



UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”



FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y METALURGIA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS:

CONTROL DE VIBRACIONES POR VOLADURA PARA  
MINIMIZAR LOS EFECTOS DE DAÑO EN MINA CUAJONE DE  
SPCC - AÑO 2017

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. MAYPÚ ALVARADO, Alfredo Cisco

ASESOR:

MBA. Ing. CASTILLEJO MELGAREJO, Ricardo Cayo

HUARAZ - PERÚ

2020

**FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCTENTES A OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

**1. Datos del autor:**

Apellidos y Nombres: MAYPU ALVARADO ALFREDO CISCO

Código de alumno: 00.0032.8.AM                      Teléfono: 950087742

E-mail: alfredomaypu@gmail.com                      D.N.I. n°: 40922797

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

**2. Tipo de trabajo de investigación:**

- |  |  |
|--|--|
| <input checked="" type="radio"/> Tesis   | <input type="radio"/> Trabajo de Suficiencia Profesional |
| <input type="radio"/> Trabajo Académico  | <input type="radio"/> Trabajo de Investigación           |
| <input type="radio"/> Tesinas (presentadas antes de la publicación de la Nueva Ley Universitaria 30220 – 2014) |  |

**3. Título Profesional o Grado obtenido:**

INGENIERO DE MINAS

**4. Título del trabajo de investigación:**

"CONTROL DE VIBRACIONES POR VOLADURA PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DE DAÑO EN MINA CUAJONE DE SPCC - AÑO 2017"

**5. Facultad de:** Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia

**6. Escuela, Carrera o Programa:** INGENIERÍA DE MINAS

**7. Asesor:**

Apellidos y nombres CASTILLEJO MELGAREJO RICARDO CAYO                      D.N.I n°: 31660457

E-mail: rcastillejo77@gmail.com                      ID ORCID: \_\_\_\_\_

**8. Estilo de Citas:** APA

**9. Tipo de acceso al Documento:**

- Acceso público\* al contenido completo. Acceso restringido\*\* al contenido completo
- restringido\*\* al contenido completo

Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 10. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.



Firma del autor

### 11. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.



*El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.*

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

### 12. Para ser llenado por la Dirección del Repositorio Institucional

Fecha de recepción del documento por el Repositorio Institucional:

Huaraz, 04/06/2021

Firma:  \_\_\_\_\_  

 Varillas Wilian Eduardo  
 Asistente en Informática y Sistemas  
 - UNASAM -

**\*Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**\*\* Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS,  
GEOLOGÍA Y METALURGIA



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL**

En la ciudad de Huaraz, siendo las nueve horas con cinco minutos de la mañana (9:05 a.m) del día Seis de Mayo del Dos mil Veintiuno (06/05/2021), se reunieron los miembros del jurado calificador nominados según Resolución Nro. 021-2021-FIMGM/CF, de fecha 03 de Marzo del 2021, integrado por los siguientes Docentes: **Dr. Ing. JACINTO CORNELIO ISIDRO GIRALDO**, como **Presidente**; **Dr. Ing. JUAN ROGER QUIÑONES POMA**, como **Secretario** y el **M.Sc. Ing. GUSTAVO ROBERTO BOJORQUEZ HUERTA** como **Vocal**; para la sustentación de la tesis Titulada: **"CONTROL DE VIBRACIONES POR VOLADURA PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DE DAÑO EN MINA CUAJONE DE SPCC – AÑO 2017"** Presentado por el Bachiller **ALFREDO CISCO MAYPU ALVARADO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas, en concordancia con el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", se procedió con el acto de sustentación bajo las siguientes consideraciones, el Presidente del Jurado calificador, invitó a los docentes, alumnos y público en general a participar en este acto; luego invitó al Secretario del Jurado calificador a dar lectura de la Resolución N° 021-2021-FIMGM/CF de fecha 03 de Marzo del 2021. Acto seguido invitó al sustentante a la defensa de su tesis por un lapso de veinte minutos (20), concluida con la misma, se procedió con el rol de preguntas de parte de los miembros del Jurado Calificador, finalmente se invitó al público en general a hacer abandono del Auditorium de la FIMGM por un lapso de diez (10) minutos con el propósito de deliberar la nota del sustentante, **ACORDANDO: APROBAR CON EL CALIFICATIVO (\*) de: DIECISIETE (17 ) Aprobado con Distinción.** Siendo las Diez horas y veinte minutos (10:20 a.m.) del mismo día, se dio por concluida el acto de sustentación.

En consecuencia, queda en condición de ser calificado **APTO** por el Consejo de Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia y por el Consejo Universitario de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" y recibir el Título de **INGENIERO DE MINAS** de conformidad con la Ley Universitaria y el Estatuto de la UNASAM.

Dr. Ing. JACINTO CORNELIO ISIDRO GIRALDO  
Presidente

Dr. Ing. JUAN ROGER QUIÑONES POMA  
Secretario

M.Sc. Ing. GUSTAVO ROBERTO BOJORQUEZ HUERTA  
Vocal

MBA Ing. RICARDO CAYO CASTILLEJO MELGAREJO  
Asesor

(\*) De acuerdo con el Artículo 84º Reglamento de Grados y Títulos de la UNASAM, están deben ser calificadas con términos de: **APROBADO CON EXCELENCIA** (19-20), **APROBADO CON DISTINCIÓN** (17-18), **APROBADO** (14-16), **DESAPROBADO** (00-13).



**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"**

*"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"*  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS,  
GEOLOGÍA Y METALURGIA**



**ACTA DE CONFORMIDAD DE TESIS**

Los Miembros del Jurado, luego de evaluar la tesis titulada: **"CONTROL DE VIBRACIONES POR VOLADURA PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DE DAÑO EN MINA CUAJONE DE SPCC – AÑO 2017"** Presentado por el Bachiller ALFREDO CISCO MAYPU ALVARADO y sustentada el día 06 de Mayo del 2021, por Resolución de Consejo de Facultad N° 021-2021-FIMGM-/CF , la declaramos CONFORME.

En consecuencia queda en condiciones de ser publicada.

Huaraz, 06 de Mayo del 2021

Dr. Ing. JACINTO CORNELIO ISIDRO GIRALDO  
Presidente

Dr. Ing. JUAN ROGER QUIÑONES POMA  
Secretario

M.Sc. Ing. GUSTAVO ROBERTO BOJORQUEZ HUERTA  
Vocal

MBA Ing. RICARDO CAYO CASTILLEJO MELGAREJO  
Asesor

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, por bendecir e iluminar mi camino, por ser el inspirador y darme fuerzas para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis hijos, quienes con su ternura, amor, comprensión y paciencia impulsaron a cumplir hoy un sueño más.

A mis padres por su apoyo incondicional en mi formación y desarrollo como Profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, principalmente por haberme dado la existencia, fuerza y sabiduría para seguir adelante y llegar a concretar mis metas.

A la Universidad Nacional de Santiago Antúnez de Mayolo de Ancash por ser el Alma Mater durante mi formación universitaria, junto a todos los maestros, doctores e ingenieros que día a día impartieron sus enseñanzas y consejos; en especial a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia por sus conocimientos y consejos brindados para realizar mis estudios.

Un agradecimiento especial al MBA Ing, Ricardo Castillejo Melgarejo por el apoyo brindado en la dirección de la presente investigación, por su amistad y compañerismo.

A la empresa EXSA S.A. por brindarme la oportunidad de laborar y ser parte de su proyecto, gracias al cual puedo presentar la presente tesis.

## **RESUMEN**

La presente tesis nace de la necesidad de controlar el daño al macizo rocoso producido por las vibraciones de las voladuras.

Las voladuras en el campo lejano (distancias mayores a 70.0 m.) generan desplazamientos de bloques asociados a esfuerzos post voladura en las paredes de los taludes e inmediaciones de la Fase 6A (Deslizamiento 50), motivo por el cual el presente trabajo técnico interpreta como las vibraciones afectan a estructuras e instalaciones próximas al área de voladura en la Fase 6A Este de la Mina Cuajone de la compañía SPCC, mediante el análisis de registros sísmicos tomados a diferentes distancias del punto de inicio a disparar hacia zonas delicadas estructuralmente y estos registros tendrán como datos de interés: la velocidad pico partícula, frecuencia dominante y el desplazamiento de partícula, en función a la norma internacional española para protección a instalaciones y estructuras, norma UNE 22-381-93.

Para el desarrollo del estudio se han empleado varias técnicas (monitoreo a campo lejano a diferentes distancias, Onda Elemental y Signature Hole), y software (JKSIMBLAST y BLASTWARE), lo que finalmente nos han proporcionado tiempos de retardo idóneos, límites de desplazamientos de partículas y modelos de atenuación.

Se ha determinado tiempos de retardo idóneos de 35 ms a 55 ms, tiempos entre filas mayores a 100 ms, la carga operante dinámica no debe superar de 4 taladros y el valor del desplazamiento límite de partícula no debería exceder los 0.21 mm.

### **Palabras Clave**

Daño por Vibraciones, Velocidad Pico Partícula, Frecuencia, Desplazamiento de partícula, Tiempos de Retardo.

## **ABSTRACT**

This thesis arises from the need to control the damage to the rock mass produced by the vibrations of the blasting.

Blasting in the far field (distances greater than 70.0 meters) Generates block displacements associated with post-blasting efforts on the walls of the slopes and surroundings of phase 6A (Sliding 50), which is why this work technician interprets how the vibrations affect structures and facilities near the blasting area in phase 6A East of the Cuajone Mine of the SPCC company, by analyzing seismic records taken at different distances from the starting point to shoot towards structurally sensitive areas and These records will have as interest data: the peak particle velocity, dominant frequency and particle displacement, depending on the Spanish international standard for protection of facilities and structures, UNE 22-381-93.

Several techniques (far-field monitoring at different distances, Elemental Wave and Signature Hole), and software (JKSIMBLAST and BLASTWARE) have been used for the development of the study, which finally provided us with ideal delay times, particle displacement limits and attenuation models.

Suitable delay times of 35 ms to 55 ms have been determined, times between rows greater than 100 ms, the dynamic operating load must not exceed 4 holes and the particle limit offset value should not exceed 0.21 mm.

