

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

“MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACIONES EN CAMPO
LEJANO PARA INFERIR VIBRACIONES EN VOLADURAS
MASIVAS CERCA A ESTRUCTURAS DE CONCRETO”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
GESTIÓN MINERA

ELABORADO POR:
YOGER MATEO GUERRERO ESPINOZA

ASESOR
M.Sc. Ing. JAVIER EDUARDO PERALES ORELLANA

LIMA – PERÚ
2022

DEDICATORIA

Con mucho aprecio dedico el presente trabajo a mis padres por su inconmensurable esfuerzo para guiarme por el camino correcto hacia la superación personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi gratitud a la empresa DNA Blast Group S.A. y a su gerente general M.Sc. Alan Díaz Butron por haberme brindado la oportunidad de liderar el trabajo monitoreo, control y optimización de voladuras para el control de efectos de vibraciones realizado en el proyecto Control Water DAM – Mina Quellaveco y ejecutado por la empresa JJC Contratistas Generales S.A. liderado por el Ing. Humberto Fernández Andia, gerente de proyecto, al cual extiendo mi agradecimiento.

A mi asesor del presente trabajo de investigación M.Sc. Ing. Javier Perales Orellana por sus consejos y contribución a mejorar el contenido de la presente investigación.

Así mismo agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, a la escuela de post grado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalurgia y a los docentes por haberme compartido sus conocimientos y aportado con sus enseñanzas a mi crecimiento profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
INDICE DE CONTENIDO.....	IV
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	VII
RESUMEN Y ABSTRAC.....	XII
INTRODUCCION.....	14
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	16
1.1. Antecedentes Bibliográficos	16
1.2. Descripción de la Realidad Problemática	20
1.3. Formulación del Problema	22
1.3.1. <i>Problema General</i>	23
1.3.2. <i>Problemas Específicos</i>	23
1.4. Justificación e Importancia de la Investigación	24
1.4.1. <i>Justificación Teórica</i>	24
1.4.2. <i>Justificación Práctica</i>	24
1.4.3. <i>Justificación Personal</i>	24
1.5. Objetivos:	25
1.5.1. <i>Objetivos General</i>	25
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	25
1.6. Hipótesis.....	25
1.6.1. <i>Hipótesis General</i>	25
1.6.2. <i>Hipótesis Específicas</i>	25
1.7. Variables e Indicadores	26
1.7.1. <i>Variable Dependiente</i>	26
1.7.2. <i>Variable Independiente</i>	26
1.7.3. <i>Indicadores</i>	26
1.8. Periodo de Análisis	26
CAPITULO II: MARCO TEORICO	27
2.1. Entorno Geomecánico/Geotécnico del Macizo Rocoso.....	28

2.1.1.	<i>Características Geomecánicas del Macizo Rocosó</i>	28
2.1.2.	<i>Caracterización Geotécnica</i>	32
2.2.	Descripción de los Actuales Trabajos de Perforación y Voladura.....	40
2.2.1.	<i>Perforación</i>	41
2.2.2.	<i>Voladura</i>	45
2.3.	Determinación del Diseño de Voladura	52
2.3.1.	<i>Selección del Explosivo</i>	53
2.3.2.	<i>Caracterización del Macizo Rocosó</i>	57
2.3.3.	<i>Geometría de la Malla de Perforación</i>	59
2.3.4.	<i>Determinación del Factor de Carga</i>	65
2.4.	Vibraciones en Voladura.....	73
2.4.1.	<i>Generación de Ondas Sísmicas por Voladura</i>	74
2.4.2.	<i>Características del Movimiento Ondulatorio</i>	76
2.4.3.	<i>Tipos de Ondas</i>	78
2.4.4.	<i>Velocidad de Propagación de la Onda</i>	81
2.4.5.	<i>Velocidad de la Partícula (VP)</i>	81
2.4.6.	<i>Factores que Influyen en la Propagación de la Vibración</i>	83
2.4.7.	<i>Predicción del Nivel de Vibración Sobre el Terreno</i>	87
CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....		93
3.1.	Metodología de la Investigación	93
3.1.1.	<i>Tipo de Investigación</i>	93
3.1.2.	<i>Nivel y diseño de Investigación</i>	93
3.1.3.	<i>Población y Muestra</i>	94
3.1.4.	<i>Técnicas e Instrumentos para recoger información</i>	94
3.1.5.	<i>Técnicas de procedimiento de datos</i>	94
3.2.	Desarrollo del Trabajo de Tesis	97
3.2.1.	<i>Zona de Prueba</i>	96
3.3.	Monitoreo de Vibraciones.....	97
3.3.1.	<i>Características del Equipo y Software</i>	100
3.3.2.	<i>Ubicación de los Sismógrafos</i>	101
3.4.	Trabajos en Oficina/Gabinete	103
3.4.1.	<i>Selección de Constantes Teóricas Iniciales k y Alpha</i>	103
3.4.2.	<i>Estimaciones de Velocidades Pico Partículas (VPP)</i>	105

3.4.3.	<i>Determinación de Carga Óptima – Taladro Prueba</i>	107
3.5.	Análisis de Información	110
3.5.1.	<i>Captura de Ondas Elementales – Taladro Prueba</i>	111
3.5.2.	<i>Determinación del Modelo Predictivo – Taladro Prueba</i>	117
3.6.	Validación del Modelo Matemático	122
3.6.1.	<i>Estimación de Velocidades Pico Partículas</i>	122
3.6.2.	<i>Metodología de Validación</i>	123
CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		130
4.1.	Monitoreo en Voladuras Masivas	130
4.1.1.	<i>Resultado de Leyes de Atenuación por Zonas</i>	131
4.1.2.	<i>Análisis de Modelos de Atenuación por Zonas</i>	134
4.2.	Contrastación de Hipótesis.....	137
4.2.1.	<i>Comparativo entre Predicción y Registro</i>	138
4.2.2.	<i>Limitaciones Del Modelo</i>	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		142
	Conclusiones.....	142
	Recomendaciones	144
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		145
ANEXOS.....		148
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....		149
ANEXOS OTROS.....		165
CURRICULUM VITAE.....		166

ÍNDICE DE TABLAS

	Pagina
Tabla 1.1 <i>Limites de vibración por estructuras</i>	23
Tabla 2.1 <i>Perforaciones diamantinas ejecutadas</i>	29
Tabla 2.2 <i>Resumen de propiedades índices y de resistencia de la roca intacta</i>	35
Tabla 2.3 <i>Parámetros de GSI del macizo rocoso</i>	36
Tabla 2.4 <i>Parámetros de Hoek and Brown del macizo rocoso</i>	37
Tabla 2.5 <i>Resumen de parámetros dinámicos del macizo rocoso</i>	38
Tabla 2.6 <i>Resumen de parámetros y propiedades de ingeniería del macizo rocoso</i>	39
Tabla 2.7 <i>Grado de aprovechamiento de la energía</i>	50
Tabla 2.8 <i>Registro de explosivos en proyecto</i>	52
Tabla 2.9 <i>Registro de accesorios de voladura en proyecto</i>	52
Tabla 2.10 <i>Características técnicas del ANFO</i>	54
Tabla 2.11 <i>Características técnicas de la Emulsión</i>	55
Tabla 2.12 <i>Propiedades físicas de la roca - Sondajes diamantinos</i>	57
Tabla 2.13 <i>Parámetros geomecánicos - Índice de Lilly</i>	58
Tabla 2.14 <i>Propiedades físicas - Riolita</i>	62
Tabla 2.15 <i>Características técnicas del Emultex CN</i>	62
Tabla 2.16 <i>Accesorios de voladura</i>	63
Tabla 2.17 <i>Parámetros de perforación</i>	63
Tabla 2.18 <i>Grados de relación de rigidez</i>	65
Tabla 2.19 <i>Parámetros geomecánicos del macizo rocoso de proyecto</i>	68
Tabla 2.20 <i>Relación entre desplazamiento de partícula, velocidad y aceleración</i>	74
Tabla 2.21 <i>Factores que influyen en la magnitud de la vibración</i>	83
Tabla 3.1 <i>Configuración de modelo de carga N° 1</i>	106
Tabla 3.2 <i>Configuración de modelo de carga N° 2</i>	107
Tabla 3.3 <i>Configuración de modelo de carga N° 3</i>	108
Tabla 3.4 <i>Resumen de VPP simulado por zona de control</i>	109
Tabla 3.5 <i>Resumen de P80 simulado por modelo de carga</i>	109
Tabla 3.6 <i>Resumen de fly rock simulado por modelo de carga</i>	110
Tabla 3.7 <i>Coordenadas del taladro prueba y puntos de monitoreo</i>	113
Tabla 3.8 <i>Registro de valores sísmicos - Taladro prueba</i>	116
Tabla 3.9 <i>Tabla de datos de análisis - Taladro prueba</i>	117

Tabla 3.10 <i>Cálculos logarítmicos de datos - Taladro prueba</i>	119
Tabla 3.11 <i>Desviación entre VPP simulado vs registrado</i>	128
Tabla 4.1 <i>Monitoreo de vibraciones en voladuras</i>	130
Tabla 4.2 <i>Comparativo VPP simulado vs medido - Modelo de predicción modificado para zona Plinto</i>	138
Tabla 4.3 <i>Comparativo VPP simulado vs medido - Modelo de predicción modificado para zona Túnel salida</i>	139
Tabla 4.4 <i>Comparativo VPP simulado vs medido - Modelo de predicción modificado para zona Plataforma de bombas</i>	140

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1.1. <i>Periodo de ejecución para la elaboración de la tesis.</i>	26
Figura 2.1. <i>Materiales definidos en la sección del eje del dique de control.</i>	33
Figura 2.2. <i>Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial UCS de la Riolita</i>	36
Figura 2.3. <i>Funcionamiento básico de equipos de perforación rotoperkusivos.</i>	42
Figura 2.4. <i>Martillo neumático RH658.</i>	44
Figura 2.5. <i>Perforadora Track Drill STD 11 (Soosan).</i>	44
Figura 2.6. <i>Secuencia de rompimiento de la roca.</i>	45
Figura 2.7. <i>Curva P-V para ANFO.</i>	47
Figura 2.8. <i>Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua.</i>	48
Figura 2.9. <i>Distribución de la energía potencial de un explosivo.</i>	56
Figura 2.10. <i>Parámetros de voladuras en bancos.</i>	59
Figura 2.11. <i>Datos geológicos de la roca Riolita – I Blast.</i>	70
Figura 2.12. <i>Diseños de carguío tipo – I Blast.</i>	71
Figura 2.13. <i>Simulación de fragmentación – I Blast.</i>	72
Figura 2.14. <i>Simulación de proyección – I Blast.</i>	73
Figura 2.15. <i>Ondas producidas por la detonación de una mezcla explosiva.</i>	76
Figura 2.16. <i>Tipos de Ondas.</i>	78
Figura 2.17. <i>Ondas sísmicas internas.</i>	79
Figura 2.18. <i>Ondas sísmicas superficiales.</i>	80
Figura 2.19. <i>Esquema de daños inducido sobre el macizo rocoso</i>	87
Figura 2.20. <i>Típica dispersión de datos, velocidad pico-partícula vs distancia escalada cuadrada</i>	90
Figura 2.21. <i>Integración de la onda de superficie en la región cercana de una carga extendida</i>	92
Figura 3.1. <i>Procedimiento de control de una voladura.</i>	96
Figura 3.2. <i>Ubicación de zona de estudio.</i>	97
Figura 3.3. <i>Determinación zona inicial de prueba.</i>	98
Figura 3.4. <i>Orientación del geófono con respecto a la voladura.</i>	99
Figura 3.5. <i>Sismógrafo Vibracord Gaia.</i>	100
Figura 3.6. <i>Software I-Blast Versión 7.8.</i>	101
Figura 3.7. <i>Zonas de monitoreo de vibraciones.</i>	102

Figura 3.8. <i>Simulación de VPP para modelo de carga N°1.</i>	106
Figura 3.9. <i>Simulación de VPP para modelo de carga N°2.</i>	107
Figura 3.10. <i>Simulación de VPP para modelo de carga N°3.</i>	108
Figura 3.11. <i>Diagrama de flujo - modelo predictivo.</i>	111
Figura 3.12. <i>Ubicación de taladro prueba y puntos de monitoreo.</i>	113
Figura 3.13. <i>Análisis de perfil crítico – Taladro prueba.</i>	114
Figura 3.14. <i>Análisis de proyección – Taladro prueba.</i>	114
Figura 3.15. <i>Captura de ondas sísmicas – Taladro prueba.</i>	115
Figura 3.16. <i>Mapa de iso-vibraciones – Taladro prueba.</i>	116
Figura 3.17. <i>Proyección y desplazamiento – Taladro prueba.</i>	117
Figura 3.18. <i>Análisis de Ley de atenuación I-Blast – zona Plinto (50% de confiabilidad)</i>	118
Figura 3.19. <i>Análisis Estadístico Excel– zona Plinto.</i>	120
Figura 3.20. <i>Análisis de ley de atenuación I-Blast – zona Plinto (80% de confiabilidad)</i>	121
Figura 3.21. <i>Ubicación de voladura y puntos de monitoreo.</i>	122
Figura 3.22. <i>Predicción sísmica para voladura.</i>	123
Figura 3.23. <i>Mapa de iso-vibraciones – Voladura completa.</i>	124
Figura 3.24. <i>Diseños de carga – voladura.</i>	125
Figura 3.25. <i>Diseños de amarre – voladura.</i>	126
Figura 3.26. <i>Análisis de superposición de retardos – voladura.</i>	126
Figura 3.27. <i>Registro sísmico medido vs simulado.</i>	127
Figura 4.1. <i>Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Plinto (voladuras completas)</i>	131
Figura 4.2. <i>Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Túnel (voladuras completas)</i>	132
Figura 4.3. <i>Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Plataforma bombas (voladuras completas)</i>	133
Figura 4.4. <i>Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Zona Plinto.</i>	135
Figura 4.5. <i>Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Zona Túnel.</i>	136
Figura 4.6. <i>Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Plataforma de bombas.</i>	137

Figura 4.7. <i>Morfología de la zona.</i>	141
Figura 4.8. <i>Geología estructural de la zona.</i>	141

RESUMEN

La aplicación de técnicas de perforación y voladura en las diversas etapas de vida operacional de una mina, no solo resulta beneficiosa productiva y económicamente sino son también fuentes generadoras de aspectos negativos si no son realizadas de manera adecuada, tales como afectaciones sociales, ambientales y operacionales. Durante el proceso de detonación de un explosivo se produce una liberación de energía que no necesariamente está destinada en su totalidad a la fragmentación del material, de esta energía liberada un porcentaje se transforma en ondas vibratoriales que se transmiten en diferentes direcciones.

En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo generar modelos matemáticos de predicción sísmica en campo lejano, que nos permitan estimar magnitudes de vibración como resultado de las voladuras con explosivo. Para ello propone utilizar el Modelo de Devine de la distancia escalada, donde emplearemos para su aplicación parámetros como distancia (voladura-punto de monitoreo) y carga operante (kg de explosivo por tiempo de retardo) que nos den como resultado leyes de atenuación del terreno.

Como resultado del estudio se obtuvieron modelos matemáticos de predicción sísmica obtenido a partir de ondas elementales y voladuras completas que nos permitieron estimar su nivel de precisión para cada uno de los casos, durante la realización de la predicción sísmica. Finalmente se determinó que ecuaciones de predicción sísmica determinadas con leyes de atenuación (k y α) obtenidas de voladuras completas nos dan resultados de predicción con mejor nivel de confianza, esto considerando una misma zona de estudio.

ABSTRACT

The application of drilling and blasting techniques in the various stages of the operational life of a mine is not only beneficial productively and economically, but is also a source of negative aspects if they are not carried out correctly, such as social, environmental and operational effects. During the detonation process of an explosive there is a release of energy that is not necessarily destined in its entirety to the fragmentation of the material, a percentage of this released energy is transformed into vibrational waves that are transmitted in different directions.

In this sense, the present research aims to generate mathematical models for far-field seismic prediction, which allow us to estimate vibration magnitudes as a result of explosive blasting. To do this, he proposes to use Devine's model of the scaled distance, where we will use parameters such as distance (blasting-monitoring point) and operating load (kg of explosive per delay time) that give us ground attenuation laws as a result.

As a result of the study, mathematical models for seismic prediction were obtained from elementary waves and complete blasts that allowed us to estimate their level of precision for each of the cases, during the seismic prediction. Finally, it was determined that seismic prediction equations determined with attenuation laws (k y α) obtained from complete blasts give us prediction results with a better level of confidence, this considering the same study area.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los trabajos de movimiento de tierra para los procesos constructivos; cada vez es más frecuente ver el empleo de técnicas de perforación y voladura para la excavación en roca por su efectividad a bajo costo, pero también son fuentes generadoras de vibración en el medio circundante, teniendo efectos negativos sobre todo tipo de estructuras, que de no ser controladas podrían acarrear daños, colapsos y/o reprocesos constructivos. En la Mina Quellaveco actualmente se encuentra en proceso de construcción, dentro de ello la empresa JJC Contratistas Generales SA tiene a su cargo la ejecución del proyecto “Construcción de Obras a Pie de Botadero – Área 2000” que abarca la construcción de un dique de CCR.

Desde inicio de la década de los 90 la minería ingreso a una fase de expansión de manera gradual y significativa, esto genero una tendencia de interacción mundial de comunidad – minería, por lo que empezaron a generarse problemas sociales a causa de los efectos de la voladura (onda aérea y vibraciones). A la fecha se han escrito artículos y presentado diferentes trabajos de investigación relacionados al estudio de vibraciones determinándose aspectos que se encuentren involucrados directa o indirectamente en la generación de estas precepciones negativas. Todos sin ninguna duda tienen como objetivo principal controlar los niveles de vibración y que estas no excedan de los límites previamente determinados para reducir el daño a ciertas estructuras y/o evitar generar malestar a poblaciones cercanas a las operaciones mineras.

Para poder inferir vibraciones generadas producto de las voladuras, resulta de suma importancia contar con herramientas y comprensibles metodologías que nos permitan generar un modelo predictivo de vibraciones. Por ello se planteó aplicar la

metodología de vibraciones en campo lejano, el cual sería desarrollado a partir de registros de vibraciones generadas por un taladro de prueba o firma, con la data obtenida de los monitoreos generaremos un análisis de ley de atenuación que no dará como resultado una primera ecuación de predicción sísmica para la liberación de voladuras masivas, posteriormente serán validadas con la realización de voladuras masivas. Para la ejecución de taladros de prueba se realizó el mapeo geológico, profundidad de perforación, tipo de explosivo con la finalidad que estas mantengan las mismas condiciones que las zonas donde se harán las voladuras masivas.

Finalmente, para nuestro caso el estudio comprende el cuidado de estructuras de concreto construidas y futuras a construir paralelamente con los trabajos de perforación y voladura, siendo importante la determinación de ecuaciones de predicción sísmica que nos permitan tener valores de predicción sísmica más acertados a los obtenidos post voladura en cada una de las estructuras monitoreadas y que estas no sobrepasen los límites previamente determinados.

Palabras Clave: Modelamiento, vibraciones, distancia escalar, velocidad pico partícula, constantes del terreno.

Key Words: Modeling, vibrations, scalar distance, particle peak velocity, terrain constants.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes Bibliográficos

DE COSPETAL JESUS (2019) en su tesis “Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental” presentada para obtener el grado de Doctor en la Universidad Politécnica de Cartagena se establece que los efectos de los explosivos en la roca ornamental no han sido tratados de forma específica, a pesar del interés que en la actualidad este método de arranque. Las vibraciones provocadas por las voladuras en excavaciones mineras o civiles se estudian fundamentalmente para conocer la posibilidad de que las estructuras cercanas a los frentes se vean dañadas por las ondas que provocan movimiento, el objetivo es encontrar las máximas cargas que pueden ser utilizadas sin riesgo; la metodología utilizada abarcará la necesidad de realizar registros de campo,

ensayos mecánicos de laboratorio y prospección de las ondas sísmicas que integrara datos y variables que nos darán como resultados que las distancias de daño pronosticadas en un primer estudio en el año 2016 pueden reducirse ahora; de manera concluyente se determina que, mediante el estudio de las vibraciones, la utilización de ensayos mecánicos y la medida de la propagación sísmica de la roca podemos establecer, con garantías, a que distancia la roca ornamental no será dañada por los explosivos.

MOREIRA JOSE (2016) en su dissertação “Metodología para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos” presentada para obtener el grado de Maestro en ingeniería de minas y geo-ambiente en la Universidade do Porto nos establece la imperiosa necesidad de mejorar el control y mitigación de las limitaciones ambientales y sociales asociados a la extracción y transformación de materias primas es cada vez más una demanda impuesta por entidades legales que buscan fiscalizar su cumplimiento; el objetivo es presentar una mejor estimación de la magnitud de las vibraciones resultante de la voladura con explosivos, considerando dentro de su metodología considerar la incorporación de heterogeneidades causadas por parámetros no controlados como los geológicos y geotécnicos en el estudio del comportamiento de las vibraciones, para ello la aplicación de un modelo predictivo de vibración propone como resultado un enfoque más fiable y fidedigno de la propagación del fenómeno vibratorio que minimizaran los errores. Esto permite concluir que estos modelos aplicados generan un valor agregado ya que pueden representar ganancias significativas por la optimización de recursos internos para mejores soluciones en voladura.

VASQUEZ NED (2013) en su tesis “Predicción de la ley de atenuación, frecuencia dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a cielo abierto” presentada para obtener el título de ingeniero de minas en la Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Minas (ETSM) se establece que el fenómeno vibratorio tiene dos parámetros fundamentales, la velocidad pico partícula

(VPP) y la frecuencia dominante, los cuales caracterizan cuan dañino puede ser este frente a su influencia sobre estructuras civiles, por ello se pretende caracterizarlas y fundamentalmente predecirlas, lo que permitirá su debido control. El objetivo es caracterizar el comportamiento del terreno mediante la estimación de la ley de atenuación y encontrar relaciones útiles entre las tres variables manejadas (velocidad pico partícula, distancia y carga máxima instantánea) usadas para voladuras posteriores. La metodología abarca en una primera parte describir el comportamiento del terreno mediante la estimación de la ley de atenuación de la velocidad pico partícula a través del uso de la regresión lineal por mínimos cuadrados y el segundo detalla el proceso validable para la predicción de la frecuencia dominante. Los resultados a obtener son ley de atenuación del terreno para distintos grados de fiabilidad, herramientas de diseño de voladuras basados en la relación carga-distancia; permitiendo concluir que a partir de los resultados obtenidos se tendrá información útil para su uso en el diseño y control de voladuras posteriores del proyecto.

CORNEJO PAUL/HUAMAN ANDRE (2020) en su tesis “Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre” presentada para obtener el grado de ingeniero de minas en la Pontificia Universidad Católica del Perú se establece que el uso de explosivos en procesos de voladura en minas libera energía en forma de vibraciones, que no necesariamente ayudan a la fragmentación de roca, sino que originan una perturbación de estructuras cercanas a la fuente de la explosión, principalmente a través de ondas sísmicas en todas las direcciones, la presente investigación tiene por objeto desarrollar un modelo de predicción de las vibraciones inducida utilizando datos históricos de monitoreo en una mina a cielo abierto con el fin de proteger los taludes de diseño final (campo medio) y edificaciones sensibles de los poblados más cercanos (campo lejano); la metodología utilizada está basada en la teoría de Devine de la distancia escalada de raíz cuadrada (SRSD) para predecir la velocidad máxima de partículas (VPP), las distancias de

monitoreo en campo medio oscilaran entre 30 y 150 metros, las estructuras en este intervalo serán atendidas por los criterios de falla de Cameron Mckenzie, para campos lejanos se tienen distancias desde los 150 hasta 1000 metros, por lo que se opta utilizar la norma Alemana DIN 4150 para un valor límite de 3 mm/s para frecuencias bajas en estructuras muy sensibles; de los análisis realizados obtendremos como resultados modelos predictivos en vibraciones en campo lejano y campo medio. En conclusión, con la recopilación y análisis de data de los monitoreos de vibración es posible construir un modelo predictivo de vibraciones que refleje la realidad de los disparos para una determinada operación minera con un índice de confiabilidad (r^2) aceptable que nos permita controlar algún tipo de daño que se pudiese generar durante la ejecución de voladuras futuras.

CHOQUE EDGAR (2019) en su tesis “Modelamiento de vibraciones y determinación del burden optimo en U. E. C. Mallay – Cia. de minas Buenaventura - 2019” presentada para obtener el grado de Maestro en la Universidad Nacional del Centro del Perú establece que la inestabilidad de las labores subterráneas inducidas por un mal diseño de las mallas y el exceso de las cargas explosivas con el fin de asegurar la producción ponen en riesgo la seguridad de los equipos ubicados en los bancos de producción por lo que resulta necesario evaluar una metodología de control, cuyo objetivo radica en la importancia de determinar cómo influye el modelamiento de vibraciones para determinar un burden óptimo que no genere daños a las estructuras circundantes; la metodología consistirá en la aplicación de modelos matemáticos de Pearson y Holmberg para el análisis de vibraciones en campo cercano, y el modelo de Devine para el análisis de vibraciones en campo lejano; que nos darán como resultado modelos predictivos de vibración que permitan ajustar el burden, espaciamiento y carga operante por retardo. En conclusión, el burden optimizado con el modelamiento de vibraciones genero mejores rendimientos de los explosivos con niveles de vibración bajos que aseguran un mínimo de daño sobre las estructuras adyacentes a la zona de voladura.

ANICAMA ALBERTO (2010) en su tesis “Monitoreo de los efectos de las vibraciones producidas por la voladura de rocas El modelo de vibración Colque” presentada para obtener el grado de Maestro en la Universidad Nacional de Ingeniería se establece que las vibraciones generadas por las voladuras no solo generan daños estructurales, ambientales sino que pueden ocasionar también daños a la salud (sistema nervios y auditivo), y demás; para realizar la prevención y control de estas vibraciones existe un método muy usado que es establecer la ley de propagación de la velocidad de partículas (VPP) teniendo en cuenta el tipo de macizo rocoso, la carga explosiva y la distancia, el objetivo es estimar uno de los modelos presentados por varios investigadores relacionados con la VVP como el postulado por Devine; la metodología utilizada se basa en aplicar el postulado en una unidad minera para posteriormente generar su propio modelo predictivo de vibración denominado “colque”, esto dará como resultado voladuras con vibraciones más controladas que nos permitan reducir impactos negativos. Se concluye que la aplicación del modelo de colque estima mejor la VPP que el modelo de Devine, con un error de 17.24% a 21.32% respectivamente, estos errores pueden ser generadas por la baja correlación que hay entre las variables independientes (distancia y carga).

1.2. Descripción de la Realidad Problemática

A nivel mundial las vibraciones generadas como efecto de las voladuras es uno de los aspectos más perceptibles dentro de las operaciones de una mina, cantera y obra de construcción, que consideran dentro de su proceso el uso de explosivos. Actualmente no solo se investiga su impacto en la integridad del macizo rocoso o estructura cercana, sino también ya se le atribuye cada vez más un impacto social por la cercanía de las operaciones a zonas rurales y urbanas, que obligan a las empresas a regirse a normas internacionales y que éstas sean legisladas para dar cumplimiento a los límites establecidos como parte del control de posibles efectos negativos.

Como en muchos fenómenos ondulatorios, la velocidad de las partículas es la variable que mejor correlación ha mostrado con los fenómenos de daño que se presentan en las obras civiles. Las vibraciones debidas a voladuras no son la excepción y por ello es el parámetro más importante a relacionar con las características de las voladuras mismas; véanse por ejemplo las normas DIN 4150 (1999), AS 2187 (1993) y BS 7385-2 (1993). (Valencia et al., 2007, p.161)

Pampacata (2015, como se citó en Cornejo y Huamán, 2020) indico que, en el Perú, se realizaron estudios para limitar las cargas operantes en minas superficiales emblemáticas como Yanacocha (Cruzado & Díaz, 2017), mina que se rige bajo la Normativa Alemana DIN 4150 en lugar de la desfasada Norma Peruana (MINEM, 1995). Asimismo, Giraldo (2010) planteó un estudio del daño causado por vibraciones sobre estructuras sensibles de poblaciones aledañas a una mina superficial, basándose en la Norma RI 8507 de la United States Bureau of Mines (USBM), organización que lidera el campo investigación de vibraciones inducidas por voladuras. Y más recientemente se realiza una investigación práctica de la influencia que tienen los disparos llevados en una cantera sobre estructuras urbanas dentro de Lima, planteando frecuencias de monitoreo y lugares estratégicos para las mediciones.

Actualmente la empresa Anglo American SA., viene desarrollando la etapa constructiva del proyecto minero Quellaveco (cobre y molibdeno). La mina de tajo abierto está ubicada a 3500 msnm en el valle Quellaveco, distrito de Torata provincia de Mariscal Nieto, en el departamento de Moquegua. La operación de botadero de la mina considera ejecutar una serie de obras al pie del botadero, cuyo propósito es manejar la descarga de aguas contactadas durante la etapa de construcción y operación; como parte del cumplimiento de compromisos ambientales.

JJC Contratista Generales S.A. viene ejecutando las obras al pie del botadero; que consta de una estructura de contención (Dique de Control), dicha obra constituye trabajos de movimiento de tierras, inyección de concreto y construcción de estructuras de concreto. Dentro del proceso constructivo se identificó presencia de roca sólida en la zona donde se ubicara los cimientos del proyecto y cercano a ello se encuentran estructuras ya construidas y otras a construirse paralelamente; razón por la cual se contactó a la Empresa Especializada DNA Blast para la ejecución de diseños optimizados de voladura que permitieran arrancar dichas rocas de manera que durante el proceso, la vibración producida se encuentre dentro de los niveles máximos permitidos, evitando cualquier efecto negativo que genere daño en estructuras eventualmente cercanas.

1.3. Formulación del Problema

El proyecto Contact Water Dam comprende la ejecución de obras al pie del botadero de la mina para controlar el aporte de agua contactada al río Asana, tanto de escorrentía superficial como de agua sub superficial infiltrada a través y bajo el botadero localizado en el cauce del río Asana. Estas obras al pie del botadero constan de un dique de control de CCR, una poza de aguas eventuales, pozos de monitoreo, cámara de filtraciones y un sistema de impulsión y conducción de aguas contactadas.

Dentro de su proceso constructivo se identificó la presencia de roca fija que requerirá ser removido para poder llegar a los límites finales del proyecto, por ello se solicitó el asesoramiento de la empresa especializada DNA Blast para la implementación de estrategias en ejecución de diseños de perforación y voladura, control de vibraciones y optimización de voladuras para evitar cualquier impacto adverso dentro del proceso.

La aplicación de perforación y voladura no acarrearía mayor riesgo de no ser que la zona donde se realizaran dichos trabajos, están cercanos a estructuras

construidas (túnel portal salida) y estructuras de concreto futuras (plataforma de bombeo, dados de concreto, impermeabilización con concreto, entre otros), los cuales podrían presentar daños por efectos adversos generada por la vibración, por ello la empresa Stantec en su documento MQ13-58-TE-2040-CE0008 – 2019 “Especificaciones Técnicas de Voladuras Controladas en excavaciones” nos establece mediante estudios de laboratorios los límites de vibración correlacionadas específicamente para cada una de ellas.

Tabla 1.1. Límites de vibración por estructuras.

Zona / Estructura	Madurez del Concreto	Velocidad Pico Partícula (PPV)
Túnel		≤ 150 mm/s
Concreto	6 - 24 horas	≤ 5 mm/s
Concreto	24 - 48 horas	≤ 15 mm/s
Concreto	48 - 72 horas	≤ 25 mm/s
Concreto	> 72 horas	≤ 50 mm/s

Fuente: Extraído de estudio MQ13-58-TE-2040-CE0008 “Especificaciones Técnicas de Voladura Controlada en Excavaciones – Stantec, 2019”.

1.3.1. Problema General

¿En qué medida la aplicación del modelo predictivo de vibraciones en campo lejano infiere las vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿En qué medida la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano determina los valores de las constantes k y Alpha para monitoreos en estructuras de concreto?

- ¿En qué medida la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano determina la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?
- ¿En qué medida la aplicación de un modelo predictivo de vibraciones en campo lejano determina la predicción sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?

1.4. Justificación e Importancia de la Investigación

1.4.1. Justificación Teórica

El presente trabajo de investigación justifica la necesidad de realizar un modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para inferir y controlar vibraciones para voladuras masivas que se ejecuten cerca de estructuras de concreto y que estas no se vean afectadas por excesivos valores en los registros, que superen los límites previamente determinados.

1.4.2. Justificación Práctica

El resultado de la investigación servirá para que las voladuras futuras que se realicen cerca de la zona del proyecto, puedan utilizar el modelo predictivo determinado para poder predecir posibles registros de valores de vibración generadas por la voladura.

1.4.3. Justificación Personal

La presente investigación tiene una justificación personal, porque a través de ella tendré la oportunidad de lograr el grado académico de maestro en Gestión Minera.

1.5. Objetivos:

1.5.1. *Objetivos General*

Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para inferir vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.

1.5.2. *Objetivos Específicos*

- Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar valores de las constantes K y Alpha para monitoreos en estructuras de concreto.
- Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.
- Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar la predicción sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.

1.6. Hipótesis

1.6.1. *Hipótesis General*

Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá inferir vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.

1.6.2. *Hipótesis Específicas*

- Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar los valores de las constantes K y Alpha para monitoreos en estructuras de concreto.
- Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.

- Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar la predicción sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.

1.7. Variables e Indicadores

1.7.1. Variable Dependiente

Y: Vibraciones en Voladuras Masivas

Y1: Valores de k y Alpha

Y2: Carga óptima por retardo

Y3: Predicción de vibración

1.7.2. Variable Independiente

X: Modelo Predictivo de Vibraciones en Campo Lejano

X1: Velocidad pico partícula

X2: Distancia del sismógrafo por voladura

X3: Carga por retardo (carga operante)

1.7.3. Indicadores

X1: VPP (mm / s)

X2: Distancia escalada (m)

X3: Kilogramos de explosivo (kg)

Y1: Constantes numéricas

Y2: Kilogramos de explosivo (kg)

Y3: VPP (mm/s)

1.8. Periodo de Análisis

El periodo de elaboración de la presente investigación se realizará desde el mes de septiembre del 2020 al mes de diciembre 2021.

ACTIVIDADES	2020				2021												
	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agost.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	
Recopilación de información del proyecto	■																
Capacitación del personal para toma de datos		■															
Análisis de información preliminar			■														
Recopilación de datos de monitoreo			■	■													
Análisis e interpretación de datos software I-Blast				■	■	■	■	■	■								
Ejecución de voladuras y discusión de resultados					■	■	■	■	■								
Elaboración y presentación del plan de tesis									■	■	■	■	■	■			
Elaboración de la tesis preliminar											■	■	■	■	■		
Revisión y crítica															■		
Elaboración de la tesis final																■	
Presentación de la tesis																	■
Sustentación																	■

Figura 1.1. Periodo de ejecución para la elaboración de la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

Los trabajos de movimiento de tierras necesarios para la ejecución de obras de construcción o minería, abarcan actividades de remoción de material suelto hasta roca fija; cuando es material y/o roca suelta solo será necesario el uso de maquinaria pesada (tractor, excavadora) para su remoción, cuando nos encontremos frente a roca fija si se requerirá el uso de procesos de perforación y voladura para su fracturamiento y/o desplazamiento, con el fin de optimizar dichos procesos se han desarrollado diversas tecnologías para el cumplimiento de los objetivos, centrándose en estudiar y analizar variables que interfieran directamente en su correcto desarrollo.

Los criterios para un desarrollo óptimo en trabajos de perforación y voladura están sujetos a variables controlables (geometría de la malla de perforación, explosivos y accesorios) y no controlables (macizo rocoso), este último solo es posible caracterizar para tener en cuenta sus propiedades que puedan inferir en la fragmentación y vibración obtenida.

2.1. Entorno Geomecánico/Geotécnico del Macizo Rocoso

Para la ejecución del Proyecto Contac Water DAM se partió inicialmente de un estudio detallado de la zona; que involucró campañas de reconocimiento geotécnico con actividades de campo, logeo geomecánico de los sondajes, pruebas geofísicas de refracción sísmica y pruebas de permeabilidad. Los datos obtenidos del levantamiento geomecánico correlacionados con la geología local de la zona donde se ubicará el proyecto nos proporcionaron parámetros que serán empleados para nuestros cálculos y/o análisis con el software I-Blast; los valores obtenidos como la resistencia a la compresión simple, a la tracción, tenacidad obtenidos para las diferentes litologías, así como su clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) y Rock Quality Designation (RQD).

2.1.1. Características Geomecánicas del Macizo Rocoso

Para la realización de los estudios geomecánicos SMI (Supervisión de Angloamerica) contrató a KP-GP para la ejecución de las investigaciones geotécnicas del Proyecto en el sitio del dique de control y en las canteras. Asimismo, KP (por medio de la subcontratista ZER Geosystem Perú S.A.C.) realizó pruebas geofísicas consistentes en refracción sísmica y MASW en el sector del dique y entregó el informe con los resultados en junio del 2019.

A continuación, resumimos las investigaciones geotécnicas realizadas a la ingeniería de detalle del proyecto Obras al Pie del Botadero.

2.2.1.1. Perforaciones Diamantinas. KP-GP ejecutó 313.2 m de perforación diamantina con sistema wireline, en diámetro HQ y muestreo continuo, empleando dos equipos (una Diamec modelo 282 y una Versadril), distribuidos en 10 sondajes de los cuales seis se ubican en el área del sitio del dique, dos en la cantera Truck Shop y dos en la cantera Bajo Río Asana (véase la tabla 2.1).

El objetivo de las perforaciones fue evaluar la naturaleza y características de ingeniería de las unidades de suelo y roca de las áreas de estudio, observar las condiciones de la roca en profundidad, conocer los diferentes estratos, identificar la profundidad de la roca competente, realizar ensayos in situ de permeabilidad y obtener muestras perturbadas y no perturbadas para ensayos de laboratorio.

Tabla 2.1. Perforaciones diamantinas ejecutadas.

Ubicación	Item.	Código de Perforación	Inclinación (°)	Azimut (°)	Profundidad Total (m)
Eje de Presa	1	P-06	(+)20	N135	30.00
	2	P-07	-70	N155	30.00
	3	P-08	-60	N335	40.00
	4	P-09	-90	Vertical	50.00
	5	P-10	-75	N155	30.00
	6	P-11	-60	N335	40.00
Cantera Truck Shop	1	PT-01	-60	N180	30.10
	2	PT-02	-90	Vertical	30.10
Cantera Bajo Río Azana	3	PT-03	-45	N270	30.00
	4	PT-04	-60	N195	30.00

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

En los planos del Anexo N°2, se muestra la ubicación de las perforaciones diamantinas en cada una de las áreas de estudio. Asimismo, en el Anexo N°3 presentamos la caracterización geomecánica de la zona en cada una de las perforaciones ejecutadas para el proyecto y el Anexo N°4, se presenta un resume las características de las perforaciones y la cantidad de pruebas ejecutadas.

2.1.1.2. Niveles de Agua. KP-GP En los sondajes diamantinos (con excepción del P06) ejecutados en el sitio del dique de control, hallamos un nivel de agua subterráneo comprendido entre los 3.0 metros y los 19.0 metros de longitud respecto al nivel de superficie de terreno. Véase el Anexo N°4, donde se resume las características de las perforaciones.

2.1.1.3. Pruebas Geofísicas. En el programa de investigaciones geotécnicas se propusieron pruebas de registro sísmico de pozos down hole, con el fin de conocer las propiedades elásticas y en suelo y roca. Los ensayos del down hole no fueron ejecutados por K.P., dado que el equipo de medición de ondas no pudo ingresar por una tubería de 25.0 mm de diámetro, que se insertó en los sondajes para las pruebas; en su lugar se realizaron las pruebas de refracción sísmica y MASW 1D. El Anexo N°1 se adjunta las ubicaciones donde se ejecutaron las pruebas geofísicas y los estudios geofísico de refracción sísmica y MASW realizado por KP. A continuación, brindamos una breve descripción de cada tipo de prueba:

Refracción Sísmica. Este método mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurridas desde un sitio donde se han generado estas ondas sísmicas, y la llegada de éstas a un sensor ubicado en un diferente punto de observación. Las pruebas de refracción sísmica y MASW fueron realizadas empleando un sismógrafo modelo GEODE de 24 canales, 24 geófonos de 4.5 Hz y 10.0 Hz, laptop para registro de datos, cables geofísicos, comba para generación de onda sísmica y una placa metálica de recepción de golpe.

Pruebas MASW – 1D. La técnica MASW proporciona las velocidades promedio de las ondas de corte (V_s), Con los valores de onda es posible calcular el coeficiente de Poisson dinámico, el módulo de elasticidad dinámico, el módulo de corte dinámico y el

módulo volumétrico dinámico de los macizos rocosos. Se realizaron dos pruebas MASW 1D en el sitio del dique.

Ensayo Microtremor. El período de vibración del suelo es un parámetro dinámico que define el comportamiento del suelo durante un evento sísmico o terremoto. En la actualidad, este parámetro es normalmente obtenido de las mediciones puntuales de microtremores. Y representaba adecuadamente el comportamiento dinámico del suelo.

