



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**SIMULACIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA MEDIANTE
I-BLAST 8.2 PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE
TALUDES EN MINA CERRO CORONA**

TESIS

PRESENTADA POR:

JAMIL YELSTIN CCASA VALERO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO - PERÚ

2026



JAMIL YELSTIN CCASA VALERO

SIMULACIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA MEDIANTE I-BLAST 8.2 PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDE...

My Files

My Files

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:573584713

194 páginas

Fecha de entrega
31 mar 2026, 3:26 p.m. GMT-5

30.574 palabras

Fecha de descarga
31 mar 2026, 3:46 p.m. GMT-5

163.257 caracteres

Nombre del archivo
JAMIL YELSTIN CCASA VALERO.docx

Tamaño del archivo
35.4 MB





1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 1% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dr. Amilcar G. Teran Diazderca
CATEDRÁTICO UNA - PUNO
FACULTAD INGENIERÍA MINAS
COD. 20079-03

Dr. Anibal Sucari León
Director de la Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería de Minas - UNAP





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
TESIS

SIMULACIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA MEDIANTE I-
BLAST 8.2 PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN
MINA CERRO CORONA

TESIS PRESENTADA POR:

JAMIL YELSTIN CCASA VALERO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS



APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:

.....

Mtro. ARTURO R. CHAYÑA RODRIGUEZ

PRIMER MIEMBRO:

.....

Mtro. HEINZ MIGUEL CHURA CAHUANA

SEGUNDO MIEMBRO:

.....

Mtro. CARLOS PAUL HANCCO RAMOS

ASESOR DE TESIS:

.....

D.Sc. AMILCAR G. TERAN DIANDERAS

ÁREA : Ingeniería de minas.

TEMA: Análisis de Costos Mineros y Comercialización de Minerales.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 08 de Enero de 2026



DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía constante, mi fortaleza en los momentos difíciles y la luz que iluminó cada uno de mis pasos a lo largo de este camino.

A mi madre, Luisa Loyola Valero Canales, por su amor incondicional, su paciencia infinita y su fe inquebrantable en mí; por ser el pilar fundamental que sostuvo este sueño incluso cuando parecía lejano.

A mi padre, Néstor Ccasa Acsara, por su apoyo silencioso, pero siempre presente, que me brindó la seguridad y la confianza necesarias para seguir adelante.

De manera muy especial, a mi hermana, Laura Luz Ccasa Valero, pieza esencial y corazón de todo este proceso. Gracias por ser mi compañera incondicional, mi aliada de vida y confidente de mis sueños; por sostenerme cuando dudé, por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía y por recordarme siempre quién soy. Fuiste la flor más linda de nuestro hogar, quien con su ejemplo me enseñó todo aquello que hoy te describe: fortaleza, amor, entrega y esperanza. Tu guía, tu fortaleza y tu amor fueron el impulso que me permitió no rendirme y seguir adelante cuando el camino parecía incierto. Este logro también es reflejo de tu entrega, tu aliento constante y de cada abrazo que me devolvió la fuerza para continuar.

Jamil Yelstin Ccasa Valero.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme durante esta etapa, orientándome en cada paso y siendo mi pilar fundamental en todo momento y en cada lugar donde me encuentro.

De manera muy especial, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, Luisa Loyola Valero Canales, quien fue el pilar fundamental de este camino. Su amor incondicional, su paciencia infinita y su fe constante en mí hicieron posible que este sueño se mantuviera firme incluso en los momentos más difíciles. Gracias a ella aprendí el valor de la resiliencia, la fortaleza ante la adversidad y la importancia de mirar la vida con esperanza.

A mi padre, Néstor Ccasa Acsara, agradezco su apoyo constante y silencioso, siempre presente. A mi hermana, Laura Luz Ccasa Valero, expreso un agradecimiento profundamente especial, pues fue una pieza clave en todo este proceso. Su acompañamiento incondicional, su confianza en mí incluso cuando yo dudaba y su constante motivación fueron fundamentales para no rendirme. Fue mi guía, mi consejera y mi ejemplo académico; mi fortaleza en los momentos más difíciles y mi impulso para seguir adelante cuando el camino parecía incierto. Su apoyo marcó de manera significativa cada etapa de este logro, y este trabajo es también reflejo de su entrega y aliento permanente.

Asimismo, agradezco a Dakota, fiel compañera durante innumerables veladas académicas, cuya presencia fue un consuelo en las largas noches de estudio, y a mis familiares, quienes siempre me brindaron su apoyo, confianza y palabras de aliento.

Finalmente, agradezco de corazón a todas aquellas personas que creyeron en mí, me ofrecieron su apoyo sincero, palabras de ánimo y consejos oportunos cuando más los necesité, así como a quienes confiaron en mí y me brindaron oportunidades de manera desinteresada. Gracias a cada uno de ellos fue posible culminar esta etapa tan significativa de mi vida, la cual llevaré siempre con gratitud y orgullo.

Jamil Yelstin Ccasa Valero.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE TABLAS	
ÍNDICE FIGURAS	
ÍNDICE ANEXOS	
ÁCRONIMOS	
RESUMEN	18
ABSTRACT.....	19
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2.1. Problema general.....	21
1.2.2. Problemas específicos	21
1.3. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	22
1.3.1. Hipótesis general.....	22
1.3.2. Hipótesis específicas	22
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.4.1. Objetivo general.....	22
1.4.2. Objetivos específicos.....	23
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	23



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	25
2.2.	MARCO TEÓRICO	30
2.2.1.	Explotación en minas a tajo abierto	30
2.2.2.	Proceso integral en voladuras a tajo abierto	32
2.2.3.	Estudio de vibraciones y criterio de daños.....	36
2.2.4.	Diseño y modelamiento de voladuras con software especializado	47
2.2.5.	Control del perfilado y estabilidad de taludes.....	62
2.3.	SOFTWARES UTILIZADOS	66
2.3.1.	DNA – I-Blast 8.2	66
2.3.2.	Blastware.....	67

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	69
3.1.1.	Tipo de investigación	69
3.1.2.	Alcance.....	69
3.1.3.	Diseño de la investigación.....	71
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	72
3.2.1.	La población.....	72
3.2.2.	La muestra	73
3.3.	DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	73
3.4.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	77
3.4.1.	Criterio de daño y simulación de las vibraciones.....	77
3.4.2.	Cálculo de las constantes K y alfa.....	79



3.4.3. Normativa USBM RI 8507 y OSMRE.....	80
3.5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	83
3.5.1. Ubicación y acceso.....	83
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. SIMULACIÓN DE VOLADURAS EN I-BLAST PARA PREDECIR NIVELES DE PPV	85
4.1.1. Proyecto de voladura py-3840 zona 1	86
4.1.2. Proyecto de voladura py-3860 zona 2	99
4.1.3. Proyecto de voladura py-3850 zona 1	111
4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MONITOREO IN SITU DE LAS VIBRACIONES	123
4.2.1. Proceso del monitoreo de vibraciones.....	124
4.2.2. Registro de las vibraciones antes del I-Blast.....	133
4.2.3. Registro de las vibraciones con I-Blast.....	145
4.3. INSPECCIÓN VISUAL DE LAS PAREDES DE BANCO Y BERMAS EN EL TAJO CERRO CORONA	165
4.3.1. Verificando el estado de las paredes del talud de banco	165
4.3.2. Cotejando resultados	171
V. CONCLUSIONES.....	172
VI. RECOMENDACIONES	174
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	176
ANEXOS	178



ÍNDICE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación geomecánica de rocas según Hoek	42
Tabla 2 Configuración de la Plantilla Geológica (Geology Template) en I-Blast 8"48	
Tabla 3 Resumen de las Variables y Operacionalización	76
Tabla 4 Parámetros geológicos de Diorita Caliza	87
Tabla 5 Parámetros geológicos de Caliza Fracturada	88
Tabla 6 Parámetros geológicos de Diorita Argilizada	89
Tabla 7 Resultados de simulación de PPV y distancias críticas (py-3840 zona 1)...	98
Tabla 8 Plantilla geológica del dominio Granito – Potásico.....	100
Tabla 9 Plantilla geológica del dominio Diorita-Caliza.....	101
Tabla 10 Predicción de PPV por Zona mediante el método de Distancia Escalada .	110
Tabla 11 Plantilla geológica del dominio Caliza fracturada	112
Tabla 12 Plantilla geológica del dominio Diorita Argilizada	114
Tabla 13 Resultados de predicción de vibraciones (PPV) por zona	122
Tabla 14 Límites críticos del PPV por tipo de roca	132
Tabla 15 Registro de las vibraciones en el mes de mayo 2024.....	134
Tabla 16 Registro de las vibraciones en el mes de junio 2024	137
Tabla 17 Registro de las vibraciones en el mes de julio 2024	139
Tabla 18 Registro de las vibraciones en el mes de agosto 2024	141
Tabla 19 Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-226	147
Tabla 20 Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-235	150



Tabla 21	Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-314	153
Tabla 22	Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-340	155
Tabla 23	Registro de las vibraciones en el mes de setiembre 2024.....	157
Tabla 24	Registro de las vibraciones en el mes de octubre 2024.....	158
Tabla 25	Registro de las vibraciones en el mes de noviembre 2024	160
Tabla 26	Registro de las vibraciones en el mes de diciembre 2024.....	161
Tabla 27	Resumen del registro de las vibraciones de setiembre a diciembre del 2024	162



ÍNDICE FÍGURAS

	Pág.
Figura 1 Ondas de compresión P y cizallamiento S.....	37
Figura 2 Esquema de un vuelo fotogramétrico sobre una línea de vuelo.....	49
Figura 3 Vista 2D del modelo de terreno importado en la plataforma I-Blast.....	51
Figura 4 Simulación de la distribución granulométrica predictiva mediante el software I-Blast para la Voladura	56
Figura 5 Análisis digital de fragmentación mediante el módulo DNA-Frag	58
Figura 6 Vista 2D del modelo de terreno importado en la plataforma I-Blast.....	62
Figura 7 Vista de inicio del software I-Blast.....	67
Figura 8 Vista de inicio del software Blastware.....	68
Figura 9 Vista general de las zonas monitoreadas.....	85
Figura 10 Modelo geológico del dominio Diorita Caliza.....	86
Figura 11 Modelo geológico del dominio Caliza Fracturada.....	88
Figura 12 Modelo geológico del dominio Diorita Argilizada	89
Figura 13 Delimitación del dominio geológico.....	90
Figura 14 Diseño de columnas de carga para taladros de contorno y producción	91
Figura 15 Visualización tridimensional de los taladros y análisis de la cara libre.....	92
Figura 16 Proyección de la malla de perforación sobre la topografía del terreno.....	93
Figura 17 Simulación de la secuencia de salida cronológica	93
Figura 18 Simulación de la distribución de energía explosiva.....	94
Figura 19 Perfil de desplazamiento y geometría predicha de la pila de material.....	95
Figura 20 Proyección en planta de los halos de dispersión y alcance máximo del material volado.....	96
Figura 21 Proyección de zonas de monitoreo de vibraciones (py-3840 zona 1).....	97



Figura 22	Histograma de niveles de PPV por zona (py-3840 zona 1)	99
Figura 23	Modelo de Geología" del software I-Blast.....	100
Figura 24	Modelo de Geología" del software I-Blast.....	101
Figura 25	Delimitación del dominio geológico.....	102
Figura 26	Diseño de columnas de carga para taladros de producción y contorno	103
Figura 27	Vista isométrica de la configuración geométrica de la malla en entorno 3D – PY3860	104
Figura 28	Proyección espacial del diseño de voladura sobre la topografía real del tajo – PY3860	105
Figura 29	Diagrama de tiempos de retardo y esquema de amarre en superficie	106
Figura 30	Simulación visual de la secuencia de salida mediante escala cromática ...	106
Figura 31	Simulación de la distribución de energía explosiva.....	107
Figura 32	Simulación del perfil de desplazamiento y geometría de la pila.....	108
Figura 33	Proyección en planta de halos de dispersión y alcance de material.....	108
Figura 34	Distribución espacial de los puntos de monitoreo virtual	110
Figura 35	Histograma comparativo de niveles de PPV simulados por zona.....	111
Figura 36	Modelo de Geología" del software I-Blast.....	112
Figura 37	Modelo de Geología" del software I-Blast.....	113
Figura 38	Delimitación del dominio geológico.....	115
Figura 39	Diseño de columnas de carga para taladros de contorno y producción	116
Figura 40	Visualización tridimensional de los taladros y análisis de la cara libre.....	117
Figura 41	Proyección de la malla de perforación sobre la topografía del terreno.....	117
Figura 42	Simulación de la secuencia de salida cronológica	118
Figura 43	Simulación de la distribución de energía explosiva.....	119



Figura 44	Perfil de desplazamiento y geometría predicha de la pila de material (muck pile) tras la detonación	120
Figura 45	Proyección en planta de los halos de dispersión y alcance máximo del material volado.....	120
Figura 46	Distribución espacial de los puntos de monitoreo de vibraciones	121
Figura 47	Histograma de niveles de PPV simulados por zona (PY-3850)	123
Figura 48	Vista del equipo Instantel con sus componentes.....	125
Figura 49	Vista del registro de ondas sísmicas	126
Figura 50	Vista del resumen de las vibraciones	127
Figura 51	Elección del punto de instalación del sismógrafo	129
Figura 52	Ausencia de área de para instalar del sismógrafo	129
Figura 53	Sismógrafo instalado y señalizado en área segura	130
Figura 54	Informe resumido post voladura	131
Figura 55	Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona (Mayo)	135
Figura 56	Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona Junio)	138
Figura 57	Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona Julio)	140
Figura 58	Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona agosto).....	142
Figura 59	Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640	146
Figura 60	Sismograma de velocidades de onda (Transversal, Vertical y Longitudinal) - Proyecto Py 3640-226.....	147
Figura 61	Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-235	149
Figura 62	Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-235.....	150



Figura 63 Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-314	151
Figura 64 Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-314.....	152
Figura 65 Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-340	154
Figura 66 Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-340.....	155
Figura 67 Evolución del control de vibraciones y cumplimiento de estándares (setiembre - diciembre 2024).....	163
Figura 68 Inspección visual de las paredes de banco.....	166
Figura 69 Inspección visual de las paredes de banco de la fase 4.....	167
Figura 70 Estado de las paredes de banco de la fase 4.....	168
Figura 71 Estado de las paredes de banco de la fase 5.....	169
Figura 72 Estado de las paredes de banco de la fase 4.....	170
Figura 73 Vista general del tajo Cerro Corona.....	170



ÍNDICE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1 Ubicación de la mina Cerro Corona.....	178
Anexo 2 Informes de del monitoreo de vibraciones antes del I-Blast.....	179
Anexo 3 Informes de del monitoreo de vibraciones con del I-Blast	182
Anexo 4 Zonas de derrame de material en el tajo Cerro Corona.....	186
Anexo 5 Limites críticos para cada dominio de roca del tajo Cerro Corona.....	188
Anexo 6 Calibración de los equipos	189
Anexo 7 Malla de perforación informe post voladura 3415 232 233.....	190
Anexo 8 Declaración jurada de autenticidad de tesis	193
Anexo 9 Autorización para el depósito de Tesis en el Repositorio Institucional	194



ÁCRONIMOS

ANFO :	Ammonium Nitrate - Fuel Oil (Nitrato de Amonio - Petróleo)
CP:	Costo de Perforación
CP&V :	Costo Total de Perforación y Voladura
CV:	Costo de Voladura
DCL:	Densidad de Carga Lineal
DIM:	Deutsches Institut für Normung (Normativa Alemana)
FS:	Factor de Seguridad
GSD:	Ground Sample Distance (Distancia de Muestreo del Suelo)
GSI:	Geological Strength Index (Índice de Resistencia Geológica)
ISO:	International Organization for Standardization
LOM:	Life of Mine (Vida de la Mina)
PPV:	Peak Particle Velocity (Velocidad Pico de Partícula)
PVS:	Peak Vector Sum (Suma Vectorial Pico)
RMR:	Rock Mass Rating (Valoración del Macizo Rocoso)
UCS:	Uniaxial Resistencia a la compresión (Resistencia a la Compresión Uniaxial)
USBM:	United States Bureau of Mines (Oficina de Minas de EE.UU.)
UTS:	Ultimate Resistencia a la tracción (Resistencia a la Tracción)
VANT :	Vehículo Aéreo No Tripulado (Dron)
VPP:	Velocidad Pico de Partícula



RESUMEN

La mina Cerro Corona, operación a tajo abierto perteneciente a la empresa Gold Fields, presentó durante el primer semestre del año 2024 evidencias de afectación en la estabilidad de los taludes correspondientes a las fases 4 y 5 debido a las vibraciones generadas por las voladuras. Los registros de monitoreo mostraron valores cercanos al límite crítico permitido y, en algunos eventos, superiores a este umbral, generando preocupación respecto a la estabilidad geomecánica del macizo rocoso y a la seguridad operativa del tajo. Ante esta problemática, el objetivo de la investigación fue simular y validar las vibraciones generadas por voladuras mediante el software I-Blast 8.2 para mejorar la estabilidad de los taludes en Mina Cerro Corona. Para ello, la investigación fue de tipo aplicada, de nivel descriptivo y con diseño no experimental, en el que primero se realizaron simulaciones en diversos escenarios de voladura, integrando la caracterización geomecánica de los dominios litológicos y los parámetros de carga. Este proceso permitió establecer un marco numérico para la predicción de la velocidad pico de partícula (PPV). Los resultados evidenciaron que durante los monitoreos realizados en septiembre y octubre aún se registraban niveles elevados de vibración, lo que indicó la necesidad de recalibrar algunos parámetros operativos. Posteriormente, los monitoreos de noviembre y diciembre mostraron una reducción de los valores de PPV, alcanzando promedios cercanos a 110 mm/s y logrando un cumplimiento total de los límites establecidos. Finalmente, la aplicación del software I-Blast permitió una mejor gestión de vibraciones mejorando la estabilidad de los taludes.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, simulación, Software I-Blast 8.2, Velocidad pico partícula, Vibraciones.



ABSTRACT

The Cerro Corona mine, an open-pit operation owned by Gold Fields, presented during the first semester of 2024 evidence of impacts on the stability of slopes corresponding to phases 4 and 5 due to vibrations generated by blasting activities. Monitoring records showed values close to the permitted critical limit and, in some cases, exceeding this threshold, generating concern regarding the geomechanical stability of the rock mass and the operational safety of the open pit. Given this situation, the objective of this research was to simulate and validate the vibrations generated by blasting using the software I-Blast 8.2 in order to improve slope stability at the Cerro Corona mine. For this purpose, the study was developed as applied research, with a descriptive level and a non-experimental design. In the first stage, simulations were carried out under different blasting scenarios, integrating the geomechanical characterization of lithological domains and the charge parameters used in the blasting design. This process made it possible to establish a numerical framework for predicting peak particle velocity (PPV). The results showed that monitoring conducted in September and October still recorded elevated vibration levels, indicating the need to recalibrate some operational parameters. Subsequently, monitoring results from November and December showed a reduction in PPV values, reaching averages close to 110 mm/s and achieving full compliance with the established limits. Finally, the application of the I-Blast software allowed better vibration management, contributing to improved slope stability within the mining operation.

Keywords: Slope stability, simulation, I-Blast 8.2 software, peak particle velocity, vibrations.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las vibraciones producto de la voladura de rocas son importantes para la fragmentación de la roca en campo cercano según refiere Alfonso (2005), sin embargo; en campo lejano puede producir daños a las paredes de banco sino se controla adecuadamente la carga operante. Existen estudios y normativas referenciales como el de USBM en EXSA (2017), que detallan como límite de PPV para campo cercano es 25 mm/s; no obstante, en cada mina se establecen límites críticos para cada dominio de roca que rigen como referencia más exacta y ajustada. Ya que sobrepasar los VPP crítico de cada dominio de roca puede repercutir en el agrandamiento de fracturas existentes y la creación de nuevas fracturas de acuerdo a Bernaola et al. (2013).

La mina Cerro Corona es una operación a tajo abierto que pertenece a la empresa Gold Fields, el cual extrae el mineral de oro en bancos operativos de 8 m. A lo largo del tiempo el tajo Cerro Corona se ha extendido fase a fase, además que ha profundizado más 184 m. Durante el primer semestre del año 2024, se ha observado que las vibraciones, han estado afectando la estabilidad de la fase 4 y 5, debido a que las vibraciones monitoreadas de los disparos han estado muy cerca del límite crítico promedio de 222 mm/s y en algunos casos han sobrepasado límite crítico, afectando la estabilidad de los taludes, ya que se ha visto zonas con derrame de material debido al desprendimiento de material de los taludes de banco superiores, lo cual pone en riesgo la operación en los niveles inferiores de la fase 4 y fase 5 (fondo de mina). Esta situación ha sido observada por la compañía minera, debido a que estos taludes son parte del pit final y deben mantenerse estables durante el resto de la operación y también posterior al cierre de minas.



En ese sentido, se ha venido buscando alternativas de solución rápida y de aplicación al corto plazo, ya que, según el LOM, la vida de la mina está proyectada culminarse en el segundo semestre del año 2025 y las operaciones se concentran más y más en fondo de mina.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿En qué medida la simulación y validación de las vibraciones generadas por voladuras mediante el software I-Blast 8?2 contribuyen a mejorar la estabilidad de los taludes en la Mina Cerro Corona?

1.2.2. Problemas específicos

¿De qué manera la simulación de proyectos de voladura, mediante la variación de los parámetros de diseño, permite predecir niveles de PPV que se mantengan por debajo de los límites críticos establecidos?

¿En qué medida los valores de PPV predichos mediante el software I-Blast 8?2 se corresponden con los valores de PPV reales registrados a través del monitoreo in situ de vibraciones?

¿Cuál es el estado de las paredes del talud del banco posterior a las voladuras, en relación con los niveles de PPV generados, y cómo se manifiesta la ocurrencia de derrame de material?



1.3. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

La simulación y validación de las vibraciones generadas por voladuras mediante el software I-Blast 8.2 permiten mejorar la estabilidad de los taludes en la Mina Cerro Corona, al mantener los niveles de PPV dentro de los límites críticos establecidos.

1.3.2. Hipótesis específicas

La simulación de proyectos de voladura mediante el software I-Blast 8.2, al variar los parámetros de diseño, permite predecir niveles de PPV que se mantienen por debajo de los límites críticos establecidos para el área de estudio.

Existe concordancia significativa entre los valores de PPV predichos con I-Blast 8.2 y los valores de PPV reales registrados mediante el monitoreo in situ de vibraciones, validando la capacidad predictiva del software.

Los niveles de PPV generados por las voladuras, cuando se mantienen dentro de los límites críticos, no generan la ocurrencia de derrame de material en el tajo Cerro Corona

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Simular y validar las vibraciones generadas por voladuras mediante el software I-Blast 8.2 para mejorar la estabilidad de los taludes en Mina Cerro Corona.



1.4.2. Objetivos específicos

Simular los proyectos de voladura en software I-Blast 8.2, variando parámetros de diseño, para predecir niveles de PPV y analizar su ajuste por debajo de los límites críticos.

Implementar monitoreo in situ de vibraciones para evaluar el PVV real registrado de modo que se pueda validar las predicciones obtenidas con I-Blast 8.2.

Inspeccionar visualmente las paredes del talud del banco y las bermas para detectar, documentar e identificar la ocurrencia de derrame de material en el tajo Cerro Corona.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El control de las vibraciones generadas por las voladuras es esencial para mantener la estabilidad de los taludes en una mina a tajo abierto, como Cerro Corona. Durante el primer semestre de 2024, en de los disparos monitoreados, 3 disparos en promedio excedieron el límite crítico de PPV, es decir, el 20% de los disparos, generando un incremento de 3% en los costos de sostenimiento de taludes y una reducción del ancho efectivo de la berma de seguridad, lo que genera un riesgo significativo para la seguridad de los taludes. Las vibraciones excesivas inducen caídas de rocas, deslizamientos de material y sobrerotura o sobre excavación, lo que afecta la integridad de la estructura del talud, incrementa los costos de mantenimiento y aumenta la probabilidad de eventos geotécnicos adversos.

Para abordar este problema, el software I-Blast 8.2 se utilizará para simular y predecir los niveles de vibración generados por diferentes diseños de voladura. Esta



herramienta permitirá evaluar las combinaciones de parámetros que generan niveles de VPP dentro de los límites permitidos, reduciendo el impacto negativo sobre los taludes y mejorando la seguridad operacional. La simulación también permitirá ajustar los parámetros de diseño de las voladuras, tales como burden, espaciamiento, carga por columna y retardo, con el objetivo de optimizar el proceso de voladura y reducir las vibraciones generadas.

Este estudio es crucial para mitigar los efectos perjudiciales de las vibraciones en la mina, lo que contribuirá a mejorar la seguridad y a reducir los costos asociados con la remediación de taludes inestables. Además, la validación de las simulaciones con datos históricos fortalecerá la confiabilidad del modelo, proporcionando una base sólida para futuras decisiones operativas que optimicen la seguridad y la eficiencia en la minería.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Se tienen los siguientes antecedentes para esta investigación:

Herrera (2006), el presente estudio tuvo como objetivo analizar y monitorear las vibraciones generadas por voladuras en el Tajo 753E de la UEA San Cristóbal – Minera Bateas S.A.C., con el fin de reducir los daños al macizo rocoso. La investigación fue de tipo aplicada con nivel explicativo y diseño no experimental, enfocada en una zona de alta prioridad operativa y próxima a labores permanentes. Se realizaron siete monitoreos en campo entre octubre y diciembre de 2020 utilizando sismógrafos InstanTel, recolectando datos de velocidades de partícula en tres vectores, distancias, cargas explosivas y condiciones geomecánicas. Posteriormente, se calcularon los parámetros clave como la velocidad pico de partícula crítica, constantes de atenuación (k y α), distancias escalares y se aplicaron los modelos de Holmberg y Persson (campo cercano) y Devine (campo lejano), interpretados bajo el criterio de daño de Cameron Mckenzi. El resultado principal indicó un fracturamiento mínimo de 0.94 m, sin superar los límites de PPV establecidos por la norma USBM RI-8507, validando el uso de mallas, retardos y tipos de explosivos como adecuados para minimizar el daño estructural. Con respecto a este estudio, Herrera (2006) empleó los métodos de Holmberg y Persson de campo cercano y Devine de campo lejano, a diferencia de este estudio se empleará el método de Devine, tanto para la simulación dentro del software I-Blast 8.2, como el monitoreo post voladura, en el cual se hará una evaluación entre los valores del PPV proyectados por el I-Blast y los registrados finalmente en los disparos. Esto permitirá realizar ajustes más rápidos disminuyendo la incidencia de PPV mayores al valor crítico.



Araujo (2021), el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del filtro de pre corte en la reducción de vibraciones generadas por voladura en el nivel 4021 del tajo Quecher Main de Minera Yanacocha, Cajamarca. La investigación fue de tipo aplicada, en la cual se perforaron 12 taladros de prueba: 9 como fuente sísmica y 3 para monitoreo mediante geófonos triaxiales y uniaxial. El pre corte, diseñado como una fila sin carga explosiva, buscaba actuar como filtro para atenuar la propagación de vibraciones y reducir el impacto de gases sobre los taludes. Se utilizó el método Cross Hole para determinar la velocidad de propagación de la onda P (609 m/s) y se obtuvieron parámetros como VPP crítico (1029 mm/s), PPV máximo (257 mm/s) y tiempo de acoplamiento (11 ms). Sin embargo, al aplicar el modelo de Holmberg & Persson para campo cercano, se determinó que el porcentaje de eficiencia del filtro de pre corte fue del 0%, concluyendo que los taladros no estaban cumpliendo con su función de mitigación vibracional ni de evacuación de gases. Con respecto a este estudio, a diferencia de Araujo (2021) no se realizan diseños de taladros pre corte, en la mina Cerro solo se utiliza taladros Buffer o Trim como medida de evitar daños al talud de banco; es por ello, la importancia de controlar el VPP por debajo de los límites del VPP crítico, ya que su falta de eficacia puede generar una falsa percepción de seguridad en el control de vibraciones y estabilidad de taludes.

Chen y Lu (2021) desarrollaron una investigación orientada a simular las vibraciones inducidas por voladura y evaluar sus efectos en la estabilidad de taludes en una mina a cielo abierto del sur de China, mediante el uso de software especializado de modelado numérico tridimensional. La investigación se estructuró en cinco etapas: caracterización geotécnica, levantamiento de parámetros de voladura, simulación computacional con modelado de onda, análisis de deformación del talud y validación con datos empíricos. Los resultados evidenciaron que las vibraciones con frecuencias mayores



a 50 Hz no causaban desplazamientos relevantes, mientras que aquellas con frecuencias cercanas a 10 Hz generaban resonancias peligrosas. Con respecto a este estudio, Chen y Lu (2021), refuerza la importancia de la simulación computacional para predecir comportamientos del VPP en base a una caracterización geotécnica y levantamiento de parámetros de voladura, que son inputs directos para el software I-Blast. Asimismo, recalca el hecho de vincular los resultados vibracionales con análisis de estabilidad de taludes, siendo uno consecuencia del otro.

Romero (2020) realizó una investigación en una mina cuprífera del sur peruano con el propósito de evaluar los niveles de vibración generados por voladuras y su relación con el diseño técnico empleado. La investigación fue de tipo aplicada, con un diseño no experimental y enfoque descriptivo-correlacional. Se recopilaron datos de campo mediante sismógrafos ubicados en zonas estratégicas, correlacionándolos con los valores de carga, burden y espaciamiento. A partir del análisis estadístico, se generó una curva de predicción de VPP ajustada para el contexto geológico de la mina. Si bien no se utilizó el software I-Blast 8.2, los resultados obtenidos permitieron identificar patrones críticos de comportamiento vibracional y se propusieron recomendaciones técnicas para reducir el impacto sísmico de las voladuras. Con respecto a este estudio, Romero (2020) aplica una metodología de ajuste a parámetros de carga como: burden, espaciamiento, longitud de carga, sin embargo, a diferencia de este estudio, el enfoque está más en la modificación de la longitud de carga que influye en la fragmentación de la roca, así como en las vibraciones. El software I-Blast 8.2 puede ofrecerte una flexibilidad para configurar múltiples diseños de carga que permiten analizar la fragmentación y también las vibraciones, esto hace posible realizar cambios dinámicos tomando en cuenta la fragmentación y las vibraciones.



Torres et al. (2020), el presente estudio tuvo como objetivo predecir las vibraciones inducidas por voladura en la Mina Cerro Corona, utilizando redes neuronales artificiales aplicadas a datos históricos de voladuras y parámetros de diseño. La investigación fue de tipo aplicada y con enfoque cuantitativo, en la cual se recopilaban datos sísmicos de diferentes zonas operativas y parámetros como carga por taladro, espaciamiento y retardo. A partir de estos datos, se entrenaron modelos predictivos utilizando redes neuronales para estimar la Velocidad Pico de Partícula (VPP) y su relación con las características del diseño de voladura. El modelo predictivo permitió identificar que las vibraciones generadas por las voladuras de gran carga superaban los límites establecidos, especialmente en zonas cercanas a los taludes. Como resultado, se optimizó el diseño de voladura ajustando las cargas y los tiempos de retardo, lo que redujo las vibraciones en un 15% y mejoró la estabilidad de los taludes. Con respecto a este estudio, no se utilizará las redes neuronales como una herramienta complementaria en la predicción y control de vibraciones por voladura, sino otra diferente enfocada más a la predicción de vibraciones con las constantes de atenuación de rocas y la fórmula de Devine, que tendrá diferentes VPP en función de la variación de la carga operante.

Ancca (2017), el presente estudio tuvo como objetivo reducir el daño estructural del macizo rocoso mediante el modelamiento de la velocidad pico de partícula (PPV) a partir del monitoreo de vibraciones por voladura, utilizando registros sísmicos en la Mina Untuca, Puno. La investigación fue de tipo aplicada y tuvo un enfoque cuantitativo, en la cual se recopilaban datos sísmicos en tres zonas operativas: Túnel Esperanza, Tajeo 023 y Tajeo 03. Se establecieron ecuaciones de predicción del PPV para cada zona, determinando niveles de sobrecarga explosiva de 49% y 26% en dos de ellas. Como resultado, se optimizó la carga por retardo, logrando una mejora significativa en la calidad de las voladuras, reducción de disturbios en los hastiales y mayor control del macizo



rocoso. Con respecto a este estudio, no se hará específicamente una caracterización de las vibraciones que concierne más a estudios de Onda Elemental, sino de predicción de las vibraciones con constantes de atenuación de rocas previamente definidas con los VPP críticos. Ahora Ancca (2017) define un punto importante, los VPP críticos, sin esos límites es muy complicado tener predicciones validas, y si se obtienen pueden no ser aplicables de forma constante.

Pérez (2016), el presente estudio tuvo como objetivo reducir las vibraciones generadas por voladuras superficiales mediante la implementación de cámaras de aire en la columna explosiva en la Minera Corporación del Centro, ubicada en La Libertad. La investigación fue aplicada, iniciando con la revisión bibliográfica sobre cámaras de aire en voladura y un análisis geomecánico del yacimiento (Roca Tipo II, RMR 61–81). Se realizaron cinco pruebas de voladura diseñadas con el software JK SimBlast 2.0, definiendo secuencias específicas de disparo y utilizando sismógrafos Instantel para medir las vibraciones generadas. Los resultados demostraron una reducción del 37% en las vibraciones en comparación con voladuras convencionales, mejoras en la granulometría (P80) evaluadas con Wipfrag 2.3 y una disminución significativa de costos unitarios de perforación y voladura (0.48 US\$/t vs. 0.80 US\$/t). Además, se evidenció una menor proyección de rocas (fly rock) y una mayor eficiencia en etapas posteriores del proceso minero. Con respecto a este estudio, Pérez (2016) realiza monitoreos de vibraciones post voladura con los sismógrafos Instantel, y utiliza una herramienta que es la cámara de aire que lo que hace es reducir la longitud de carga, muy parecido a este estudio. Aunque no define como tal el VPP crítico, sin embargo, reducir la longitud de carga es un factor muy importante para reducir la las vibraciones.

Orihuela y Dapello (2009), el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo predictivo del alcance de las ondas vibratorias generadas por voladuras en un



terreno específico de una mina modelo, utilizando datos reales obtenidos de ensayos controlados. La investigación fue de tipo aplicada y se estructuró en cinco capítulos: una introducción a las ondas vibratorias y su impacto en estructuras, el análisis teórico mediante la ley de transmisividad, el procesamiento de datos empíricos de campo, el desarrollo del modelo predictivo mediante regresión y, finalmente, el análisis integral de resultados. A través del ajuste cuadrático de los datos, se determinaron los parámetros “k” y “a” en la ecuación base, que permiten predecir las velocidades pico de partícula (VPP) bajo condiciones geológicas específicas. Este modelo no solo mejora la precisión en la estimación de vibraciones en futuras voladuras, sino que también permite un mejor cumplimiento con normativas internacionales y una mitigación efectiva del riesgo estructural y humano en zonas cercanas. Con respecto a este estudio, Orihuela y Dapello (2009) resaltan la utilidad de combinar datos empíricos y fundamentos teóricos para construir modelos de predicción que favorezcan una gestión más segura y eficiente de vibraciones por voladura, sin embargo, determinar las constantes de atenuación de roca, no es suficiente para reducir las vibraciones, te permiten predecir mas no minimizar los efectos colaterales de las vibraciones, para ellos es necesario influir en parámetros de carga.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Explotación en minas a tajo abierto

Según refiere Hustrulid (2004), la explotación a tajo abierto (open pit mining) se define como un método de minería superficial utilizado predominantemente para la extracción de yacimientos masivos o vetas de gran potencia que se encuentran relativamente cerca de la superficie. La viabilidad económica y el diseño final de la excavación están regidos por la relación de



desbroce (stripping ratio), la cual determina la proporción de material estéril o sobrecarga que debe removerse para liberar una unidad de mineral con valor económico. Este parámetro no es estático, sino que define los límites económicos finales del tajo (ultimate pit limits), asegurando que el costo de extracción del estéril no exceda el beneficio obtenido por el mineral recuperado.

Desde una perspectiva operativa y geométrica, el libro establece que la explotación se estructura mediante la formación de bancos horizontales descendentes, los cuales constituyen las unidades básicas de excavación. La geometría de estos bancos es crítica para la seguridad y eficiencia de la mina, y se define mediante tres parámetros principales: la altura de banco (bench height), que debe ser compatible con el alcance de los equipos de carga; el ancho de berma (berm width), necesario para contener derrames de roca y proporcionar estabilidad; y el ángulo de cara del banco (batter angle), que maximiza la recuperación de mineral sin comprometer la estabilidad local del talud.

El ciclo minero básico dentro de este sistema se compone de operaciones unitarias secuenciales que deben ser rigurosamente planificadas para mantener la continuidad de la producción. El proceso comienza con la perforación y voladura (drilling and blasting) para fragmentar la roca in situ, seguido por el carguío (loading) y el transporte (hauling) del material hacia la planta de procesamiento o los botaderos de estéril. La eficiencia de este ciclo depende de una planificación que optimice la secuencia de extracción, garantizando un flujo constante de mineral y el mantenimiento de los accesos y rampas durante toda la vida útil de la mina.



2.2.2. Proceso integral en voladuras a tajo abierto

De acuerdo con Enaex et al. (2019), El proceso integral de una voladura a tajo abierto este compuesto por una estructura bien establecida debido a que es un proceso de mucha relevancia y con el manipuleo de sustancias peligrosas. Es así que es proceso se divide en tres puntos importantes:

A. Propósito de la voladura

De acuerdo con Enaex et al. (2019), el objetivo de la tronadura (voladura) se define como un proceso integral que busca optimizar un conjunto de variables clave, más allá de la simple rotura de la roca. El propósito fundamental es, en primer lugar, fragmentar el macizo rocoso hasta obtener tamaños que sean adecuados para su manejo posterior. Inmediatamente después, este material debe ser desplazado y soltado de tal forma que se constituya una pila que pueda ser excavada con facilidad por la maquinaria.

Este proceso debe ejecutarse con precisión para minimizar el daño colateral, asegurando la estabilidad de los bancos y las paredes de la operación, así como protegiendo cualquier edificación contigua. Desde una perspectiva de eficiencia del proceso, es crucial evitar la dilución del mineral (es decir, la mezcla de material valioso con estéril). En resumen, la tronadura debe proporcionar un producto final que satisfaga los requerimientos de las operaciones posteriores (como carguío y transporte) y, de manera primordial, debe garantizar que, una vez concluida la detonación, se permita liberar los equipos en el área de trabajo de forma completamente segura



B. Proceso de la operación de voladura

De acuerdo con Enaex et al. (2019), el proceso de voladura debe seguir una secuencia ordenada y segura para garantizar la eficiencia de la fragmentación y el control de riesgos.

De acuerdo con los procedimientos operativos estándar y la metodología descrita las etapas se desarrollan de la siguiente manera:

Medición de taladros

Antes de iniciar el carguío, es fundamental verificar la profundidad y limpieza de los taladros. Esta etapa asegura que la longitud de perforación coincida con el diseño planteado, permitiendo calcular correctamente el acoplamiento y la densidad de carga necesaria. Se debe comprobar que no existan obstrucciones o detritos que impidan el descenso de la carga explosiva.

Limitación del área con señales de seguridad

De acuerdo con los estándares de manejo y seguridad, se debe delimitar la zona de trabajo (radio de seguridad) para restringir el acceso de personal y equipos no autorizados. Esto es crítico para prevenir accidentes durante la manipulación de los accesorios y explosivos, cumpliendo con los protocolos de almacenamiento y manipulación en el área de trabajo.

Repartición de accesorios y explosivos

Consiste en la distribución estratégica de los insumos (cartuchos, agentes de voladura, cebos y accesorios de iniciación) a lo largo de la malla de perforación. Esta distribución debe realizarse de manera controlada para mantener la



organización y evitar la acumulación insegura de material sensible cerca de los taladros antes del momento de uso.

Proceso de primado de taladros (Cebado)

El primado consiste en la preparación del cebo o primer, el cual es el encargado de iniciar la columna explosiva. El uso de un cebo o booster adecuado y de tamaño correcto es vital para incrementar la velocidad de detonación y asegurar la iniciación de agentes menos sensibles como el ANFO. El cebo se introduce con cuidado en el taladro, asegurando su contacto con la carga principal.

Proceso de carguío

Es la introducción del explosivo en el taladro. Se debe controlar la densidad de carga (cantidad de explosivo por metro) para asegurar que la energía liberada sea suficiente para vencer la resistencia de la roca. El carguío puede ser manual (cartuchos) o mecanizado (a granel/granulados), buscando siempre un buen confinamiento y acoplamiento para maximizar la presión de taladro.

Tapado de taladros (Taco)

El taco es el material inerte colocado en la parte superior del taladro para confinar los gases de la explosión. Un tapado correcto es esencial para evitar el escape prematuro de los gases a la atmósfera, lo que reduciría drásticamente la energía útil para la fragmentación y aumentaría el ruido y la onda aérea.

Amarre y disparo

Finalmente, se realiza la conexión de los accesorios de superficie (sistemas de iniciación eléctricos, no eléctricos o electrónicos) siguiendo la secuencia de



salida diseñada. Una vez verificado el circuito y asegurada el área, se procede al disparo, generando la reacción en cadena desde el iniciador hasta la última carga.

C. Sub productos de la voladura o efectos adversos

Fly Rocks

Según refiere Enaex et al. (2019), la proyección de rocas se define como el desplazamiento indeseado de material rocoso fuera de los límites de la zona de voladura. Este fenómeno ocurre principalmente por un confinamiento excesivo de las cargas o por una sobrecarga de explosivo en zonas donde existen debilidades geológicas, como cavidades o fracturas abiertas.

De acuerdo con la misma fuente técnica, los factores determinantes en la generación de proyecciones son:

- Sobrecarga de explosivo en los taladros
- Control deficiente en la longitud del taco
- Presencia de cavidades o fracturas abiertas en la roca
- Sobreconfinamiento de las cargas
- Expansión violenta de gases a alta presión

Vibraciones del terreno

Según refiere Enaex (2019), la proyección de rocas se define como el desplazamiento indeseado de material rocoso fuera de los límites de la zona de voladura, un evento que debe evitarse mediante un diseño adecuado que minimice este riesgo. Este fenómeno ocurre principalmente por un sobreconfinamiento de las cargas o una sobrecarga de explosivo en presencia de debilidades geológicas, como cavidades o fracturas abiertas, situaciones donde la expansión violenta de



los gases y la falta de control en el taco facilitan que el material sea expulsado peligrosamente más allá del área de seguridad establecida.

Por otro lado, de acuerdo a Famesa (2019), las vibraciones terrestres son ondas sísmicas generadas cuando la energía del explosivo no se consume totalmente en la fragmentación de la roca, transmitiéndose el remanente a través del macizo rocoso. Estas ondas se desplazan radialmente desde el punto de detonación y su intensidad está condicionada por variables críticas como el peso de la carga operante por retardo, la distancia al punto de la voladura, las propiedades geomecánicas del terreno y las características de los explosivos utilizados, factores que deben gestionarse para mitigar el impacto en el entorno.

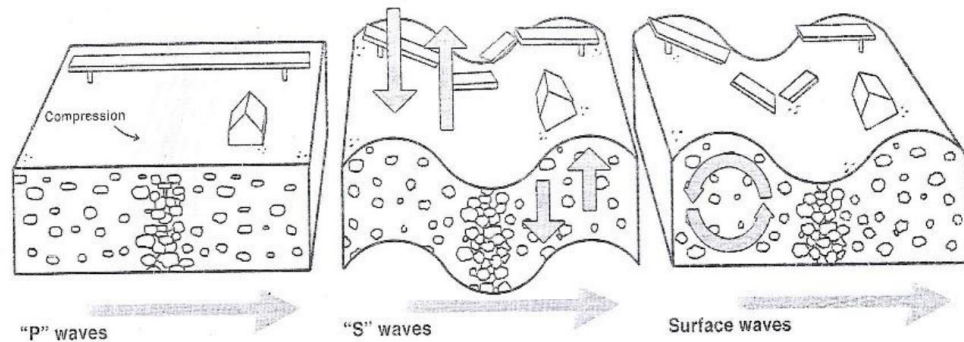
2.2.3. Estudio de vibraciones y criterio de daños

A. Estudio de la onda P y la onda S producidas por la voladura

Según lo que se indica en EXSA (2017), las vibraciones generadas por la detonación de explosivos se propagan a través del macizo rocoso en forma de ondas elásticas, que se clasifican en ondas de cuerpo y ondas superficiales. Dentro de las ondas de cuerpo se encuentran la Onda P y la Onda S, siendo fundamentales para la caracterización sísmica de la roca y la comprensión de los mecanismos de fractura.