### **Keywords**

Vibration damage, particle peak velocity, frequency, particle displacement, delay times.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xix
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	xxi
INTRODUCCIÓN .....	xxii
CAPÍTULO I .....	24
GENERALIDADES .....	24
1.1. ENTORNO FÍSICO .....	24
1.1.1. Ubicación .....	24
1.1.2. Acceso .....	25
1.1.3. Clima, Meteorología y Fisiografía .....	26

1.1.4.	Recursos Naturales, Hídricos, Energía Eléctrica y Humanos .....	26
1.2.	ENTORNO GEOLÓGICO .....	27
1.2.1.	Geología Regional .....	27
1.2.2.	Geología Estructural Regional y Distrital .....	32
1.2.3.	Geología estructural de la mina .....	34
1.2.4.	Análisis Estereográfico.....	36
1.3.	ENTORNO GEOTÉCNICO .....	37
1.3.1.	Unidades Geotécnicas Básicas (UGB) .....	37
1.3.2.	Dominios Estructurales .....	39
1.3.3.	Propiedades de la Roca Intacta y Macizo Rocoso .....	40
1.3.4.	Zonas Inestables, Deslizamientos y Fallas .....	42
1.4.	OPERACIONES MINERAS.....	44
1.4.1.	Perforación y Disparos .....	45
1.4.2.	Acarreo, Transporte y Equipos Auxiliares .....	48
	CAPÍTULO II:.....	49
	FUNDAMENTACIÓN .....	49
2.1.	MARCO TEÓRICO .....	49
2.1.1.	Antecedentes de la investigación.....	49
2.1.1.1.	Antecedentes Internacionales .....	49
2.1.1.2.	Antecedentes Nacionales .....	51

2.1.2. Definición de Términos .....	52
2.1.3. Fundamentación Teórica .....	65
2.1.3.1. Teoría de Voladuras.....	65
2.1.3.2. Descripción de las Vibraciones Producidas por las Voladuras de Rocas y sus Efectos .....	68
2.1.3.3. Ondas Sísmicas Inducidas por las Voladuras .....	70
2.1.3.4. Distribución de Energía en las Ondas.....	74
2.1.3.5. Principales Componentes de una Onda de Vibración por Voladura .....	75
2.1.3.6. Dirección de las Vibraciones por Voladura en el Terreno .....	80
2.1.3.7. Atenuación de la Onda .....	82
2.1.3.8. Daño por Voladura en Taludes.....	83
2.1.3.9. Monitoreo y Análisis de las vibraciones.....	88
2.1.3.10. Normativas de control de vibraciones .....	90
 CAPÍTULO III .....	 94
 METODOLOGÍA.....	 94
 3.1. EL PROBLEMA .....	 94
3.1.1. Descripción De La Realidad Problemática.....	94
3.1.2. Planteamiento y formulación del problema.....	96
3.1.3. Objetivos.....	97
3.1.4. Justificación .....	98
3.1.4.1. Justificación Legal.....	98
3.1.4.2. Justificación Técnica Económica .....	99
3.1.5. Limitaciones .....	100

3.1.6. Alcances.....	100
3.2. HIPÓTESIS .....	101
3.2.1. Hipótesis General .....	101
3.2.2. Hipótesis Específicas .....	101
3.3. VARIABLES.....	101
3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	102
3.4.1. Tipo De Investigación .....	102
3.4.2. Población Y Muestra .....	102
3.4.2.1. Población .....	102
3.4.2.2. Muestra .....	103
3.4.3. Técnicas E Instrumento De Recolección De Datos.....	103
3.4.3.1. Técnicas .....	103
3.4.3.2. Instrumentos .....	103
3.4.4. Forma de tratamiento de los datos.....	105
3.4.5. Forma de análisis de las informaciones.....	105
CAPÍTULO VI.....	106
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	106
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	106
4.1.1. Línea Base .....	106
4.1.2. Planificación y Ejecución de Estudio Inicial.....	109

4.2.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	112
4.2.1.	Análisis de Amplificación, Frecuencia y Desplazamiento .....	112
4.2.2.	Análisis de Onda Elemental para Determinar Tiempos de Retardo .....	115
4.2.3.	Análisis de Frecuencias Aplicando el Espectro de la Energía de Fourier .....	117
4.3.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	118
4.3.1.	Cambio de Tiempos de Retardos en los Diseños de Amarre. ....	118
4.3.2.	Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyectos Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros .....	119
4.4.	APORTES DEL TESISISTA.....	124
	CONCLUSIONES.....	125
	RECOMENDACIONES .....	127
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	128
	ANEXOS .....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de Ubicación de la unidad minera Cuajone. Fuente: WSP PERU S.A. (2017, p. 36). .....	25
Figura 2. Fisiografía y Geología Regional de la Mina Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 22). .....	28
Figura 3. Plano de Geología Local. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2012). .....	29
Figura 4. Plano de Columna Estratigráfica de Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 33). .....	30
Figura 5. Información de la Gravedad Específica y del Work Index de las Rocas. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018). .....	31
Figura 6. Modelos Geológicos de Cuajone. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2015). .....	32
Figura 7. Mapa de Geología Estructural Regional y Distrital. Fuente: INGEMMET (2018, p. 13). .....	33
Figura 8. Estructuras Locales del Yacimiento Cuajone. Fuente: San Juan Vergara (2014, p. 26). .....	35
Figura 9. Análisis Estereográfico Total de la Mina Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 46). .....	36
Figura 10. Unidades Geotécnicas Básicas (UGB) del Tajo Cuajone. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018). .....	39
Figura 11. Dominios Estructurales al 2015. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018). .....	40

Figura 12. Ubicación del Radar 059, Ubicado en el Talud Sur Oeste (539491.8, 84598.9, 3776.9), Monitorea Fase 8, Fase 6A y Fase 6B2. Fuente: Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone (2018).....	42
Figura 13. Plano de Zonas Inestables. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018). .....	43
Figura 14. Vista del Software MSR HMI versión 10.0 Rev3. Radar 59. Fuente: Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone (2018).....	43
Figura 15. Fases de Minado de Tajo Cuajone (Límite Final). Fuente: Departamento de Ingeniería Mina Cuajone (2018). .....	44
Figura 16. Diagrama Operativo Cuajone. Fuente: Departamento de Ingeniería Mina Cuajone (2018). .....	45
Figura 17. Perforadoras para Producción de Mina Cuajone. Fuente: Diseño Propio (2018). .....	46
Figura 18. Malla Triangular Equilátera Usada. Fuente: Diseño Propio (2018). .....	46
Figura 19. Tecnología Quantex. Fuente: EXSA S.A. (2015).....	47
Figura 20. Definiciones de Burden & Espaciamiento nominal y efectivo. Fuente: McKenzie (1994).....	52
Figura 21. Ilustración de Tiempo de Retardo entre Taladros y Tiempo de Retardo entre Filas. Fuente: (Haotian, 2016, p. 17). .....	55
Figura 22. Esquema representativo del secuenciamiento de Iniciación. Fuente: CINTEX (2004). .....	57
Figura 23. Esquema representativo de la Dirección de Iniciación. Fuente (Blastechnology, 2006).....	57
Figura 24. Principio de Superposición de Onda. Fuente: (Centro Educativo San Antonio María Claret, 2007, p. 51-52). .....	58

Figura 25. Método de Zero Cross (ZC). Fuente: (ENAE S.A., 2011).....	59
Figura 26. Esquema de la Técnica Signature Hole. Fuente: Rizky (2012), extraído de <a href="https://es.slideshare.net">https://es.slideshare.net</a> .....	61
Figura 27. Modelo de Montecarlo. Fuente: (ORICA MINING SERVICES, 2010). ....	62
Figura 28. Esquema de Onda Elemental Basada en Teoría de Superposición. Fuente: (ENAE S.A., 2011).....	63
Figura 29. Esquema de Resonancia Natural. Fuente: <a href="https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/WYBlasterCertModules/8AdverseEffectsBlasting.pdf">https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/WYBlasterCertModules/8AdverseEffectsBlasting.pdf</a> .....	64
Figura 30. La Transformada Rápida de Fourier (FFT). Fuente: (ENAE S.A., 2011). ....	65
Figura 31. Disparando una Carga Cilíndrica. Fuente: <a href="https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/">https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/</a> ....	65
Figura 32. Ilustración de los Tipos de Fisuras en las Proximidades del Taladro Detonado. Fuente: <a href="https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/">https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/</a> .....	66
Figura 33. Teoría de Voladuras. Fuente: Niklasson, Olsson, & Beyglou (2014).....	67
Figura 34. Fenómeno Físico en Voladura de Rocas. Fuente: <a href="https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/">https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/</a> ....	68
Figura 35. Efectos de la Voladura al Área Circundante. Fuente: Bakhtavar & Yousefi (2018). ....	69
Figura 36. Ondas Internas y Superficiales. Fuente: <a href="http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html">http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html</a> .....	72
Figura 37. Ecuaciones de la Energía en las Ondas. Fuente: Fleetwood (2010). ....	74

Figura 38. Distribución de la energía por tipo de ondas a partir de una fuerza normal aplicada cerca de la superficie según Woods (1968). Fuente: Fleetwood (2010). .....	75
Figura 39. Principales Componentes de una Onda. Fuente: Geoblast (2018). .....	76
Figura 40. Ejemplo de Cálculo de Frecuencia. Fuente: (GEOBLAST, 2018). .....	77
Figura 41. Cálculo de Periodo. Fuente: (ENAEX S.A., 2011). .....	77
Figura 42. El efecto de la Longitud de Onda y el Riesgo de Daños. Fuente: Copyrigh Sandvik Tamrock Corp. (1999). .....	78
Figura 43. Grafica representativa del desplazamiento. Fuente: www.oricaminingservices.com   Document reference: 20028. ....	79
Figura 44. Integración de la Velocidad a lo Largo del Tiempo en el Desplazamiento. Fuente: ORICA MINING SERVICES. ....	79
Figura 45. Ilustración de Ondas Sísmicas y de Aire Producida a Partir de un Impacto Explosivo (Según Chiappetta RF 1981). Fuente: <a href="http://rpq.eu.com/pdfs/ground_vibrations.pdf">http://rpq.eu.com/pdfs/ground_vibrations.pdf</a> .....	80
Figura 46. Ondas que se Generan al Momento de la Detonación de un taladro. Fuente: ISEE. ....	81
Figura 47. Ilustración del vector suma y sus componentes vectoriales. Fuente: (Fleetwood, 2010, pp. 69-70). ....	82
Figura 48. Impacto de Vibraciones a Campo Cercano y Lejano. Fuente: (GEOBLAST, 2019). .....	84
Figura 49. Diagrama esquemático de los parámetros de Holmberg & Persson para modelar la atenuación de velocidad pico partícula. Fuente: Tovar Lloclla (2015). ....	85
Figura 50. Ajuste para Modelo de Vibraciones a Campo Lejano. Fuente: (DynoConsult, 2006). .....	88

Figura 51. Equipo de Medición de Vibraciones. Fuente: Diseño Propio, adaptada de INSTANTEL (2017). .....	89
Figura 52. Factores que Afectan a la Frecuencia. Fuente: (ORICA MINING SERVICES, 2010). .....	90
Figura 53. Esquema de Altas y Bajas Frecuencias. Fuente: OSMRE (2017). .....	90
Figura 54. Límites del criterio de prevención de daños de la norma española. Fuente: (De Los Santos Batista, 2016). .....	93
Figura 55. Muestra los Dominios Estructurales Cercanos al Deslizamiento 50 en Fase 6A. Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017). .....	95
Figura 56. Fotografía de la Fase 6A Este y el Deslizamiento 50. Fuente: Diseño Propio. .	96
Figura 57. Ficha de Observación. Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A. ....	104
Figura 58. Esquema de Instrumentación de Monitoreo de Vibraciones. Fuente: Diseño Propio, Adaptada de Geoblast. ....	104
Figura 59. Esquema de Monitoreo de Vibraciones a 50 m. Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017). ....	107
Figura 60. Se muestra el Deslizamiento 50 (D50) por Efecto de Energía Asociada a Bajas Frecuencias en el Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio. ....	107
Figura 61. Gráfica de Registros de Vibraciones por Tipo de Roca Antes del Estudio. Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone. ....	108
Figura 62. Análisis de Frecuencias de la Voladuras Antes de la Prueba con la Norma UNE 22-381-93. Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone. ....	109
Figura 63. Vista en Planta de Taladro Isolado y Puntos de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio. ....	110
Figura 64. Foto de Ubicación de Taladro Isolado y Puntos de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio. ....	110

