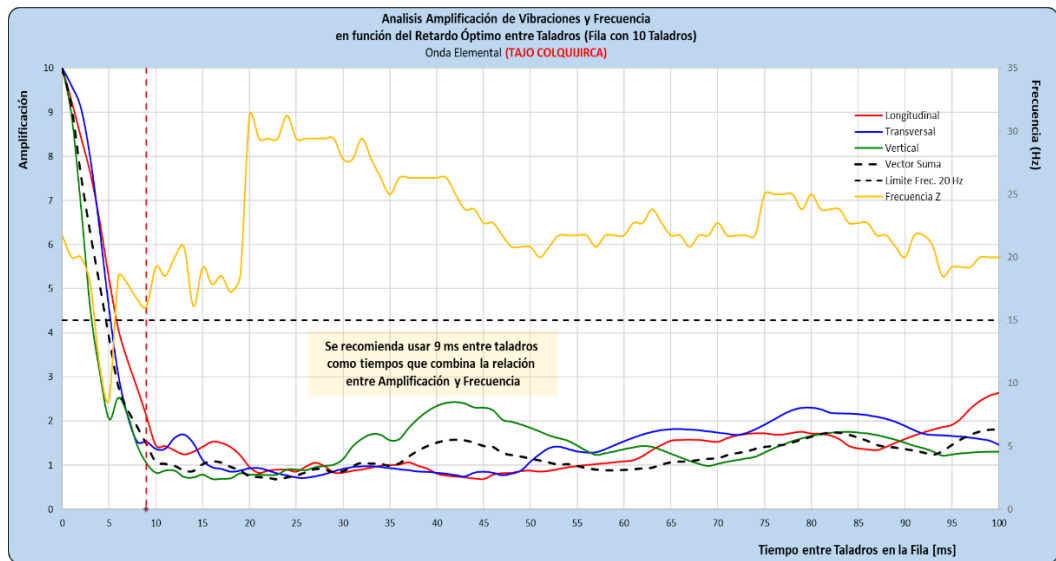


D. Determinar los tiempos de detonación efectivos de detonación que reducirán los efectos adversos de vibraciones en un sector del Tajo Colquijirca.

La estimación de los tiempos óptimos busca identificar el retardo adecuado entre taladros para minimizar el acoplamiento de ondas y reducir la interferencia constructiva, reduciendo al máximo la interferencia constructiva. En una simulación típica de 10 taladros en una fila, se verifica que valores de 0 a 9 ms conllevan acoplamientos de 10 a 1.5 taladros equivalentes respectivamente.

Se recomienda 9 ms como tiempo óptimo entre taladros, el cual combina la amplificación (acoplamiento) y frecuencia para de esta forma disminuir la superposición de onda.

Figura 20. *Análisis amplificación de vibraciones y frecuencia en función del retardo*



4.3. Prueba de hipótesis

Hipótesis general:

H_i: Al analizar las vibraciones en campo cercano producto de la voladura, se determina el umbral de daño permisible para un sector del Tajo Colquijirca.

H₀: Al analizar las vibraciones en campo cercano producto de la voladura, no se determina el umbral de daño permisible para un sector del Tajo Colquijirca.

Para validar la hipótesis general, se realizó una regresión lineal simple entre el logaritmo de la distancia escalada y el logaritmo de la velocidad pico de partícula (PPV). El resultado mostró un coeficiente de correlación $R = 0.822$ y un valor de significancia de $p = 0.001$, lo que evidencia una relación significativa y directa entre ambas variables. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna: las vibraciones en campo cercano permiten determinar el umbral de daño permisible en el sector evaluado. Los datos se encuentran en el Anexo 4.