Figura 1

Ondas de compresión P y cizallamiento S.



Nota: (Famesa, 2019)

La Onda P (Primaria o Longitudinal) es la onda sísmica más rápida y se identifica como la Onda Longitudinal (V_L) en estudios geofísicos aplicados a la voladura. Su mecanismo de propagación se basa en la compresión y dilatación sucesiva del medio, donde el movimiento de las partículas ocurre de forma paralela a la dirección de avance de la onda. Por otro lado, la Onda S (Secundaria o Transversal), u Onda Transversal (V_T), es más lenta que la Onda P, propagándose a una velocidad inferior. Estas ondas producen un movimiento de corte o cizalle, con oscilaciones de las partículas que son perpendiculares a la dirección de propagación. La importancia de distinguir entre V_L y V_T radica en que sus velocidades permiten calcular las propiedades elásticas dinámicas de la roca, las cuales son esenciales para modelar el comportamiento del macizo rocoso durante y después de la tronadura.

B. Criterio de daño en base a la velocidad pico partícula (PPV)

Según lo que se indica en EXSA (2017), El criterio de daño se fundamenta en la correlación directa entre la tensión dinámica inducida en el macizo rocoso y la velocidad pico de partícula (PPV) generada por la detonación. Según lo



establecido en el presente estudio, se utiliza el modelo de Holmberg y Persson de 1978 para evaluar la extensión del daño en el campo cercano (Near-Field), el cual asume que la vibración se atenúa en función de la distancia y la densidad de carga lineal.

Umbrales Críticos de Daño a la Roca

Para garantizar la estabilidad de los taludes y la integridad del macizo remanente, se establecen umbrales de vibración crítica. El modelo predice que el fracturamiento de la roca ocurre cuando la tensión dinámica supera la resistencia a la tracción del material. En el contexto de esta tesis, se consideran los siguientes límites de PPV para la Diorita (roca competente):

Modelo Matemático de Predicción

La predicción de estos valores se realiza mediante la ecuación de atenuación de campo cercano propuesta por Holmberg-Persson, la cual integra la carga distribuida a lo largo del taladro cilíndrico:

$$PPV = K \cdot \left[\frac{R}{\sqrt{q}} \right]^{-\alpha}$$

Donde:

PPV = Velocidad Pico de Partícula (mm/s).

K = Constantes de sitio determinadas mediante monitoreo sismográfico (Ley de Atenuación).

R = Distancia desde el eje de la carga al punto de interés (m).

q = Densidad de carga lineal (kg/m).



α = Factor de atenuación de la roca.

Aplicación con Software I-Blast

En el desarrollo de las simulaciones, el software I-Blast utiliza este criterio para generar mapas de contornos de iso-vibración (Iso-damage contours). Esto permite visualizar espacialmente hasta dónde se extiende el umbral de 700-1000 mm/s dentro del talud final, validando si el diseño de malla y los tiempos de retardo son efectivos para prevenir el backbreak (rotura hacia atrás) y asegurar la estabilidad de la pared.

C. Resistencia a la compresión de la roca intacta

Según Zhang (2017), la resistencia a la compresión simple σ_c es la medida más común utilizada para cuantificar la resistencia de la roca intacta (material rocoso). Es un parámetro fundamental, ya que la resistencia de la masa rocosa es casi siempre significativamente menor que la de la roca intacta debido a la presencia de discontinuidades. Aunque el procedimiento para medir la σ_c ha sido estandarizado por organismos internacionales, la determinación directa en laboratorio es un proceso que consume tiempo y resulta costoso, requiriendo la preparación de núcleos de roca de alta calidad. Por consiguiente, se recurre frecuentemente a ensayos indirectos y correlaciones empíricas para estimar la σ_c .

Métodos Indirectos Comunes:

- Ensayo de carga puntual
- Ensayo de martillo schmidt
- Penetración con aguja
- Cono indentador



- Ensayos de velocidad de onda sísmica

Cada uno de estos métodos indirectos ofrece una estimación rápida y económica de la resistencia a la compresión, aunque siempre deben ser utilizados con correlaciones empíricas basadas en datos experimentales previos para obtener resultados precisos de acuerdo en lo que se menciona en IGP (2020).

D. Velocidad de propagación de la onda primaria (VP)

De acuerdo a Famesa et al. (2019), la velocidad de propagación de la onda primaria (V_p) corresponde a la rapidez con la que se transmiten las ondas de compresión o longitudinales a través del macizo rocoso. Estas ondas, conocidas también como ondas P, son las primeras en llegar a cualquier punto de monitoreo debido a que son las más rápidas del tren de ondas sísmicas generado por la detonación. Su mecanismo de propagación implica la generación alternada de compresiones y rarefacciones en la misma dirección del movimiento, provocando cambios de volumen en el material rocoso sin alterar su forma.

La V_p es una propiedad intrínseca del medio rocoso y es independiente de la fuente de vibración, estando determinada fundamentalmente por las propiedades elásticas de la roca (Módulo de Young y Coeficiente de Poisson) y su densidad. Este parámetro es crítico para la ingeniería de voladuras, ya que permite calcular la impedancia de la roca (clave para la transferencia de energía explosiva) y determinar el nivel de deformación dinámica inducida ϵ , el cual se utiliza para establecer los umbrales de daño en el macizo remanente mediante la relación entre la velocidad pico de partícula y la velocidad de propagación sónica.

Según refiere EXSA et al. (2017), complementa esta definición señalando que la velocidad de propagación es un indicador directo de la calidad y

competencia de la roca, siendo afectada por factores como la meteorización, la porosidad y el fracturamiento. Valores altos de V_p indican rocas masivas y competentes, mientras que valores bajos sugieren materiales alterados o intensamente fracturados, lo que influye directamente en la selección de la carga explosiva y el diseño de la malla.

E. Módulo de elasticidad de la roca intacta (E_i)

Según Hoek (2006), el módulo de elasticidad de la roca intacta (E_i) es una propiedad fundamental, aunque difícil de medir directamente con fiabilidad. Los valores obtenidos en laboratorio suelen ser menores a los reales debido a las microfisuras que sufren las muestras durante su recuperación y preparación, un daño que afecta más a la rigidez (módulo) que a la resistencia de la roca.

Debido a esta limitación, Hoek recomienda estimar el módulo intacto (E_i) basándose en la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}) y un factor conocido como Ratio de Módulo (MR), utilizando la siguiente relación:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

Donde MR varía según la textura y mineralogía de la roca. A continuación, se presenta los valores guía para seleccionar el MR adecuado:

Tabla 1

Clasificación geomecánica de rocas según Hoek

Clase	Grupo	Textura							
		Gruoso	Medio	Fino					
Clástico	Conglomerados 300-400 Brechas 230-350	Areniscas 200-350	Limolitas (Siltstones) 350 - 400 Grauwacas (Greywackes) 350	Arcillolitas (Claystones) 200 - 300 Lutitas (Shales) 150 - 250* Margas (Marls) 150 - 200					
					Carbonatos	Caliza Cristalina 400 - 600	Caliza Esparfítica 600 - 800	Caliza Micrítica 800 - 1000	Dolomitas 350 - 500
					Evaporitas	Yeso (Gypsum) 350**	Anhidrita 350**		
No Clásticas	Orgánicas			Creta (Chalk) 1000+					
	No foliado	Mármol 700 - 1000	Hornfels (Corneana) 400 - 700 Meta-arenisca 200 - 300	Cuarcitas 300 - 450					
Ligeramente foliado	Migmatita 350 - 400	Anfibolitas 400 - 500	Gneiss 300 - 750	Pizarras (Slates) 400 - 600					
					Foliado	Esquistos (Schists) 250 - 1100	Filitas / Esquistos micáceo 300 - 800		
Igne	Plutónicas	Claros	Diorita + 300 - 350	Granito + 300 - 550					



Clase	Grupo	Textura		
		Grueso	Medio	Fino
		Granodiorita 400 - 450		Muy fino
	Oscuras	Gabro 400 - 500	Dolerita 300 - 400	
Hipabisales		Pórfidos 400		Diabasa 300 - 350 Peridotita 250 - 300
				Piroclásticas
	Lava		Riolita 300 - 500 Andesita 300 - 500	Dacita 350 - 450 Basalto 250 - 450
Volcánicas				
	Piroclásticas	Aglomerado 400 - 600	Brecha volcánica 500**	Toba (Tuff) 200 - 400

Nota: (Hoek, 2006)

F. Criterio de daño en el macizo rocoso

Conforme a Enaex (2019), el fundamento teórico del daño por vibración se basa en la deformación inducida dinámica (ϵ) que experimenta la roca al paso de una onda sísmica. Esta deformación se define matemáticamente mediante la relación directa entre la Velocidad Pico de Partícula (VPP) y la velocidad de propagación de la onda P (V_P) en el medio rocoso, establecida en la ecuación $\epsilon = VPP / V_P$. Bajo este criterio, el daño ocurre cuando la deformación inducida por la vibración excede el límite elástico de la roca o su resistencia a la tracción dinámica, lo que provoca la falla del material no por la presión de los gases, sino por el estrés dinámico generado por la onda de choque al viajar a través del macizo.

El análisis de este fenómeno requiere distinguir entre el campo lejano y el campo cercano. En el campo cercano, definido aproximadamente como la distancia equivalente a cinco veces la longitud de la columna de carga, las ecuaciones convencionales de distancia escalar no son aplicables debido a la complejidad de la interacción de la onda con la roca circundante. Es en esta zona crítica donde el modelo predice que los niveles de vibración son lo suficientemente altos para causar dos tipos de daño estructural irreversibles:

- La iniciación de fracturas frescas en la matriz rocosa intacta
- La dilatación y apertura permanente de las fracturas preexistentes
- El desplazamiento o deslizamiento de bloques a lo largo de las diaclasas

Por lo tanto, el control de daño no solo implica monitorear un valor numérico de velocidad, sino entender que en el campo cercano la vibración actúa como un mecanismo de fracturamiento secundario. Las rocas masivas y de alta

resistencia requieren presiones de detonación y niveles de vibración más altos para iniciar la fractura, mientras que, en macizos estructuralmente débiles, niveles menores de VPP pueden inducir desplazamientos significativos en las discontinuidades, lo que valida el uso de velocidades críticas específicas (como el rango de 700-1000 mm/s) como umbrales de seguridad para evitar la degradación del macizo remanente.

G. Cálculo de la carga operante máxima

De acuerdo a Zou (2017), el cálculo de la carga operativa máxima es fundamental para diseñar una voladura eficiente que logre la fragmentación deseada sin comprometer la estabilidad de la roca circundante. Este cálculo se basa en varios factores, tales como la resistencia de la roca, el tipo de explosivo utilizado, el tamaño del barreno y el espaciamiento de los agujeros de perforación.

La carga operativa máxima se determina utilizando una fórmula que relaciona la densidad del explosivo y la resistencia de la roca. A continuación, se presenta la fórmula que puede utilizarse en el cálculo:

$$Q_{\text{máx}} = \frac{S_c \cdot P_{\text{res}} \cdot V_b}{S_c}$$

Donde:

$Q_{\text{máx}}$ = Es la carga operativa máxima en kilogramos.

P_{res} = Es la resistencia de la roca a la compresión (MPa).

V_b = Es el volumen del barreno, medido en metros cúbicos (m³).



$P_{res} = Sc$ es el factor de seguridad, determinado según las características del terreno y la geometría de la voladura.

El cálculo de la carga operativa máxima es esencial para el diseño adecuado de voladuras que logren la fragmentación deseada de manera controlada y segura, optimizando tanto el rendimiento de los explosivos como la protección del entorno geológico.

H. Cálculo de tiempo de retardo entre filas y taladros

Según los principios metodológicos expuestos en Cámac (2019), para el diseño de la malla de voladura, la determinación de los tiempos de retardo es fundamental para garantizar la creación de caras libres y la minimización de vibraciones. Es así, que el cálculo se basa en la relación entre la velocidad de las ondas de choque y el desplazamiento de la roca.

Tiempo de retardo entre taladros (Secuencia interna)

Este intervalo define la secuencia de detonación entre taladros de una misma fila. Su objetivo es generar una fractura por tensión entre los puntos de detonación. Se calcula comúnmente utilizando factores de tiempo en función del burden (B).

Fórmula práctica:

$$T_t = K_t \times B$$

Donde:

T_t = Tiempo de retardo entre taladros (ms).

K = Constante de tiempo entre taladros (generalmente entre 3 a 6 ms/m).



B= Burden (m).

Tiempo de retardo entre filas (Secuencia de salida)

Este tiempo es crítico para permitir el desplazamiento de la masa rocosa de la fila anterior antes de que detone la siguiente, evitando el confinamiento y la proyección vertical (flyrock). Debe ser significativamente mayor que el tiempo entre taladros (usualmente de 2 a 3 veces mayor).

Fórmula práctica:

$$T_f = K_f \times B$$

Donde:

T_f =Tiempo de retardo entre filas (ms).

K_f =Constante de tiempo entre filas (generalmente entre 9 a 15 ms/m o superior, dependiendo de la dureza de la roca).

Consideración de la dispersión (Scatter)

En el diseño se debe considerar el error intrínseco o dispersión de los accesorios de voladura (fulminantes pirotécnicos vs. electrónicos) para evitar el traslape de detonaciones de acuerdo a Cámac (2019).

2.2.4. Diseño y modelamiento de voladuras con software especializado

Este diseño y modelamiento sigue la secuencia establecida en el manual de usuario del software I-Blast 8.2 detallado en DNA Blast (2024):

A. Parámetros de entrada

Para iniciar el proyecto en I-Blast, se deben ingresar las propiedades físicas del macizo rocoso predominante en la unidad minera (Cerro Corona).

- Creación del Sitio: En la pestaña General > Sitios, crear el sitio "Cerro Corona".
- Configuración Geológica: Ir a la pestaña Bases > Modelos > Geología. Crear una nueva plantilla llamada "Diorita Alterada" con los siguientes parámetros (basados en la caracterización del macizo).

Tabla 2

Configuración de la Plantilla Geológica (Geology Template) en I-Blast 8"

Campo (Field)	Valor Recomendado	Unidad
Nombre	Basalto / Basalt	-
Densidad	2,900.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	5,200.00	m/s
Resistencia a la compresión	180.00 - 220.00	MPa
Resistencia a la tracción	18	MPa
Módulo de Young	70	GPa
Relación de Poisson	0.25	-
K (Vib)	2,000.00	-
Alfa (Vib)	-1.6	-
Calibración A	1	-
Calibración B	0	MPa

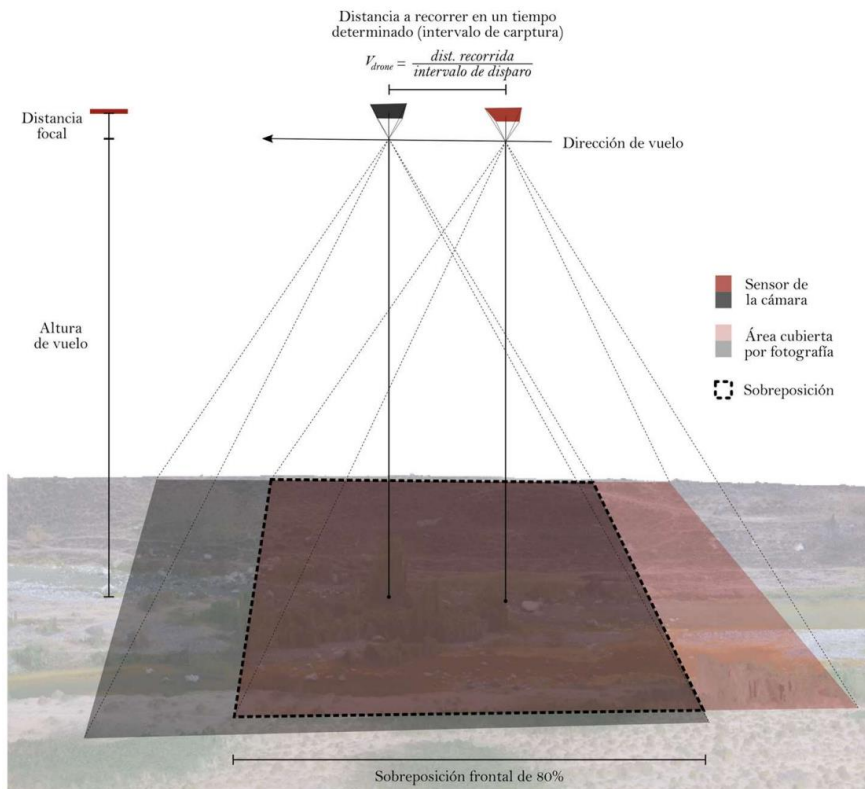
B. Uso de dron para modelado de terrenos en 3D

Según el IGP (2020), el levantamiento topográfico mediante fotogrametría aérea con dron es una metodología que integra el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para capturar secuencias de imágenes superpuestas del terreno, junto con mediciones de alta precisión realizadas con equipos GNSS/GPS en tierra (puntos de fotocontrol); esta combinación permite procesar la información visual para generar nubes de puntos 3D, modelos digitales del terreno

(MDT) y ortomosaicos con resolución centimétrica, optimizando tiempos y costos frente a la topografía convencional.

Figura 2

Esquema de un vuelo fotogramétrico sobre una línea de vuelo



Nota: (Macías-Medrano, 2021)

Sobreposición

De acuerdo a Colomina y Molina (2014), la sobreposición (o traslape) se define como la porción de una fotografía que incluye el área cubierta por otra fotografía adyacente con el objetivo de construir una imagen continua. Esta superposición puede ocurrir de manera frontal (entre fotografías consecutivas de una misma línea de vuelo) o de manera lateral (entre líneas de vuelo paralelas), recomendándose porcentajes de entre 60% y 80% para compensar la inestabilidad del dron y evitar huecos en la información.

La Base se define como la distancia o intervalo existente entre dos tomas fotográficas sucesivas y su cálculo se realiza mediante una expresión matemática que integra el porcentaje de sobreposición junto con la distancia real de la cámara y la relación geométrica entre la distancia al objeto y la distancia focal.

$$B = \frac{1 - \text{Sobreposición}\%}{100} \times \text{Distancia Real de la Cámara (mm)} \times \frac{\text{Distancia al objeto (m)}}{\text{Distancia Focal (mm)}}$$

Altitud y Ground Sample Distance (GSD)

El Ground Sample Distance (GSD) o resolución espacial es un valor fundamental en fotogrametría que define la dimensión lineal del terreno representada por un solo píxel de la imagen (medida en cm/píxel o m/píxel), determinando directamente la precisión y el nivel de detalle de los modelos 3D, mapas y mediciones resultantes. Un valor de GSD bajo permite detectar objetos pequeños y realizar análisis detallados necesarios en ingeniería y topografía, mientras que su cálculo depende intrínsecamente de factores técnicos como la distancia focal de la cámara, el tamaño del píxel del sensor y la altura de vuelo con respecto al objeto, siendo un parámetro crítico para la planificación eficaz de misiones y la selección del equipo adecuado.

$$GSD = \frac{\text{Altura de Vuelo} \times \text{Tamaño del Píxel}}{\text{Distancia Focal}}$$

El procesamiento de la información capturada mediante drones requiere el uso de herramientas informáticas especializadas que, a través de algoritmos de fotogrametría, alinean las imágenes superpuestas para generar nubes de puntos densas y modelos digitales de superficie de alta precisión geométrica.

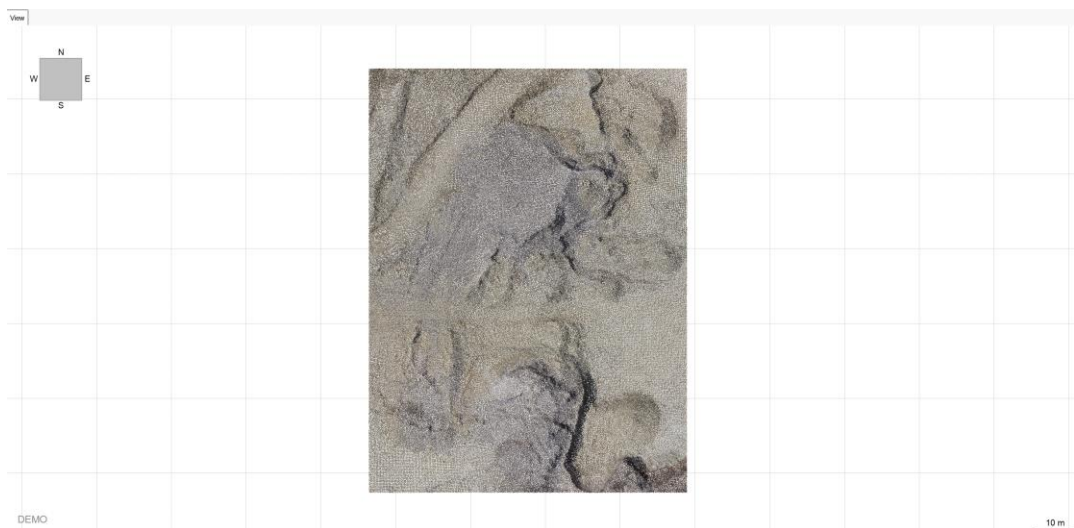
- Pix4Dmapper

- Agisoft Metashape
- Autodesk ReCap Pro
- RealityCapture
- Bentley ContextCapture
- WebODM

Por su parte, el software I-Blast tiene la capacidad de integrar estos modelos digitales del terreno resultantes para el diseño de voladuras, permitiendo la importación directa de archivos de fotogrametría y escaneo láser compatibles con las extensiones “.LAS y .LAZ”, archivos de malla “.OBJ, .PLY y .STL”, datos de sistemas de perfilado como .FSC (Quarryman), así como nubes de puntos en formatos de texto “.TXT, .CSV y .XYZ”.

Figura 3

Vista 2D del modelo de terreno importado en la plataforma I-Blast



C. Diseño de carga – plantillas

El diseño de carga se administra mediante el uso de "Reglas de Carga" (Charge Rules), las cuales funcionan como plantillas predefinidas que



estandarizan la configuración de la columna explosiva dentro de los taladros. Esta herramienta permite al ingeniero definir con precisión la estructura interna del pozo, especificando el tipo y cantidad de explosivo (carga de fondo y carga de columna), la ubicación de los cebos (boosters) y detonadores, así como la longitud y tipo de material de taco (stemming). El software facilita la creación de reglas complejas que pueden incluir cargas espaciadas (decks) o cámaras de aire, asegurando que la distribución de energía se ajuste a las características geomecánicas del banco.

Una vez definidas las plantillas, el manual indica que estas se aplican de manera automática a los taladros seleccionados, ajustando las cantidades de explosivo en función de la profundidad real y la geometría de cada pozo. Esta funcionalidad no solo agiliza el proceso de diseño, sino que también permite visualizar y simular el carguío en un entorno tridimensional antes de la ejecución. El sistema valida que el diseño cumpla con los parámetros de seguridad y rendimiento establecidos, generando reportes detallados de consumo de explosivos y accesorios que son fundamentales para la planificación logística y el control de costos de la voladura.

D. Amarre de taladros según secuencia de iniciación

De acuerdo a Famesa (2019), la configuración del amarre permite implementar diversos esquemas de encendido como salidas por filas, en cuña o en echelon, manipulando la ubicación de los retardos de superficie y la dirección del tendido de iniciación. En sistemas eléctricos este amarre implica la interconexión de los alambres de los detonadores en circuitos serie o paralelo para garantizar la continuidad eléctrica, mientras que en sistemas con cordón detonante se requiere



el uso de nudos específicos, como el nudo recto o la conexión en ángulo recto, para asegurar la transmisión efectiva de la onda de choque a todos los taladros sin cortes prematuros.

El software I-Blast 8, el amarre de taladros y la definición de la secuencia de iniciación se gestionan a través del módulo de "Secuencia", el cual permite diseñar y simular el orden de detonación con alta precisión. Este proceso comienza con la selección del "pozo de inicio" (pozo 0ms), a partir del cual se establece la dirección y el flujo de la detonación. El software permite configurar tanto retardos de fondo (in-hole delays) como retardos de superficie (surface delays), facilitando la creación de esquemas de conexión complejos, como amarres en "V", filas o escalonados, mediante herramientas gráficas que visualizan las líneas de conexión y los tiempos individuales de cada pozo.

El amarre, se utilizan funciones específicas para conectar los taladros, permitiendo al usuario definir manualmente las líneas de retardo entre pozos o utilizar patrones automáticos que optimizan la secuencia según la geometría del banco. Una vez definido el amarre, el software calcula automáticamente los tiempos de detonación nominales y reales para cada taladro, generando una simulación visual que permite identificar posibles problemas, como traslapes de tiempos o secuencias inadecuadas, asegurando así que el diseño cumpla con los objetivos de fragmentación y dirección de movimiento del material antes de su implementación en campo.

E. Simulación de la secuencia de salida

La simulación de la secuencia de encendido en el software I-Blast constituye una etapa crítica de validación técnica diseñada para verificar la lógica



del diseño temporal antes de su ejecución en campo. Según el manual de usuario, esta herramienta utiliza una interfaz de reproducción dinámica para visualizar el cambio de estado de los taladros en función de los retardos asignados, facilitando la detección temprana de inconsistencias operativas y permitiendo evaluar la dirección del frente de cocción mediante la generación de mapas de contornos de isotiempo (iso-time contours).

Adicionalmente, el módulo integra herramientas de análisis cuantitativo y estocástico para optimizar el control de vibraciones y la fiabilidad del disparo. El sistema calcula el histograma de carga operante instantánea para asegurar que la masa explosiva detonada por intervalo se mantenga bajo los límites permisibles, y permite ejecutar simulaciones avanzadas tipo Monte Carlo; estas últimas modelan la dispersión estadística (scatter) de los detonadores para predecir la probabilidad de traslapes indeseados o secuencias fuera de orden que podrían afectar la fragmentación y seguridad

F. Análisis de movimiento de material del disparo

El análisis de la dinámica de movimiento en el software I-Blast permite predecir el comportamiento cinemático de la masa rocosa y la configuración final de la pila de material (muckpile) post-voladura. Esta herramienta utiliza un motor de cálculo físico para generar vectores de desplazamiento y velocidad que representan gráficamente la dirección y magnitud del empuje de la roca; esto resulta fundamental para validar que la secuencia de tiempos proporcione el alivio (relief) necesario hacia la cara libre, evitando el confinamiento excesivo que podría generar vibraciones altas o daños en la pared remanente.

Asimismo, el módulo facilita la planificación de las operaciones de carguío mediante la modelización de la geometría de la pila resultante. Al simular la trayectoria balística y el esponjamiento del material, el ingeniero puede prever la altura y extensión del muckpile, asegurando que sea compatible con el alcance de los equipos de excavación. Esta visualización también actúa como una herramienta de seguridad crítica, permitiendo identificar vectores de velocidad anómalos que podrían indicar riesgos de proyecciones de roca (flyrock) fuera del área controlada.

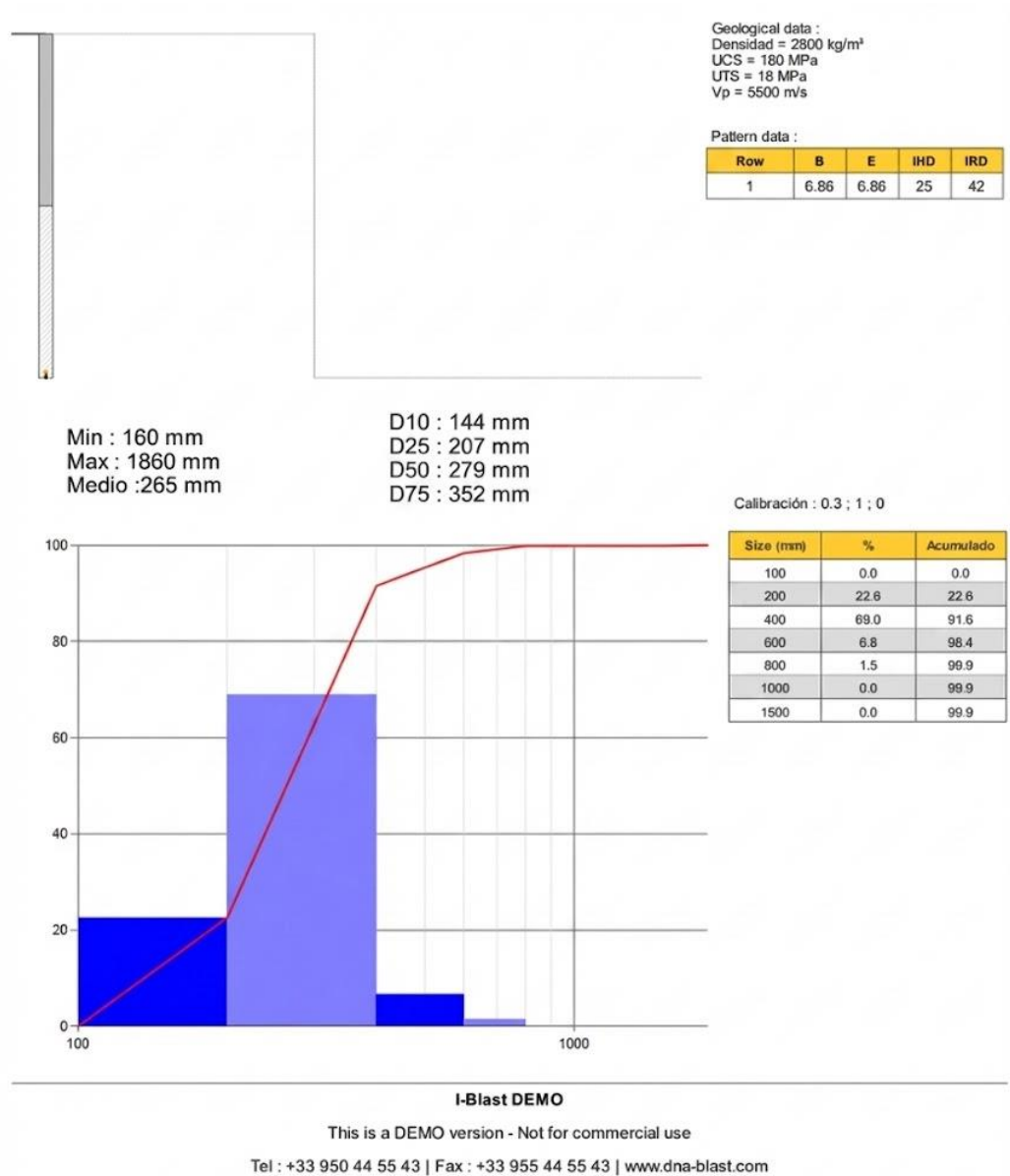
G. Análisis de los parámetros del disparo (PPV, fly rocks, P80)

P80

El software integra un módulo avanzado denominado "Theoretical Blast Pattern Simulation", diseñado para modelar el comportamiento de la voladura mediante la configuración precisa de parámetros críticos. Esta interfaz permite al ingeniero definir las propiedades geomecánicas del macizo rocoso (como densidad, velocidad de onda y resistencias R_c $\vee R_t$), así como ajustar la geometría del disparo (Burden, espaciamiento, diámetro) y la secuencia de tiempos de retardo, centralizando todas las variables necesarias para un diseño de perforación y voladura eficiente. Su funcionalidad más destacada es la capacidad para simular y calcular la fragmentación esperada. A través de la visualización de "Blast voxels", el sistema procesa los datos ingresados para predecir la distribución granulométrica y el grado de fracturamiento de la roca. Esta herramienta es fundamental para validar el diseño antes de la ejecución, permitiendo realizar ajustes iterativos que aseguren una fragmentación óptima para los procesos posteriores de carguío y chancado.

Figura 4

Simulación de la distribución granulométrica predictiva mediante el software I-Blast para la Voladura



El módulo DNA-Frag procesa las imágenes mediante inteligencia artificial, el software genera un reporte estadístico detallado que cuantifica las características físicas de la pila de material. Este reporte comienza desplegando el Número de fragmentos identificados, dato fundamental para validar la representatividad estadística de la muestra analizada. Seguidamente, se presentan



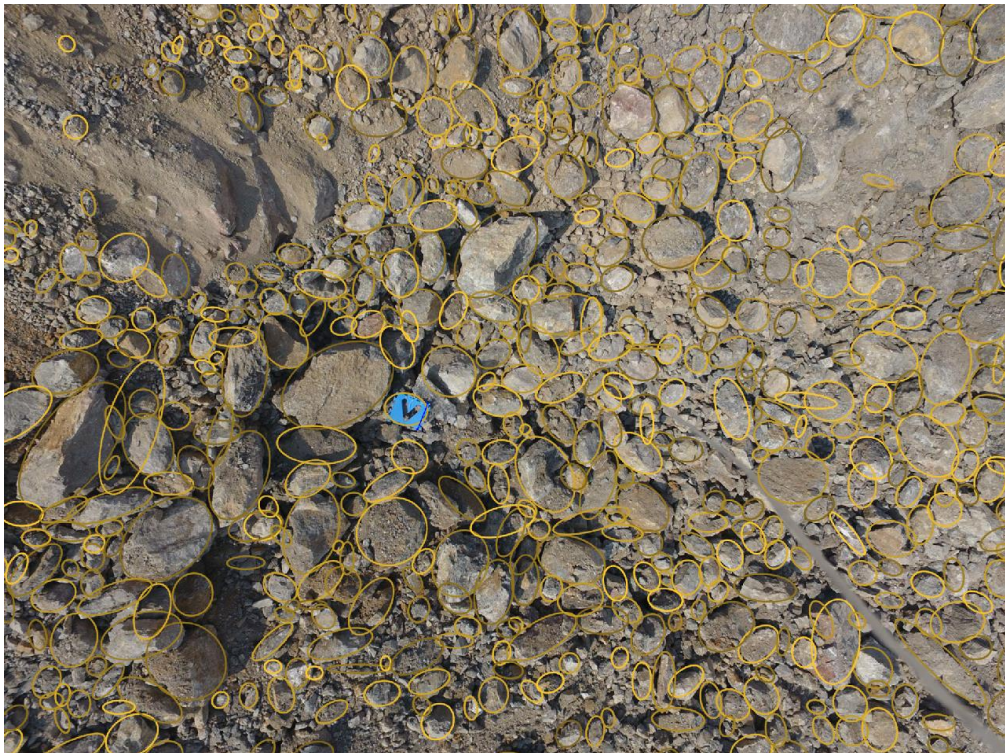
los valores límites y centrales de la distribución, especificando el Tamaño mínimo, el Tamaño máximo y el Tamaño promedio de los bloques detectados, lo cual permite al ingeniero evaluar rápidamente el rango de dispersión y la uniformidad general de la voladura antes de profundizar en la curva granulométrica.

Complementando estos datos generales, el sistema desglosa la distribución de tamaños a través de una serie de percentiles acumulados críticos, identificados como D10, D25, D50, D75 y D90. Estos indicadores representan el tamaño de abertura (en milímetros) por el cual pasaría el 10%, 25%, 50%, 75% y 90% del material respectivamente. El análisis de esta serie permite diagnosticar problemas específicos en el diseño: el D10 ayuda a identificar el exceso de finos que podría indicar una pulverización de la roca, el D50 establece el tamaño mediano de la fragmentación, y el D90 alerta sobre la presencia de bolonería o sobretamaños que podrían requerir tronadura secundaria.

Tras el análisis de la serie de percentiles, se destaca el parámetro D80 (comúnmente denominado P80 en la industria). Este indicador es el valor técnico de mayor jerarquía en la evaluación de la eficiencia de la voladura, pues representa el tamaño bajo el cual se encuentra el 80% del material pasante. La determinación precisa del D80 es indispensable para validar el cumplimiento de los requisitos de diseño, asegurando que la fragmentación sea compatible con la apertura del chancador primario (gappe) y optimizando los tiempos de ciclo de los equipos de carguío.

Figura 5

Análisis digital de fragmentación mediante el módulo DNA-Frag



H. Costo de voladura

De acuerdo a Anchorena (2015), para la evaluación económica de los diseños de voladura, se emplea una Matriz de Costos que integra las variables operativas y de insumos. El cálculo se divide en dos componentes principales: el Costo de Perforación (CP) y el Costo de Voladura (CV), los cuales se expresan en dólares por tonelada métrica (\$/TM) para normalizar la comparación entre diferentes mallas y diámetros.

Costo de perforación (CP)

Este costo se estima partiendo del valor de perforar un taladro individual y su aporte en toneladas de material roto. La fórmula considera el costo por metro lineal de perforación (CPm), el cual incluye el desgaste de aceros (brocas, barras,



shock absorbers), consumo de diésel y ratio de penetración, relacionándolo con la geometría del diseño.

La expresión matemática utilizada es:

$$CP = \frac{CPm \cdot (H + SD)}{B \cdot Es \cdot H \cdot De}$$

Donde:

CP = Costo de Perforación (\$/TM).

CPm = Costo de perforación por metro lineal (\$/m).

H = Altura de banco (m).

SD = Sobre perforación (m).

B = Burden (m).

Es = Espaciamiento (m).

De = Densidad de la roca (TM/m³).

Costo de Voladura (CV)

El costo de voladura abarca el valor de los explosivos y el sistema de iniciación necesarios para fragmentar el volumen de roca asignado a cada taladro. Este cálculo requiere determinar previamente el costo de la mezcla explosiva y el costo del primado.

Costo del sistema de iniciación (CPr)

Corresponde a la suma de los accesorios utilizados por taladro (booster, detonador electrónico y detonador pirotécnico de respaldo)5:



$$CPr = \text{Costo Booster} + \text{Costo Det. Electrónico} + \text{Costo Det. Pirotécnico}$$

Costo de la mezcla explosiva (CM)

Se determina según el porcentaje de emulsión matriz (n) y anfo en la mezcla, considerando los precios del nitrato (C.N.), emulsión (C.E.) y diésel (C.D.):

$$CM = n \% \cdot C.E. + 94 \% (100 - n) \% \cdot C.N. + 6 \% (100 - n) \% \cdot C.D.$$

Cálculo costo total de Voladura

Finalmente, el costo de voladura por tonelada se obtiene relacionando la altura de carga (C), la densidad de carga lineal (DCL) y los costos unitarios calculados anteriormente con el volumen de roca:

$$CV = \frac{C \cdot DCL \cdot CM + CPr}{B \cdot Es \cdot H \cdot De}$$

Donde:

C = Altura de carga de explosivo (m).

DCL = Densidad de carga lineal (Kg/m), calculada como $0.507 \cdot Dm \cdot D^2$ (siendo Dm la densidad del explosivo y D el diámetro en pulgadas).

CM = Costo de la mezcla explosiva (\$/Kg).

CPr = Costo del primado por taladro (\$).



Costo Total de Perforación y Voladura (CP&V)

El indicador económico final para la toma de decisiones es la sumatoria de ambos componentes, permitiendo comparar la rentabilidad de distintos diseños de malla9:

$$CP\&V = CP + CV$$

I. Ploteo de planos

El software I-Blast facilita la generación y el ploteo de planos mediante su herramienta de "Página personalizada". Esta interfaz permite a los usuarios configurar detalladamente la presentación final de sus proyectos antes de exportarlos. Dentro de esta ventana, es posible asignar un título específico a la página y seleccionar exactamente qué tipo de información se desea guardar a través de un menú desplegable, ofreciendo opciones como "Plan de voladura", "Simulación", "Resultados" u "Otros documentos". Además, el usuario tiene control sobre la orientación del documento, pudiendo elegir entre formato vertical (Portrait) u horizontal (Landscape) según las necesidades de visualización.

Para concretar el proceso de ploteo, que habitualmente resulta en un archivo PDF, el software ofrece configuraciones adicionales como la opción de estandarizar el tamaño del papel a A3 mediante una simple casilla de verificación. Una vez definidos todos los parámetros de personalización y formato, el usuario finaliza el proceso haciendo clic en el botón "Guardar". Esta acción genera un documento digital profesional y ordenado, listo para ser almacenado, impreso o compartido con el equipo de trabajo.

Figura 6

Vista 2D del modelo de terreno importado en la plataforma I-Blast



2.2.5. Control del perfilado y estabilidad de taludes

A. Importancia del factor de seguridad estático y pseudoestático

De acuerdo a Wyllie y Mah (2004), la evaluación de la estabilidad de taludes en macizos rocosos se fundamenta en la determinación del Factor de Seguridad (FS), el cual cuantifica la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras. La importancia del Factor de Seguridad Estático reside en su capacidad para garantizar la estabilidad a largo plazo bajo condiciones de carga gravitacional constante. Este indicador debe proporcionar un margen de seguridad suficiente, típicamente superior a 1.5 para obras civiles permanentes y 1.3 para taludes mineros, con el fin de compensar las incertidumbres inherentes a



la variabilidad de las propiedades geomecánicas del macizo, la presencia de discontinuidades y las fluctuaciones en la presión de poros.

Por otra parte, la determinación del Factor de Seguridad Pseudoestático resulta crítica para el diseño sismorresistente. Este análisis permite modelar el efecto de las aceleraciones sísmicas mediante la incorporación de una fuerza inercial horizontal en el equilibrio límite. La relevancia de este factor radica en verificar que el talud no sufra un colapso catastrófico ante eventos transitorios. Dado el carácter temporal de la carga sísmica, la literatura técnica acepta factores de seguridad menores, en el rango de 1.0 a 1.1. Es fundamental destacar que, bajo condiciones pseudoestáticas, un FS inferior a la unidad no implica necesariamente el colapso global de la estructura, sino la ocurrencia de desplazamientos finitos que deben ser evaluados mediante métodos de deformación acumulada, como el análisis de Newmark.

B. Control de la estabilidad de taludes

De acuerdo a Alfonso (2005), el control de la estabilidad en taludes rocosos o de suelo se fundamenta en la modificación de los factores que intervienen en el equilibrio límite, actuando ya sea para disminuir las fuerzas desestabilizadoras o para incrementar las fuerzas resistentes.

Los métodos de control se clasifican en tres categorías principales: modificación de la geometría, medidas de drenaje y elementos estructurales resistentes.

La modificación geométrica es el método más directo y consiste en la redistribución de masas; esto se logra mediante el "descabezamiento" o reducción de altura de la cresta para disminuir el peso impulsor, o mediante la construcción

de bermas y tacones de relleno al pie del talud para aumentar la fuerza contrarrestante. Por otro lado, el control hidrogeológico (drenaje) se considera la medida más efectiva en relación costo-beneficio, ya que al reducir la presión intersticial (presión de poros) en las grietas de tracción y planos de deslizamiento, se incrementa directamente la resistencia al corte, efectiva del material.

Cuando las condiciones geométricas no pueden alterarse, se recurre a elementos estructurales que introducen fuerzas externas de compresión o retención. Entre estos destacan el uso de anclajes y bulones (activos o pasivos) que cosen las discontinuidades en macizos rocosos, así como la implementación de muros de contención, gaviones o inyecciones de cemento para mejorar la cohesión global del macizo y prevenir la degradación superficial.

C. Análisis del costo-beneficio

Según el modelo presentado por Ebrahimi et al. (2025), el análisis de costo-beneficio se fundamenta en la metodología "Mine-to-Mill" (de la Mina a la Planta), la cual establece que el costo global de conminución no se minimiza reduciendo únicamente el costo de explosivos, sino optimizando la fragmentación para reducir los costos en las etapas posteriores. Cuya función objetivo es minimizar el Costo Total de Producción (C_{Total}), integrando las variables de perforación, voladura, carguío, transporte y chancado.