Figura 65. Secuencia de Detonación Proyecto 3100-603. Fuente: Adaptada de Base de Datos de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone. ....	111
Figura 66. Registros de Vibraciones Visualizados con Software Blastware. Fuente: Base de Datos de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone (2017). ....	111
Figura 67. Control de Georadar Geotécnico Antes y Post Voladura. Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017).....	112
Figura 68. Gráfica de Comportamiento de la Frecuencia en la Distancia. Fuente: Diseño Propio. ....	113
Figura 69. Modelo de Devine para Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio. ....	113
Figura 70. Comportamiento de la Frecuencia y Atenuación del Desplazamiento de Partícula a Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio.....	114
Figura 71. Análisis de Resultados con Criterio de Prevención UNE 22.381. Fuente: Diseño Propio. ....	115
Figura 72. Procesamiento de Ondas Elementales con Signature Hole en Software Blastware. Fuente. Diseño Propio. ....	115
Figura 73. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 01 a 180 m. Fuente: Diseño Propio. ....	116
Figura 74. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 02 a 360 m. Fuente: Diseño Propio. ....	116
Figura 75. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 03 a 515 m. Fuente: Diseño Propio. ....	116
Figura 76. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 04 a 680 m. Fuente: Diseño Propio. ....	117
Figura 77. Análisis Energético de Frecuencia y Tiempos de Retardo en Software Blastware. Fuente: Diseño Propio. ....	117

Figura 78. Diseño de Amarre con 17 ms de Tiempo de Retardo entre taladros. Fuente: EBS ORICA (2017).	119
Figura 79. Ubicación del Punto de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio.	119
Figura 80. Diseño de Amarre Transcrito en JKSIMBLAST. Fuente: Diseño Propio.	120
Figura 81. Cálculo de las VPP y las Frecuencias Dominantes. Fuente: Diseño Propio.	120
Figura 82. Análisis Avanzado de Herramienta TIME HEX. Fuente: Diseño Propio.	121
Figura 83. Taladros que Generan Mayor Amplitud. Fuente: Diseño Propio.	121
Figura 84. Muestra el Modelo de Atenuación del Desplazamiento de Partícula. Fuente: Diseño Propio.	123
Figura 85. Comparativo de Frecuencias con el Criterio de Prevención UNE 22.381. Fuente: Diseño Propio.	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Geología Estructural Regional y Distrital de Cuajone .....	34
Tabla 2. Unidades Geotécnicas básicas del Tajo Cuajone .....	38
Tabla 3. Propiedades Geomecánicas del Tajo .....	41
Tabla 4. Equipos Usados para Perforación en Mina Cuajone. ....	45
Tabla 5. Parámetros de Perforación y Disparos .....	47
Tabla 6. Equipos de <i>Acarreo</i> y Transporte de Mina Cuajone. ....	48
Tabla 7. Equipos Auxiliares de Mina Cuajone.....	48
Tabla 8. Velocidad de Factores de Voladuras y Duración de Voladuras de Bancos. ....	68
Tabla 9. Resumen sobre influencia de mecanismos de atenuación de energía. ....	83
Tabla 10. Normativas Internacionales Sobre Control de Vibraciones. ....	91
Tabla 11. Criterio de Prevención de Daño Norma UNE22-381.....	93
Tabla 12. Resumen de Vibraciones por Tipo de Roca en Fase 6A - Año 2017 (Antes de las Pruebas). ....	108
Tabla 13. Frecuencia y Desplazamiento Calculadas en las Cuatro Estaciones. ....	112
Tabla 14. Cálculo de la Frecuencia y Desplazamiento de Partícula.....	114
Tabla 15. Tiempos de Retardos Óptimos Según la Distancia. ....	118
Tabla 16. Resultado de Análisis con TIME HEX y BLASTWARE. ....	122

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Vista en Sección del Modelo de Roca .....	137
Anexo 2. Vista en Sección del Modelo de Alteración.....	138
Anexo 3. Vista en Sección del Modelo de Mineralización .....	139
Anexo 4. Vista en Sección del Modelo de Work Index .....	140
Anexo 5. Plano de Caracterización RMR de Mina Cuajone al 27/09/2017 .....	141
Anexo 6. Plano de Caracterización RQD de Mina Cuajone al 27/09/2017 .....	142
Anexo 7. Ensayos de Laboratorio y Propiedades de la Roca Intacta del Tajo .....	143
Anexo 8. Diseños de Mallas de Perforación.....	144
Anexo 9. Esquema de Ejecución de la Técnica Signature Hole.....	145
Anexo 10. Procedimiento para Instalación de Geófono Estándar .....	146
Anexo 11. Recomendaciones de sujeción del Geófono. ....	147
Anexo 12. Tipos de Investigación Científica. ....	148
Anexo 13. Tipos de Investigación. ....	148
Anexo 14. Base de Dato de Vibraciones de Fase 6A antes de las Pruebas. ....	149
Anexo 15. VPP Límites por Tipo de Roca. ....	149
Anexo 16. Diseño de Carga, Diseño de Amarre y Post Voladura del Proyecto 3100-603. .....	150
Anexo 17. Parámetros de Diseño de Perforación de la Zona de Estudio. ....	151
Anexo 18. Registro de Vibraciones en Estación 01 (A 180 m).....	152
Anexo 19. Registro de Vibraciones en Estación 02 (A 360 m).....	153
Anexo 20. Registro de Vibraciones en Estación 03 (A 515 m).....	154
Anexo 21. Registro de Vibraciones en Estación 04 (A 680 m).....	155
Anexo 22. Valores Límites de Desplazamiento para Georadar.....	156

Anexo 23. Base de Datos de Vibraciones y Análisis de Desplazamiento de Partícula en Deslizamiento 50 (Fase 6A) Post Pruebas.....	156
Anexo 24. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 310-0602 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	157
Anexo 25. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3100-0607 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	158
Anexo 26. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3130-0625 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	159
Anexo 27. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3100-0608 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	160
Anexo 28. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0617 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	161
Anexo 29. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0618 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	162
Anexo 30. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0619 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	163
Anexo 31. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0615 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	164
Anexo 32. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0616 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.....	165

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>SPCC:</b>	Southern Peru Copper Corporation
<b>mm/s:</b>	Milímetros por Segundo
<b>VPP:</b>	Velocidad Pico Partícula
<b>m/s:</b>	Metros por Segundo
<b>D50:</b>	Deslizamiento 50
<b>Kg:</b>	Kilogramos
<b>U.M.:</b>	Unidad Minera
<b>UTM:</b>	Universal Transversal de Mercator
<b>E:</b>	Este
<b>N:</b>	Norte
<b>W:</b>	Oeste
<b>S:</b>	Sur
<b>m.s.n.m.:</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>p.:</b>	Página
<b>pp.:</b>	Páginas
<b>Km:</b>	Kilómetro
<b>m:</b>	Metro
<b>UGB:</b>	Unidades Geotécnicas Básicas
<b>mm:</b>	Milímetro
<b>RQD:</b>	Rock Quality Designation
<b>RMR:</b>	Rock Mass Rating
<b>MEQ:</b>	Mezcla Explosiva Quantex
<b>Hz:</b>	Hertz
<b>cm/día:</b>	Centímetros por Día

## INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presenta una metodología y alternativa para Control de Vibraciones por Voladuras para Minimizar los Efectos de Daño en la Mina Cuajone - Southern Peru Copper Corporation, Año 2017.

De las distintas variables que definen una onda vibracional (desplazamiento, velocidad y aceleración de la partícula, frecuencia, longitud de onda) el par velocidad de partícula y frecuencia es el que más se asocia a la generación de daño estructural, para lo cual existen normas internacionales en la cual permite determinar si una determinada estructura se puede ver afectada por el daño producto de la detonación de un proyecto de voladura. Con el propósito de contribuir al conocimiento de la influencia de las vibraciones producto de la voladura de rocas y su aplicabilidad del monitoreo de estas en las Operaciones Mineras, orientada a conseguir minimizar el daño al macizo rocoso y construcciones cercanas a la voladura. Para ello el principio de la velocidad de pico partícula e índice de daño cumplen un rol significativo e importante en la voladura de rocas.

La tesis consta de: La dedicatoria, el agradecimiento, el resumen, las palabras claves, el abstract, keyword, el índice general, de tablas y de figuras, y la introducción.

**CAPÍTULO I:** Describe las generalidades, ubicación de la mina, la fisiografía, entorno físico, geológico, geotécnico y de operaciones mina. También se hacen mención algunos parámetros.

**CAPÍTULO I:** Trata sobre los antecedentes de la investigación, desarrolla definición de términos y la fundamentación teórica que necesaria para el desarrollo del estudio.

**CAPÍTULO I:** Trata de la Metodología del desarrollo del problema, la descripción de la realidad, la identificación y selección del problema, la formulación del problema, los

objetivos de la investigación, la justificación e importancia, los alcances, las limitaciones, la hipótesis, las variables, y el diseño de la investigación.

**CAPÍTULO I:** Trata sobre la aplicación y los resultados de la investigación, con la descripción de la realidad, basada en una línea base, ejecución del estudio, análisis del estudio, discusión de resultados, aplicación de cambios en las voladuras, seguimiento y análisis de proyectos volados con los cambios, discusión de resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones, complementado con las referencias bibliográficas y anexos.

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. ENTORNO FÍSICO**

##### **1.1.1. Ubicación**

El INGEMMET (2018), en su Boletín Serie B de Geología Económica N° 49, menciona que la U.M. Cuajone es un yacimiento de pórfido de Cu-Mo, ubicado en la zona sur del Perú; inscrito en el catastro minero con el nombre de “Acumulación Cuajone”, propiedad de Southern Peru Copper Corporation (SPCC), demarcado en el distrito Torata, provincia Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, entre los cuadrángulos (34U) y (35U), ubicados en la zona UTM 19, con coordenada central; 318,000E; 814,842N, geográficamente se encuentra a 17°02’S; 70°42’W con elevación que va de 2950 m.s.n.m. a 3880 m.s.n.m., como se puede apreciar en la figura 1 (p. 4).