Para realizar los ensayos de sondajes de microtremores (MT), se define el punto de análisis del ensayo, luego se procede a instalar el velocímetro y a configurar los parámetros de adquisición, para proseguir con la adquisición de ruido sísmico durante un tiempo determinado.

2.1.1.4. Ensayos de Laboratorio. La selección y el transporte de muestras en terreno hacia los laboratorios especializados fueron realizados por Stantec. Los ensayos en muestras de rocas se realizaron en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), ubicado en la ciudad de Lima. A continuación, mencionamos los ensayos de laboratorio ejecutados:

Ensayos en Muestras de Rocas. La caracterización de rocas de fundación del sitio del dique y las canteras comprende la identificación del tipo de roca, la determinación de las propiedades físicas y resistencia mecánica de la roca a fin de definir propiedades de ingeniería.

A continuación, se listan los ensayos realizados:

- ✓ Propiedades físicas (ASTM C97-02);
- ✓ Compresión uniaxial (ASTM D238);
- ✓ Compresión triaxial (ASTM 2664-95);

- ✓ Constantes elásticas (ASTM D7012):
- ✓ Corte directo (ASTM D5607-09).

Cada una de estas pruebas realizadas, fueron certificados por el Laboratorio de Mecánica de Rocas (FIGMM – UNI).

2.1.2. Caracterización Geotécnica.

Se definieron dos unidades geomecánicas, denominadas UG-I y UG-II con base en la geología y las perforaciones diamantinas en el registro geomecánicos de las perforaciones. Las propiedades del macizo rocoso tales como: el RQD, el Rock Mass Rating (RMR), la densidad de las fracturas, la permeabilidad y la litología elaborados para cada uno de los sondajes diamantinos. Esta información fue empleada para la caracterización geotécnica y geomecánica que se desarrolla en adelante.

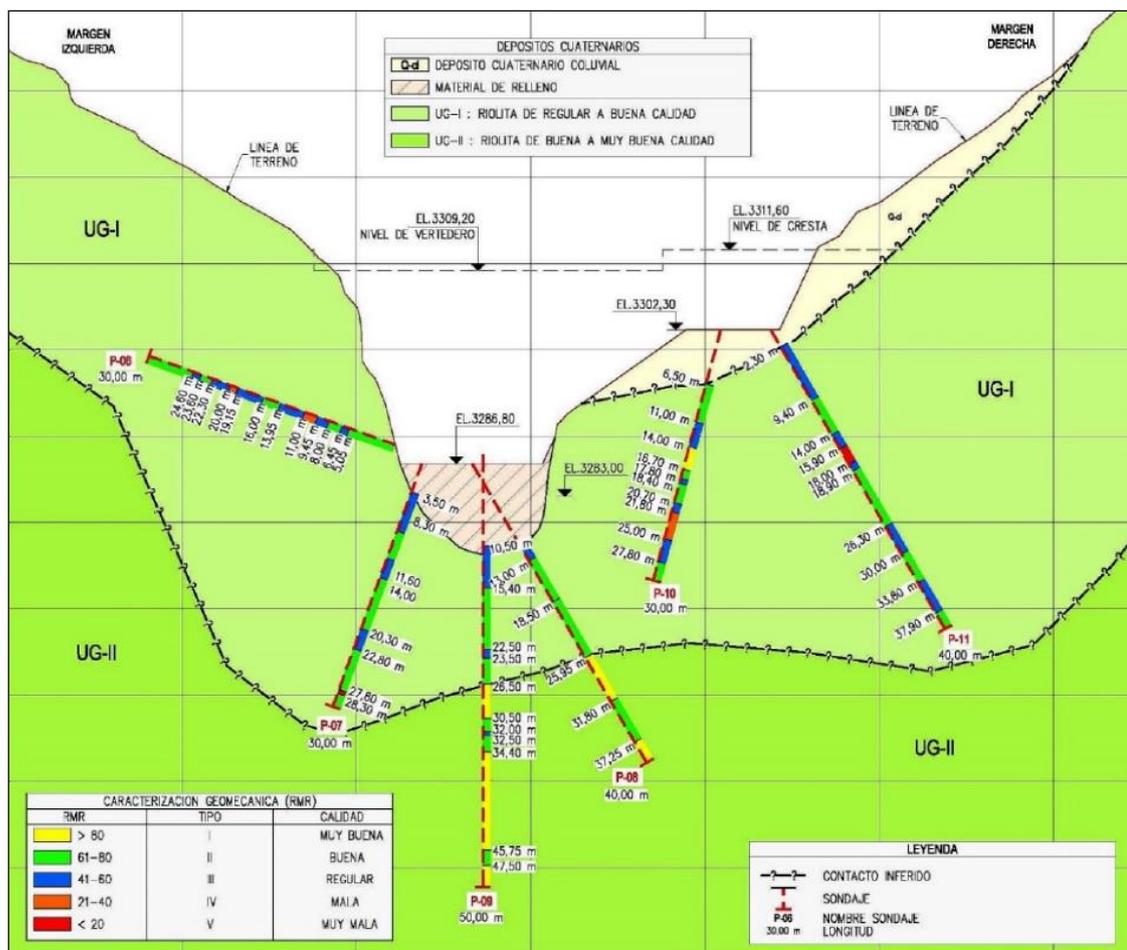


Figura 2.1. Materiales definidos en la sección del eje del dique de control.

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero, 2019”.

En la figura 2.1, se muestran los diferentes materiales observados en un perfil esquemático del dique de control. A continuación, se realiza la caracterización geotécnica de cada uno de estos materiales.

2.1.2.1. Definición y Descripción de Materiales. Stantec identificó, con los trabajos de mapeo geológico de campo, un afloramiento rocoso de litología riolita. Este basamento rocoso aflora desde el cauce del río y cubre el estribo izquierdo y parcialmente el estribo derecho del dique de control proyectado. Dicho afloramiento está conformado por roca volcánica de composición riolítica de la formación Samanaque de

la serie alta, que pertenece al horizonte (Ksp-sa/ar), de textura fina a granular, coloración rosácea, que presenta bancos de substratos, masivo y compacto, con buzamiento hacia aguas abajo y con inclinaciones que varían entre 12 grados y 20 grados. También se identificaron depósitos cuaternarios en el estribo derecho de tipo depósitos coluviales (Q-cl1),

Unidad Geomecánica UG-I. Roca riolita, según la información de los registros geomecánicos de los sondajes diamantinos se constituye principalmente, de un macizo rocoso de regular a buena calidad con un RMR comprendido entre 50 a 70, según la clasificación geomecánica RMR de Bienawasky 1989. La roca riolita tiene un peso específico que varía entre 25.6 KN/m³ y 26 KN/m³ y una resistencia a la compresión simple superior a 100 MPa con base en los ensayos de laboratorio en muestras de roca intacta realizadas por Stantec. Es un material de 15.0 m de espesor, en el cauce ubicado en el eje del sitio del dique, con base en los espesores hallados en las perforaciones.

Unidad Geomecánica UG-II. De forma similar a la UG-I, es de roca tipo riolita, según la información de los registros geomecánicos de los sondajes diamantinos, se constituye principalmente de un macizo rocoso de buena a muy buena calidad con un RMR comprendido entre 70 a 90 según la clasificación geomecánica RMR de Bienawasky 1989. La roca riolita tiene un peso específico entre 25.6 KN/m³ y 26 KN/m³ y una resistencia a la compresión simple superior a 100 MPa, con base en los ensayos de laboratorio en muestras de roca intacta realizadas por Stantec.

2.1.2.2. Propiedades de la Roca.

Ensayos de Laboratorio en Muestras de Roca Intacta. A continuación, resumimos los resultados de laboratorio representativos para la roca. Los ensayos se realizaron en muestras de testigos diamantinos, obtenidos de las perforaciones. La

Tabla 2.2 muestra el promedio y un rango de valores de densidad, resistencia a la compresión no confinada (UCS), la constante (mi) de Hoek a Brown, el módulo de Poisson y el módulo de elasticidad (E).

La figura 2.2, presenta la distribución de resultados de resistencia a la compresión uniaxial en roca intacta en rangos, establecidos por la sociedad internacional de mecánica de rocas "ISRM" por sus siglas en inglés. En general la roca con resistencia muy fuerte.

Tabla 2.2. Resumen de propiedades índices y de resistencia de la roca intacta.

Número	Propiedad	Unidad	Rango	Promedio	Considerado
1	Peso específico	KN/m ³	25 -26	25.8	25.8
2	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	Mpa	90 - 320	227	107
3	Constante "mi"	-	10 - 42	32	12.6
4	Módulo de Poisson	-	0.24 - 0.26	0.25	0.25
5	Módulo de Elasticidad (E)	Gpa	15 - 30	25	16.8

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB "Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero, 2019".

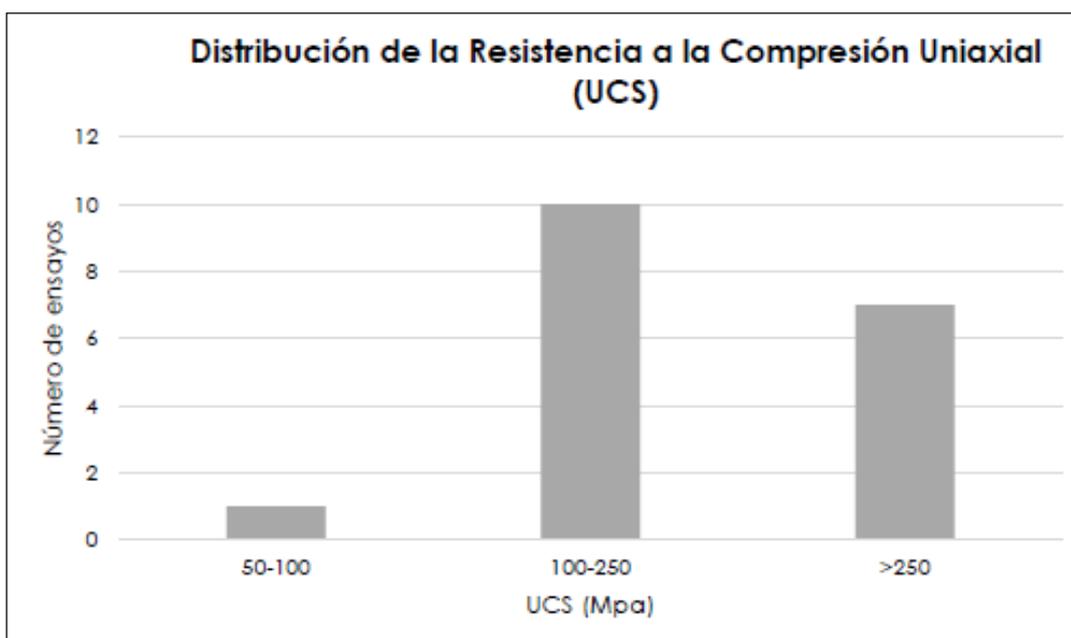


Figura 2.2. Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial UCS de la Riolita.

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

2.1.2.3. Parámetros del Macizo Rocoso. El índice de resistencia geológica de Hoek y los criterios de Hoek and Brown fueron utilizados para calcular la resistencia del macizo rocoso y propiedades de deformación de la riolita, para la fundación del dique de control.

Estos cálculos se basan en lo siguiente:

- ✓ El RMR89 de Bieniaswky fue calculado en base a las perforaciones diamantinas ejecutadas por KP-GP.
- ✓ En concordancia con Hoek 1993, el valor de GSI fue calculado de la siguiente forma: $GSI=RMR89-5$. Los rangos y valores de GSI asumidos para las unidades geotécnicas se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de GSI del macizo rocoso.

Unidad geomecánica del macizo rocoso		Geological Strength Index, GSI	
Unidad	Descripción	Rango	Valor considerado
UG - I	Riolita de regular a buena calidad	45 - 65	56
UG - II	Riolita de buena a muy buena calidad	65 - 85	72

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

La distribución de las unidades geomecánicas en la fundación del dique de control se muestran en la Figura 2.1.

- ✓ Los valores promedio se calcularon para grandes zonas de roca relativamente uniformes en cada uno de los sondajes. El macizo rocoso debajo del dique de control proyectado fue subdividido en zonas de propiedades generalmente uniformes. Estas zonas están designadas como UG-I y UG-II y se describen en la Figura 2.1.
- ✓ Los parámetros de Hoek and Brown, del macizo rocoso se determinaron empleando el programa Rocscience.
- ✓ La tabla 2.4 resume los parámetros de Hoek and Brown del macizo rocoso de la fundación del dique de control, determinados con el programa Roclab de Rocscience.

Los criterios de mecánica de rocas usados como input fueron los siguientes:

- ✓ Resistencia a la compresión simple no confinada (UCS) de 107 Mpa (asumido como un valor representativo de la riolita; $m_i = 12.6$);
- ✓ Módulo de elasticidad de la roca intacta de 16.8 Gpa;
- ✓ GSI que varía de 55 a 65 para UG-I y de 65 a 85 para UG-II respectivamente.
- ✓ Factor de disturbancia de $D = 0.0$, dado que se tiene previsto realizar las excavaciones con equipo mecánico, voladura controlada en sectores requeridos y la fundación contará con un tratamiento con inyecciones de consolidación.

Tabla 2.4. Parámetros de Hoek and Brown del macizo rocoso.

Parámetros	Unidad geomecánica del macizo rocoso	
	UG - I	UG - II
Clasificación de Hoek Brown		
GSI	56	72
Factor de disturbancia, D	0	0
Criterio de Hoek Brown		
mb	2.6	4.6
s	0.0075	0.0446
a	0.504	0.501
Parámetros de Mohr-Coulomb (aproximado)		
c (Mpa)	1	3.4
ϕ (°)	61	67
Parámetros del macizo		
Módulo de elasticidad E_m (Gpa)	7.2	17.2

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

2.1.2.4. Parámetros Dinámicos del Macizo Rocoso. Las velocidades de ondas Vs y Vp medidas mediante pruebas de refracción sísmica y de MASW, y la densidad de la roca definidas, fueron empleadas para determinar el módulo de elasticidad y módulo de Poisson dinámicos de la fundación del dique de control (véase la tabla 2.5). Las pruebas geofísicas fueron ejecutadas por la empresa ZERGEOSYSTEM bajo subcontrato/supervisión de KP.

Los criterios empleados son los siguientes:

- ✓ Vs (m/s) de las pruebas de refracción sísmica y MASW.
- ✓ Vp (m/s) de las pruebas de refracción sísmica y MASW.
- ✓ Densidad (kg/m³) de los resultados de laboratorio.
- ✓ Módulo de elasticidad y Poisson dinámicos de los estratos. Determinados a partir de las pruebas geofísicas y densidad de la roca.
- ✓ Módulo de elasticidad y Poisson dinámicos para las unidades geomecánicas. Según promedios ponderados basados en la Rock Foundations de la USACE.

Tabla 2.5. Resumen de parámetros dinámicos del macizo rocoso.

Unidad geomecánica del macizo rocoso		Parámetros dinámicos			
		Módulo de Poisson		Módulo de elasticidad (Gpa)	
Unidad	Descripción	Rango	Valor considerado	Rango	Valor considerado
UG - I	Riolita de regular a buena calidad	0.29 - 0.31	0.29	19 - 23	19.5
UG - II	Riolita de buena a muy buena calidad	0.29 - 0.31	0.29	19 - 52	19.5

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

2.1.2.5. Parámetros y Propiedades del Macizo Rocoso. La tabla 2.6, resume los parámetros y propiedades de ingeniería del macizo que, recomendados para el análisis de estabilidad del dique de control, filtraciones, fundación, estabilidad de las excavaciones de los estribos del dique y el diseño del tratamiento de la fundación.

Tabla 2.6. Resumen de parámetros y propiedades de ingeniería del macizo rocoso.

Parámetros geotécnicos de la fundación de OPB					
Item	Unidad geomecánica	Parámetro	Unidad	Rango	Valor Recomendado calculado
1		RMR	-	50 - 70	61
2		GSI	-	45 - 65	56
3		Densidad	KN/m ³	25.8 - 26	25.8
4		Resistencia a la compresión simple	Mpa	100 - 320	107
5	UG - I	Módulo de deformación estática	Gpa	7 - 12	7.2
6		Coefficiente de Poisson estático	-	0.24 - 0.26	0.24
7		Módulo de deformación dinámico	Gpa	19 - 23	19.5
8		Coefficiente de Poisson dinámico	-	0.29 - 0.31	0.29
9		Ángulo de fricción	°	60 - 70	61
10		Cohesión	Mpa	1 - 1.5	1
11		RMR	-	70 - 90	77
12		GSI	-	65 - 85	72
13		Densidad	KN/m ³	25.8 - 26	26
14		Resistencia a la compresión simple	Mpa	100 - 320	107
15	UG - II	Módulo de deformación estática	Gpa	17 - 29	17
16		Coefficiente de Poisson estático	-	0.24 - 0.26	0.26
17		Módulo de deformación dinámico	Gpa	19 - 52	19.5
18		Coefficiente de Poisson dinámico	-	0.29 - 0.31	0.29
19		Ángulo de fricción	°	60 - 70	67
20		Cohesión	Mpa	3 - 5	3.4

Fuente: Estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB “Informe final de las investigaciones geotécnicas – obras al pie de botadero - Stantec, 2019”.

2.2. Descripción de los Actuales Trabajos de Perforación y Voladura

El Proyecto Contac Water DAM que incluye varias actividades entre ellas la construcción de un Dique de control de CCR, que abarca trabajos de excavación en la fundación del Dique de control y poza se disipación, remoción y transporte del material excavado, estabilización de taludes, construcción del cuerpo del dique (obras de concreto), inyecciones en fundación, entre otras actividades. Para la excavación y remoción de materiales inicialmente se aplicaron medios mecánicos (Excavadora, tractor, volquetes) esto por la presencia de material suelto y roca altamente intemperizada que hacía fácil su arranque en la zona de construcción. Durante el proceso inicial de excavación y acorde a los análisis de geomecánicos, la litología de la zona estaría conformada por Riolita que se iría consolidando a medida que se profundizaran las excavaciones, y ello se fue presentando conforme se realizaban los trabajos observándose presencia de Riolita consolidada pero no de forma masiva por lo cual no requería trabajos específicos de perforación y voladura; por el contrario se ejecutaba perforaciones de taladros puntuales los cuales eran cargados con cemento expansivo y fragmentados al tamaño requerido para su transporte, para ello se contaba con el apoyo de un martillo hidráulico.

A continuación, se realizará una breve descripción de los equipos y aceros de perforación con los que cuenta el proyecto; así como los explosivos y accesorios que se tiene en mina para ser utilizados en el proceso de voladura.

2.2.1. Perforación

“La perforación de las rocas dentro del campo de las voladuras es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir unos huecos, con la distribución y geometría adecuada dentro de los macizos donde se alojara las cargas de explosivos y sus accesorios iniciadores”. (Carlos Lopez Jimeno, 2003, p. 15)

2.2.1.1. Perforación Rotopercusiva.

“De los distintos métodos de perforación existentes la perforación rotopercusiva de banqueo a cielo abierto, es decir, voladuras con un frente libre, es el más extendido en la realización de barrenos en casi todos los tipos de rocas. El funcionamiento básico de los equipos de perforación rotopercusivos se basa en cuatro acciones principales”. (Esquitino, 2011, p. 12)

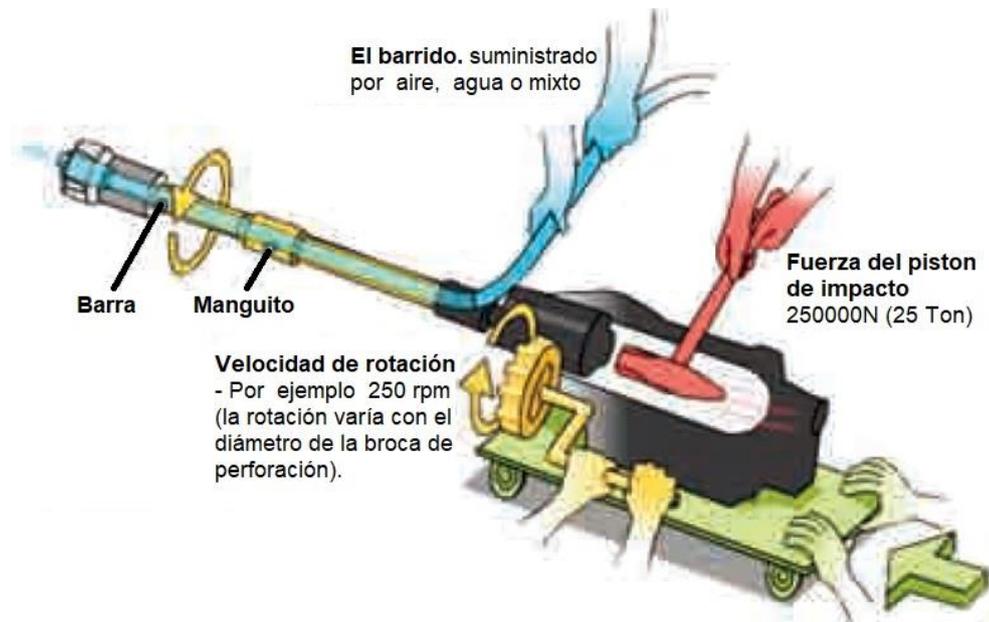


Figura 2.3. Funcionamiento básico de equipos de perforación rotopercussivos.

Fuente: Revista IGP Ingeopres, 2011.

Las perforadoras rotopercussivas están compuesta por parámetros de percusión, rotación, empuje y barrido. Si durante el proceso de perforación alguno de estos parámetros de encuentran fuera del rango recomendado se verá reflejado en el rendimiento, desviación y vida útil de los componentes.

Dentro de este método aplicado para la generación de agujeros sobre la roca para la excavación con explosivos encontramos 2 sistemas comunmente utilizados que se han ido sofisticando con el pasar del tiempo hasta llegar a lo que es ahora, los cuales detallamos a continuación:

Perforación Manual. Son sistemas convencionales que se realizan con equipos ligeros que son manipulados y guiados por los perforistas para la ejecución del trabajo. Se utiliza para realizar perforaciones donde es inviable posicionar un equipo de gran tamaño, para trabajos en zonas angostas y empinadas, cerca a estructuras y/o

ciudades; Su uso requiere la implementación de un generador de aire comprimido para su utilización.

Perforación Hidráulica. Son sistemas más actualizados, pero que mantienen las bases de funcionamiento de las perforadoras manuales. El empleo de este sistema permitira al operador controlar todos los parámetros de perforación que se veran reflejados en mayor capacidad de perforación, menor consumo de energía, mayor ahorro en aceros de perforación, mejores condiciones ambientales de trabajo, mayor facilidad para la automatización, entre otros.

Esté tipo de equipos van montados sobre estructuras de tipo neumático u oruga, los cuales pueden trasladarse por sus propios medios o ser remolcados por otro equipo.

2.2.1.2. Equipos de Perforación en Proyecto. Para los trabajos de perforación en el proyecto contact water dam utilizaremos tanto equipos neumaticos como hidraulicos, los cuales actualmente la empresa JJC tiene en mina; estos equipos generalmente se asignaron de acuerdo a la morfología del terreno que es de forma irregular al ubicarse en una quebrada por el cual pasaba el rio azana. Estos equipos de perforación se determinaron dimensionando el volumen de cantidad de roca a remover con proceso de perforación y voladura, según las necesidades de avance, condiciones de los frentes de trabajo y zonas cercanas sencible a la vibración. A continuación detallare las especificaciones tecnicas de los equipos con los que se cuenta en proyecto y se utilizaran:

Martillo Neumatico RH658 (Atlas Copco). Se utilizará para trabajos en zonas inaccesibles para equipos de mayor diametro, su tamaño permitira al perforista posicionarse adecuadamente para la ejecución de los trabajos de perforación.

Especificaciones del Equipo de Perforación	
Equipo:	Martillo Neumático
Marca:	Atlas Copco
Modelo:	RH658
Diametro Broca:	1.5 pulg
Longitud Perforación:	3, 5, 8 y 10 pies



Figura 2.4. Martillo neumático RH658.

Fuente: Elaboración propia.

Track Drill STD 11 (Soosan). Equipo de perforación hidráulica que tiene un sistema de montaje sobre orugas y que es muy utilizado para realizar banquetes verticales, su diseño que cuenta con una cabina para la seguridad y confort del operador.

Especificaciones del Equipo de Perforación	
Equipo:	Track Drill
Marca:	Soosan
Modelo:	STD 11E
Diametro Broca:	T45 de 2.5 - 3 pulg
Longitud Perforación:	MF T45 de 12 pies



Figura 2.5. Perforadora Track Drill STD 11 (Soosan).

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Voladura

Dentro de los diferentes métodos existentes para fragmentar una roca, existe uno que sobresale actualmente dentro de los proyectos de minería y construcción no solo por su eficiencia sino también por su bajo costo a la hora de ejecutarse; estamos hablando de la voladura.

Cuando un explosivo detona en un taladro confinado adecuadamente, este produce ondas de estrés en la roca circundante, conforme aumenta el estrés aparecen grietas cuando la deformación de la masa rocosa excede el límite elástico del material. A medida que se forman nuevas grietas, las antiguas grietas influyen en las nuevas. A medida que la reacción del explosivo continua, una rápida expansión de gases de alta presión actúa como cuña para expandir las grietas existentes y crear nuevas. Este proceso se le llama fragmentación. (Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos [ISSE], 2006, p. 2-1))

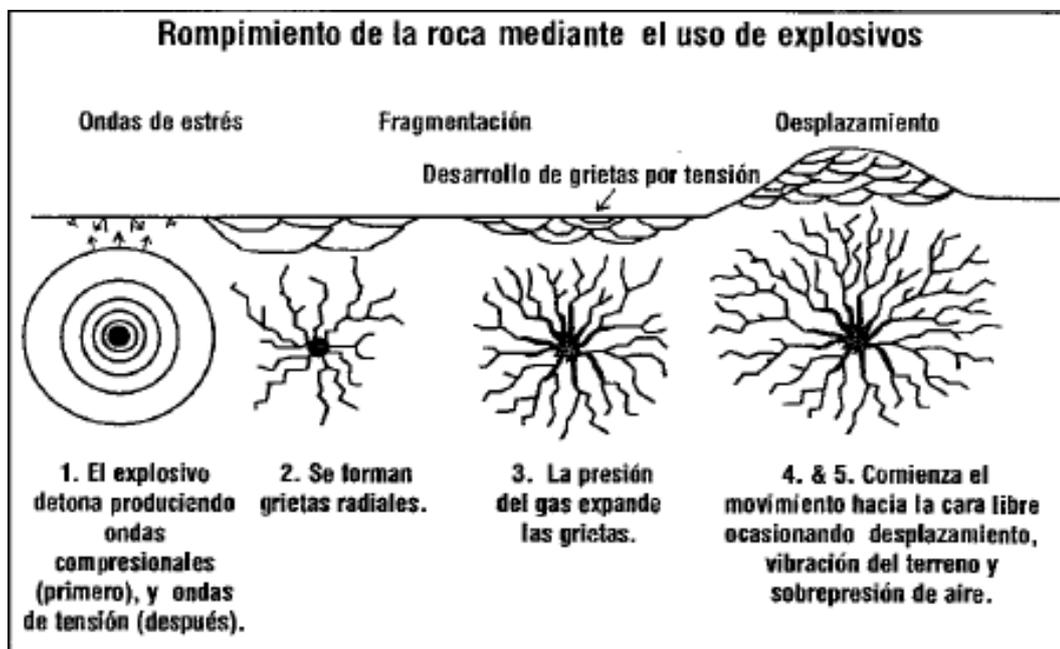


Figura 2.6. Secuencia de rompimiento de la roca.

Fuente: ISSE – Fundamentos prácticos de voladura, 2006.

Del fracturamiento de la roca por acción del uso de explosivos podemos deducir que su eficacia va a depender principalmente de la capacidad de entregar energía a altas presiones y para ello resulta de suma importancia considerar la presión de detonación como el encargado de realizar el trabajo útil para actuar sobre el macizo rocoso y sus propiedades fisicomecánicas.

2.2.2.1. Análisis del Explosivo.

Energía del Explosivo. Se puede definir de acuerdo a los términos del trabajo de expansión de los gases de alta presión, ósea el área bajo la curva PV como se muestra en en la figura 2.7, y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Energía = \int_{P_d}^{P_c} P dV$$

Donde:

P = Presión de gases.

V = Volumen de gases.

Pd = Presión de detonación.

Pc = Presión crítica.

Después de varias observaciones se determinó que la presión crítica a la cual el trabajo útil cesa, es alrededor de 100 Mpa, por lo cual este será casi siempre menor al trabajo útil teórico que obtengamos. La curva PV es característica en cada formulación del explosivo y su derivación requiere conocimiento preciso de la composición del producto. Los explosivos tipo EMULSION, por ej., tienen una curva completamente diferente, con el área total bajo la curva (de Pd a presión ambiental) menor que los del ANFO. Esto se espera debido a la presencia de cantidades sustanciales de agua, y el efecto de

apagado que tiene esto en la reacción. Sin embargo, el área bajo la curva PV desde Pd a Pc normal, es frecuentemente mayor o muy similar a la del Anfo, de manera que las emulsiones pueden tener una potencia en peso efectiva muy cercana o aún exceder al 100%. (ENAEX, 2010, p. 24)

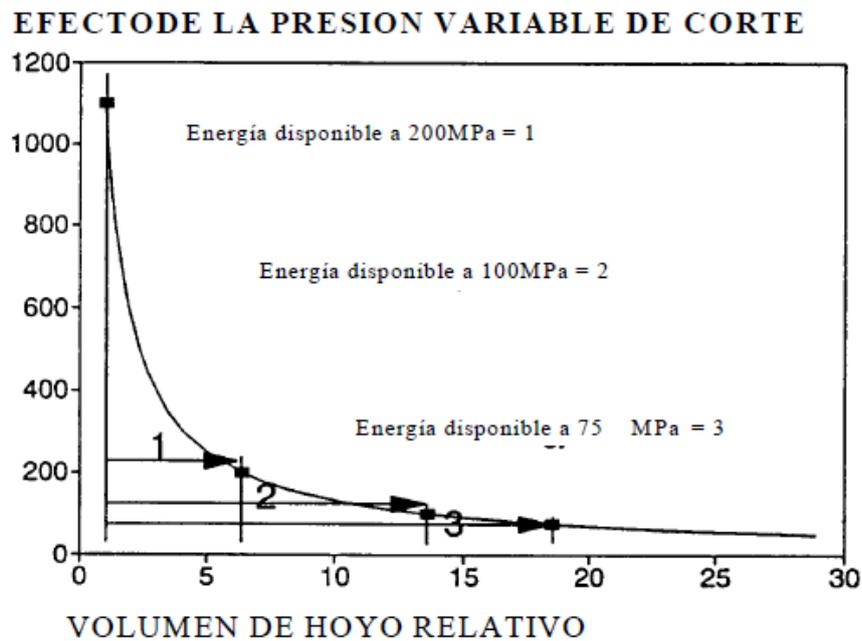


Figura 2.7. Curva P-V para ANFO.

Fuente: Estudio Manual de tronadura de Enaex, 2010.

Es importante notar que los factores que afectan a la presión de venteo de los gases de explosión (tales como el grado de confinamiento de la carga) afectaran también a la cantidad de energía obtenida de los explosivos y pueden, por lo tanto, esperarse que influya en los perfiles de la pila, la fragmentación y los niveles peak de vibración. Estudios recientes de McKenzie et al (1992), investigaron la relación entre la energía disponible y la vibración inducida.

Energía de Burbuja. O energía de levantamiento, definición que se da al trabajo útil realizado por un explosivo después que la roca ha estado sujeta a la energía de

choque inicial. A la energía de burbuja se le atribuye el desplazamiento de la roca después de fracturarse. Se mide en la prueba submarina de energía y se calcula de acuerdo a la ecuación: (ENAEX, 2010)

$$E_b = 0.684 \times P_h^{2.5} \times t^3 \times \rho_w^{-1.5}$$

Donde:

E_b = Energía de burbuja.

P_h = Presión hidrostática.

t = periodo de tiempo entre la pulsación de choque y la primera implosión de la burbuja.

ρ_w = densidad del agua.

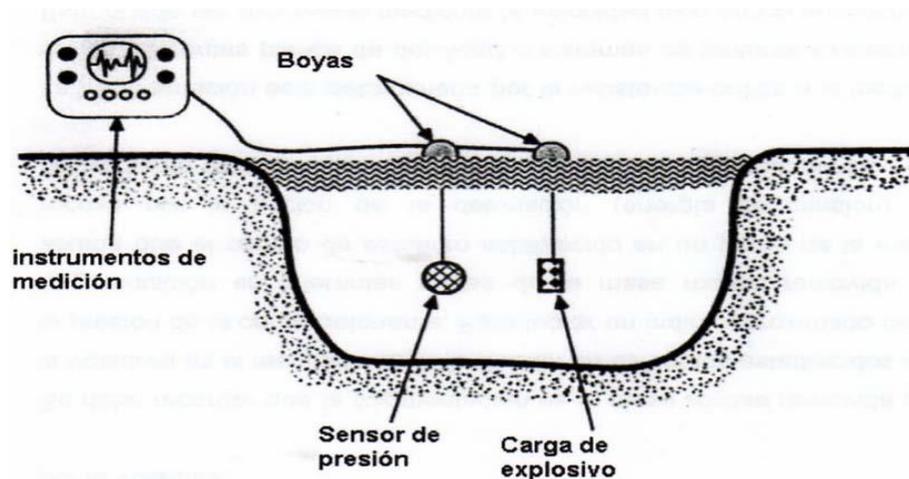


Figura 2.8. Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua.

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder, 1987.

Potencia de los Explosivos. La potencia es la medida de la cantidad de energía de un explosivo. Se expresa como potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS). También se puede expresar como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO, el cual es tomado como el 100%, obteniéndose la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen. (Ames, 2008)

Potencia absoluta por peso (AWS); Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías), en cada gramo de explosivo. Ejemplo: la AWS del ANFO es 900 cal/g.

Potencia absoluta por volumen (ABS); Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías) en cada centímetro cúbico de explosivo. Esto se obtiene multiplicando la AWS por la densidad del explosivo.

$$ABS = AWS \times \delta_{\text{explosivo}}$$

Potencia relativa por peso (RWS); Esta es la medida de la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de ANFO. Esta se calcula dividiendo la AWS del explosivo por la AWS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RWS = \frac{AWS_{\text{explosivo}}}{AWS_{\text{ANFO}}}$$

Potencia relativa por volumen (RBS); Esta es la energía disponible por volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO, con una densidad de 0,82 g/cc. Esto se calcula dividiendo la ABS de un explosivo por la ABS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RBS = \frac{ABS_{\text{explosivo}}}{ABS_{\text{ANFO}}}$$

Eficiencia de los Explosivos. Este factor es un índice del grado de aprovechamiento práctico de la energía liberada por una mezcla explosiva, en relación a los parámetros termodinámicos calculados en forma teórica.

La eficiencia total es una función de muchas variables, algunas de las cuales son internas e inherentes dentro del explosivo por la virtud de su formulación química y algunas de las cuales son externas y parte del diseño de la voladura o condiciones encontradas en el lugar. Las variables externas que pueden afectar la eficiencia total de un explosivo incluyen, a la eficiencia de la iniciación, condiciones de agua, diámetro de carga, longitud de carga, grado de confinamiento, temperatura, efectos de la detonación de cargas explosivas adyacentes, etc. (Ames, 2008)

Las mediciones de las eficiencias de los explosivos han sido desarrolladas para evaluar la potencia práctica del explosivo y sugieren sus propiedades en el campo. La eficiencia es posible determinar empíricamente mediante la técnica de la "energía de burbuja" en las voladuras bajo el agua, y se mide como el porcentaje de energía aprovechable. En la tabla 2.7 podemos visualizar un resumen del grado de aprovechamiento de la energía, determinada en base a mediciones efectuadas en los Estados Unidos permiten obtener los siguientes rangos de factores de eficiencia para las distintas familias de explosivos.

Tabla 2.7. Grado de aprovechamiento de la energía.

Grado de aprovechamiento de la energía de diversos explosivos	
Explosivos moleculares (Nitroglicerina, Pentrita, TNT y otros)	95 a 100%
Emulsiones	90 a 95%
ANFOs pesados bombeables (sobre 60% emulsión)	75 a 90%
ANFOs pesados vaceables (bajo 50 ó 60% emulsión)	65 a 85%
Hidrogeles	55 a 70%
ANFO	60 a 80%
SANFO	50 a 70%

Fuente: Manual práctico de voladura – EXSA, 2008.

Factor de Energía. La preocupación para poder cuantificar el rendimiento del explosivo utilizado hizo que se utilice el factor de carga. En el factor de carga se supone que el peso del explosivo es igual a la energía explosiva; esto es incorrecto. Un kg. de

dinamita, AN/FO o emulsión, tienen rendimientos de energía diferentes. Podría ser válida cuando el taladro tiene un solo tipo de explosivo, ¿Cómo se podría expresar el factor de carga si en un taladro hubiera dos o más tipos de mezclas explosivas? Esta situación justifica el uso del FACTOR DE ENERGIA.

Con los explosivos antiguos la energía explosiva aumentaba directamente con la densidad; pero, actualmente se puede encontrar dos tipos de explosivos con la misma densidad, pero con diferentes rendimientos de energía; ejemplo, en las emulsiones. Entonces es necesario utilizar el factor de energía.

El factor de energía es un parámetro que nos permite determinar la cantidad de energía usada para fragmentar una tonelada de mineral o un metro cúbico de material estéril (en el movimiento de tierras), y se puede usar la siguiente relación: (Ames, 2008)

$$\text{Factor de Energía} = \frac{\text{MJ de energía}}{\text{TM de material fragmentado}}$$

2.2.2.2. Explosivos y Accesorios de Voladura. Actualmente la unidad minera Quellaveco se encuentra en fase de construcción, lo que implica desbroce de material, construcción de botaderos, presas de relaves, diques, túneles entre otros. La empresa JJC Contratistas Generales actualmente es la encargada de ejecutar trabajos de construcción del proyecto Water Dam Contact, que implica también trabajos de perforación y voladura. Para la operación de voladura, se realizará con sistema de iniciación pirotécnica y los explosivos actualmente que se manejan en la mina son emulsiones encartuchadas y anfo que serán suministrados por las empresas Exsa, Famesa y Enaex. A continuación, detallo la gama de explosivos que se cuenta para la ejecución de los trabajos de voladura:

Tabla 2.8. Registros de explosivos en proyecto.

Explosivos					
Proveedor	Descripción	Proveedor	Descripción	Proveedor	Descripción
	* SUPERFAMDOS	*			* ANFO PREMIUM
FAMESA	EMULNOR 5000 1"x8"	*	EXSA	* EMULEX 80 1"x8"	* EMULTEX PG 3"x16"
	EMULNOR 5000 2"x16"	*			* ENALINE 1 1/4"x 20m
	CORDON DETONANTE 5P				* CORDON DETONANTE N°5
					* CORDON DETONANTE 80 GR

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.9. Registros de accesorios de voladura en proyecto.

Accesorios de Voladura			
Proveedor	Descripción	Proveedor	Descripción
	* FANEL DUAL 6m - 800ms		* DET NE FANEL DUAL 10m - 800/17ms
	* FANEL DUAL 10m - 800ms		* DET NE FANEL CTD 6m - 35ms
	* FANEL CTD 17ms - 6.5m		DET NE FANEL DUAL 12m - 800/17ms
FAMESA	* FANEL CTD 25ms - 6.5m	ENAEX	* DET NE FANEL CTD 6m - 42ms
	* FANEL CTD 42ms - 6.5m		DET NE FANEL DUAL 12m - 800/17ms
	* FANEL CTD 109ms - 6.5m		* DET NE FANEL CTD 6m - 65ms
	* LSEF LINEA 500m SILENC. ENCENDIDO		DET NE FANEL CTD 6m - 0ms
			* DET NE FANEL CTD 6m - 100ms
			DET NE FANEL CTD 6m - 17ms
			* LINEA DE DISPARO P 500m
			DET NE FANEL CTD 6m - 25ms
			* CABLE DISPARO 1000m

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Determinación del Diseño de Voladura

Muchos profesionales y expertos en voladura han determinado una variedad basta de fórmulas que nos permitan acercarnos más al propósito de tener una voladura óptima (Fragmentación, desplazamiento, proyección y vibración), pero todas resultan ser empíricas y determinadas mediante pruebas en campo que nos acercan a un escenario más real del resultado a obtener; esto debido a que tenemos parámetros controlables (geometría de perforación, explosivo, secuencia de salida) y no controlables (geología). Para un mejor control de los resultados a obtener, se hace necesario supervisar y recabar la mayor cantidad de información para realizar el análisis que posteriormente resultara en una adecuada toma de decisión al momento de seleccionar el explosivo, geometría de la malla, factor de carga, secuencia de salida y aplicación de software de voladuras para simular resultados post voladura.