Modelo de Costos Integrados

La evaluación económica se realiza mediante la suma de los costos unitarios de cada operación unitaria. El beneficio se obtiene cuando el incremento en el costo de voladura (por ejemplo, mediante el uso de diseños optimizados con

I-Blast para controlar el PPV y mejorar la fragmentación) es menor que el ahorro generado en las etapas de carga y chancado.

La ecuación general del costo total se define como:

$$C_{Total} = C_D + C_B + C_L + C_H + C_C$$

C_D = Costo de Perforación (\$/t).

C_B = Costo de Voladura (\$/t).

C_L = Costo de Carguío (\$/t) el cual es función directa de la distribución granulométrica; una mejor fragmentación aumenta la productividad de las palas y reduce los tiempos de ciclo.

C_H = Costo de Acarreo (\$/t).

C_C = Costo de Chancado (\$/t), que depende del índice de trabajo (W_i) y el tamaño de alimentación F_{80} resultante de la voladura.

Beneficio por Fragmentación (P_{80})

El estudio demuestra que la variable crítica de enlace es el tamaño medio de fragmento (P_{50} o P_{80}). Un diseño de voladura que reduce el P_{80} mediante la gestión precisa de la energía (controlada por software de simulación) impacta positivamente en el consumo energético del chancado. El modelo de predicción de energía de chancado propuesto utiliza la ley de Bond ajustada:

$$E_C = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80_{ch}}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80_{vol}}}} \right)$$



Donde:

E_C = Consumo específico de energía en chancado (kWh/t).

$F_{80_{vol}}$ = Tamaño del 80% pasante de la alimentación (producto de la voladura).

$P_{80_{ch}}$ = Tamaño del 80% pasante del producto chancado.

El beneficio económico se cuantifica al demostrar que un $F_{80_{vol}}$ menor (logrado con la optimización de I-Blast) reduce drásticamente E_C y, por ende, el costo C_C , compensando el posible costo adicional de una malla más ajustada o detonadores electrónicos.

Restricción por Vibraciones (PPV)

En el análisis costo-beneficio, el control del PPV actúa como una restricción de diseño. Si bien aumentar la carga operante podría mejorar la fragmentación y reducir costos aguas abajo, esto incrementa las vibraciones. El uso de herramientas de simulación permite encontrar el punto óptimo donde se maximiza la fragmentación sin exceder el umbral crítico de PPV, evitando así los "costos ocultos" por daños a la infraestructura o inestabilidad de taludes.

2.3. SOFTWARES UTILIZADOS

Los softwares que se utilizaran en esta investigación son:

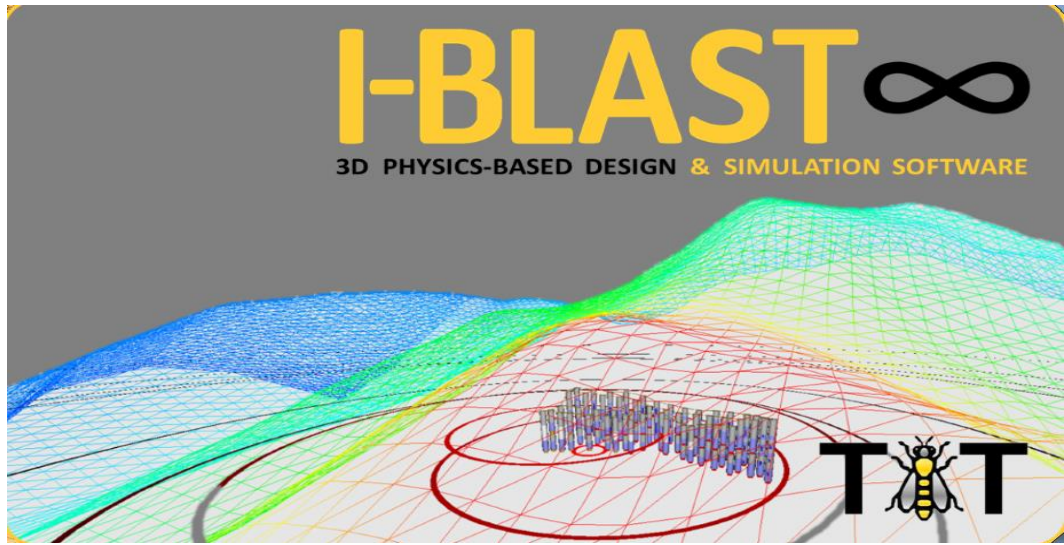
2.3.1. DNA – I-Blast 8.2

Es un software especializado para realizar diseños, simulaciones de los amarres y disparos, análisis post voladura, y otros controles necesarios para tener

una voladura eficiente antes de ser llevada a cabo. Para esta investigación se utilizó para la simulación de los disparos, diseño de carga, amarres y proyección de las vibraciones.

Figura 7

Vista de inicio del software I-Blast



Nota: DNA.

2.3.2. Blastware

Es un software de Instantel, que es utilizados para procesar los registros de vibraciones en el gabinete minero. Para efectos de esta investigación, es software se utilizó para verificar las vibraciones de cada disparo, así como analizar las ondas sísmicas registradas.

Figura 8

Vista de inicio del software Blastware



Nota: Instantel



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1. Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada y descriptiva con componente predictivo.

- **Aplicada:** Porque buscó generar conocimiento y soluciones prácticas para mejorar el diseño de voladuras y la estabilidad geotécnica de los taludes en la Mina Cerro Corona mediante el uso del software I-Blast 8.2.
- **Descriptiva:** Ya que se propuso identificar, caracterizar y analizar cuantitativamente las vibraciones generadas por voladuras, tanto a través de simulaciones como de monitoreo.
- **Con componente predictivo:** Porque se utilizó el software I-Blast 8.2 como herramienta para modelar y predecir el comportamiento de las vibraciones (PPV) bajo diferentes condiciones y parámetros de diseño antes de su implementación real, permitiendo anticipar resultados y evaluar escenarios de riesgo.

3.1.2. Alcance

El presente estudio se enmarcó en un alcance descriptivo con componente predictivo, alineado con una investigación aplicada que busca generar propuestas de mejora en el diseño de voladuras en función del análisis vibracional.



- **Descriptivo:** Se realizó la caracterización cuantitativa de las vibraciones generadas por voladura (PPV, frecuencia dominante y radio de influencia), a partir de diversos parámetros de diseño (burden, espaciamiento, carga por columna y retardo). Además, se describió las condiciones geomecánicas representativas del entorno minero en zonas críticas de Cerro Corona, incluyendo parámetros como RMR, GSI y litología dominante, que puedan influir en la propagación de ondas sísmicas.
- **Predictivo:** Se utilizó el software I-Blast 8.2 como herramienta de modelación numérica para predecir los niveles de vibración (PPV) en diferentes escenarios de voladura, generándose simulaciones ajustadas a condiciones reales de operación. Estas predicciones permitieron anticipar comportamientos vibratoriales potencialmente peligrosos y proponer optimizaciones en los diseños, con el fin de minimizar el impacto en la estabilidad de taludes.

Aunque se analizó la relación entre parámetros técnicos (input) y respuestas vibratoriales (output), esta correlación se evaluará dentro del entorno de simulación del software, sin establecer relaciones causales mediante manipulación directa de variables en campo. La validación de los resultados se hizo a través de la comparación con registros reales de monitoreo sísmico histórico. De esta manera, el estudio busca verificar la capacidad predictiva del modelo numérico para luego plantear mejoras técnicas en los diseños operacionales.

3.1.3. Diseño de la investigación

La investigación adopta un diseño no experimental de enfoque cuantitativo y carácter longitudinal, centrado en el análisis de datos simulados y reales sin intervención directa sobre las variables de campo.

- **Diseño cuasi experimental:** Debido a que se hizo una comparación de un antes y después. Si bien no se han manipulado las variables de forma aleatoria, si se siguió un proceso de cambio para un comparativo posterior en cuanto a las vibraciones. El antes tuvo lugar durante los de mayo hasta agosto del 2024, y el después, los siguientes meses desde setiembre hasta diciembre del 2024. Durante todo este tiempo se observaron los cambios, de forma paulatina, hasta que los VPP de cada disparo no sobrepase los VPP Críticos.
- **Enfoque cuantitativo:** Se emplearon variables numéricas precisas como carga por columna (kg/m), burden y espaciamento (m), PPV (mm/s), frecuencia (Hz), distancia a la fuente (m). Estas variables fueron procesadas estadísticamente y utilizadas para construir modelos de análisis comparativo entre escenarios reales y simulados.
- **Diseño longitudinal:** El análisis se extendió a lo largo de una serie de voladuras operacionales realizadas en diferentes periodos dentro del año 2025, lo que permitió observar variaciones temporales y establecer patrones de comportamiento vibracional. Asimismo, la evaluación progresiva facilitó verificar la consistencia de las predicciones del software en distintos contextos operacionales, fortaleciendo la validez de las propuestas de mejora.



Proceso Metodológico

El estudio fue de naturaleza aplicada, con enfoque descriptivo y predictivo, complementado con actividades de validación experimental en campo. La secuencia es la siguiente:

- **Recolección de datos:** se obtuvieron registros históricos y actuales de los parámetros de diseño de perforación y explosivos, así como diferentes mediciones en campo (geófonos, sismógrafos).
- **Simulación en I-Blast 8.2:** se crearon modelos digitales variando los parámetros de carga, geometría y secuencia para generar niveles de PPV, frecuencia y radio de influencia.
- **Monitoreo en campo:** durante las detonaciones, se instalaron equipos de medición en zonas críticas para registrar datos vibratorios.
- **Análisis comparativo y ajuste:** se cotejaron los niveles simulados con los datos medidos, ajustando el modelo predictivo para incrementar su precisión.
- **Definición de parámetros optimizados:** se establecieron los mejores escenarios para futuras voladuras, en función de los resultados obtenidos

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. La población

Como población para este estudio se tuvo a la operación unitaria de voladura, el cual se llevaba a cabo por la empresa Geoblast y MUR-WY dentro del tajo Cerro Corona. Esta información incluye informes de los anteproyectos, post voladura, informes técnicos, entre otros, provenientes del año 2024. Dentro del tajo Cerro Corona se realizan 1 disparo por día, es decir, 28 disparos por mes



en promedio. Para el registro de vibraciones antes del uso de software I-Blast, se han tomado 67 registros, es decir, 59.82% del total de disparos. Post uso del I-Blast se han simulado en total 114 disparos en 4 meses, de los cuales, se han medido las vibraciones en 66 registros, es decir, 57.89% del total de disparos.

3.2.2. La muestra

Como muestras se tienen distintos proyectos de voladura, específicamente desde el mes de mayo hasta el mes de diciembre del 2024. En lo que respecta a procesos integrales se han tomado 3 proyectos en los bancos 3840 hasta el 3860, debido a que son extensos, empero, la aplicación del software I-Blast, fue el 100% de los proyectos desde setiembre hasta diciembre del 2024. En cuanto al registro de las vibraciones, se tienen de los meses de mayo hasta agosto del 2024 como línea base; y de setiembre hasta diciembre del 2024 en la etapa de experimentación con el software I-Blast.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Las variables que se tuvo para esta investigación son:

Variable Dependiente: Las vibraciones generadas por las voladuras.

Definición conceptual: Son las magnitudes de las vibraciones generadas por la voladura, especialmente la Velocidad Pico de Partícula (PPV), que indica la intensidad del movimiento sísmico.

Definición operacional: Son los valores de PPV y otras características de la onda (frecuencia dominante, radio de influencia) calculados por I-Blast 8.2 en puntos de monitoreo específicos.



Indicadores:

- Velocidad Pico de Partícula (PPV) simulada (mm/seg)
- Frecuencia dominante de la onda (Hz)

Instrumento de recolección / generación: Reportes técnicos del Software I-Blast

8.2.

Variable Independiente: Parámetros de diseño de voladura que influyen en las vibraciones.

Definición conceptual: Son las características técnicas y geométricas de la voladura que afectan la liberación de energía explosiva y las vibraciones generadas, incluyendo la disposición de los taladros y la carga explosiva.

Definición operacional: Son los valores numéricos específicos (burden, espaciamiento, carga, tipo de explosivo, retardo) introducidos en el software I-Blast 8.2 para simular diferentes escenarios de voladura.

Influencia en las vibraciones:

- 1. El burden y espaciamiento:** Principalmente el burden, ya que el tiempo entre filas se estima en base al burden. Este cálculo se verá más adelante en el apartado timing.
- 2. El taco:** un sobrecargado de un taladro, no solo puede generar fly rocks, sino que también incremento en la fuerza de detonación, lo cual, consecuentemente incrementaría la VPP, ya que este valor depende directamente de la carga operante por taladro. Por lo que el carguío se controla por medio de los camiones fabrica, así como por un personal de piso



3. **Densidad del explosivo:** En la mina Cerro Corona aún se utiliza el ANFO, el cual tiene una densidad constante 0.85 g/cc, considerado una baja densidad, lo ayuda a la reducción de las vibraciones, de utilizar el heavy ANFO, el escenario cambia.
4. **Ubicación de la prima:** una medida que se tiene con respecto de la ubicación de la prima dentro del taladro, es ubicarlo 1 m por encima del fondo del taladro; esto evita detonar la prima, el cual posee un VOD de 7,200 m/s; alrededor de un explosivo de alta densidad debido al confinamiento por la longitud de carga
5. **El control de la carga operante:** es fundamental para controlar el exceso de las vibraciones, puesto que aun realizando un disparo con una salida con filas y taladros en una voladura tipo Nonel, la carga operante podría ser mayor al diseño ya que los retardos poseen: dispersión, generándose un pico de vibraciones que podría dañar la estabilidad del talud debido a que se pueden acoplar de 2 a 3 taladros a la vez.

En la voladura de producción dentro del tajo Cerro Corona, desde varios años atrás, se realiza con voladura electrónica, con lo cual se elimina la dispersión de los retardos cortos, permitiendo un abanico de posibilidades en poner un tiempo determinado entre taladros. No obstante, elegir el tiempo entre taladros, es el punto crítico para la generación de vibraciones, ya que no existe una recomendación específica.

Un parámetro que se usa como guía es el de Chura y EXSA S.A. (2018), siendo este:

$$T_{et} = K_d \times B$$

Dónde:

Tet = Tiempo entre taladros (ms).

B = Burden (m).

Kd = Factor que va desde 2 a 5 (ms/m).

6. **La secuencia de salida:** juega un rol importante en la generación de la onda de choque y por ende las ondas sísmicas. Pues, no es lo mismo realizar un disparo con una salida con filas y realizar una salida con filas y taladros; es decir, denotar toda una fila de taladros que contiene entre 4 hasta 20 taladros, a detonar un taladro a la vez. Ya que la “carga operante”, es distinta en ambos casos. Sin embargo, en este punto es necesario considerar varios aspectos:

Instrumento de recolección / generación: Reportes operativos de voladura (para datos históricos), Configuración de escenarios en Software I-Blast 8.2 (para parámetros simulados).

Tabla 3

Resumen de las Variables y Operacionalización

Variable	Tipo	Dimensiones	Indicadores	Índices	
Parámetros de voladura que influyen en las vibraciones	Independiente	Diseño de carga	Burden	m	
			Espaciamiento	m	
			Carga	kg/m	
			Retardo	ms	
			Longitud de carga explosiva	m	
		Simulación en el software	Carga por taladro	kg/tal	
			Tipo de explosivo		
			Tiempos de retardo	ms	
			Monitoreo de las vibraciones	PPV	mm/s
				Frecuencia dominante	Hz
Las vibraciones generadas por las voladuras.	Dependiente	Estado del talud de banco	Radio de influencia	m	
			Derrame de material	Imágenes	
		Ocurrencia de nuevas fracturas	Imágenes		
		Agrietamiento de fracturas ya existentes.	Imágenes		



3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el primer objetivo específico (OE1), se ha tomado en cuenta el criterio de daño de Devine además de las fórmulas matemáticas para el cálculo de las constantes de atenuación del macizo rocoso, los cuales se detallan más adelante. Estas formulas están incorporadas en el software I-Blast 8.2, es por ello la importancia de tener datos de entrada de cada dominio de roca que se encuentra mapeado por el departamento de geomecánica de la mina Cerro Corona.

Para el segundo objetivo, en el monitoreo se han empleado instrumentos y equipos especializados como el sismógrafo Instantel y el software Blastware. El sismógrafo registrara las tres ondas sísmicas, vertical, longitudinal y transversal, los cuales fueron procesados en gabinete con el software Blastware para obtener principalmente la dispersión de las vibraciones, todo ello de acuerdo a la normativa USBM RI 8507 y OSMRE.

Para el tercer objetivo, se realizar una toma de imágenes, tanto de las paredes de los bancos, así como las zonas de deslizamiento dentro del tajo Cerro Corona. Ello, ha permitido evaluar, desde un punto de vista de voladura, el estado de los taludes del banco del tajo Cerro Corona.

3.4.1. Criterio de daño y simulación de las vibraciones

En la mina Cerro Corona se han definido los límites críticos, muchos años atrás, para cada tipo de dominio de roca. Esto se hizo con la finalidad de controlar los daños producidos por la voladura de rocas para lo cual se utilizó el modelo de H&P, a través de estudios de onda elemental. Estos límites críticos definidos se pueden ver a detalle en el Anexo 5.



En base a este estudio, y a los informes geomecánicos, se ha utilizado el criterio de daño de PPV de Devine, el cual identifica las zonas de daño, a partir de la cual se puede buscar un diseño adecuado utilizando los parámetros de roca intacta y de macizo rocoso. Este criterio se rige en la siguiente ecuación:

$$PPV = K \times \left(\frac{d}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

PPV: Velocidad de pico partícula en mm/seg.

Q: Carga operante.

d: Distancia de medición

α : factor de Atenuación de la roca (características geológicas, litológicos, geotécnicos y geomecánicas de la estructura del macizo por donde se transmite la onda).

K: Factor controlado principalmente por el explosivo y tipo de secuenciación (densidad del explosivo, VOD, cantidad de carga y el número de taladros, tiempos).

Esta ecuación se encuentra ya establecido dentro del software I-Blast 8.2, y permite realizar simulación dividiendo la influencia del proyecto de voladura en zonas. Lo cual es muy interesante, ya que el daño de un disparo no es flat o constante, sino que varía de acuerdo a factores como la secuencia de salida, numero de filas de la malla, factor de carga, cercanía lo lejanía al talud, entre otros. Es así, que la simulación entregada por



el I-Blast 8.2, te otorga una mejor visión para posicionar el punto de monitoreo en campo cercano.

3.4.2. Cálculo de las constantes K y alfa

Para el cálculo de las constantes de atenuación del macizo rocoso, se tomado como referencia a Chura (2018), en el cual parte de la fórmula de Devine:

Es decir:

$$SD = \left(\frac{d}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)$$

Entonces:

$$PPV = K \times SD^{-\alpha}$$

1. Linealización matemática

Se pone el logaritmo a ambos lados (se puedes usar ln o log10):

Con logaritmo natural

$$\ln(PPV) = \ln(K) - \alpha \ln(SD)$$

Lo cual es una recta:

$$Y = a + bX$$

Siendo:

$$Y = \ln(PPV)$$

$$X = \ln(SD)$$

$$a = \ln(K)$$



$$b = -\alpha$$

Con algoritmo en base 10, es casi lo mismo.

2. Cálculo por mínimos cuadrados (fórmula cerrada)

Con N mediciones (SD_i , PPV_i), define:

$$X_i = \ln(SD_i), \quad Y_i = \ln(PPV_i),$$

El estimador de mínimos cuadrados para la pendiente b e intercepto a es:

$$b = \frac{N \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$a = Y - bX$$

Donde:

$$X = \frac{1}{N} \sum X_i, \quad Y = \frac{1}{N} \sum Y_i$$

Luego se recupera las constantes:

$$\alpha = -b$$

$$K = e^\alpha$$

(ó $K=10^\alpha$ si se trabaja con \log_{10}).

3.4.3. Normativa USBM RI 8507 y OSMRE

U.S. Bureau of Mines – Report of Investigations 8507, es un informe técnico publicado en 1980 por el U.S. Bureau of Mines cuyo objetivo fue establecer criterios científicos para evaluar el daño estructural causado por vibraciones de voladura.



Importancia

Es el documento de referencia más utilizado a nivel mundial para:

- Definir límites permisibles de vibración
- Relacionar PPV (velocidad pico de partícula) con frecuencia
- Proteger estructuras, viviendas e infraestructura

1. Criterio principal del USBM RI 8507

El informe concluye que el daño no depende solo de la PPV, sino también de la frecuencia de la vibración.

Curvas límite de daño

El RI 8507 establece curvas PPV–frecuencia, donde:

- Baja frecuencia - mayor riesgo de daño
- Alta frecuencia - la estructura tolera mayor PPV

Valores típicos de referencia (viviendas)

Frecuencia (Hz)	PPV máx. permisible
------------------------	----------------------------

< 10 Hz	12.5 mm/s
---------	-----------

10 – 40 Hz	12.5 – 50 mm/s
------------	----------------

> 40 Hz	50 mm/s
---------	---------

Estos valores no garantizan cero daños, pero reducen significativamente el riesgo.



2. ¿Qué es la OSMRE?

OSMRE significa: Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement

Es una agencia federal de EE. UU., dependiente del Department of the Interior, encargada de regular y fiscalizar la minería a cielo abierto, especialmente carbón.

3. Relación entre USBM RI 8507 y OSMRE

La OSMRE adopta y hace obligatorios los criterios técnicos del USBM RI 8507 dentro de su normativa legal.

Es decir:

- USBM RI 8507 → base técnica y científica
- OSMRE → marco legal y regulatorio

4. Límites legales OSMRE para vibraciones por voladura

La OSMRE establece dos formas de cumplimiento:

Método por frecuencia (basado en RI 8507)

Se aplican directamente las curvas PPV–frecuencia.

Método conservador (sin análisis de frecuencia)

Si no se mide frecuencia, se aplica:

- $PPV \leq 12.5 \text{ mm/s (0.5 in/s)}$

Este es el límite más usado por su simplicidad.



5. ¿Dónde se usan estas normativas?

Aunque son de origen estadounidense, se utilizan ampliamente en:

- América Latina
- Europa
- África
- Australia

Especialmente cuando:

- No existe normativa local específica
- Se requiere un criterio internacional reconocido
- Hay conflictos con comunidades o infraestructura sensible

3.5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.5.1. Ubicación y acceso

La unidad minera Cerro Corona se encuentra situada en el Distrito Minero de Hualgayoc, en la región norte de Perú, departamento de Cajamarca, específicamente a 1.5 km al oeste-noroeste del pueblo de Hualgayoc. Geográficamente, la propiedad se localiza en las coordenadas Longitud $78^{\circ} 37' 17''$ O y Latitud $6^{\circ} 45' 47''$ S, en un terreno montañoso con elevaciones que oscilan entre los 3,600 y 4,000 metros sobre el nivel del mar. En términos de distancias relativas, la mina se ubica aproximadamente a 600 km al nor-noroeste de la capital, Lima, y a unos 80 km al norte de la ciudad de Cajamarca.

El acceso principal a la unidad minera se realiza por vía terrestre desde la ciudad de Cajamarca, recorriendo una distancia aproximada de 80 kilómetros a



través de una ruta que es predominantemente asfaltada, completándose el trayecto final con un tramo corto de carretera afirmada (sin asfaltar). La logística de transporte para suministros y concentrado se efectúa mediante camiones, destacando que el concentrado se transporta en convoyes a lo largo de 380 km hasta el puerto de Salaverry, cerca de Trujillo, dado que no existe conexión ferroviaria directa al sitio. Adicionalmente, la ciudad de Cajamarca cuenta con un aeropuerto regional que recibe vuelos regulares, facilitando la conexión aérea con el resto del país.

La ubicación de la mina Cerro Corona se puede ver a detalle en el Anexo 1.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

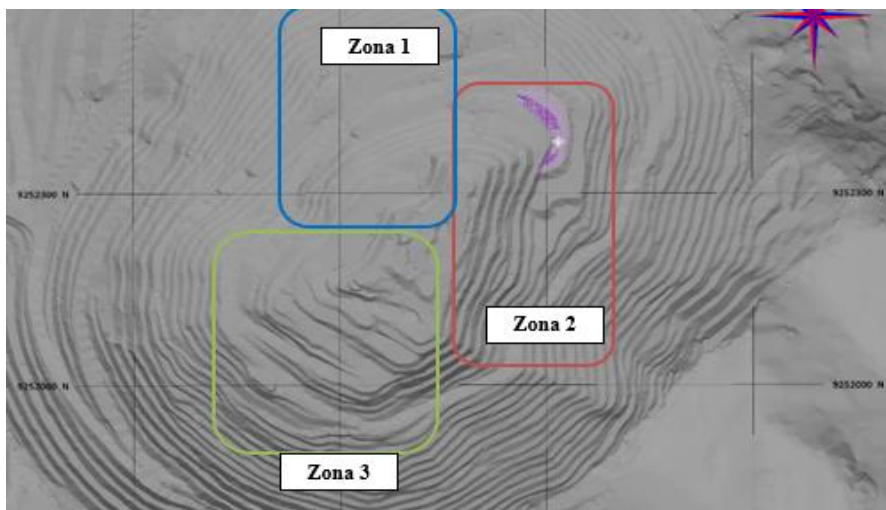
4.1. SIMULACIÓN DE VOLADURAS EN I-BLAST PARA PREDECIR NIVELES DE PPV

El primer objetivo de esta investigación fue modelar y simular voladuras en I-Blast 8.2, variando parámetros de diseño, para predecir niveles de PPV y analizar su ajuste a límites normativos. Para ello, se han tomado diseño de los patrones de perforación y los diseños de carga de la mina Cerro Corona para llevarlos dentro del software I-Blast con el fin de hacer ajustes en estos parámetros y proyectar PPV que estén por debajo de los límites críticos de cada dominio de roca, así evitar daños sobre los taludes finales del tajo Cerro Corona.

Estos diseños se hicieron de manera detallada en 3 proyectos distintos dividiéndolo en 3 zonas de trabajo, con el fin de abarcar más zonas del fondo de mina del tajo Cerro Corona. Ver figura 9.

Figura 9

Vista general de las zonas monitoreadas



En la figura 9, se puede apreciar las zonas en donde se ubicaron los proyectos diseñados y monitoreados posteriormente. El detalle de diseño de cada proyecto dentro del software I-Blast 8.2, se puede ver a continuación:

4.1.1. Proyecto de voladura py-3840 zona 1

A. Consideraciones del macizo rocoso

Con sustento en la información técnica suministrada por el Departamento de Geomecánica, se caracterizó el macizo rocoso correspondiente al Nivel 3840, Zona 1 del tajo Cerro Corona, identificando tres dominios litológicos clave: Diorita-Caliza, Caliza Fracturada y Diorita Argilizada. Para establecer la base física del modelo en el software I-Blast, se recopilaron y procesaron parámetros fundamentales tales como densidad, velocidad de onda P, resistencia a la compresión y tracción, módulos elásticos y las constantes de atenuación sísmica (K y α). Estos valores fueron ingresados en la interfaz del programa para configurar las 'Plantillas Geológicas' específicas, asegurando que las propiedades asignadas representen fielmente las condiciones del terreno para las simulaciones posteriores.

Figura 10

Modelo geológico del dominio Diorita Caliza

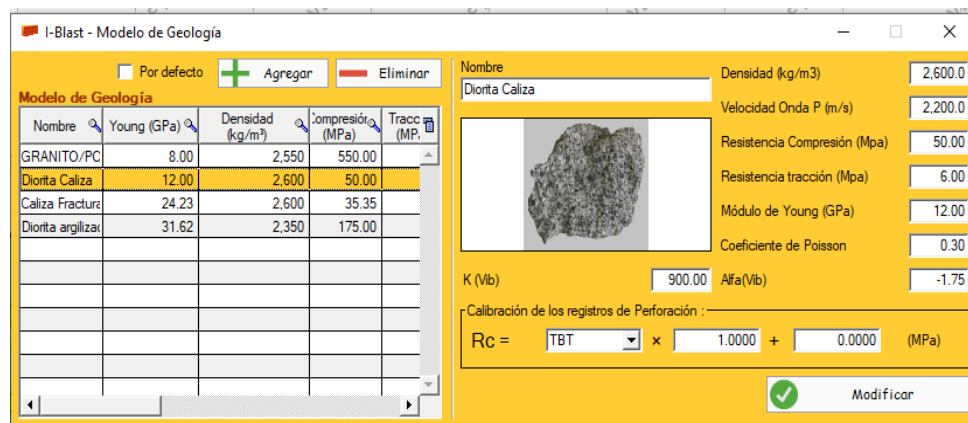


Tabla 4*Parámetros geológicos de Diorita Caliza*

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Diorita-Caliza	-
Densidad	2,600.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,200.00	m/s
Resistencia a la compresión	55.00 - 65.00	MPa
Resistencia a la tracción	6.0	MPa
Módulo de Young	12.0	GPa
Relación de Poisson	0.30	-
K (Vib)	900	-
Alfa (Vib)	-1.75	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

Como se aprecia en la figura 10 y tabla 4, para el dominio litológico denominado Diorita-Caliza, se definieron las propiedades físicas y geomecánicas detalladas en la Tabla 4. Entre los parámetros característicos ingresados al sistema destacan una densidad de 2,600 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,200 m/s y una resistencia a la compresión en el rango de 55 a 65 MPa. Estos valores constituyen la base numérica utilizada para configurar la plantilla geológica de este material, cuya representación visual dentro del software se aprecia en la Figura 10.

Figura 11

Modelo geológico del dominio Caliza Fracturada

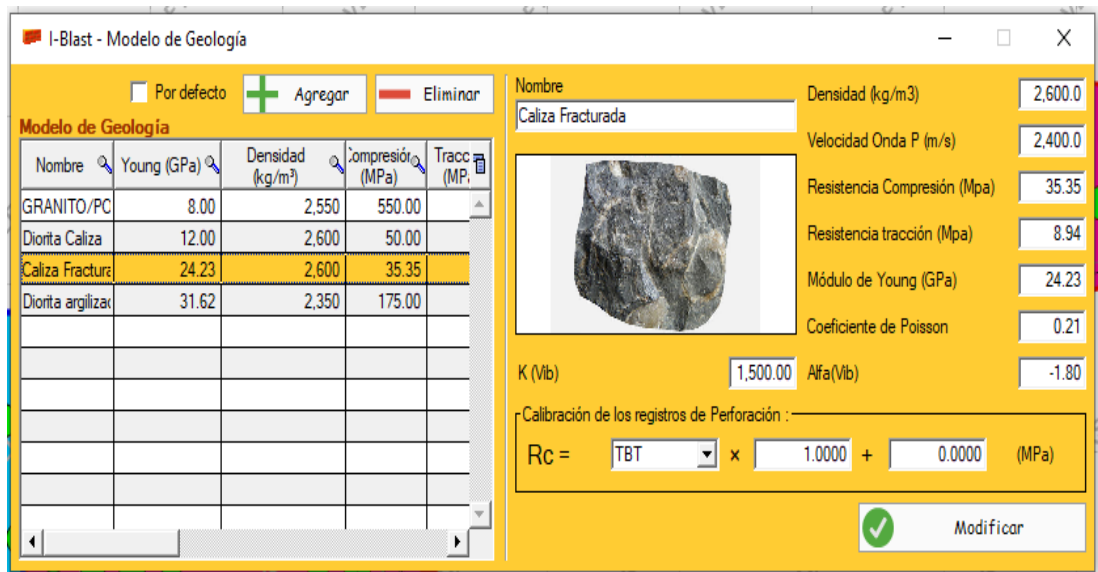


Tabla 5

Parámetros geológicos de Caliza Fracturada

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Caliza-Fracturada	-
Densidad	2,600.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,400.00	m/s
Resistencia a la compresión	35.35	MPa
Resistencia a la tracción	8.94	MPa
Módulo de Young	24.23	GPa
Relación de Poisson	0.21	-
K (Vib)	1500	-
Alfa (Vib)	-1.80	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

Por su parte, el dominio litológico de Caliza Fracturada fue caracterizado según los parámetros técnicos expuestos en la Tabla 5. Para este material, se incorporaron al modelo variables determinantes como una densidad de 2,600.00 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,400.00 m/s y una resistencia a la compresión

de 35.35 MPa. Estos datos permitieron la calibración de su plantilla geológica correspondiente, la cual se ilustra gráficamente en la Figura 11.

Figura 12

Modelo geológico del dominio Diorita Argilizada

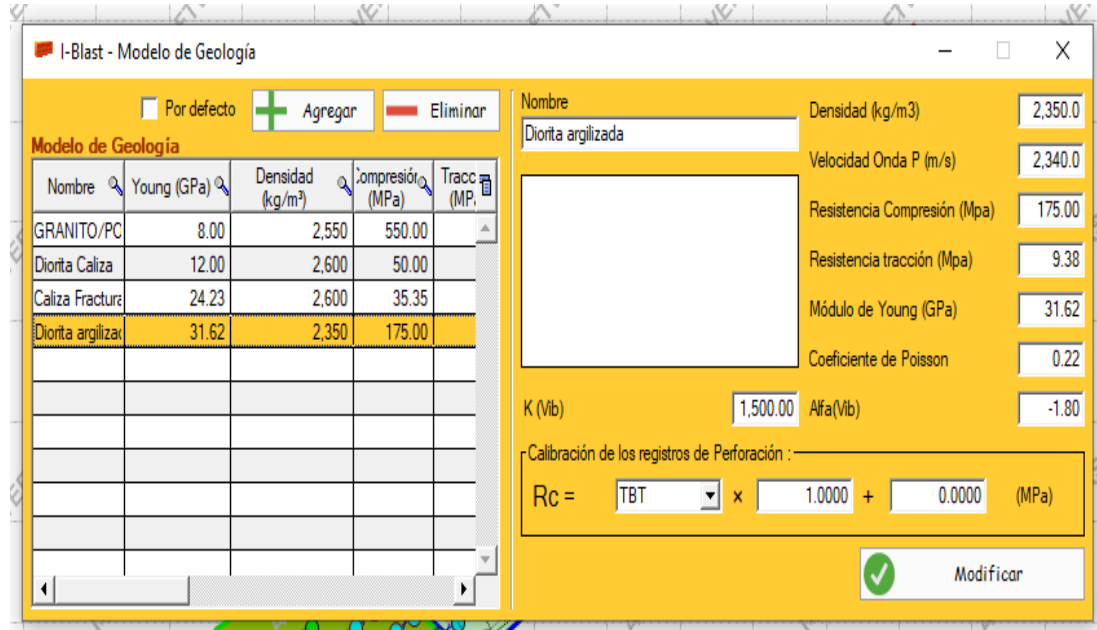


Tabla 6

Parámetros geológicos de Diorita Argilizada

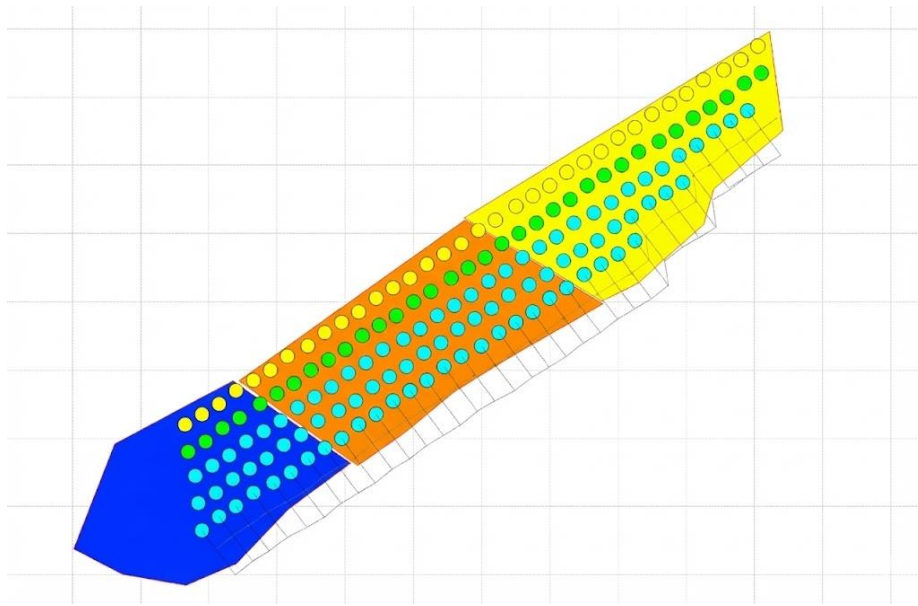
Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Diorita-Caliza	-
Densidad	2,350.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,340.00	m/s
Resistencia a la compresión	175	MPa
Resistencia a la tracción	9.38	MPa
Módulo de Young	31.62	GPa
Relación de Poisson	0.22	-
K (Vib)	1500	-
Alfa (Vib)	-1.75	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

El dominio de Diorita Argilizada se definió con base en las propiedades geomecánicas listadas en la Tabla 6. Este material se configuró en el modelo

utilizando parámetros distintivos como una densidad de 2,350.00 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,340.00 m/s y una resistencia a la compresión de 175 MPa. La representación espacial de esta plantilla geológica dentro del entorno de simulación se muestra en la Figura 12.

Figura 13

Delimitación del dominio geológico



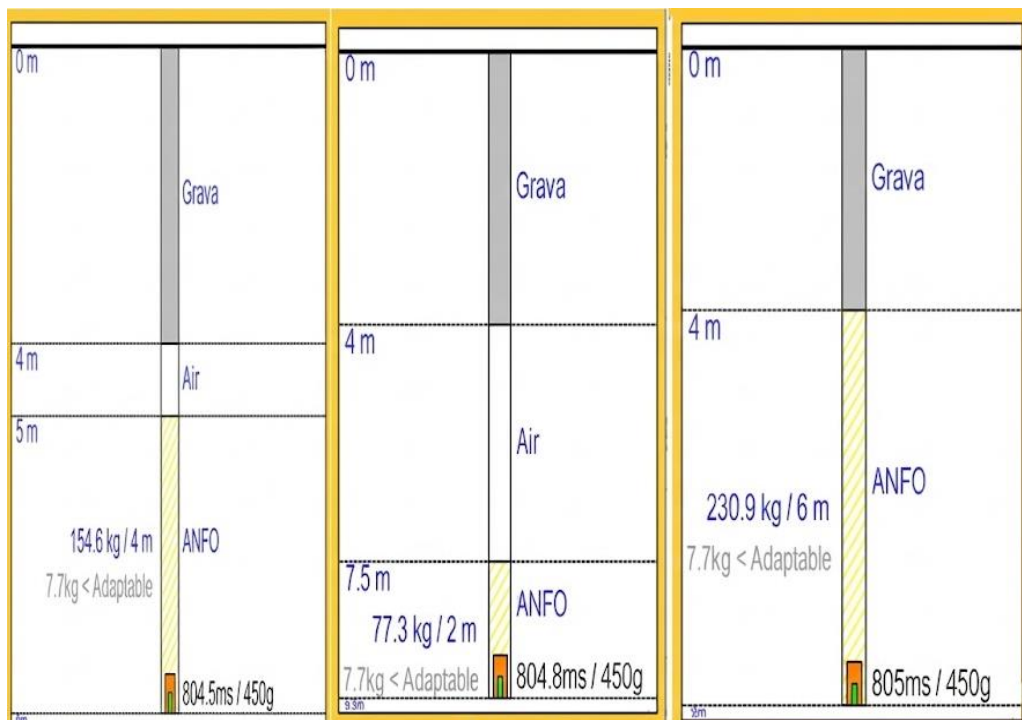
Para la definición del modelo geológico en el software I-Blast 8.2, se procedió a delimitar la zona de influencia mediante la creación de un polígono situado en una cota superior respecto al nivel de los taladros de perforación. A esta geometría se le asignaron las propiedades geomecánicas previamente configuradas en la 'Plantilla Geológica' (como se muestra en la Figura 13). Finalmente, se aplicó una proyección vertical descendente al polígono para asegurar que los parámetros litológicos abarcaran la totalidad de la columna de perforación y el volumen de roca a volar, garantizando así que la simulación considere las características del macizo en toda el área de diseño.

B. Diseño de carga

Posterior a la caracterización del macizo rocoso, se procedió a configurar la distribución de la carga explosiva dentro de los taladros utilizando el módulo de diseño de I-Blast. Se definieron dos arquitecturas de carga distintas para cumplir con los objetivos operativos: un diseño amortiguado para los taladros de contorno, orientado a minimizar el daño en las paredes del tajo (control de taludes), y un diseño de carga continua para los taladros de producción, enfocado en maximizar la fragmentación de la roca. La disposición de los explosivos, el taco inerte y las cámaras de aire se detallan a continuación:

Figura 14

Diseño de columnas de carga para taladros de contorno y producción



Como se aprecia en la figura 14, la configuración de las columnas de carga simuladas en I-Blast. A la izquierda se presenta el diseño para el taladro de Contorno, el cual incorpora una cámara de aire (air deck) de 1m y 3.5 m para

reducir la densidad de carga lineal y proteger la pared del tajo. A la derecha se muestra el taladro de Producción, diseñado con una columna explosiva continua de 6 m para maximizar la fragmentación.

C. Diseño de la malla en 3D

Para garantizar la correcta ubicación espacial de los taladros, se integró el diseño de perforación con la topografía actual del banco en el software I-Blast. Esta visualización tridimensional permite validar el burden real y el espaciamiento en función de la cara libre del talud, asegurando que la distribución geométrica de la malla se adapte a las irregularidades del terreno antes de la ejecución.