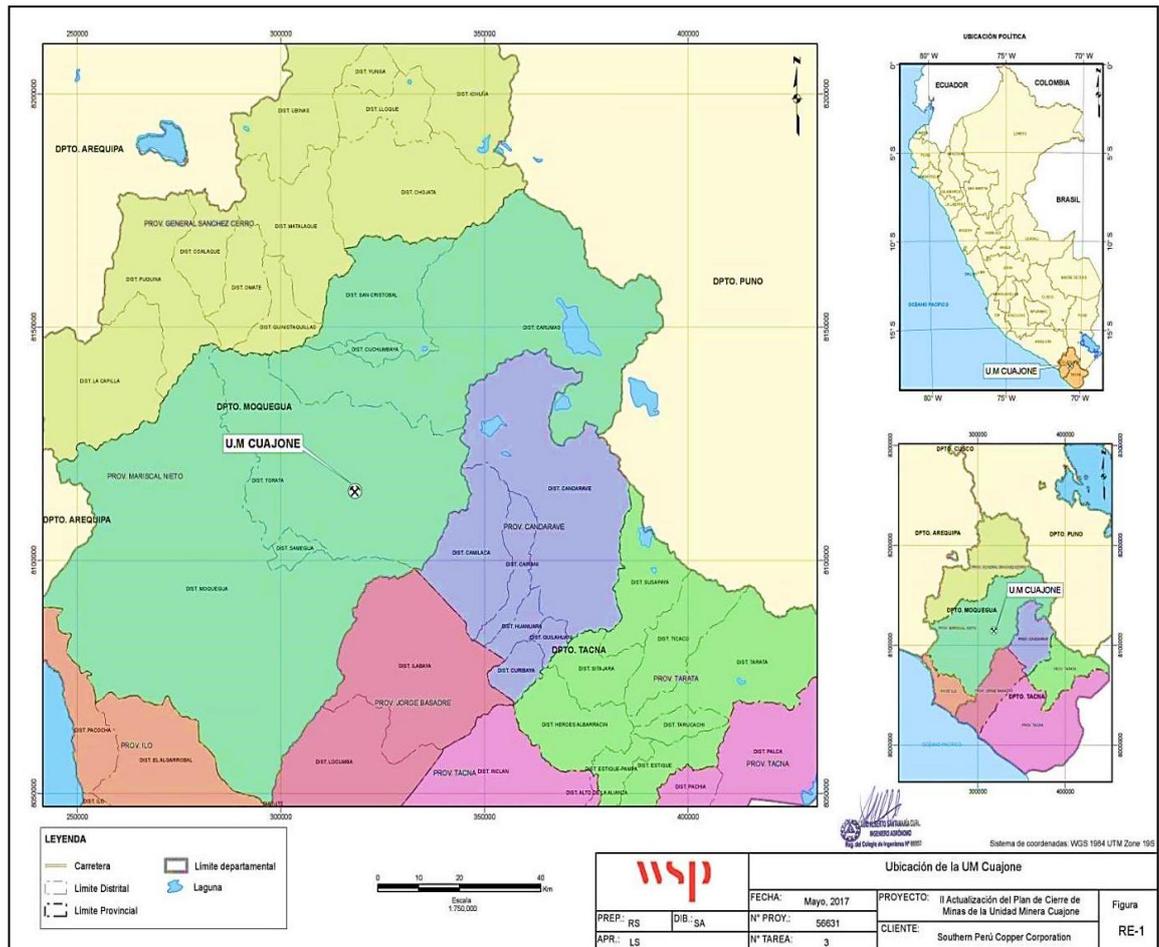


Figura 1. Plano de Ubicación de la unidad minera Cuajone. Fuente: WSP PERU S.A. (2017, p. 36).

### 1.1.2. Acceso

**Vía Terrestre**, se accede desde Lima o desde Tacna por la Panamericana Sur hasta Moquegua y luego continuando de Moquegua por la carretera Interoceánica Sur en dirección a Torata, hasta el cruce con la carretera a Cuajone, donde se debe proseguir el viaje por esa carretera hasta llegar al yacimiento; cuyas distancias son:

- ❖ Lima – Moquegua = 1 145 Km.
- ❖ Tacna - Moquegua = 158 Km.
- ❖ Moquegua – Mina = 43 Km (Provías Nacional [PVN], 2019).

**Vía Área**, a la U.M. Cuajone se puede llegar aterrizando en el aeródromo ubicado en Villa Botiflaca (ENPERU, 2019).

### **1.1.3. Clima, Meteorología y Fisiografía**

La U.M. Cuajone presenta un clima semidesértico a semiárido con temperaturas que van de templado a frío (temperatura promedio anual es de 10.2 °C), con una precipitación promedio anual de 135.9 mm. La época seca ocurre entre los meses de mayo a octubre, mientras que la época húmeda se da en los meses de diciembre a marzo. Las velocidades medias se encuentran entre 1,8 y 1,9 m/s y la dirección predominante del viento es Oeste; fisiográficamente la ubicamos en la zona media de la vertiente occidental andina, con alturas que van de 2100 m.s.n.m. y 43300 m.s.n.m. y su relieve corresponde a las montañas andinas sur occidentales del país, donde la aridez climática constituye el agente morfológico principal, y geológicamente, se encuentra sobre el flanco andino occidental, cerca del moderno arco volcánico sur peruano (WSP PERU SA, 2017, p. 15).

### **1.1.4. Recursos Naturales, Hídricos, Energía Eléctrica y Humanos**

En el Informe Anual de SPCC (2013), citado por Champi Guzmán (2015), nos menciona que en la U.M. Cuajone, los recursos de agua, tierras de cultivo y pastos son escasos, por lo que la producción agrícola, ganadera y sus derivados manufacturados, son a pequeña escala, que solo logra abastecer las necesidades locales; y la necesidad de recursos hídricos (agua) de la mina es abastecida de las represas de Suches y Viña Blanca, y del fondo de mina donde se tiene un pequeño reservorio de agua que capta las aguas del tajo y que es usado durante todo el año para regar las rampas de acceso y para reducir la polución en la mina, mientras que el río Torata que cruza al yacimiento, ha sido represado 4 km aguas arriba de la mina para luego ser derivado por un túnel y tuberías de 8 km de extensión, luego de lo cual el

caudal es devuelto al curso normal del río Torata; con Respecto al recurso hídrico, Enersur provee de energía eléctrica a todas las instalaciones SPCC, además se cuenta con una capacidad de generación eléctrica de nueve megavatios provenientes de dos pequeñas plantas hidroeléctricas en Cuajone (138 Kv Alta tensión desde Ilo, 69 Kv Tensión mediana – mina y 160 v Baja tensión – mina) (pp. 62-64).

Según WSP PERU SA (2017), La operación de la mina Cuajone contribuye con el desarrollo económico de la región Moquegua a través del empleo de mano de obra local, representado el 65 % de la mano de obra total, y generando mediante ello puestos de trabajo directos e indirectos (p. 14).

## **1.2. ENTORNO GEOLÓGICO**

### **1.2.1. Geología Regional**

Las áreas fisiográficas de la zona de estudio se encuentran emplazadas longitudinalmente de sureste a noroeste y definidos mayormente por la altitud, relieve, el clima y la geología, las cuales se pueden diferenciar en: la Cordillera de la Costa, la Llanura Costanera, el Flanco Andino y la Cadena de Conos Volcánicos. Estas áreas fisiográficas se encuentran emplazadas longitudinalmente de Sureste a Noroeste. En la figura 2, se observa que la geología regional del yacimiento en estudio, presenta formaciones rocosas en el Jurásico (Volcánicos Chocolate) que afloran cerca al puerto de Ilo en la Cadena de la Costa, en el Cretáceo Superior - Paleoceno (Grupo Toquepala) que aflora una parte en la Mina Cuajone y la mayoría se extiende en el flanco andino, del cretáceo superior al eoceno-paleoceno (Rocas intrusivas del Batolito de la Costa Segmento Toquepala) afloran en la mina Cuajone del

flanco andino y entre la cadena de la costa y llanura costanera, en el oligoceno superior al mioceno inferior (La Formación Moquegua) formado por clastos continentales afloran en toda la Llanura Costanera, en el Mioceno Inferior al Mioceno Superior (Volcánicos Huaylillas y Volcánicos Chuntacala) afloran en la Mina Cuajone, en el Plioceno (Volcánicos Barroso) afloran en los Conos Volcánicos. En el Holoceno Pleistoceno (depósitos glaciares aluviales y coluviales) (Concha y Bernabé Tapia, 1999, pp. 21-23).

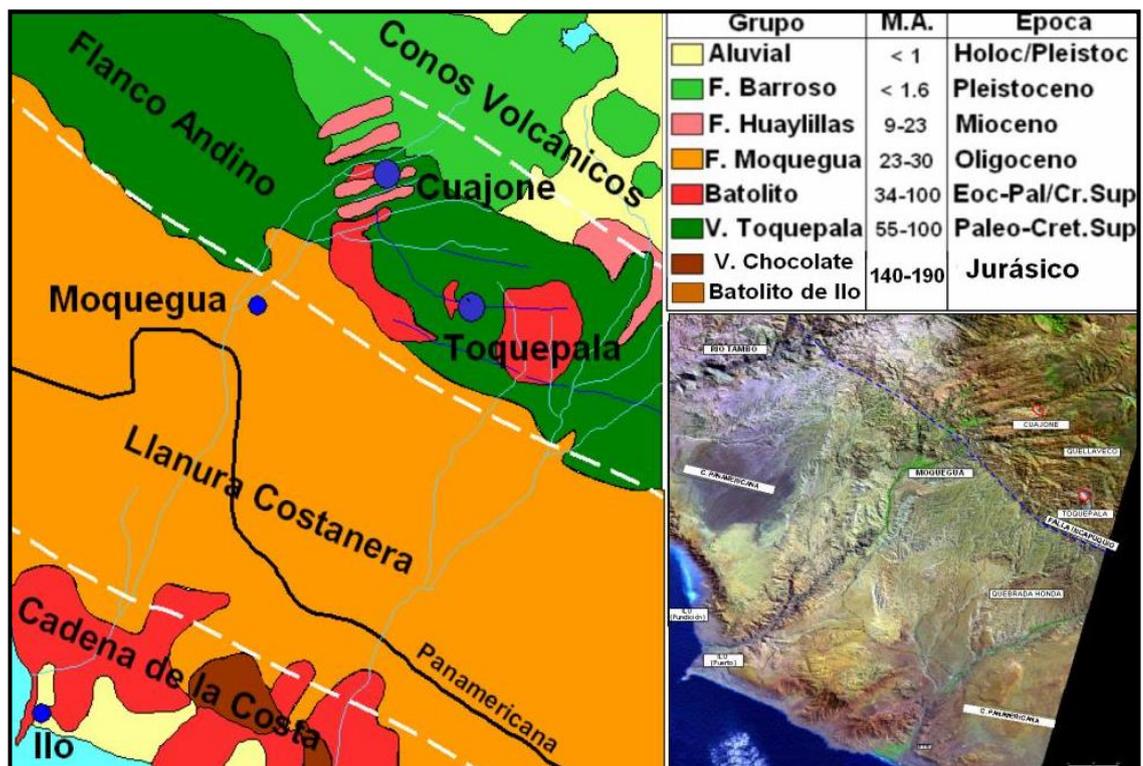


Figura 2. Fisiografía y Geología Regional de la Mina Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 22).