2.3.1. Selección del Explosivo

La selección del explosivo a utilizar para un proyecto de voladura determinado, resulta muchas veces una tarea muy confusa para el ejecutor del trabajo. Debido a que en la actualidad ya se deben considerar diversos factores entre operativos, económicos, sociales y ambientales. A menudo nos guiamos de los catálogos que el fabricante nos proporciona y lo correlacionamos a la dureza de la roca como un factor determinante para su selección, pero esto no resulta ser suficiente como para determinar completamente si es el explosivo ideal para la realización de nuestro trabajo, requiriendo de pruebas en campo, análisis y monitoreo de resultados.

Para nuestro proyecto, los explosivos a utilizar son los más comerciales y los que actualmente vienen en uso para las voladuras realizadas en la mina. Determinado previamente ya los explosivos procederemos a realizar el análisis de energía de los explosivos correlacionándolo al índice de volabilidad (BI) que determinaremos previamente con los parámetros geológicos y/o geomecánicos obtenidos de estudios y visitas a campo. Seleccionados los explosivos comunes, procederemos a analizar y comparar la eficiencia de los mismos:

2.3.1.1. ANFO. Es una mezcla de Nitrato de amonio y petróleo (5.7%), en la que actúa el nitrato de amonio como oxidante y el petróleo como combustible. Es económico y seguro, ya que generalmente es un tercio más barato que la nitroglicerina y considerablemente más seguro de manejar porque no es sensible. En muchos tipos de voladura el anfo produce una mejor fragmentación debido a sus altas propiedades de producción de gases.

Dentro de las desventajas tenemos no es aplicable para terrenos con presencia de agua (no es resistente al agua y se diluye), terrenos fracturados (generación altas

concentraciones de gases produce mayor desplazamiento y/o proyección del material fracturado), no es iniciado por un detonador (requiere de un explosivo de alto poder para su detonación), diámetro crítico (el diámetro del taladro debe ser mayor a 51 mm, diámetros menores la detonación es nula o inestable).

Tabla 2.10. Características técnicas del ANFO.

Características Técnicas	
Densidad vaciado ("pour")	0.77 ± 3% g/cc
Velocidad de detonación	3600-4100 m/s*
	2000-2500 m/s**
Presión de detonación	28 kbar*
Energía	3818 KJ/Kg
Volumen de gases	1050 L/Kg
Diámetro mínimo	1 pulg
Resistencia al agua	Nula

* Confinado en 3" de diámetro

**No confinado en 3" de diámetro

***Confinado

Fuente: Elaboración propia, extraída de ficha técnica del producto.

2.3.1.2. Emulsión. Los explosivos de emulsión están ganando más participación en el mercado debido a sus características seguras y versátiles. Las emulsiones son los denominados productos bifásicos. Las emulsiones explosivas consisten en una mezcla de combustible y componentes oxidantes. Los oxidantes son principalmente nitratos y los combustibles principalmente hidrocarburos minerales u derivados orgánicos. La relación oxidante/combustible es de aproximadamente 10:1.

Los explosivos de emulsión son resistentes al agua, debido a sus propiedades y estabilidad química, se pueden utilizar para diámetros grandes y pequeños.

Tabla 2.11. Características técnicas de la Emulsión.

Características Técnicas	
Densidad	1.15 ± 4% g/cc
Velocidad de detonación	4600 ± 6000 m/s
Presión de detonación	61 kbar
Energía	3940 KJ/Kg
Volumen de gases	930 L/Kg
Potencia relativa al ANFO	1.01 (En peso)
	1.49 (En volumen)

*Cartucho de 1 1/4x8", sin confinar

Fuente: Elaboración propia, extraída de ficha técnica del producto.

Dentro de las consideraciones a tomar en cuenta para la selección de explosivo para obtener mejor eficiencia en las voladuras:

Velocidad de Detonación. Es la velocidad a la que la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Tiene un rango que va de 1.524 a 7.620 m/s en productos explosivos comerciales. La velocidad de detonación se puede usar como una herramienta para determinar la eficiencia de una reacción explosiva en el uso práctico". (Konya, 2010)

Diámetro de Taladro. Considerando el área y volumen de material rocoso a volar y con la cercanía de las estructuras de control de vibración, se determinó usar diámetros pequeños de perforación de 1.5 y 2.0 pulgadas.

Diámetro de Carga. Para este parámetro se tomará en cuenta el diámetro crítico del explosivo, el cual nos indica que por debajo de dicho diámetro la onda de detonación no se propaga; pudiendo este no detonar y/o solo deflagrar.

Características de la Roca. Se considera los parámetros geomecánicos del estudio realizado para el proyecto, que presenta una roca (RIOLITA) de una resistencia a la compresión alta, pero que se encuentra fracturado.

Presencia de Agua. El proyecto de voladura se encuentra en lo que abarcó el cauce de un río que fue desviado para la construcción de proyecto, por ello se estimó la posible presencia de agua.

Energía. Cuando los explosivos reaccionan químicamente, se liberan dos tipos principales de energía. El primero se llama energía de choque y la segunda energía de gas. Ambos tipos de energía se liberan durante el proceso de detonación.

De los ítems analizados para los explosivos comerciales que utilizaremos en el proyecto y nuestro requerimiento para fracturar y desplazar la roca, determinamos que el explosivo que se ajusta más a las necesidades y condiciones del proyecto es la Emulsión Encartuchada.

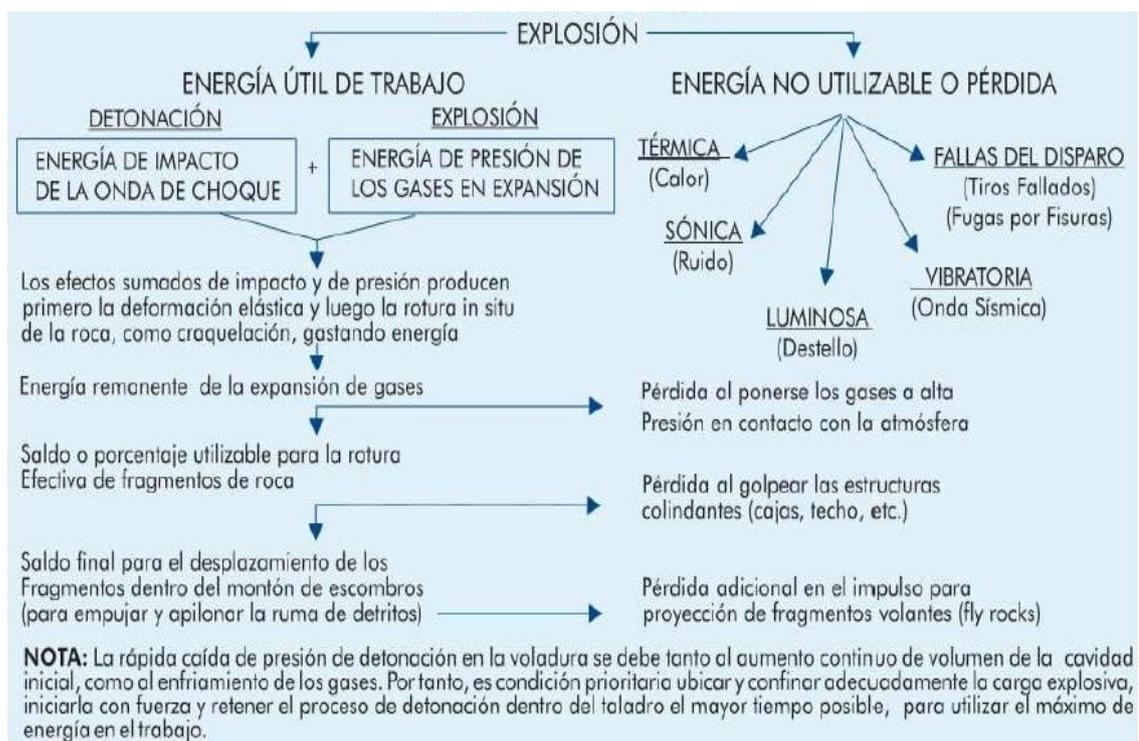


Figura 2.9. Distribución de la energía potencial de un explosivo.

Fuente: Manual práctico de voladura – EXSA, 2019.

(<https://www.mineridelibrosycursos.com/2019/10/manual-practico-de-voladura-5ta-edicion.html>).

2.3.1.3. Sistemas de Iniciación de Explosivos. Para el inicio de la columna explosiva y secuenciamiento de salida de la voladura, se realizará mediante un sistema no eléctrico, que son activadas mediante ondas de choque y transmitidas por tubos de transmisión:

- Detonador no eléctrico bidireccional (fanel dual)
- Detonador no eléctrico CTD
- Línea silenciosa LSEF

2.3.2. Caracterización del Macizo Rocoso

Determinar correctamente los parámetros geomecánicos del macizo rocoso presente en el proyecto será de gran importancia para conseguir un buen diseño de perforación y voladura, para ello tomaremos en consideración mediciones realizadas en campo (sondeos, refracción sísmica y mapeos) y análisis en laboratorio.

El tipo de roca predominante en el proyecto es la Riolita que se presenta diaclasado con relleno de arcilla, el cual reduce su resistencia a la compresión. A continuación, mostramos el resumen de las propiedades físicas de la roca que fueron obtenidos como resultado de los sondeos realizados.

Tabla 2.12. Propiedades Físicas de la roca – Sondajes diamantinos.

Propiedades Físicas - Riolita	Sondaje P-06	Sondaje P-07	Sondaje P-08	Sondaje P-09
Densidad	2.61 g/cm ³	2.62 g/cm ³	2.63 g/cm ³	2.61 g/cm ³
Velocidad de la onda P	2800 m/s	2800 m/s	2800 m/s	2800 m/s
Resistencia a la Compresión	202 Mpa	263.8 Mpa	223.6 Mpa	320.7 Mpa
Resistencia a la Tracción	16.16 Mpa	21.10 Mpa	17.89 Mpa	25.66 Mpa
Módulo de Young	21 Gpa	33.1 Gpa	38.9 Gpa	37.6 Gpa
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.2	0.2

Fuente: Elaboración propia, extraída del estudio MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB.

“El diseño de las voladuras y la propia predicción de la fragmentación resultante requiere un conocimiento detallado de las características del macizo rocoso”. (Jimeno et al., 2017, p. 619)

Lopez Jimeno (2017) indica que: “Lilly (1986, 1992) para caracterizar los macizos rocosos, mediante el denominado Índice de Volabilidad, BI. En su aplicación intervienen cinco parámetros: descripción del macizo rocoso, espaciamiento entre planos de juntas, densidad y resistencia a la compresión de la roca”. (p. 619).

Tabla 2.13. Parámetros Geomecánicos – Índice de Lilly.

Parámetros geomecánicos	Calificación
1.- Descripción del macizo rocoso (RMD)	
1.1 Friable/Poco consolidado.	10
1.2 Diaclasado en bloques.	20
1.3 Totalmente masivo.	50
2.- Espaciamiento de los planos de las juntas (JPS)	
2.1 Pequeño (< 0,1 m).	10
2.2 Intermedio (0,1 m a 1m).	20
2.3 Grande (> 1 m).	50
3.- Orientación de los planos de juntas (JPO)	
3.1 Horizontal.	10
3.2 Buzamiento Normal al frente.	20
3.3 Dirección normal al frente.	30
3.4 Buzamiento coincidente con el frente.	40
4.- Influencia de peso específico (SGI)	
SGI = 25 SG – 50	
Dónde:	
SG = Peso específico en (t/m ³).	
5.- Influencia de la Resistencia	
RSI = 0,05 σ_c	
Dónde:	
σ_c = Resistencia a la compresión (MPa).	1 a 10

Fuente: Manual de Perforación, Explosivos y Voladura, 2017.

El índice de volabilidad que se obtenga de la suma de los cinco parámetros geomecánicos debe tener un valor máximo de 100.

2.3.3. Geometría de la Malla de Perforación

La determinación de una geometría adecuada de perforación para la voladura en minería superficial, está ligado al uso y análisis de varios parámetros; siendo estos los que tienen mayor influencia en los resultados de las voladuras de rocas:



Figura 2.10. Parámetros de voladuras en bancos.

Fuente: Manual de Perforación y Voladura de Rocas – ETSI de Ingenieros de Minas de Madrid, 2003.

Diámetro del Taladro (Φ). “La selección del diámetro de taladro es crítica considerando el equipo de perforación, carga y acarreo, también al burden, espaciamiento, distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general a la eficiencia y economía de toda la operación”.

Longitud o Profundidad del Taladro (L). “Es la suma de la altura del banco más la sobre perforación necesaria por debajo del nivel o rasante del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos (toes)”.

Sobreperforación (SP). “Realizado para mantener la rasante del piso. Si resulta corta normalmente reproducirán lomos, pero si es excesiva se produciría una sobre excavación con incremento de vibraciones y de los costos de perforación”.

Longitud de Taco (T). “Altura de taladro relleno de material inerte que tiene la función de retener a los gases generados durante la detonación y trabajen en la fragmentación y desplazamiento de la roca en toda la longitud de la columna carga explosiva”.

Altura de Banco (H). “Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso).”.

Burden (B). También denominada piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre de forma perpendicular. Según Exsa “Se considera el parámetro más determinante de la voladura. Depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones de explosivo a emplear”. (EXSA, 2019, p. 170)

Espaciamiento (E). “Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila”.

Considerando los parámetros del diseño de la malla de perforación y voladura, teniendo en cuenta las condiciones de la roca se prevé el uso de emulsión encartuchada por las características mencionadas anteriormente y cuyas propiedades se ajustan a los requerimientos del proyecto. Para ello utilizaremos el método de voladuras en pequeño diámetro. De acuerdo a López Jimeno (2017) “Se denominan voladuras en pequeño diámetro aquellas que se encuentran en el rango de 76mm a 152mm de diámetro de perforación y sus aplicaciones más importantes son: explotación de canteras, excavaciones de obras públicas y minería a cielo abierto de pequeña escala” (p. 590)

Según López Jimeno, E. (1980)

- Modificación de la fórmula de Ash incorporando la velocidad sísmica del macizo rocoso, por lo que resulta:

$$B = 0.76 \times D \times f \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

B = Burden (m).

D = Diámetro del barreno (pulg).

f = Factor de corrección en función de la clase de roca y tipo de explosivo.

f = $F_r \times F_e$

$$F_r = \left(\frac{2.7 \times 3500}{\rho_r} \right)^{0.33} \dots\dots\dots(2)$$

$$F_e = \left(\frac{\rho_e \times VD^2}{1.3 \times 3660^2} \right)^{0.33} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

F_r = Factor de corrección de roca.

F_e = Factor de corrección de explosivo.

ρ_r = Densidad de la roca en (gr /cm³).

VC = velocidad sísmica de propagación del macizo rocoso en (m/s).

ρ_e = densidad de la carga de explosivo (gr /cm³).

VD = velocidad de detonación del explosivo (m/s).

La fórmula indicada es válida para diámetros superiores a 165 mm. Para barrenos más pequeños el valor del burden se afectará por un coeficiente reductor de 0.9.

Realizando los cálculos:

- *Geología*; La tabla 2.14 muestra propiedades físicas de la roca Riolita obtenidas de las perforaciones diamantinas.

Tabla 2.14. Propiedades físicas – Riolita.

PROPIEDADES FISICAS - RIOLITA	
Densidad	2.61 g/cm ³
Velocidad de la onda P	2800 m/s
Resistencia a la Compresión	202 Mpa
Resistencia a la Tracción	16.16 Mpa
Módulo de Young	21 Gpa
Coefficiente de Poisson	0.3

Fuente: Elaboración propia, extraída del estudio

MQ13-58-RE-2040-GO0007-RB.

- *Explosivos*; Se determino el uso de Emulsión encartuchada EMULTEX CN 1 ½ * 16", se determinó el uso de este explosivo tomando en consideración a la geología de la zona que presenta bastante diaclasado y con relleno de limonita, lo que resultaría desfavorable para el uso de ANFO por la gran cantidad de gases que esta genera.

Tabla 2.15. Características técnicas del Emultex CN.

Características Técnicas	
Densidad	1.15 ± 4% g/cc
Velocidad de detonación	4600 ± 6000 m/s
Presión de detonación	61 kbar
Energía	3940 KJ/Kg
Volumen de gases	930 L/Kg
Potencia relativa al ANFO	1.01 (En peso) 1.49 (En volumen)

*Cartucho de 1 1/4x8", sin confinar

Fuente: Elaboración propia, extraída de ficha técnica del producto.

- *Accesorios*; Para los conectores utilizaremos detonadores no electrónicos, esto debido a que solo se cuenta con este tipo de accesorios.

Tabla 2.16. Accesorios de voladura.

ACCESORIOS DE VOLADURA	
Fanel Dual (8 m)	(17/800) ms
Conector CTD (6 m)	17 ms
Conector CTD (6 m)	25 ms
Conector CTD (6 m)	42 ms
Conector CTD (6 m)	100 ms
Cordon detonante	5P
Linea de disparo LSEF	500 m

Fuente: Elaboración propia.

- *Parámetros de Perforación*; Para su determinación se tomó en consideración los equipos de perforación que se tienen en proyecto.

Tabla 2.17. Parámetros de perforación.

Parámetros de perforación		
Diametro de taladro	2 pulg.	1.5 pulg
Altura de banco	5 m	3 m
Sobreperforación	0.3 m	0 m
Inclinación de taladro	0°	0°

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos en proyecto, procederemos a calcular la malla de perforación:

Aplicando la formula (3) y (2) en (1)

Calculando el factor de corrección:

$$F_r = \left(\frac{2.7 * 3500}{2.61 * 2800} \right)^{0.33} \rightarrow F_r = 1.090$$

$$F_e = \left(\frac{1.15 * 4600}{1.3 * 3660} \right)^{0.33} \rightarrow F_e = 1.203$$

Entonces haremos el cálculo del burden para un diámetro de perforación de 2 pulgadas:

$$B_{teorico} = 0.76 * 3" * \frac{1.090}{1.203} \rightarrow B_{teórico} = 1.99 m$$

Considerando la restricción para diámetros menores a 165 mm, aplicaremos un factor de corrección de 0.90:

$$B_{real} = 1.80 m$$

$$E = 1.80 * 1.15 \rightarrow E = 2.10 m$$

Para dar validez a los parámetros geométricos obtenidos aplicaríamos la relación de rigidez, este formulismo fue planteado por Konya (1998) donde relaciona la altura de corte con el burden, el resultado que se obtenga será valorado según la tabla 2.18, determinando el potencial de los efectos a obtener efectos indeseables en la voladura como fragmentación, sobrepresión de aire, rocas volantes y vibración. El valor optimo a considerar debe ser 3.

$$k = \frac{H}{B}$$

Donde:

K: Relación rigidez.

H: Altura de banco o de corte.

B: Burden.

Tabla 2.18. Grados de relación de rigidez.

Relación de Rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente
Consideraciones				
1	Rompimiento trasero severo, problemas de piso, volver a diseñar			
2	Rediseño si es posible			
3	Buen control y fragmentación			
4	No representa mayores beneficios con el aumento del factor por encima de 4			

Fuente: Manual de Konya, 2009.

2.3.4. Determinación del Factor de Carga

2.3.4.1. Índice Propuesto por LILLY (1986). Lilly (1986) desarrolló una ecuación para la voladura del macizo rocoso basada en cinco parámetros relacionados con las condiciones del sitio, denominado índice de Volabilidad (BI) y cuya ecuación es la siguiente: (Bhachalandra, 2011)

$$BI = 0.5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + H)$$

Donde:

BI = Índice de Volabilidad.

RMD = Descripción del Macizo Rocos.

JPS = Espaciamiento de planos de juntas.

JPO = Orientación de planos de juntas.

SGI = Influencia del peso específico de la roca.

H = Dureza de la roca en la escala de Moh's.

Los valores que se utilizarán para las variables anteriores son los siguientes:

DESCRIPCION DEL MACIZO ROCOSO

Los valores de RMD son:

- 10 – Para masa rocosa friable/poco consolidada.
- 20 – Para bloques de rocas (Diaclasado).
- 50 – Para masa rocosa totalmente masiva.

ESPACIAMIENTO DE PLANOS DE JUNTAS

Los valores de JPS son:

- 10 – Para juntas con espaciamiento < 0.1 m.
- 20 – Para juntas con espaciamiento 0.1 a 1 m.
- 50 – Para juntas con espaciamiento > 1 m.

ORIENTACIÓN DE PLANOS DE JUNTAS

Los valores para JPO son:

- 10 – Cuando la orientación de la junta es menor a 10° con el plano horizontal.
- 20 – Cuando la diferencia absoluta entre el ángulo de la junta y la cara del banco es menor a 30°.
- 30 – Cuando la diferencia absoluta entre el ángulo de la junta y la cara del banco es mayor a 60°.
- 40 – Cuando la diferencia absoluta entre la junta y dirección de la cara del banco está entre 30° y 60°.

INFLUENCIA DEL PESO ESPECIFICO DE LA ROCA

Los valores de SGI se calcularán como:

$$SGI = 0.25 \times SG - 50$$

Donde:

SG = Gravedad específica del macizo rocoso en Kg/m³.

DUREZA EN LA ESCALA DE MOHS

El valor que se utilizará para H es el valor de dureza que se encuentra entre 1 y 10 en la escala de Mohs.

Lilly (1986, 1992) realizó un reemplazo del parámetro H por el RSI (Radio de influencia de la resistencia) con ello se determinó utilizar 5 parámetros geomecánicos para definir el Índice de Volabilidad "BI" (Blastability Index).

RADIO DE INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA

Los valores de RSI se calcularán como:

$$RSI = 0.05 \times R_c$$

Donde:

R_c = Resistencia a la compresión simple Mpa.

Con dicha modificación la ecuación para el cálculo del índice de volabilidad (BI) quedaría determinada de la siguiente manera:

$$BI = 0.5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

A partir del valor del índice de volabilidad propuesto por Lilly calculado por la fórmula dada arriba uno puede calcular el factor de potencia (Fp) y el factor de energía (Fe) usando las siguientes ecuaciones:

$$Fp = 0.004 \times BI$$

$$Fe = 0.015 \times BI$$

Donde:

Fp = Cantidad de Explosivo (Anfo) en Kilogramos por tonelada de macizo rocoso (Kg. Anfo/ton).

Fe = Energía requerida MJ por tonelada de macizo rocoso (MJ/ton).

Una vez determinada la energía requerida, se seleccionan las longitudes de carga y las potencias de los explosivos sujeta a la restricción de un mínimo de altura de taco y un diámetro de taladro. De manera similar, el factor de roca que se utilizará para predecir la distribución del tamaño de los fragmentos en el modelo de Kuz Ram, propuesto por Cunningham, se calcula multiplicando BI (es decir, índice de volabilidad de Lilly) en 0.12.

Para nuestro caso motivo de estudio, se realizó la revisión de información de pruebas de laboratorio y mapeos en campo conjuntamente con el área de geomecánica de JJC contratistas generales. En la tabla 2.19 mostramos el resumen de los valores obtenidos para cada uno de los parámetros considerados por Lilly para la realización la caracterización del macizo rocoso.

Tabla 2.19. Parámetros geomecánicos del macizo rocoso de proyecto.

Parámetros Geomecánicos	
Descripción	Calificación
1.- Descripción del macizo rocoso (RMD)	20
2.- Espaciamiento de los planos de juntas (JPS)	10
3.- Orientación de los planos de juntas (JPO)	20
4.- Influencia del pesos específico (SGI)	15.25
5.- Influencia de la resistencia (RSI)	10.1
Total	75.35

Fuente: Elaboración propia, con área de geomecánica JJC.

Calculando el índice de Volabilidad (BI):

$$BI = 0.5 * (75) = 37.68$$

Calculando el factor de energía requerido para la fragmentación:

$$FE = 0.015 (37.68) = 0.57 \text{ kJ/ton roca}$$

Calculando el factor de carga requerido para la fragmentación:

$$FC = 0.004 (37.68) = 0.15 \text{ kg/ton roca}$$

$$FC = 0.39 \text{ kg/m}^3 \text{ roca}$$

2.3.4.2. Simulación de Fragmentación y Proyección. Anteriormente la perforación de las mallas de voladura y el carguío de los taladros generalmente se realizaban en base a los cálculos teóricos determinados mediante fórmulas empíricas previamente analizada por diversos autores, con el avance tecnológico de los últimos años y la inserción de diversos software de voladura a las operaciones mineras, se considera ya una fase de simulaciones, las cuales nos van a permitir predecir posibles resultados e ir optimizándolos en la fase previa de planificación. Es decir, vamos a poder validar los cálculos iniciales como la geometría de la malla de perforación y el factor de

carga que utilizaremos para la ejecución de las voladuras, nos apoyaremos en el software de simulación de voladura I-Blast 7.8.

Para la fase de simulación de resultados es importante también considerar la geología de la zona, por ello se ingresará al software I-Blast 7.8 en el comando de geología tal como se muestra en la figura 2.11.

Geología	
Riolita	<input type="checkbox"/> Por defecto
Masa volumétrica (kg/m ³)	2,610.0
Velocidad Onda P (m/s)	2,800.00
Resistencia tracción (Mpa)	16.16
Resistencia Compresión (Mpa)	202.00
Módulo de Young	21.00
Coeficiente de Poisson	0.30

Figura 2.11. Datos geológicos de la roca Riolita – I Blast.

Fuente: Elaboración propia.

Simulación de Fragmentación. La fragmentación consiste en fracturar y desplazar la roca de su medio inicial (matriz rocosa) mediante la generación de puntos de daño producidos por la onda de compresión y tensión a través de la detonación de una columna de carga explosiva que libera energía a altas temperaturas y presiones.

El modelo de fragmentación que resultará de la simulación estará caracterizado por el módulo de Young, el coeficiente de poisson y las fuerzas de tensión y compresión. Para un mismo explosivo podemos ir parametrizando diversos modelos de carga y geometría de malla que serán simulados verificando si las curvas granulométricas se asemejan a los objetivos determinados en fragmentación; se podrá realizar un comparativo y posterior ajuste de la simulación una vez obtenido la medición real post

voladura, esto nos permitirá acercar más nuestra simulación a los resultados a obtenerse en campo.

En la figura 2.12 podemos observar los 03 modelos de cargas propuestos para las pruebas iniciales de captura de ondas elementales, para ello se empleará la emulsión encartuchada Emultex CN 1 1/2 * 12.

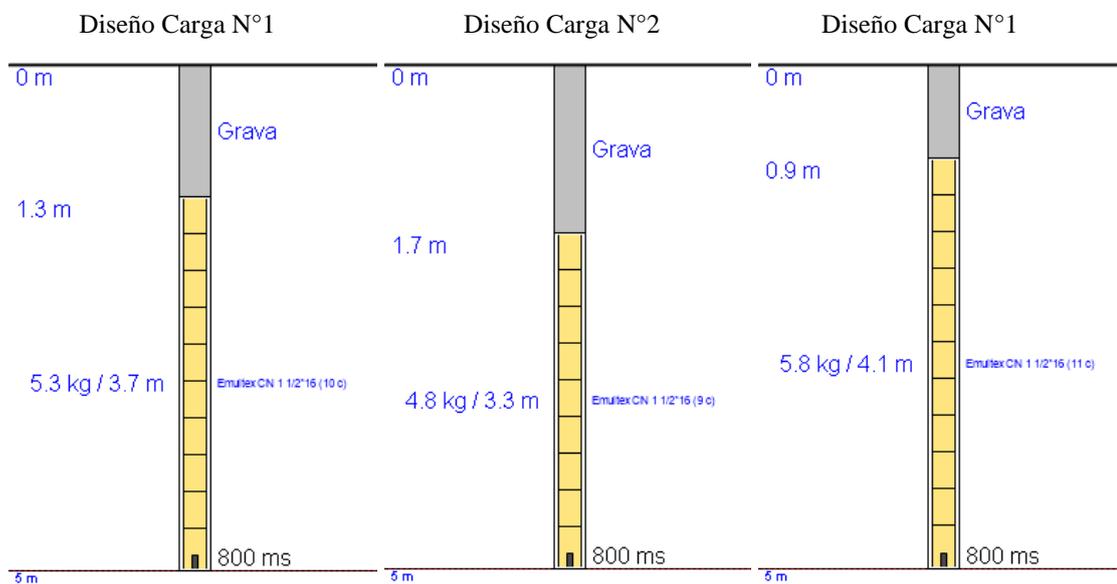


Figura 2.12. Diseños de carguío tipo – I Blast.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 2.13 nos muestra la medida (mm) obtenida del P80 (%) para cada uno de los modelos de carga definidos y que fueron simulados en el software I-Blast.

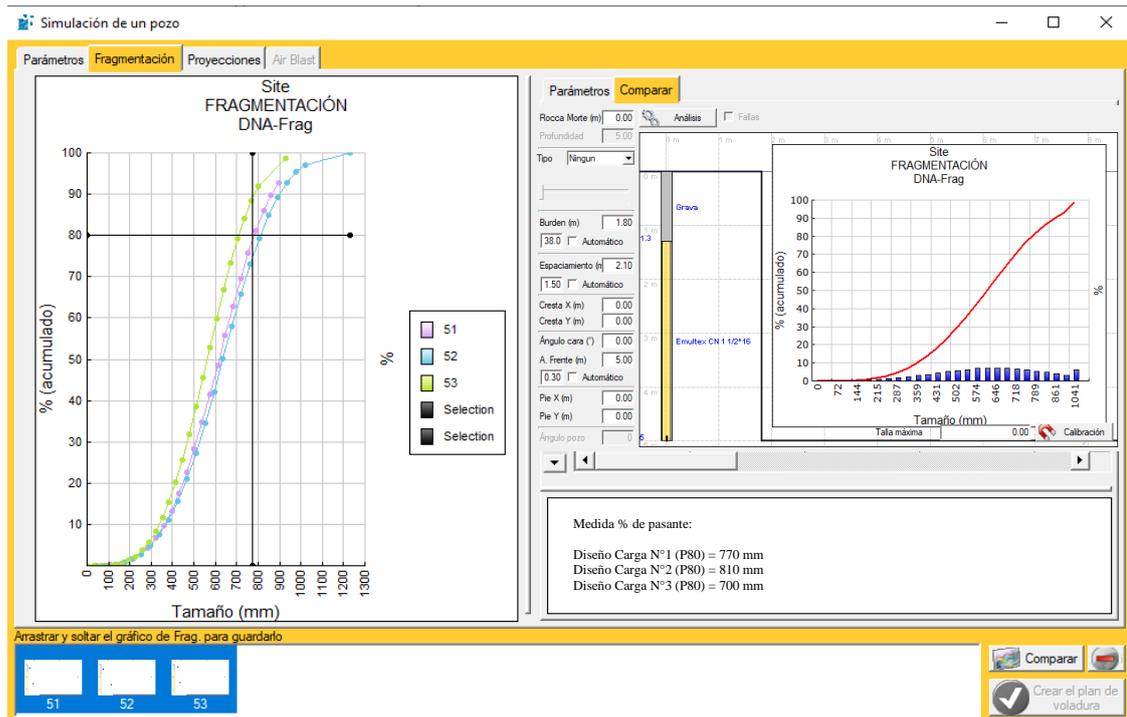


Figura 2.13. Simulación de fragmentación – I Blast.

Fuente: Elaboración propia.

Simulación de Proyección. Este análisis nos permitirá ajustar la carga teórica en los taladros con el fin de evitar proyecciones verticales. El modelo aplicado sobre las cargas teóricas nos permitirá simular proyecciones en términos de fly rock y efecto cráter, similar al análisis de fragmentación se deberá ir optimizando hasta el cumplimiento de los objetivos.

La realización de esta simulación toma relevancia considerando que las voladuras que se ejecutaran están colindantes con el río Asana, cualquier evento de proyección podría acarrear observaciones sobre el proceso constructivo. La figura 2.14 nos muestra los resultados de simulación para cada uno de los modelos propuestos, donde podemos visualizar que ninguno de los modelos generara proyección vertical o efecto cráter.

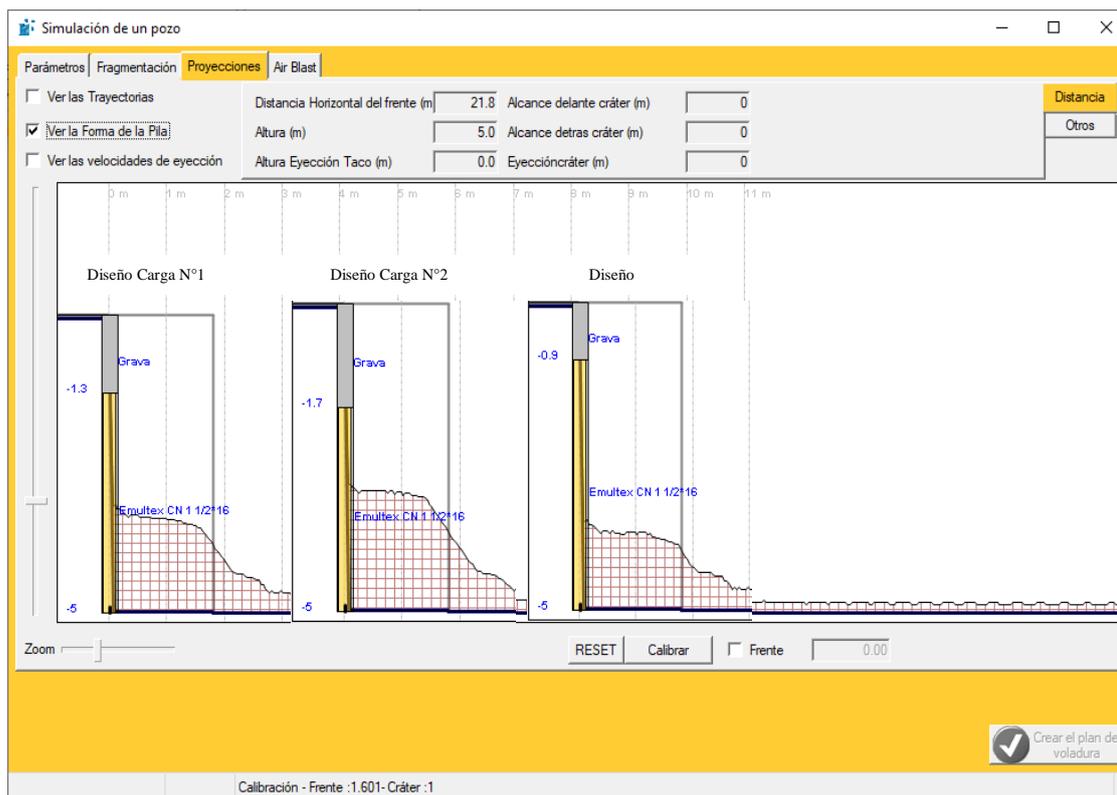


Figura 2.14. *Simulación de proyección – I Blast.*

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Vibraciones en Voladura

La vibración es una cantidad dinámica que varía con el tiempo y esto exige cuidado en su medición. Desde un punto de vista físico, la más natural manifestación es el desplazamiento que se produce cuando la vibración pasa por un lugar determinado. Este desplazamiento de partículas se puede diferenciar para obtener la velocidad pico partícula que a su vez se puede diferenciar para obtener la aceleración de la partícula. (Spathis & Noy, 2009).

Tabla 2.20. Relación entre desplazamiento de partícula, velocidad y aceleración.

Given kinematic quantity	Calculated kinematic quantity		
	$s(t)$	$v(t)$	$h(t)$
$s(t)$	No change	$\frac{ds}{dt}$	$\frac{d^2s}{dt^2}$
$S(f)$		$2\pi f S(f)$	$4\pi^2 f^2 S(f)$
$v(t)$	$\int v dt$	No change	$\frac{dv}{dt}$
$V(f)$	$\frac{V(f)}{2\pi f}$		$2\pi f V(f)$
h	$\int \int h dt$	$\int h dt$	No change
$H(f)$	$\frac{H(f)}{4\pi^2 f^2}$	$\frac{H(f)}{2\pi f}$	

Fuente: Vibrations from blasting, 2009.

Las vibraciones producidas en el terreno por efectos de voladuras son consecuencia de la detonación de cargas explosivas que liberan grandes cantidades de energía en forma de presión, estas pueden ser definidas como movimientos oscilatorios debido al paso de ondas de compresión y tensión.

2.4.1. Generación de Ondas Sísmicas por Voladura

Durante el proceso de detonación de una carga explosiva en el interior de un taladro, se libera una gran cantidad de energía, generando altas presiones y temperaturas; estos cambios bruscos que se experimenta en el taladro van a simular choques o impactos bruscos sobre el macizo rocoso produciendo deformaciones axiales y tangenciales de manera esférica causando el fracturamiento de la roca.

Para quebrar una roca, es requerida una gran potencia por sobre una gran energía. Tan solo el 40-50% de la energía liberada por un explosivo se transforma en trabajo útil, mientras que el resto se libera en forma de calor, vibraciones y energía acústica. Rascheff y Goemas (1977) han establecido un modelo teórico de reparto de

energía a partir de ensayos sobre bloques cúbicos de roca sumergidos en piscinas. Estos investigadores afirman que cerca del 53% de la energía del explosivo está asociada a la onda de choque, valor que depende de las condiciones de la experimentación, del tipo de roca que se desea fragmentar y del explosivo utilizado. (Bravo, 2018)

En el contorno del barreno podemos considerar tres zonas, en función de la magnitud de la presión de la onda de choque (Salchidrián & Muñiz, 2000):

La Zona más Inmediata al Barreno. donde la presión de la onda de choque es superior a la resistencia a compresión de la roca, originando su pulverización, lo que produce el consiguiente amortiguamiento de la onda de choque por el elevado consumo de energía. La extensión de esta zona es muy limitada, del orden de algunos diámetros alrededor del barreno y en ella se produce un fuerte amortiguamiento de la onda de choque. Según Hagan (1997) en esta zona se consume casi el 30% de la energía que transporta la onda de choque.

La Zona de Deformación Plástica. aquí la presión de la onda de choque no excede la resistencia a compresión de la roca, pero sí el límite elástico, produciéndose básicamente deformaciones permanentes (plásticas). En esta zona se producen además grietas radiales, muy intensas en las inmediaciones del barreno, por efecto de las tensiones tangenciales de tracción. Esta zona se extiende varios diámetros a partir de la zona anterior. La cantidad de la energía de la onda de choque es del orden de 5 -15% del total de la energía liberada por el explosivo.

La Zona Elástica. se extiende indefinidamente a partir de la anterior. En esta zona los esfuerzos no superan el límite elástico a compresión del material, lo que hace que este tenga un comportamiento elástico, aunque también en ella se producen

algunas fracturas radiales como consecuencia de esfuerzos de tracción. El consumo de energía es prácticamente nulo y la amortiguación de la onda solo se debe, al aumento de superficie sobre la que actúa.

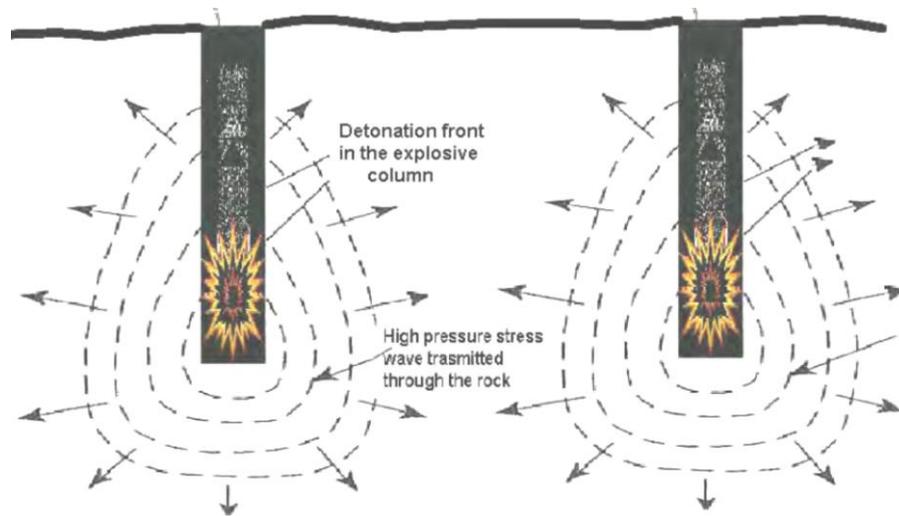


Figura 2.15. *Ondas producidas por la detonación de una mezcla explosiva.*

Fuente: ISSE – Fundamentos prácticos de voladura, 2008.

2.4.2. Características del Movimiento Ondulatorio

Las vibraciones producidas por las voladuras pueden ser asemejadas a ondas sinusoidales, que se propaga radialmente alrededor de la detonación. Cuando estos se propagan en régimen elástico, no hay movimiento irreversible de material, solo la transferencia de energía de un punto a otro.

Un movimiento oscilatorio se define cuando se conocen las siguientes características:

Características de las Partículas:

- Desplazamiento.
- Velocidad.
- Aceleración.

- Duración de las vibraciones de las partículas.

Características de las Ondas:

- Velocidad de propagación.
- Longitud de onda de vibración.
- Frecuencia de propagación.
- Atenuación de onda en función del medio de propagación.