Figura 15

Visualización tridimensional de los taladros y análisis de la cara libre

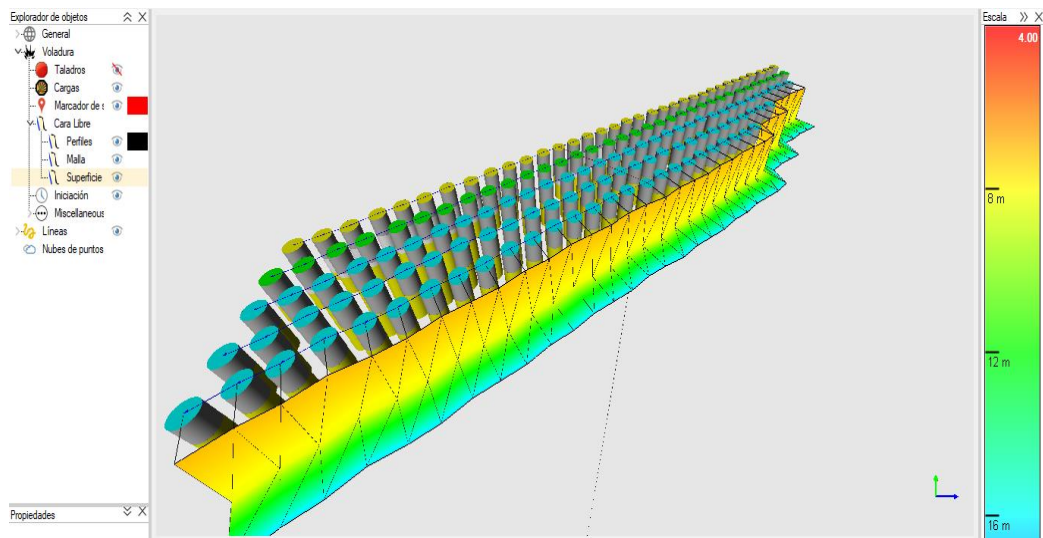
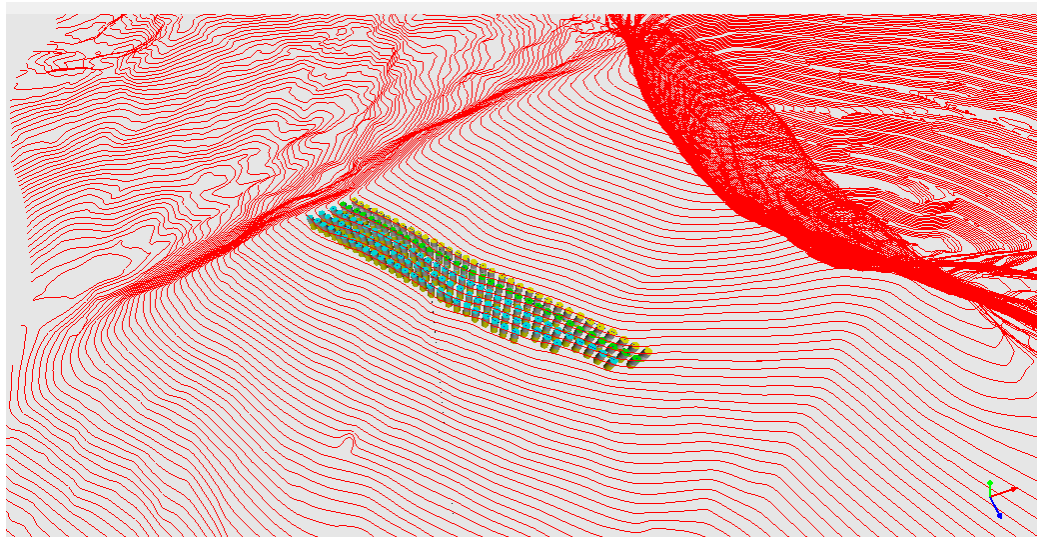


Figura 16

Proyección de la malla de perforación sobre la topografía del terreno

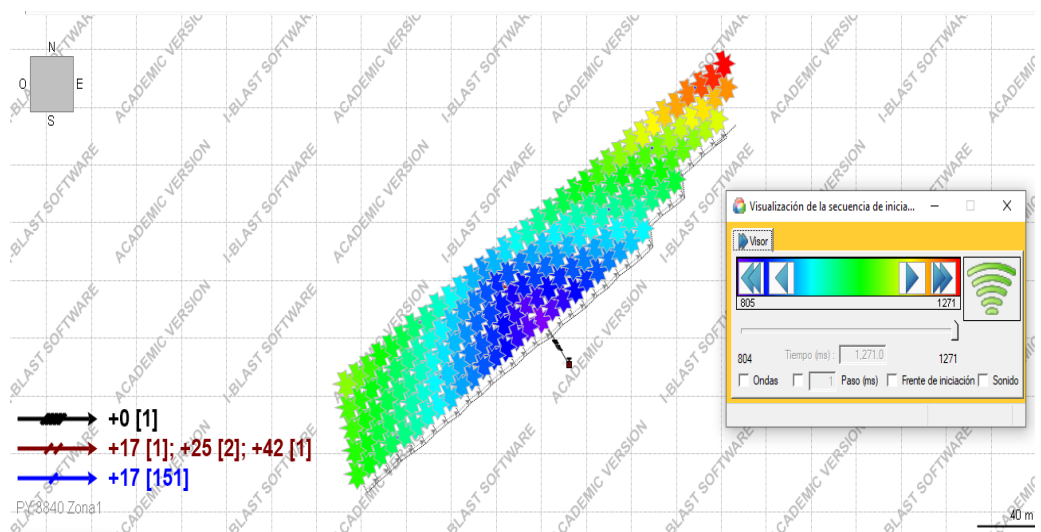


D. Secuencia de salida

Simulación de la secuencia de iniciación y tiempos de detonación en I-Blast. La escala cromática representa la cronología del disparo, donde los tonos fríos (azul) indican los tiempos iniciales y los cálidos (rojo) los finales, confirmando la dirección de salida y el alivio progresivo de la malla.

Figura 17

Simulación de la secuencia de salida cronológica

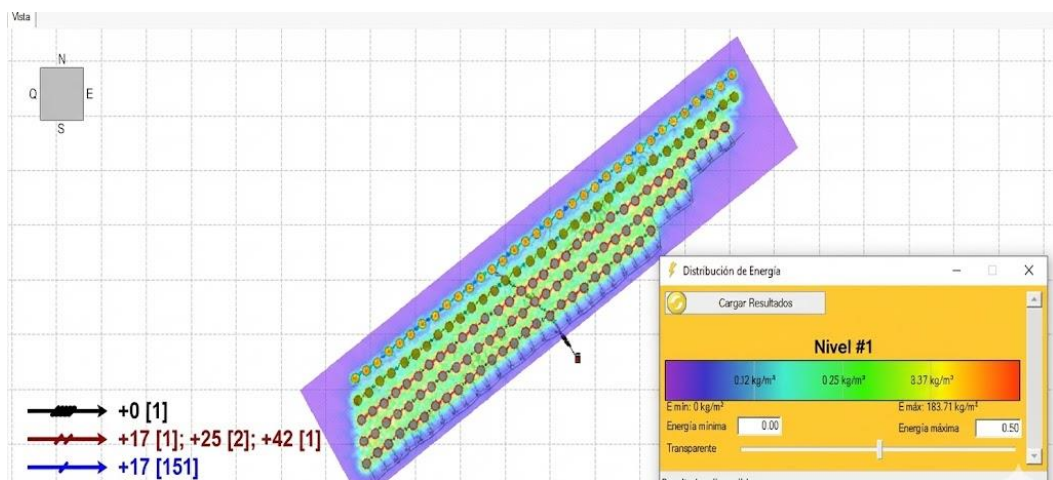


E. Halos de energía

Para evaluar la eficiencia de la malla propuesta, se realizó una simulación de la distribución espacial de la energía dentro del macizo rocoso utilizando el software I-Blast. El análisis consistió en dividir la altura del banco en 5 secciones (niveles) horizontales equidistantes. Esto permitió visualizar los halos de distribución de energía en cada cota, asegurando que no existan zonas con eficiencia energética (zonas frías/azules) que pudieran generar bolones, ni zonas de sobrecarga excesiva (zonas rojas saturadas) que causaran proyecciones indeseadas. La figura muestra el comportamiento energético en el corte correspondiente al Nivel #4.

Figura 18

Simulación de la distribución de energía explosiva



F. Halos de dispersión de material

El análisis del comportamiento dinámico de la voladura se complementa con las simulaciones de movimiento de material presentadas a continuación. La Figura 18 detalla el perfil de desplazamiento (heave) y la geometría esperada de

la pila de material (muck pile), validando que la energía explosiva sea suficiente para lograr un esponjamiento adecuado que facilite el carguío, sin generar proyecciones verticales descontroladas. Por su parte, la Figura 19 delimita en planta los halos de dispersión y el alcance máximo del material, proporcionando una visualización crítica para gestionar los riesgos asociados al flyrock y asegurar el control de la zona de influencia.

Figura 19

Perfil de desplazamiento y geometría predicha de la pila de material

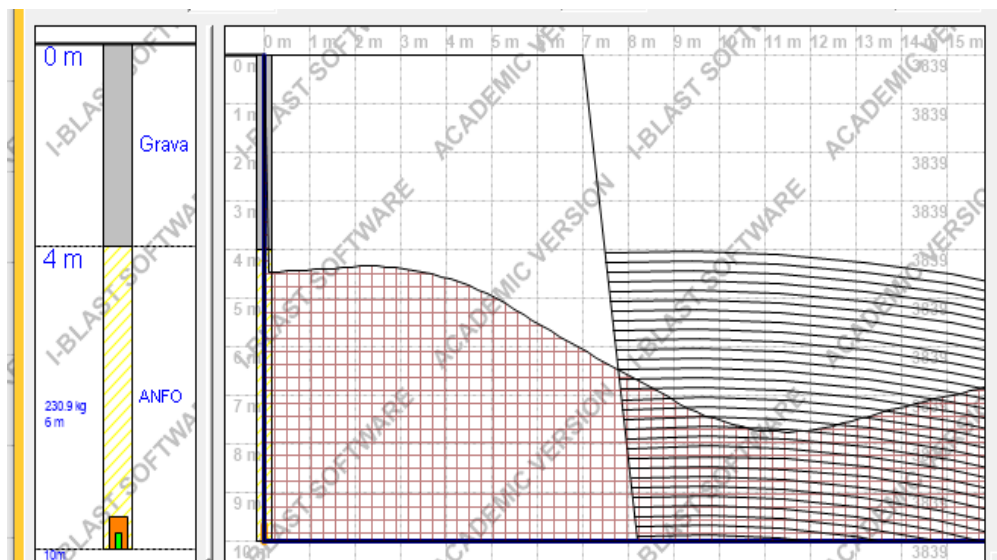
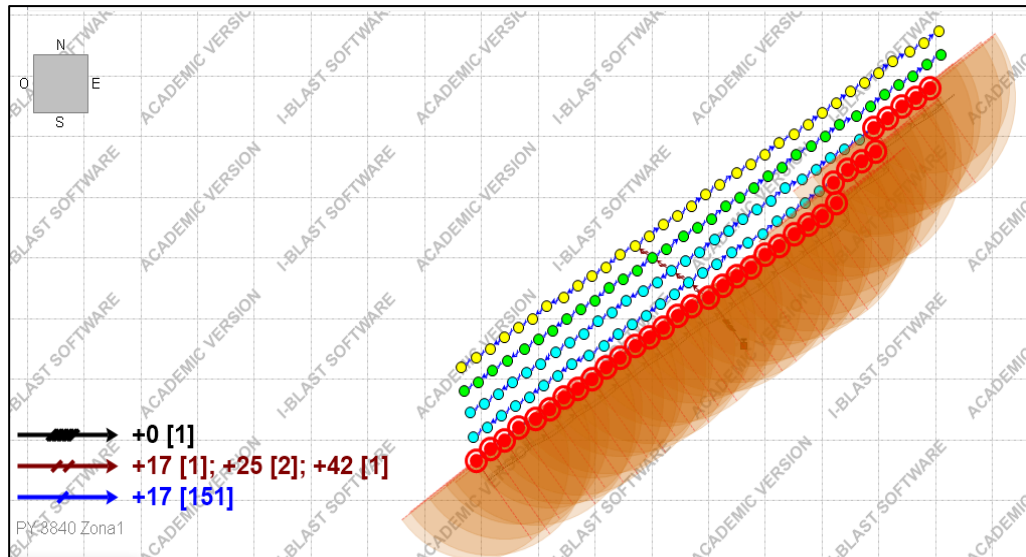


Figura 20

Proyección en planta de los halos de dispersión y alcance máximo del material volado



Las simulaciones de movimiento de material presentadas en las Figura 19 y 20 permiten anticipar el comportamiento dinámico de la voladura. La Figura 19 se ilustra el perfil de desplazamiento (heave), validando que la energía del explosivo sea suficiente para esponjar y desplazar la roca, facilitando el posterior carguío sin generar una proyección excesiva (flyrock). Por su parte, la Figura 20 delimita los halos de dispersión en superficie, permitiendo visualizar el área final que ocupará el material fragmentado, dato crítico para la gestión de la seguridad y la planificación de los equipos de limpieza en el tajo

G. Proyección de vibraciones

Con el objetivo de controlar el impacto sísmico de la voladura, se establecieron zonas de monitoreo virtual (denominadas Zona A hasta Zona H) distribuidas estratégicamente alrededor de la malla de perforación. La ubicación espacial de estos receptores y su interacción con los dominios geomecánicos se

presenta en la Figura 21. Posteriormente, se simularon los valores de Velocidad Pico de Partícula (PPV) para cada punto, considerando la carga operante y la distancia a la fuente. Los resultados, detallados en la Tabla 7 y visualizados en el histograma de la Figura 22, indican que la Zona A registra los niveles más altos (5,269 mm/s) debido a su proximidad (25.96 m), mientras que las zonas más alejadas muestran una atenuación progresiva, permitiendo verificar el cumplimiento de los umbrales críticos de daño.

Figura 21

Proyección de zonas de monitoreo de vibraciones (py-3840 zona 1)

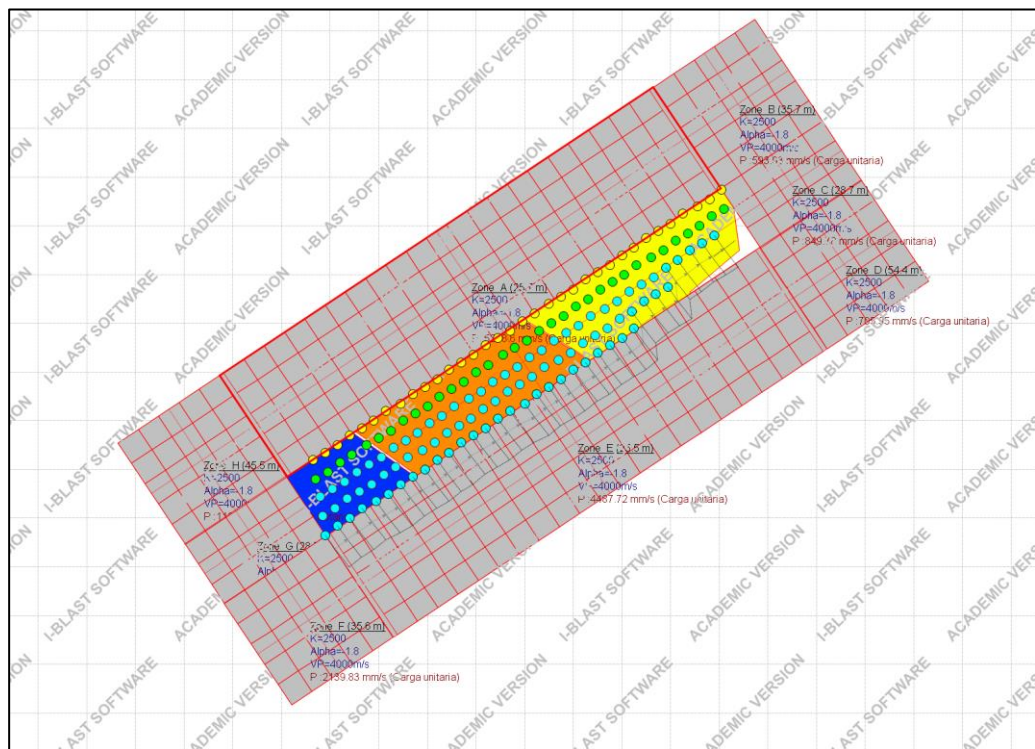


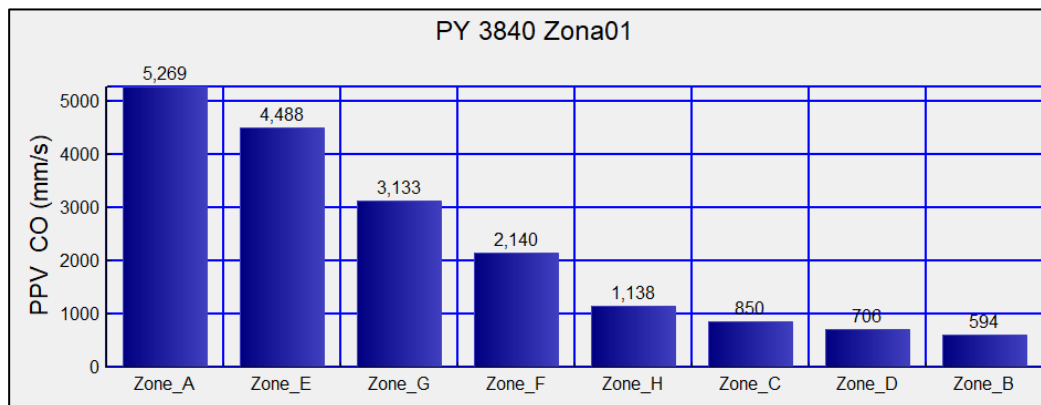
Tabla 7*Resultados de simulación de PPV y distancias críticas (py-3840 zona I)*

Zona	k	Alfa	Holes (Taladros)	Distancia (m)	Carga Q (kg)	PPV (mm/s)	PPV Critico (mm/s)
A	2500	-1.8	107/123/13 1/149/19/2 5/80/94	25.96	1543.27	5268.6	1053.72
B	2500	-1.8	102/128/15 4/14/30/75 /99	80.49	1311.97	593.93	118.786
C	2500	-1.8	102/128/15 4/14/30/75 /99	65.96	1311.97	849.78	169.956
D	2500	-1.8	102/128/15 4/14/30/75 /99	73.12	1311.97	705.95	141.19
E	2500	-1.8	113/117/13 7/143/86/8 8	26.92	1387.8	4487.72	897.544
F	2500	-1.8	130/156/12 /32/73/101	35.84	1080.67	2139.83	427.966
G	2500	-1.8	130/156/12 /32/73/101	29	1080.67	3132.57	626.514
H	2500	-1.8	130/156/12 /32/73/101	50.9	1080.67	1138.26	227.652

La Tabla 7 resume los resultados de la simulación de PPV para la zona py-3840, la cual utiliza constantes de atenuación sísmica fijas ($K=2500$ y $\alpha = -1.8$). Al analizar los datos para la distancia de interés más cercana a 50 metros, se identifica la Zona H con una distancia simulada de 50.90 metros. En esta voladura, se aplicó una carga explosiva (Q) de 1080.67 kg sobre el grupo de taladros 130/156/12/32/73/101, lo que resultó en un PPV simulado de 1138.26 mm/s en el punto de monitoreo para las condiciones geomecánicas parametrizadas.

Figura 22

Histograma de niveles de PPV por zona (py-3840 zona 1)



De acuerdo a la figura 22, de la simulación donde se identifica a la Zona A como el punto crítico con el mayor nivel de velocidad pico de partícula (5,269 mm/s).

4.1.2. Proyecto de voladura py-3860 zona 2

A. Consideraciones del macizo rocoso

En esta sección se establecen las Consideraciones del macizo rocoso necesarias para la parametrización del modelo numérico en el software I-Blast. Se han configurado las 'Plantillas Geológicas' específicas para los dominios litológicos de Granito - Potásico y Diorita-Caliza, integrando propiedades físico-mecánicas claves como la densidad, la velocidad de onda P, la resistencia a la compresión y los factores de atenuación sísmica (K y α). La caracterización detallada de estos parámetros se presenta en las Tablas 8 y 9, mientras que su representación visual dentro de la interfaz del software se ilustra en las Figuras 23 y 24, asegurando así la fidelidad del modelo para las simulaciones posteriores.

Figura 23

Modelo de Geología" del software I-Blast

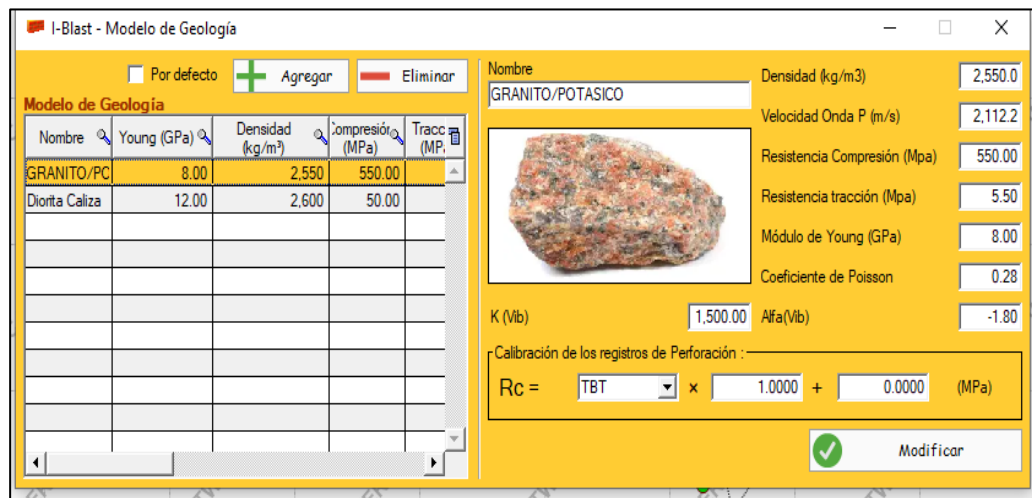


Tabla 8

Plantilla geológica del dominio Granito – Potásico

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Diorita-Potsico	-
Densidad	2,550.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,112.00	m/s
Resistencia a la compresión	55.00 - 65.00	MPa
Resistencia a la tracción	5.5	MPa
Módulo de Young	8.0	GPa
Relación de Poisson	0.28	-
K (Vib)	1500	-
Alfa (Vib)	-1.80	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

La configuración del dominio Granito - Potásico (nombrado como Diorita-Potsico en la plantilla) se estableció mediante los parámetros geomecánicos detallados en la Tabla 8. Entre los valores clave ingresados para la simulación destacan la densidad de 2,550.00 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,112.00 m/s, y un rango de resistencia a la compresión de 55.00 - 65.00 MPa. Esta plantilla, que también incluye las constantes de atenuación sísmica ($K=1500$ y $\alpha=-1.80$),

define las propiedades físicas del macizo rocoso para la simulación, cuyo modelo geológico espacial se visualiza en la Figura 23 dentro del software I-Blast.

Figura 24

Modelo de Geología" del software I-Blast

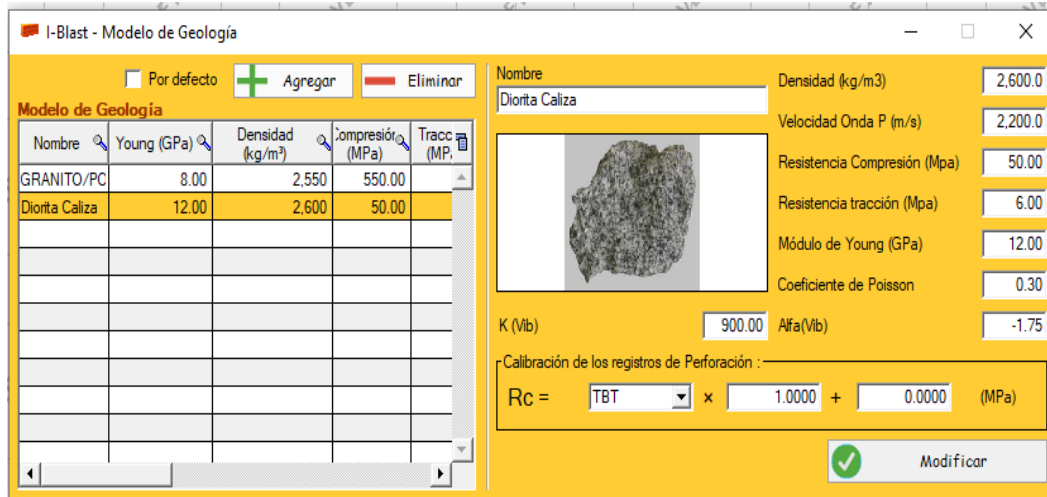


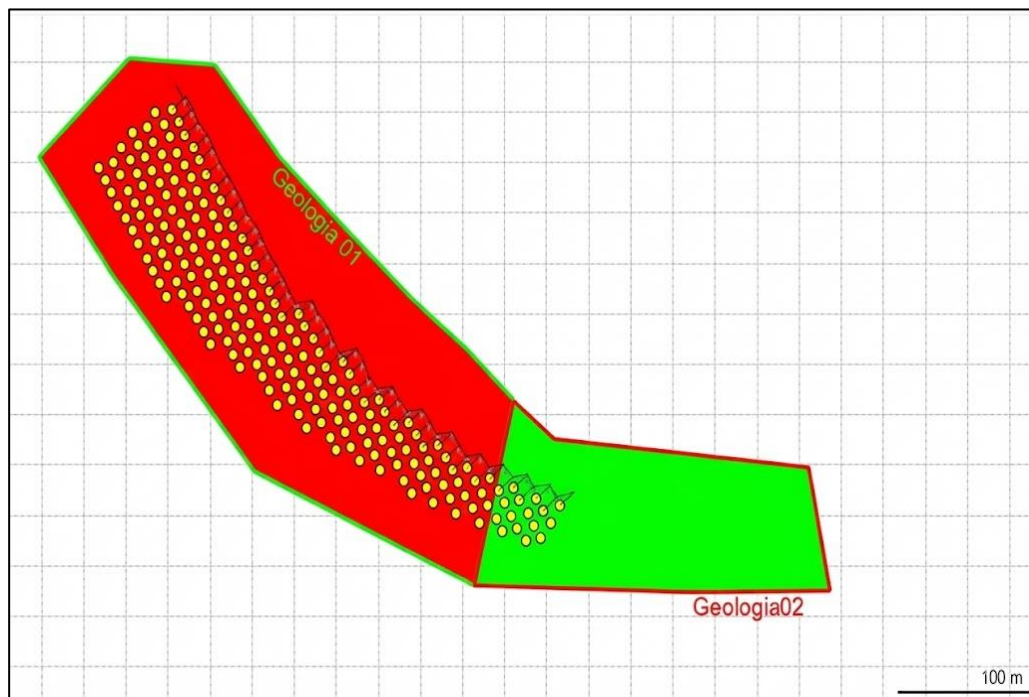
Tabla 9

Plantilla geológica del dominio Diorita-Caliza

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Diorita-Caliza	-
Densidad	2,550.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,112.00	m/s
Resistencia a la compresión	55.00 - 65.00	MPa
Resistencia a la tracción	5.5	MPa
Módulo de Young	8.9	GPa
Relación de Poisson	0.28	-
K (Vib)	760	-
Alfa (Vib)	-1.75	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

Figura 25

Delimitación del dominio geológico



Para la definición del modelo geológico en el software I-Blast, se procedió a delimitar la zona de influencia mediante la creación de un polígono situado en una cota superior respecto al nivel de los taladros de perforación. A esta geometría se le asignaron las propiedades geomecánicas previamente configuradas en la 'Plantilla Geológica' (como se muestra en la Figura 25). Finalmente, se aplicó una proyección vertical descendente al polígono para asegurar que los parámetros litológicos abarcaran la totalidad de la columna de perforación y el volumen de roca a volar, garantizando así que la simulación considere las características del macizo en toda el área de diseño.

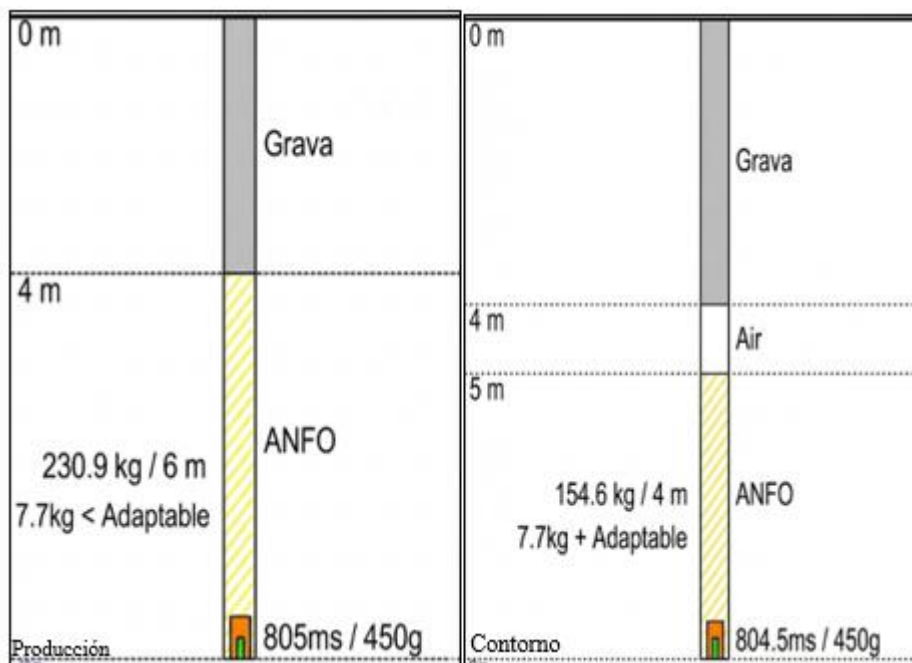
B. Diseño de carga

Para la determinación de los parámetros geométricos de la malla y la configuración de las columnas explosivas, se utilizó una matriz de cálculo basada

en la teoría de rotura de Roger Ash, complementada con criterios de Jimeno. A partir de las variables geomecánicas del macizo y las propiedades del explosivo, se dimensionaron dos tipos de carga diferenciadas: una para producción, maximizando la energía para la fragmentación, y otra para contorno (pre-corte o amortiguado), la cual incorpora cámaras de aire para reducir la presión en las paredes del tajo y garantizar la estabilidad de los taludes.

Figura 26

Diseño de columnas de carga para taladros de producción y contorno



A la izquierda se ilustra el diseño del taladro de Producción, conformado por una columna explosiva continua de 6 m (230.9 kg de ANFO) con el objetivo de maximizar la energía de fragmentación. A la derecha se presenta el taladro de Contorno, el cual incorpora una cámara de aire (air deck) de 1 m intermedia para desacoplar la carga; esta técnica reduce la presión de detonación contra las paredes del tajo, minimizando el daño al macizo remanente y asegurando la estabilidad de los taludes.

C. Diseño de la malla en 3D

Una vez definidos los parámetros de carga y la geometría teórica, se procedió a la integración del diseño dentro del entorno tridimensional del tajo. Para asegurar la fidelidad de la simulación, se importó la superficie topográfica actualizada de la zona de disparo al software I-Blast.

Esta visualización espacial, mostrada en la Figura 28, permite validar la ubicación exacta de los collares de los taladros sobre el terreno irregular y verificar la condición real de la cara libre (free face). El modelamiento en 3D es indispensable para confirmar que el burden efectivo se mantenga constante a lo largo de la columna explosiva y para evitar desviaciones que podrían generar proyecciones de roca (flyrock) o zonas de mala fragmentación.

Figura 27

Vista isométrica de la configuración geométrica de la malla en entorno 3D – PY3860

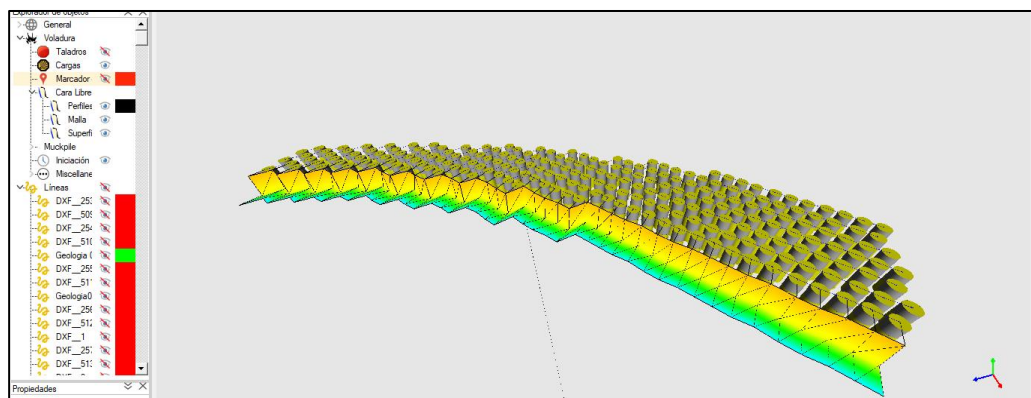
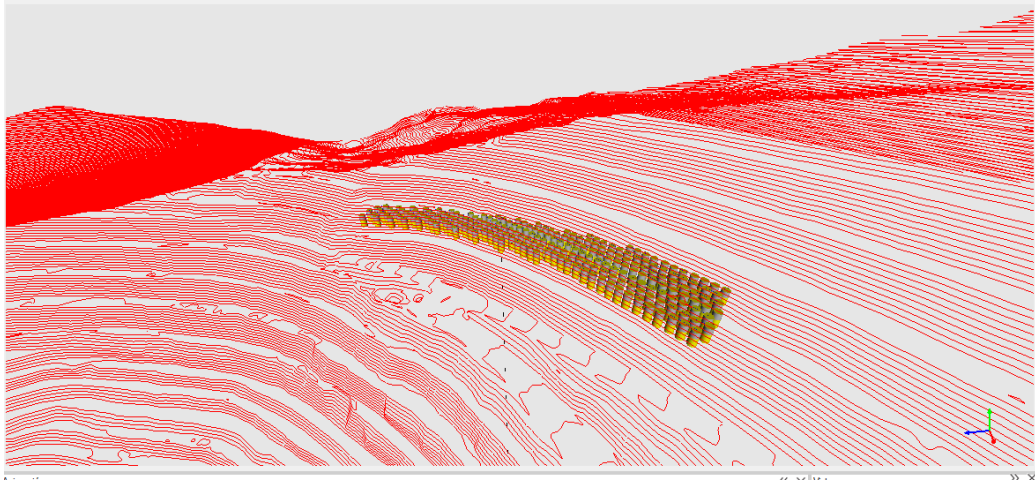


Figura 28

*Proyección espacial del diseño de voladura sobre la topografía real del tajo –
PY3860*



D. Secuencia de salida

Para la configuración del sistema de iniciación, se diseñó un esquema de amarre en 'V' (tipo Echelon) que permite una salida progresiva y simétrica de la voladura. Como se detalla en el diagrama de tiempos, se emplearon retardos de superficie de 17 ms entre taladros de una misma fila y retardos intercalados de 25 ms y 42 ms entre filas (burden). Esta secuencia cronológica, que inicia en el punto central inferior ($t=0$ ms) y avanza hacia los taladros de contorno (taladros amarillos), tiene como objetivo garantizar la generación constante de cara libre efectiva durante la detonación, minimizando el confinamiento y reduciendo la probabilidad de vibraciones excesivas por superposición de ondas.

Figura 29

Diagrama de tiempos de retardo y esquema de amarre en superficie

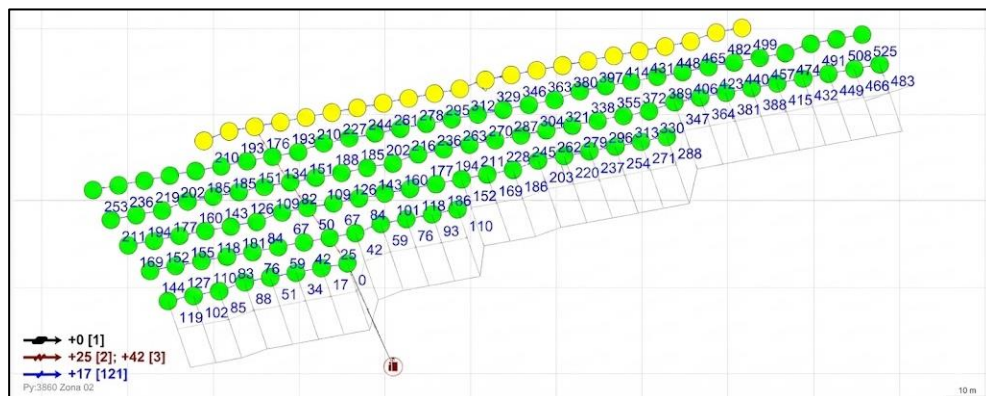
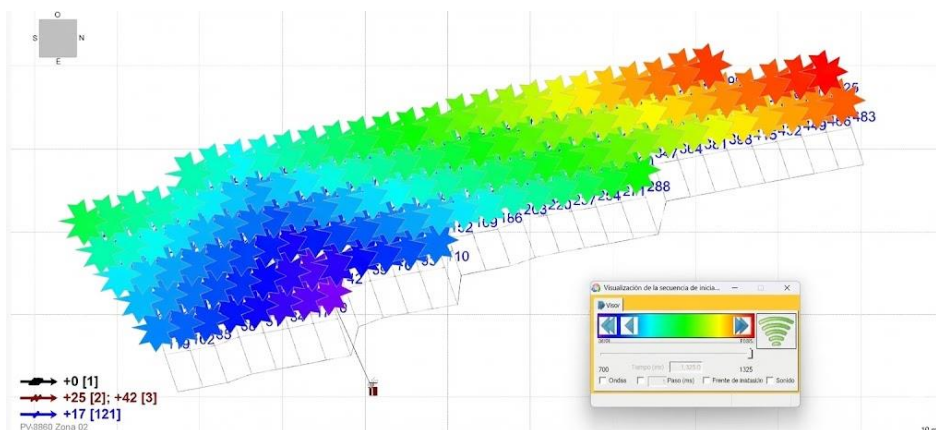


Figura 30

Simulación visual de la secuencia de salida mediante escala cromática

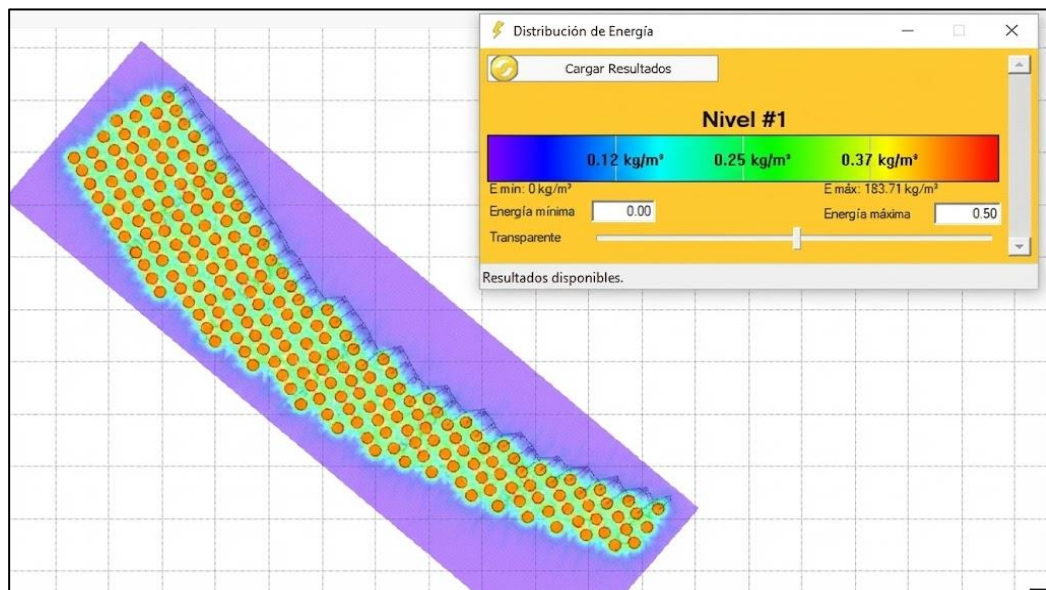


Simulación de la secuencia de iniciación y tiempos de detonación en I-Blast. La escala cromática representa la cronología del disparo, donde los tonos fríos (azul) indican los tiempos iniciales y los cálidos (rojo) los finales, confirmando la dirección de salida y el alivio progresivo de la malla.

E. Halos de energía

Figura 31

Simulación de la distribución de energía explosiva



Para evaluar la eficiencia de la malla propuesta, se realizó una simulación de la distribución espacial de la energía dentro del macizo rocoso utilizando el software I-Blast. El análisis consistió en dividir la altura del banco en 5 secciones (niveles) horizontales equidistantes. Esto permitió visualizar los halos de distribución de energía en cada cota, asegurando que no existan zonas con eficiencia energética (zonas frías/azules) que pudieran generar bolones, ni zonas de sobrecarga excesiva (zonas rojas saturadas) que causaran proyecciones indeseadas. La figura muestra el comportamiento energético en el corte correspondiente al Nivel #4.

F. Halos de dispersión de material

Una vez definido el diseño de carga y la secuencia de encendido, es indispensable validar el comportamiento cinético de la voladura mediante simulaciones de transporte de material. Este análisis permite predecir la geometría final de la pila (muck pile) y la dispersión de fragmentos, factores determinantes

para la eficiencia de los equipos de carguío y la delimitación de zonas de seguridad. A continuación, se presentan las proyecciones obtenidas en el software I-Blast, las cuales modelan tanto el desplazamiento vertical como la expansión horizontal del material volado.

Figura 32

Simulación del perfil de desplazamiento y geometría de la pila

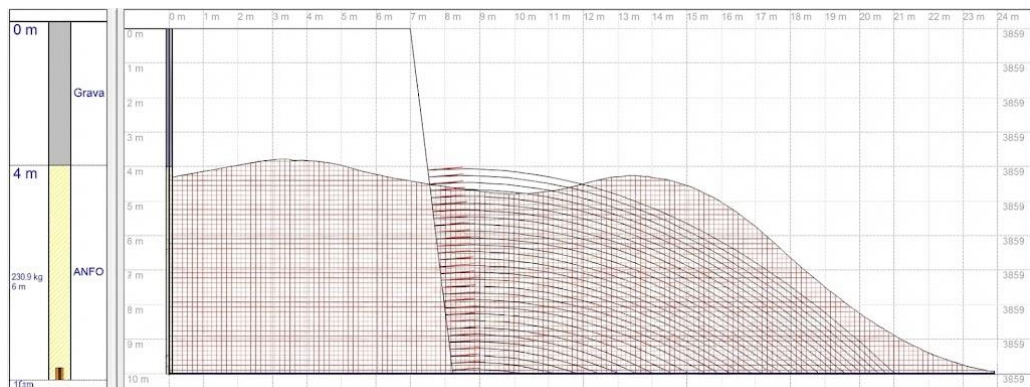
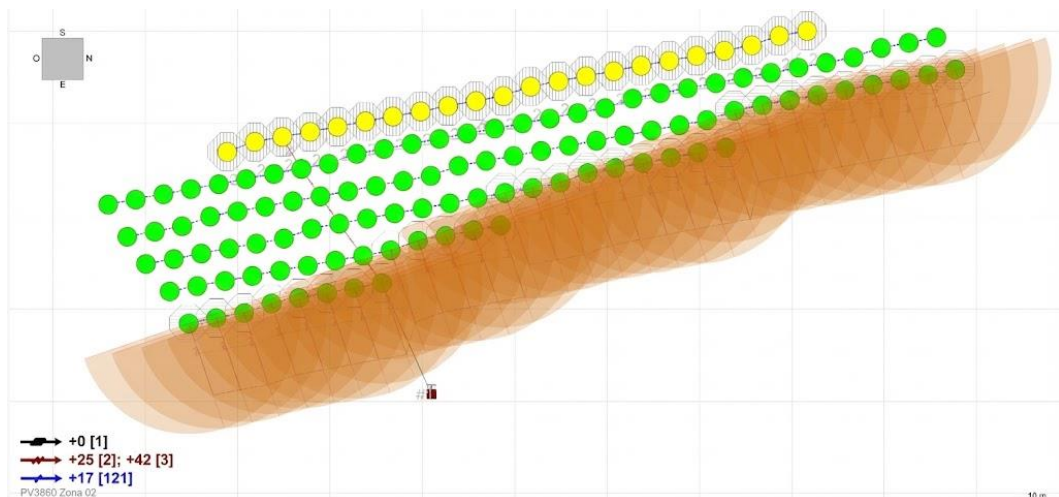


Figura 33

Proyección en planta de halos de dispersión y alcance de material



Las simulaciones de movimiento de material presentadas en las Figuras 32 y 33 permiten anticipar el comportamiento dinámico de la voladura. La Figura 32 ilustra el perfil de desplazamiento, validando que la energía del explosivo sea

suficiente para esponjar y desplazar la roca, lo que facilitará el posterior carguío sin generar proyecciones verticales excesivas. Por su parte, la Figura 33 delimita los halos de dispersión en superficie, permitiendo visualizar el área final que ocupará el material fragmentado, un dato crítico para la gestión de la seguridad (flyrock) y la planificación operativa de los equipos de limpieza en el tajo.

G. Proyección de vibraciones

Para la evaluación del impacto vibratorio en el entorno del disparo, se estableció una red de monitoreo virtual compuesta por ocho puntos de control (Zonas A-H) distribuidos estratégicamente alrededor de la malla, tal como se visualiza en la Figura 34. El cálculo predictivo de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) se realizó aplicando el modelo de Distancia Escalada, integrando las constantes de atenuación del sitio ($K=2500$, $\text{Alfa}=-1.8$) con la carga operante máxima por retardo y la distancia a la fuente. Los resultados numéricos se detallan en la Tabla 10, mientras que el análisis comparativo se presenta en el histograma de la Figura 35. De este análisis se desprende que la Zona G representa el punto crítico de mayor impacto, registrando un PPV máximo de 2,885.71 mm/s, consecuencia directa de la proximidad al frente (28.09 m) y la configuración de carga.

Figura 34

Distribución espacial de los puntos de monitoreo virtual



Visualización en planta de las ocho zonas de control (A-H) dispuestas alrededor de la malla para evaluar el impacto vibratorio en diferentes direcciones.