El yacimiento mineralizado ha sido parcialmente erosionado al lado noroeste por el río Torata y débilmente erosionado en su parte central de este a oeste en la Quebrada Chuntacala que proporciona sus aguas en temporada de lluvia al río Torata. Como se observa en la columna lito estratigráfica de Cuajone (véase en la figura 4), la litología predominante en el yacimiento Cuajone está conformada por rocas volcánicas y macizos intrusivos que se han ido depositando a través del tiempo desde fines del Cretáceo hasta la

actualidad, siendo inicialmente identificados 23 tipos de rocas, como se puede apreciar en la figura 3 (Concha y Bernabé Tapia, 1999, p.44).

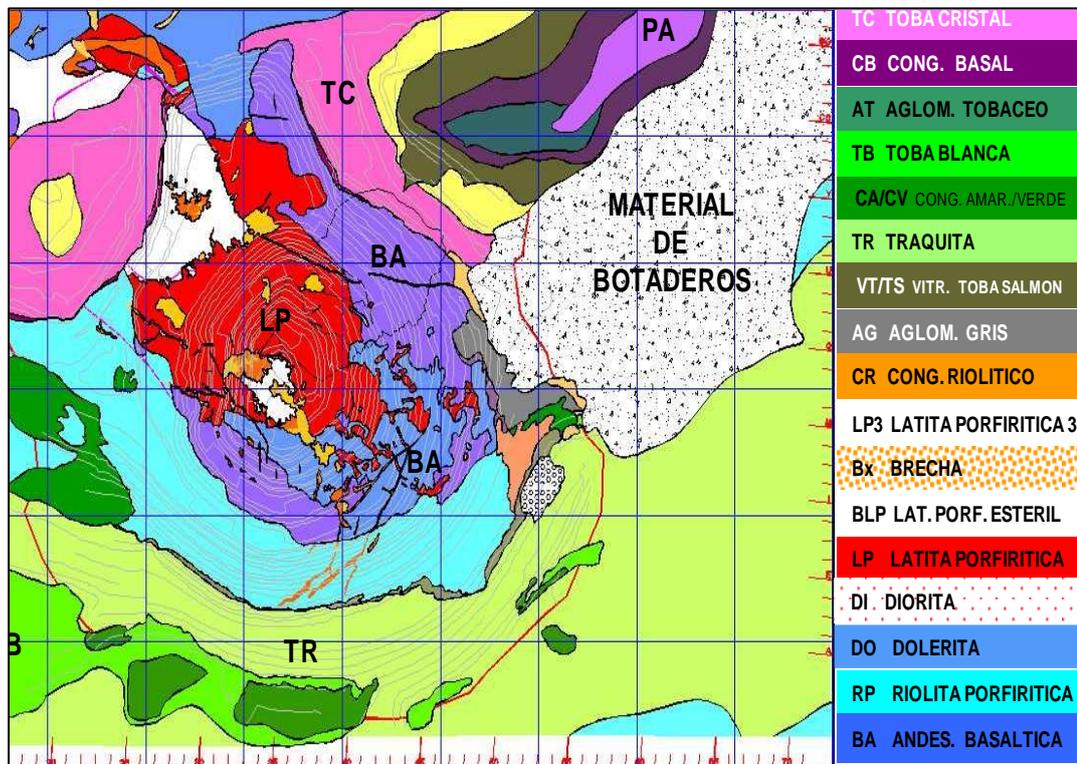


Figura 3. Plano de Geología Local. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2012).

La alteración hidrotermal intensa ha destruido parcial o totalmente las texturas originales mineralógicas dentro de rocas pre mineral e intrusivo en Cuajone, donde se han presentado los siguientes eventos:

➤ **Volcánicos pre-mineral.**

Las rocas más antiguas en el área de la mina son los dos miembros más bajos del grupo Toquepala de volcánicos (cretáceo superior / paleoceno), la andesita basáltica y la riolita porfirídica.

➤ **Complejo intrusivo.**

El principal cuerpo intrusivo en Cuajone es un stock de latita porfirítica alterada y mineralizada. Los contactos entre la latita y los volcánicos pre-mineral son especialmente con andesita basáltica, puede ser transicional a causa de la asimilación.

➤ **Brechas post – mineral.**

Este consiste en clastos redondeados a subredondeados localmente derivados, alterados y mineralizados en volcánicos y rocas intrusivas, contenidos en una matriz fresca de latita porfirítica. Localmente la matriz puede ser silicificada o parcialmente compuesta de geodas, conteniendo incrustaciones de cuarzo.

➤ **Volcánicos posts – mineral.**

Las mayores secuencias piroclásticas son reconocidas en Cuajone, separadas por la formación quebrada Chuntacala y ahora por el minado. Estos son los volcánicos Hualillas y los volcánicos Chuntacala del lado sur y lado norte de la mina respectivamente, Sus edades son 17 a 22 millones de años para Hualillas y de 9 a 14 millones de años para Chuntacala (Sánchez Medina, 2012).

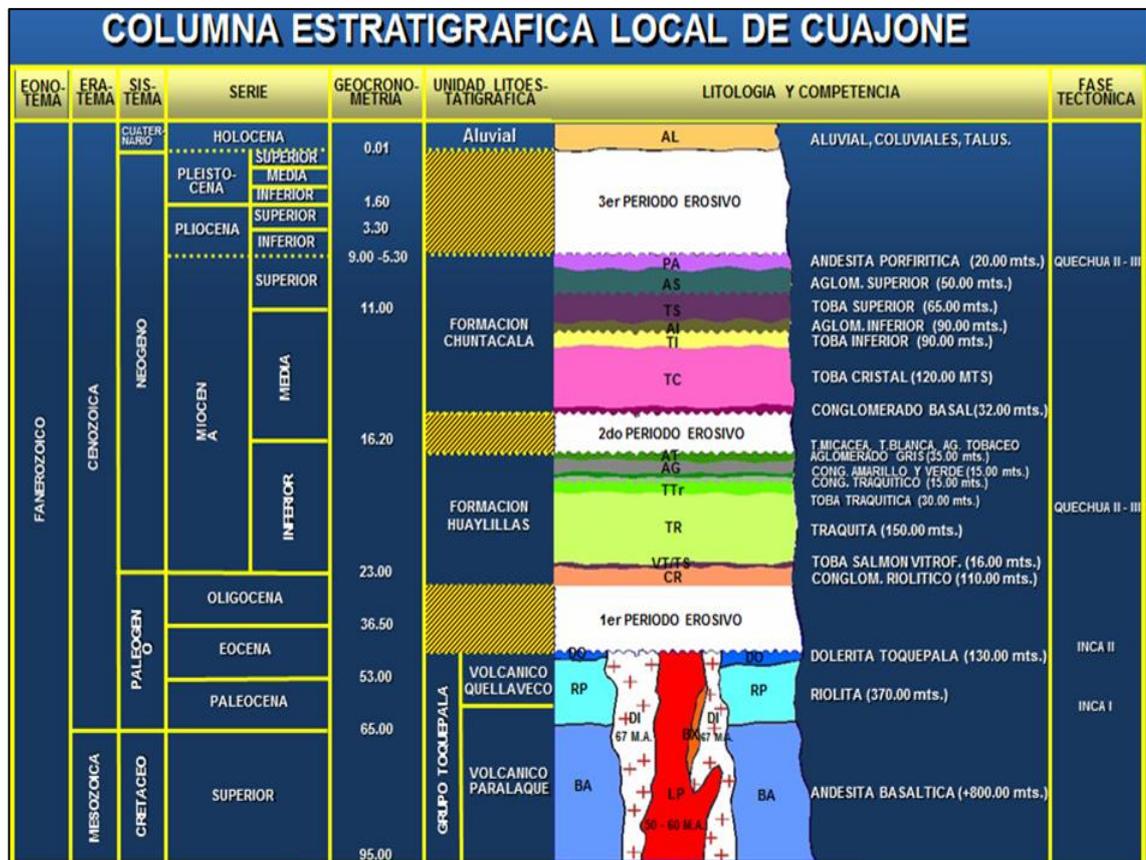


Figura 4. Plano de Columna Estratigráfica de Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 33).

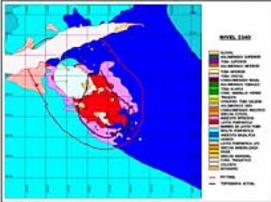
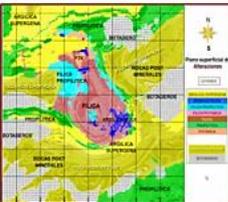
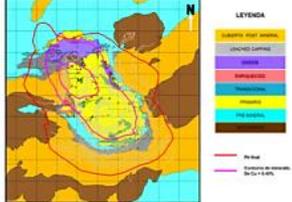
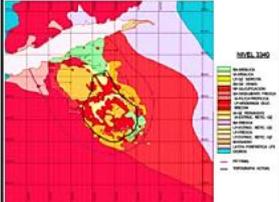
En la figura 5 se aprecia la petrología de mineral y desmonte en función a su work index y unidad geológica básica (Departamento de Geología Mina Cuajone, 2018).