De una forma simplificada, el movimiento vibratorio se asemeja a un movimiento sinusoidal armónico, definido por la siguiente ecuación:

$$u(x, t) = u_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right)$$

Para obtener la velocidad y la aceleración, se realizan la primera y segunda derivada con referencia al tiempo, respectivamente:

$$\dot{u}(x, t) = \frac{du}{dt} = \left(\frac{2\pi}{f}\right)^2 \cdot u_{max} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right)$$

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{d^2u}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{f}\right)^2 \cdot u_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right)$$

Esta fórmula presentada resulta inadecuada para poder describir el fenómeno vibratorio producido por la voladura, debido a que esta se compone de varios tipos de ondas con diferentes características, que le da a este fenómeno en estudio una mayor complejidad a la que se presenta. Sin embargo, consideramos que este el mejor método simplificado para su caracterización.

2.4.3. Tipos de Ondas

Las vibraciones que se propagan por el suelo dentro de un régimen elástico están compuestas por ondas con características diferentes, que al interactuar con medios de propagación heterogéneos nos van a dar como resultados una vibración con patrón pseudoaleatorio.

A continuación, podemos clasificarlas en dos grupos:

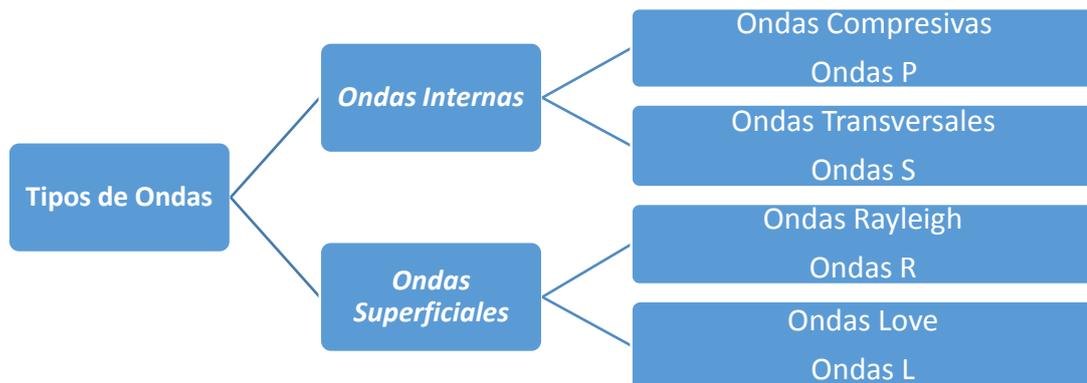


Figura 2.16. Tipos de Ondas.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3.1. Ondas Internas. Este tipo de ondas se caracterizan por ejercer una propagación esférica dentro del macizo rocoso e inducir movimientos unidireccionales en las partículas del suelo. Estos asumen mayor importancia, a nivel de la energía liberada en la proximidad de la fuente que los genera. Las ondas internas están conformadas por ondas compresivas o denominadas ondas “P” y ondas transversales u ondas “S”.

Onda Compresiva – P. Las ondas “P” se propagan en el suelo induciendo una deformación longitudinal en la dirección de su propagación, consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión. Este tipo de ondas generalmente viajan a velocidades de 1.73 veces de la onda “S”, siendo la primera que arriba a los puntos de monitoreo.

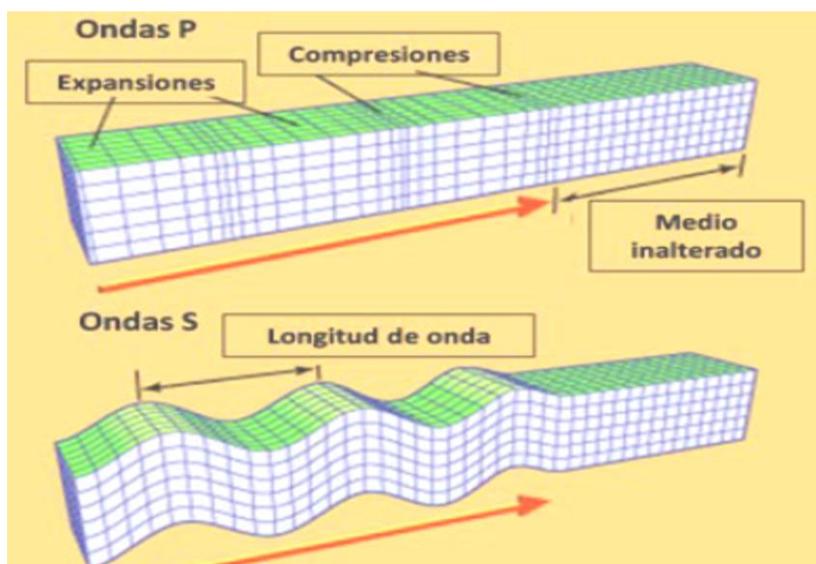


Figura 2.17. *Ondas sísmicas internas.*

Fuente: <http://mydpanel.net/adjuntosTextos/cz47hroew7iqkp/673/Sowitec-Pelayo-Verdu.pdf>.

Onda Transversal – S. Las ondas “S” generan una deformación en el suelo transversalmente a su dirección de propagación por lo cual son denominados ondas de cizalladura o de corte, se registran en segundo lugar en los sismógrafos por su menor amplitud y velocidad. Estas solo se propagan en cuerpos sólidos, ya que los fluidos no resisten los esfuerzos cortantes.

2.4.3.2. Ondas Superficiales. Este tipo de ondas se caracterizan por ejercer una propagación en las interfaces del terreno como fallas, contactos geológicos y en la superficie del suelo, induciendo vibraciones bidimensionales. El origen de estas ondas resulta de la transformación de las ondas internas cuando estas se cruzan como resultado de la anisotropía de los materiales. Se caracterizan por tener gran amplitud y duración, así como baja frecuencia. Por lo tanto, las podemos catalogar como destructivas, y adquieren mayor importancia con mayores distancias de transmisión. Las

ondas superficiales más importantes son las Rayleigh o denominadas ondas “R” y ondas Love u ondas “Q”.

Onda Rayleigh. Las ondas “R” se propagan elípticamente en planos verticales, teniendo la misma dirección de la dirección de propagación. La propagación de estas ondas es mayor que las ondas internas, sin embargo, disminuye rápidamente al aumentar la distancia a la interfaz. La velocidad de difusión de estas ondas es aproximadamente 0.9 de las ondas transversales.

Onda Love. Las ondas “Q” se propagan en planos horizontales, siendo el tipo de oscilación elíptica al igual que las ondas “R”, estos tienen altas amplitudes y bajas frecuencias, pudiendo diferenciarse únicamente en su velocidad de propagación que es ligeramente superior.

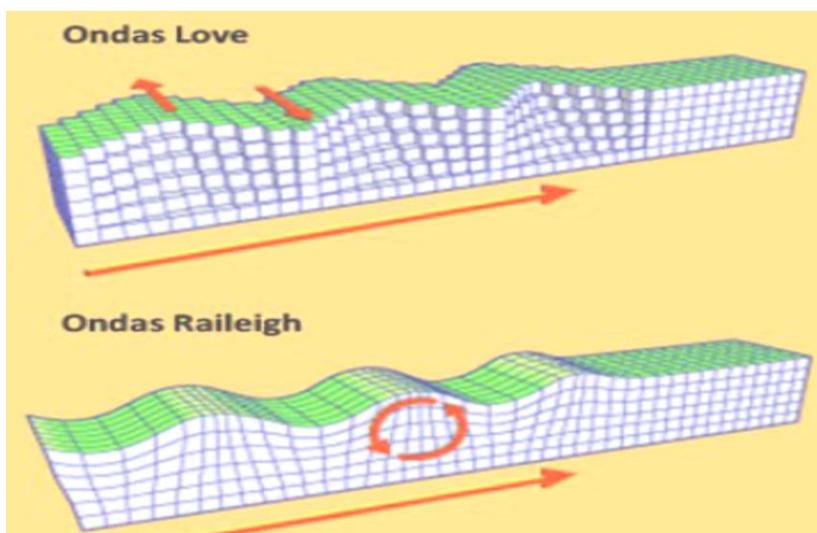


Figura 2.18. *Ondas sísmicas superficiales.*

Fuente: <http://mvdpanel.net/adjuntosTextos/cz47hroew7iqkp/673/Sowitec-Pelayo-Verdu.pdf>.

2.4.4. Velocidad de Propagación de la Onda

Se puede definir como el desplazamiento por unidad de tiempo tomando como referencia a una acción compresiva que se propaga a través de cualquier medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Cuando se genera un sismo se manifiesta como una complejidad de ondas que se propagan a través del terreno, de varias maneras.

De todos los tipos de ondas presentes en un sismo, se estudia la onda P (López Jimeno, 1980).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}}$$

Donde:

E = Módulo de Young.

γ = Relación de Poisson.

ρ = Densidad del medio (roca).

2.4.5. Velocidad de la Partícula (VP)

A medida que las ondas sísmicas se desplazan a través de un área, estas generan movimiento de partícula, a los cuales llamamos vibraciones. El movimiento de la partícula en la superficie del suelo es increíblemente similar al movimiento de un corcho sobre una superficie de agua cuando una ola pasa por debajo. La velocidad de la partícula del corcho expresa cuan rápido este se balancea hacia arriba y hacia abajo, mientras que la ola que pasa por debajo se desplaza a una velocidad de onda mucho más rápida. El corcho en movimiento (partícula vibrante) tiene un desplazamiento, una frecuencia de velocidad y aceleración. (ISEE, 2008, p. 543).

Muchas veces se confunden los conceptos de velocidad de propagación de la onda con velocidad de la partícula, si bien es cierto que guardan correlación, pero la primera esta referenciada a la velocidad con la que la vibración se propaga por un medio transmisor, mientras que la segunda está determinada por las oscilaciones que experimenta una partícula, excitada por el paso de las ondas de energía vibratoria.

2.4.5.1. Análisis de la Velocidad Pico Partícula (VPP). Para poder medir, informar y discutir acerca de la intensidad de la vibración es importante asignarle una unidad de medida que puede estar relacionada al desplazamiento, velocidad y aceleración. Actualmente la más común y empleada es la velocidad pico partícula (VPP) para expresar la intensidad de las vibraciones sobre el terreno generadas por la voladura. En la mayoría de los casos, esta se va a relacionar más estrechamente al potencial de daño sobre estructuras que a la aceleración o desplazamiento. Por lo general esta unidad de medida puede ser expresada en in/s o mm/s.

Generalmente, los límites propuestos por distintas normativas son establecidas en base a las medidas de la VPP (velocidad pico partícula), por lo que la correcta medición y almacenamiento de este parámetro no solo es considerado importante, sino también crítico para cualquier operación minera (Carlos Agreda, 2010).

2.4.5.2. Análisis de Frecuencia (f). Cuando buscamos determinar el potencial de daño que puede sufrir una estructura como consecuencia de la voladura, no solo se puede determinar desde el punto de vista del VPP, sino también podemos considerar la frecuencia de la misma cuya unidad es el Hertz (Hz). Para poder determinar la respuesta de la estructura con respecto a las vibraciones, podemos clasificarla por rangos de frecuencia baja y alta. La frecuencia está representado por el número de oscilaciones de onda que se pueden repetir por segundo, dentro de este análisis las que son consideradas como frecuencias con alto potencial de daño son las que se ubica en el rango bajo (5 – 20 Hz), esto debido a que la respuesta del terreno natural normalmente se encuentra en frecuencia de rangos bajos lo que causaría una absorción mayor de la energía por parte de la estructura, aumentando las probabilidades de generarse algún daño.

Por este motivo, es muy importante poder determinar cuáles son las frecuencias que participan en el tren de onda generada por la voladura; sin embargo, un tren de onda puede contener diferentes niveles de frecuencias, por lo que es necesario calcular cuales son las frecuencias que más dominan en dicho tren y eso se puede hacer hallando el espectro de frecuencias del mismo (Carlos Agreda, 2010).

2.4.6. Factores que Influencian en la Propagación de la Vibración

Para poder minimizar los efectos negativos producidos por la vibración, resulta necesario identificar cuáles son las variables que van a influenciar directamente sobre su propagación en el terreno. Dentro de estas variables que se van a identificar distinguiremos factores controlables y no controlables, todo esto va a depender de la adaptabilidad al dimensionar el corte y diagrama de la voladura.

A continuación, en la tabla 2.21, describiremos los principales parámetros identificados y que están directamente relacionado a la generación de efectos vibracionales.

Tabla 2.21. Factores que influyen en la magnitud de la vibración.

	Influencia en la vibración		
	Importante	Moderadamente importante	Insignificante
<i>Variables controlables</i>	Peso de carga explosiva por retardo	X	
	Intervalos de retardo	X	
	Parametros geométricos de voladura		
	* Burden y espaciamiento		
	* Confinamiento de carga		
	* Longitud y diametro de carga	X	
	* Angulo e inclinación de la carga		
	* Profundidad de carga		
	*Cantidad y tipo de taco		
	Peso de carga por detonación	X	
Dirección de iniciación	X		
Cordón detonante descubierto o no			X
<i>Variables no controlables</i>	Geología local	X	
	Tipo de material de cobertura	X	
	Espesor de material de cobertura	X	
	Distancia entre la voladura y punto de monitoreo	X	
	Propiedades del macizo rocoso	X	
	Error de tiempo de iniciación		X
	Superficie del terreno		

Fuente: Adaptado de Rosenthal, et al., 1987.

2.4.6.1. Variables Controlables.

Carga Operante. Considerado el factor más importante y de mayor influencia sobre la magnitud de la vibración, está referido a la cantidad de explosivos que van a detonar en un mismo tiempo de retardo. Este parámetro está relacionado a variables geométricos de la voladura como por ejemplo el diámetro de perforación, altura de banco, longitud de carga y uso de decks.

Consumo de Explosivo por Voladura. Relacionado directamente con el factor de carga (kg/m³), una disminución en la cantidad de explosivo por voladura reduciría la cantidad de explosivo por taladro y esto disminuiría la carga operante que a su vez reduciría la magnitud de vibración, pero como efecto negativo una reducción excesiva en el factor de carga podría generar efectos adversos tanto en la fragmentación como en la vibración. Según Gonzales de Vallejo (2002, como se citó en Moreira, 2016) indica que “Para una disminución del 20% del factor de carga en relación a los valores óptimos los niveles de vibración pueden duplicarse o triplicarse”.

Tiempo de Retardo. Durante el proceso de detonación podemos registrar acumulaciones de vibraciones producto de intervalos de tiempo insuficientes entre taladros o cargas, lo que algunos entendidos en la materia recomiendan que para garantizar que esto no suceda se deberían de considerar intervalos de tiempo más grandes, pero muchas veces en la práctica esto no se llega a cumplir de manera efectiva y al contrario podrían generarnos vibraciones de gran amplitud.

A continuación, citaremos a algunos estudios realizados:

- Nobel's Explosives Co: Retardos entre taladros inferiores a 25 ms pueden causar interferencias constructivas, aumentando la velocidad máxima de las partículas.

- Langerfors, 1963: Con demoras 3 veces más largas entre taladros adyacentes al periodo de vibración se puede suponer que no hay amplificación de la amplitud de las ondas.

Parámetros Geométricos de la Voladura. Dentro de los parámetros identificados consideraremos con el más resaltante a la longitud y diámetro de carga, esto debido a que se correlaciona directamente a la cantidad de carga por taladro y a su vez a la carga operante.

Dirección de Iniciación. Si bien es cierto que no se tiene un estudio que nos indique que la elección correcta de la dirección de salida influye en la reducción de la magnitud de la vibración, algunos investigadores indican que una voladura con cara libre permite obtener una mejor disipación de la energía, evitando que esta retorne y golpee. Pero sobre la practica aun podemos indicar que esta no se llega a cumplir de manera efectiva.

2.4.6.2. Variables No Controlables.

Geología. La geología de la zona sumado a la geomecánica de las rocas, son factores que no solo tienen importancia durante el proceso de detonación, estos al ser el medio transmisor de la vibración generada, tienen gran influencia en la magnitud de las mismas. La heterogeneidad de las propiedades geomecánicas y la existencia de una

variedad de litologías nos conlleva a no poder definir un parámetro geológico en específico, al contrario, nos va a presentar filtrados de vibración diversos con frecuencias típicas que pueden variar entre 5 y 100 Hertz. Con efectos de atenuación diferentes.

Material de cobertura. Las diferentes heterogeneidades del terreno, en la mayoría de los casos produce un efecto amortiguador sobre la propagación de la vibración sobre el suelo, pero en condiciones específicas puede producir un efecto amplificador que puede producir un mayor riesgo de daño como es el caso de los suelos estratificados.

Distancia. La magnitud de la vibración generada durante la voladura tiende a disminuirse conforme se vaya ampliando la distancia entre el punto de voladura con referencia a la zona de monitoreo, esto es una respuesta debido a que a mayor distancia tendremos una expansión geométrica de las ondas, así como la separación de los tipos de ondas causadas por diferentes velocidades de propagación. Otra característica que afecta la magnitud de las vibraciones es el hecho que el suelo filtra el componente de altas frecuencias de vibración.

2.4.7. Predicción del Nivel de Vibración Sobre el Terreno

La predicción de los fenómenos vibratorios viene tomando gran importancia dentro del control de las condiciones ambientales y de seguridad, ya que nos va a permitir estimar magnitudes de vibración anticipadas. Pudiendo saber con anticipación y con cierto grado de certeza si las magnitudes de vibraciones generadas por procesos de voladura serán fuentes generadoras de daño.

Actualmente se considera a la velocidad peak de partícula (VPP) como un indicador del potencial de daño asociado a una vibración sísmica. Es por esto que se han creado modelos que estiman el comportamiento de las velocidades de partícula bajo ciertas condiciones especiales de voladura. (Holmberg, Persson, & Lee, 1994)

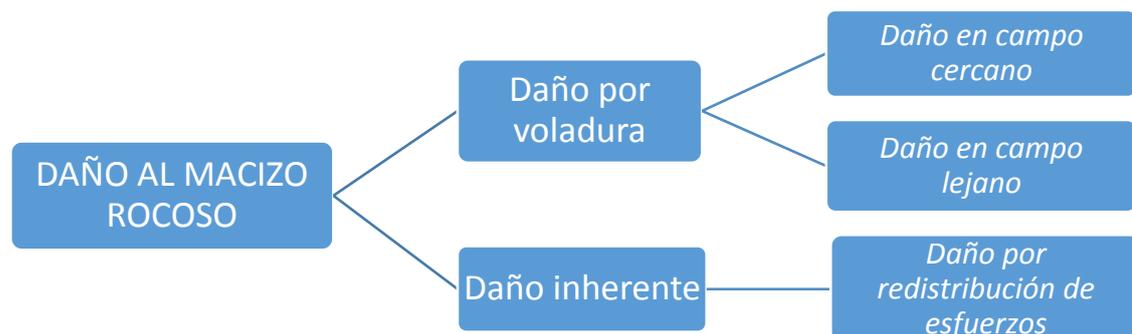


Figura 2.19. Esquema de daños inducidos sobre el macizo rocoso

Fuente: Elaboración propia.

2.4.7.1. Vibración en Campo Lejano. La aceleración de partículas se relaciona frecuentemente al estado friccional de entre los bloques de la masa rocosa, donde podemos considerar que esta tendrá una tendencia a disminuir el coeficiente de fricción de fracturas y planos de diaclasas que se encuentren orientadas desfavorablemente. Cuando realizamos mediciones de magnitudes de vibración en campo lejano, podemos mencionar que conforme la distancia entre el punto de monitoreo con referencia a la

zona de voladura sea mayor, se va a ver fuertemente influenciada no solo por la distancia sino por las características del macizo rocoso y principalmente por el grado de fracturamiento y/o alteración (tipo suelo) que rápidamente las irán atenuando las vibraciones producidas.

Modelo de Campo Lejano. Varios investigadores han estudiado y propuesto diversas fórmulas para poder predecir la vibración sobre el terreno, pero todos han llegado a determinar que la relación matemática entre el nivel de vibración (VPP) es directamente proporcional a la distancia e inversamente proporcional a la carga. El boletín de la agencia de Minas de USA (escrito por Nichols, Johnson y Duvali en 1971) expresa la siguiente relación:

Modelo vibracional general:

$$V = k \left(\frac{D}{Q^\alpha} \right)^{-\beta}$$

La expresión $\left(\frac{D}{Q^\alpha} \right)$ se le denomina distancia escalada, y hace referencia a una relación directa que los niveles de vibración generados a diferentes distancias y para diferentes cantidades de explosivos. Para el valor de las constantes se deberán realizar previamente ensayos midiendo la vibración que producen cargas conocidas a distancias definidas, determinando coeficientes de correlación y la desviación estándar.

A continuación, algunos criterios para definir la distancia escalada (SD):

- Langerfors y Kihisrom, 1973 $SD = \left(\frac{D}{Q^{3/2}} \right)$
- Akbraseys y Hendron, 1968 $SD = \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)$

- Devine (1962), United States Bureau of Mines (USB), 1980 $SD = \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)$

El modelo para la predicción de vibración en campo lejano más utilizado es el de Devine. Se suele asumir como campo lejano a una distancia $D > 3-5$ veces la longitud de la carga. Para efectos del presente estudio, el modelamiento considerara distancias entre 10 y 40 metros al punto de voladura.

Modelo de Devine:

$$PPV = k \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

VPP = Velocidad Pico Partícula (mm/s).

D = Distancia al punto de monitoreo (m).

Q = Carga máxima por tiempo de retardo (kg).

K = Factor de Velocidad.

α = Factor de decaimiento.

Este modelo de distancia escalada de Devine es la que mejor representara el comportamiento de la vibración en campo lejano para carga cilíndricas, a su vez está basado en un análisis estadístico de un gran número de datos tal como se muestra en la figura 2.20.

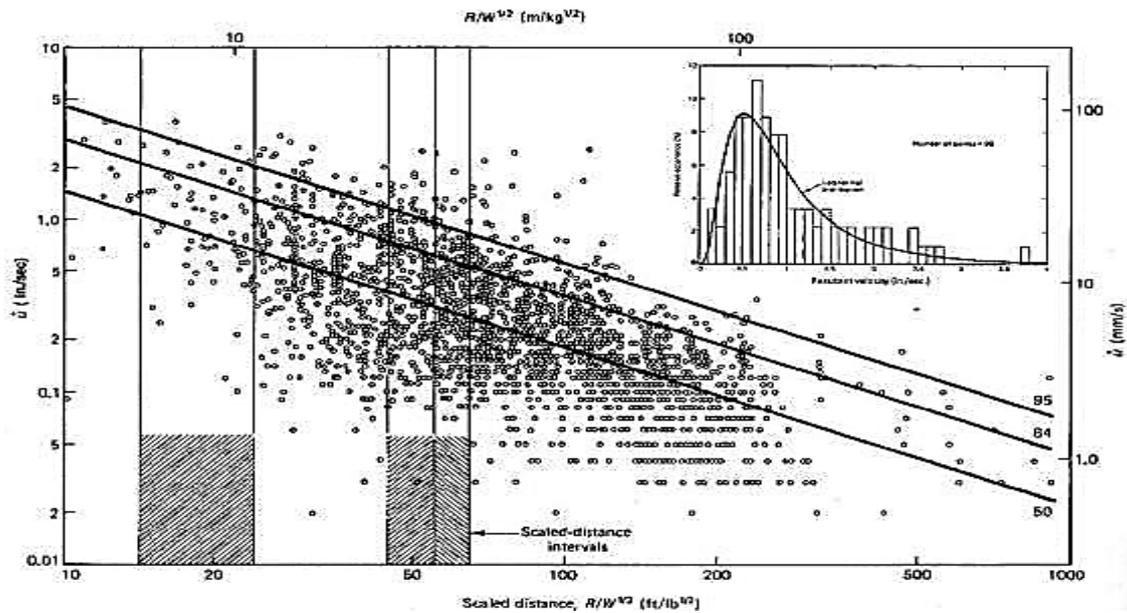


Figura 2.20. *Típica dispersión de datos, velocidad pico-partícula vs distancia escalada cuadrada.*

Fuente: Dowding, C. H., 2000.

2.4.7.2. Vibración en Campo Cercano. La velocidad de partículas será analizado mediante este método para poder estimar el grado de fracturamiento que va presentar el macizo rocoso inducido por la voladura, para ello se buscara caracterizar la propagación de la vibración de la masa rocosa y de la relación entre la vibración y la deformación, haciendo posible establecer contornos de fracturamiento alrededor de un pozo o halo de daño; dicho diagrama será un indicador para controlar la quebradura detrás de la voladura y poder asignarle una distancia mínima requerida entre la última fila con referencia a la pared final. Para nuestro presente estudio no será motivo de análisis, pero a continuación mencionare el modelo más utilizado para realizar este tipo de estudios.

Modelo de Campo Cercano. (Holmberg, et al., 1994) nos menciona que “la onda sísmica se desplaza en el macizo rocoso en una forma elíptica, decreciendo en la

distancia y que el daño en el entorno al pozo cargado, es la resultante del quiebre en este entorno elástico y homogéneo del medio en el que se transmite" (p. 244).

Considera una columna de explosivo y cargas cilíndricas infinitesimales en toda la columna, cada una de longitud dx , siendo q el peso por unidad de longitud de cada carga. El peso lineal de explosivo estará dado por:

Peso de la carga, Holmberg and Pearsson

$$W = q * dx$$

En función de la forma de la carga y de la ecuación general de las partículas, se tiene la velocidad peak de la partícula:

Modelo de velocidad, Holmberg and Pearsson

$$v = K q^\alpha \left[\int_0^h \frac{dx}{\{R_0^2 + (z-x)^2\}^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha$$

VPP resultado, Holmberg and Pearsson

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

Donde:

u = Velocidad peak de partícula.

k, α, β = Constantes empíricas determinadas por monitoreo en campo lejano.

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

x = Posición de carga elemental medido desde el fondo del pozo (m).

R_0 = Distancia de medición desde la carga (m).

El termino encerrado en corchetes hace referencia a la distancia escalada correspondiente al factor de Holmberg and Pearsson (Factor H&P).

Este modelo no toma en consideración el tamaño de la voladura, secuencia de retardos ni grado de confinamiento del explosivo. Es por eso que los resultados obtenidos con este modelo generalmente serán superiores a los encontrados en el terreno.

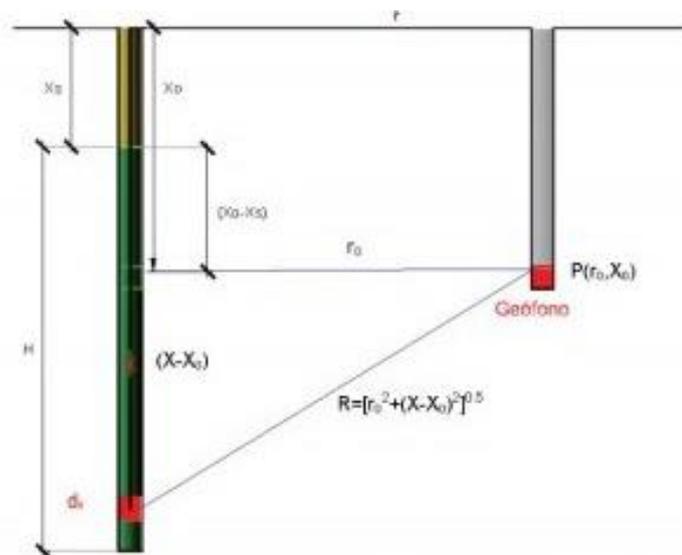


Figura 2.21. Integración de la onda de superficie en la región cercana de una carga extendida.

Fuente: Persson, Holmberg & Lee, 1994.

CAPITULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Metodología de la Investigación

3.1.1. Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación es de carácter APLICATIVO, conforme a los propósitos y naturaleza de la investigación.

La investigación aplicada tiene la intención de mejorar una situación y contribuir a construir un nuevo conocimiento. Según Jiménez (1988) menciona que “Si el problema surge directamente de la practica social y genera resultados que pueden aplicarse (son aplicables y tienen aplicación en el ámbito donde se realizan) la investigación se considera aplicativa” (p. 14).

3.1.2. Nivel y diseño de Investigación

El nivel de investigación a emplear es EXPLICATIVO con diseño de carácter EXPERIMENTAL.

Según Sampieri (1997) menciona que “Los estudios explicativos van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales” (p. 74).

Según Sampieri (2014) “Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control.” (p. 129).

3.1.3. Población y Muestra

La población para el presente estudio comprende todas las voladuras que se van a realizar cerca de las estructuras de concreto dentro del proyecto “Construcción de Obras a Pie de Botadero – Área 2000”.

El tipo de muestreo empleado es no probabilístico y estará representada por la voladura de prueba y/o voladuras masivas que se ejecuten para obtener valores iniciales del comportamiento vibracional de la zona en estudio.

3.1.4. Técnicas e Instrumentos para recoger información

La fuente utilizada para la recolección de datos será PRIMARIA, ya que la información obtenida será por contacto directo con el sujeto de estudio, utilizando como instrumento:

- Guías de observación,
- Sismógrafos, con geófonos triaxiales
- Registros de consumo de explosivos y accesorios
- Software de voladura I-Blast.7.8

3.1.5. Técnicas de procedimiento de datos

Según Sampieri (2014) menciona que “En la actualidad, el análisis cuantitativo de los datos se lleva a cabo por computadora u ordenador. Ya casi nadie lo hace de forma manual ni aplicando formulas, en especial si hay un volumen considerable de datos” (p. 272).

. Para el análisis de los datos del presente estudio codificaremos cada una de las voladuras realizadas y observadas, esto con el apoyo del software de simulación de voladura I-Blast 7.8. La metodología de trabajo que se empleara considera cuatro aspectos fundamentales para el logro de los objetivos:

1.- Definir inicialmente un diseño de malla con carga y secuencia de detonación para taladro prueba y voladuras masivas, este proceso será realizado tomando en consideración información relevante obtenida en campo y gabinete.

2.- Se efectuará seguimiento y control a las actividades de perforación y carguío, para poder evidenciar desvíos en el proceso que pudieran afectar el cumplimiento de los objetivos.

3.- Evaluar resultados post voladura y mediante la aplicación de técnicas de evaluación y software de análisis poder cualificar y cuantificar parámetros de interés (carga, distancia, vibración) que nos permitan optimizar nuestros diseños iniciales.

4.- Finalmente se generará planes e informes de voladura para cada proyecto, donde se especificará los objetivos iniciales y las medidas adoptadas para el cumplimiento de las misma.

A continuación, presentaremos un procedimiento general de control para voladuras y subprocesos inmersos para el planeamiento, control y optimización de voladuras que nos conlleven al cumplimiento de los objetivos propuesto como parte de nuestro estudio:



Figura 3.1. *Procedimiento de control de una voladura.*

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Desarrollo del Trabajo de Tesis

El presente estudio se llevará a cabo en proyecto minero Quellaveco de cobre y molibdeno, la mina tajo abierto se ubica a 3500 m.s.n.m. en el valle de Quellaveco. Los trabajos de construcción que se realizarán sobre dicha zona son: Dique de control, poza de aguas eventuales, pozos de monitoreo, y un sistema de impulsión y conducción de aguas contactadas; para el logro de los objetivos de realizarán movimientos masivos de tierra y roca, por lo cual se consignarán trabajos paralelos de construcción y movimiento de tierras.

Las voladuras previstas a ejecutarse se encuentran ubicadas en el área 2000 de la mina y específicamente en los márgenes derechos e izquierdos de la cuenca del río Asana, para lo cual previamente las aguas habían sido desviadas mediante un túnel de descarga aguas abajo del botadero de la mina, fuera del área de operaciones de la mina.

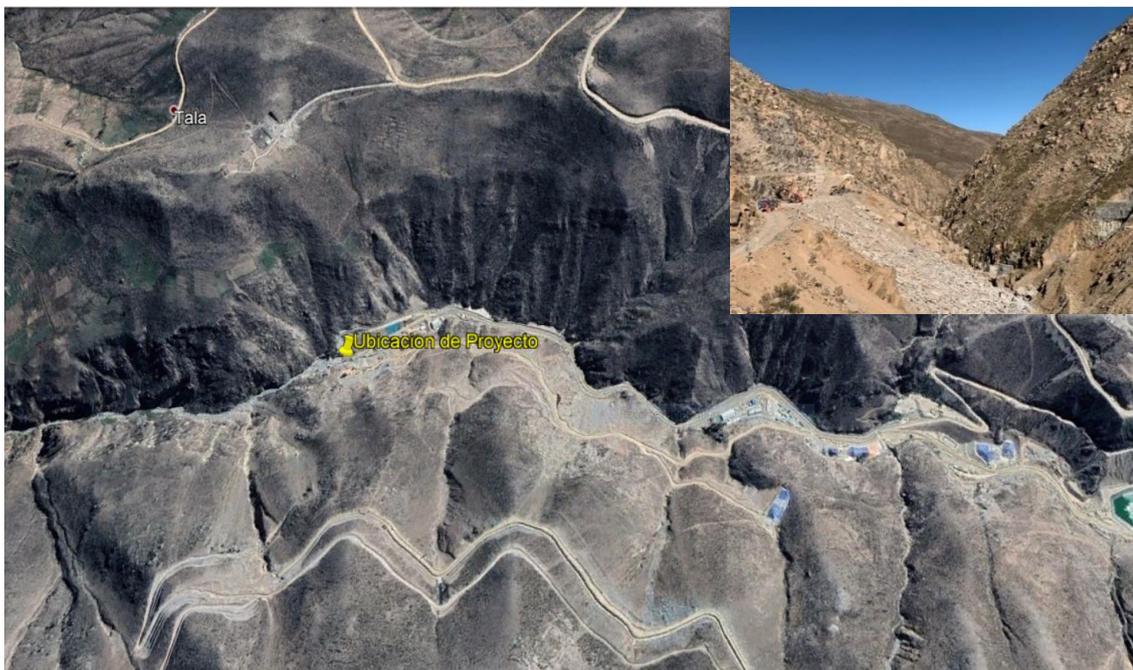


Figura 3.2. Ubicación de zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Zona de Prueba

La determinación de la zona de prueba estará sujeta a condiciones del terreno, cercanía a las estructuras a controlar la vibración y fácil acceso para realizar la perforación. Por lo agreste de la zona fue necesario realizar la caminata para su determinación.

Para la selección de las zonas iniciales para la realización de los taladros de prueba, se tomó en consideración los siguientes aspectos:

- Litología similar entre zona de prueba y proyectos de voladura.
- Zona cercana a puntos de monitoreo que nos permitan capturar ondas sísmicas en los puntos de monitoreo o puntos de control para estructuras.
- Información geología y geotécnica de la zona.



Figura 3.3. *Determinación zona inicial de prueba.*

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Monitoreo de Vibraciones

Cuando se generan vibraciones, las partículas del suelo se mueven en todas las direcciones hasta que puedan alcanzar un punto de reposo. Para describir este movimiento dentro de un proceso de voladura generalmente se realiza mediciones sobre 3 direcciones perpendiculares; donde el eje principal que tiene la dirección de la voladura registra valores de la componente longitudinal y las otras dos que se generan en direcciones ortogonales se denominan componente vertical y transversal.



Figura 3.4. *Orientación del geófono con respecto a la voladura.*

Fuente: ISSE – Fundamentos prácticos de voladura, 2006.

El monitoreo de las voladuras estará dividido en dos etapas; en una primera etapa se posicionarán los sismógrafos para la captura de data sísmica generada por la detonación de taladros prueba, para posteriormente en una segunda etapa realizar el monitoreo de voladuras masiva y con puntos de control fijo en zonas de interés.

3.3.1. Características del Equipo y Software

Silva-Castro (2012, como se citó en Moreira, 2016) El equipo para monitorear vibraciones consta de transductores que convierten señales mecánicas (desplazamiento, velocidad, aceleración o deformación) en señales eléctricas, que son transmitidos a través de un cable a un sistema de amplificación y almacenamiento. El funcionamiento de los transductores simples consiste en un imán móvil suspendido dentro de una bobina, en la cual, cuando el imán se mueve en relación con la bobina crea una corriente eléctrica proporcional al movimiento del imán. A su vez, el movimiento del imán es proporcional al desplazamiento, velocidad y aceleración del punto muestreado; Actualmente los transductores más utilizados por la industria están fabricados con materiales piezoeléctricos, que al deformarse generan corrientes eléctricas proporcionales al desplazamiento, velocidad y aceleración.

Sismógrafo VIBRACORD Gaia, 03 Canales y Pica de 2 – 250 Hz. Instrumento que permite medir el nivel de vibraciones en canales Longitudinal, Vertical y transversal que se generen producto de las voladuras. Estos pueden ser ubicados acorde a los requerimientos de monitoreo del proyecto, la figura 3.5 muestra los sismógrafos a emplear en el presente estudio.



Figura 3.5. Sismógrafo Vibracord Gaia.

Fuente: Elaboración propia.

Software I-Blast 7.8. Software de simulación de voladura que está basado en parámetros físicos y matemáticos que nos permiten tener un 90% de predicción de los efectos de la voladura. Cuenta con módulos de diseño de malla, simulación de energía, simulación de vibraciones. La figura 3.6 nos muestra algunos cálculos realizados por el software.

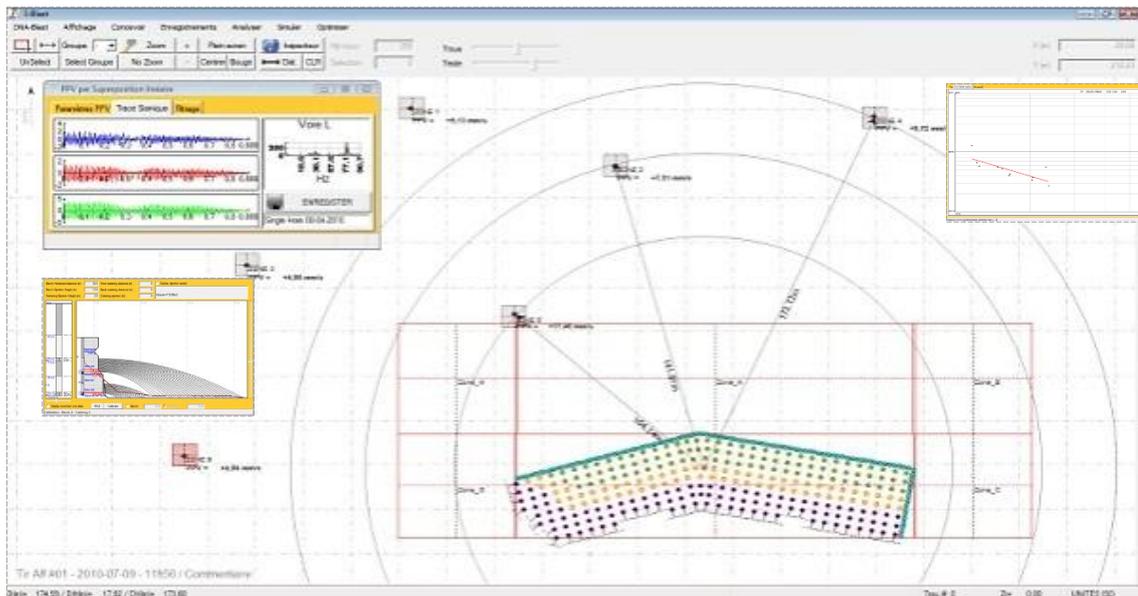


Figura 3.6. Software I-Blast Versión 7.8.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Ubicación de los Sismógrafos

Para el presente estudio, conjuntamente con el área de ingeniería de JJC se determinó 03 puntos de monitoreo que son consideradas como críticas dentro del proceso constructivo:

- Plataforma de Bombas (sistema de impulsión y conducción de aguas contactadas)

X= 323414.419

Y= 8108535.378

Z= 3311.825

- Plinto (zona que será el soporte de la estructura del dique)

X= 323385.626

Y= 8108599.352

Z= 3296.384

- Túnel de salida (túnel de descarga del río Azana).

X= 323355.425

Y= 8108561.785

Z= 3280.351

La figura 3.7 nos muestra la ubicación de los puntos de monitoreo con relación a la zona donde se ejecutarán las voladuras para el proyecto en construcción.



Figura 3.7. Zonas de monitoreo de vibraciones.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Trabajos en Oficina/Gabinete

Los trabajos realizados en oficina consistieron en la recolección de data de estudios técnicos del proyecto o cerca al proyecto, información de estudios anteriores de la metodología a emplear e información recolectada en campo; todo ello fue seleccionado, procesado, analizado y posteriormente utilizado para los estudios a realizar como parte del cumplimiento de los objetivos.

En el capítulo II, se determinaron parámetros iniciales para actividades de perforación y voladura (burden, espaciamento, longitud de perforación, selección de explosivo, factor de carga y modelo de carga). Ahora procederemos a iniciar con el desarrollo de la metodología de ley de atenuación.

3.4.1. Selección de Constantes Teóricas Iniciales k y α

Explicado ya en el capítulo anterior, el modelo predictivo que generaremos para el presente estudio se basara en la distancia escalada de devine:

$$PPV = k \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

Para su aplicación es indispensable encontrar las constantes k y α , para poder determinar estos valores es necesario la realización de regresión no lineal, con el avance de la tecnología y presencia de diversos softwares en minería en la actualidad. Nos apoyaremos en el software I-Blast que nos permite obtener dichos valores con mayor rapidez.