Tabla 10

Predicción de PPV por Zona mediante el método de Distancia Escalada

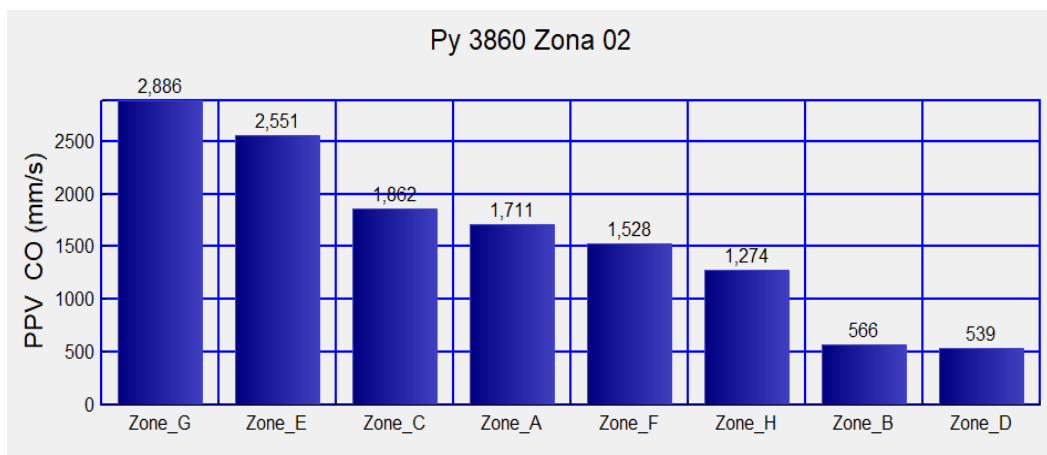
Zona	k	Alfa	Holes (Taladros)	Distancia (m)	Carga Q (kg)	PPV (mm/s)	PPV Crítico (mm/s)
A	2500	-1.8	39, 53, 87, 15	34.3	771.63	1710.67	342.134
B	2500	-1.8	54, 25	49.09	462.6	565.94	113.188
C	2500	-1.8	54, 25	25.33	462.6	1862.42	372.484
D	2500	-1.8	54, 25	50.44	462.6	538.96	107.792
E	2500	-1.8	126, 76, 78, 107, 117	33.63	1156.5	2550.65	510.13
F	2500	-1.8	95, 103, 127, 75, 79	44.7	1156.5	1528.26	305.652
G	2500	-1.8	70, 84, 41, 51	28.09	925.2	2885.71	577.142
H	2500	-1.8	39, 53, 87, 15	40.39	771.63	1274.34	254.868

La Tabla 10 presenta los resultados de la predicción de la Velocidad Pico de Partícula (PPV) mediante el método de Distancia Escalada, utilizando constantes de atenuación sísmica fijas ($K=2500$ y $\alpha=-1.8$) para todas las voladuras.

Al enfocar el análisis en la simulación más próxima a los 50 metros, se identifica que la Zona D es la que mejor se ajusta, con una distancia simulada de 50.44 metros. Esta voladura se diseñó con una carga explosiva total (Q) de 462.60 kg, la cual resultó en un PPV predicho de 538.96 mm/s en el punto de monitoreo para las condiciones geomecánicas establecidas.

Figura 35

Histograma comparativo de niveles de PPV simulados por zona



De acuerdo a la figura 35, de la simulación donde se identifica a la Zona G como el punto crítico con el mayor nivel de velocidad pico de partícula (2,886 mm/s).

4.1.3. Proyecto de voladura py-3850 zona 1

A. Consideraciones del macizo rocoso

Con base en la información técnica suministrada por el Departamento de Geomecánica de la operación, se procedió a la caracterización del macizo rocoso para el Proyecto de voladura py-3850 Zona 1, definiendo las propiedades físico-mecánicas de los dominios litológicos predominantes: Caliza Fracturada y Diorita Argilizada. Para lograr una simulación precisa del PPV y la fragmentación en el

software I-Blast, los parámetros clave como la densidad, la velocidad de onda P, las resistencias a la compresión y tracción, y los módulos elásticos fueron ingresados manualmente para configurar las 'Plantillas Geológicas' específicas de cada material. Las propiedades de la Caliza Fracturada se detallan en la Tabla 11 y su modelo se ilustra en la Figura 36, mientras que las características de la Diorita Argilizada se presentan en la Tabla 12, con su modelo en la Figura 37.

Figura 36

Modelo de Geología" del software I-Blast

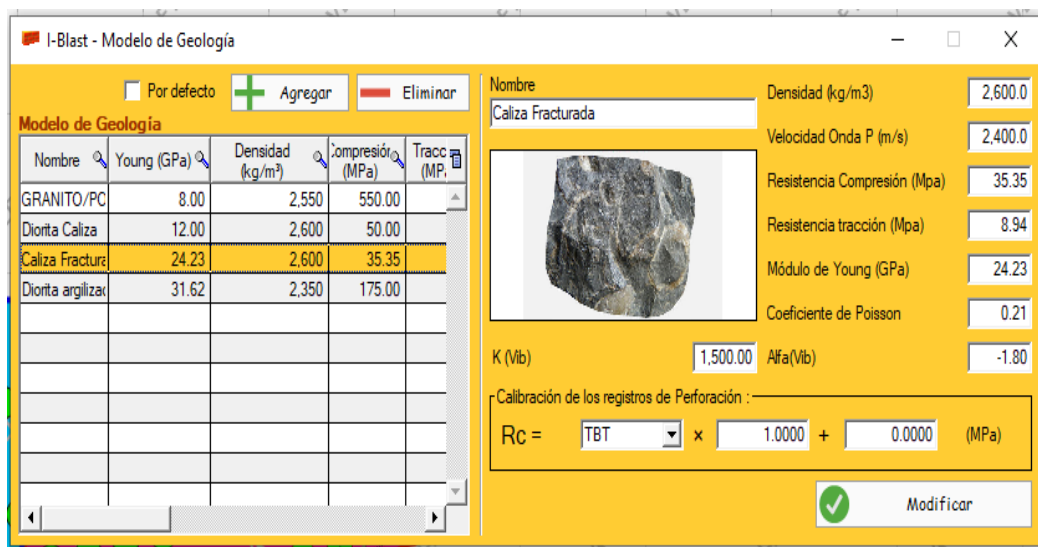


Tabla 11

Plantilla geológica del dominio Caliza fracturada

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Caliza-Fracturada	-
Densidad	2,600.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,400.00	m/s
Resistencia a la compresión	35.35	MPa
Resistencia a la tracción	8.94	MPa
Módulo de Young	24.23	GPa
Relación de Poisson	0.21	-
K (Vib)	1500	-
Alfa (Vib)	-1.80	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

La configuración del dominio Caliza Fracturada para la simulación del proyecto py-3850 se realizó utilizando la plantilla geológica detallada en la Tabla 11, la cual incorpora propiedades geomecánicas clave. Entre los parámetros ingresados, se destaca una densidad de 2,600.00 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,400.00 m/s, y una resistencia a la compresión de 35.35 MPa, junto con un módulo de Young de 24.23 GPa y las constantes de atenuación sísmica ($K=1500$ y $\alpha=-1.80$). Esta parametrización define el comportamiento del macizo rocoso en la zona de voladura, cuyo modelo espacial dentro del software I-Blast se representa en la Figura 36.

Figura 37

Modelo de Geología" del software I-Blast

The screenshot shows the 'I-Blast - Modelo de Geología' window. It features a table of geological models and a form for editing the properties of a selected model.

Nombre	Young (GPa)	Densidad (kg/m ³)	Compresión (MPa)	Tracc (MPa)
GRANITO/PC	8.00	2.550	550.00	
Diorita Caliza	12.00	2.600	50.00	
Caliza Fractura	24.23	2.600	35.35	
Diorita argilizada	31.62	2.350	175.00	

The form on the right allows editing the properties of the selected model 'Diorita argilizada':

- Nombre: Diorita argilizada
- Densidad (kg/m³): 2,350.0
- Velocidad Onda P (m/s): 2,340.0
- Resistencia Compresión (Mpa): 175.00
- Resistencia tracción (Mpa): 9.38
- Módulo de Young (GPa): 31.62
- Coefficiente de Poisson: 0.22
- K (Vib): 1,500.00
- Alfa(Vib): -1.80

Calibración de los registros de Perforación:

Rc = TBT × 1.0000 + 0.0000 (MPa)

Modificar

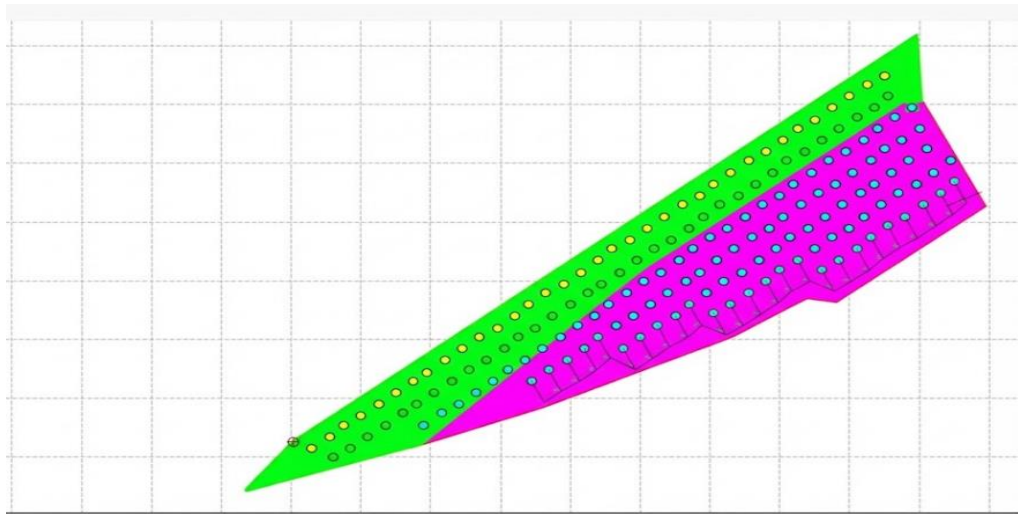
Tabla 12*Plantilla geológica del dominio Diorita Argilizada*

Campo (Field)	Valor	Unidad
Nombre	Diorita-Caliza	-
Densidad	2,350.00	kg/m ³
Velocidad de la onda P	2,340.00	m/s
Resistencia a la compresión	175	MPa
Resistencia a la tracción	9.38	MPa
Módulo de Young	31.62	GPa
Relación de Poisson	0.22	-
K (Vib)	1500	-
Alfa (Vib)	-1.75	-
Calibración	1	-
Calibración B	0	MPa

La caracterización del dominio Diorita Argilizada para la simulación se establece a partir de la Tabla 12, que lista sus propiedades geomecánicas. Los parámetros introducidos en el modelo incluyen una densidad de 2,350.00 kg/m³, una velocidad de onda P de 2,340.00 m/s, y una elevada resistencia a la compresión de 175 MPa. Adicionalmente, se registran las constantes de atenuación sísmica ($K=1500$ y $\alpha=-1.75$) y un módulo de Young de 31.62 GPa. Esta plantilla define el comportamiento del macizo rocoso y su representación gráfica dentro del software I-Blast se visualiza en la Figura 37.

Figura 38

Delimitación del dominio geológico

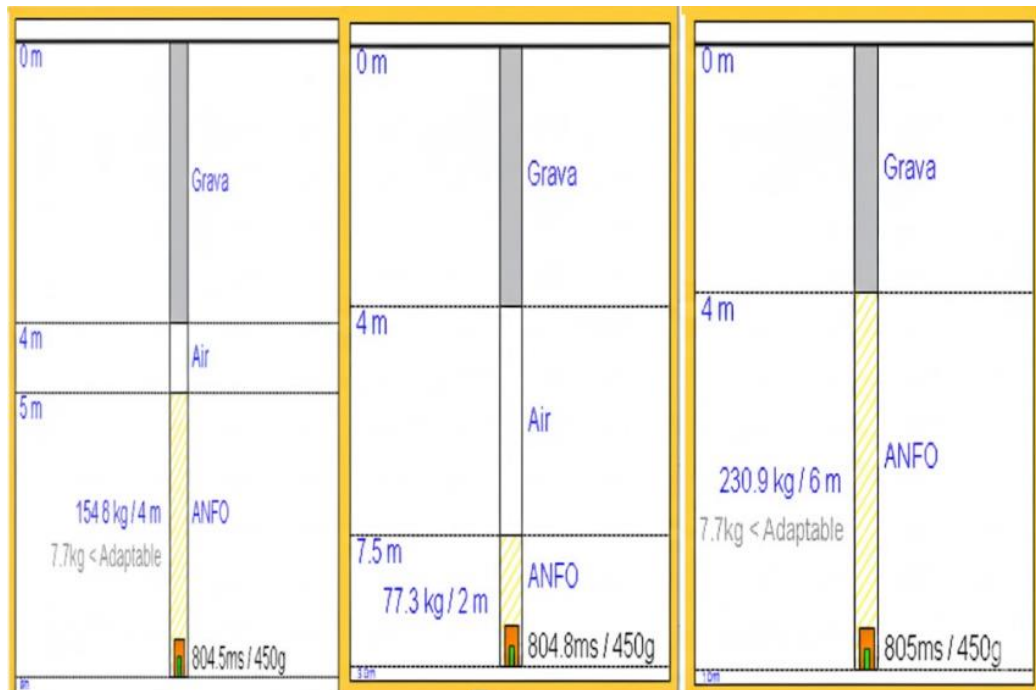


B. Diseño de carga

Para optimizar la distribución de energía explosiva según los requerimientos de cada zona del banco, se establecieron configuraciones de carga diferenciadas en el software I-Blast. Este diseño busca equilibrar la necesidad de fragmentación en el volumen principal con la protección de las paredes finales del tajo.

Figura 39

Diseño de columnas de carga para taladros de contorno y producción



La Figura 39 detalla la arquitectura de las tres columnas de carga simuladas. Para los taladros de producción (derecha), se configuró una columna explosiva continua de 6.0 m de longitud para maximizar la fragmentación. Por otro lado, para la protección de taludes se emplearon cargas desacopladas: el diseño del centro (contorno) incorpora una cámara de aire (air deck) de 3.5 m con una carga reducida de 2.0 m, mientras que el diseño de la izquierda (amortiguamiento) utiliza una cámara de aire de 1.0 m sobre una carga de 4.0 m. Esta variación en el desacoplamiento permite atenuar la energía de choque progresivamente hacia la pared final.

C. Diseño de la malla en 3D

Para garantizar la correcta ubicación espacial de los taladros, se integró el diseño de perforación con la topografía actualizada del banco en el software I-

Blast. Esta visualización tridimensional permite validar el burden efectivo y el espaciamiento en función de la cara libre del talud, asegurando que la distribución geométrica de la malla se adapte a las irregularidades del terreno antes de la ejecución.

Figura 40

Visualización tridimensional de los taladros y análisis de la cara libre

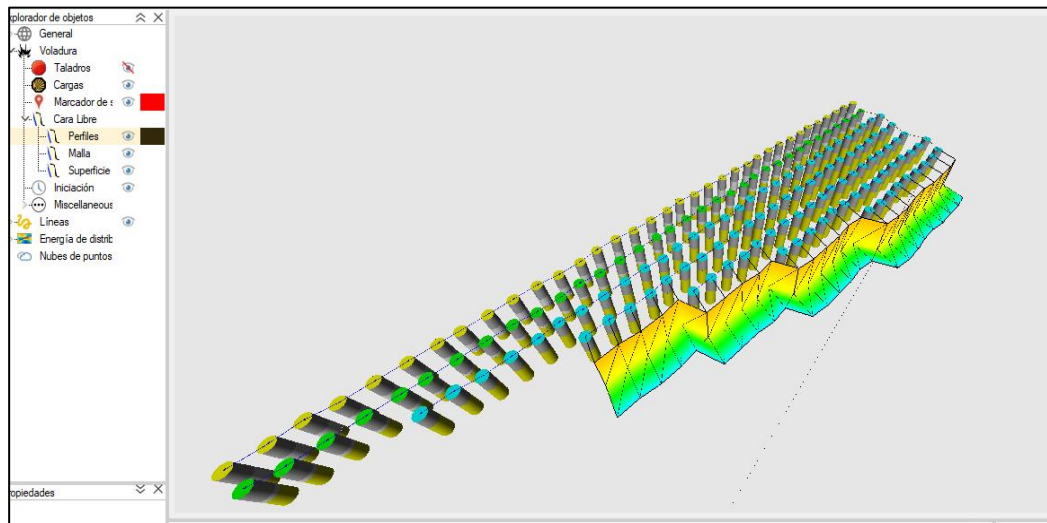
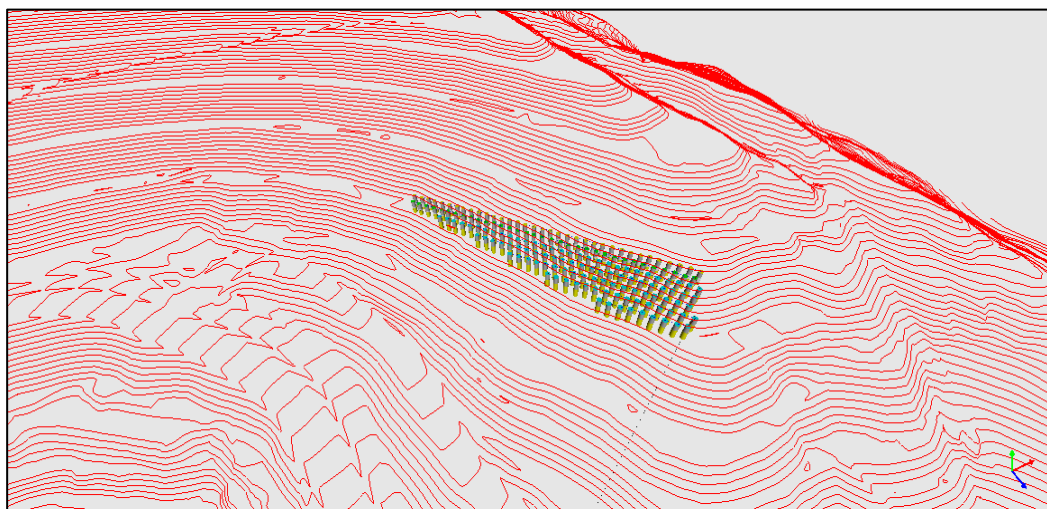


Figura 41

Proyección de la malla de perforación sobre la topografía del terreno

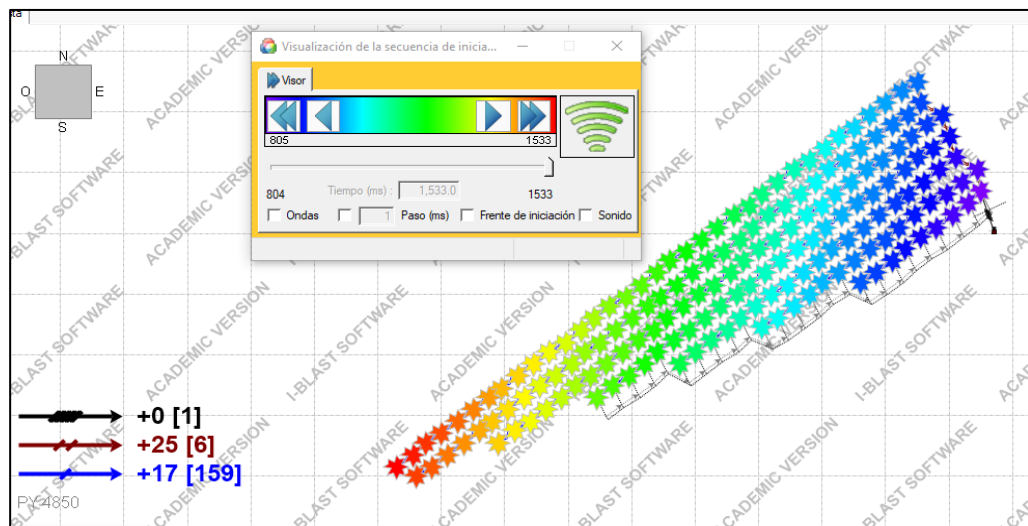


D. Secuencia de salida

Simulación de la secuencia de iniciación y tiempos de detonación en I-Blast. La escala cromática representa la cronología del disparo, donde los tonos fríos (azul) indican los tiempos iniciales y los cálidos (rojo) los finales, confirmando la dirección de salida y el alivio progresivo de la malla.

Figura 42

Simulación de la secuencia de salida cronológica



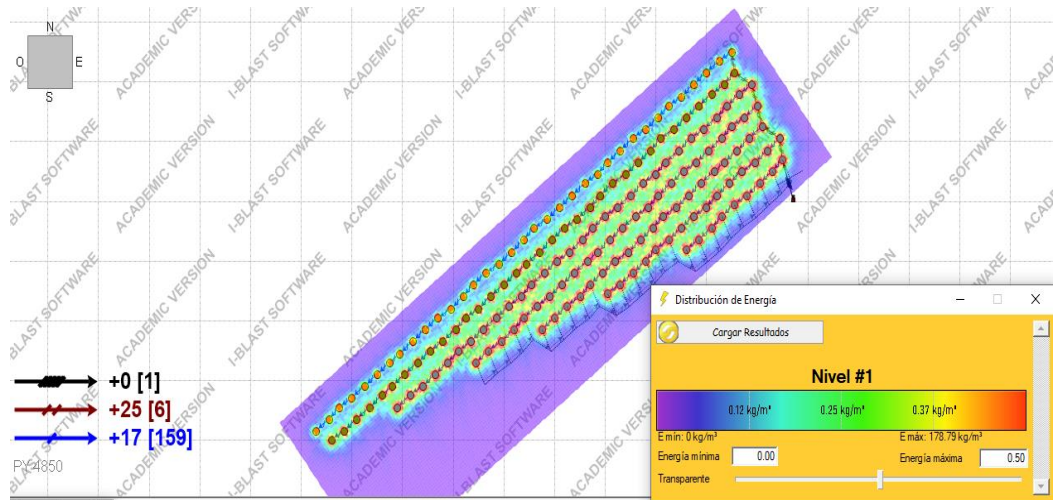
E. Halos de energía

Para evaluar la eficiencia de la malla propuesta, se realizó una simulación de la distribución espacial de la energía dentro del macizo rocoso utilizando el software I-Blast. El análisis consistió en dividir la altura del banco en 5 secciones (niveles) horizontales equidistantes. Esto permitió visualizar los halos de distribución de energía en cada cota, asegurando que no existan zonas con eficiencia energética (zonas frías/azules) que pudieran generar bolones, ni zonas de sobrecarga excesiva (zonas rojas saturadas) que causaran proyecciones

indeseadas. La figura muestra el comportamiento energético en el corte correspondiente al Nivel #4.

Figura 43

Simulación de la distribución de energía explosiva



F. Halos de dispersión de material

Las simulaciones de movimiento de material, presentadas en las Figuras 44 y 45, permiten anticipar el comportamiento dinámico de la voladura una vez detonada. La Figura 44 ilustra el perfil de desplazamiento (heave) y la geometría final de la pila, validando que la energía explosiva sea suficiente para esponjar la roca y facilitar el carguío, sin generar proyecciones verticales excesivas. Por su parte, la Figura 45 delimita en planta los halos de dispersión, permitiendo visualizar el alcance máximo del material fragmentado; este dato es crítico para establecer los perímetros de seguridad (flyrock) y planificar la operación de los equipos de limpieza en el nivel.

Figura 44

Perfil de desplazamiento y geometría predicha de la pila de material (muck pile) tras la detonación

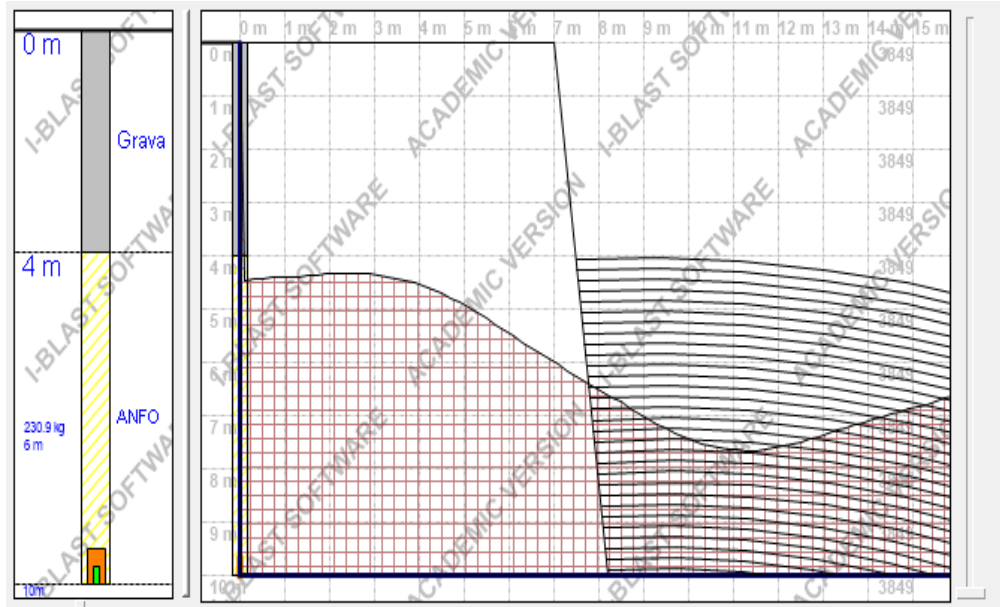
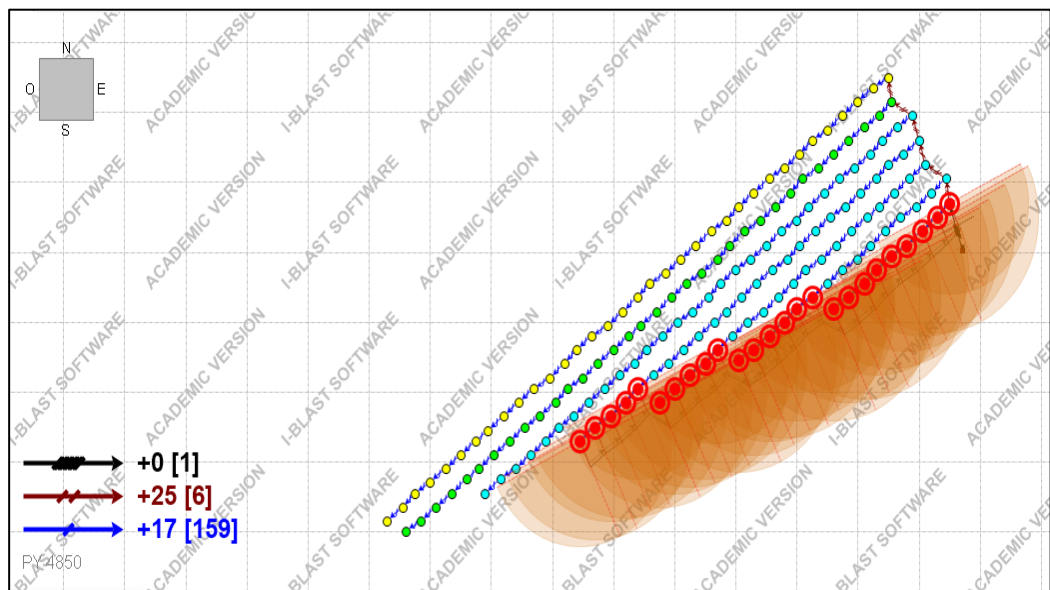


Figura 45

Proyección en planta de los halos de dispersión y alcance máximo del material volado



G. Proyección de vibraciones

Con la finalidad de asegurar el cumplimiento de los estándares ambientales y de seguridad, se establecieron zonas de monitoreo virtual alrededor del diseño de voladura PY-3850. La distribución espacial de estos puntos de control se detalla en la Figura 46, donde se evalúa la atenuación de la onda sísmica en función de la distancia y la carga operante. Los resultados de la simulación, presentados en el histograma de la Figura 47 y detallados en la Tabla 13, identifican a la Zona C como el punto de mayor impacto con un PPV de 2,456 mm/s, seguido por la Zona A (2,044 mm/s), valores que responden a su proximidad inmediata a la malla de perforación.

Figura 46

Distribución espacial de los puntos de monitoreo de vibraciones

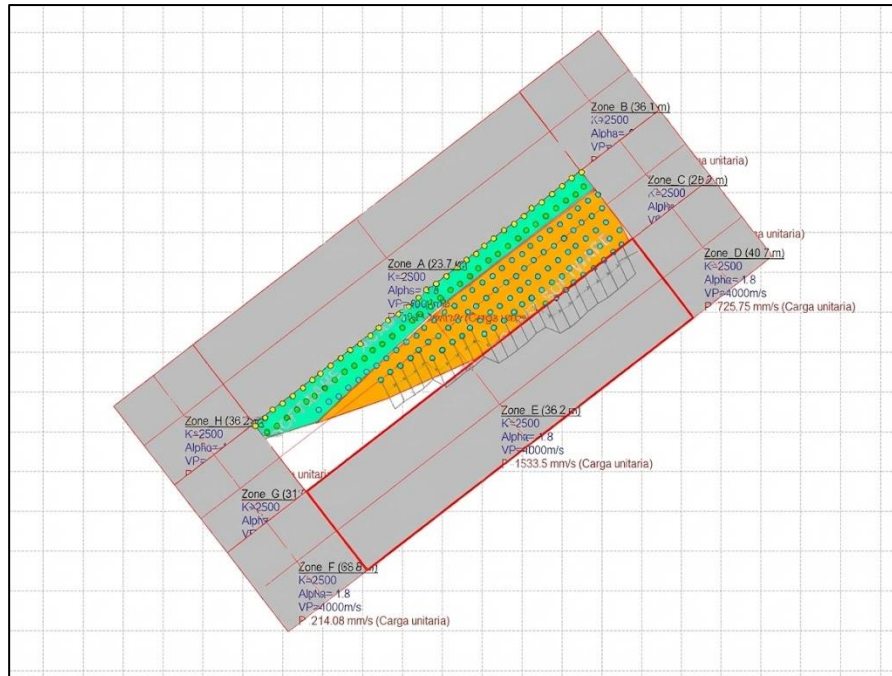


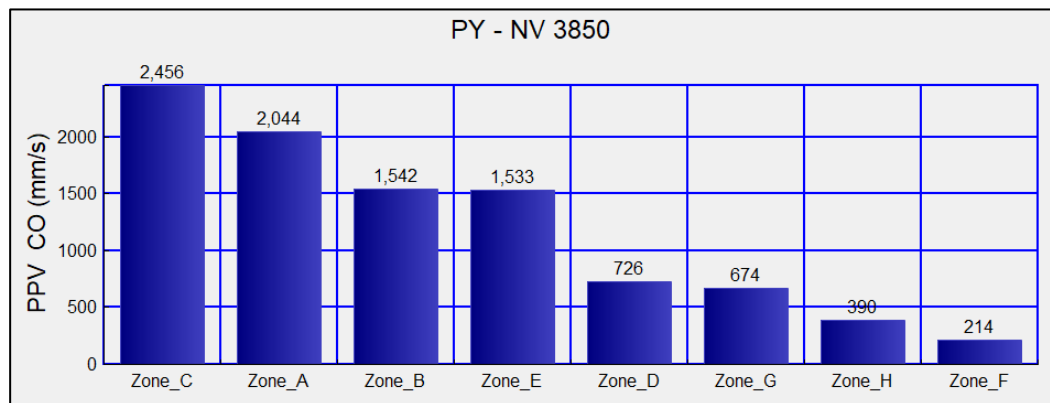
Tabla 13*Resultados de predicción de vibraciones (PPV) por zona*

Zona	k	Alfa	Holes (Taladros)	Distancia (m)	Carga Q (kg)	PPV (mm/s)
A	2500	-1.8	120/17/89	26	540.33	2043.5
B	2500	-1.8	104/150/1/73	36.33	771.63	1541.93
C	2500	-1.8	101/147/70	26.6	693.9	2456.02
D	2500	-1.8	159/143	42.76	462.6	725.75
E	2500	-1.8	111/157/8/80	36.44	771.63	1533.5
F	2500	-1.8	99/64	76.99	386.32	214.08
G	2500	-1.8	69/33	31.6	232.75	674.22
H	2500	-1.8	69/33	42.81	232.75	390.33

La Tabla 13 resume los resultados de la predicción de vibraciones (PPV) para las distintas zonas del proyecto PY-3850, calculados bajo parámetros de atenuación constantes ($K=2500$ y $\alpha=-1.8$). El análisis de los datos revela que la Zona C representa el escenario de mayor intensidad sísmica, con un PPV simulado de 2,456.02 mm/s, consecuencia directa de la proximidad al punto de monitoreo (26.6 m) y una carga operante considerable (693.9 kg). Por el contrario, la Zona F exhibe la menor respuesta vibratoria (214.08 mm/s), beneficiada por la mayor distancia de registro (76.99 m), lo que valida la tendencia decreciente de la energía mostrada en el histograma de la Figura 47 y confirma la influencia determinante de la distancia en la magnitud del impacto vibratorio simulado.

Figura 47

Histograma de niveles de PPV simulados por zona (PY-3850)



De acuerdo a la figura 22, de la simulación donde se identifica a la Zona C como el punto crítico con el mayor nivel de velocidad pico de partícula (2,456 mm/s).

De esta manera se ha culminó el diseño de estos tres proyectos, dando paso al monitoreo en campo para verificar si su proyección es válida o necesita de algunos ajustes.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MONITOREO IN SITU DE LAS VIBRACIONES

El segundo objetivo de esta investigación fue implementar el monitoreo in situ de vibraciones para registrar PPV reales para validar las predicciones obtenidas con I-Blast 8.2. Esta validación es importante para cotejar los resultados en campo con la simulación obtenida en el software I-Blast, ya que, al existir diferencias, que sobre todo en PPV real que estén por encima del valor proyectado de PPV, fue necesario ajustar los parámetros del diseño de carga y la secuencia de salida de modo que se obtengan mejores resultados. Todo este proceso se detalla a continuación:



4.2.1. Proceso del monitoreo de vibraciones

El proceso de monitoreo de vibraciones se realiza mediante una empresa especializada en voladura y se hace para todos los disparos, siempre cuando las condiciones del terreno lo permitan. La finalidad es controlar que las vibraciones registradas no sobrepasen los límites críticos que dañen el talud del tajo Cerro Corona. Para ello, existe un proceso definido y equipos especializados.

A. Equipos y herramientas utilizadas

Para realizar el monitoreo de vibraciones, se utilizan equipos y herramientas específicas, los cuales son utilizados e instalados según la secuencia de proceso de monitoreo. Estos son:

Equipo sismógrafo de marca Instantel

Es un equipo utilizado para registrar las ondas sísmicas producidas por la voladura tales como: longitudinal, vertical y transversal, los cuales poseen una frecuencia y una velocidad de partícula específica que es registrado por el geófono y almacenado en la memoria del sismógrafo. Ver figura 48.

Figura 48

Vista del equipo Instantel con sus componentes



Nota: Equipo de voladura

En la figura 48, se puede apreciar al sismógrafo que posee tres componentes: el geófono, el micrófono (para registrar la concusión del disparo), y el sismógrafo que sirve para almacenar y configurar el registro.

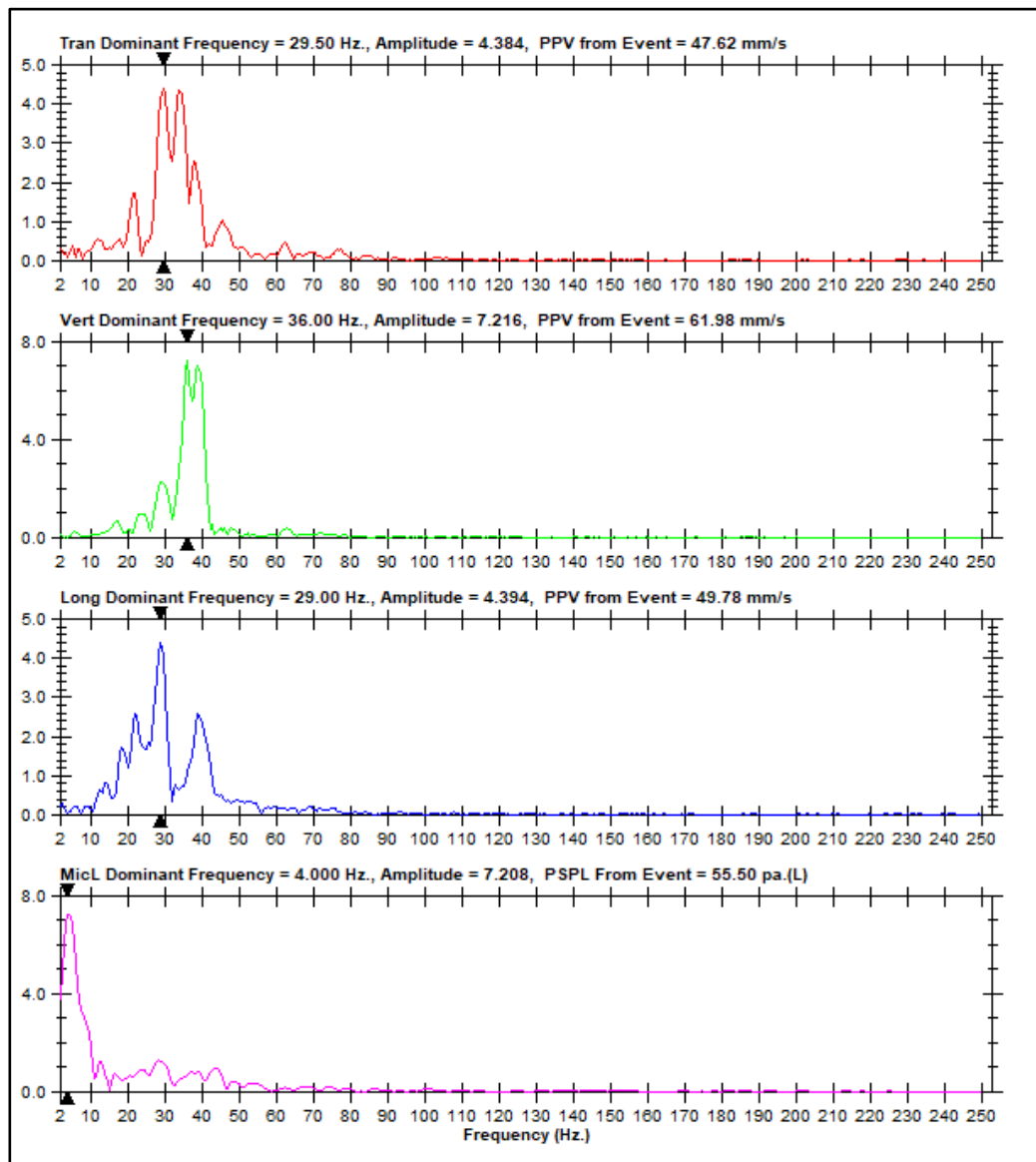
El detalle del equipo para medir las vibraciones y su proceso de calibración antes su aplicación se puede ver en el Anexo 6.

Software Blastware

Es un componente de escritorio del equipo de Instantel, en cual sirve para visualizar, analizar e informar sobre las vibraciones registradas de cierto disparo. El registro se compone de dos ventanas, el detalle del registro de las ondas sísmicas y el resumen del registro.

Figura 49

Vista del registro de ondas sísmicas

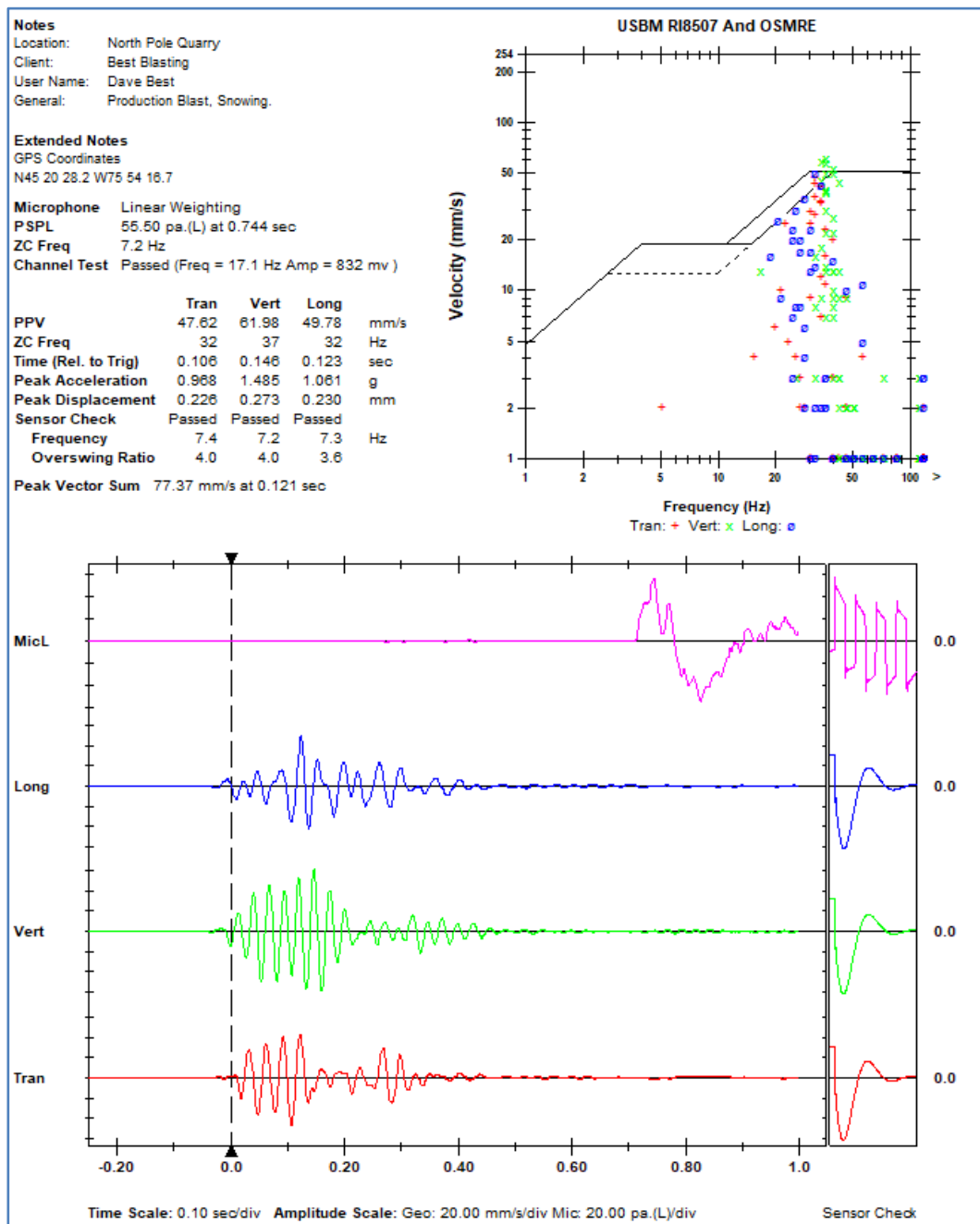


Nota: Equipo de voladura

En la figura 49, se puede apreciar las tres ondas sísmicas registradas y detalladas mediante gráficos sísmicos, así como aspectos de amplitud, frecuencia y el PPV.

Figura 50

Vista del resumen de las vibraciones



Nota: Equipo de voladura

En la figura 50, se puede apreciar un registro detallado y comparativo, así como una gráfica cruzada de la frecuencia y velocidad de partícula que te ofrece el software Blastware.

Personal especializado

El personal especializado debe contar con capacitaciones sobre el manejo del sismógrafo, así como el procedimiento de la instalación de los equipos y accesorios en campo. También y por supuesto, el manejo del software Blastware.

Este personal, por lo general se le conoce como asistencia técnica, y cada empresa especializada posee múltiples asistentes técnicos.