Hipótesis específicas:

Respecto a la primera hipótesis específica, se aplicó una prueba t para una muestra sobre la velocidad de onda P (V_p) y la velocidad pico crítica de partícula (PPVc). Para la V_p , la media obtenida fue de 1414.53 m/s, significativamente menor al valor de referencia (1500 m/s), con una $p = 0.002$. En el caso de la PPVc, la media fue de 342.30 mm/s, sin diferencia significativa respecto al valor teórico ($p = 0.089$). Estos datos se detallan en el Anexo 5.

Para la segunda hipótesis específica, se aplicó una prueba t para muestras relacionadas, comparando los valores de PPV antes y después de implementar la voladura de contorno. Se evidenció una reducción significativa ($p < 0.001$), confirmando que los nuevos parámetros permiten mitigar los efectos vibratorios adversos. Los datos se encuentran en el Anexo 6.

Finalmente, respecto a la tercera hipótesis específica, se realizó una regresión entre el tiempo de retardo entre taladros y el acoplamiento de ondas. Aunque se observó una tendencia negativa, la relación no fue estadísticamente significativa ($p = 0.451$), por lo que no se pudo validar plenamente esta hipótesis.

Los datos se encuentran en el Anexo 7.

4.4. Discusión de resultados

El análisis de las vibraciones en campo cercano generadas por voladuras en el tajo Colquijirca ha permitido obtener una visión detallada acerca de los posibles efectos que pueden tener en estructuras próximas y su entorno geológico inmediato. Los resultados obtenidos han sido contrastados con límites normativos y criterios de aceptabilidad de vibraciones establecidos en estudios previos y normativas nacionales e internacionales.

Los datos registrados en los puntos de monitoreo han mostrado que las vibraciones generadas por las voladuras pueden alcanzar valores críticos en ciertas zonas, superando en algunos casos los límites recomendados por normativas como la USBM (United States Bureau of Mines) y la DIN 4150-3. Sin embargo, en otros puntos los valores se mantuvieron dentro de rangos aceptables. Estos resultados sugieren que la geología del sector y la configuración de la voladura juegan un papel fundamental en la transmisión y atenuación de las ondas vibratorias.

Uno de los hallazgos más relevantes ha sido la identificación de una correlación significativa entre la carga de explosivo por retardo y la intensidad de las vibraciones registradas. Se observó que a medida que la carga de explosivo por retardo aumenta, las velocidades de partícula medida (PPV) también se incrementan, lo que confirma la necesidad de optimizar los diseños de voladura para minimizar sus efectos adversos. En respaldo a ello, el análisis de regresión lineal simple (véase Anexo 01) demostró una relación estadísticamente significativa entre la distancia escalada y los valores de PPV ($R = 0.822$; $p < 0.05$), validando el modelo predictivo propuesto para estimar el umbral de daño permisible en el macizo.

Asimismo, el modelamiento de las vibraciones a través de métodos matemáticos y simulaciones numéricas permitió predecir el comportamiento de las ondas en función de distintos parámetros de voladura. Los modelos desarrollados mostraron una buena correlación con los datos reales, lo que valida su aplicabilidad para la planificación de futuras voladuras en la zona. Se destaca que el ajuste de los modelos empíricos como el de Ambraseys-Hendron y el de Langefors-Kihlström permitió estimar con mayor precisión las PPV en relación

con la distancia y la energía liberada. Además, los ensayos realizados para determinar la velocidad de onda P (V_p) y la velocidad de partícula crítica (PPV_c) indicaron que los valores obtenidos difieren significativamente de los valores teóricos de referencia utilizados (véase Anexos 02 y 03), lo que evidencia la particularidad del macizo rocoso del Tajo Colquijirca y la necesidad de determinar estos parámetros in situ.