(McKenzie, 1994) afirma, debido a que la ecuación de distancia escalar combina la influencia de la pérdida friccional y la dispersión geométrica, el exponente α variará de acuerdo a las condiciones del lugar y tendrá un valor que siempre debe ser mayor

que 1 (ya que un valor de $\alpha=1$ representa el caso de una dispersión esférica sin tomar en cuenta la pérdida friccional) y comúnmente en el rango de 1.5 a 1.8. Tipos de rocas masivas y competentes tendrán un valor de α menor que para tipos de rocas fracturadas, meteorizadas o de baja resistencia. (p. 28)

(McKenzie, 1994) afirma que el término **K** describe la amplitud inicial del choque o pulso de vibración a alguna distancia muy próxima al hoyo. Por lo tanto, es dependiente del peso del explosivo por metro de hoyo y de la potencia del explosivo en el hoyo (p. 28)

Dado que los modelos predictivos tienen componentes en común, evaluaremos algunos modelos australianos para poder determinar nuestras constantes iniciales, dichos modelos son:

Modelo A: Voladuras muy confinadas

$$PPV = 5000 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.6}$$

Modelo B: Voladura a una cara libre en roca dura y muy estructurada (RMR entre 21 – 40, roca tipo IV)

$$PPV = 500 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.6}$$

Modelo C: Voladura con una cara libre en roca promedio o media (RMR entre 41 – 60, roca tipo III)

$$PPV = 1140 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.6}$$

Habiendo realizado el análisis de los tres modelos y tomando en consideración la geología, condiciones estructurales del macizo y distribución de energía del explosivo; concluimos que de los tres modelos el que más se adapta a nuestras condiciones presentadas en campo el modelo "C", por ello nuestras constantes iniciales o teóricas para estimar nuestras velocidades de partícula serán:

$$K_{teórico} = 1140$$

$$\alpha_{teórico} = -1.6$$

3.4.2. Estimaciones de Velocidades Pico Partículas (VPP)

Dentro de la búsqueda de minimizar el riesgo de daño producido por las voladuras, resulta imperativo la aplicación de modelos matemáticos que nos permitan determinar con anticipación, posibles magnitudes de vibración (velocidad pico partícula) a obtener producto de procesos de detonación. Determinada de manera teórica el modelo predictivo inicial, procederemos a predecir velocidades pico partículas en cada uno de los puntos de monitoreo considerados críticos dentro del proyecto, para ello nos apoyaremos en el software de voladura I-Blast donde ingresaremos los modelos de carga propuestos, coordenadas del taladro, coordenadas de la zona de monitoreo y constantes teóricas iniciales.

3.4.2.1. Simulaciones Taladro Prueba. Se realizaron simulaciones de VPP en cada uno de los puntos de monitoreo para modelos de carga predefinidos (figura 2.12).

- La figura 3.8 nos muestra las magnitudes sísmicas obtenidas a partir de la simulación con modelo de predicción sísmica para el modelo de carga N°1 (ver tabla 3.1)

Tabla 3.1. Configuración de modelo de carga N° 1.

Modelo de carga N° 1		
Diametro		2 pulg
Longitud		5 m
Kg. Explosivo		5.3 kg
Tiempo de retardo		800 ms
Coordenadas	X	323403.6
	Y	8108552.9
	Z	3311.64

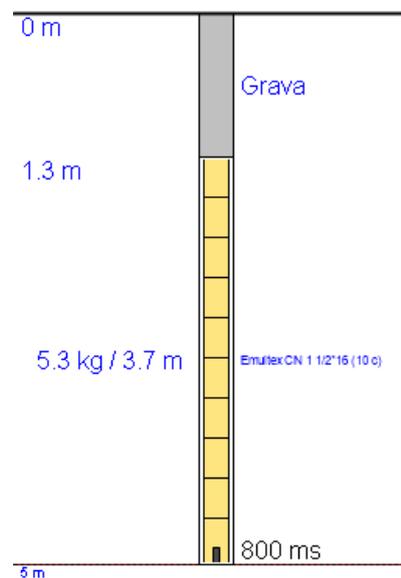


Figura 3.8. Simulación de VPP para modelo de carga N°1.

Fuente: Elaboración propia.

- La figura 3.9 nos muestra las magnitudes sísmicas obtenidas a partir de la simulación con modelo de predicción sísmica para el modelo de carga N°2 (ver tabla 3.2)

Tabla 3.2. Configuración de modelo de carga N° 2.

Modelo de carga N° 1		
Diametro		2 pulg
Longitud		5 m
Kg. Explosivo		4.8 kg
Tiempo de retardo		800 ms
Coordenadas	X	323403.6
	Y	8108552.9
	Z	3311.64

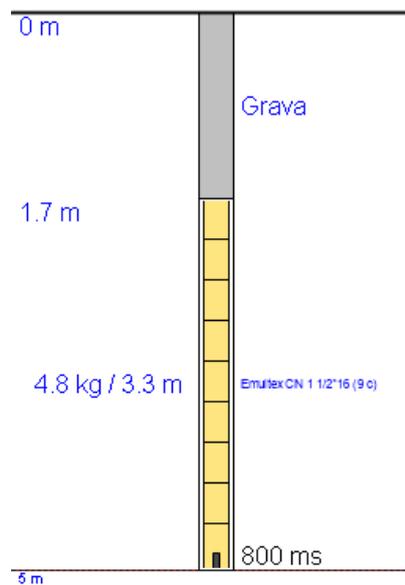


Figura 3.9. Simulación de VPP para modelo de carga N°2.

Fuente: Elaboración propia.

- La figura 3.10 nos muestra las magnitudes sísmicas obtenidas a partir de la simulación con modelo de predicción sísmica para el modelo de carga N°3 (ver tabla 3.3)

Tabla 3.3. Configuración de modelo de carga N° 3.

Modelo de carga N° 1		
Diametro		2 pulg
Longitud		5 m
Kg. Explosivo		5.8 kg
Tiempo de retardo		800 ms
Coordenadas	X	323403.6
	Y	810852.9
	Z	3311.64

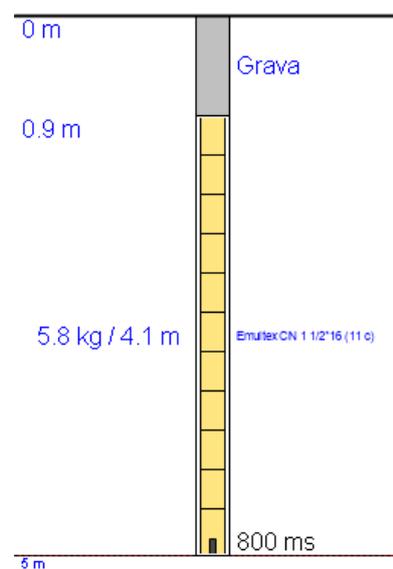


Figura 3.10. Simulación de VPP para modelo de carga N°3.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Determinación de Carga Óptima – Taladro Prueba

Para determinar la carga optima requerida para las pruebas iniciales y voladuras masivas serán analizados y definidos de acuerdo a 03 objetivos planteados para la voladura:

Vibración. es la condicionante principal para determinar el mejor escenario a tomar en consideración los limites indicados según la tabla 1.1 “Limites de vibración”. La tabla 3.4 nos muestra un resumen de los valores simulados obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo y para cada tipo de carga propuesto.

Tabla 3.4. Resumen de VPP simulado por zonas de control.

Zonas de Control	Distancia (m)	Modelo Carga N°1		Modelo Carga N°2		Modelo Carga N°3	
		Kg. Explosivo	VPP (mm/s)	Kg. Explosivo	VPP (mm/s)	Kg. Explosivo	VPP (mm/s)
Plinto	46.90	5.30	9.32	4.80	8.60	5.80	10.02
Plat. Bombas	53.90	5.30	18.05	4.80	16.57	5.80	19.49
Túnel	30.70	5.30	7.51	4.80	6.95	5.80	8.06

Fuente: Elaboración propia.

Fragmentación. no es un condicionante determinante, pero como en toda voladura es un parámetro que nos permitirá medir la eficiencia de nuestras voladuras. La tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos de la simulación en el software I-blast por cada modelo.

Tabla 3.5. Resumen de P80 simulado por modelo de carga.

Modelo de Carga	Burden (m)	Espaciamiento (m)	Factor de Carga (Kg)	Explosivos (Kg)	P 80 (mm)
N° 1	1.80	2.00	0.29	5.30	770
N° 2	1.80	2.00	0.27	4.80	810
N° 3	1.80	2.00	0.32	5.80	700

Fuente: Elaboración propia.

Proyección – Fly rock. se considera este parámetro debido a que en la zona de voladuras de prueba y masivas, se tiene equipos como perforadoras, tableros eléctricos, materiales de construcción y sobre todo el paso del río Asana, al cual no se debe de proyectar ningún tipo de material volado. La tabla 3.6 muestra los resultados obtenidos de la proyección (fly rock) simulada en el software I-blast por cada modelo.

Tabla 3.6. Resumen de fly rock simulado por modelo de carga.

Modelo de Carga	Altura de Taco (m)	Longitud de Taladro (m)	Explosivos (Kg)	Fly rock (Kg)
N° 1	1.30	5.00	5.30	0.00
N° 2	1.70	5.00	4.80	0.00
N° 3	0.90	5.00	5.80	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los objetivos planteados para las voladuras, podemos indicar que desde el punto de vista de la vibración podemos elegir el modelo 2, si consideramos la fragmentación el modelo 3 y para controlar la proyección fly rock el modelo 1. En conclusión, para mantener un equilibrio entre los 3 objetivos elegiremos el modelo de carga 1, el cual deberá ser ajustado conforme se realicen las voladuras de prueba y voladuras masivas.

3.5. Análisis de Información

Detallado la metodología a emplear para poder determinar un modelo predictivo que nos permita estimar velocidades de propagación máximas de una partícula para nuestro terreno y/o estructuras motivo de estudio. Procederemos a recolectar información de arribos de ondas reales obtenidas de las voladuras de taladros de prueba propuestas para el proyecto, analizar con el I-Blast 7.8, que es un software que se destaca por su versatilidad y diversas herramientas que nos permitirán realizar cálculos

y simulaciones, finalmente validaremos los datos obtenidos para poder determinar un modelo predictivo que nos asegure cierto grado de confiabilidad r las predicciones de vibraciones para voladuras masivas. La figura 3.11 muestra la metodología a emplear.

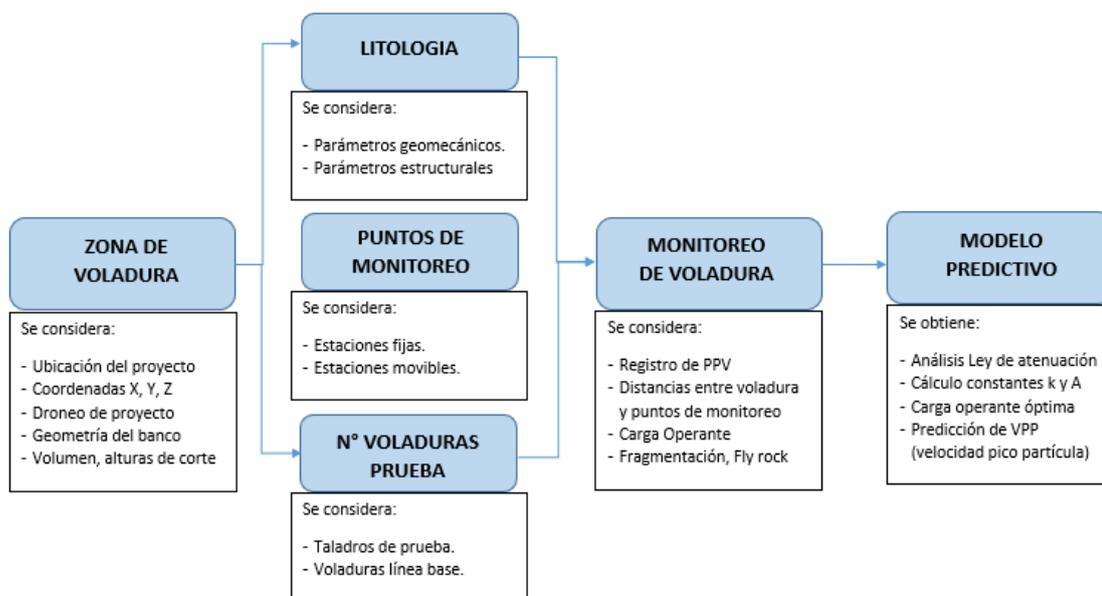


Figura 3.11. Diagrama de flujo - modelo predictivo.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1. Captura de Ondas Elementales – Taladro Prueba

Se consignaron realizar inicialmente un total de 03 taladros de prueba para poder registrar valores sísmicos en las zonas de Plinto, Plataforma de bombas y Túnel salida; para ello se iban a instalar sismógrafos en cada uno de los puntos de monitoreo mencionados, esto con la finalidad de obtener 03 registros por zonas que nos permitirán realizar el análisis de ley de atenuación para cada una de ellas y obtener valores reales de k y Alpha. Considerando el análisis inicial de predicción sísmica realizada con constantes teóricas determinadas de modelos australianos podemos definir los siguiente:

Zona Túnel. La vibración máxima obtenida en la simulación inicial fue de 8.06 mm/s (ver tabla 3.4), este valor de velocidad pico partícula resulta considerablemente baja tomando en cuenta que el límite máximo permisible para una estructura de concreto consolidada es de 150 mm/s (ver tabla 1.1).

Zona Plataforma de Bombas. La vibración máxima obtenida en la simulación inicial fue de 19.49 mm/s (ver tabla 3.4), este valor aun no puede ser cuantificado para la zona debido a que no se vienen realizando aun trabajos de construcción.

Zona Plinto. La vibración mínima obtenida en la simulación inicial fue de 8.60 mm/s (ver tabla 3.4), este valor resulta considerablemente alta tomando en cuenta que se iniciaran los trabajos de inyección de concreto para impermeabilizar el terreno incrementando su resistencia y módulo de deformabilidad, por lo cual el límite máximo permisible inicial para un concreto según edad es de 5 mm/s, el cual ira aumentando conforme lleve mayor tiempo de consolidación (ver tabla 1.1).

De lo analizado podemos determinar que la zona más crítica y expuesta a daños por efectos de vibraciones no controladas se ubica en el Plinto, por ello se determinó que las constantes iniciales del terreno a determinar deberán calcularse en dicha zona para poder tener una modelo de predicción sísmica inicial.

3.5.1.1. Taladro de prueba

Ubicación del Taladro y Puntos de Monitoreo. Se definieron 03 puntos de monitoreo en línea en la zona de Plinto, para poder registrar magnitudes sísmicas que nos permitan analizar el comportamiento de atenuación de la roca en dicha zona. La posición del furo y puntos de monitoreo en la zona de estudio se pueden apreciar en la figura 3.12.



Figura 3.12. *Ubicación de taladro prueba y puntos de monitoreo.*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7. *Coordenadas del taladro prueba y puntos de monitoreo.*

Tipo	Coordenadas		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Taladro Prueba	323405.831	8108555.017	3309.732
Sismografo 1	323382.101	8108592.647	3295349
Sismografo 2	323379.639	8108595.96	3295.141
Sismografo 3	323377.29	8108597.595	3296.288

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de Proyección (fly rock). Para el análisis de proyección y desplazamiento, se realizó un vuelo de dron para el levantamiento de la superficie y posterior análisis con el software I-Blast 7.8, como se muestra en la figura 3.14.

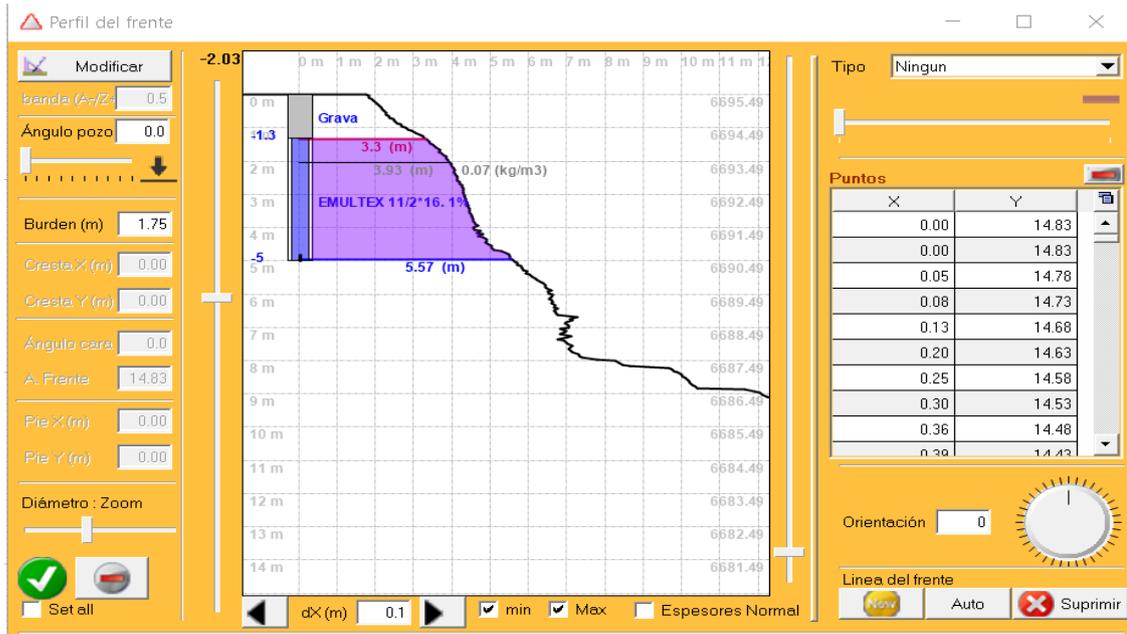


Figura 3.13. Análisis de perfil crítico – Taladro prueba.

Fuente: Elaboración propia.

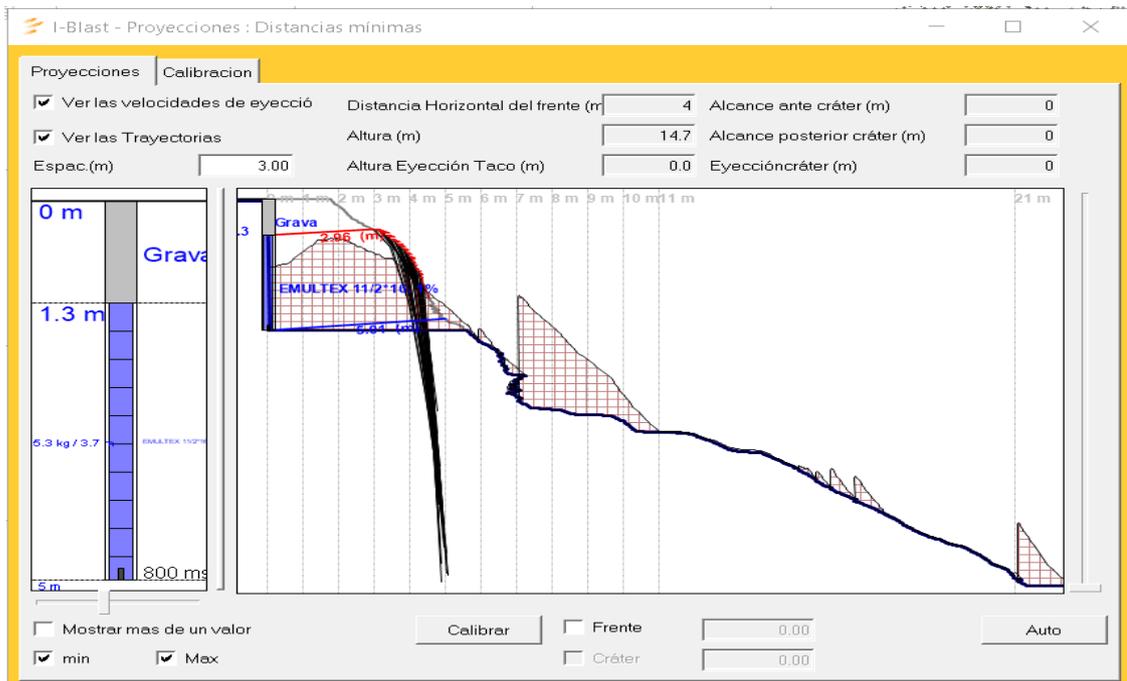


Figura 3.14. Análisis de proyección – Taladro prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Estos análisis fueron considerados necesarios para poder realizar un primer registro de proyección y desplazamiento que podría generar el modelo de carga n° 1, los valores obtenidos de la simulación según se aprecia en la figura 3.12 nos indican que el desplazamiento será mínimo y la proyección fly rock será de 0 metros. Igual se considera el uso de sistemas de protección (sacos de arena).

Captura de Ondas Sísmicas. Realizado el carguío del taladro prueba con el modelo de carga n° 1, se procedió a instalar los sismógrafos según coordenadas determinadas (ver tabla 3.7). La figura 3.15 nos muestra la magnitud del arribo de ondas en cada uno de los puntos de monitoreo.

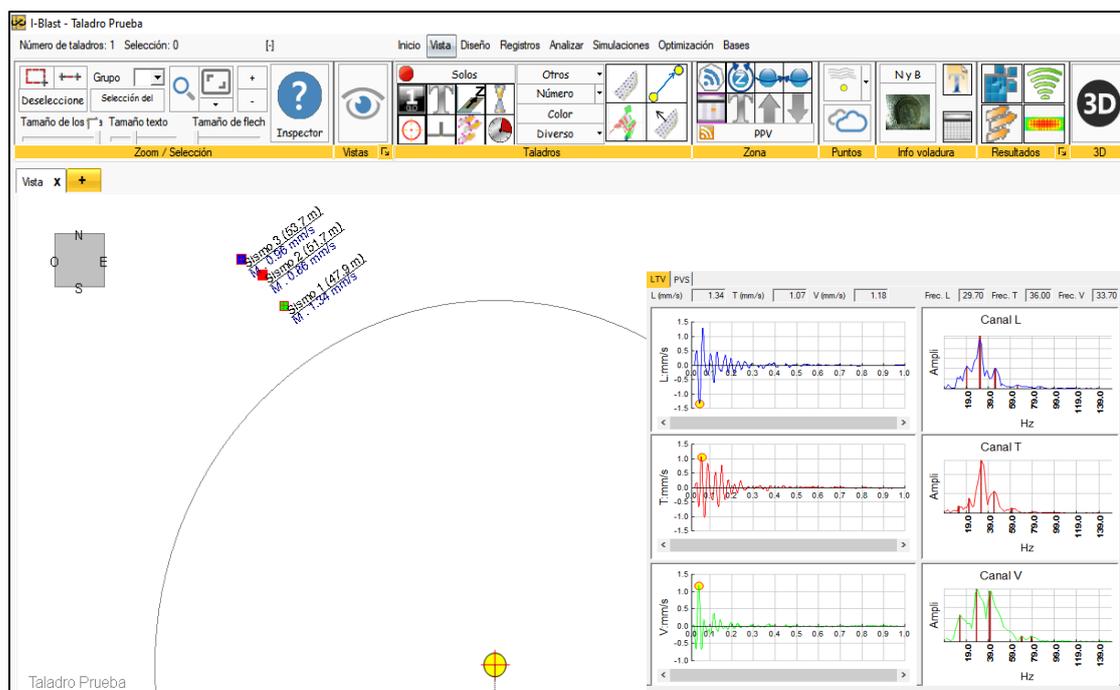


Figura 3.15. Captura de ondas sísmicas – Taladro prueba.

Fuente: Elaboración propia.

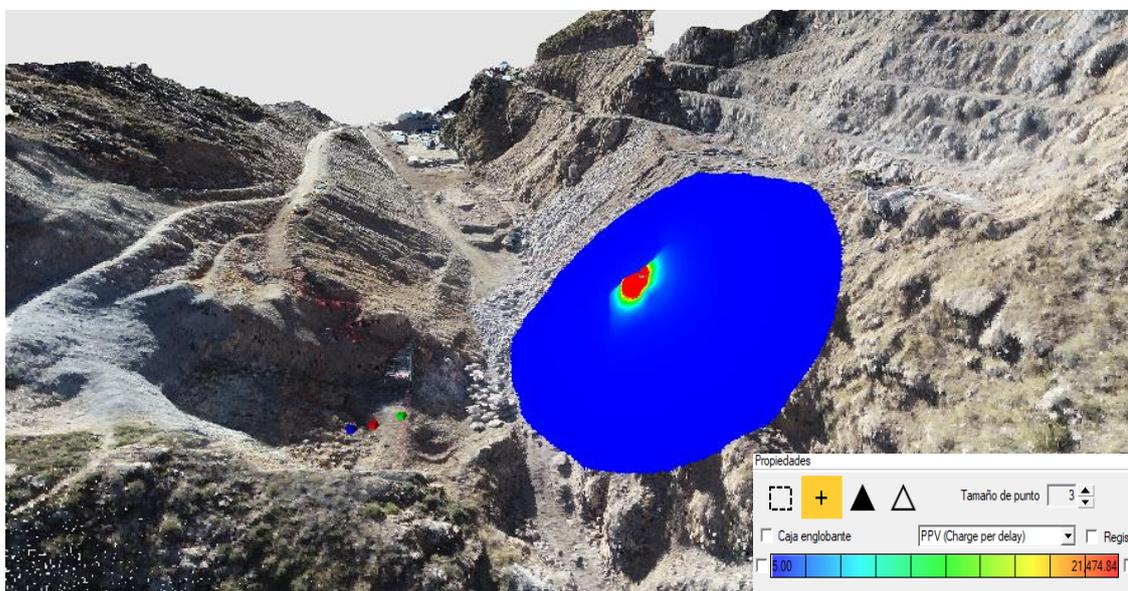
La tabla 3.8 nos muestra un resumen con los VPP obtenidos en cada uno de los sismógrafos, la distancia entre la voladura y los puntos de monitoreo y la carga operante utilizada.

Tabla 3.8. Registro de valores sísmicos – Taladro prueba.

	Velocidad Pico Partícula VPP (mm/s)		Distancia (m)	Explosivo (kg)
Sismografo 1	Longitudinal	1.34	47.85	5.31
	Transversal	1.07		
	Vertical	1.18		
Sismografo 2	Longitudinal	0.86	51.66	
	Transversal	0.54		
	Vertical	0.68		
Sismografo 3	Longitudinal	0.96	53.71	
	Transversal	0.53		
	Vertical	0.63		

Fuente: Elaboración propia.

Otros Registros. Con el apoyo del I-Blast se realizó el mapa de isovibraciones donde el VPP máximo es de 21474.84 mm/s (zona roja) hasta un valor de 5 mm/s (zona azul), que se aprecia en la figura 3.16 y análisis comparativo proyección simulada y obtenida del taladro con I-Blast, como se muestra en la figura 3.17.

**Figura 3.16. Mapa de iso-vibraciones – Taladro prueba.**

Fuente: Elaboración propia.

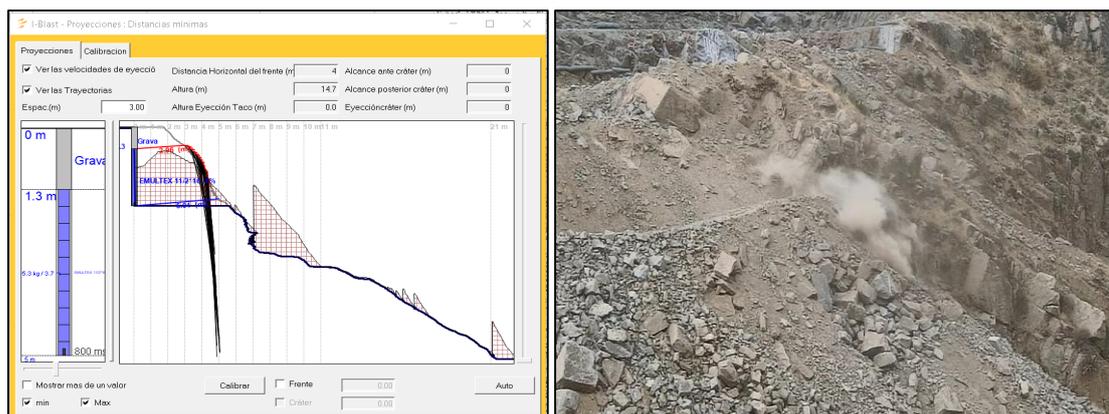


Figura 3.17. Proyección y desplazamiento – Taladro prueba.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Determinación del Modelo Predictivo – Taladro Prueba

3.5.2.1. Selección de datos. Para determinar el modelo predictivo es importante comenzar seleccionando los datos relacionados con la o las voladuras que fueron realizadas en el lugar de estudio. La tabla 3.9 muestra la información recolectada como coordenada del taladro de prueba, coordenadas de los sismógrafos, velocidad máxima registrada por el sismógrafo (VPP), la distancia entre la voladura y los sismógrafos, y la carga instantánea máxima utilizada.

Tabla 3.9. Tabla de datos de análisis – Taladro prueba.

Voladura: Taladro Prueba							Fecha : 15/10/2020		
Zona	X (taladro)	Y (Taladro)	Z (Taladro)	X (sismógrafo)	Y (sismógrafo)	Z (sismógrafo)	VPP	Distancia	Carga
Sismo 1	323,405.83	8,108,555.02	3,309.73	323,382.10	8,108,592.65	3,295.35	1.34 mm/s	47.85 m	5.31 kg
Sismo 2	323,405.83	8,108,555.02	3,309.73	323,379.64	8,108,595.96	3,295.14	0.86 mm/s	51.66 m	5.31 kg
Sismo 3	323,405.83	8,108,555.02	3,309.73	323,377.29	8,108,597.60	3,296.29	0.96 mm/s	53.71 m	5.31 kg

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.2. Análisis de Ley de atenuación. Para el análisis de ley de atenuación es importante cumplir con el número de muestras, al estar representado por una recta

es necesario un mínimo de 03 muestras que son representadas de la siguiente manera: 02 muestras construyen la recta y la tercera realiza el ajuste de la misma. La selección de datos requeridos con características específicas nos va a permitir determinar la ley de atenuación para cada zona. En la actualidad hay diversos softwares que nos permiten realizar este procedimiento, para el presente estudio haremos el análisis con el software I-Blast y también con métodos estadísticos.

Análisis Utilizando el Software I-Blast. Nos apoyaremos en el software de simulación avanzada para el procesamiento de la información obtenida.

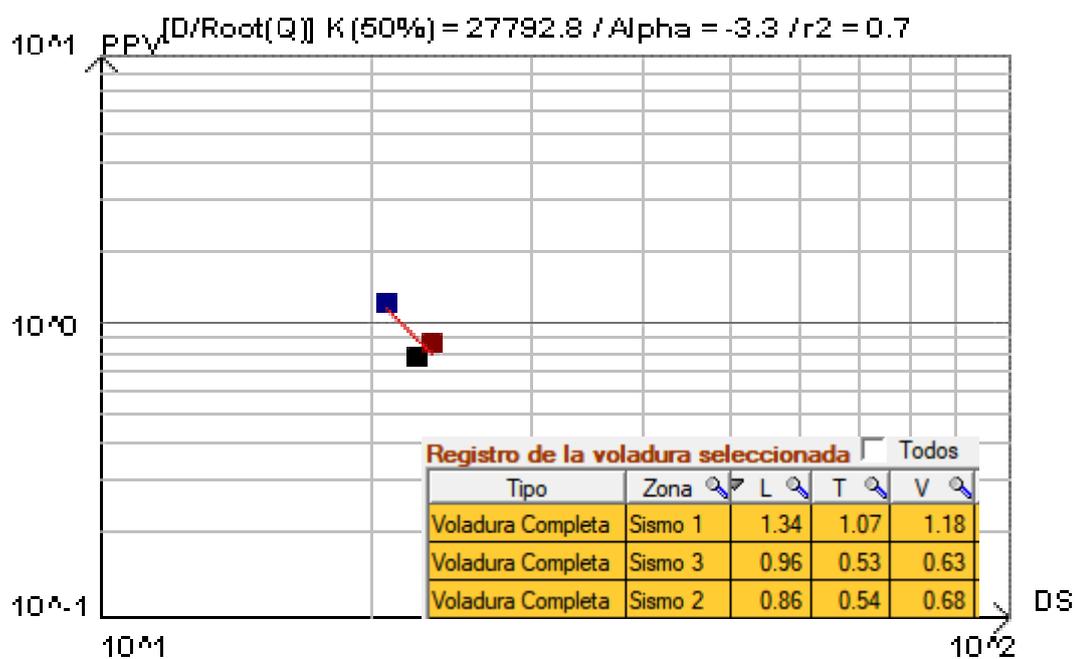


Figura 3.18. Análisis de Ley de atenuación I-Blast – zona Plinto (50% de confiabilidad).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis Estadístico.

Para calcular las constantes k y Alpha nos basaremos en el modelo de devine 1962:

$$VPP = k \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

Esta ecuación tiene un comportamiento potencial:

$$Y = aX^b$$

Para su modelamiento se convierte en una ecuación lineal al cual hay que aplicarle logaritmos, de la siguiente manera:

$$\text{Log}Y = \text{Log}a + b \text{log}X$$

En la tabla 3.10 tenemos el resumen de cálculos logarítmicos realizados para los registros obtenidos en la zona Plinto.

Tabla 3.10. Cálculos logarítmicos de datos – Taladro prueba.

Nº Muestra	PPV (m/s)	Distancia (m)	Carga (kg)	D. Escalada (m/kg ^{1/2})	Log Y	Log X	(Log X) ²	LogX * LogY
Simografo 1	1.34	47.85	5.31	20.77	0.127	1.317	1.735	0.167
Sismografo 2	0.86	51.66	5.31	22.42	-0.066	1.351	1.824	-0.088
Sismografo 3	0.96	53.71	5.31	23.31	-0.018	1.368	1.870	-0.024
Nº Total = 3		Sumatoria (Σ)			0.044	4.035	5.430	0.055

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, mostramos el cálculo de las constante k y Alpha determinadas a través de los registros analizados del taladro prueba con el apoyo de la herramienta Excel.

$$a = \frac{N^{\circ} * \sum(\text{Log}X * \text{Log}Y) - \sum \text{Log}X * \sum \text{Log}Y}{N^{\circ} * \sum \text{Log}X^2 - (\sum \text{Log}X)^2} = -3.29$$

$$k = 10^{\left(\frac{\sum \text{Log}Y}{N^{\circ}} + \frac{a \cdot \sum \text{Log}X}{N^{\circ}}\right)} = 27636.32$$

En la figura 3.19 podemos observar el gráfico estadístico generado en el programa Excel.

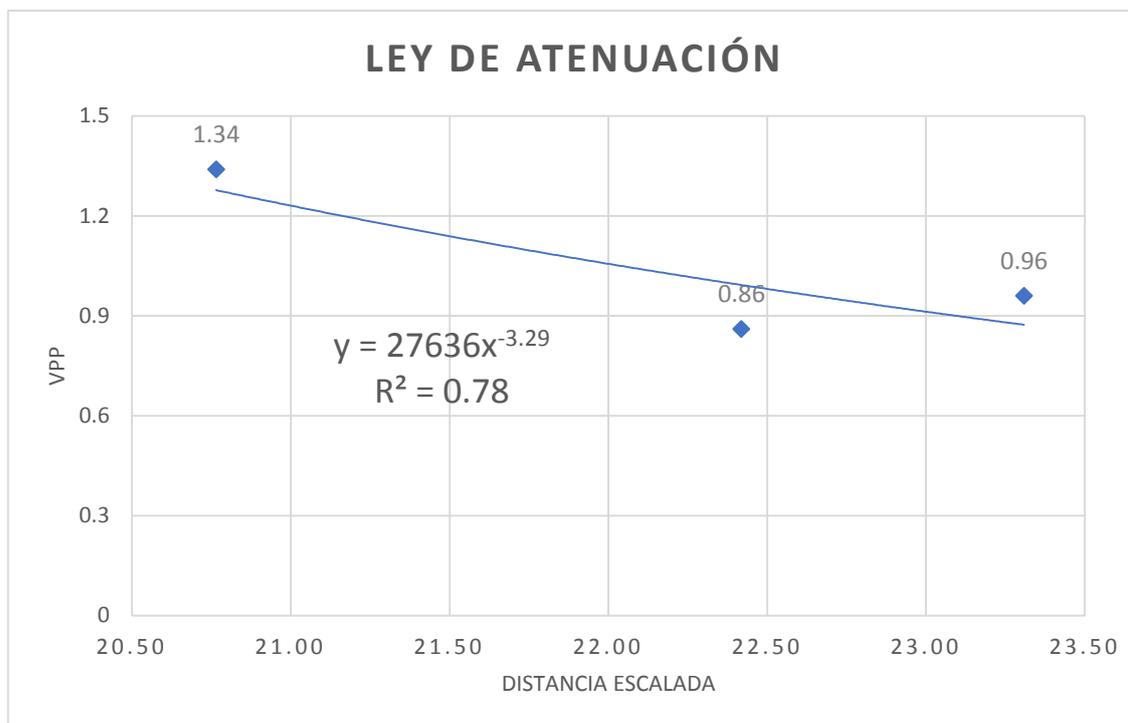


Figura 3.19. Análisis Estadístico Excel– zona Plinto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.3. Modelo de predicción sísmica al 50% y 80% de confianza - zona Plinto.

Realizado el análisis de ley de atenuación, generamos un modelo de predicción sísmica al 50% de confianza, que matemáticamente es correcto, pero podríamos obtener una vibración superior. Para hacer más confiable nuestro modelo se podemos incrementar nuestra confianza a rangos entre 80% y 95%, esto considerando la criticidad de nuestros puntos de monitoreo con respecto a la estimación de vibraciones.

Para nuestro caso consideraremos un modelo de predicción sísmica al 80% de confiabilidad.

- Modelo 50% Confiianza (Original)

$$VPP = 27792.84 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-3.29}$$

- Modelo 80% Confiianza (Ajustado)

$$VPP = 30560.60 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-3.29}$$

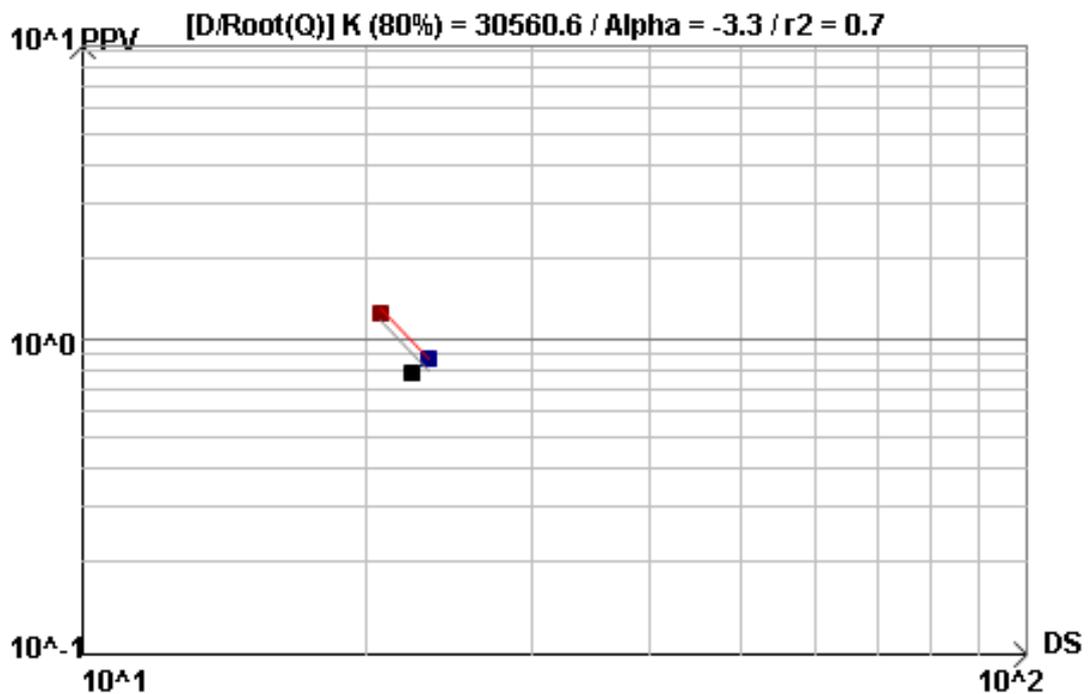


Figura 3.20. Análisis de ley de atenuación I-Blast – zona Plinto (80% de confiabilidad).

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Validación del Modelo Matemático

Se programo ejecutar una voladura masiva en el estribo izquierdo del proyecto, el cual tenía un total de 102 taladros (40 taladros de pre corte y 62 taladros de producción), para ello con el apoyo del software I-Blast 7.8 realizaremos la simulación de vibración en 03 puntos de control (Plinto, Túnel y Plataforma de bombas) según se aprecia en la figura 3.21 y aplicando el modelo matemático determinado con el taladro prueba se obtuvo predicciones sísmica en cada uno de los puntos de control, ver figura 3.22.