B. Proceso de instalación del sismógrafo

El proceso de instalación del sismógrafo para realizar el monitoreo de las vibraciones de cada disparo se realiza teniendo un procedimiento escrito de seguridad, en el cual se detalla cada uno de los pasos a realizar para realizar esta tarea. Esto es importante, porque es proceso se realiza poco antes del disparo, el cual es una tarea de crítica y de muy alto dentro de proceso de minado. De forma resumida este proceso se ejecuta de la siguiente manera:

Elección del punto de instalación

Esta elección tiene un alto grado de dificultad, ya que está ligado mucho al criterio y experiencia del ingeniero de asistencia técnica. Este se debe a que, según el proyecto a disparar, a este le rodea un contexto operativo complejo que va desde la presencia de rampas, proyectos ya disparados, cercanía a fases colindantes, la secuencia de salida del proyecto, que muchas veces dificultan el proceso de instalación del sismógrafo puesto que el punto de elección se elige en dirección del último taladro a disparar del proyecto. Ver figura 51.

Figura 51

Elección del punto de instalación del sismógrafo



Nota: Mina Cerro Corona

Tal como se aprecia en la figura 51, la instalación del sismógrafo se realiza a una distancia escalada de 50 m en dirección al último taladro a disparar. el lugar de instalación debe ser una zona segura para el equipo instalado y el personal que realiza la instalación. De no existir las condiciones para la instalación, este no se realiza.

Figura 52

Ausencia de área de para instalar del sismógrafo



Nota: Mina Cerro Corona

Tal como se aprecia en la figura 52, en el proyecto 3815 214, no se puede realizar la instalación del sismógrafo a una distancia escalada de 50 m en dirección al último taladro a disparar, debido a que no existe un área idónea de instalación del equipo en dirección del último taladro debido al contexto operativo del proyecto.

Instalación del sismógrafo

Una vez elegido el punto de instalación, se procede a cavar un agujero en el piso del nivel hasta llegar a roca dura, quitando el relleno de material, utilizando herramientas como barretas, palas y otros. En este agujero se procede a colocar un relleno fino compactado, que generalmente es el mismo detritus de algún taladro de producción. Para luego insertar el geófono del sismógrafo, el cual posee pies de inserción. Después este geófono se conecta al sismógrafo que debe cubrirse con una pieza de metal para evitar cualquier accidente por proyectiles de roca. Finalmente se procede a señalizar el área con conos. Ver figura 53.

Figura 53

Sismógrafo instalado y señalizado en área segura



Nota: Mina Cerro Corona

C. Trabajo en gabinete

Una vez realizado el disparo, se procede a recoger el equipo sismógrafo, previamente verificando si se ha registrado las vibraciones del disparo monitoreado. De aquí en adelante se realiza el trabajo en la oficina técnica para informar la compañía minera de las vibraciones obtenidas en dicho disparo. En este punto existen dos escenarios posibles:

- Si el monitoreo no rebasa el límite crítico de la roca: En ese caso, se procede a enviar los resultados en el informe de post voladura diario que lo realiza asistencia técnica. Ver figura 54.
- Si el monitoreo supera el límite crítico de la roca: En ese caso, se procede a enviar un informe detallado con las posibles causas y también con las recomendaciones para evitar la ocurrencia de un nuevo suceso así.

Figura 54

Informe resumido post voladura

COMENTARIOS



- ❖ En el proyecto 3640 202 & Pre corte 34640 200 para la Pala 02 se dispararon 93 taladros primarios y 40 taladros de pre corte.
- ❖ El proyecto no presentó agua en el total de taladros.
- ❖ El carguío de los taladros se inició el día 05 de Agosto (1 día de permanencia en el taladro).
- ❖ El valor promedio de densidad final de la mezcla explosiva está de acuerdo a los valores de diseño: HA64 ($\rho=1.28 \text{ gr/cm}^3$).
- ❖ El control de vibraciones dio un registro de 126.6 mm/s por debajo del V_{pp} crítico 253.65 mm/s (T-da)
- ❖ Los resultados obtenidos fueron:
 - 0% (Nivel 0) de generación de gases nitrosos por el disparo.
 - Se observa en la superficie del material disparado (Di-qs), que la fragmentación obtenida se encuentra dentro de los rangos esperados.
 - Cero taladros con Back up y Cero tiros cortados.

Nota: Mina Cerro Corona

En la figura 54, se puede apreciar la última diapositiva del informe post voladura, con todos los comentarios finales. Esta informe post voladura se puede con más detalle en el Anexo 7.

D. Límites críticos por tipo de roca

En la mina Cerro Corona se han establecido límites críticos por cada tipo de roca que se puede encontrar dentro del tajo Cerro Corona. Estos límites fueron definidos por el departamento de geomecánica mediante estudios de caracterización de vibraciones. Ver tabla 14.

Tabla 14

Límites críticos del PPV por tipo de roca

Simbología	Unidad Geológica	PPV Crítico (mm/s)
T-di	Diorita Cerro Corona	253.65
DI-NE	Diorita Noreste	256.43
DI-SO	Diorita Suroeste	261.23
T-gd	Pórfido Granodiorítico	253.45
T-da	Dacita	221.77
T-ri	Volcánico Riolítico	249.31
Ki-Fa	Formación Farrat (Cuarcita)	233.18
Ki-in	Formación Inca	215.1
Km-Ch	Formación Chulec	234.32
Km-Pa	Formación Pariatambo	207.85
Km-Yi	Formación Yumagual Inf.	205.65
Km-Ym	Formación Yumagual Med.	208.41
Km-Ys	Formación Yumagual Sup.	211.87
Km-Mu	Formación Mujarrun	149.63
Qbo	Depósitos Cuaternarios	182.72

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

La tabla 14, compila los valores de PPV crítico (Peak Particle Velocity crítico, en mm/s) asociados a diversas unidades geológicas presentes en un entorno minero–tectónico. La variabilidad de PPV crítico refleja diferencias en competencia mecánica, cohesión, grado de fracturamiento y resistencia dinámica.

Las rocas intrusivas como las dioritas (T-di, DI-NE, DI-SO) exhiben los valores más altos de PPV crítico (253–261 mm/s), lo que indica una mayor capacidad para resistir sollicitaciones vibratorias sin comprometer su integridad. Las unidades volcánicas y sedimentarias muestran valores intermedios (205–249 mm/s), mientras que las formaciones de menor competencia mecánica, como la Formación Mujarrun (Km-Mu, 149.63 mm/s), presentan los umbrales más bajos, evidenciando mayor susceptibilidad al daño dinámico.

4.2.2. Registro de las vibraciones antes del I-Blast

En la mina Cerro Corona se realiza un monitoreo constante de las vibraciones, debido a la amplitud y profundidad que tiene el tajo Cerro Corona. Este monitoreo se realiza en campo cercano, tal y como se detalló en el punto anterior. Las vibraciones monitoreadas que se recopilaron se hicieron en los meses de mayo a agosto. Ver tablas 15 hasta 18.

Análisis de vibraciones mes de mayo

La evaluación de la respuesta dinámica del macizo rocoso inició con el procesamiento de los registros sísmicos adquiridos durante el mes de mayo de 2024. Esta campaña de monitoreo se centró en el campo cercano, estableciendo una distancia de medición constante de 50 metros desde la fuente hasta el punto de registro. La Tabla 15 detalla las magnitudes de Velocidad Pico de Partícula (VPP) registradas para cada evento, comparándolas frente a los umbrales críticos admisibles determinados para los dominios geomecánicos específicos involucrados en cada voladura.

Tabla 15*Registro de las vibraciones en el mes de mayo 2024*

Fecha	Tajo	Simbología	Distancia (m)	VPP registrado (mm/s)	VPP crítico (mm/s)
01/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	61.77	208.41
02/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	189.50	208.41
03/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	127.50	208.41
06/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	135.20	208.41
07/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	114.89	208.41
09/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	186.46	208.41
10/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	204.10	208.41
11/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	141.27	208.41
12/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	136.65	208.41
13/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	37.14	208.41
14/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	122.20	208.41
16/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	116.30	208.41
17/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	45.40	208.41
18/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	99.08	208.41
19/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	185.10	208.41
21/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	103.60	208.41
22/05/2024	Cerro Corona	DI-NE	50	84.37	256.43
23/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	132.90	208.41
24/05/2024	Cerro Corona	T-di	50	122.00	253.65
25/05/2024	Cerro Corona	Km-Mu	50	162.00	149.63
25/05/2024	Cerro Corona	Km-Yi	50	162.00	205.65
26/05/2024	Cerro Corona	T-da	50	43.09	221.77
27/05/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	112.10	208.41
28/05/2024	Cerro Corona	Ki-Fa	50	154.50	233.18
30/05/2024	Cerro Corona	Ki-Fa	50	104.60	233.18

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

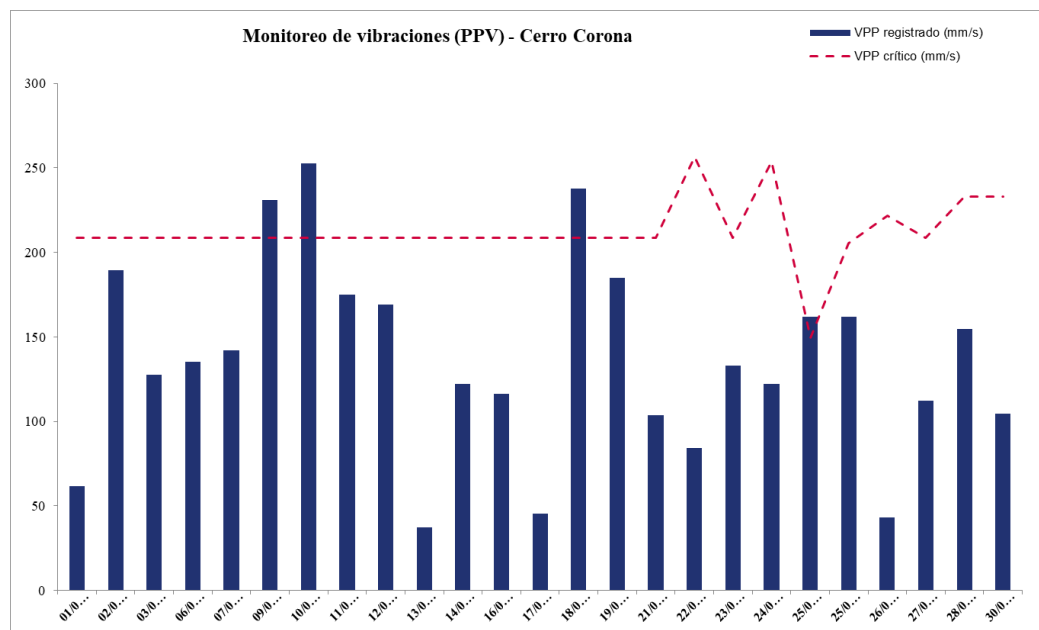
Según la Tabla 15, la gestión de vibraciones durante el mes de mayo mostró un desempeño mayoritariamente efectivo, logrando un cumplimiento del 96% de los eventos monitoreados. Se registró una excepción crítica el 25/05/2024 (zona Km-Mu), donde el VPP de 162.00 mm/s superó en un 8.27% su límite permisible de 149.63 mm/s. Por otro lado, el evento de mayor magnitud ocurrió el 10/05/2024 alcanzando los 204.10 mm/s; si bien este valor no infringió la norma, consumió el 97.9% del límite disponible (208.41 mm/s), representando el

punto de mayor estrés operativo del mes. En términos globales, el promedio de VPP registrado (123.35 mm/s) se mantiene distante del promedio crítico del periodo (211.51 mm/s), lo que sugiere que el factor de carga general es adecuado, salvo en zonas puntuales de menor atenuación sísmica.

Para visualizar la evolución temporal de las vibraciones y la variabilidad de los límites críticos a lo largo del mes, se generó la representación gráfica mostrada en la Figura 55. Este gráfico contrasta los niveles de intensidad registrados frente a los criterios de falla, permitiendo identificar rápidamente las tendencias de comportamiento y los eventos atípicos en la secuencia de disparo.

Figura 55

Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona (Mayo)



Nota: Mina Cerro Corona

Como se aprecia en la Figura 55, el comportamiento visual confirma que el límite de control se mantuvo estable (aprox. 208 mm/s) durante las primeras tres semanas, presentando posteriormente fluctuaciones dinámicas atribuibles a cambios litológicos. El gráfico valida que la gran mayoría de las voladuras



operaron en la zona segura (bajo la línea roja); no obstante, es evidente la intersección visual del 25 de mayo, donde la magnitud de la vibración (barra azul) sobrepasa el umbral crítico (línea roja) que había descendido notablemente para esa fecha específica, corroborando la necesidad de ajustar la carga operante en zonas de menor atenuación sísmica.

Análisis de vibraciones mes de junio

La continuidad del monitoreo durante el mes de junio evidenció un cambio drástico en el comportamiento sísmico del macizo rocoso respecto al periodo anterior. Según los datos registrados en la Tabla 16, se detectó una intensificación severa en las magnitudes de velocidad de partícula, registrándose múltiples eventos que vulneraron los estándares de seguridad. El caso más crítico ocurrió el 06 de junio, reportando un valor de 260.95 mm/s, el cual excedió ampliamente el límite crítico de 208.41 mm/s. Esta tendencia de inestabilidad se repitió hacia el cierre del mes, específicamente el 30 de junio, con un registro de 244.44 mm/s, confirmando que las condiciones de confinamiento o carga en este periodo generaron un impacto vibratorio fuera de control en el campo cercano.

Tabla 16*Registro de las vibraciones en el mes de junio 2024*

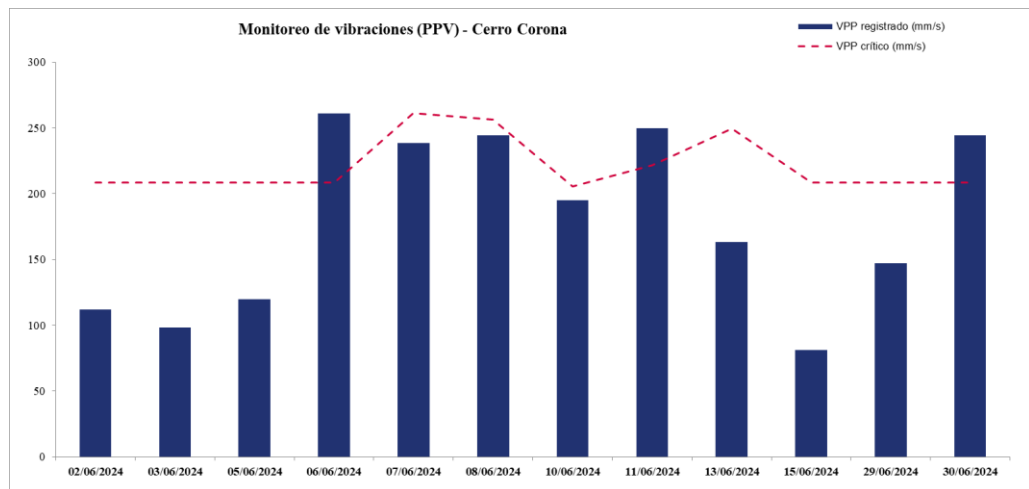
Fecha	Tajo	Simbología	Distancia (m)	VPP registrado (mm/s)	VPP crítico (mm/s)
02/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	112	208.41
03/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	98.22	208.41
05/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	119.6	208.41
06/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	260.95	208.41
07/06/2024	Cerro Corona	DI-SO	50	238.35	261.23
08/06/2024	Cerro Corona	DI-NE	50	244.23	256.43
10/06/2024	Cerro Corona	Km-Yi	50	195.1	205.65
11/06/2024	Cerro Corona	T-da	50	249.8	221.77
13/06/2024	Cerro Corona	T-ri	50	163.2	249.31
15/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	81.43	208.41
29/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	147.4	208.41
30/06/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	244.44	208.41

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

El análisis gráfico permite visualizar claramente la distribución de estos excesos energéticos. A diferencia de la estabilidad observada en mayo, la gráfica de junio muestra picos pronunciados que sobrepasan la línea de umbral crítico (línea roja discontinua), especialmente al inicio y al final del mes. Se observa además un "enjambre" de alta intensidad entre el 06 y el 11 de junio donde, aunque algunos eventos como los del 07 y 08 de junio (238.35 mm/s y 244.23 mm/s respectivamente) no superaron su límite específico debido a que este aumentó temporalmente (aprox. a 260 mm/s), se mantuvieron en una zona de riesgo muy elevada, bordeando la falla técnica.

Figura 56

Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona Junio



Nota: Mina Cerro Corona

Análisis de vibraciones mes de Julio

El periodo de monitoreo correspondiente al mes de julio sirvió como base para la evaluación operativa de los diseños de voladura y del sistema de distribución de carga explosiva. A continuación, se presentan los datos registrados durante este mes, los cuales permitieron la planificación de las medidas correctivas y la posterior adopción de una nueva metodología de diseño.

Tabla 17*Registro de las vibraciones en el mes de julio 2024*

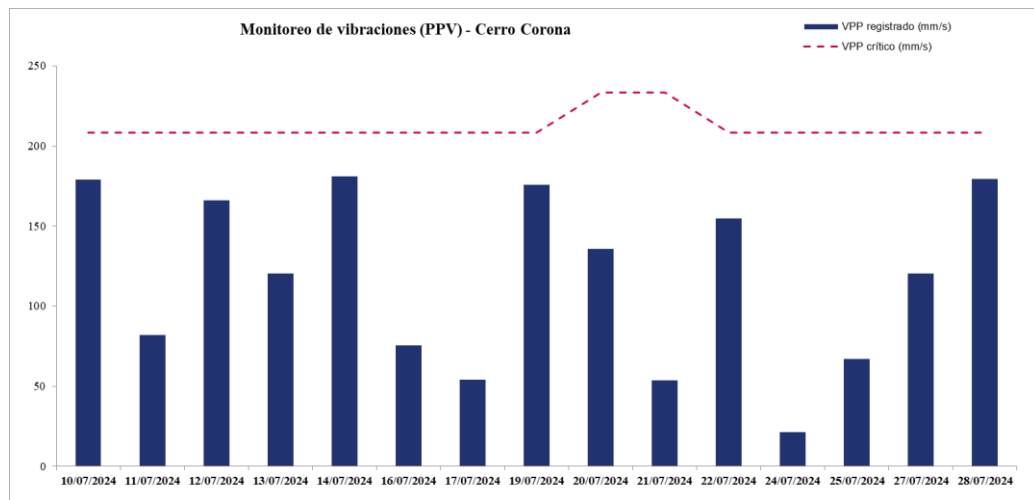
Fecha	Tajo	Simbología	Distancia (m)	VPP registrado (mm/s)	VPP crítico (mm/s)
10/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	179.068	208.41
11/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	82.08	208.41
12/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	166	208.41
13/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	120.2	208.41
14/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	181.116	208.41
16/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	75.51	208.41
17/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	54.05	208.41
19/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	175.695	208.41
20/07/2024	Cerro Corona	Ki-Fa	50	135.8	233.18
21/07/2024	Cerro Corona	Ki-Fa	50	53.75	233.18
22/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	154.9	208.41
24/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	21.5	208.41
25/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	67.15	208.41
27/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	120.4	208.41
28/07/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	179.5	208.41

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

Según la Tabla 17, la gestión de vibraciones durante el mes de julio evidenció una optimización operativa absoluta, logrando un cumplimiento del 100% de los eventos monitoreados. A diferencia del mes anterior, no se registraron excedencias, manteniéndose todas las detonaciones dentro de los parámetros de seguridad. El evento de mayor magnitud ocurrió el 14/07/2024 alcanzando los 181.116 mm/s; este valor consumió el 86.9% del límite disponible (208.41 mm/s), representando el punto de mayor estrés operativo del mes, pero sin comprometer la estabilidad geotécnica. En términos globales, el promedio de VPP registrado (117.78 mm/s) se mantiene holgadamente por debajo del promedio crítico del periodo (211.71 mm/s), lo que confirma que los ajustes de carga implementados han logrado controlar eficazmente la transmisión de energía en el campo cercano.

Figura 57

Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona Julio



Nota: Mina Cerro Corona

Análisis de vibraciones mes de agosto

El periodo de monitoreo correspondiente al mes de agosto se centró en la evaluación de la respuesta del macizo rocoso ante las voladuras, con todos los registros de vibración (VPP) tomados a una distancia constante de 50 metros en el tajo Cerro Corona. Los datos recopilados durante este mes cubrieron tres dominios litológicos principales (Km-Ym, DI-SO y T-ri), lo que permitió analizar las variaciones del VPP registrado frente a los límites críticos específicos de cada material. Estos resultados, que reflejan la respuesta real del macizo rocoso en campo, sirvieron como herramienta fundamental para validar la estabilidad operativa y realizar ajustes finales a los parámetros de diseño de voladura. A continuación, se presentan los datos detallados de este registro.

Tabla 18*Registro de las vibraciones en el mes de agosto 2024*

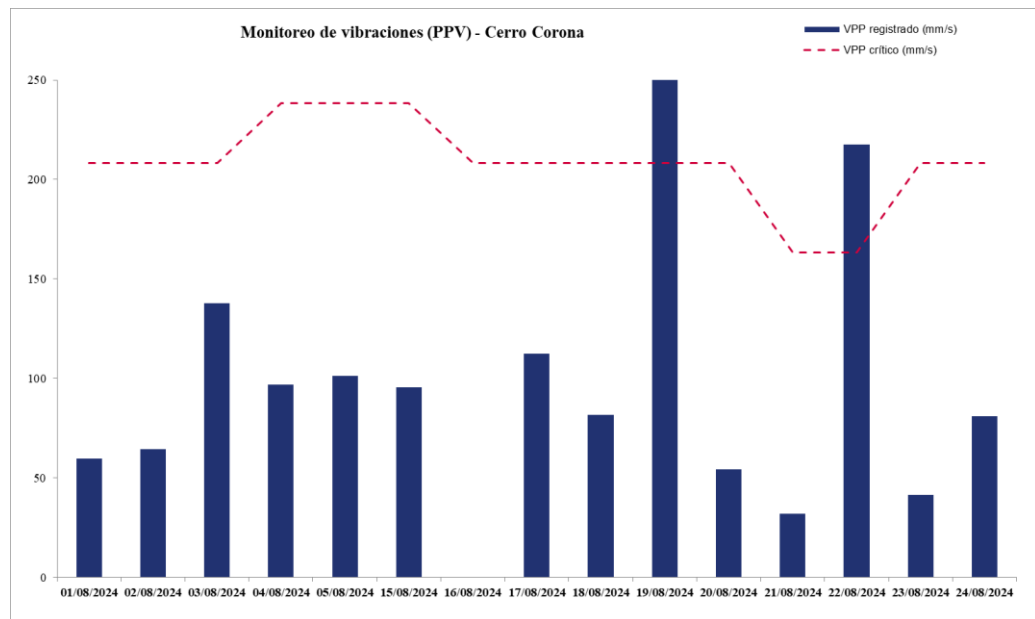
Fecha	Tajo	Simbología	Distancia (m)	VPP registrado (mm/s)	VPP crítico (mm/s)
01/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	59.55	208.41
02/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	64.4	208.41
03/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	137.928	208.41
04/08/2024	Cerro Corona	DI-SO	50	96.81	238.35
05/08/2024	Cerro Corona	DI-SO	50	101.215	238.35
15/08/2024	Cerro Corona	DI-SO	50	95.66	238.35
16/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	0	208.41
17/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	112.352	208.41
18/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	81.51	208.41
19/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	214.2	208.41
20/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	54.39	208.41
21/08/2024	Cerro Corona	T-ri	50	32.07	163.2
22/08/2024	Cerro Corona	T-ri	50	186.6	163.2
23/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	41.5	208.41
24/08/2024	Cerro Corona	Km-Ym	50	81.14	208.41

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

El periodo de monitoreo correspondiente al mes de agosto se centró en la evaluación de la respuesta del macizo rocoso ante las voladuras, con todos los registros de vibración (VPP) tomados a una distancia constante de 50 metros en el tajo Cerro Corona. Los datos recopilados durante este mes, que abarcaron tres dominios litológicos principales (Km-Ym, DI-SO y T-ri), reflejaron una tasa de incumplimiento del VPP Crítico en dos eventos clave. La máxima vibración registrada en el mes fue de 214.20 mm/s (19/08/2024, Km-Ym), mientras que el valor más bajo fue de 32.07 mm/s (21/08/2024, T-ri). Estos resultados sirvieron como herramienta fundamental para validar la estabilidad operativa y realizar ajustes finales a los parámetros de diseño de voladura.

Figura 58

Monitoreo de vibraciones (PPV) - Cerro Corona agosto)



Nota: Mina Cerro Corona

A. Análisis de vibraciones mes de mayo

El monitoreo de mayo de 2024 mostró un desempeño mayoritariamente efectivo, logrando un cumplimiento del 96% de los eventos monitoreados. La única excepción crítica ocurrió el 25/05/2024 en la zona Km-Mu, donde el VPP registrado de 162.00 mm/s superó el límite permisible de 149.63 mm/s. A pesar de este incumplimiento puntual, el VPP promedio registrado se mantuvo distante del promedio crítico, lo que sugirió que el factor de carga general era adecuado, excepto en áreas de menor atenuación sísmica.

B. Análisis de vibraciones mes de junio

La continuidad del monitoreo en junio evidenció un cambio drástico hacia la inestabilidad operativa. Se registraron múltiples eventos que vulneraron los estándares de seguridad, destacando el caso crítico del 06 de junio, con un registro de 260.95 mm/s, excediendo ampliamente el límite crítico de 208.41 mm/s. Esta



tendencia de alta intensidad se repitió hacia el cierre del mes (30 de junio, 244.44 mm/s), confirmando que las condiciones de confinamiento o carga generaron un impacto vibratorio fuera de control en el campo cercano.

C. Análisis de vibraciones mes de julio

El mes de julio marcó una optimización operativa absoluta, logrando un cumplimiento del 100% de los eventos monitoreados sin registrar excedencias. El VPP de mayor magnitud alcanzó los 181.116 mm/s el 14/07/2024, consumiendo el 86.9% del límite disponible (208.41 mm/s). Este desempeño confirmó que los ajustes de carga implementados lograron controlar eficazmente la transmisión de energía, manteniendo el VPP promedio registrado holgadamente por debajo del promedio crítico del periodo.

D. Análisis de vibraciones mes de agosto

El monitoreo de agosto se centró en validar la estabilidad, registrando una reducción histórica en el promedio de vibraciones (66 mm/s). Sin embargo, la inestabilidad se mantuvo, con dos excedencias críticas registradas. La máxima vibración del mes fue de 214.20 mm/s (19/08/2024), superando su límite crítico (208.41 mm/s), mientras que la unidad litológica T-ri registró una excedencia el 22/08/2024 (186.60 mm/s sobre 163.2 mm/s). Pese a estas desviaciones puntuales, el rendimiento general ratificó que las medidas correctivas habían logrado controlar la transmisión de energía en el campo cercano.



Observaciones clave:

- Los meses iniciales de la campaña (mayo y junio) se caracterizaron por un control deficiente y un riesgo constante de incumplimiento, con registros de VPP consistentemente superiores o limítrofes a sus respectivos VPP Críticos.
- En mayo, se registró el primer incumplimiento crítico el 25/05/2024 en el dominio Km-Mu, donde el VPP de 162.00 mm/s excedió su límite permisible. El evento de mayor magnitud (204.10 mm/s) consumió el 97.9% del límite disponible, señalando una operación de alto estrés.
- Junio marcó el punto más crítico de inestabilidad, con múltiples excedencias registradas y el VPP máximo de toda la campaña, alcanzando 260.95 mm/s (Km-Ym), lo que representó un incumplimiento flagrante de la norma y un exceso de energía transmitida al macizo rocoso.
- El mes de Julio sirvió únicamente para detener la tendencia de incumplimiento, logrando cero excedencias y un VPP máximo de 181.116 mm/s.
- No obstante, la inestabilidad regresó en agosto, donde se registraron dos nuevas excedencias críticas del VPP, con el valor más alto de 214.20 mm/s (19/08/2024) superando su límite crítico. Esta recurrencia de fallas en el control de vibración subraya la necesidad crítica de ajuste en los diseños de carga y tiempos de retardo que aún persiste para mitigar el riesgo residual y los incumplimientos normativos.

El informe detallado del registro de vibraciones analizado se puede ver en el Anexo 2.



4.2.3. Registro de las vibraciones con I-Blast

Una vez implementado el software I-Blast 8.2. para hacer los diseños y simulaciones de voladura de los distintos proyectos de voladura, se realizó el monitoreo de las vibraciones, los cuales tuvieron lugar entre los meses de setiembre a diciembre del 2024.

A. Proceso de monitoreo de vibraciones proyecto a proyecto:

Para un mejor entendimiento del proceso de monitoreo de vibraciones, se ha visto por conveniente detallar el resultado de las vibraciones registradas y extraídas del software Blastware. Estos proyectos son:

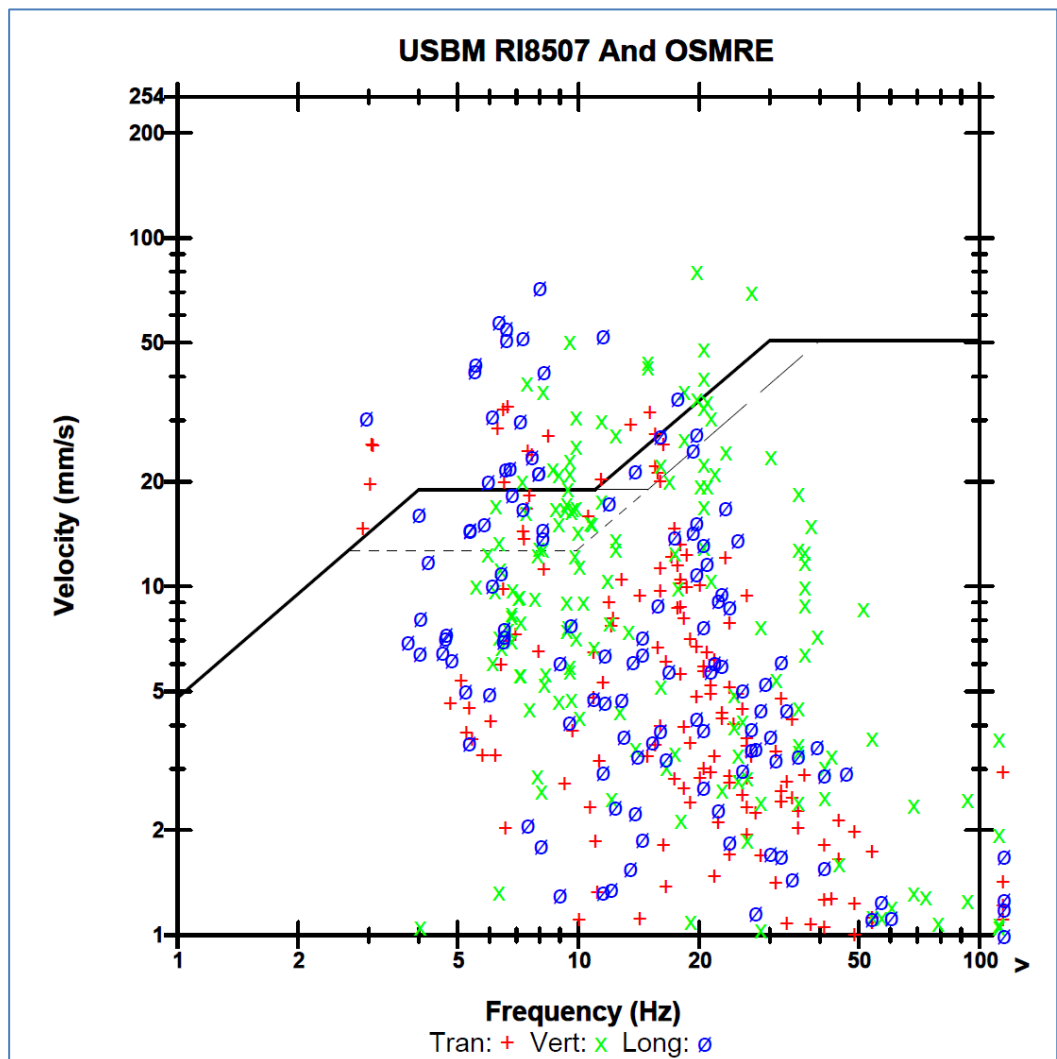
Proyecto de voladura Py 3640-226

Este proyecto se ejecutó en el Banco 3640, correspondiente a la Fase 4 del tajo Cerro Corona. Durante el evento, se realizó un monitoreo sísmico efectivo que permitió registrar el comportamiento de las ondas en el dominio del tiempo y la frecuencia.

A continuación, se presenta la caracterización gráfica del evento.

Figura 59

Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640 340

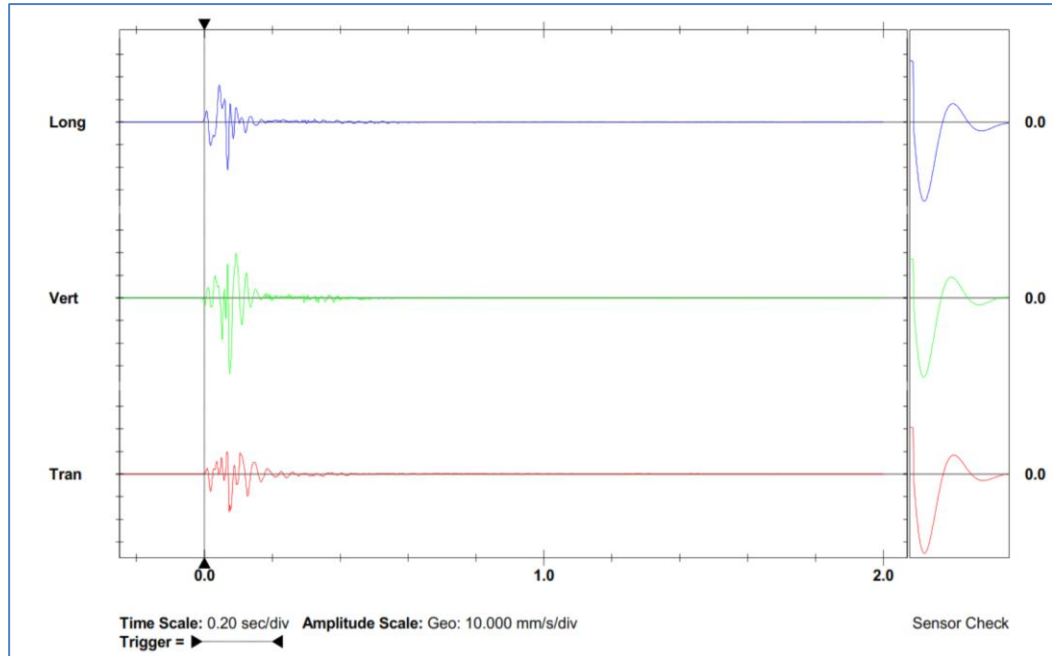


Nota: Mina Cerro Corona

La Figura 59 muestra el análisis de dispersión de las vibraciones respecto a la norma USBM RI8507, correlacionando la Velocidad Pico de Partícula (PPV) con la frecuencia. En este se puede apreciar también, que ninguna, ya sea transversal, vertical y longitudinal sobrepasa el límite crítico de este tipo de roca, el cual se representa en el eje Y con el valor de 254 mm/s. Asimismo, las frecuencias más altas fueron las ondas verticales (símbolo de x de color verde), llegando a 100 mm/s y una frecuencia de 20 Hz.

Figura 60

Sismograma de velocidades de onda (Transversal, Vertical y Longitudinal) - Proyecto Py 3640-226



Nota: Mina Cerro Corona

Por su parte, la Figura 60 despliega el sismograma de velocidades de onda, detallando la evolución temporal de la energía en sus tres componentes ortogonales (longitudinal, vertical y transversal).

El resumen los parámetros cuantitativos más relevantes obtenidos del registro del sismógrafo:

Tabla 19

Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-226

Parámetro	Tran (Transversal)	Vert (Vertical)	Long (Longitudinal)	Unidades
PPV (Velocidad Pico)	32.61	80	72.39	mm/s
Frecuencia (ZC Freq)	6.6	19.7	8	Hz
Aceleración Pico	0.446	1.933	1.487	g
Desplazamiento Pico	0.623	0.615	1.282	mm



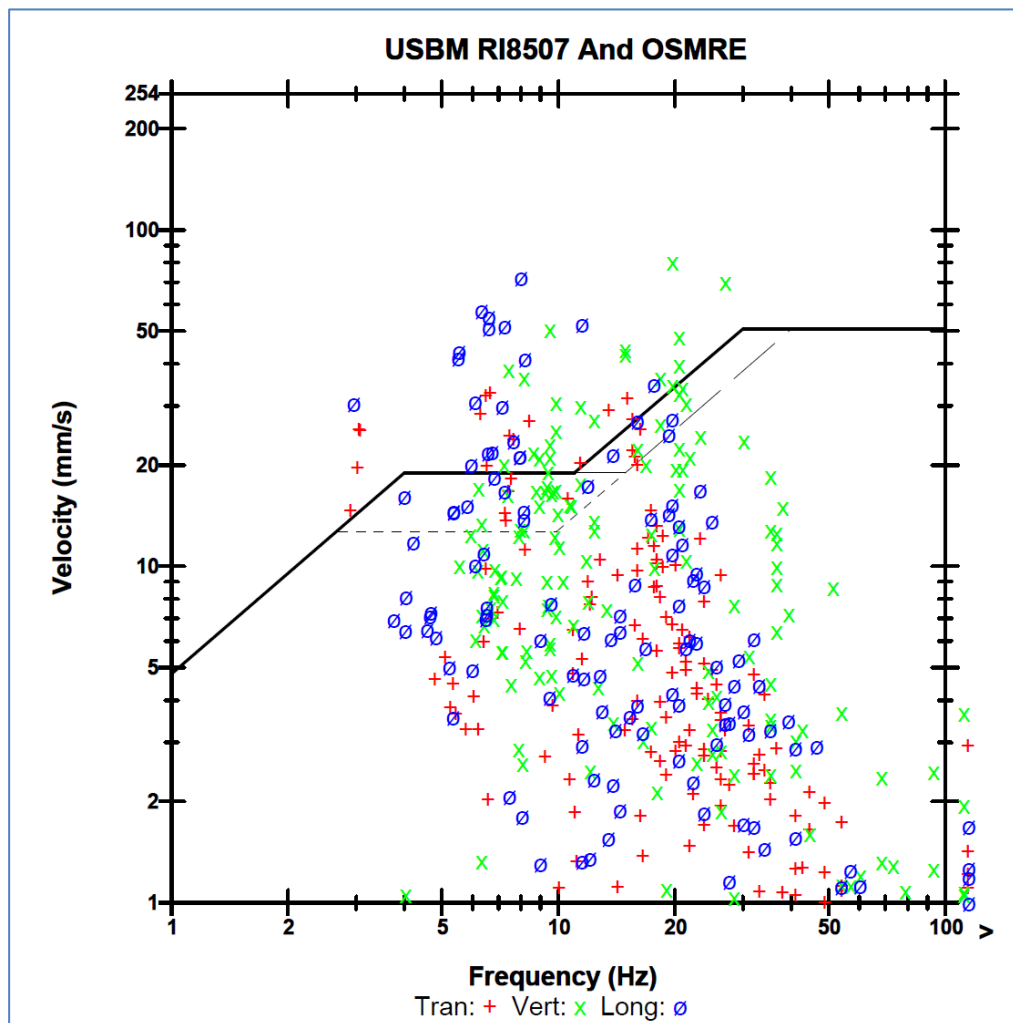
Al examinar los datos presentados en la Tabla 19, se observa que el evento generó una Suma Vectorial Pico (PVS) de 93.97 mm/s. Es técnicamente relevante destacar la anisotropía en la distribución de la energía: el componente Vertical registró la mayor intensidad con un PPV de 80.00 mm/s asociado a una frecuencia de 19.7 Hz, superando significativamente al componente Transversal (32.61 mm/s). Este comportamiento, donde la onda vertical predomina en magnitud y frecuencia sobre las ondas horizontales, proporciona información crítica para la calibración de los modelos de atenuación en la Fase 4 y sugiere una transmisión eficiente de energía a través de los estratos subyacentes.

Py 3640-235

La ejecución del proyecto Py 3640-235 tuvo lugar en el Banco 3640, correspondiente a la Fase 4 del tajo Cerro Corona. Este evento fue objeto de un monitoreo sismográfico de campo cercano, con el fin de caracterizar la respuesta dinámica del macizo rocoso y evaluar la interacción de la energía explosiva con el entorno geológico.

Figura 61

Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-235

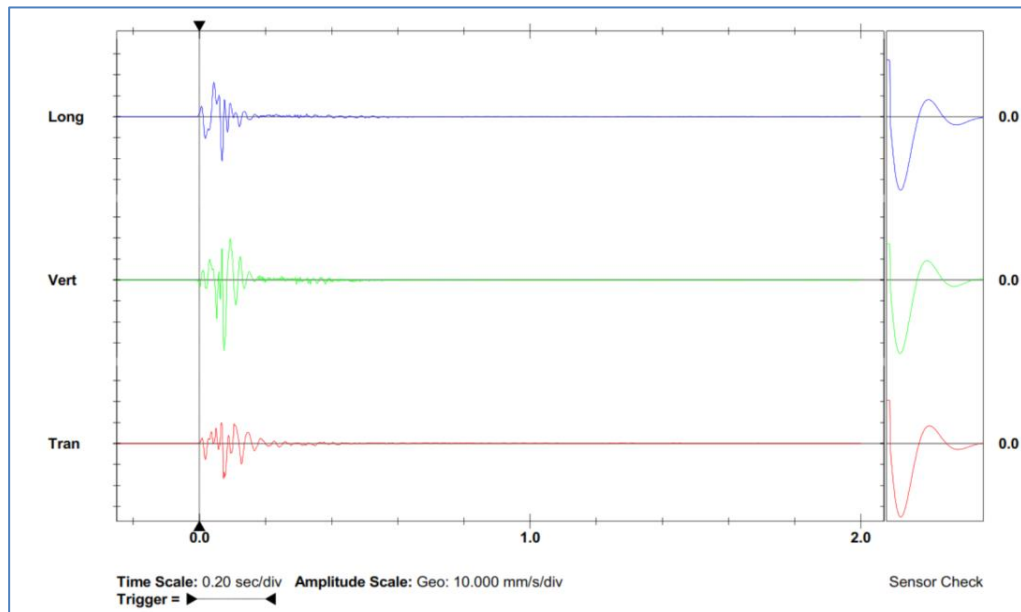


Nota: Mina Cerro Corona

La Figura 61 ilustra el análisis de dispersión (PPV vs. Frecuencia), permitiendo verificar el cumplimiento de los umbrales de seguridad sísmica. Por su parte, la Figura 62 despliega el sismograma de velocidades, evidenciando la firma de onda y la evolución temporal de la energía en sus tres componentes ortogonales.