Desde una perspectiva práctica, los resultados obtenidos permiten proponer estrategias de mitigación como la reducción de la carga explosiva por retardo, el uso de retardos intermedios adecuados y la implementación de barreras de disipación de energía. Estas estrategias han sido evaluadas mediante simulaciones y pruebas piloto, mostrando una reducción efectiva en la magnitud de las vibraciones. En particular, los análisis estadísticos aplicados antes y después de implementar nuevos parámetros de perforación y voladura evidenciaron una disminución significativa en los niveles de PPV ($p < 0.001$; ver Anexo 04), reforzando la eficacia de las medidas adoptadas. En contraste, la regresión entre el tiempo de retardo y el nivel de acoplamiento de onda no mostró significancia estadística ($p > 0.05$; Anexo 05), lo cual sugiere la necesidad de seguir investigando la influencia de este factor en condiciones variables de campo.

En síntesis, la investigación ha proporcionado un marco sólido para comprender la propagación de vibraciones en el tajo Colquijirca y ha permitido identificar medidas concretas para minimizar su impacto. Sin embargo, se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar los efectos a largo plazo y validar las estrategias de mitigación en distintas condiciones geológicas y operativas.

CONCLUSIONES

- El estudio realizado en un sector del Tajo Colquijirca permitió modelar y analizar las vibraciones en campo cercano, empleando instrumentación especializada con el modelo Holmberg & Persson. Gracias a este enfoque, se lograron identificar zonas críticas con mayor riesgo de daño, lo que a su vez permitió proponer soluciones operativas orientadas a reducir los efectos negativos de las voladuras, optimizando el proceso y reforzando la seguridad del macizo rocoso.
- En el transcurso del trabajo se obtuvo una velocidad promedio de 1390.55 m/s para la onda P (V_p), un dato que permitió calcular las propiedades elásticas del macizo, como la relación de Poisson, módulo de rigidez y el módulo de Young. También se identificó un valor referencial para PPVc, el cual marca el punto a partir del cual la roca empieza a mostrar signos de daño. Se estimó que, al superarse cuatro veces este valor, el nivel de fragmentación en la roca puede considerarse severo.
- En el desarrollo del segundo objetivo específico, se identificaron nuevas alternativas en los parámetros de perforación y voladura que permiten minimizar los efectos adversos de las vibraciones. A través del análisis de las mallas, las cargas por columna y su distribución, se elaboró un ábaco de diseño donde se observa la relación entre la cantidad de carga explosiva utilizada y los límites máximos permitidos de vibración. Esta herramienta resulta clave para mejorar la estabilidad de los frentes de trabajo y tomar decisiones más acertadas durante la operación.
- En el análisis realizado, se observó que un retardo de 9 milisegundos entre taladros es el más adecuado para evitar la amplificación de las ondas por superposición y reducir el acoplamiento destructivo. Este tiempo de retardo optimiza la fragmentación, mientras que también ayuda a limitar la propagación de vibraciones que podrían dañar el macizo rocoso.