3.6.1. Estimación de Velocidades Pico Partículas

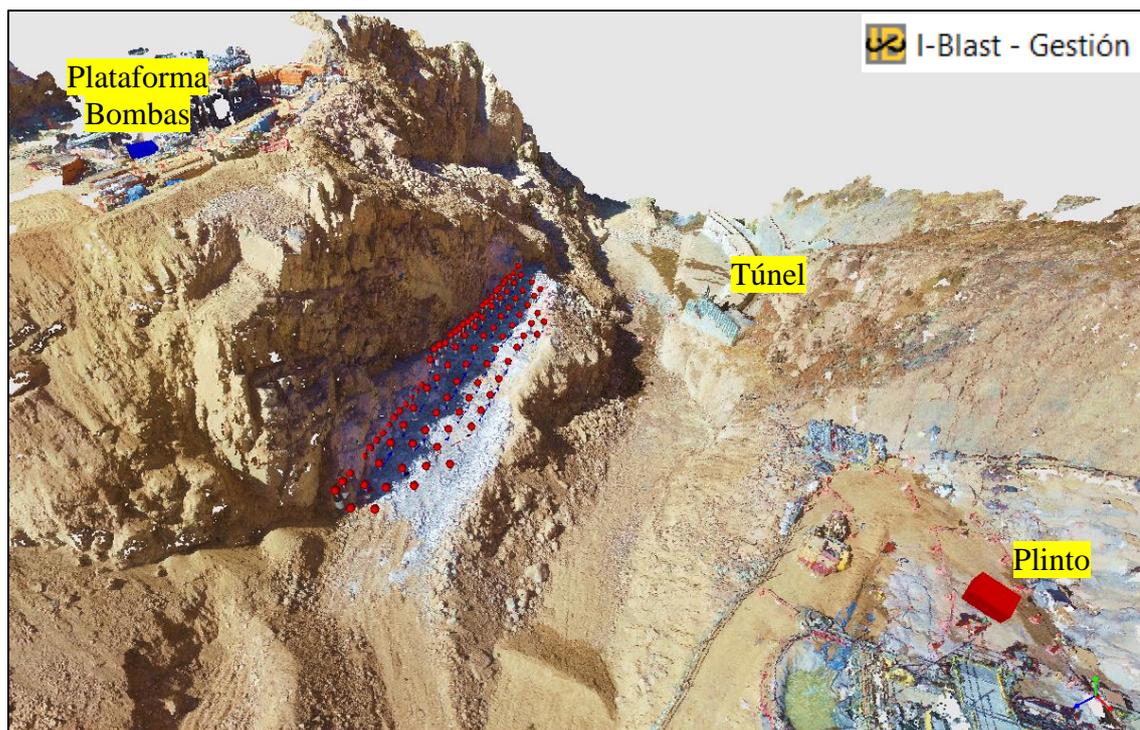


Figura 3.21. *Ubicación de voladura y puntos de monitoreo.*

Fuente: Elaboración propia.

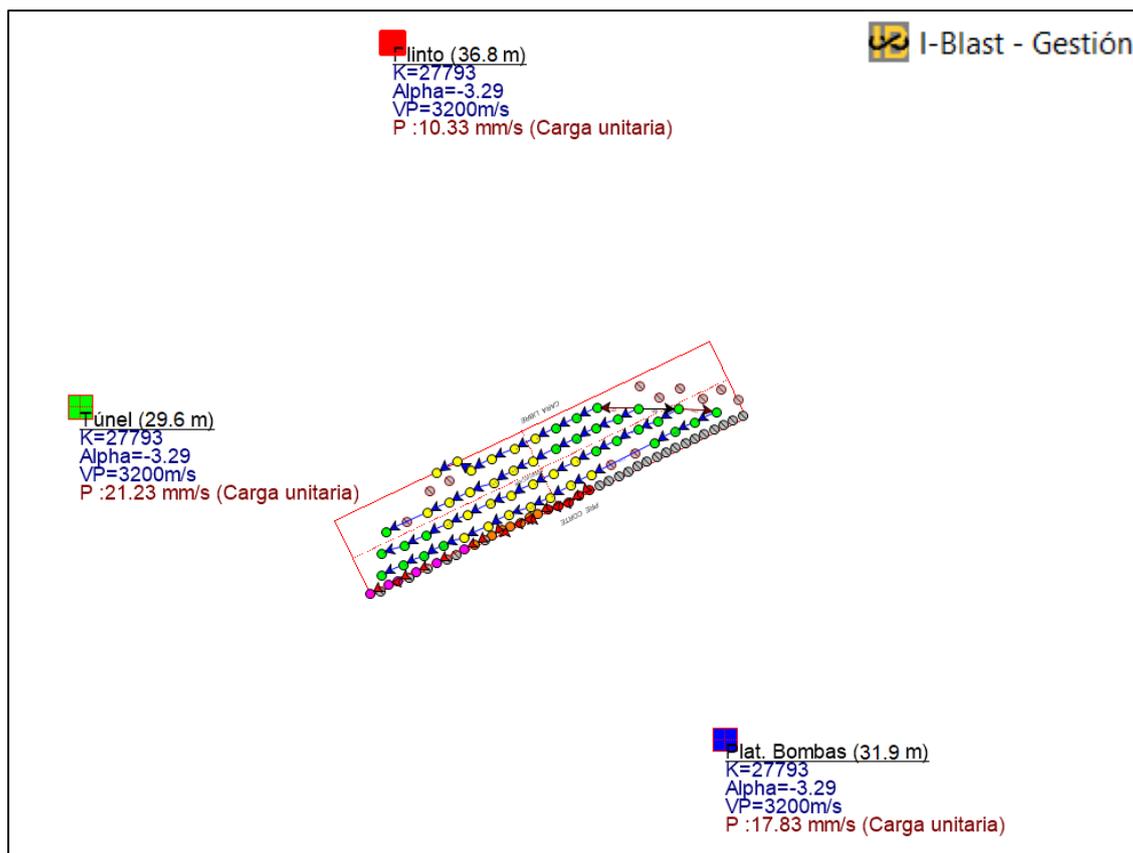


Figura 3.22. *Predicción sísmica para voladura.*

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Metodología de Validación

Para poder validar nuestro modelo matemático de predicción sísmica, usaremos una metodología convencional cuyo principio se basa en la isotropía, es decir, vamos a considerar que las propiedades de toda el área bajo el análisis permanecen constantes en todas las direcciones. Esto significa que las vibraciones, independientemente del lugar donde se realice la voladura, tienen una atenuación constante sobre el área de propagación. A continuación, mostraremos gráficamente la metodología para simplificar la interpretación de los mencionado anteriormente.

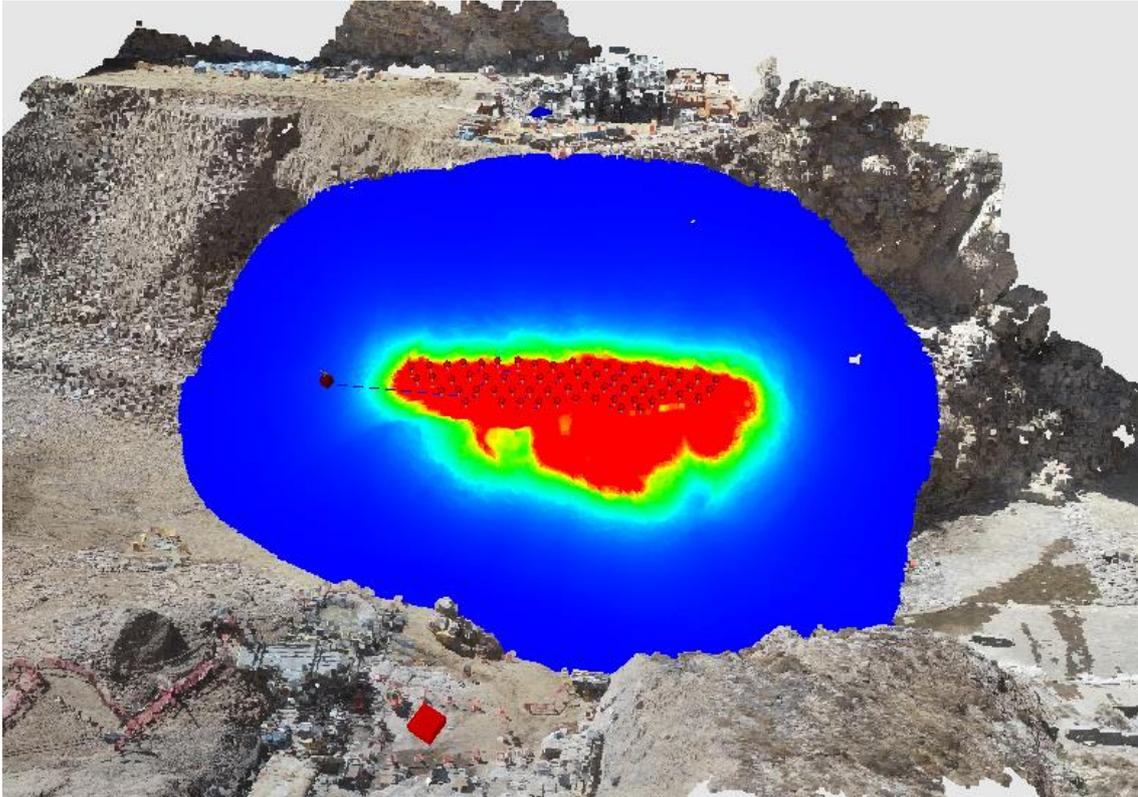


Figura 3.23. Mapa de iso-vibraciones – Voladura completa.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.23 nos ilustra un mapa de iso-vibraciones obtenidas para una voladura completa, donde la zona roja nos indica mayor acumulación de VPP y esto va degradándose hasta una zona color azul donde podemos ver una VPP más atenuada según la ecuación : $PPV = 27792.84 (SD)^{-3.29}$.Por ello la metodología considera o asume que todo el terreno en estudio está compuesto por un mismo tipo de material, dando como respuesta un mismo comportamiento y características de las vibraciones generadas sin tomar en consideración la zona donde se ejecuten las voladuras.

3.6.2.1. Modelos de Carga Empleados. El modelo matemático considera como uno de sus parámetros principales la distancia escalada (SD), y dentro de ello está la carga de explosivo, por ello determinaremos los modos de carga utilizados en la voladura según su posición en la malla de perforación (ver figura 3.24).

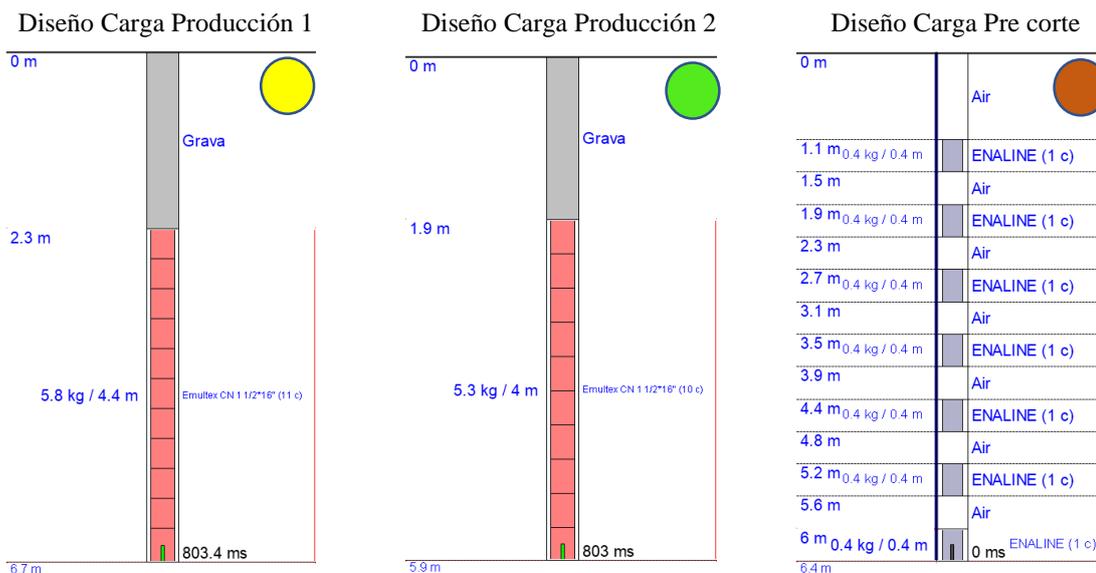


Figura 3.24. Diseños de carga – voladura.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2. Diseño de Amarre. Para el amarre se utilizaron detonadores no eléctricos en superficie (faneles duales y conectores CTD), como se puede apreciar en la imagen, hubo taladros que no se cargaron por encontrarse tapados o cortos en su perforación. (ver figura 3.25)

Para el amarre se utilizaron tiempos de 17 ms (entre taladros) y 42 ms - 65 ms (entre filas), estos retardos fueron definidos considerando el desplazamiento del material y sobre todo asegurando una mínima superposición para el control de la carga operante.

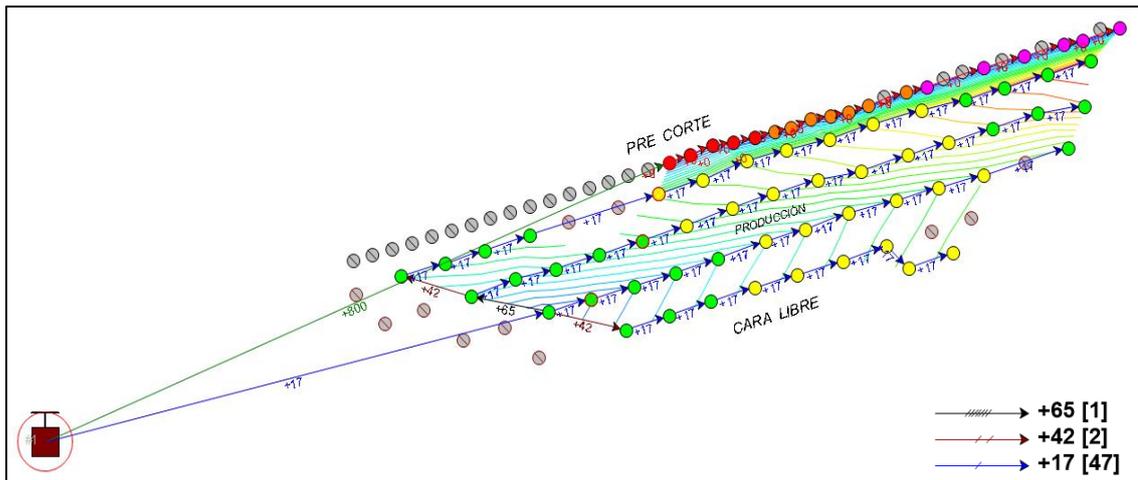


Figura 3.25. Diseños de amarre – voladura.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.3. Análisis de Superposición de Taladros. Para la ejecución de la voladura se consideró una carga operante de 11.68 kg. (ver figura 3.26)

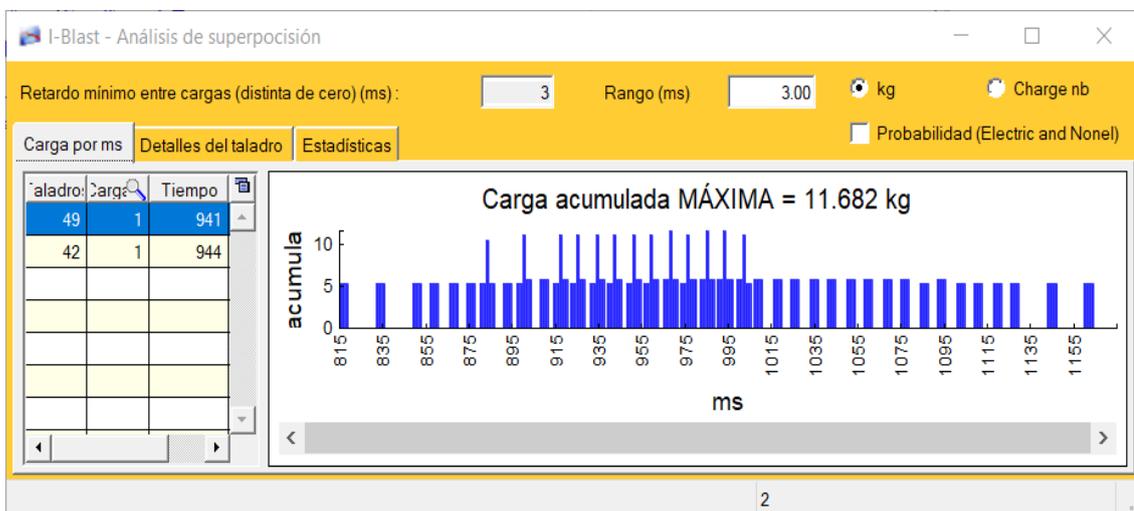


Figura 3.26. Análisis de superposición de retardos – voladura.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la carga operante en la voladura (kg de explosivo por tiempo de retardo) se realizó un análisis estadístico consideraremos una dispersión de ± 3 ms según recomendación del fabricante del accesorio, se realizó el análisis de

superposición en el software I-Blast 7.8, obteniendo como resultados la detonación de 02 taladros en un mismo tiempo.

3.6.2.4. Registro sísmico. Se recolecto la vibración registrada por cada uno de los sismógrafos ubicados en los puntos de monitoreo previamente definidos y considerados como puntos de control fijos. Estos valores fueron ingresados al software I-Blast 7.8 para su procesamiento.

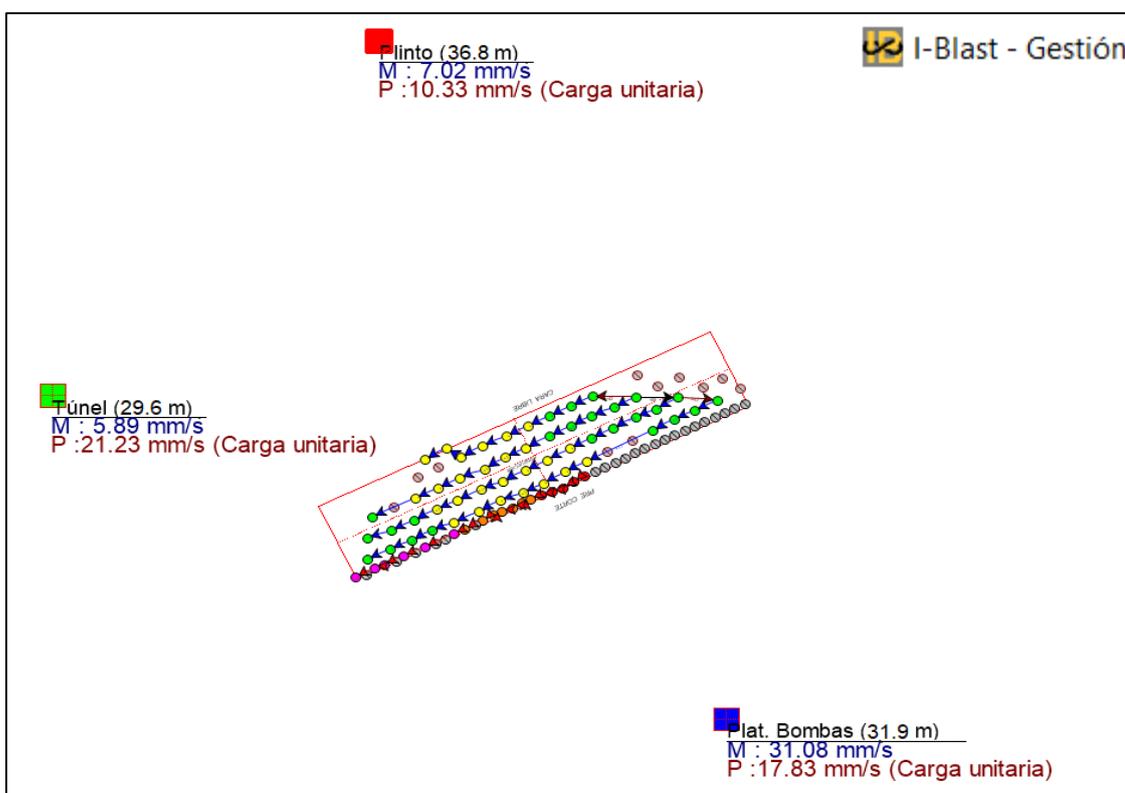


Figura 3.27. Registro sísmico medido vs simulado.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.5. Análisis Inicial de Resultados. En la figura 3.27, podemos observar que hay diferencias entre las velocidades pico partículas previstas o estimadas (P) versus las que se registraron producto de la voladura (M), esto nos demuestra que si bien es cierto geológicamente la zona puede estar conceptualizada por un mismo tipo

de material, en la realidad pueden presentar una gran diversidad en cuanto a características geológicas y geotécnicas que a su vez van a influir de manera diferente para la propagación de las vibraciones. Este aspecto es extremadamente importante al momento de realizar predicciones sísmicas para zonas ubicadas a diferentes distancias.

Para analizar esta discrepancia relativa, es necesario su determinación para poder afirmar si estos se encuentran dentro del rango de confianza para minimizar el riesgo de impactos negativos en seguridad o leyes.

Tabla 3.11. Desviación entre VPP simulado vs registrado.

Zona / Sismografo	Distancia (m)	Explosivo (kg)	PPV (mm/s) simulado	PPV (mm/s) medido	Desviación (%)
Plinto	36.80	11.68	10.33	7.02	-32
Túnel	29.60	11.68	5.89	21.23	260
Plat. Bombas	31.90	11.68	17.83	31.08	74

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 3.11 podemos observar el % de discrepancia entre los valores de vibración simulados con respecto a los valores medidos en las voladuras, estos presentan variaciones desde 32% hasta 260% aproximadamente, algunas pruebas de campo realizadas por algunos investigadores nos indican que una dispersión del 30% resulta valido para poder aplicar el modelo predictivo determinado, y que estos pueden ser ajustados incrementándose el grado de confiabilidad de nuestra ecuación en caso que nuestra predicción se encuentre con dispersión negativa.

En el caso del Plinto tenemos una discrepancia relativa del 32%, que se encuentra dentro del rango aceptable, la predicción sísmica realizada para esta zona muestra una sobrestimación en comparación al valor registrado. Esta información puede

ser beneficiosa a nivel de producción, porque con este tipo de estimaciones es posible incrementar la carga explosiva que puede favorecer a la producción.

Para los registros obtenidos en la zona Túnel y plataforma de bombas será necesario generar nuevos modelos de predicción sísmica que se ajusten a las condiciones anisotrópicas de dichas zonas.

CAPITULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Monitoreo en Voladuras Masivas

Observada algunas deficiencias con el modelo predictivo obtenido por ondas elementales, para minimizar estos defectos será necesario incorporar el monitoreo de voladuras completas que contengan taladros de pre-corte, buffer y producción. Desde un punto de vista operativo, la minimización de este problema pasa por analizar la ley de atenuación de voladuras masivas donde se generan ondas constructivas y destructivas e implicancias. A continuación, en la tabla 4.1 mostramos el resumen de las vibraciones obtenidas en las voladuras ejecutadas en el periodo del 12/12/2020 al 10/01/2021.

Tabla 4.1. Monitoreo de vibraciones en voladuras.

Voladura / Fecha	Zona Plinto			Zona Túnel			Zona Plataforma de bombas		
	Distancia	Carga	PPV	Distancia	Carga	PPV	Distancia	Carga	PPV
15/12/2020	35.80 m	11.68 kg	7.02 mm/s	29.60 m	11.68 kg	21.23 mm/s	31.90 m	11.68 kg	31.08 mm/s
22/12/2020	38.16 m	11.68 kg	9.16 mm/s	19.08 m	11.68 kg	11.80 mm/s	41.60 m	11.68 kg	36.26 mm/s
31/12/2020	44.58 m	4.25 kg	1.95 mm/s	13.65 m	4.25 kg	21.50 mm/s	44.70 m	4.25 kg	5.89 mm/s
10/01/2021	30.17 m	6.93 kg	5.89 mm/s	15.12 m	6.93 kg	7.34 mm/s	42.70 m	6.93 kg	7.94 mm/s

Fuente: Elaboración propia.

Para la ejecución de estas voladuras se coordinó con el área de ingeniería y/o supervisión que las obras de concreto en el Plinto deberían de tener una edad superior

a 48 horas y la plataforma de bombas mayor a 72 horas, esto nos permitía darle un factor de seguridad a nuestras voladuras y cumplir los límites de vibración indicados en la tabla 1.1.

4.1.1. Resultado de Leyes de Atenuación por Zonas

De los registros sísmicos obtenidos por cada una de las voladuras completas (ver tabla 4.1), se realizará un análisis de ley de atenuación para ver el comportamiento del terreno con relación a las ondas generadas por las voladuras completas.

4.1.1.1. Resultado zona Plinto.

En la figura 4.1, con el análisis de ley de atenuación realizado, generamos un modelo de predicción sísmica al 50% de confianza, que matemáticamente es correcto para poder predecir vibraciones de voladuras futuras en dicha zona. Además, los valores analizados poseen un coeficiente de determinación de 0.93, lo cual indica que tenemos una buena correlación lineal entre ambas variables.

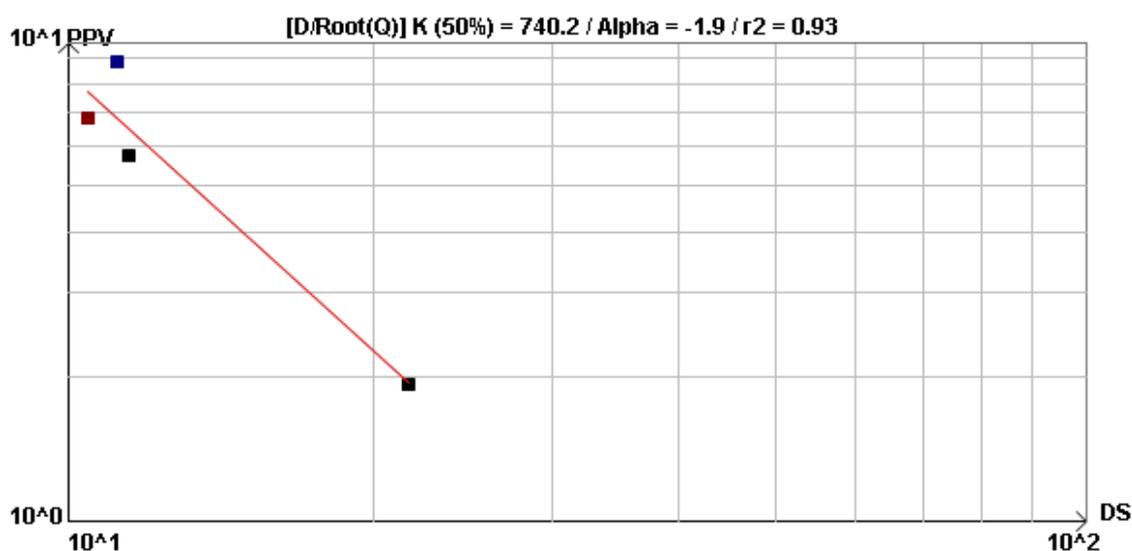


Figura 4.1. *Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Plinto (voladuras completas).*

Fuente: Elaboración propia.

- Modelo 50% Confianza (Original)

$$PPV = 740.15 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.92}$$

4.1.1.2. Resultado Zona Túnel

En la figura 4.2, con el análisis de ley de atenuación realizado, generamos un modelo de predicción sísmica al 50% de confianza, que matemáticamente es correcto para poder predecir vibraciones de voladuras futuras en dicha zona. Además, los valores analizados poseen un coeficiente de determinación de 0.61, lo cual indica que la correlación lineal entre ambas variables no está muy asociada.

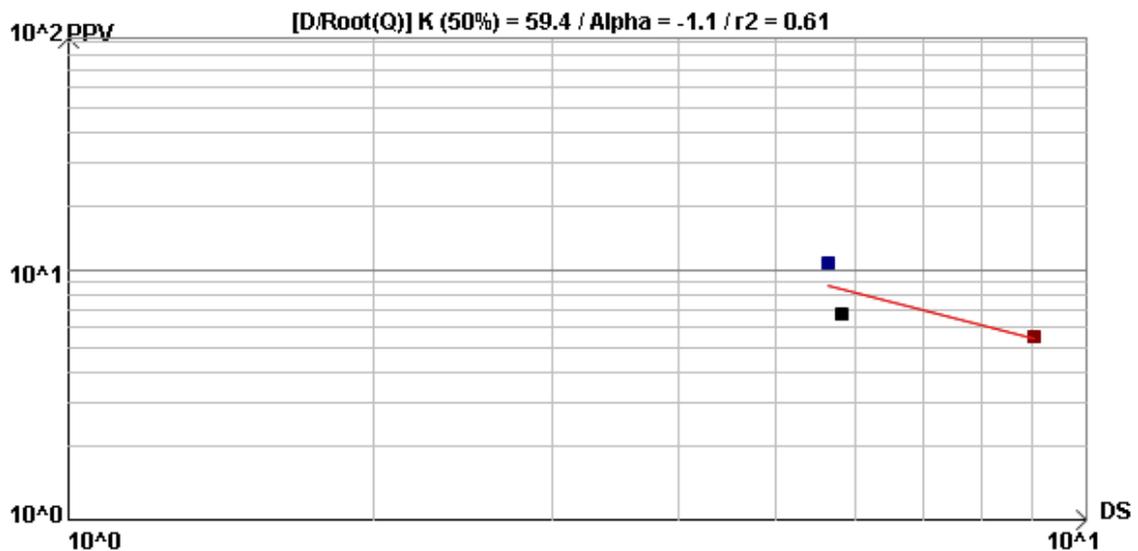


Figura 4.2. *Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Túnel (voladuras completas).*

Fuente: Elaboración propia.

- Modelo 50% Confianza (Original)

$$PPV = 59.38 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-1.06}$$

4.1.1.3. Resultado Zona Plataforma de bombas

En la figura 4.3, con el análisis de ley de atenuación realizado, generamos un modelo de predicción sísmica al 50% de confianza, que matemáticamente es correcto para poder predecir vibraciones de voladuras futuras en dicha zona. Además, los valores analizados poseen un coeficiente de determinación de 0.90, lo cual indica que tenemos una buena correlación lineal entre ambas variables.

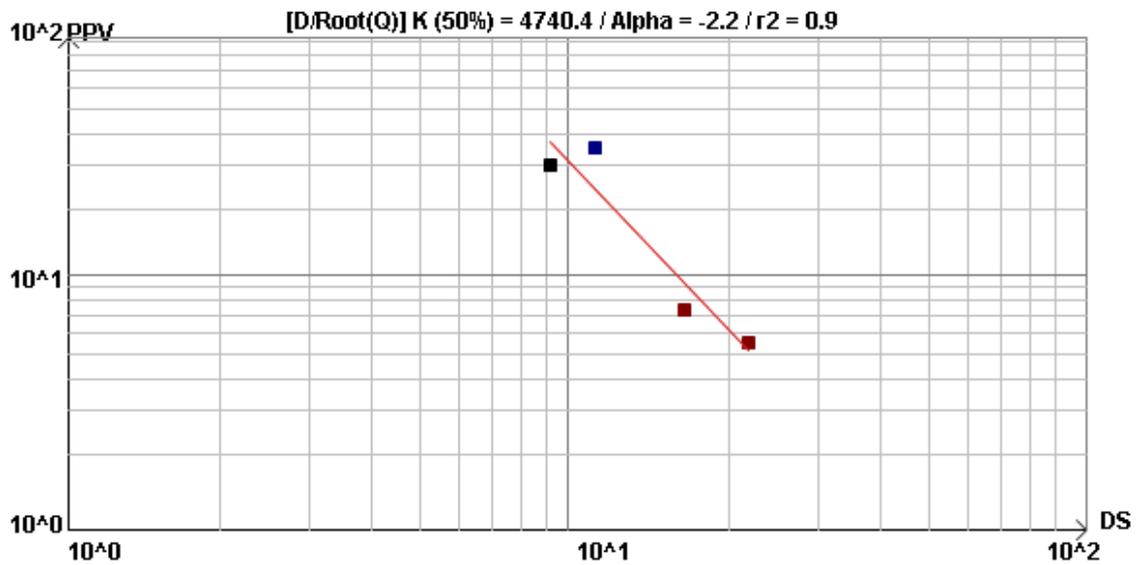


Figura 4.3. *Análisis de ley de atenuación I-Blast – Zona Plataforma bombas (voladuras completas).*

Fuente: Elaboración propia.

- Modelo 50% Confianza (Original)

$$PPV = 4740.44 \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-2.20}$$

4.1.2. Análisis de Modelos de Atenuación por Zonas

En cuanto a la estimación de VPP's cerca a los límites de área de influencia, la presencia de discontinuidades hace visible la discrepancia entre las leyes de atenuación entre modelos determinados con la detonación de taladros únicos u ondas elementales en comparación a voladuras completas. A continuación, analizaremos cada una de las zonas de monitoreo.

4.1.2.1. Análisis zona Plinto.

Con el modelo matemático obtenido del análisis de voladuras completas, realizaremos un análisis comparativo con el modelo matemático obtenido de la Taladro prueba, para evaluar su grado de correlación de ambas ecuaciones generadas para la predicción sísmica en la zona Plinto.

En la figura 4.4, correspondiente a la zona de Plinto podemos ver una discontinuidad entre la ecuación de atenuación obtenida con el análisis de ondas elementales obtenido del taladro prueba, en comparación a la ecuación de atenuación obtenido con el análisis de voladuras completas.

Es decir, cada uno de los casos asume características diferentes del terreno pertenecientes al área de influencia, esto nos da como resultados valores de k y α atípicos en voladuras de un solo taladro comparados con voladuras completas.

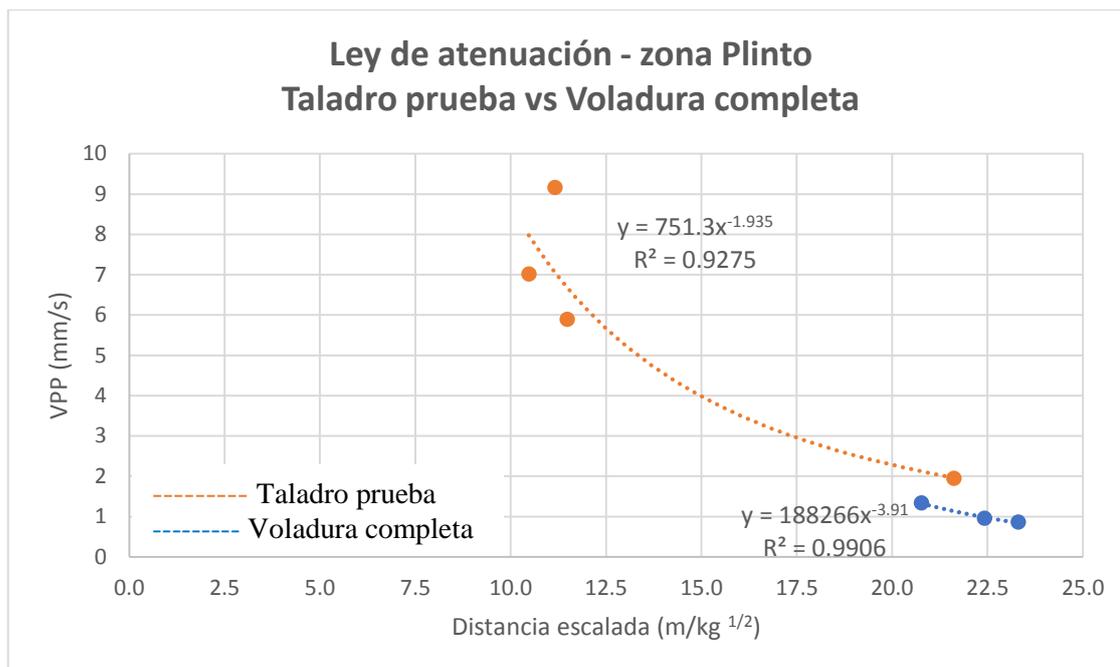


Figura 4.4. Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Zona Plinto.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2. Análisis Zona Túnel

Con el modelo matemático obtenido del análisis de voladuras completas, realizaremos un análisis comparativo con el modelo matemático obtenido de la Taladro prueba, para evaluar su grado de correlación de ambas ecuaciones generadas para la predicción sísmica en la zona Túnel.

En la figura 4.5, correspondiente a la zona Túnel de salida podemos ver que la discontinuidad entre la ecuación de atenuación de ondas elementales y voladuras completas es demasiado amplia, en este caso podemos decir que las ecuaciones nos indican que los análisis fueron realizados en zonas diferentes. Así que la predicción sísmica realizada con ambos modelos serán diferentes y en el caso del determinado con ondas elementales tendrá un alto grado de error.

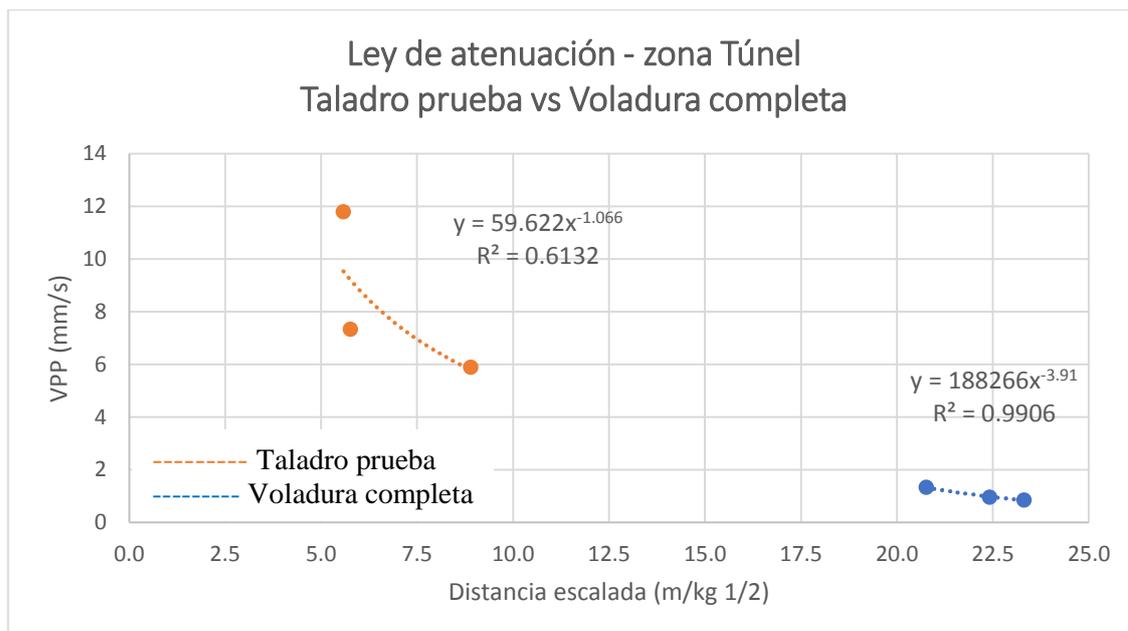


Figura 4.5. Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Zona Túnel.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.3. Análisis Zona Plataforma de bombas

Con el modelo matemático obtenido del análisis de voladuras completas, realizaremos un análisis comparativo con el modelo matemático obtenido de la Taladro prueba, para evaluar su grado de correlación de ambas ecuaciones generadas para la predicción sísmica en la zona Túnel.

En la figura 4.6, correspondiente a la zona de plataforma de bombas se presenta el mismo caso que en el análisis para la zona Plinto, tomando en consideración estos casos podemos mencionar que las predicciones sísmicas realizadas con estos modelos tendrán un cierto grado de error.

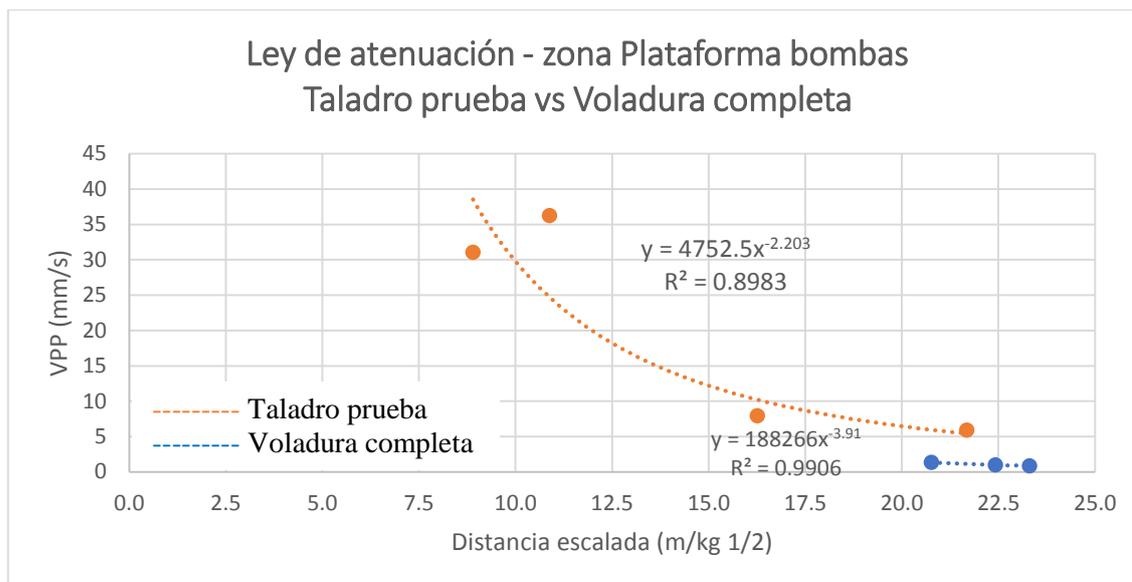


Figura 4.6. Análisis Estadístico Excel– Ley de atenuación Taladro prueba vs voladura completa – Plataforma de bombas.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Contrastación de Hipótesis

Para la contrastación de la hipótesis aplicando el modelo de campo lejano se determinaron ecuaciones de predicción sísmica para cada una de las zonas de estudio, evaluando el porcentaje de variación entre la predicción realizada y los registros de las voladuras realizadas.

$$PPV = k * \left[\frac{d}{w^{1/2}} \right]^{-\alpha}$$

Donde:

K e Alpha (α) = constantes del terreno obtenidos mediante regresión lineal.