PETROLOGIA - CUAJONE					
MATERIAL	TIPO DE ROCA Y ALTERACIÓN	SÍMBOLO	GRAVEDAD ESPECÍFICA (t/m <sup>3</sup> )	WI (kwh/te)	UGB
ZONA DE MINERAL	RIOLITA PORFIRITICA CUARZO SERICITA	RP-QS	2.60	9.3	UGB 3
	LA'ITTA PORFIRITICA SILICIFICA	LP-SIL	2.66	12.1	UGB 1
	LA'ITTA PORFIRITICA ESTRUCTURA REICULAR DE CUARZO	LP-ES-RQ	2.62	13.6	UGB 1
	LA'ITTA PORFIRITICA POTASICA	LP-PTK	2.66	15.3	UGB 2
	LA'ITTA PORFIRITICA MODERADAMENTE SILICIFICADA	LP-MS	2.66	14.1	UGB 1
	LA'ITTA PORFIRITICA CUARZO SERICITA	LP-QS	2.66	14.4	UGB 1
	LA'ITTA PORFIRITICA FRESCA	BLP-FRES	2.67	19.7	UGB 1
	BRECHA EN LA'ITTA PORFIRITICA CUARZO SERICITA	BX-LP-QS	2.68	14.0	UGB 1
	BRECHA DE BLP FRESCA	BX-BLP-FRES	2.66	16.2	UGB 1
	ANDESITA BASALTICA POTASICA	BA-PTK	2.69	21.0	UGB 7
	ANDESITA BASALTICA FILICA POTASICA	BA-FL-PTK	2.69	19.2	UGB 6
	ANDESITA BASALTICA ARGILICA	BA-ARG	2.69	13.5	UGB 8
	ANDESITA INTRUSIVA FILICA POTASICA	IA-FIL-PTK	2.72	18.4	UGB 9
	ANDESITA INTRUSIVA FILICA	IA-FIL	2.72	17.5	UGB 9
	ANDESITA INTRUSIVA ESTRUCTURA REICULAR DE CUARZO	IA-ES-RQ	2.72	15.5	UGB 9
	ANDESITA INTRUSIVA SILICEA	IA-SIL	2.70	16.2	UGB 9
	ANDESITA INTRUSIVA FILICA BRECHADA	IA-FIL-BX	2.64	15.0	UGB 9
	BRECHA DE ANDESITA INTRUSIVA FILICA	BX-IA-FIL	2.64	15.0	UGB 12
ZONA DE DESMONTE	BRECHA EN RIOLITA PORFIRITICA CUARZO SERICITA	BX-RP-QS	2.68	9.4	UGB 3
	LA'ITTA PORFIRITICA SILICEA BRECHADA	LP-SIL-BX	2.66	16.2	UGB 1
	RIOLITA PORFIRITICA ARGILICA	RP-ARG	2.55	9.3	UGB 4
	RIOLITA PORFIRITICA FIL PROPIL	RP-FL-PRO	2.68	15.2	UGB 5
	ANDESITA BASALTICA PROPILICA	BA-PRO	2.74	22.0	UGB 8
	ALUVIAL	AL	1.25	-	
	AGLOMERADO TOBACEO	AT	2.20	-	
	TOBA BLANCA	TB	1.95	-	UGB 17
	CONGLOMERADO AMARILLO Y VERDE	CA/CV	2.14	-	UGB 15
	TRAQUITA	TR	2.33	-	UGB 16
	TOBA CRISTAL	TC	2.30	-	UGB 14
	TOBA SALMON	TSA	2.26	-	UGB 18
	CONGLOMERADO RIOLITICO	CR	2.46	-	UGB 15
	TOBA MICÁCEA	TBM	1.60	-	
	TOBA TRAQUITICA	TBR	2.06	-	UGB 16
	BO TADERO	BOT	1.80	-	
	DOLERITA	DO	2.71	-	
	VITROFIRO	VT	2.26	-	UGB 19
	CONGLOMERADO BASAL	CB	2.31	-	UGB 15
	AGLOMERADO BLANCO	AB	1.25	-	
AGLOMERADO INFERIOR	AI	1.96	-		
AGLOMERADO TRAQUITICO	AGTR	1.90	-		

Figura 5. Información de la Gravedad Específica y del Work Index de las Rocas. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018).

Con el objetivo de tener mayor certeza del yacimiento, se realiza planes de perforación diamantina permanentemente, para generar modelos geológicos

de roca (litología), de alteración, de mineralización y de dureza (véase figura 6); el modelo litológico actualizado tiene 43 tipos rocas (Departamento de Geología Mina Cuajone, 2015).

MODELO DE ROCA	MODELO DE ALTERACIÓN	MODELO DE MINERALIZACIÓN	MODELO DE DUREZA
Creado en base a los mapeos y logeos que contienen la interpretación macroscópica de campo. Se tiene 43 tipos de roca.	Creado en base a los logeos y mapeos. Se contemplan 8 tipos de alteración.	Creado en base a índices de solubilidad del Cu, cuya interpretación diferencia las zonas de Leach Capping, Óxidos, Enriquecido, Transicional y Primario.	Elaborado con muestras representativas del deposito que se envían para la determinación de la dureza por el método de Bond. Tenemos 4 grupos.
<p style="text-align: center;">Modelo de Rocas</p> 	<p style="text-align: center;">Plano Superficial de Alteración</p> 	<p style="text-align: center;">Plano Superficial de Mineralización</p> 	<p style="text-align: center;">Modelo de Dureza</p> 

**Figura 6.** Modelos Geológicos de Cuajone. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2015).

Y en los anexos 1, 2, 3 y 4, se puede apreciar detalladamente los planos de los modelos geológicos.

### 1.2.2. Geología Estructural Regional y Distrital

Como se puede apreciar en la figura 7; la geología estructural está constituida por el corredor estructural denominado Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio de tendencia NO-SE, tal y como se puede apreciar para las unidades morfo estructurales del Batolito de la Costa y la Cordillera de los Andes Occidental.

En este sistema de fallas, el principal control estructural está conformado por fallas de carácter regionales como Incapuquio, Micalaco, Capillune, Quellaveco, Viña Blanca y Botiflaca.

El sistema de falla distrital de la mina Cuajone se encuentra emplazada dentro del sistema de fallas de Viña Blanca y Botiflaca (Concha y Bernabé Tapia, 1999, p. 29).

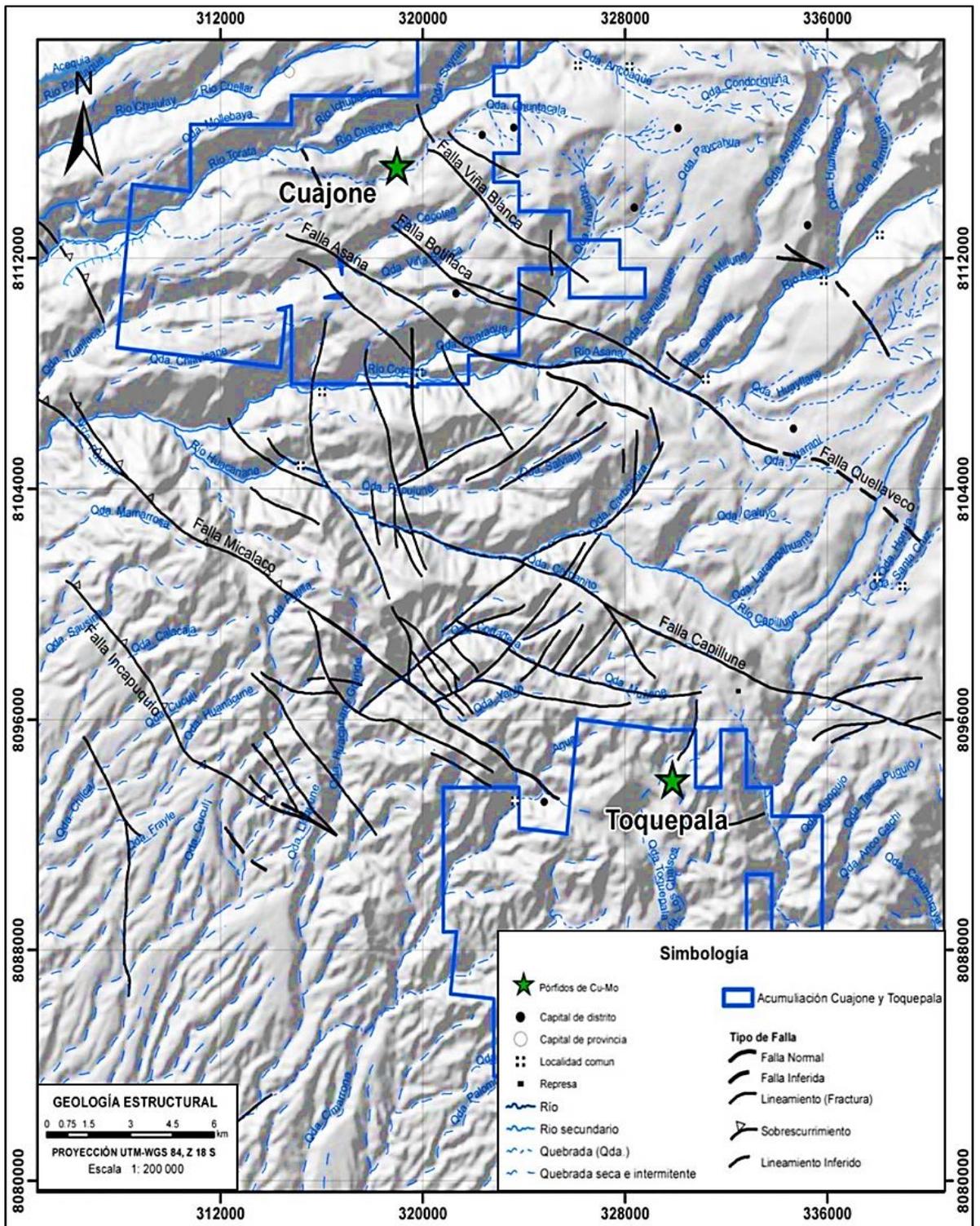


Figura 7. Mapa de Geología Estructural Regional y Distrital. Fuente: INGEMMET (2018, p. 13).

En la tabla 1, se detalla las características de rumbo, longitud, ancho, extensión y composición de relleno del afloramiento que conforman la geología estructural regional y distrital del yacimiento.