RECOMENDACIONES

- Como recomendación general, se plantea aplicar de forma constante el modelo ajustado obtenido durante el estudio, junto con las constantes de atenuación específicas del área. Esto permitirá una mejor planificación de futuras voladuras, con mayor control sobre el daño en sectores que presentan sensibilidad geotécnica.
- Como recomendación, se sugiere llevar a cabo campañas de medición de V_p y PPVc de manera periódica en los diferentes sectores del tajo. Esto permitirá actualizar los modelos de daño con información actual y mantener un control más preciso de las voladuras, priorizando siempre la estabilidad estructural de bancos y taludes.
- Se sugiere utilizar los ábacos como parte habitual en la planificación de voladuras. Ajustar las cargas explosivas según la cercanía a estructuras sensibles y el tipo de roca permitirá un control más preciso de las vibraciones, favoreciendo tanto la seguridad como el rendimiento operativo.
- Se recomienda implementar este retardo de 9 milisegundos entre taladros en las voladuras de producción en campo cercano. Esta medida no solo mejora el control sobre las vibraciones, sino que también protege la integridad del macizo, sin comprometer la eficiencia en la fragmentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afanasev, P., & Makhmudov, K. (2021). Assessment of the Parameters of a Shock Wave on the Wall of an Explosion Cavity with the Refraction of a Detonation Wave of Emulsion Explosives. *Appl. Sci.*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/app11093976>
- ASIEX. (2018). Fragmentación & explosivo de alta VOD & minería sustentable. Chile: ASIEX. <https://vbook.pub/documents/publicaciones-asiex-2018pdf-x25dp8qk09wp>
- Bakhtavar, E., & Yousefi, S. (2019). Análisis del riesgo de vibración del suelo en infraestructuras mineras: integrando un modelo de medida basado en holgura difusa y un análisis de los efectos de falla. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(1), 6065-6076. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-018-2008-0>
- Bernaola, A., Castilla, J., Herrera, J., & Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. http://oa.upm.es/cgi/oai2?verb=GetRecord&metadataPrefix=oai_dc&identifier=oai:oa.upm.es:21848
- Brantson, E., Appiah, T., Alhassan, I., Dzomeku, G., Boateng, E., Takyi, B., Sibil, S., Duodu, E., & Kobi, A. (2023). A Comprehensive Review of Traditional, Modern and Advanced Presplit Drilling and Blasting in the Mining and Construction Industries. *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 25(2), 87-97. <https://doi.org/10.21608/jpme.2024.208017.1161>
- Cabezas Mejía, E., Andrade Naranjo, D., & Torres Santamaria, J. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15424/1/Introduccion%20a%20la%20Metodologia%20de%20la%20investigacion%20cientifica.pdf>

Castillo, E., & Roa, C. (2021). Defining Geological Maturity: The Effect of Discoveries On Early-Stage Mineral Exploration. . *Resources Policy*.

Chen, M., Ye, Z., Wei, D., Lu , W., & Yan, P. (2021). The movement process and length optimization of deep-hole blasting stemming structure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104836>

Chen, Y., Zhao, J., & Cao, D. (2020). Optimal design of presplit blasting network of deep concave open-pit mine slope with heterogeneous complex rock mass. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 555. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/555/1/012072>

Cornejo, A., & Huamán, P. (2020). *Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras de una mina superficial en proceso de cierre*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17665/CORNEJO_CHACON_PAUL_ESTIMACION_MODELO_PREDICTIVO.pdf

Guerra, C., Altamirano, H., & Villalobos, C. (2022). Los efectos causados por la voladura en el macizo rocoso o medio circundante de un banco genera perturbaciones que con el tiempo se convierten potenciales eventos de inestabilidad en las paredes del tajo abierto, se estima que alrededor de 10m a 30m o 10. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-385.pdf>

- Hashemi, S., & Katsabanis, P. (2020). The Effect of Stress Wave Interaction and Delay Timing on Blast-Induced Rock Damage and Fragmentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2327–2346. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02043-9>
- Heras, F., & Guijarro, R. (2020). *Análisis de la implementación de cámaras de aire en las voladuras de canteras urbanas*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral], Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/50502>
- Hernandez, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Himanshu, V., Mishra, A., Priyadarshi, V., Shankar, R., Yadav, R. S., & Singh, P. K. (2024). Determination of Optimal Burden for Ringhole Blasting in Underground Hard Rock Mining Under Varying Geotechnical Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 97, 760-766. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1757-4>
- Himanshu, V., Vishwakarma, M., Kaushik, A., & Vishwakarma, A. (2024). Optimized Burden-Spacing for Improvement of Rock Fragmentation by Blasting in Limestone Mines. *The Indian Mining & Engineering Journal*(1), 25-30. https://www.imejournal.com/images/Research_article_image/January-February%202024_Final.pdf#page=25
- Huamán, W. (2023). *Análisis de control de voladura para reducir la sobrerotura de rocas en la mina Tangana – 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo], Repositorio de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5784>
- Huanca, J. (2019). *Análisis de vibraciones producidas por voladura para reducir daños al macizo rocoso en BP. 1200E – U.P. Andaychagua - Volcan Compañía Minera S.A.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú],

Repositorio Universidad Nacional del Centro del Perú.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5636>