Figura 62

Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-235



Nota: Mina Cerro Corona

La cuantificación de los parámetros cinemáticos se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 20

Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-235

Parámetro	Tran (Transversal)	Vert (Vertical)	Long (Longitudinal)	Unidades
PPV (Velocidad Pico)	50.17	47.31	64.38	mm/s
Frecuencia (ZC Freq)	6	20	3.4	Hz
Aceleración Pico	0.895	1.139	2.429	g
Desplazamiento Pico	1.311	0.455	1.498	mm

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

Al examinar los datos presentados en la Tabla 20, se observa un comportamiento vibratorio distinto al del proyecto anterior. En este caso, el componente Longitudinal fue el predominante, registrando la mayor intensidad con un PPV de 64.38 mm/s asociado a una frecuencia baja de 3.4 Hz. Le sigue el

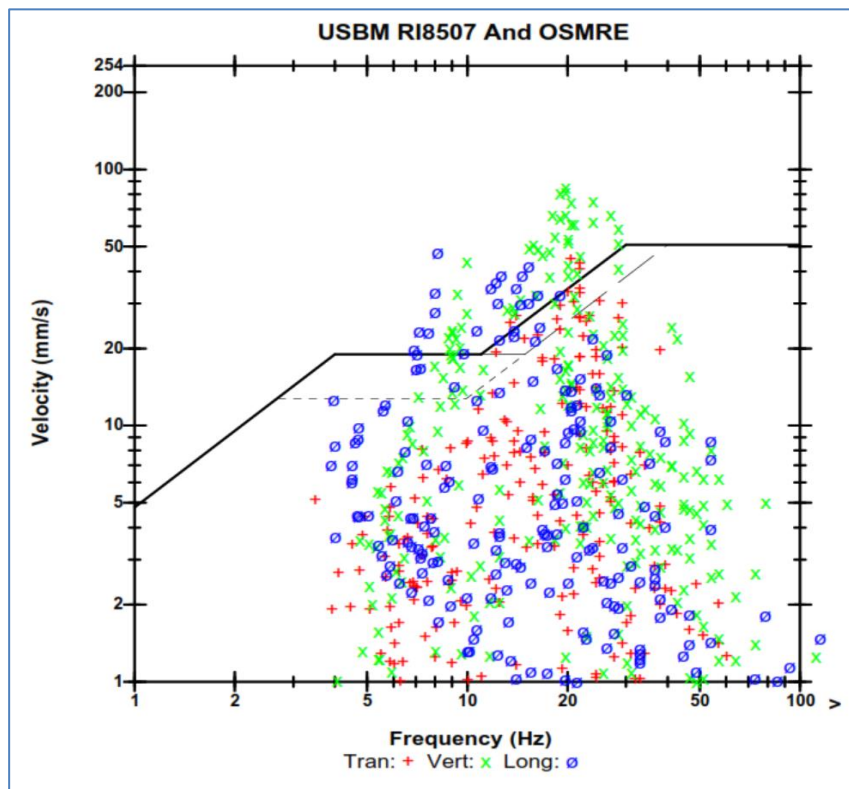
componente Transversal con 50.17 mm/s, mientras que el eje Vertical, aunque presentó la menor velocidad pico (47.31 mm/s), registró la frecuencia más alta del evento (20 Hz). Esta variabilidad en la distribución de energía y frecuencias entre los ejes resalta la importancia de considerar la anisotropía del macizo rocoso en la Fase 4 para la optimización de los futuros diseños de voladura.

Py 3640-314

El monitoreo de vibraciones continuó con la evaluación del proyecto Py 3640-314, ejecutado en el Banco 3640 del tajo Cerro Corona. Este registro sismográfico es fundamental para establecer la correlación entre las variables de diseño de carga aplicadas y la respuesta dinámica real del terreno en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Figura 63

Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-314

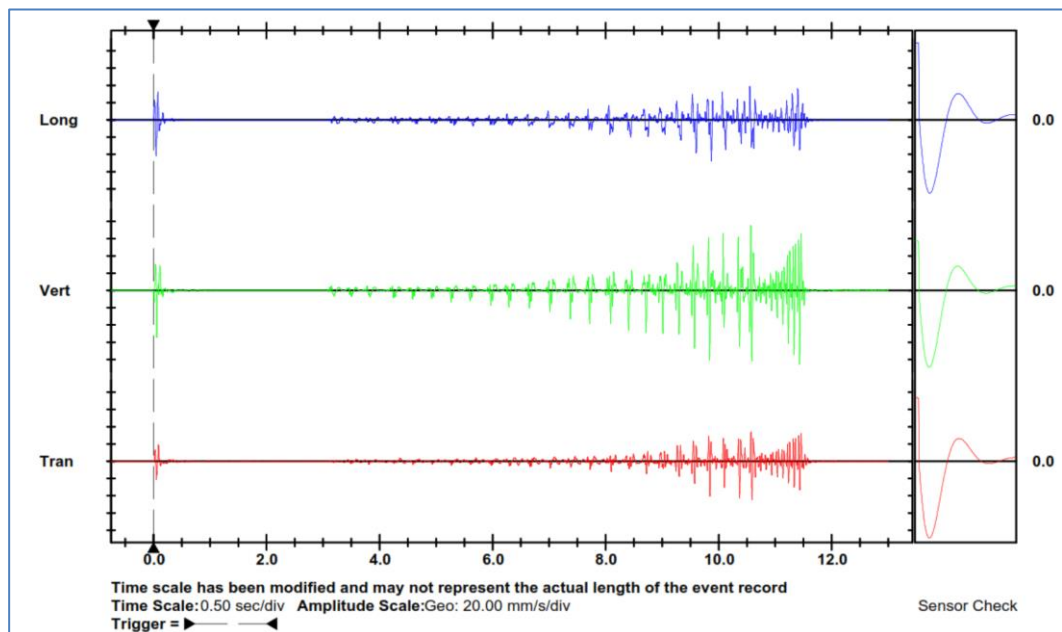


Nota: Mina Cerro Corona

En la Figura 63, el gráfico de dispersión permite visualizar la concentración de la energía sísmica registrada. Se observa cómo se distribuyen las amplitudes de velocidad en función de sus frecuencias dominantes, contrastando los datos directamente con los umbrales de daño de las normas USBM RI8507 y OSMRE. Esta comparación es esencial para evaluar el cumplimiento de los estándares de seguridad internacionales y determinar el potencial de daño estructural en las instalaciones cercanas.

Figura 64

Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-314



Nota: Mina Cerro Corona

La Figura 64 expone el sismograma de velocidades, detallando la firma completa de la onda y la evolución temporal de la energía en sus tres componentes espaciales (longitudinal, vertical y transversal). Esta visualización facilita la identificación de las fases de llegada y la duración del tren de vibraciones.

Tabla 21*Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-314*

Parámetro	Tran (Transversal)	Vert (Vertical)	Long (Longitudinal)	Unidades
PPV (Velocidad Pico)	44.75	85.64	47.57	mm/s
Frecuencia (ZC Freq)	20	19.7	8.1	Hz
Aceleración Pico	0.869	1.983	0.995	g
Desplazamiento Pico	0.35	0.66	0.613	mm

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

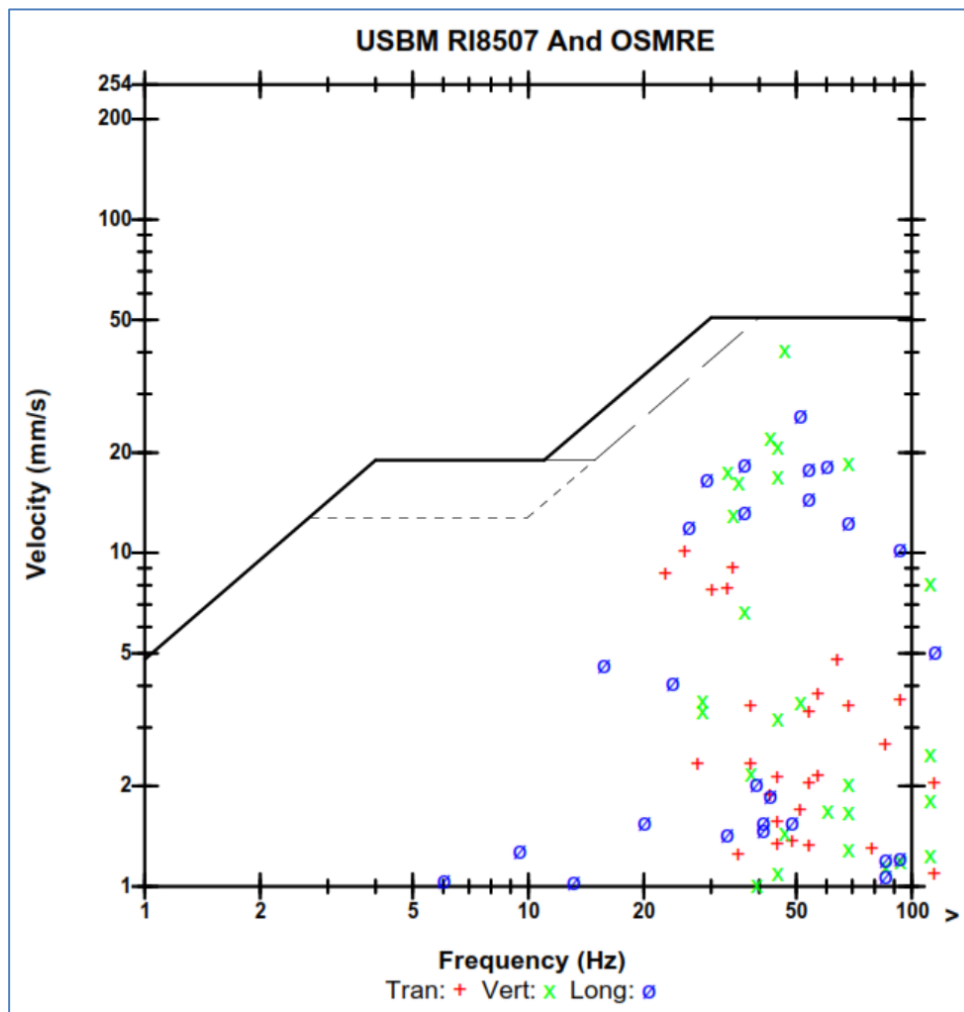
Basado en los datos consolidados en la Tabla 21, se identifica un patrón vibratorio dominado energéticamente por el componente Vertical, el cual registró un PPV de 85.64 mm/s, duplicando prácticamente la intensidad de los ejes horizontales. Es relevante destacar el contraste en el dominio de la frecuencia: mientras que los componentes Transversal y Vertical oscilaron en un rango de alta frecuencia (~20 Hz), el eje Longitudinal presentó una respuesta de baja frecuencia (8.1 Hz). Este comportamiento, sumado a una aceleración pico vertical cercana a 2 g, sugiere una fuerte interacción de la onda de compresión con la superficie libre inmediata al punto de monitoreo.

Py 3640-340

El programa de monitoreo continuó con el registro del evento Py 3640-340, ejecutado en el Banco 3640 del tajo Cerro Corona. La captura de datos de este evento es fundamental para analizar la atenuación de la energía y caracterizar la respuesta frecuencial del macizo rocoso en esta zona específica de operación.

Figura 65

Análisis de dispersión de vibraciones (PPV vs Frecuencia) - Py 3640-340

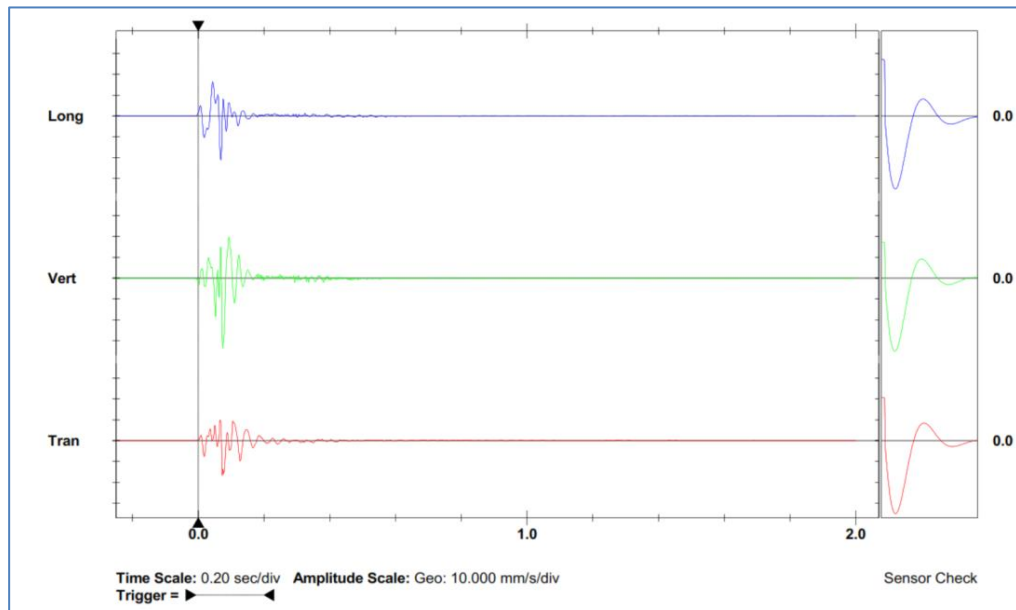


Nota: Mina Cerro Corona

En la Figura 65, el análisis de dispersión permite visualizar el cumplimiento de los niveles de vibración respecto a los estándares internacionales (USBM/OSMRE). Esta gráfica es clave para verificar que la concentración de energía se mantenga dentro de los umbrales seguros según la frecuencia dominante.

Figura 66

Sismograma de velocidades de onda - Py 3640-340



Nota: Mina Cerro Corona

la Figura 66 presenta el sismograma detallado, el cual despliega el historial de tiempo de las velocidades de partícula. Esta visualización permite identificar la duración del evento, las fases de la onda y el comportamiento individual de los componentes espaciales (longitudinal, vertical y transversal).

Los parámetros cuantitativos registrados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 22

Parámetros de vibración registrados en el evento - Proyecto Py 3640-340

Parámetro	Tran (Transversal)	Vert (Vertical)	Long (Longitudinal)	Unidades
PPV (Velocidad Pico)	10.03	40.57	25.89	mm/s
Frecuencia (ZC Freq)	26	47	51	Hz
Aceleración Pico	0.531	1.979	1.257	g
Desplazamiento Pico	0.057	0.095	0.106	mm

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona



El análisis de los datos expuestos en la tabla evidencia un comportamiento vibratorio dominado por altas frecuencias. El componente Vertical registró la mayor intensidad con un PPV de 40.57 mm/s, superando notablemente a los ejes horizontales. Es significativo destacar que las frecuencias asociadas a los picos de velocidad fueron elevadas (47 Hz en la vertical y 51 Hz en la longitudinal), lo que, sumado a desplazamientos de partícula muy bajos (<0.11 mm), sugiere una transmisión de energía de corto alcance o a través de un medio rocoso muy rígido en esta zona del banco.

B. Monitoreo de vibraciones mes a mes:

La evaluación continua de la respuesta sísmica del macizo rocoso en la mina Cerro Corona durante el último cuatrimestre del año 2024 se presenta a continuación. Este monitoreo, realizado a una distancia constante de 50 metros en las Fases 4 y 5, permitió validar la estabilidad operativa y el cumplimiento de los estándares de seguridad frente a los umbrales críticos de vibración (VPP Crítico) específicos para cada litología (Km-Ch y Km-Pa).

Tabla 23*Registro de las vibraciones en el mes de setiembre 2024*

Fase	Fecha de Disparo	Nombre Disparo	Tipo de roca VPP Crítico	Distancia al Sismógrafo (m)	VPP Registrado	VPP Crítico
Fase 4	05/09/2024	Pre corte 3640	Km-Ch	50	98.631	247
Fase 4	08/09/2024	3640 038 041	Km-Ch	50	182.439	247
Fase 4	13/09/2024	3640 043	Km-Ch	50	305.37	247
Fase 4	16/09/2024	Pre corte 3640 040	Km-Ch	50	108.027	247
Fase 4	23/09/2024	3640 038 041	Km-Ch	50	267.462	247
Fase 4	26/09/2024	Pre corte 3640 040	Km-Ch	50	180.954	247
Fase 4	01/09/2024	3640 225	Km-Pa	50	292.41	186
Fase 4	04/09/2024	3640 187 186	Km-Pa	50	84.321	186
Fase 4	11/09/2024	3640 221 228	Km-Pa	50	234.36	186
Fase 4	14/09/2024	3640 186 187 188	Km-Ch	50	252.99	247
Fase 4	20/09/2024	3640 226 (227)	Km-Pa	50	190.62	186
Fase 4	27/09/2024	3640 187 188 195	Km-Pa	50	195.264	186
Fase 5	18/09/2024	3648 239	Km-Ch	50	267.597	247
Fase 5	25/09/2024	3648 228 229	Km-Ch	50	223.722	247
Promedio:				50	206.01	225.21

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

El mes de setiembre (Tabla 23) registró una intensa actividad de voladura con 14 eventos monitoreados en las Fases 4 y 5. El análisis de los datos revela un escenario de alto estrés operativo, donde el VPP promedio registrado alcanzó los 206.01 mm/s, acercándose peligrosamente al promedio del límite crítico (225.21 mm/s). Se identificaron múltiples excedencias críticas:

- El evento del 13/09/2024 (Fase 4, Km-Ch) registró un VPP de 305.37 mm/s, superando ampliamente el límite de 247 mm/s.
- Similarmente, el 01/09/2024 (Fase 4, Km-Pa) alcanzó 292.41 mm/s, excediendo el límite de 186 mm/s.

- Otras excedencias notables incluyen los eventos del 23/09, 11/09, 14/09, 20/09, 27/09 y 18/09

Estos resultados indican una desviación significativa en el control de energía durante este mes, con vibraciones que frecuentemente superaron los umbrales de seguridad, especialmente en la litología Km-Pa.

Tabla 24

Registro de las vibraciones en el mes de octubre 2024

Fase	Fecha de Disparo	Nombre Disparo	Tipo de roca	Distancia al Sismógrafo (m)	VPP Registrado	VPP Crítico
Fase 4	01/10/2024	3640 044 045	Km-Ch	50	93.74	247
Fase 4	07/10/2024	3640 (044) 045	Km-Ch	50	58.35	247
Fase 4	13/10/2024	3640 039	Km-Ch	50	209.26	247
Fase 4	14/10/2024	3640 045	Km-Ch	50	209.47	247
Fase 4	18/10/2024	3640 039 046	Km-Ch	50	190.51	247
Fase 4	03/10/2024	3632 182	Km-Pa	50	105.89	186
Fase 4	05/10/2024	3632 190	Km-Pa	50	209.6	186
Fase 4	09/10/2024	Pre corte 3632 200	Km-Ch	50	100.43	247
Fase 4	11/10/2024	3632 191	Km-Pa	50	313.04	186
Fase 4	16/10/2024	3632 195	Km-Pa	50	189.37	186
Fase 4	24/10/2024	3632 196 (195)	Km-Pa	50	181.01	186
Fase 4	29/10/2024	3632 191 199 201	Km-Pa	50	286.81	186
Fase 4	30/10/2024	3632 196 197	Km-Pa	50	224.25	186
Fase 5	12/10/2024	3632 227	Km-Ch	50	199.48	247
Fase 5	20/10/2024	3632 235 242	Km-Ch	50	168.32	247
Fase 5	01/10/2024	3632 243	Km-Ch	50	266.45	247
Promedio:				50	203.85	216.5

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

El monitoreo de octubre (Tabla 24) continuó mostrando una tendencia de vibraciones elevadas



e inestabilidad. De los 13 eventos registrados, el VPP promedio se mantuvo alto en 203.85 mm/s. Se observaron reiterados incumplimientos de los límites críticos, particularmente en la litología Km-Pa (límite 186 mm/s):

- El evento más crítico ocurrió el 11/10/2024, con un VPP de 313.04 mm/s, representando una excedencia extrema.
- Otros eventos como el del 05/10, 16/10, 29/10 y 30/10 también superaron el límite de 186 mm/s.
- En la litología Km-Ch (límite 247 mm/s), se registró una excedencia el 01/10/2024 con 266.45 mm/s.

Este mes ratifica la necesidad urgente de revisar los parámetros de carga, dado que la frecuencia de eventos por encima de la norma pone en riesgo la estabilidad del macizo.

Tabla 25

Registro de las vibraciones en el mes de noviembre 2024

Fase	Fecha de Disparo	Nombre Disparo	Tipo de roca	Distancia al Sismógrafo (m)	VPP Registrado	VPP Crítico
Fase 4	02/11/2024	Pre corte 2755 028	Km-Ch	50	40.51	247
Fase 4	06/11/2024	2755 029 030	Km-Ch	50	92.02	247
Fase 4	09/11/2024	2755 035	Km-Ch	50	50.54	247
Fase 4	12/11/2024	2755 031 030	Km-Ch	50	113	247
Fase 4	20/11/2024	2755 030 031 032 033	Km-Ch	50	86.37	247
Fase 4	28/11/2024	2755 029 030	Km-Ch	50	89.78	247
Fase 4	03/11/2024	Pre corte 3632 200	Km-Ch	50	33.83	247
Fase 4	04/11/2024	3632 180	Km-Ch	50	117.8	247
Fase 4	11/11/2024	3632 192	Km-Ch	50	101.8	247
Fase 4	15/11/2024	3632 179 194	Km-Ch	50	206.8	247
Fase 4	18/11/2024	3632 199	Km-Pa	50	98.07	186
Fase 4	23/11/2024	3632 198 201 204	Km-Pa	50	96.91	186
Fase 5	07/11/2024	3632 230	Km-Ch	50	117.8	247
Fase 5	14/11/2024	3632 230 231	Km-Ch	50	144.8	247
Fase 5	22/11/2024	3632 234 249 (242)	Km-Ch	50	182.7	247
Fase 5	24/11/2024	3632 243 244	Km-Ch	50	88.14	247
Fase 5	29/11/2024	3632 242	Km-Ch	50	87.7	247
Promedio:				50	111.82	238.29

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

El mes de noviembre (Tabla 25) marcó un punto de inflexión positivo en la gestión de vibraciones. Con 13 eventos monitoreados en las Fases 4 y 5, se observó una reducción drástica en la intensidad sísmica, logrando un VPP promedio de 111.82 mm/s, muy por debajo del promedio crítico de 238.29 mm/s.

- Todos los eventos cumplieron con los estándares de seguridad.
- El valor máximo registrado fue de 206.8 mm/s (15/11/2024), manteniéndose dentro del límite de 247 mm/s.

- Incluso en la litología más restrictiva (Km-Pa), los eventos del 18/11 y 23/11 registraron valores (98.07 y 96.91 mm/s) muy inferiores al límite de 186 mm/s.

Este comportamiento evidencia la efectividad de las medidas correctivas implementadas tras los meses críticos anteriores.

Tabla 26

Registro de las vibraciones en el mes de diciembre 2024

Fase	Fecha de Disparo	Nombre Disparo	Tipo de roca	Distancia al Sismógrafo (m)	VPP Registrado	VPP Crítico
Fase 4	08/12/2024	2755 032 033 034	Km-Ch	50	29.97	247
Fase 4	18/12/2024	2755 034	Km-Ch	50	85.54	247
Fase 4	31/12/2024	3632 203 204	Km-Pa	50	67.71	247
Fase 4	01/12/2024	3632 179 188 (185)	Km-Ch	50	152.5	247
Fase 4	06/12/2024	3632 202 203	Km-Pa	50	109.6	247
Fase 4	11/12/2024	3025 233	Km-Ch	50	71.19	247
Fase 4	12/12/2024	3632 195 196 202	Km-Pa	50	64.16	247
Fase 4	19/12/2024	3632 202 (195)	Km-Pa	50	56.84	247
Fase 4	20/12/2024	3632 188 189	Km-Pa	50	39.42	247
Fase 5	22/12/2024	3025 233	Km-Ch	50	64.26	247
Fase 5	26/12/2024	3632 205 199	Km-Pa	50	94.6	247
Fase 5	28/12/2024	3025 233 234	Km-Ch	50	69.74	247
Fase 5	03/12/2024	3632 244 245	Km-Ch	50	99.62	247
Fase 5	05/12/2024	3632 232 233	Km-Ch	50	222.3	247
Fase 5	15/12/2024	3632 236 237 242	Km-Ch	50	102.3	247
Fase 5	24/12/2024	3632 245	Km-Ch	50	211.3	247
Fase 5	25/12/2024	3632 238	Km-Ch	50	154.2	247
Fase 5	29/12/2024	3632 242 248 249	Km-Ch	50	130.8	247
Promedio:				50	106.45	247

Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

Diciembre (Tabla 26) consolidó la tendencia de estabilidad y control iniciada en noviembre. Con 19 eventos registrados, el VPP promedio descendió



aún más a 106.45 mm/s, frente a un límite crítico constante de 247 mm/s (predominio Km-Ch y Km-Pa ajustado).

- Se mantuvo un 100% de cumplimiento normativo.
- El evento de mayor magnitud fue de 222.3 mm/s (05/12/2024), respetando el límite de 247 mm/s.
- La mayoría de los disparos se ubicaron en un rango seguro de 30 a 150 mm/s.

Este cierre de año demuestra que la operación logró estabilizar la transmisión de energía sísmica, eliminando las excedencias críticas observadas en el tercer trimestre.

En resumen, de este monitoreo se tiene que

Tabla 27

Resumen del registro de las vibraciones de setiembre a diciembre del 2024

Mes	Tajo	Distancia al Sismógrafo (m)	VPP Registrado	VPP Crítico
Setiembre	Cerro Corona	50	206.01	225.21
Octubre	Cerro Corona	50	203.85	216.5
Noviembre	Cerro Corona	50	111.82	238.29
Diciembre	Cerro Corona	50	106.45	247
Promedio:		50	157.03	231.75

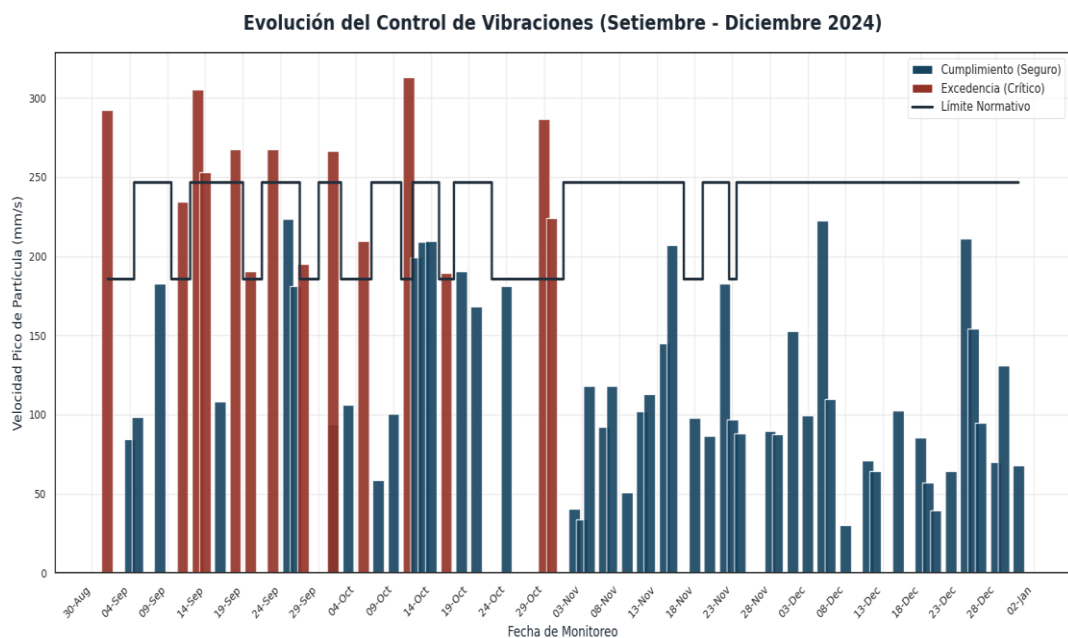
Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

La Tabla 27 consolida el comportamiento vibratorio registrado en el tajo Cerro Corona durante el último cuatrimestre de 2024, con mediciones estandarizadas a una distancia de 50 metros. El análisis de los datos revela dos tendencias operativas claramente diferenciadas:

- Fase de Alta Intensidad (setiembre - octubre): Durante el primer bimestre, los niveles de vibración (VPP) se mantuvieron elevados, fluctuando entre 203.85 mm/s y 206.01 mm/s. En este periodo, la operación trabajó con márgenes de seguridad ajustados respecto a los límites críticos (que oscilaron entre 216.5 y 225.21 mm/s).
- Fase de Control y Estabilización (noviembre - diciembre): En el segundo bimestre se observa una reducción drástica de la intensidad sísmica, descendiendo los registros a un rango de 106.45 mm/s a 111.82 mm/s. A su vez, el VPP Crítico aumentó hasta 247 mm/s (debido a cambios litológicos favorables), lo que maximizó la holgura de seguridad.

Figura 67

Evolución del control de vibraciones y cumplimiento de estándares (setiembre - diciembre 2024)



Nota: Mina Cerro Corona



De acuerdo con la Figura 67, el análisis temporal del comportamiento sísmico permite establecer las siguientes conclusiones sobre el desempeño operativo en el tajo Cerro Corona:

- **Evolución del VPP Registrado:** Se observa una clara segmentación en el desempeño. Los meses de setiembre y octubre presentaron una alta variabilidad energética, registrando picos de vibración que superaron el umbral normativo (representados por las barras rojas), siendo octubre el periodo con la mayor intensidad sísmica acumulada.
- **Estabilidad del Límite Crítico:** El umbral de VPP Crítico (línea oscura) se mantuvo relativamente estable durante el periodo, mostrando ligeras variaciones asociadas a los cambios en el tipo de roca predominante en cada frente de voladura.
- **Consolidación del Control:** A partir de noviembre, se evidencia un cambio drástico en la tendencia. Los registros de vibración (barras azules) se estabilizaron sistemáticamente por debajo del límite normativo, eliminando las excedencias observadas en el bimestre anterior.

Conclusión

El monitoreo del último cuatrimestre de 2024 demuestra que, tras un periodo inicial de ajuste e inestabilidad en setiembre y octubre, las medidas correctivas implementadas lograron optimizar las voladuras en el tajo. Esto permitió cerrar el año (noviembre-diciembre) con niveles de vibración controlados y holgadamente por debajo de los límites permitidos, garantizando así la integridad de las estructuras cercanas y el cumplimiento de la normativa vigente.



El informe de registro de vibraciones antes del uso del software I-blast 8.2 se puede ver en el Anexo 3.

4.3. INSPECCIÓN VISUAL DE LAS PAREDES DE BANCO Y BERMAS EN EL TAJO CERRO CORONA

El tercer objetivo de esta investigación fue inspeccionar visualmente las paredes del talud del banco y las bermas para detectar, documentar e identificar la ocurrencia de derrame de material en el tajo Cerro Corona. Esta labor se hace de forma directa en los bancos y lo realiza el departamento de geomecánica de manera más detallada como control al área de voladura, verificando que en las paredes del talud de banco no aparezcan grietas frescas (o nuevas), y que tampoco se agranden las grietas ya existentes. Sin embargo, como área de voladura se realiza una verificación más visual y más objetiva, midiendo con fotografías la ocurrencia de derrame de material banco a banco por la caída de rocas producto de las vibraciones acumulativas.

4.3.1. Verificando el estado de las paredes del talud de banco

Esta verificación se hace mediante un mapeo de campo por parte del geomecánico, generalmente de forma secuencial, en paredes antiguas y también en paredes frescas. Ver figura 68.

Figura 68

Inspección visual de las paredes de banco



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

En la figura 68, se puede apreciar el proceso de verificación visual en una zona bastante crítica.

A. Estado de las paredes antes del I-Blast

Si bien el deslizamiento de rocas y material entre banco y banco dentro del tajo de la mina Cerro Corona, no solamente es producto de los disparos que se realizan cercanos al talud, sino que son una acumulación paulatina producto de las vibraciones de los disparos de producción que pueden llegar a ser más frecuentes, del orden de 10 a 1, en comparación a los disparos que se realiza cercanos al talud.

Con el tiempo se va produciendo este deslizamiento y caída de rocas de las paredes del banco hacia las bermas (catch bench) que principalmente tienen 2 factores la escorrentía de superficie y las vibraciones. De no existir controles adecuados el deslizamiento de material se puede ir agravando mes a mes y año a año. Ver figura 69.

Figura 69

Inspección visual de las paredes de banco de la fase 4



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

En la figura 69, se puede apreciar el deslizamiento de material proveniente de cada banco, si bien se puede ver una falla, el material retenido en el catch bench, proviene de los bancos adyacentes producto de las altas vibraciones.

Ahora, si bien el monitoreo de vibraciones es un control importante post voladura, este proceso es reactivo y no preventivo. Asimismo, una malla de voladura se puede ver influenciado por múltiples dominios de roca con distintas

características geomecánicas, necesiéndose una simulación más completa y con más escenarios tal y como te lo ofrece el I-Blast.

Algunas otras zonas de deslizamiento se pueden ver en el Anexo 4.

B. Estado de las paredes con el I-Blast

Como se ha podido ver en los dos primeros objetivos anteriores, el software I-Blast 8.2, te permite contemplar las características geomecánicas de los dominios de roca, con lo cual el programa calcula el PPV proyectado en base a los factores A y K, tomando por su puesto el diseño de carga ingresado y la secuencia de salida. Como ya es sabido los parámetros de la roca son factores no controlables, mientras que el diseño de carga es posible modificar. Esto permitió un análisis dinámico que se tradujo en un mejor control de las paredes de banco. Ver figuras 69 a la 71.

Figura 70

Estado de las paredes de banco de la fase 4



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

En la figura 70, se puede apreciar algunas grietas en el banco, pero gran parte del banco se puede ver estable; asimismo, no se aprecia deslizamiento de material hacia el catch bench. Ello es importante ver, ya que la variabilidad el macizo es grande, y se hicieron mayores ajustes en el diseño de carga.

Figura 71

Estado de las paredes de banco de la fase 5



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

En la figura 71, se puede apreciar muy poco deslizamiento de material hacia el catch bench, y se ve paredes más estables, ayudados por la voladura de pre-corte.

Figura 72

Estado de las paredes de banco de la fase 4



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona

En la figura 72, se puede apreciar una zona limpia con huellas de los taladros de precorte. Asimismo, no hay presencia de grietas nuevas.

Figura 73

Vista general del tajo Cerro Corona



Nota: Tomado de la mina Cerro Corona



En la figura 73, se puede ver una vista general del antes del uso del I-Blast, en el mismo dominio de roca Diorita T-di, el cuadro rojo se ve deslizamiento de material, mientras en el cuadro verde de bancos inferiores se observa zonas limpias, justo llegando al fin de la mina del tajo Cerro Corona, que finalizó este año 2025.

4.3.2. Cotejando resultados

Las paredes de los bancos, se pueden ver más estables, si hay presencia de grietas, pero no hay agrandamiento de las mismas, ni tampoco se ha podido ver presencia de grietas nuevas producto de las vibraciones.

Todo ello hace sentido, ya que las vibraciones proyectadas con el software I-Blast se encuentran en el rango de 166.67 mm/s, muy por debajo del límite crítico de cada roca (27% menos), ello se ha visto reflejado en la estabilidad de las paredes de cada banco y ha beneficiado a la estabilidad de los taludes del tajo Cerro Corona.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Se logro realizar las simulaciones realizadas en I-Blast 8.2 permitieron diseñar de manera consistente el comportamiento de las voladuras en los proyectos PY-3840, PY-3860 y PY-3850, integrando en cada caso la caracterización geomecánica de los dominios litológicos, el diseño de columnas de carga para producción y contorno, la geometría tridimensional de la malla, la secuencia de encendido y la distribución de energía explosiva, lo que proporcionó un marco numérico robusto para la predicción de la velocidad pico de partícula (PPV). En los tres proyectos se observó una relación coherente entre la distancia al frente de voladura y los niveles de PPV simulados, identificándose zonas críticas inmediatamente próximas a la malla con valores máximos de PPV significativamente próximas a los valores críticos, mientras que las zonas distales mostraron una atenuación progresiva de la respuesta vibratoria que garantiza de los límites de seguridad.

SEGUNDA: Se hizo un monitoreo in situ mediante los sismógrafos Instantel, el software Blastware y procedimientos específicos de instalación a 50 m del frente permitiendo contrastar las simulaciones proyectadas versus las reales. En la etapa previa a la implementación sistemática de I-Blast (mayo-agosto), los registros mostraron un comportamiento irregular: mayo y julio presentaron en general cumplimiento de los límites, aunque con eventos puntuales que se acercaron o superaron el PPV crítico, mientras que junio y agosto evidenciaron un control claramente deficiente, con PPV que sobrepasaron los límites críticos, lo que puso de manifiesto



la necesidad de ajustar diseños de carga y tiempos de retardo. Durante el último cuatrimestre de 2024, ya en el contexto de uso de I-Blast para el diseño, el monitoreo de septiembre y octubre reveló aún niveles de vibración elevados y múltiples excedencias, especialmente en Km-Pa y Km-Ch, señalando una fase de transición en la que fue necesario recalibrar la energía operante y la distribución de carga. Sin embargo, los registros en los meses de noviembre y diciembre los niveles de vibración promedio descendieron notablemente en comparación a los PPV críticos, consolidando un escenario de control y estabilización de las vibraciones en el tajo Cerro Corona.

TERCERA: Antes de la implementación de I-Blast 8.2, el control de las vibraciones sobre los taludes del tajo Cerro Corona era fundamentalmente reactivo y se evidenciaba un deterioro progresivo de las paredes de banco, con caída de bloques hacia las bermas de seguridad y acumulación de material que afectaba la condición y percepción de estabilidad local. La incorporación del software permitió transitar hacia un enfoque preventivo de gestión de vibraciones, integrando parámetros geomecánicos del macizo rocoso en el diseño de voladura y ajustando la carga por retardo y la secuencia de disparo, de modo que las vibraciones proyectadas se mantuvieron por debajo del umbral crítico definido para los dominios analizados. Las observaciones de campo posteriores muestran una mejora cualitativa en la condición de las paredes y de las bermas, con menor deslizamiento de material, bancos más “limpios” y mejor definición geométrica, especialmente en los sectores donde se aplicó un diseño optimizado de voladura y técnicas de precorte.



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: A partir de la capacidad demostrada de I-Blast 8.2 para reproducir el comportamiento vibratorio de las voladuras y verificar el cumplimiento de los PPV críticos en los puntos de control, se recomienda institucionalizar el uso del software como herramienta estándar de diseño previo para todas las voladuras ejecutadas en proximidad a taludes de banco sensibles en la mina Cerro Corona. Ello implica formalizar un procedimiento en el que, antes de cada disparo, se definan escenarios de diseño (variando carga máxima por retardo, burden, espaciamiento y secuencia de encendido), se simulen los niveles de PPV esperados y solo se aprueben aquellos diseños que mantengan márgenes de seguridad adecuados respecto a los PPV críticos de cada dominio litológico. Paralelamente, es conveniente consolidar una base de datos histórica de simulaciones, vinculada a los resultados de campo, que permita actualizar periódicamente los criterios de diseño y refinar las envolventes de PPV admisibles según el comportamiento real del macizo rocoso.

SEGUNDA: Considerando que el monitoreo in situ permitió identificar etapas con control deficiente, evidenciar la fase de transición tras la introducción de I-Blast y documentar la posterior estabilización con cumplimiento del 100 % de los límites, se recomienda mantener de manera permanente el sistema de monitoreo de vibraciones como parte de la gestión operativa de la mina. Esto supone establecer un programa fijo de instrumentación con sismógrafos en puntos estratégicos, criterios claros de ubicación y distancia al frente, protocolos de medición por campaña y umbrales de



alerta que activen la revisión inmediata del diseño de voladuras cuando se detecten tendencias al alza en los PPV registrados. Asimismo, debe garantizarse la integración sistemática de los datos de campo con las simulaciones en I-Blast, de modo que cada nuevo registro sirva para recalibrar el modelo, ajustar la energía operante y retroalimentar los parámetros de diseño, consolidando un ciclo continuo de mejora en el control de vibraciones.