4.2.1. Comparativo entre Predicción y Registro

Se realizaron un total de 03 voladuras más en la zona de estudio, con las cuales se llegó a los límites de corte determinados para el proyecto. Estas voladuras fueron diseñadas y se realizó el cálculo de predicción sísmica (VPP simulado) con los modelos ajustados obtenidos del monitoreo de voladuras completas y clasificada por zonas. A continuación, presento los resultados del estudio:

4.2.1.1. VPP con Modelo de Predicción Modificada - Zona Plinto

La validación de nuestro modelo matemático de predicción sísmica como fue anteriormente definido está directamente relacionada al % de variación que se pueda tener entre el VPP simulado o predicho y el VPP medido o registrado de la voladura. Según la tabla 2 podemos mencionar que los porcentajes de variación para la zona Plinto son aceptables ya que se encuentran en el rango del 30% y al ser un valor positivo que nos indica que hay una holgura en nuestra predicción que nos asegura un grado de confiabilidad para nuestras predicciones. (ver tabla 4.2)

Tabla 4.2. Comparativo VPP simulado vs medido – Modelo de predicción modificado para la zona plinto.

Voladura / Fecha	Zona Plinto						
	Distancia	Carga	Constantes terreno		PPV Simulado	PPV Medido	Variación
			k	alpha			
22/12/2020	34.60 m	4.78 kg	740.15	-1.92	3.59 mm/s	3.46 mm/s	3.62 %
31/12/2020	16.20 m	7.10 kg	740.15	-1.92	22.72 mm/s	21.80 mm/s	4.05 %
10/01/2021	21.50 m	5.79 kg	740.15	-1.92	10.81 mm/s	9.42 mm/s	12.86 %

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2. VPP con Modelo de Predicción Modificada - Zona Túnel

Según la tabla 4.3 podemos mencionar que los porcentajes de variación para la zona Túnel salida son inaceptables ya que se encuentran en el rango ampliamente superior al 30% y las predicciones realizadas resultaron erróneas.

Tabla 4.3. Comparativo VPP simulado vs medido – Modelo de predicción modificado para la zona Túnel salida.

Voladura / Fecha	Zona Túnel Salida						Variación
	Distancia	Carga	Constantes terreno		PPV simulado	PPV medido	
			k	alpha			
22/12/2020			No se monitoreo por presencia de agua en la salida del túnel				
31/12/2020	13.1	7.10 kg	59.38	-1.06	10.91 mm/s	34.44 mm/s	-215.67 %
10/01/2021	23.2	5.79 kg	59.38	-1.06	5.32 mm/s	23.26 mm/s	-337.22 %

Fuente: Elaboración propia.

Otra desviación en el modelo obtenido para esta zona es el grado de correlación que se tenía entre los registros siendo un valor de 0.61, que es un indicador bajo de la confiabilidad de nuestro modelo.

En este caso es necesario hacer un estudio más profundo de la zona, para poder considerar factores como el lecho del río Asana, la presencia de discontinuidades, cimientos del túnel, u otros. Algunos investigadores indican que esta metodología de distancia escalada pierde confiabilidad en zonas que presentan demasiada diaclasado.

4.2.1.3. VPP con Modelo de Predicción Modificada - Zona Plataforma de Bombas

Según la tabla 4.4 podemos mencionar que los porcentajes de variación para la zona Plataforma de bombas se encuentran en el límite de rango de aceptación, en este caso podemos considerar como válido el modelo predictivo determinado y al ser un

valor positivo que nos indica que hay una holgura en nuestra predicción que nos asegura un grado de confiabilidad para nuestras predicciones, en caso se quiera ajustar el modelo a un rango de aceptación, se recomienda mayor toma de registros para ajustar el modelo.

Tabla 4.4. Comparativo VPP simulado vs medido – Modelo de predicción modificado para la zona Plataforma de bombas.

Voladura / Fecha	Zona Plataforma de Bombas						
	Distancia	Carga	Constantes terreno		PPV simulado	PPV medido	Variación
			k	alpha			
22/12/2020	45.20 m	4.78 kg	4740.44	-2.20	6.01 mm/s	3.89 mm/s	35.27 %
31/12/2020	53.80 m	7.10 kg	4740.44	-2.20	6.34 mm/s	4.67 mm/s	26.34 %
10/01/2021	58.30 m	5.79 kg	4740.44	-2.20	5.07 mm/s	3.46 mm/s	31.76 %

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Limitaciones Del Modelo

En cuanto a la estimación del VPP, a pesar de la cercanía entre los puntos de monitoreo, la presencia de discontinuidades influye directamente sobre el modelo, lo cual genera discrepancias con las leyes de atenuación. En las figuras 4.7 y 4.8 podemos ver a detalle la geología de la zona y también el lecho del río Asana.

Para minimizar este defecto de estimación es necesario realizar una mayor cantidad de voladuras por zona o puntos de monitoreo, pero muchas veces desde el punto de vista operativo resulta complicado poder ejecutarlas, siendo una opción hacer voladuras en otras zonas con geología similar, pero por razones mencionadas anteriormente la geología siempre será anisotrópica por lo cual existirá la opción de que estas difieran y nos lleven a tener varias leyes de mitigación con las diversas de áreas de influencia.

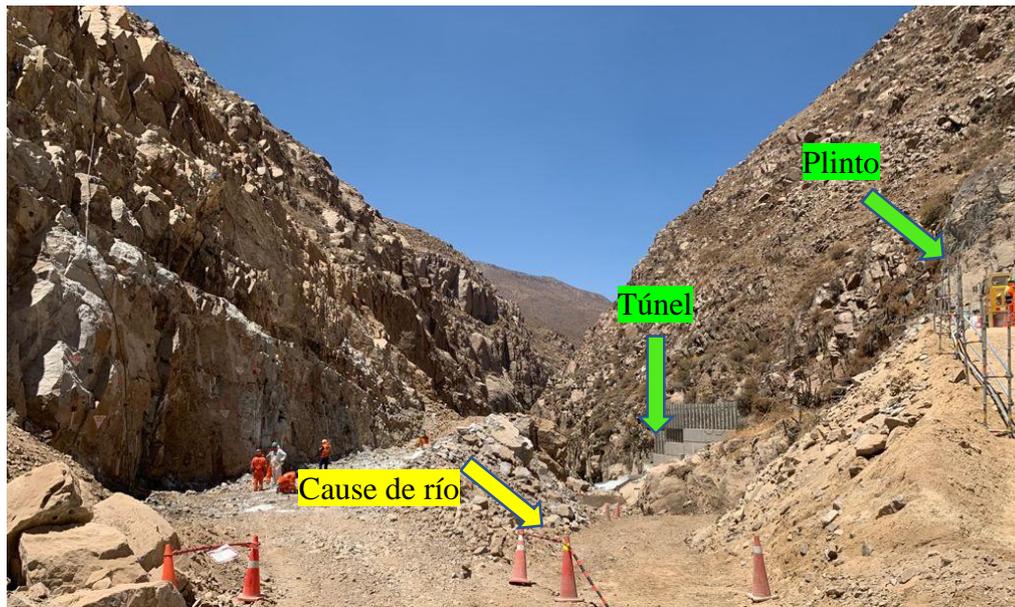


Figura 4.7. *Morfología de la zona.*



Figura 4.8. *Geología estructural de la zona.*

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El proyecto motivo de estudio abarco el control en 03 zonas de monitoreo que correspondían al Plinto, Túnel de salida y Plataforma de bombas, con límites de vibración: Túnel (150 mm/s), Plinto y Plataforma de Bombas (5 mm/s a 50 mm/s determinados según la edad del concreto).
- Se realizo la voladura de 01 taladro prueba, con 5.3 kg de explosivo para la captura inicial de una onda elemental que nos permitiera conceptualizar el comportamiento de atenuación del macizo rocoso frente a la detonación de una columna explosiva, para ello se colocaron 03 sismógrafos en línea en la zona de Plinto,
- Con el apoyo del software I-Blast 7.8 se realizó el análisis de ley de atenuación del terreno para la obtención de las constantes k y Alpha iniciales, generándose el primer modelo de predicción sísmica: $PPV = 27792.84 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-3.29}$ con un grado de correlación de $R^2 = 0.78$.
- En la tabla N° 33 podemos visualizar la desviación del VPP simulado aplicando el modelo matemático obtenido del taladro prueba versus el VPP registrado en la voladura: Túnel (-260%), Plinto (+32%) y Plataforma de Bombas (-74%).
- A partir de las desviaciones de las desviaciones halladas fuera del rango de aceptación, se optó por monitorear voladuras completas. Generándose un total de 12 registros sísmicos para analizar.
- Con los registros sísmicos obtenidos de voladuras masivas s, se procedió a realizar el análisis de ley de atenuación por zonas de control, , obteniéndose los siguientes modelos de predicción sísmica: **Túnel** ($PPV =$

$$59.38 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.06} ; R^2 = 0.61), \quad \text{Plinto} (PPV = 740.15 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.92} ; R^2 = 0.93 \text{ y}$$

$$\text{Plataforma de bombas} \quad (PPV = 4740.44 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2.20} ; R^2 = 0.90)$$

- Aplicando los modelos matemáticos obtenidos por zona y a partir del monitoreo de voladuras masivas, se registró desviaciones Túnel (-337%), Plinto (+12%) y Plataforma de Bombas (-35%).
- Finalmente, la zona Plinto y Plataforma de bombas se puede determinar buena correlación de la data recolectada ($R^2 \geq 0.90$) mientras en la zona Túnel de salida la correlación es baja ($R^2 = 0.61$), de ello podemos concluir que en el caso del túnel está afectado a condiciones geológicas y morfológicas de su medio transmisor (lecho del río, conglomerados y presencia de falla).

Recomendaciones

- Se recomienda para investigaciones futuras aplicando este método de predicción sísmica resulta importante considerar ampliar la cantidad de registros sísmicos que nos permitan generar una base de datos más diversa para determinar ecuaciones o modelos predictivos en corto plazo, considerando sobre todo para proyectos de construcción que tienen un tiempo relativamente corto de ejecución como fue para el presente caso de estudio.
- Para macizos rocosos con fuerte presencia de falla, diaclasas no resulta muy recomendable la aplicación de esta metodología, debido a la variabilidad de la data sísmica registrada y el comportamiento de atenuación que presentaron cada una de la zona de control monitoreado para nuestro caso motivo de estudio, en el caso de la zona de control Túnel de salida se sumó otro factor determinante como la presencia del cauce del río Asana lo que genero presencia de un grado de correlación bastante baja en los datos sísmicos registrados. Requiriéndose mayor estudio a detalle para dicha zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. (ISEE, 2008) Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos (ISSE) (2008). *Manual del Especialista en Voladura. Cleveland, EEUU. By Hopler, Robert B.*
2. .A. Sanchidrián & E. Muñiz (2000): *Curso de Tecnología de explosivos*. Fundación Gómez Pardo, D.L.
3. A.T. Spathis and M.J. Noy (Setiembre 2009). *Vibrations from Blasting*, New York, EE.UU. by Taylor & Francis Group.
4. Ames Lara, Victor (2008). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas*. (Tesis Profesional. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/635>
5. Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J. and Herrera Herbert, J. (2013) *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas., Madrid, España.
6. Brachalan V., Gokhale (2011). *Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines*. New York, EE.UU. by Taylor & Francis Group.
7. Bravo Sánchez, Isidora (2020). *Estudió de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence*. (Tesis Profesional. Universidad de Chile. Santiago, Chile). Recuperado de [Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence \(uchile.cl\)](#).
8. Calvin J. Konya, Enrique Albarrán N., (2010). *Manual de Konya*. Extraído de: [Manual de voladura konya rev \(slideshare.net\)](#)

9. Calvin J. Konya, Enrique Albarran N., (Noviembre 2009). *Diseño de Voladuras* – Segunda Edición. Extraído de <https://www.passeidireto.com/arquivo/46441707/manual-de-konya>
10. Carlos Sherpenisse O. (Octubre 2006), *Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras*, ASP Blastronics.
11. Choque, Edgar (2019). *Modelamiento de vibraciones y determinación del burden optimo en U.E.C. Mallay – cia. de minas Buenaventura – 2019*. (Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Ingeniería, Huancayo, Perú) Recuperado de http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/6116/T010_2012008_7_M_1.pdf?sequence=1
12. CINTEX, (Mayo 2006) *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento. Chile*
13. Cornejo, Paul y Huamán, André (2020). *Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre*. (Tesis Profesional. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú). Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17665/CORNEJO_CHACON_PAUL_ESTIMACION_MODELO_PREDICTIVO.pdf?sequence=1
14. ENAEX, (2010) “Manual de tronadura ENAEX S. A.” Chile.
15. EXSA, (2019) “Manual práctico de voladura” Perú. Recuperado de <https://www.mineriadelibrosycursos.com/2019/10/manual-practico-de-voladura-5ta-edicion.html>

16. López-Jimeno, C., Lopez-Jimeno, E., García-Bermudez, P., (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*, E.T.S.I de Minas, Madrid, España.
17. López-Jimeno, C., López-Jimeno, E., García-Bermúdez, P., (2017). *Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras*, Madrid, España. By López Jimeno Carlos
18. McKenzie, Cameron (1994). *Estado del Arte de la Voladura*, Santiago, Chile extraído de: <https://es.scribd.com/document/427128343/ESTADO-DEL-ARTE-DE-LA-VOLADURA-By-Cameron-McKenzie-doc>
19. Moreira Andrade, José (2016). *Dissertação Metodologia para analise de vibrações provocadas por desmontes com recursos a explosivoa*,(Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, Universidad do Porto, Facultad de Engenharia. Porto, Portugal). Recuperado de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/85561/2/146209.pdf>
20. Pampacata, Lucio (2015). *Análisis de vibraciones inducidos por voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones*. (Tesis Profesional. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle7uni72096>.
21. Per-Anders Person, Roger Holmberg And Jaimin Lee (February 7, 2001). *Rock Blasting and Explosives Engineering*, by CRC Press LLC.
22. Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos (ISSE) (2006). *Fundamentos Prácticos de voladura – Nivel 1*

- Revistas

1. Revista especializada en Seguridad, Higiene y Salud Ocupacional del Instituto de Seguridad Minera “*Monitoreo de vibraciones causadas por voladura*” – ISEM,

Nº 123, pp. 6-8, 2015. Recuperado de <https://app.box.com/s/b2gtjk67ink2j61lmh85g3z1i40225fi>

2. Esquitino Martín, Francisco, “*Perforación y Voladura*”, Revista IGP Ingeopres (206), p. 12, 2011. Recuperado de [Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente. 2011, Nº. 206 - Dialnet \(unirioja.es\)](http://www.unirioja.es/~dialnet/Ingeopres:Actualidad_tecnica_de_ingenieria_civil_mineria_geologia_y_medio_ambiente.2011.N.206-Dialnet(unirioja.es))
3. Ruiz Daniel, Otárola Camilo y Rodríguez Jorge, “*Efectos de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia*”, Revista Int, de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol 7, p. 261, 2007. Recuperado de https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Efectos+de+las+vibraciones+generadas+por+voladuras+en+minas+sobre+edificaciones+residenciales+de+mamposter%C3%ADa+simple+en+Colombia&btnG=
4. A.O. Oliva & R. Fort, “*Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real*”, Revista Ingenio, 16(I), pp. 1-9, 2019. Recuperado de [file:///C:/Users/Asus/Downloads/mplatajacome-metodologia-para-la-prediccion-de-las-vibraciones-del-terreno-inducidas-por-voladuras-y-sus-efectos-en-las-estructuras.-a%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/mplatajacome-metodologia-para-la-prediccion-de-las-vibraciones-del-terreno-inducidas-por-voladuras-y-sus-efectos-en-las-estructuras.-a%20(2).pdf)

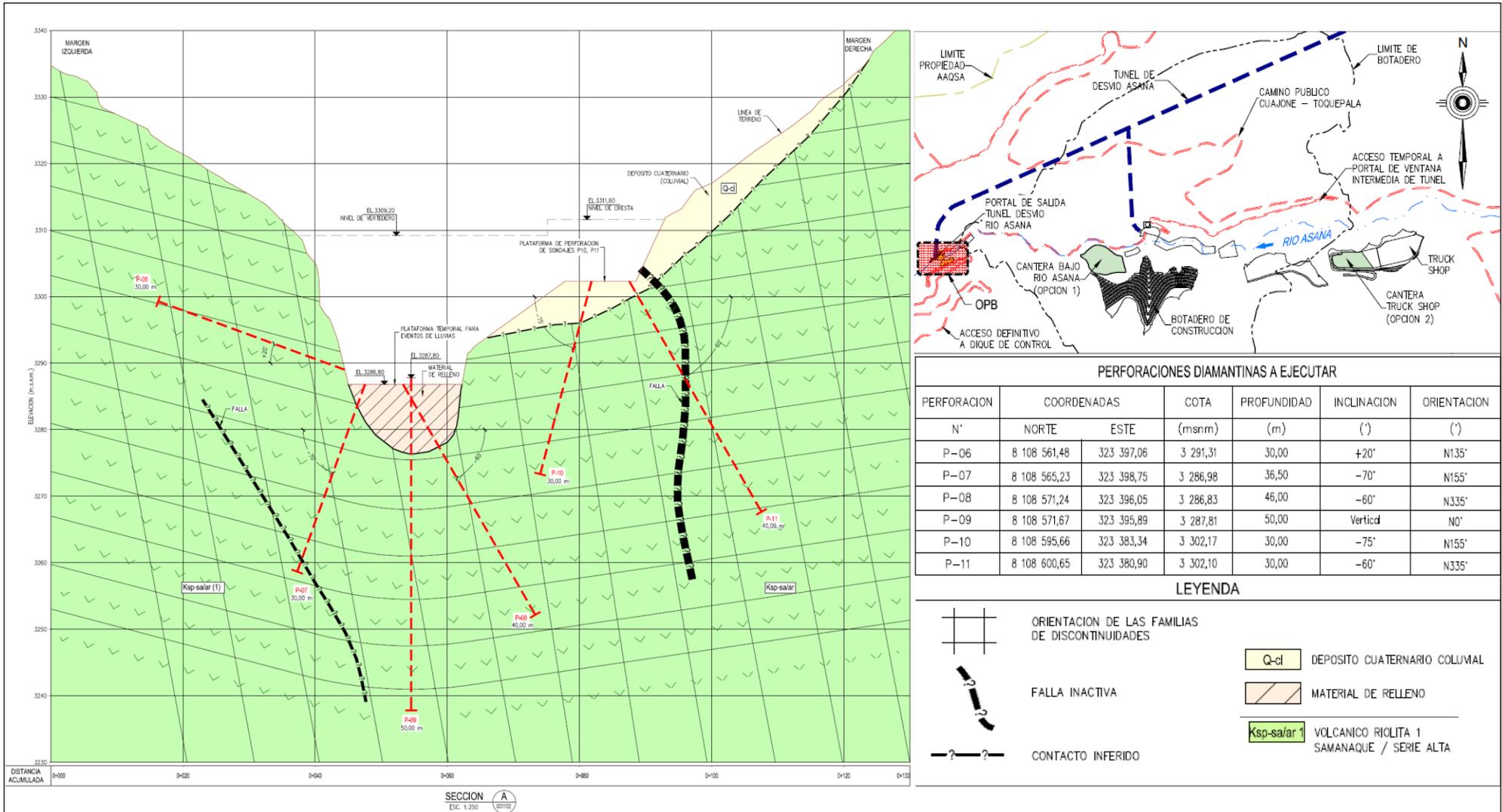
ANEXOS

Anexo N°1: Matriz de Consistencia.

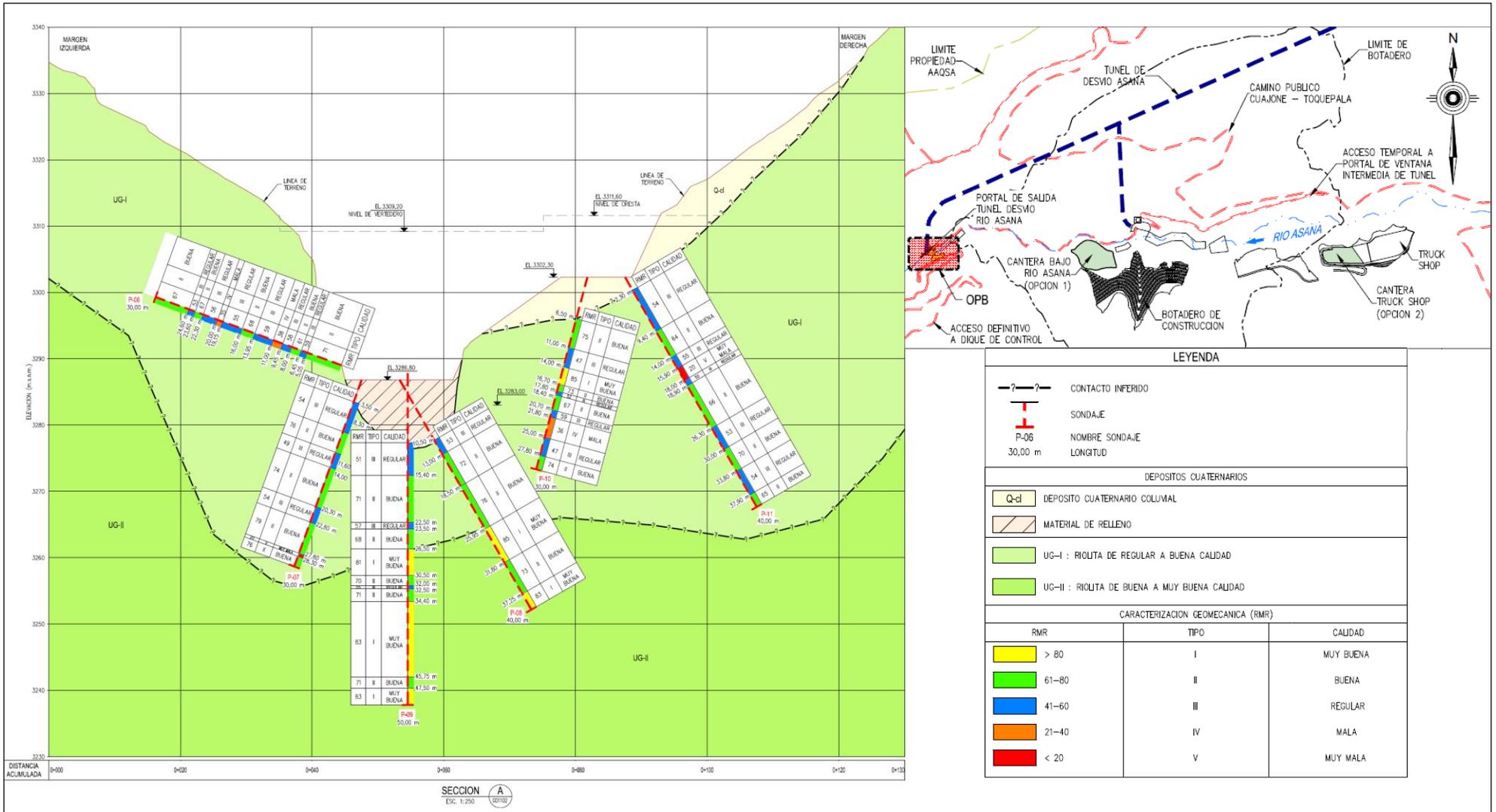
“MODELAMIENTO PREDICTIVO DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO PARA INFERIR VIBRACIONES EN VOLADURAS MASIVAS CERCA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO”

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	DISEÑO METODOLOGICO
<p align="center"><u>Problema general</u></p> <p>¿En qué medida la aplicación del modelo predictivo de vibraciones en campo lejano infiere las vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?</p> <p align="center"><u>Problemas específicos</u></p> <p>1. ¿En qué medida la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano determina los valores de las constantes k y Alpha en monitoreos en estructuras de concreto?</p> <p>2. ¿En qué medida la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano determina la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?</p> <p>3. ¿En qué medida la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano determina la predicción sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto?</p>	<p align="center"><u>Objetivo general</u></p> <p>Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para inferir vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p> <p align="center"><u>Objetivos específicos</u></p> <p>1. Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar los valores de las constantes k y Alpha de monitoreos en estructuras de concreto.</p> <p>2. Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p> <p>3. Aplicar el modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano para determinar la predicción de sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p>	<p align="center"><u>Hipótesis general</u></p> <p>Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá inferir vibraciones en voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p> <p align="center"><u>Hipótesis específicas</u></p> <p>1. Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar los valores de las constantes k y Alpha para monitoreos en estructuras de concreto.</p> <p>2. Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar la carga óptima por retardo para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p> <p>3. Con la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano se podrá determinar la predicción sísmica para voladuras masivas cerca de estructuras de concreto.</p>	<p align="center"><u>Variable independiente: X</u></p> <p>X: Modelo predictivo de vibraciones en campo lejano</p> <p>X1: Velocidad Pico partícula (VPP)</p> <p>X2: Distancia del sismógrafo por voladura</p> <p>X3: Carga por retardo (Carga Operante)</p> <p align="center"><u>Variable dependiente: Y</u></p> <p>Y: Vibraciones en voladuras masiva</p> <p>Y1: Valores de k y Alpha</p> <p>Y2: Carga óptima por retardo</p> <p>Y3: Predicción de vibración</p>	<p align="center"><u>Indicadores de X:</u></p> <p>X1: PPV mm / s</p> <p>X2: Distancia escalada (m)</p> <p>X3: Kg. De explosivos</p> <p align="center"><u>Indicadores de Y:</u></p> <p>Y1: Constantes numéricas</p> <p>Y2: Kg. De explosivo</p> <p>Y3: PPV mm/s</p>	<p align="center"><u>Tipo de Investigación</u></p> <p>Aplicada</p> <p align="center"><u>Nivel de Investigación</u></p> <p>Explicativo</p> <p align="center"><u>Diseño de la Investigación</u></p> <p>Experimental</p> <p align="center"><u>Técnica</u></p> <p>Observación</p> <p align="center"><u>Instrumento</u></p> <p>Guía de observación</p> <p>Sismógrafos</p> <p>Geófonos</p> <p>Software I-Blast 7.8</p> <p>Laptop</p>

Anexo N°2: Ubicación de Perforaciones Diamantinas en Zona de Proyecto.



Anexo N°3: Caracterización Geomecánica de la Zona.

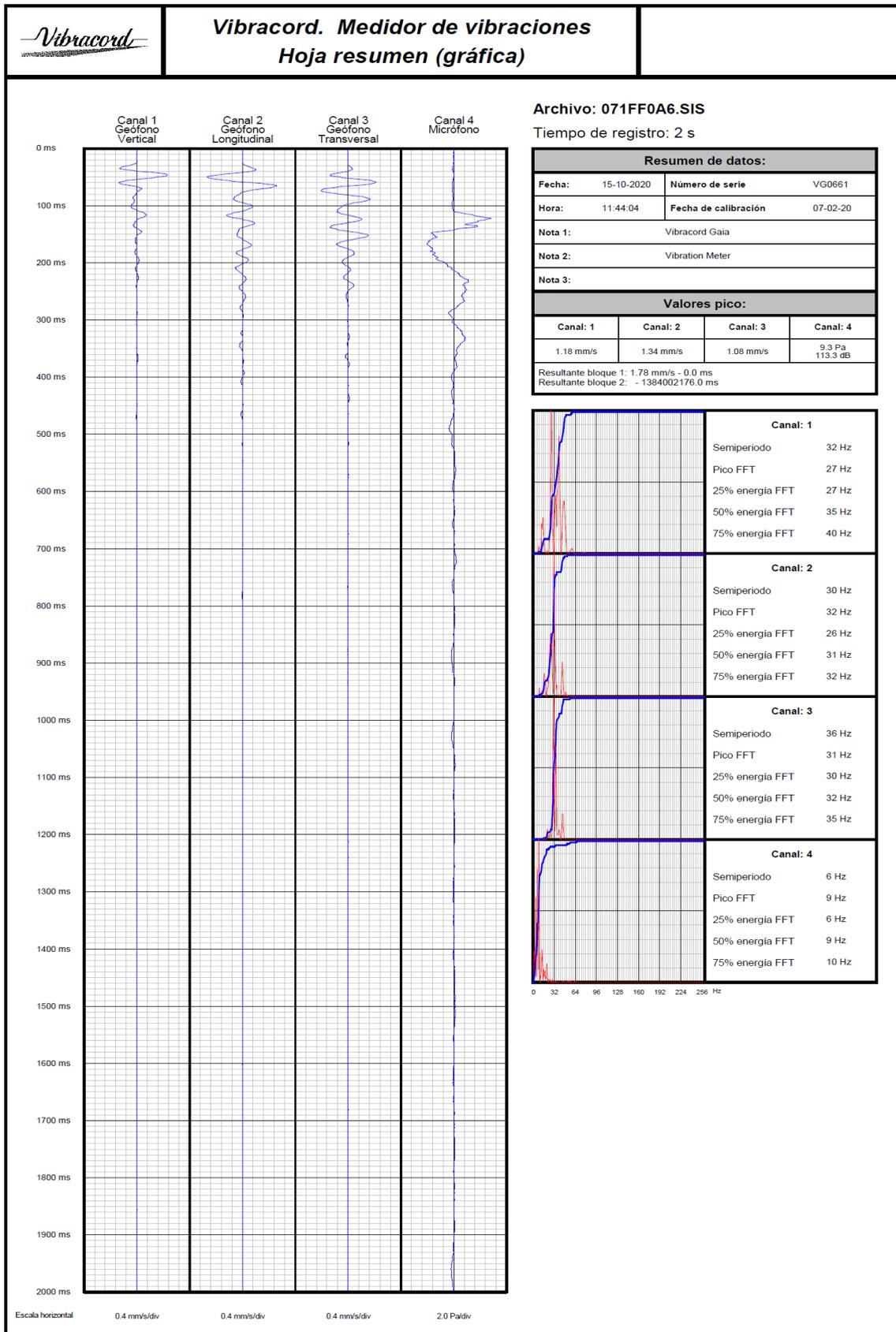


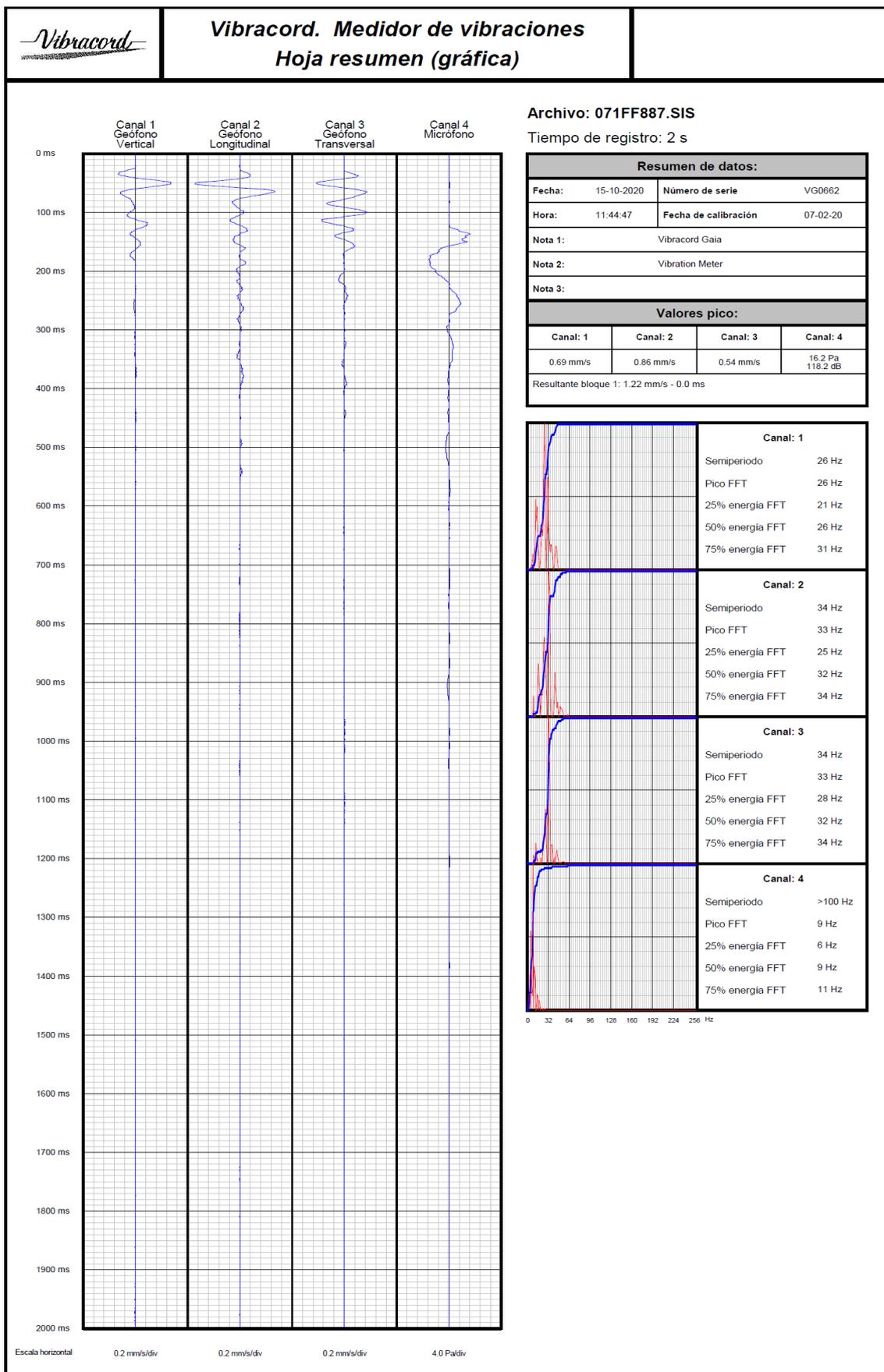
Anexo N°4: Resumen de Perforaciones Diamantinas.

UBICACIÓN	N°	CODIGO DE PERFORACIÓN	COORDENADAS UTM WGS 84		ELEVACIÓN (m)	INCLINACIÓN (°)	AZIMUT (°)	PROFUNDIDAD						NIVEL DE AGUA ACTUAL (m)	N° DE PRUEBAS PERMEABILIDAD LEFRANC	N° DE PRUEBAS PERMEABILIDAD LUGEON	N° DE CAJAS
			ESTE (m)	NORTE (m)				FECHA INICIO	FECHA FINAL	EQUIPO DE PERFORACIÓN	TOTAL (m)	SUELO (m)	ROCA (m)				
Eje de Presa	1	P-06	323397.060	8108561.48	3291.31	(+)20	N135	8/05/2019	14/05/2019	Diamec 282	30.00	0.00	30.00	SN	0	7	9
	2	P-07	323398.75	8108565.23	3286.98	-70	N155	25/04/2019	28/04/2019	Versadrill 1.4	30.00	3.50	26.50	3.00	1	4	8
	3	P-08	323396.05	8108571.24	3286.83	-60	N335	29/04/2019	3/05/2019	Versadrill 1.4	40.00	10.80	29.20	4.00	1	6	11
	4	P-09	323395.89	8108571.70	3287.80	-90	vertical	9/03/2019	25/03/2019	Versadrill 1.4	50.00	10.50	39.50	10.50	1	8	14
	5	P-10	323383.34	8108595.66	3302.17	-75	N155	23/04/2019	27/04/2019	Diamec 282	30.00	0.00	30.00	19.00	1	4	8
	6	P-11	323380.90	8108600.65	3302.10	-60	N335	29/04/2019	4/05/1900	Diamec 282	40.00	2.30	37.70	17.00	3	7	11
Cantera Truck Shop	1	PT-01	326106.82	8108554.97	3523.23	-60	N180	29/11/2019	1/12/2019	Diamec 282	30.10	1.00	29.10	0.00	0	0	8
	2	PT-02	326079.01	8108517.58	3541.61	-90	Vertical	21/11/2018	24/11/2018	Diamec 282	30.10	0.00	30.10	0.00	0	0	8
Cantera Bajo Rio Asana	3	PT-03	324540.00	8108588.00	3266.00	-45	N270	28/03/2019	4/04/2019	Diamec 282	30.00	1.70	28.30	0.00	0	0	7
	4	PT-04	324538.00	8108588.00	3218.00	-60	N195	4/04/2019	4/04/2019	Diamec 282	3.00	0.00	3.00	0.00	0	0	1
Total		10								Total	313.2	29.80	283.40		7	36	85
										Mínimo	3.0	0.0					
										Máximo	50.0	10.8					
										Promedio	31.3	3.0					

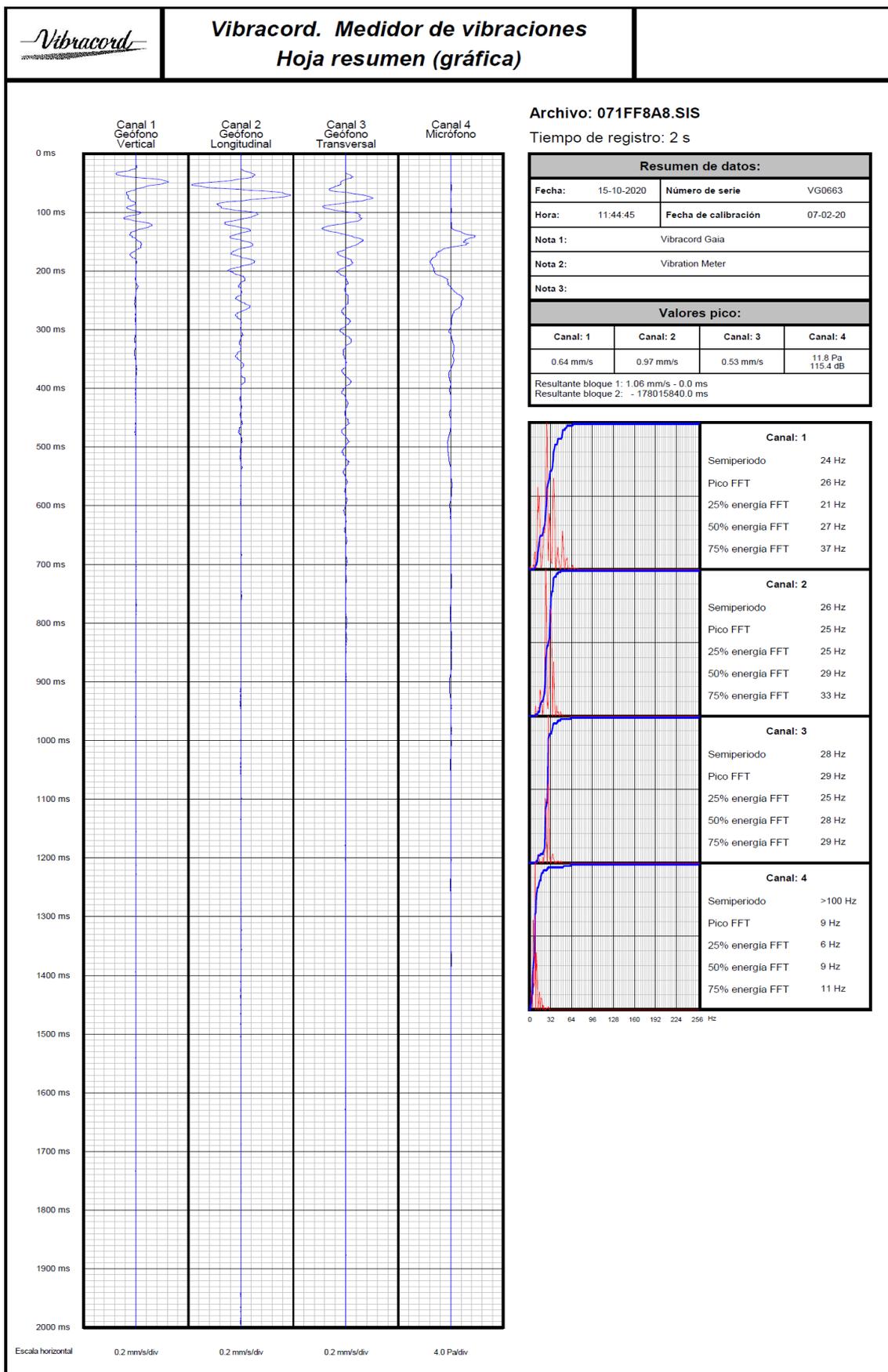
Notas: (SN) Sin nivel
 (+) En dirección opuesta a las manecillas del reloj
 (-) En dirección a las manecillas del reloj

Anexo N°5: Registros Sísmicos Onda Elemental.