Hussan, B., Lozynska, M., Takhanov, D., Oraltbay, A., & Kuzmin, S. (2021). Assessing the quality of drilling-and-blasting operations at the open pit limiting contour. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*(6), 42-48. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/042>

Kononenko, M., Khomenko, O., Savchenko, M., & Kovalenko, I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 22-30. https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/154295/03_Kononenko%2c%20Khomenko%2c%20Savchenko%2c%20Kovalenko.pdf?sequence=1&isAllowed=y

KONYA. (1990). “Diseño de voladuras. Selección múltiple. Vibraciones y ondas sísmicas; normas de vibración para tronaduras”. 231-2274.

Kumar, B., Baskar, N., & Rajaguru, K. (2020). Drilling operation: A review. *Materials Today: Proceedings*, 926-933. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.160>

Lopes, P., Da Luz, J., Pereira, T., & Silveira, L. (2023). Statistical analysis of blast-induced vibration near an open pit mine. *Engineering Sciences*, 95(1), 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/0001-3765202320210008>

López, D. (2020). *Estudio sobre las principales voladuras de contorno, optimización y desarrollo de una metodología de cálculo relacionada con los parámetros geomecánicos del terreno*. [Tesis de posgrado, Universidad de Cantabria]. <http://hdl.handle.net/10902/19151>

Luque, J. (2021). *Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole*. [Tesis de pregrado,

Universidad Católica de Santa María], Repositorio de la Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/94969e0a-81ae-4f3b-a3fe-a0ca78b0820e>

Luque, J. (2021). *Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de Cross Hole*. Tesis de grado, Universidad Católica de Santa María, Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales, Arequipa. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/19e29024-f444-4670-abdf-091c42a078da/content>

Maus, V., Giljum, S., Gutschlhofer, J., da Silva, D., Probst, M., & Luckeneder, S. (2020). A global-scale data set of mining areas. <https://www.nature.com/articles/s41597-020-00624-w>

Ministerio de Energía y Minas. (1995). *Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras*. 23.

Navarro, J., Seidl, T., Hartieb, P., Sanchidrián, J., Segarra, P., Couceiro, P., Schimek, P., & Godoy, C. (2021). Blastability and Ore Grade Assessment from Drill Monitoring for Open Pit Applications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 3209–3228. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02354-2>

Nguyen, H., Xuan, N., Tran, Q., Le, T., Do, N., & Thu, L. (2019). Evaluación y predicción de la vibración del suelo inducida por explosiones en una mina a cielo abierto utilizando ANN: un estudio de caso en Vietnam. *Discover applied sciences*.

Norma Española UNE 22381. (1993). Control de vibraciones producidas por voladuras, por la Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE. 7.

- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Bogota: Ediciones de la U .
- Oliva, A., & Fort, R. (2019). Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real. *Revista Ingenio*, 16(1), 1-9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22463/2011642X.2381>
- Ollero, J. (2021). *Reducción de vibraciones en el Municipio de Santo Domingo con la aplicación de un nuevo diseño de voladura en el tajo 333 – 311 Mina Jabalí*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión], Repositorio de Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2125>
- Pérez, G. (2019). *"Modelamiento de vibraciones para reducir y controlar daños por voladura en la rampa 2705 Unidad Minera Parcoy - Consorcio Minero Horizonte S.A."*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga], Repositorio de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3942>
- Roy, P. (2021). Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*, 14.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06949-z>
- Saéz, M. (2016). *Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago*. Tesis de postgrado, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138954>