**Tabla 1.***Geología Estructural Regional y Distrital de Cuajone*

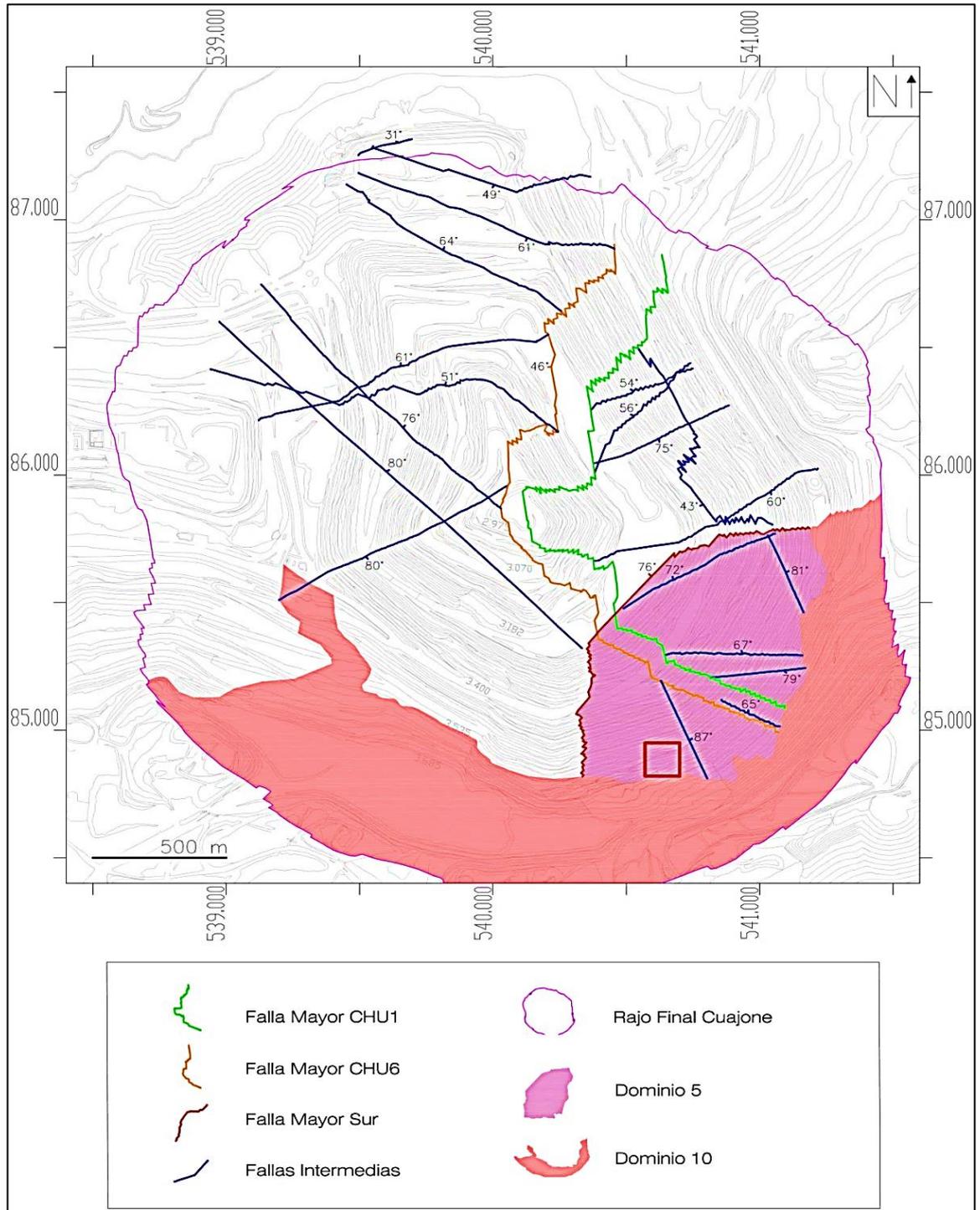
Estructura	Rumbo	Longitud de Afloramiento (km)	Ancho de Afloramiento (m)	Extensión	Composición de Relleno
Falla Incapuquio	N40°-60°O	140	1000	De frontera con Chile hasta Moquegua	Brecha de rocas alteradas y trituradas Cuarzo, turmalina, sulfuros, diques, brechas y ligera alteración hidrotermal
Falla Micalaco	N 70° O	21	500	De Pueblo Micalaco hasta la quebrada Cortadera	Rocas brechadas o fragmentos de rocas de variada composición Roca intensamente fracturada, brecha herolíticas con fragmentos subangulares a subredondeados
Falla Viña Blanca	N70°O	5.5	20	A 3.0 km E - SE de la mina Cuajone	Cubierta por material cuaternario
Falla Botiflaca	N70°O	20	40	A 2.5 km al SO de la mina cuajone de la quebrada Cocotea a Torata	-
Falla Quellaveco	N60°-80°E	-	-	Al SE de mina Quellaveco desde la quebrada Altarani hasta Santa Cruz	-
Falla Asana	N60°-80°O	-	-	Trayect. del río Asana y la Formación Asana, atravesando las quebradas Sarallenque, Charaque, Viña Blanca y Cocotea	-
Falla Capillune	N 70° O	-	-	Trayect. del río Capillune y la quebrada Carpanito, atravesando la Súper Unidad Yarabamba, Riolita Samanape y las andesitas-doleritas Carpanito	-

Fuente: Diseño Propio, adaptada de INGEMMET, Geología Económica N° 49, 2018.

**1.2.3. Geología estructural de la mina**

En el transcurso del desarrollo del tajo de Cuajone, se han ido descubriendo una serie de estructuras principales y secundarias que han sido debidamente mapeadas y con las cuales se puede tener una interpretación del comportamiento estructural del yacimiento. En la figura 8 se presentan las

discontinuidades estructurales de mayor relevancia en el yacimiento Cuajone, levantadas por el equipo de Geotecnia de Mina Cuajone. Estas discontinuidades comprenden: las fallas mayores Sur, Chuntacala 1 y Chuntacala 6; y fallas intermedias. (San Juan Vergara, 2014, p. 25).



**Figura 8.** Estructuras Locales del Yacimiento Cuajone. Fuente: San Juan Vergara (2014, p. 26).

#### 1.2.4. Análisis Estereográfico

Se ha realizado un mapeo estructural del tajo en las rocas pertenecientes al Grupo Toquepala y en los Intrusivos. Se ha considerado Fallas Mayores a las que tienen longitudes mayores a 50 m. o que abarcan tres o más bancos del tajo, fallas Menores o fallas que tienen afloramientos entre uno y tres bancos y fracturas o juego de juntas que se exponen en un banco como se puede apreciar en la figura 9 (Bernabé Tapia, 2002, p. 45).

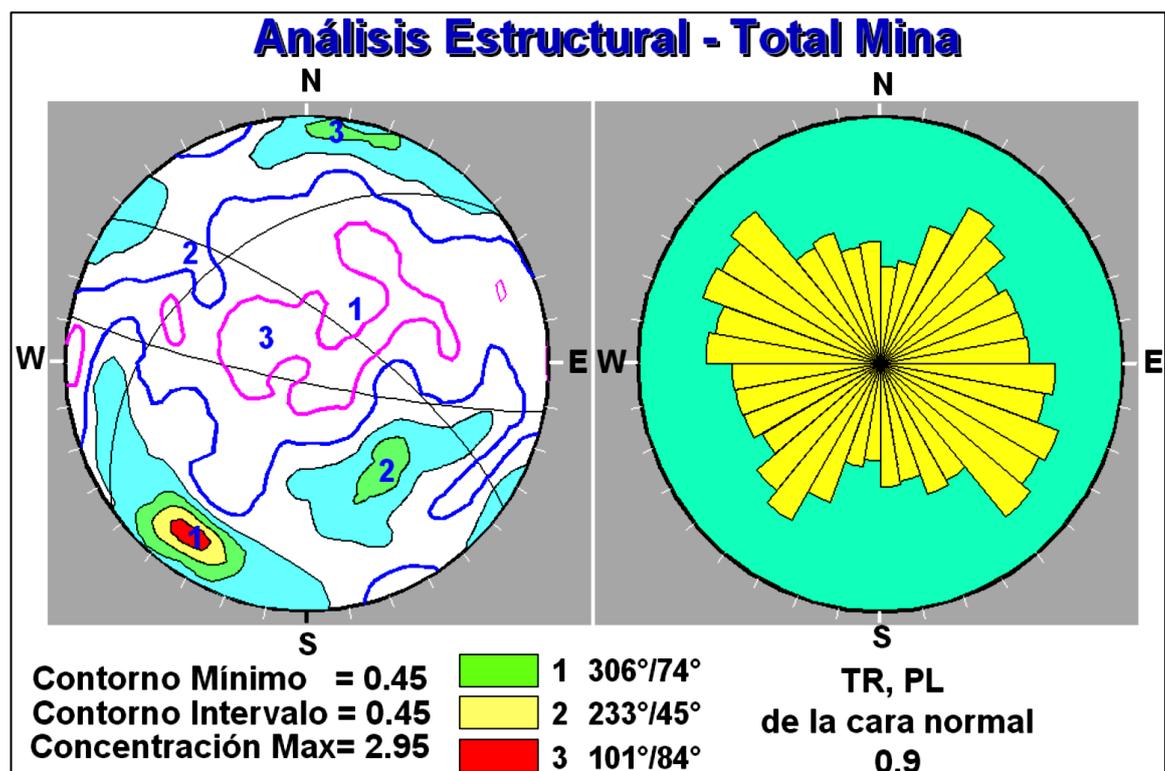


Figura 9. Análisis Estereográfico Total de la Mina Cuajone. Fuente: Bernabé Tapia (2002, p. 46).

El orden de ubicación y buzamiento representa el grado de importancia. Todas estas estructuras han sido analizadas estereográficamente en conjunto y por cada tipo de roca, y se han obtenido en total 7,918 polos. El total de estructuras tienen tres tendencias predominantes que en orden de importancia son 302°/73° (dirección NO), 227°/42° (dirección SO) y 097°/85° (dirección E-O) (Bernabé Tapia, 2002, p. 45-46).

### **1.3. ENTORNO GEOTÉCNICO**

La U.M. Cuajone cuenta con una amplia base de datos de ensayos de laboratorio realizados en diferentes campañas de exploración a muestras extraídas de sondajes, para determinar los parámetros geotécnicos, las cuales han sido estudiados por consultores que han usado la información de campo y laboratorio (grado de cohesión, permeabilidad, porosidad de las rocas), monitoreo de piezómetros e inclinómetros, información de los logueo de taladros diamantinos (el grado de fracturamiento, geomecánica de roca, pruebas uní axiales, RQD y RMR, véase en los anexo 5 y 6), mapeos de celdas, mapeo estructural de la mina, información geológica (tipos de roca, mineralización, alteración) para determinar las unidades geotécnicas básicas y dominios estructurales del tajo, además, para calcular los ángulos de taludes, estimación de las propiedades de resistencia y deformación. Dichos parámetros son aplicados para los análisis de estabilidad de taludes y diseños geotécnicos, así como para el uso en los diseños de perforación y voladura (Guerra Molina, 2012, p. 19).

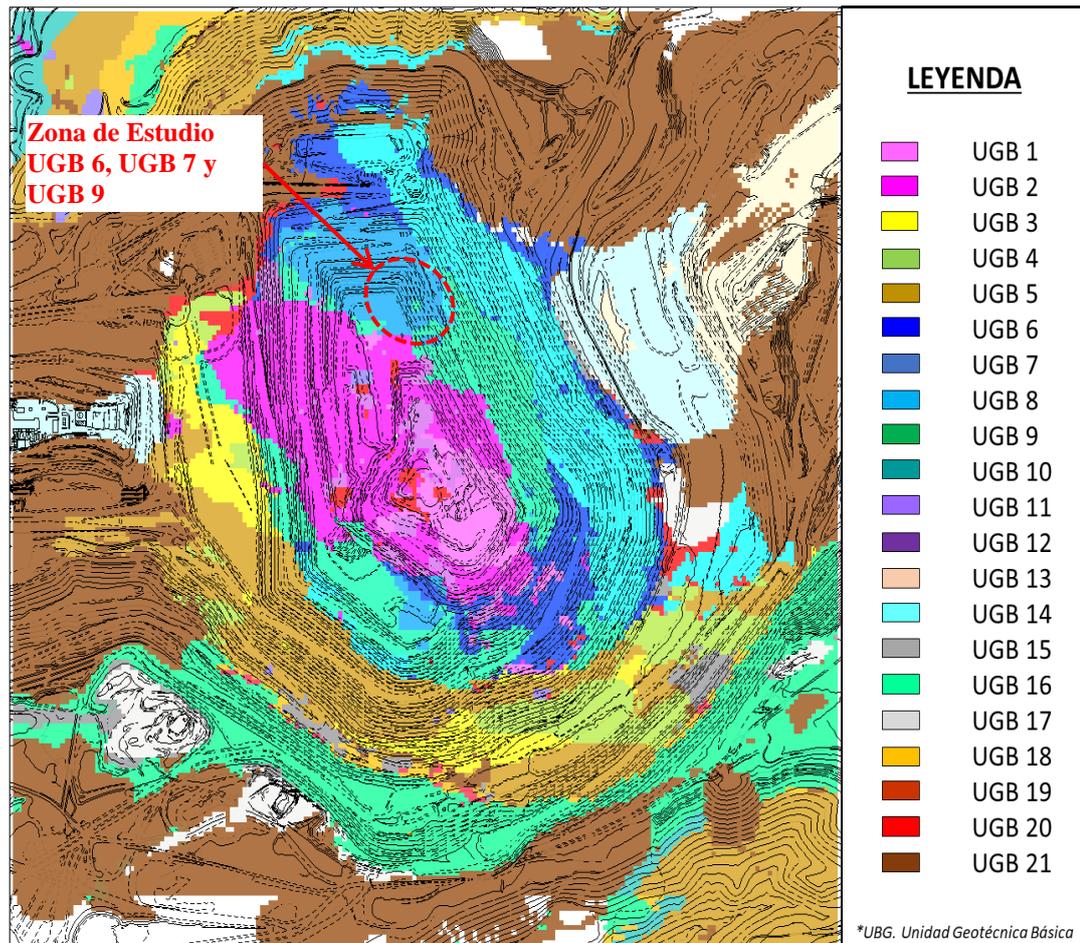
#### **1.3.1. Unidades Geotécnicas Básicas (UGB)**