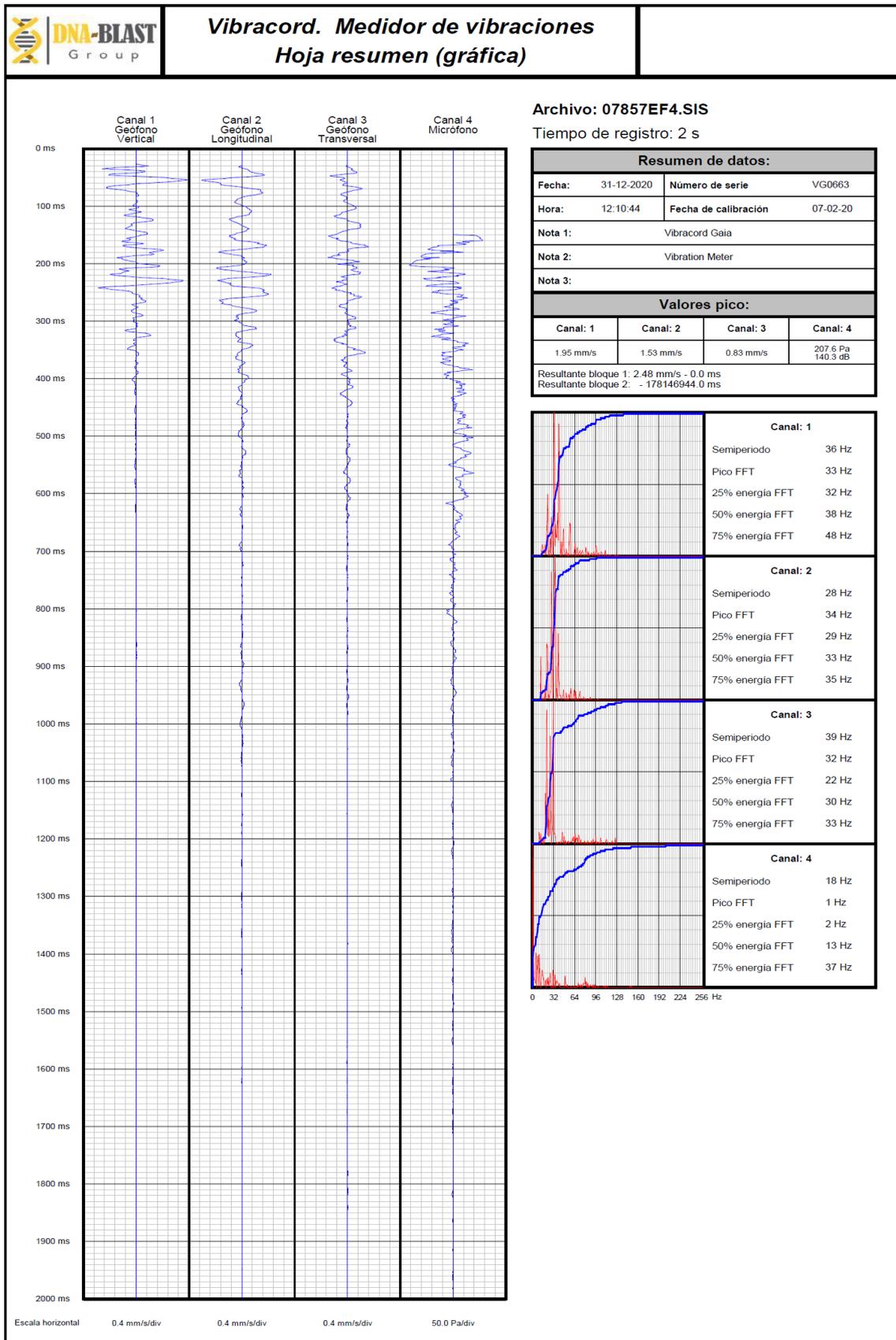


Anexo 5-2: Registro sísmico voladura prueba zona Plinto (D = 51.66 m).

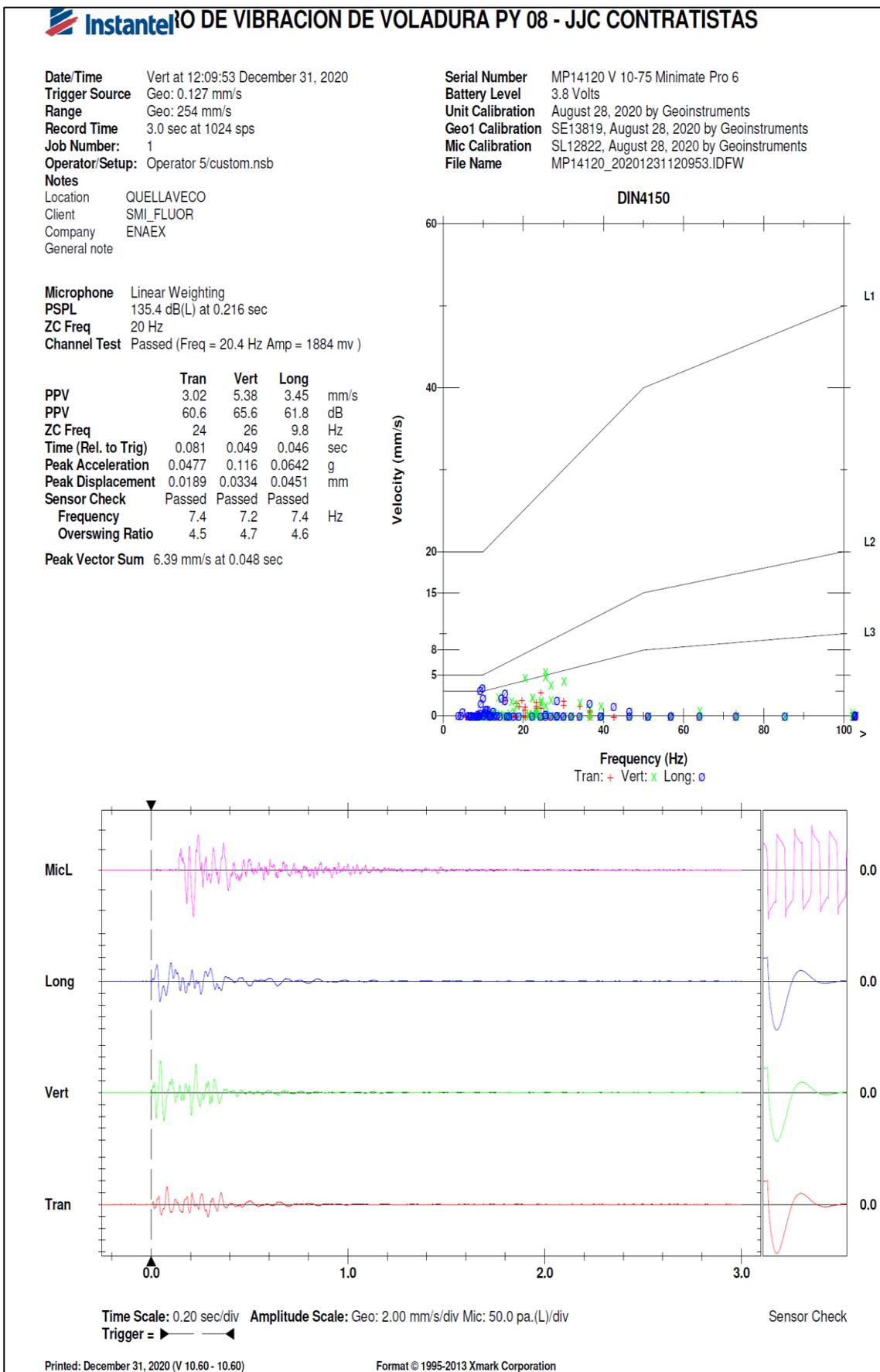


Anexo 5-3: Registro sísmico voladura prueba zona Plinto (D = 53.71 m).

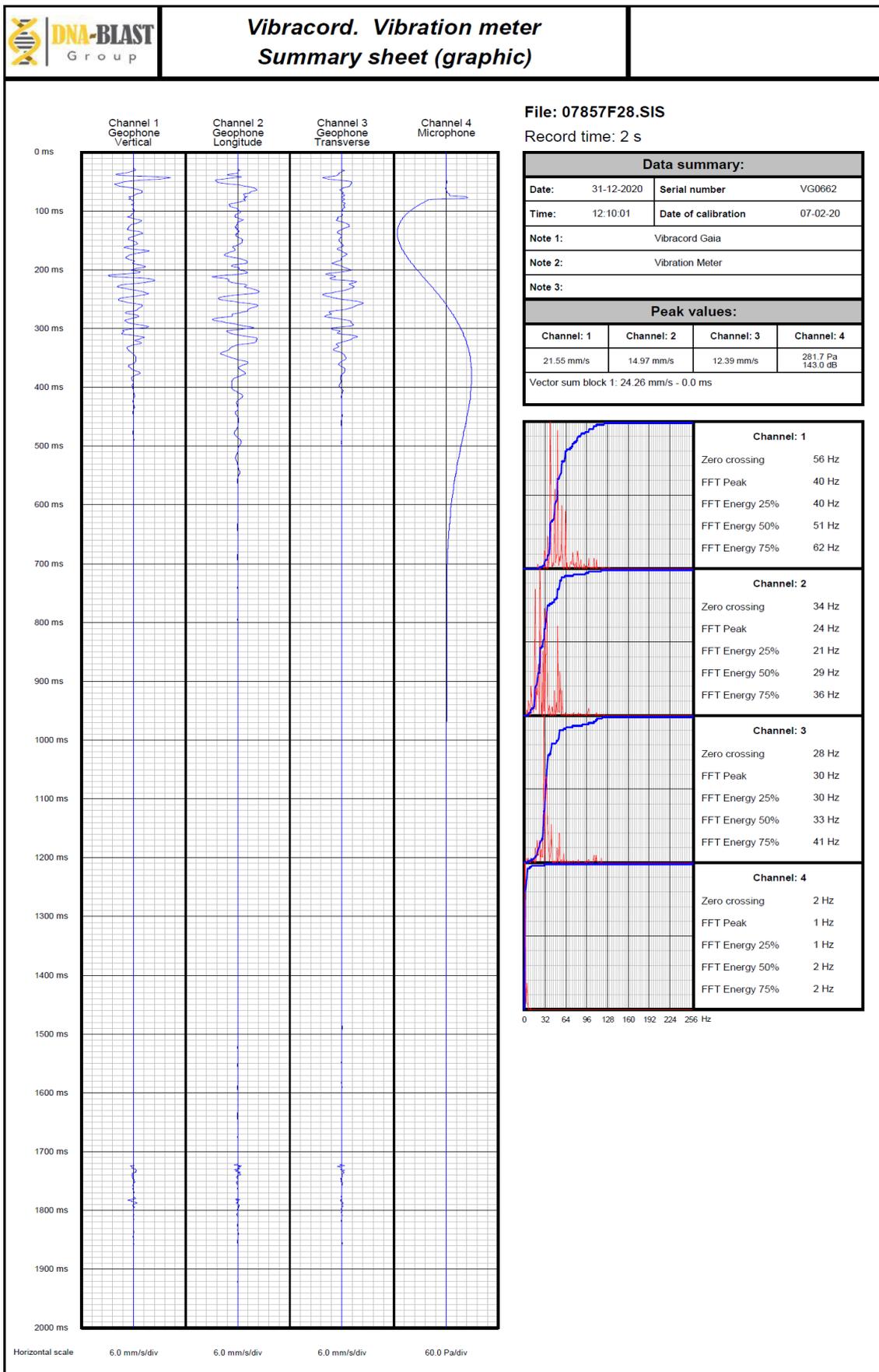
Anexo N°6: Registros Sísmicos Voladura Masiva.



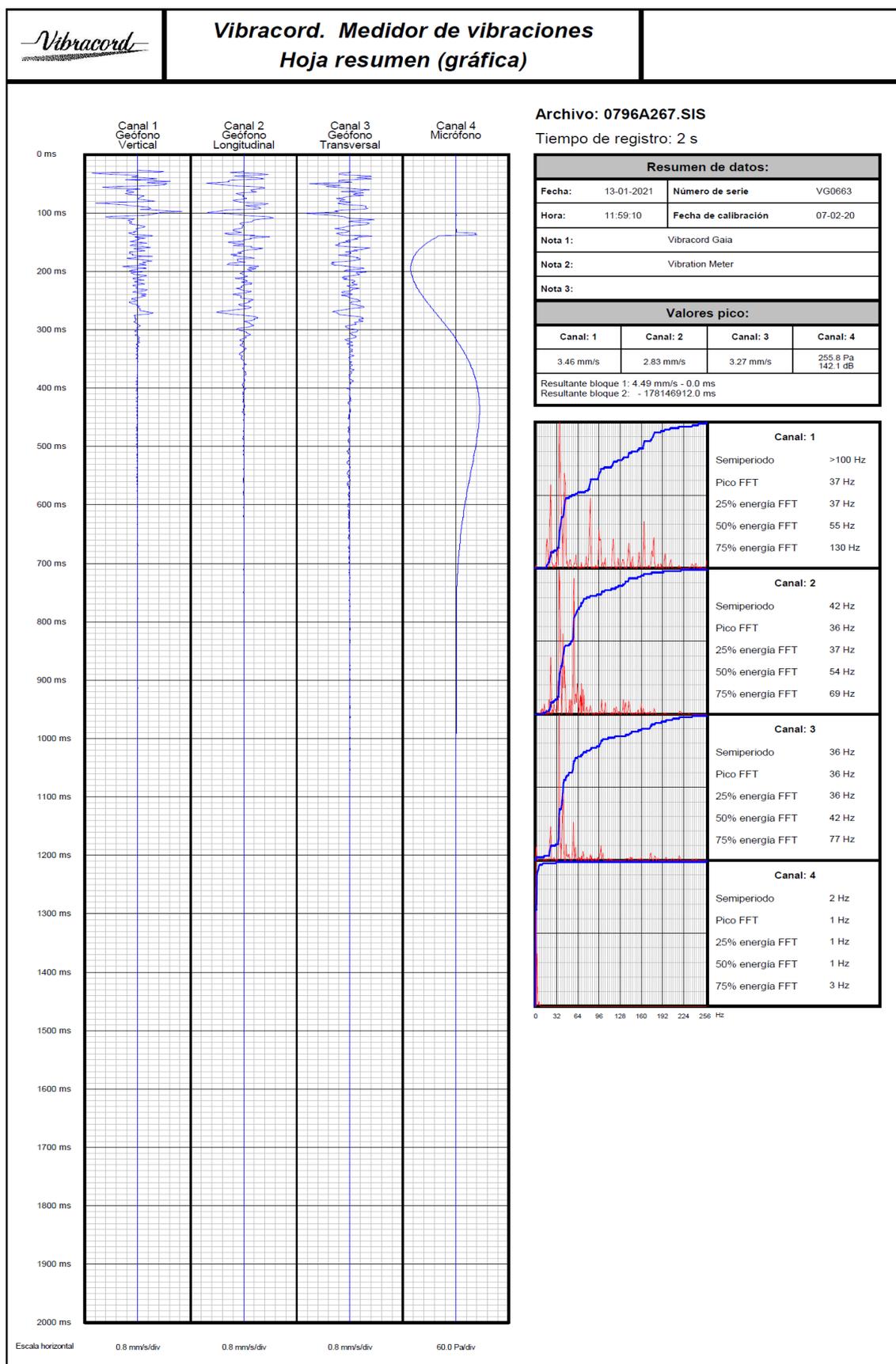
Anexo 6-1: Registro sísmico voladura zona Plinto (fecha: 31/12/20).



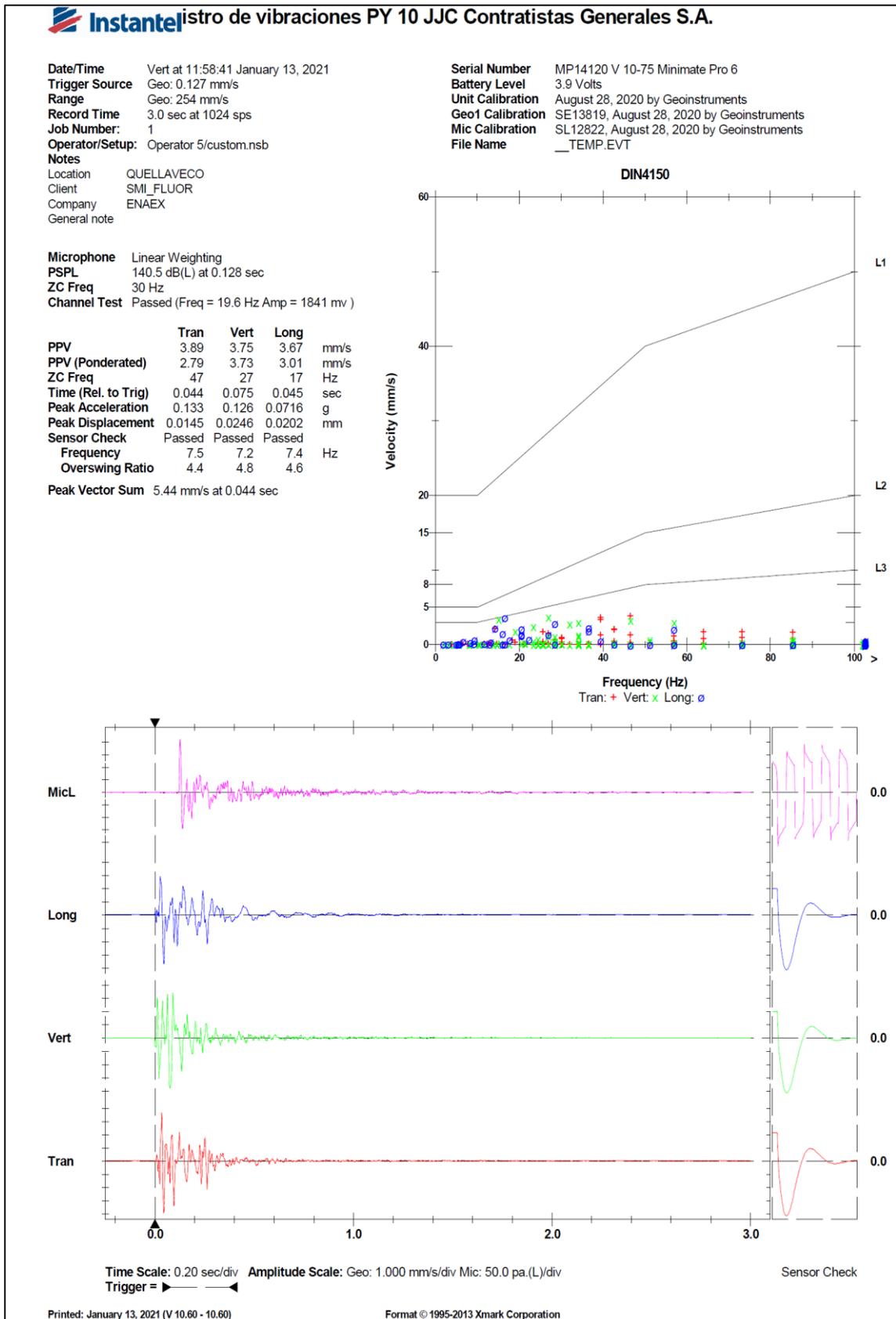
Anexo 6-2: Registro sísmico voladura zona Plataforma de Bombas (fecha: 31/12/20).



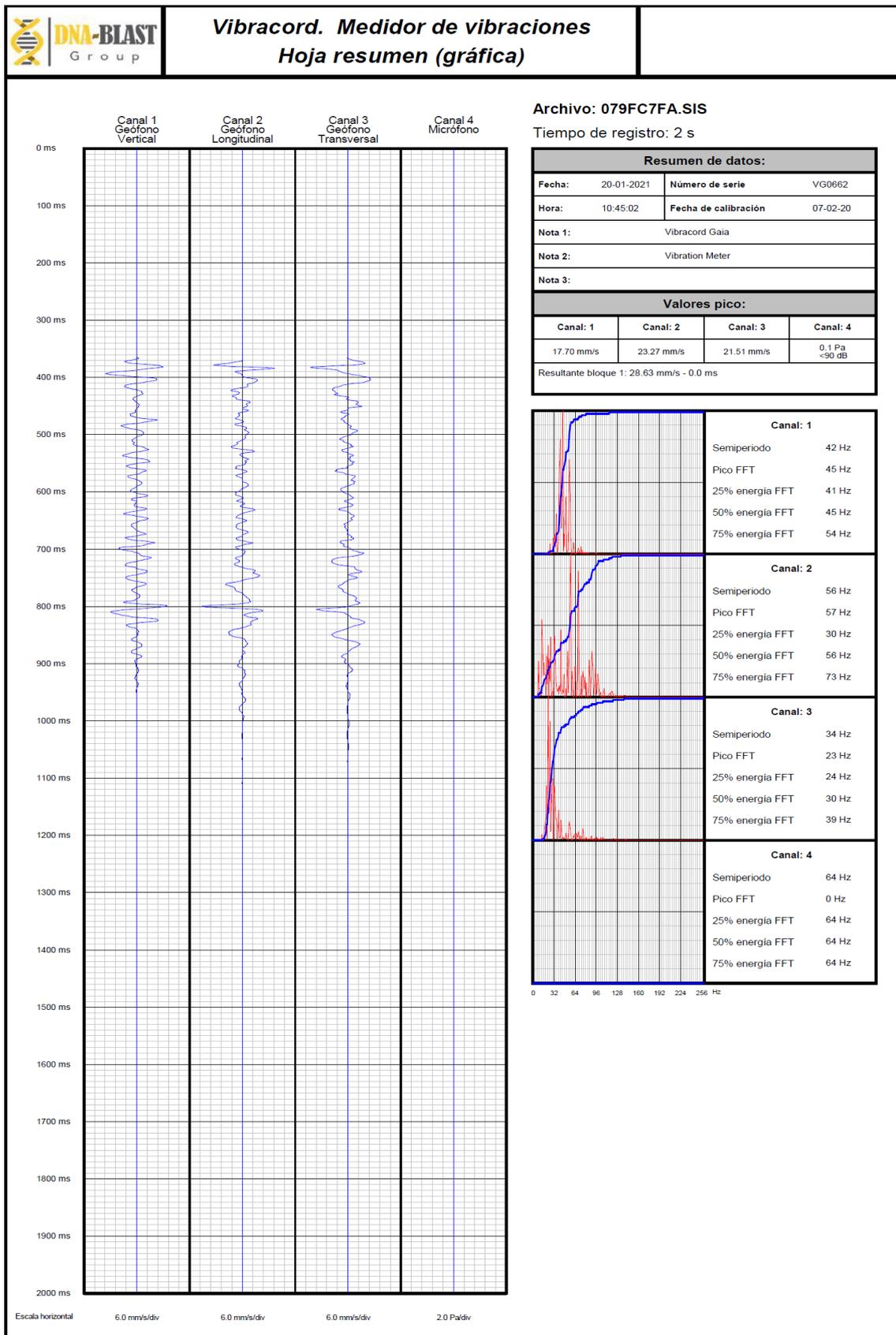
Anexo 6-3: Registro sísmico voladura zona Túnel salida (fecha: 31/12/20).



Anexo 6-4: Registro sísmico voladura zona Plinto (fecha: 13/01/21).



Anexo 6-5: Registro sísmico voladura zona Plataforma de bombas (fecha: 13/01/21).



Anexo 6-6: Registro sísmico voladura zona Túnel salida (fecha: 20/01/21).

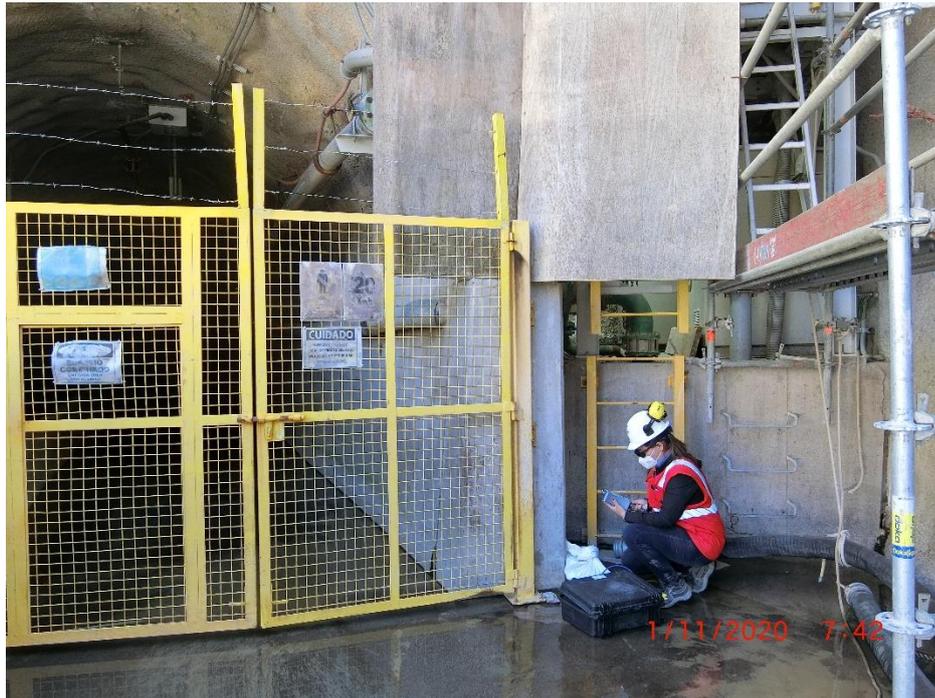
Anexo N°7: Panel Fotográfico

Figura 1: *Colocación de sismógrafo en punto de monitoreo Túnel Salida.*



Figura 2: *Colocación de sismógrafo en punto de monitoreo zona Plinto.*

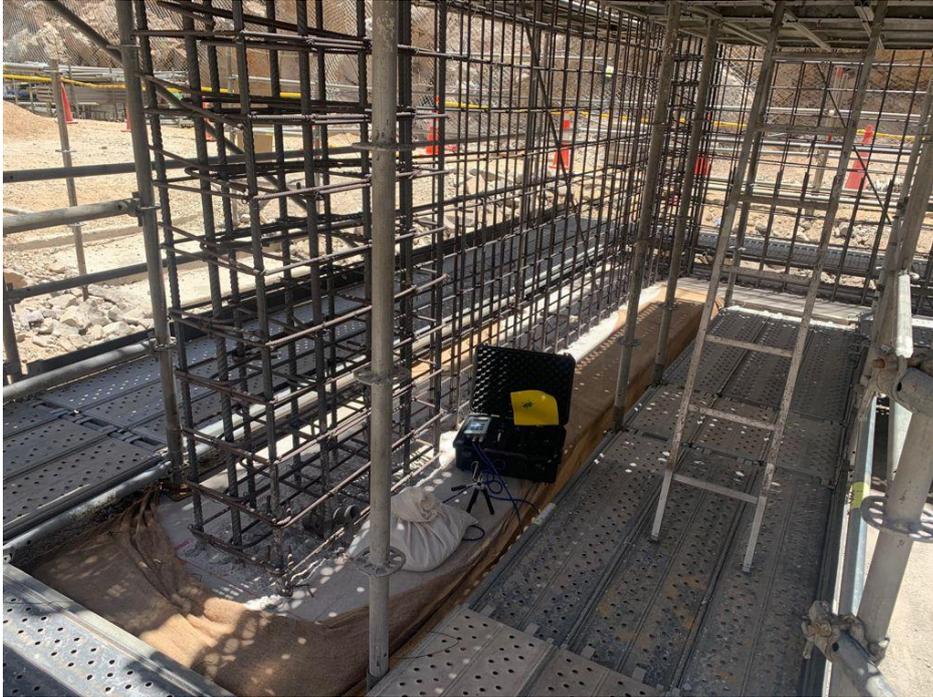


Figura 3: Colocación de sismógrafo en punto de monitoreo Plataforma de bombas.



Figura 4: Carguío de taladros perforados.



Figura 5: *Evaluación de resultados de voladura.*



Ley N°30035
Respositorio Nacional Digital



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
INGENIERIA**

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA EN EL PORTAL DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNI

1. DATOS PERSONALES

Apellidos y nombres: YOGER MATEO GUERRERO ESPINOZA

D.N.I: 43492156

Teléfono casa: celular: 982 221 580

Correos electrónicos: guespinoza273@hotmail.com

2. DATOS ACADÉMICOS

Grado académico: Bachiller

Mención: Ingeniería de Minas

3. DATOS DE LA TESIS

Título:

“Modelamiento Predictivo de Vibraciones en Campo Lejano para Inferir Vibraciones en Voladuras Masivas Cerca a Estructuras de Concreto”.

Año de publicación: 2022

A través del presente, autorizo a la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería, la publicación electrónica a texto completo en el Repositorio Institucional, el citado título.

Firma:

Fecha de recepción: 10/05/2022



Contacto

guespinoza273@Hotmail.com

+51 982221580.

Urb. Vista alegre_Pje. 28 de julio n°428.

Provincia Huaraz.

Ancash, Peru.

Áreas de Experiencia

- Operaciones Mina.
- Perforación y Voladura.
- Movimiento de Tierras.
- Geotecnia.
- Gestión de Proyectos.
- Gestión de la Seguridad.
- Sistemas de Gestion Integrados (SIG).

Yoger Mateo

GUERRERO ESPINOZA

Profesional con más de 9 años de experiencia en Minería a nivel nacional e internacional, ejerciendo liderazgo en diversas áreas como operaciones mina, perforación y voladura, seguridad, movimientos de tierra masivos, entre otros. Habitado a trabajar por objetivo y bajo presión. Me considero un profesional creativo, dinámico, flexible, proactivo, responsable. Actualmente responsable del desarrollo de ingeniería para actividades de perforación y voladura con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos en voladura (fragmentación, proyección, control de taludes, vibraciones, entre otros).

EDUCACIÓN

2008 Ingeniería de Minas en Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalúrgica de la Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo.(UNASAM)

2012 Diplomado en Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo Universidad Inca Garcilaso de la Vega/CESAP.

2016 Maestría con mención en Gestión Minera (Egresado) Facultad de Ingeniería Geologica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería. (UNI)

CERTIFICACIONES

- Curso "Avaliação da Incerteza de medição – Gauss Consultoria e Treinamento – Brasil - 2022
- Expositor en el III Congreso Nacional de Perforación y Voladura (CONAPERVOL) - 2021
- Curso taller "Gestion de Costos de Perforación y Voladura en Minería" - 2020
- Entrenamiento "Tecnológico-KON III" – 2020
- Manejo Avanzado de Software I-Blast.
- Entrenamiento Software JK Simblast.
- Capacitación conceptos básicos de seguridad y salud en el trabajo, riesgo maquinaria, manejo de materiales peligrosos.
- Capacitación Ley 2978 "Ley de Seguridad y salud en el Trabajo".
- Curso "Interpretación de las Normas ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001.
- Curso "Liderando con Coraje".
- Capacitación en Dirección de Proyectos PMBOK; y otros.

EXPERIENCIA PROFESIONAL

Responsable de Servicios de Voladura	2020 - 2021
DNA-Blast Group	Perú y Brasil
<ul style="list-style-type: none"> • Actualmente desempeñándome como consultor externo de voladura en el proyecto "Planamiento, monitoreamiento de vibraciones y control de voladuras en el complejo Vargem Grande" - Mineradora VALE S.A. • Responsable de coordinar y desarrollar la ingeniería en actividades de perforación y voladura, garantizando el cumplimiento de los objetivos establecidos según requerimiento del cliente (fragmentación, proyección, vibración, u otros) . • Responsable de entrenar y capacitar al personal de DNA blast en nuevas actualizaciones del software I-Blast, y clientes que actualmente vienen utilizando el software en sus diferentes operaciones a nivel nacional e internacional. 	
Ingeniero de Perforación y Voladura	2018 - 2020
Cosapi Minería SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de gestionar, informar y controlar los trabajos de perforación y voladura, garantizando el cumplimiento del plan mensual de minado. Mina SHOUGANG • Manejo de indicadores de Gestión (KPI) de perforación y voladura. • Responsable del área de perforación y voladura en ausencia del Jefe de PERVOL. 	
Responsable de Servicios de Voladura	2015 - 2018
DNA-Blast Group	Perú, Bolivia, México y Francia
<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de coordinar y desarrollar la ingeniería en actividades de perforación y voladura, garantizando el cumplimiento de los objetivos establecidos según requerimiento del cliente (fragmentación, proyección, vibración, u otros) . • Manejo de indicadores de Gestión (KPI) en voladura. • Funciones desempeñadas en Consorcio Constructor CHAVIMOCHIC, Especialistas en Minerales Calizos ESMICAL S.A., PROACON S.A. Proyecto Túnel II □ Ramal Carmelinas y VICAT S.A. Carriere de la Courbaisse. 	
Supervisor Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente	2014
Conalvias Construcciones S.A.S.	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de la implementación y supervisión del Sistema de Gestión de Seguridad. • Elaboración e implementación de la matriz IPER (Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos) y matriz IAAS (investigación de Aspectos Ambientales Significativos). • Capacitación y supervisión en la identificación y control, de Riesgos críticos asociados a las actividades realizadas en mina Lagunas Norte - Barrick. 	
Ingeniero de Asistencia Técnica	2012 -2013
FAMESA Explosivos SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Brindar soporte técnico en perforación y voladura en minería superficial y subterránea, diseño de polvorines, mantener actualizado el stock de accesorios y explosivos por cliente. • Brindar entrenamiento en el uso y manipuleo de Explosivos/Accesorios de voladura, entrenamiento en optimizaciones de voladuras. • Gestión para la captación de nuevos clientes. 	

Supervisor de Seguridad, Salud y Medio Ambiente	2012
Constructora CHEVES SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Cumplimiento al plan y programa HSE en la obra Hidroeléctrica de Cheves, aplicando la Norma G-050 ,OHSAS 18001 y DS 055 -2010 -EM . • Asesoramiento y/o revisión diaria del IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación y Control de Riesgos) en los frentes de trabajo interior túnel y superficie. 	
Supervisor de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente	2011
Javfrank Contratistas SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo y/o cumplimiento del plan y programa de Medio Ambiente, Seguridad y Salud Ocupacional (MASS).Aprobados bajo los lineamientos de Minera Antamina. • Cumplimiento del Sistema de Gestion de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente. • Supervision de actividades con riesgo bajo, medio y alto. 	
Supervisor de Campo – Movimiento de Tierras	2010
Minera Barrick S.A.– Unidad Pierina	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Supervisión de la Construcción del Botadero Continuación Sur (construcción y ampliación de Pads de Lixiviación (9HA), movimiento masivo de tierras. • Control de los diferentes procesos de Construcción del Proyecto Ampliación Fase I del Leach Pad en la Mina Pierina: desbroce, excavaciones, rellenos, perforación y voladura, sistema de sub-drenaje, colocación de suelo de baja permeabilidad, impermeabilización con geomembrana, sistema de colección de solución rica, canal perimetral. 	
Jefe de Guardia	2009
Sociedad Minera San Roque FM SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Planeamiento, dirección y ejecución del programa mensual de producción, dando cumplimiento a los lineamientos y políticas de la empresa. • Desarrollar el programa de seguridad, dando cumplimiento a la normativa de Seguridad e Higiene Minera (DS DS046), programa de inspecciones y actividades anexas a la prevención de perdidas. 	



Contact

guespinoza273@Hotmail.com

+51 982221580.

Urb. Vista alegre_Pje. 28
july 28 n°428.

Huaraz Province.
Ancash, Peru.

Areas of Experience

- Mine Operations.
- Drilling and Blasting.
- Eart Movements.
- Geotechnics.
- Project Management.
- Safety Management.
- Integrated Management System (SIG).

Yoger Mateo

GUERRERO ESPINOZA

Professional with more than 9 years of experience in Mining at a national and international level, exercising leadership in various areas such as mine operations, drilling and blasting, security, massive earthworks, among others. Accustomed to working by objective and under pressure. I consider myself a creative, dynamic, flexible, proactive, responsible professional. Currently responsible for the development of engineering for drilling and blasting activities in order to guarantee compliance with blasting objectives (fragmentation, projection, slope control, vibrations, among others).

EDUCATION

2008 Mining Engineer at the Faculty on Mining Engineering, Geology and Metallurgy of the Santiago Antunez of Mayolo National University.(UNASAM)

2012 Diploma in Occupational Health and Safety Management Inca Garcilaso of the Vega University/CESAP.

2016 Master's degree with mention in Mining Management (graduated) Faculty of Geology, Mining and Metallurgical Engineering of the National University of Engineering. (UNI)

CERTIFICATIONS

- Course "Avaliação da Incerteza de medição – Gauss Consultoria e Treinamento – Brasil - 2022
- Speaker at the III National Congress of Drilling and Blasting (CONAPERVOL) - 2021
- Workshop course "Management of Drilling and Blasting Costs in Mining" - 2020
- Training "Technology I-KON III" – 2020
- Advanced handling of Software I-Blast.
- Training Software JK Simblast.
- Training basic concepts of safety and health at work, machinery risk, handling of danger materials.
- Training Law 2978 "Health and Safety Law in the work".
- Course "Interpretation of the Rules ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.
- Course "Leading with Courage".
- Training in Project Management PMBOK; and others.

PROFESSIONAL EXPERIENCE

Head of Blasting Services	2020 - 2021
DNA-Blast Group	Perú y Brasil
<ul style="list-style-type: none"> • Currently working as an external blasting consultant in the project "Planning, vibration monitoring and blasting control in the Vargem Grande complex" - Mining VALE S.A. • Responsible for coordinating and developing engineering in drilling and blasting activities, guaranteeing compliance with the objectives established according to customer requirements (fragmentation, projection, vibration, or others). • Responsible for training and educating DNA blast staff in new updates of the I-Blast software, and clients who are currently using the software in their different operations at a national and international level. 	
Drilling and Blasting Engineer	2018 - 2020
Cosapi Minería SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Responsible for managing, reporting and controlling drilling and blasting work, ensuring compliance with the monthly mining plan for the SHOUGANG Mine. • Management of key performance indicators (KPI) for drilling and blasting. • Responsible for the drilling and blasting area in the absence of the Head of PERVOL. 	
Head of Blasting Services	2015 - 2018
DNA-Blast Group	Perú, Bolivia, México y Francia
<ul style="list-style-type: none"> • Responsible for coordinating and developing engineering in drilling and blasting activities, guaranteeing compliance with the objectives established according to customer requirements (fragmentation, projection, vibration, or others). • Management of key performance indicators (KPI) for blasting. • Functions performed in the Consorcio Constructor CHAVIMOCHIC, specialist in Minerales Calizas ESMICAL S.A., PROACON S.A.; Tunnel project II – Ramal Carmelinas VICAT S.A. Carrière of the Courbaisse. 	
Safety, Occupational Health and Environment Supervisor	2014
Conalvias Construcciones S.A.S.	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Responsible for the implementation and supervision of the Safety Management System. • Preparation and implementation of the matrix IPER (Identification of hazards and evaluation Risks) y matrix IAAS (Investigation of Significant Environmental Aspects). • Training and supervision in the identification and control of critical risks associated with activities carried out in mine Lagunas Norte - Barrick. 	
Technical Assistance Engineer	2012 -2013
FAMESA Explosivos SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Provide technical support in drilling and blasting in surface and underground mining, design of powder magazines keep the stock of accessories and explosives. • Provide training in the use and handling of Explosives/blasting accessories, as well as training in optimization of blasting. • Management to attract new customers. 	

Safety, Health and Environment Supervisor	2012
Constructora CHEVES SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Compliance with the HSE plan and program in the Cheves Hydroelectric Works, applying the Standard G-050, OHSAS 18001 y DS 055-2010-EM. • Advice and/or daily review of the IPERC (Danger Identification, Risk Assessment and Control) on the interior tunnel and surface work fronts. 	
Safety, Occupational Health and Environment Supervisor	2011
Javfrank Contratistas SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Development and/or compliance with the Environment, Safety and Occupational Health (MASS) plan and program. Approved under the guidelines of Mining Antamina. • Compliance with the Safety, Occupational Health and Environment Management System. • Supervision of activities with low, medium and high risk. 	
Field Supervisor – Earthworks	2010
Minera Barrick S.A.– Unidad Pierina	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Supervision of the Construction of the South Continuation Dump (SWC), construction and expansion of Leaching Pads (9 HA), massive earthworks. • Control of the different construction processes of the Phase I Leach Pad Expansion Project at the Pierina Mine: Clearing, Excavations, Filling, Drilling and Blasting, Sub-drainage system, placement of low-permeability soil, waterproofing with Geomembrane, collection system rich solution, perimeter channel. 	
Chief Guard	2009
Sociedad Minera San Roque FM SAC	Perú
<ul style="list-style-type: none"> • Planning, direction and execution of the monthly production program, complying with the company's guidelines and politics. • Develop the safety program, complying with the Mining Safety and Hygiene regulations (DS 046), inspection program and activities related to loss prevention. 	