- Senjoba, L., Sasaki, J., Kosugi, Y., Toriya, H., Hisada, M., & Kawamura, Y. (2021). One-Dimensional Convolutional Neural Network for Drill Bit Failure Detection in Rotary Percussion Drilling. *Mining*, 1(3), 297-314. <https://doi.org/10.3390/mining1030019>
- Taiwo, B., Abdulkadir, S., Moshen, J., Akinsode, K., & Oluwasanmi, E. (2022). Blasting misfire: a review of causes, economic effect, control and handling techniques. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3(1), 967-972. https://www.researchgate.net/profile/Blessing-Taiwo-5/publication/357992773_Blasting_Misfire_A_Review_of_Causes_Economic_Effect_Control_and_Handling_Techniques/links/61ea7cf79a753545e2e805ca/Blasting-Misfire-A-Review-of-Causes-Economic-Effect-Control-and-
- United States Bureau of Mines. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from Surface mine blasting.
- Utili, Agosti, Morales, Valderrama, & Albornoz. (2022). Formas de paredes de tajo óptimas para aumentar el rendimiento financiero y reducir la huella de carbono de las minas a tajo abierto. *Instituto de Ingenieria de Minas del Perú*.
- Wang, Z., Gu, X., Zhang, W., Xie, Q., Xu, X., & Wang, Q. (2019). Analysis of the Cavity Formation Mechanism of Wedge Cut Blasting in Hard Rock. *Shock and Vibration*. <https://doi.org/10.1155/2019/1828313>
- Yin, Z., Wang, D., Wang, X., Dang, Z., & Li, W. (2021). Optimization and Application of Spacing Parameter for Loosening Blasting with 24-m-High Bench in Barun Open-Pit Mine. *Shock and Vibration*. <https://doi.org/10.1155/2021/6670276>

Zhang, Z.-X., Chi, L.-Y., & Yi, C. (2021). An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 767-773. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.04.004>

ANEXOS

Anexo 1: Datos de campo utilizados para la prueba de hipótesis

N° de Prueba	Distancia (m)	Carga operante (kg)	Distancia escalada (Ds)	PPV (mm/s)	Retardo (ms)
1	12.5	3.0	7.2	385.6	9
2	10.2	2.7	6.1	412.3	9
3	15.0	3.2	8.4	348.7	9
4	13.0	2.9	7.5	390.2	9
5	14.5	3.1	8.0	365.0	9
6	11.7	2.8	6.8	400.1	9

Fuente: Elaboración propia a partir de Tablas 15 y 16. Datos recolectados en campo mediante monitoreo sísmico con geófonos triaxiales.

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
V1 (dependiente): Modelamiento y análisis de vibraciones	“Se conoce por vibraciones al fenómeno de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio y con alto potencial de perturbarlo”	Es el registro obtenido por equipos de monitoreo sísmico a través de geófonos empotrados en campo cercano.	El rango de vibraciones comprendidos para estos geófonos de monitoreo comprende de 0-2000 mm/s	Registro de Vibración	Cuantitativa
V2 (independiente): efectos adversos de Voladura	“Proceso operativo con el cual se busca lograr una granulometría adecuada (fragmentación)”.	“La voladura es un proceso controlado y planificado que implica el uso de explosivos para fragmentar materiales rocosos o terrenos con el fin de facilitar su extracción, movimiento o demolición en actividades mineras”	Nº de Taladros. Tipo de Voladura Definición de Burden x Espaciamiento, Tipo de Explosivo	-0 a 100 tal. - 100 a 200 tal. -Contorno -Producción -Trim -Malla de Mineral, Desmonte -Gasificado. -No Gasificado	Cuantitativa Cuantitativa Cualitativa Cualitativa Cualitativa Cualitativa Cualitativa

Anexo 3: Matriz de consistencia

[illegible]

generados por las voladuras en un sector del Tajo Colquijirca? C. ¿Qué tiempos de retardo entre taladros resultan más efectivos para minimizar los efectos adversos de las vibraciones en un sector del Tajo Colquijirca?	C. Identificar los tiempos de detonación más eficaces para disminuir la superposición constructiva de ondas vibratorias en el Tajo Colquijirca.	significativamente las vibraciones generadas por la voladura. C. Los tiempos de detonación efectivos oscilan en un rango de 25ms- 30ms, que ayudarán a minimizar la superposición constructiva de ondas de vibración, en un sector del Tajo Colquijirca- Pasco 2022.				
---	--	--	--	--	--	--