TERCERA: Se recomienda consolidar el uso de I-Blast 8.2 como herramienta estándar para el diseño y evaluación previa de las voladuras en los sectores próximos a taludes, formalizando un procedimiento operativo que integre, de manera sistemática, la definición de límites de PPV por dominio litológico, la simulación previa de escenarios de carga y secuencia de disparo, y la verificación posterior en campo mediante registros instrumentales de vibraciones y mapeo geomecánico de las paredes de banco. Asimismo, resulta conveniente implementar un sistema de seguimiento cuantitativo del desempeño de los taludes, que incluya indicadores como volumen de material desprendido por banco y periodo, densidad y evolución de grietas, y frecuencia de intervenciones de limpieza o sostenimiento, de modo que la información generada permita recalibrar periódicamente los parámetros de diseño de voladura y ajustar los umbrales de vibración a las condiciones reales del macizo rocoso. De esta forma, la mina no solo mantendría un enfoque preventivo en la gestión de vibraciones, sino que también fortalecería la trazabilidad técnica de las decisiones de diseño y su vínculo directo con la estabilidad geomecánica de los taludes.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

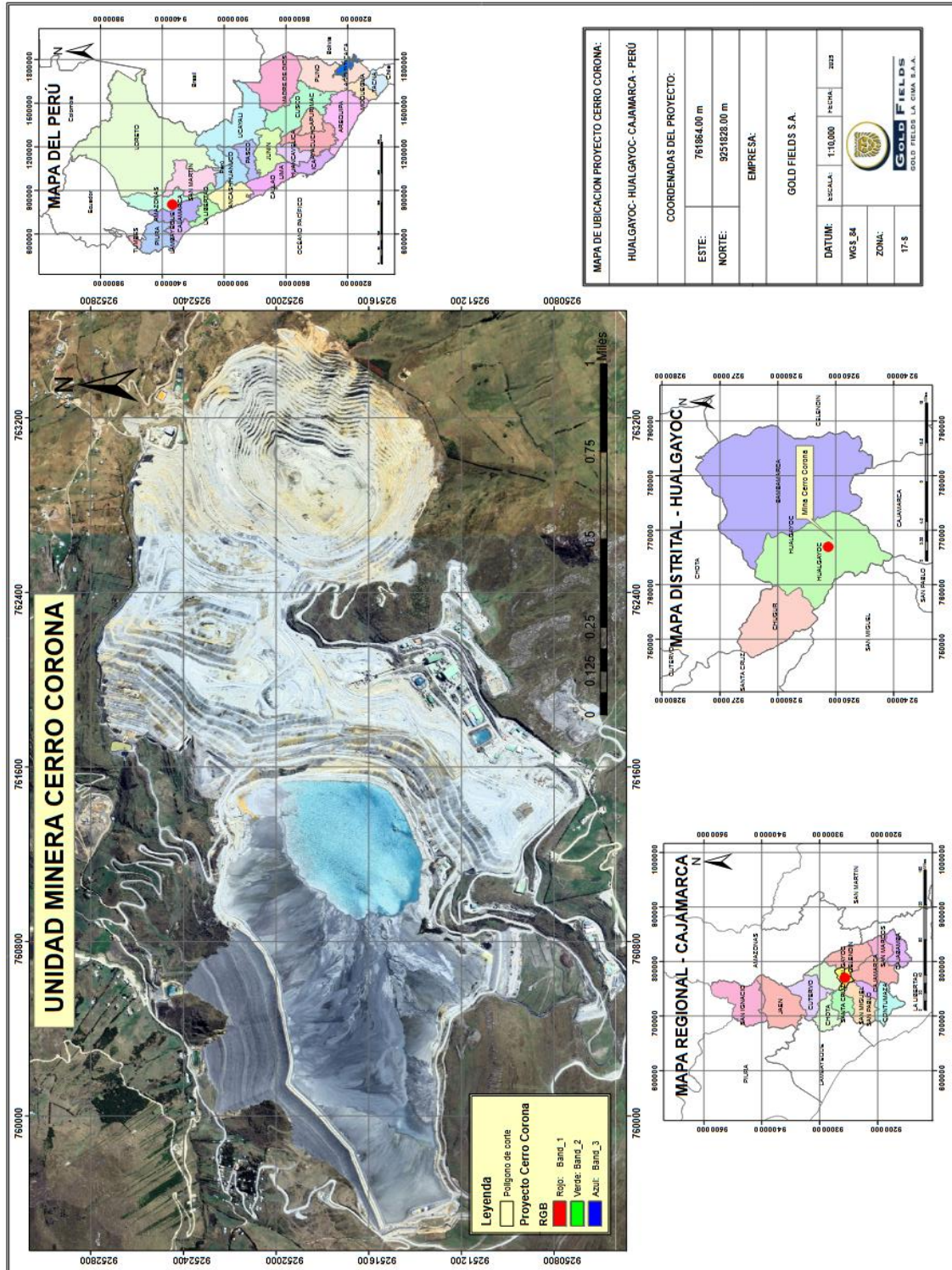
- Alfonso, E. (2005). *Estabilidad de taludes*. (P. Prat, Ed.) Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Anchorena, A. E. (2015). *Modelo Predictivo de Fragmentación y su Aplicación en una Matriz de Decisión*. Arequipa: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú - PERUMIN.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. (1ra Ed.) E.T.S. De Ingenieros de Minas de Madrid.
- Bustillo, M., & Lopez, J. (1997). *Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras (2da. Ed.)*. Entorno Gráfico, S.L.
- Cámac, E. A. (2019). *Perforación, Tecnología de Explosivos y Voladura de Rocas (1ª ed.)*. Druker Impresores y Editores E.I.R.L.
- Cárdenas, R. (2022). *Influencia del sistema taponex en la sobreperforación en tajo abierto, Unidad Operativa Shougang*. [Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero de minas, Universidad Continental] Repositorio institucional.
- Chura, H. M. (2018). *Geomecánica dinámica en la optimización de radio de influencia efectiva en voladura de taladros largos de la unidad operativa Inmaculada, Hochschild Mining – Ayacucho*. [Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero de minas, Universidad Nacional del Altiplano] Repositorio institucional.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- DNA Blast. (2024). *Manual del Usuario del Software I-Blast 8.2*. (4ra Ed.) Thierry Bernard Technologie.
- Ebrahimi, E. M. (2025). Optimization of blasting parameters in an open-pit mine using a combination of genetic algorithm and particle swarm optimization. *Heliyon*, 11(2). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106333>



- Enaex S.A. (2019). *Manual de tronadura*. Chile.
- EXSA S.A. (2017). *Manual Práctico de Voladura (5.da ed)*. EXSA.
- Famesa. (2019). *Manual Técnico FAMESA*. Perú: FAMESA Explosivos S.A.C.
- Herrera, J. H. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. North Vancouver: Evert Hoek Consulting Engineer Inc. / Rocscience.
- Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006). *Open Pit Mine Planning & Design*. (2da Ed.) CRC Press/Balkema.
- IGP. (2020). *Levantamiento topográfico mediante fotogrametría aérea con dron y mediciones GPS de Alto Laran y Rio Chico, Ica*. (1ra Ed.) Ministerio del Ambiente.
- Macías-Medrano, S. (2021). *Fotogrametría Digital: adquisición de fotografías aéreas con dron*. Facultad de Ingeniería, UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).
- Revollar, O. G. (2020). *Diseño conceptual de la explotación a tajo abierto del cuerpo de hierro Toro Negro, sector Petra de Sociedad Minera de Responsabilidad Limitada Yale II*. [Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero de minas, Universidad Continental] Repositorio institucional.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. London: Spon Press.
- Zhang, L. (2017). *Engineering properties of rocks*. (2nd Ed.) Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-O-0264S-7>. doi:<https://doi.org/10.1016/C2014-0-02645-7>
- Zou, D. (2017). *Blasting Design for Underground Excavation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-19890-18>. doi:10.1007/978-981-10-1989-0_18

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación de la mina Cerro Corona





Anexo 2. Informes de del monitoreo de vibraciones antes del I-Blast



REPORTE DE VIBRACIÓN

Date/Time Vert at 13:14:39 May 2, 2024
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 9.0 sec at 2048 sps
Operator/Setup: Operator/factory.MMB

Serial Number UM10221 V 10-87 Micromate ISEE
Battery Level 3.7 Volts
Unit Calibration May 23, 2023 by Geoinstruments
File Name UM10221_20240502131439.IDFW

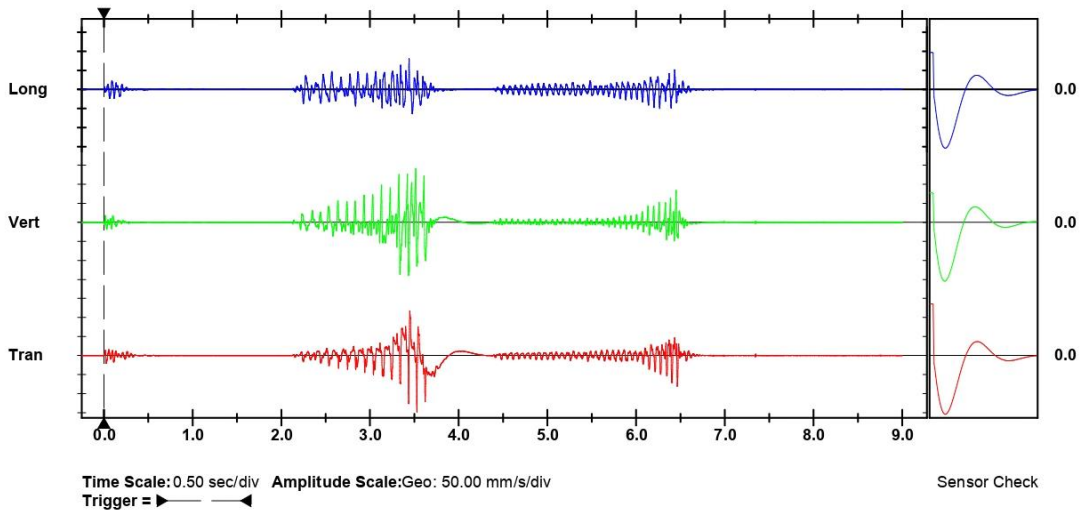
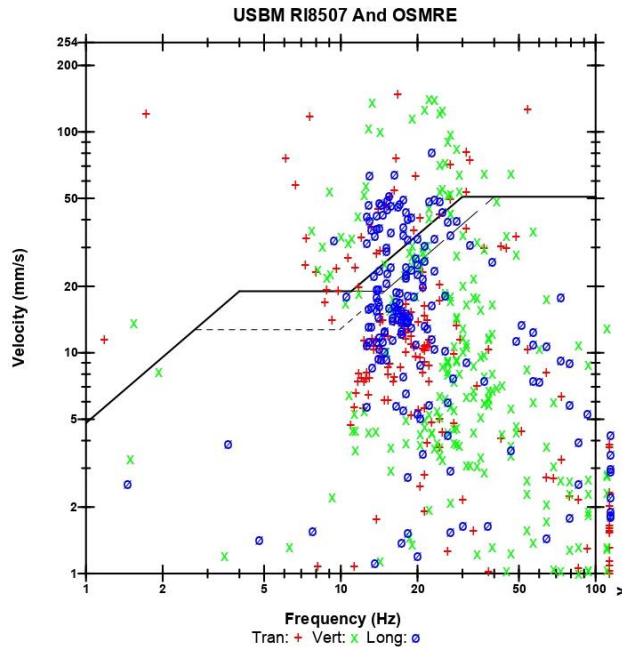
Notes

Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes

Nv: 3640
 Py: 191-196
 Tal ref: 305

	Tran	Vert	Long	
PPV	148.3	141.3	81.29	mm/s
PPV (Ponderated)	169.4	135.1	62.58	mm/s
PPV	94.42	94.01	89.20	dB
ZC Freq	16.8	22	23	Hz
Time (Rel. to Trig)	3.530	3.516	3.440	sec
Peak Acceleration	9.999	6.667	3.202	g
Peak Displacement	4.864	1.304	0.616	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.1	7.5	7.1	Hz
Overswing Ratio	4.3	3.8	4.2	
Peak Vector Sum	189.5 mm/s at 3.437 sec			



Printed: May 2, 2024 (V 10.74)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation



Event Report

Date/Time Vert at 13:22:21 July 14, 2024
Trigger Source Geo: 5.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 10.0 sec at 2048 sps
Job Number: 1
Operator/Setup: Operator 1/custom.nsb

Serial Number MP13762 V 10-75 Minimate Pro 6
Battery Level 4.1 Volts
Unit Calibration August 2023, 202023 by Geoinstruments
Geo1 Calibration SE13456, August 17, 2023 by Geoinstruments
File Name MP13762_20240714132221.IDFW

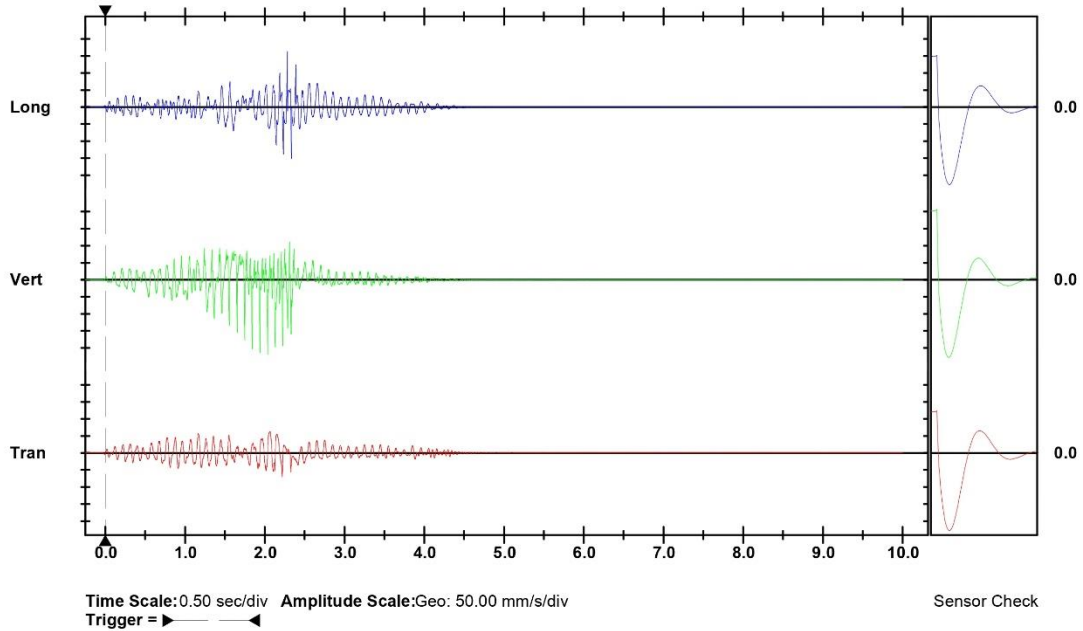
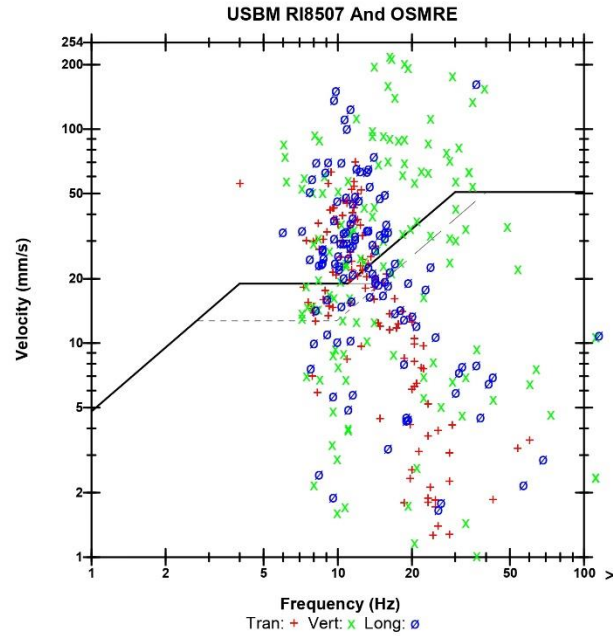
Notes

Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes

Nv:3640
 Py:182 184 191
 Tal. Ref.: 232

	Tran	Vert	Long	
PPV	69.94	219.3	163.6	mm/s
ZC Freq	11.8	16.3	37	Hz
Time (Rel. to Trig)	2.219	2.038	2.283	sec
Peak Acceleration	1.701	13.92	11.29	g
Peak Displacement	1.275	2.353	1.387	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.6	3.6	
Peak Vector Sum	223.6 mm/s at 2.038 sec			



Printed: July 14, 2024 (V 10.74)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation



Event Report

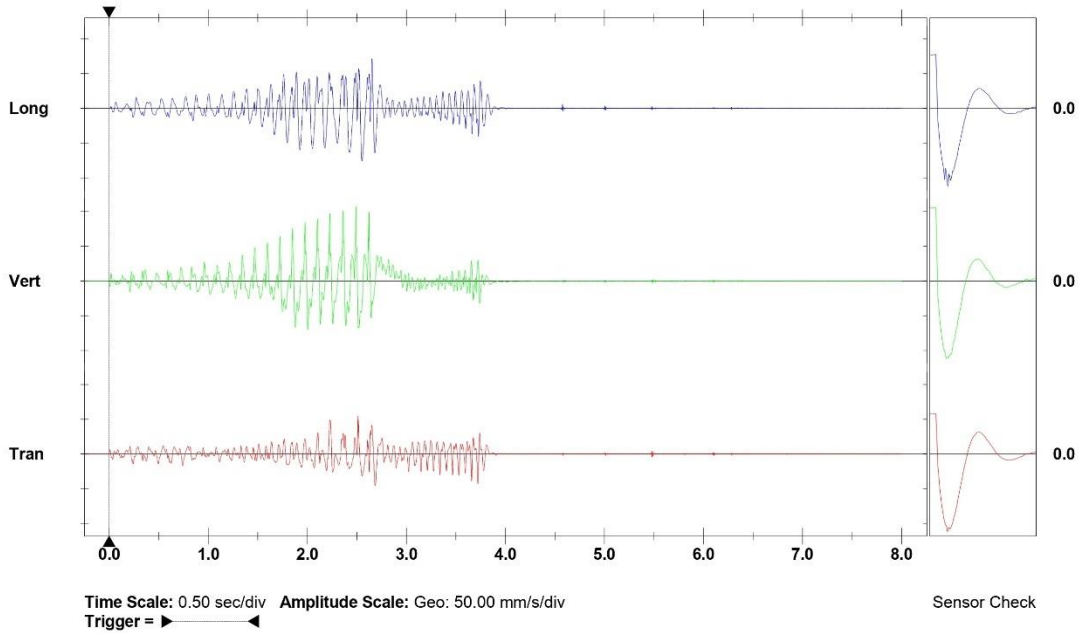
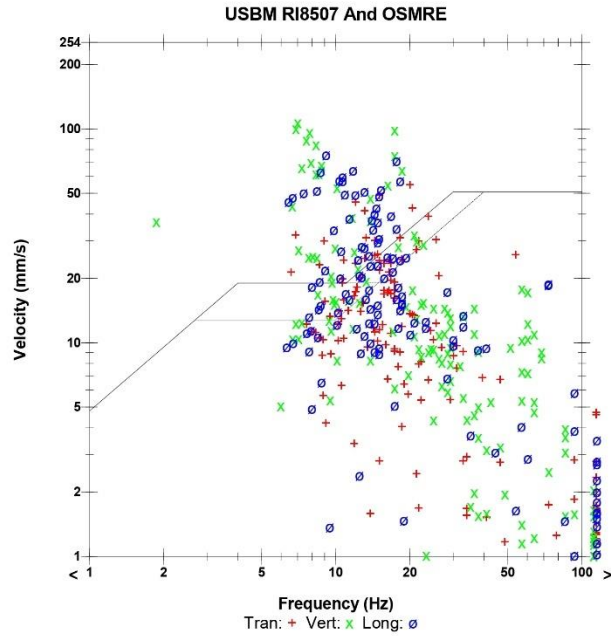
Date/Time Vert at 13:14:59 June 8, 2024
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 8.0 sec at 2048 sps
Job Number: 1
Operator/Setup: Operator 1/custom.nsb

Serial Number MP13762 V 10-75 Minimate Pro 6
Battery Level 3.8 Volts
Unit Calibration August 17, 2023 by Geoinstruments
Geo1 Calibration SE13456, August 23, 2023 by Geoinstruments
File Name MP13762_20240608131459.IDFW

Notes
 Location
 Client
 Company
 General note

Post Event Notes
 Nv: 3640
 Py: 193
 Tal ref: 293

	Tran	Vert	Long	
PPV	54.74	107.2	75.82	mm/s
ZC Freq	20	7.0	9.1	Hz
Time (Rel. to Trig)	2.512	2.492	2.553	sec
Peak Acceleration	1.387	4.352	1.619	g
Peak Displacement	0.569	2.235	1.227	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.7	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.5	4.0	
Peak Vector Sum	116.3 mm/s at 2.228 sec			



Printed: June 8, 2024 (V 10.74)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation



Anexo 3. Informes de del monitoreo de vibraciones con del I-Blast



8

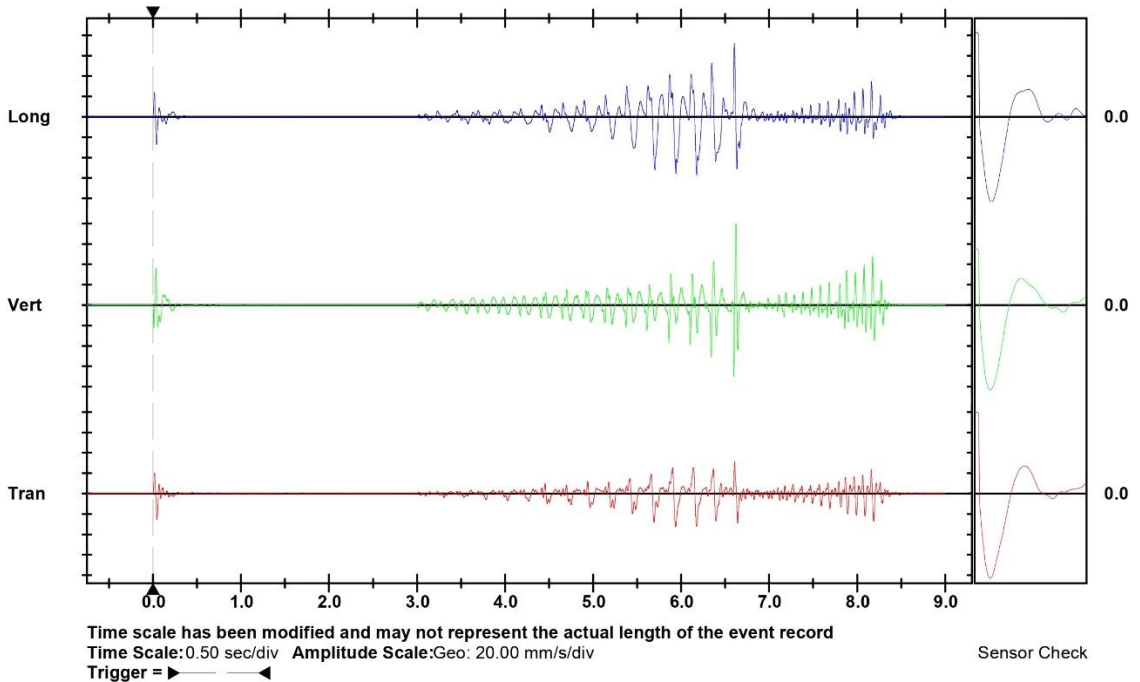
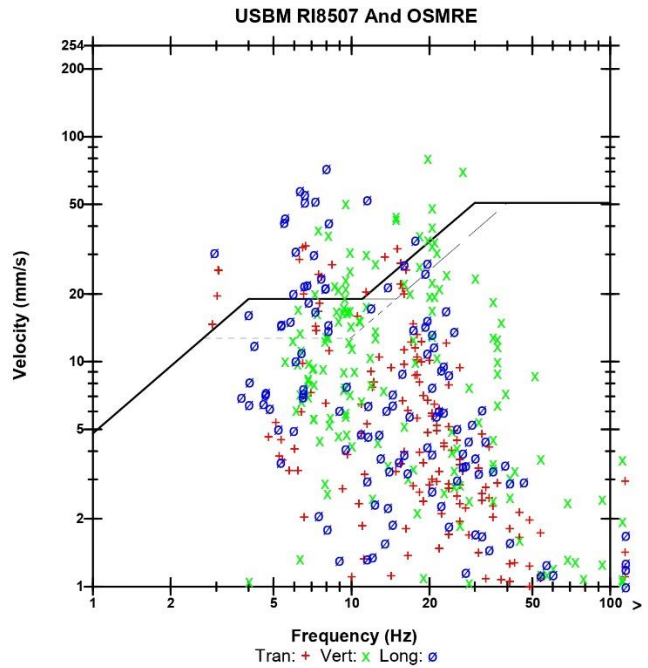
Date/Time Vert at 13:12:46 September 29, 2024
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 15.0 sec at 2048 sps
Operator/Setup: Operator/factory.MMB

Serial Number UM6628 V 10-89 Micromate ISEE
Battery Level 3.8 Volts
Unit Calibration Sep 28, 2024 by Geoinstruments
File Name UM6628_20240929131246.IDFW

Notes
 Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes
 Nv 3640
 Py 226 232 233 + Pre corte
 Tal Ref 1131 (Pre corte)

	Tran	Vert	Long	
PPV	32.61	80.00	72.39	mm/s
ZC Freq	6.6	19.7	8.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	5.938	6.623	6.605	sec
Peak Acceleration	0.446	1.933	1.487	g
Peak Displacement	0.623	0.615	1.282	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.7	7.7	Hz
Overswing Ratio	3.0	3.1	3.1	
Peak Vector Sum	93.97 mm/s at 6.601 sec			





Date/Time Long at 13:23:50 October 5, 2024
Trigger Source Geo: 5.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 30.0 sec at 2048 sps
Operator/Setup: Operator/factory.MMB

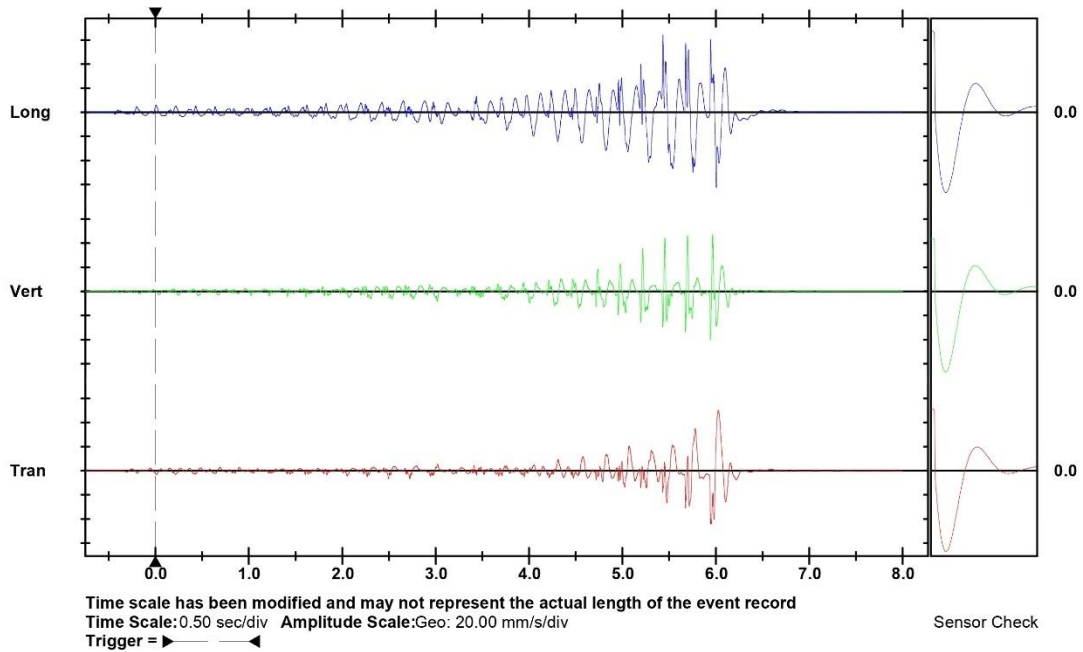
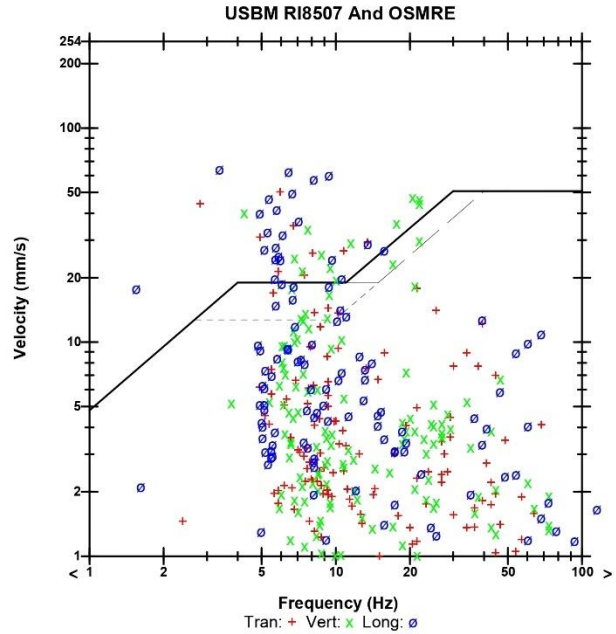
Serial Number UM6628 V 10-89 Micromate ISEE
Battery Level 3.8 Volts
Unit Calibration Oct 28, 2024 by Geoinstruments
File Name UM6628_2024105132350.IDFW

Notes
 Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes
 Nv 3640
 Py 235 236 237
 Tal Ref 123

	Tran	Vert	Long	
PPV	50.17	47.31	64.38	mm/s
ZC Freq	6.0	20	3.4	Hz
Time (Rel. to Trig)	6.026	5.966	5.434	sec
Peak Acceleration	0.895	1.139	2.429	g
Peak Displacement	1.311	0.455	1.498	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.7	7.7	Hz
Overswing Ratio	3.4	3.1	2.8	

Peak Vector Sum 81.23 mm/s at 5.944 sec





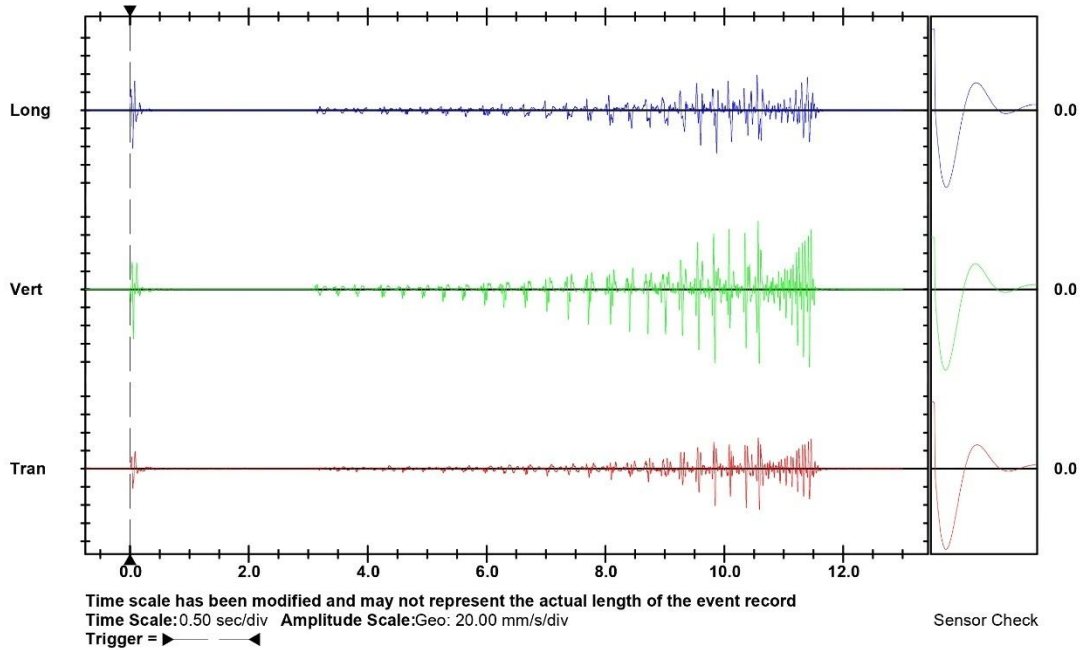
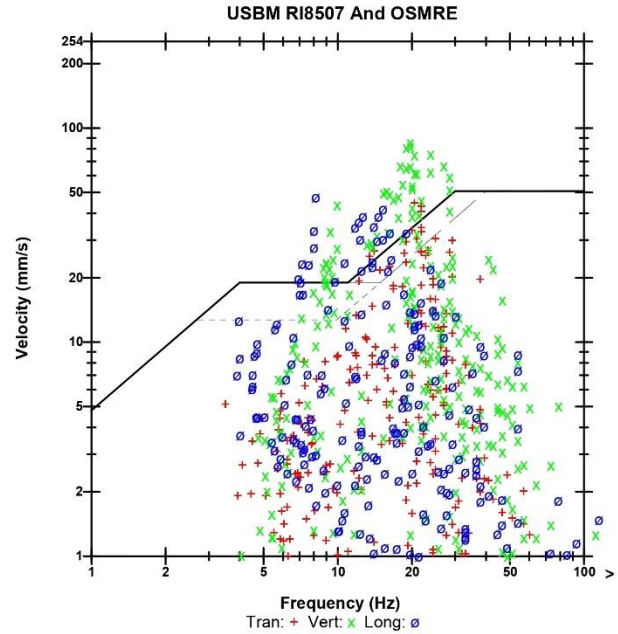
Date/Time Vert at 13:15:56 November 4, 2024
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 18.0 sec at 2048 sps
Operator/Setup: Operator/factory.MMB

Serial Number UM6628 V 10-89 Micromate ISEE
Battery Level 3.8 Volts
Unit Calibration Nov 28, 2024 by Geoinstruments
File Name UM6628_20241104131556.IDFW

Notes
 Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes
 Nv 3640
 Py 314 + Pre corte
 Tal Ref 2173 (Pre corte)

	Tran	Vert	Long	
PPV	44.75	85.64	47.57	mm/s
ZC Freq	20	19.7	8.1	Hz
Time (Rel. to Trig)	10.591	11.431	9.870	sec
Peak Acceleration	0.869	1.983	0.995	g
Peak Displacement	0.350	0.660	0.613	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.7	7.7	Hz
Overswing Ratio	3.3	3.1	2.8	
Peak Vector Sum	96.81 mm/s at 11.432 sec			





REPORTE DE VIBRACIÓN

Date/Time Vert at 13:13:35 December 17, 2024
Trigger Source Geo: 2.000 mm/s
Range Geo: 254.0 mm/s
Record Time 3.0 sec at 2048 sps
Operator/Setup: Operator/factory.MMB

Serial Number UM10221 V 10-87 Micromate ISEE 3.5
Battery Level Volts
Unit Calibration December 23, 2024 by Geoinstruments
File Name UM10221_20241217131335.IDFW

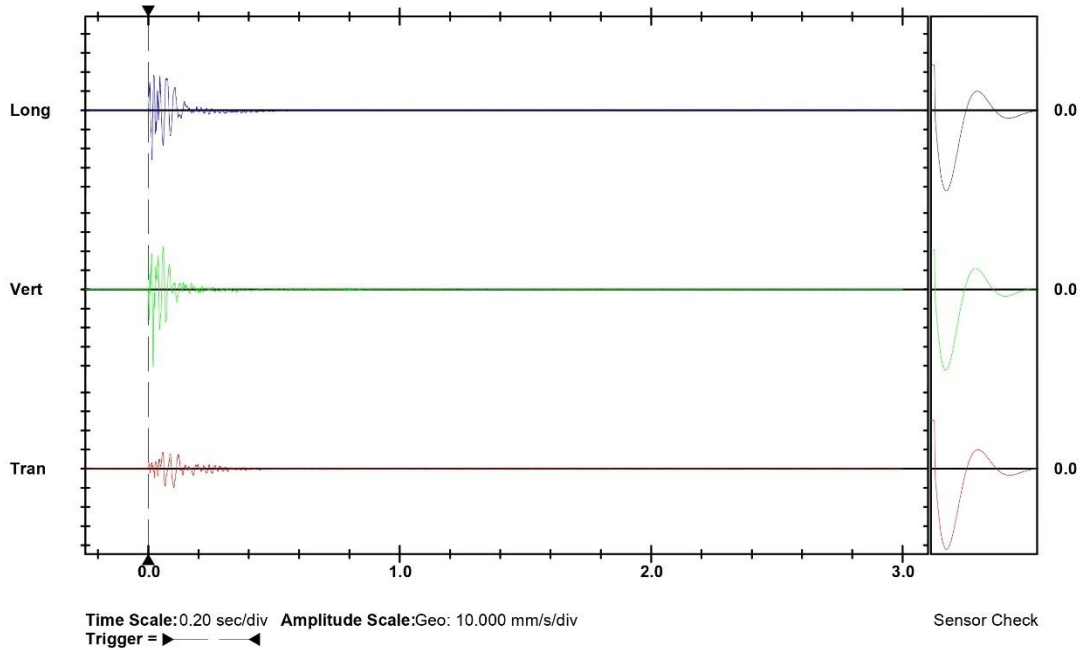
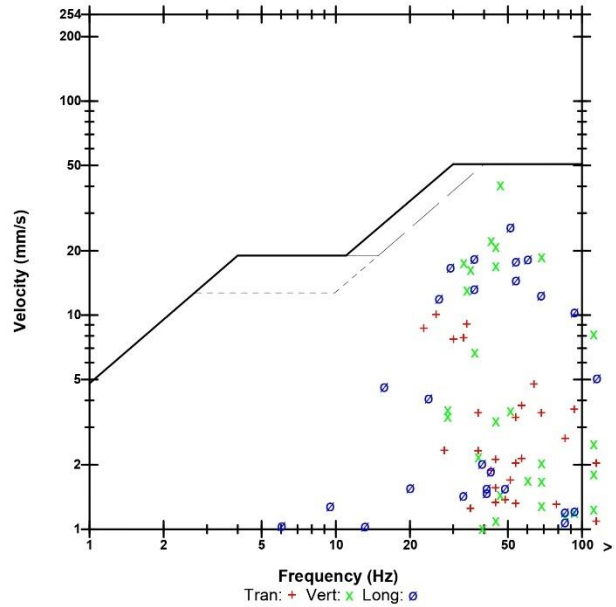
Notes
 Location: Hualgayoc
 Client: Gold Fields
 User Name: Cerro Corona
 General:

Post Event Notes

Pre corte:
 Nv: 3640
 Py: 140
 Tal. Ref. 1957

	Tran	Vert	Long	
PPV	10.03	40.57	25.89	mm/s
PPV (Ponderated)	8.707	17.85	19.38	mm/s
PPV	71.02	83.16	79.26	dB
ZC Freq	26	47	51	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.102	0.020	0.015	sec
Peak Acceleration	0.531	1.979	1.257	g
Peak Displacement	0.057	0.095	0.106	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	6.9	7.5	7.1	Hz
Overswing Ratio	4.2	3.9	4.2	
Peak Vector Sum	41.52 mm/s at 0.020 sec			

USBM RI8507 And OSMRE



Printed: December 17, 2024 (V 10.74)

Format © 1995-2015 Xmark Corporation

Anexo 4. Zonas de derrame de material en el tajo Cerro Corona







Anexo 5. Límites críticos para cada dominio de roca del tajo Cerro Corona

Geology - Mina cerro corona

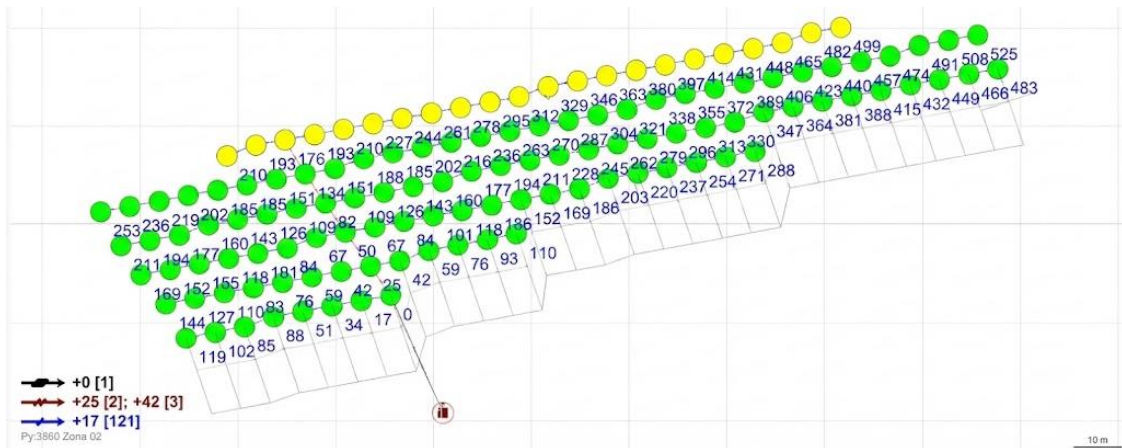
Simbología	Unidad Geológica	PPV Crítico (mm/s)
T-di	Diorita Cerro Corona	253.65
DI-NE	Diorita Noreste	256.43
DI-SO	Diorita Suroeste	261.23
T-gd	Pórfido Granodiorítico	253.45
T-da	Dacita	221.77
T-ri	Volcánico Riolítico	249.31
Ki-Fa	Formación Farrat (Cuarcita)	233.18
Ki-in	Formación Inca	215.1
Km-Ch	Formación Chulec	234.32
Km-Pa	Formación Pariatambo	207.85
Km-Yi	Formación Yumagual Inf.	205.65
Km-Ym	Formación Yumagual Med.	208.41
Km-Ys	Formación Yumagual Sup.	211.87
Km-Mu	Formación Mujarrun	149.63
Obo	Depósitos Cuaternarios	182.72

Anexo 6. Calibración de los equipos

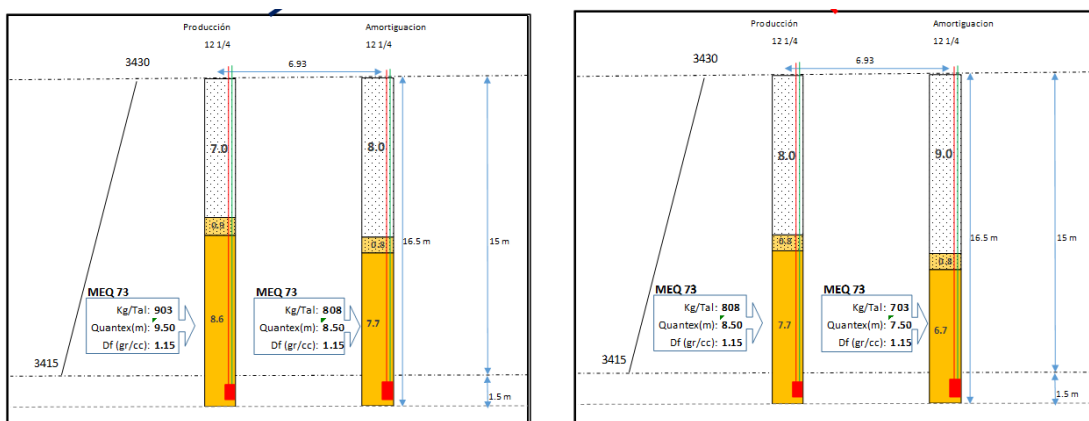


Anexo 7. Malla de perforación informe post voladura 3415 232 233

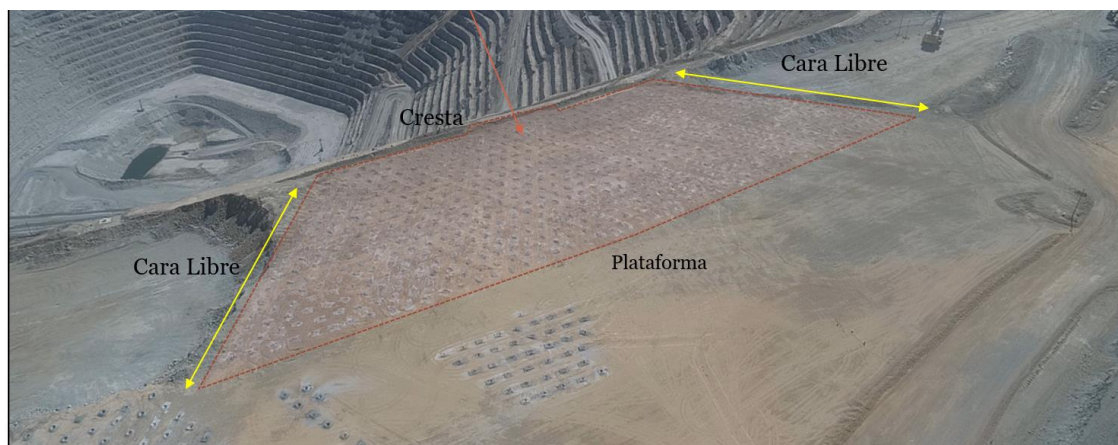
Secuencia de salida



Diseño de carga utilizada



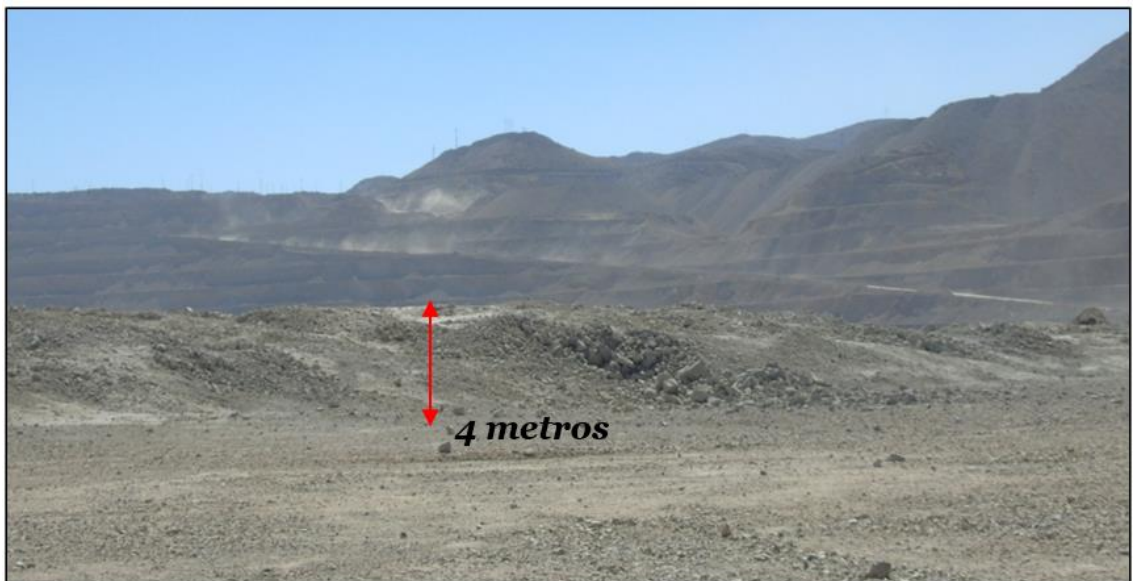
Proyección de la malla en campo



Estado del proyecto después del disparo



Análisis de la altura de la pila





COMENTARIOS



- ❖ En el proyecto 3640 202 & Pre corte 34640 200 para la Pala 02 se dispararon 93 taladros primarios y 40 taladros de pre corte.
- ❖ El proyecto no presentó agua en el total de taladros.
- ❖ El carguío de los taladros se inició el día 05 de Agosto (1 día de permanencia en el taladro).
- ❖ El valor promedio de densidad final de la mezcla explosiva está de acuerdo a los valores de diseño: HA64 ($\rho=1.28 \text{ gr/cm}^3$).
- ❖ El control de vibraciones dio un registro de 126.6 mm/s por debajo del Vpp crítico 253.65 mm/s (T-da)
- ❖ Los resultados obtenidos fueron:
 - 0% (Nivel 0) de generación de gases nitrosos por el disparo.
 - Se observa en la superficie del material disparado (Di-qs), que la fragmentación obtenida se encuentra dentro de los rangos esperados.
 - Cero taladros con Back up y Cero tiros cortados.



Anexo 8. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JAMIL YELSTIN CASA VALERO
identificado con DNI 71477932 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA DE MINAS

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"SIMULACIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA MEDIANTE
I-BLAST 8.2 PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN
MINA CERRO CORONA"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 30 de MARZO del 2026

FIRMA (obligatoria)



Huella



Anexo 9. Autorización para el depósito de Tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JAMIL YEJSTIN CCASA VALERO
identificado con DNI 71423932 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA DE MINAS
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"SIMULACIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA MEDIANTE I-BLAST
8.2 PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MINA
CERRO CORONA"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 30 de MARZO del 2026


FIRMA (obligatoria)