Anexo 4: Datos utilizados para la prueba de regresión lineal (Hipótesis general)

Nº	Distancia (m)	Carga (kg)	Distancia Escalada (D/ $\sqrt{Q}$)	Log_Distancia	PPV (mm/s)	Log_PPV
1	5.5	0.6	7.09	0.851	1020	3.008
2	6.5	0.8	7.27	0.862	978	2.990
3	7.0	1.0	7.00	0.845	900	2.954
4	8.0	1.2	7.30	0.863	870	2.939
5	9.0	1.5	7.35	0.867	820	2.914
6	10.0	2.0	7.07	0.849	790	2.898
7	11.5	2.5	7.27	0.862	760	2.880
8	12.0	3.0	6.93	0.841	730	2.863
9	13.0	3.5	6.96	0.843	700	2.845
10	14.0	4.0	7.00	0.845	670	2.826
11	15.0	4.5	7.07	0.849	640	2.806
12	16.0	5.0	7.15	0.854	610	2.785

Anexo 5: Datos utilizados para la prueba t (Hipótesis específica 1)

Nº	Vp (m/s)	PPVc (mm/s)
1	1420	340
2	1415	339
3	1405	345
4	1430	348
5	1390	343
6	1385	344
7	1422	341
8	1400	346
9	1445	343
10	1408	342

Anexo 6: Datos para prueba t de muestras emparejadas (Hipótesis específica 2)

N°	PPV Antes (mm/s)	PPV Después (mm/s)
1	470	390
2	460	385
3	455	395
4	440	375
5	430	380
6	465	390
7	450	387
8	435	389
9	460	385
10	445	390
11	455	395
12	440	385

Anexo 7: Datos para regresión (Hipótesis específica 3)

N°	Retardo (ms)	Acoplamiento (taladros equivalentes)
1	0	10
2	1	9.2
3	2	8.5
4	3	7.5
5	4	6.6
6	5	5.9
7	6	4.8
8	7	3.5
9	8	2.8
10	9	1.5

Anexo 8: Ficha de Observación Técnica – Monitoreo de Voladuras

Ficha de Observación Técnica de Vibraciones en Campo Cercano

Proyecto: Tajo Colquijirca – Fase 9E – Nivel 4252

Fecha: _____

Observador: _____

Ubicación GPS: _____

Equipo: Sismógrafo / Geófono Triaxial

Nº de voladura: _____

Modelamiento y análisis de vibraciones

Ítem	Indicador	Dato registrado	Unidad	Observaciones
V1.1	Registro de vibración (PPV)		mm/s	Lectura directa del geófono
V1.2	Frecuencia		Hz	
V1.3	Distancia al epicentro		m	Medida con estación total
V1.4	Tiempo de arribo de la onda P		s	Marcado en la gráfica de registro
V1.5	Observación de efecto inmediato	Sí / No		Fisuras, vibraciones perceptibles

Efectos adversos de la voladura

Ítem	Indicador	Dato registrado	Unidad	Observaciones
V2.1	Número total de taladros		cantidad	Contado en campo o ficha de diseño
V2.2	Tipo de voladura	Contorno / Producción / Trim	texto	Según diseño
V2.3	Definición de burden x espaciamiento		m × m	Tomado del diseño de malla
V2.4	Tipo de explosivo	Gasificado / No gasificado	texto	Según ficha técnica del explosivo
V2.5	Malla de mineral o desmonte		texto	Según planeamiento geológico

Panel Fotográfico

Anexo 9: *Delimitación del área de estudio*



Anexo 10: *Configuración de sismógrafos*



Anexo 11: *Demarcación topográfica de Blast Hole – GTX*



Anexo 12: *Ensamble de geófonos*



Anexo 13: Carguío de explosivos



Anexo 14: Lectura sismográfica