Se determinaron de acuerdo a la información geológica y geotécnica disponible, y a la información de ensayos de laboratorio de muestras de los sondajes geotécnicos pertenecientes a campañas ejecutadas durante los años 2001 al 2013; estas características han influido en el macizo rocoso y que al mismo tiempo pueden ser registradas en los mapeos geológicos-geotécnicos de sondajes, especialmente: litología, alteración y zona mineral (ver tabla 2 y figura 10), por lo tanto las UGB presenta una composición y características texturales propias, pero con un comportamiento geomecánico diferente (Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone, 2018).

**Tabla 2.***Unidades Geotécnicas básicas del Tajo Cuajone*

<b>Unidades Geotécnicas Básicas (UGB)</b>				
<b>Litología</b>	<b>Información Geológica</b>		<b>Clasificación</b>	<b>Existencia %</b>
	<b>Alteración</b>	<b>Mineralización</b>	<b>UGB</b>	<b>a %</b>
<b>Latita</b>	Fresca-Fílica	Primario - Waste	UGB 1	6.1
	Potasica	Primario	UGB 2	2.0
	Fílica-Argílica	Primario-Waste	UGB 3	0.3
<b>Riolita Porfírica</b>	Argílica	Ox-Lix-Enr-Trans	UGB 4	0.9
	Propílica-Pro.Fílica	Waste	UGB 5	7.8
	Propílica Fílica-Potásica	Primario - Waste	UGB 6	1.1
<b>Andesita</b>	Potásica	Primario	UGB 7	3.6
<b>Basáltica</b>	Propílica	Waste	UGB 8	64.7
	Fílica	Primario-Waste	UGB 9	1.6
<b>Intrusiva</b>	Propílica	Waste	UGB 10	1.9
<b>Brecha De</b>		Waste	UGB 11	0.0
	Fílica	Primario	UGB 12	0.2
<b>Toba Inferior</b>	-	Waste	UGB 13	0.8
<b>Toba Cristal</b>	-	Waste	UGB 14	1.4
<b>Conglomerado</b>	-	Waste	UGB 15	0.3
<b>Traquita Toba</b>	-	Waste	UGB 16	3.1
<b>Toba Blanca</b>	-	Waste	UGB 17	0.3
<b>Toba Salmon</b>	-	Waste	UGB 18	0.3
<b>Vitrófiro</b>	-	Waste	UGB 19	0.0
<b>Otros</b>	-	Ox-Lix-Enr-Trans	UGB 20	1.0
<b>Cobertura</b>	-	Cover + Botadero	UGB 21	2.6

Fuente: Adaptada de Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone (2018).



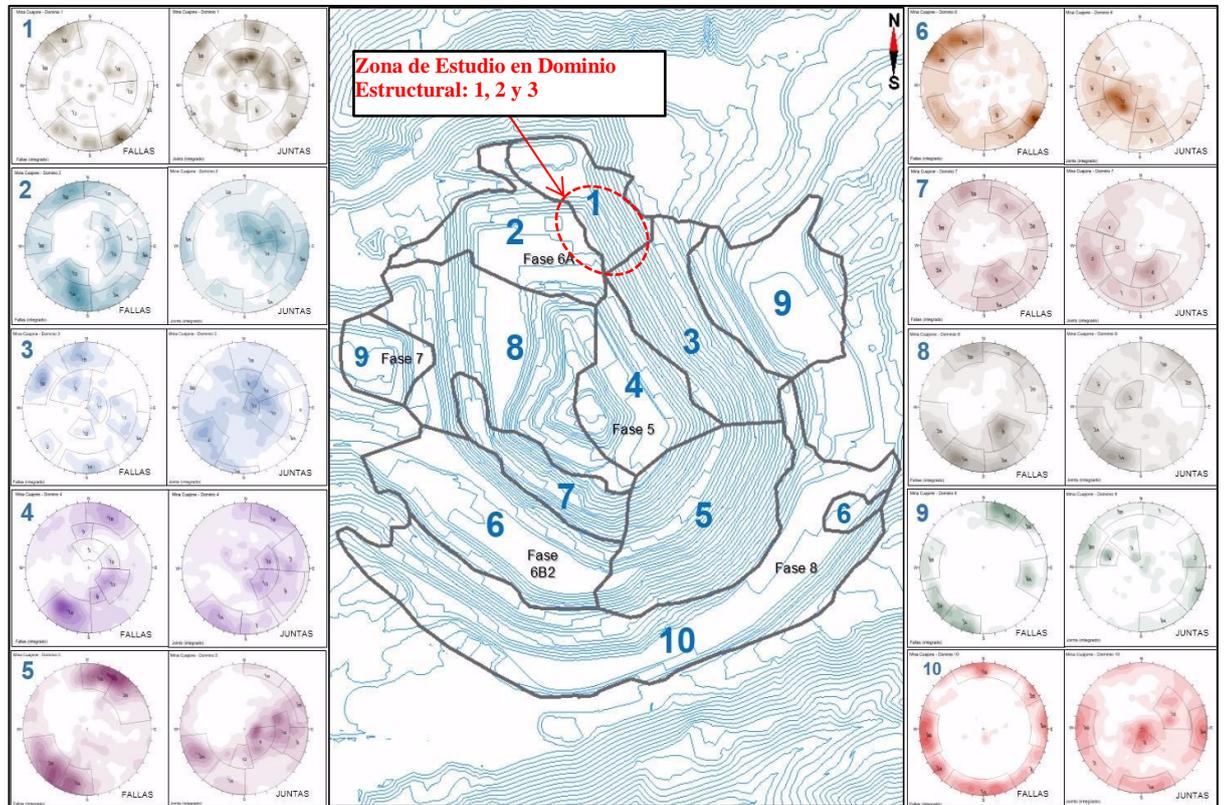
**Figura 10.** Unidades Geotécnicas Básicas (UGB) del Tajo Cuajone. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018).

### 1.3.2. Dominios Estructurales

Este criterio de división del macizo rocoso está enfocado en conseguir volúmenes del macizo en que las propiedades de las rocas puedan considerarse como esencialmente constantes; Estas zonas cumplen las siguientes condiciones:

- ❖ Tener un arreglo estructural característico.
- ❖ Encontrarse delimitadas por discontinuidades estructurales mayores: fallas geológicas mayores, diques o contactos litológicos.
- ❖ Presentar predominancia de un tipo litológico.
- ❖ Presentar predominancia de una unidad geotécnica (Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone, 2018)

En la figura 11 se muestra los dominios estructurales actualizados a diciembre del 2015, y la zona de estudio está ubicada al lado este de la fase 6A, en los dominios estructurales 1, 2 y 3.



**Figura 11.** Dominios Estructurales al 2015. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018).

### 1.3.3. Propiedades de la Roca Intacta y Macizo Rocoso

Tajo Cuajone, cuenta con una amplia base de datos de ensayos de laboratorio realizados en diferentes campañas de exploración a muestras extraídas de sondajes. Se trabajó con ensayos de laboratorio realizados por Mecánica de Rocas Ltda. (Calama) en los años 2001, 2002, 2008 y 2012; y ensayos realizados por el laboratorio SGS Ltda. (Santiago) en los años 2013 y 2014. En la tabla 3 y en el anexo 7, se resume las propiedades de la roca intacta y del macizo rocoso respectivamente, de las distintas UGB presentes en tajo Cuajone (Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone, 2018).

**Tabla 3.**

*Propiedades Geomecánicas del Tajo*

Unidades Geotécnicas Básicas				Roca Intacta			Macizo Rocoso (1)					
Litología	Alteración	Mineralización	Unidad Geotécnica	$r$ (Ton/m3)	$mi$	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$GSI$	$mb$	$s$	$a$	$E$ (GPa)	$\nu$
<b>Latita</b>	Fresca-Fílica	Primario-Waste	UGB 1	2.65	16.05	89.91	48	0.9	0.0005	0.51	3.04	0.3
	Potásica	Primario	UGB 2	2.61	13.39	94.32	61	1.57	0.0035	0.50	9.72	0.2
<b>Riolita Porfírica</b>	Fílica Argílica	Primario-Waste	UGB 3	2.58	8.71	73.36	41	0.34	0.0002	0.51	1.65	0.3
	Argílica	Ox-Lix-Enr-Trans	UGB 4	2.54	14.8	31.14	39	0.52	0.0001	0.51	2.52	0.3
	Propilitica Pro.Fílica	Waste	UGB 5	2.62	18.29	128.72	47	0.99	0.0005	0.51	4.88	0.3
<b>Andesita Basáltica</b>	Propilitica Fílica_Potasica	Primario-Waste	UGB 6	2.74	13.59	86.56	54	1.09	0.0013	0.50	3.52	0.2
	Potásica	Primario	UGB 7	2.74	18.71	92.62	52	1.34	0.0010	0.50	3.91	0.2
	Propilitica	Waste	UGB 8	2.78	15.69	135.38	67	2.56	0.0084	0.50	16.6	0.2
<b>Andesita Intrusiva</b>	Fílica	Primario-Waste	UGB 9	2.73	12.95	68.19	47	0.70	0.0005	0.51	2.48	0.3
	Propilitica	Waste	UGB 10	2.69	15.49	171.01	38	0.51	0.0001	0.51	3.01	0.3
<b>Brecha de Andesita</b>	Fílica	Waste	UGB 11	2.77	9.29	190.92	57	0.88	0.0020	0.50	9.14	0.2
		Primario	UGB 12	2.67	19.16	84.77	48	1.10	0.0005	0.51	4.88	0.3
<b>Toba Inferior</b>	-	-	UGB 13	1.93	8.97	15.25	56	0.80	0.0017	0.50	0.8	0.2
<b>Toba Cristal</b>	-	-	UGB 14	2.29	28.55	80.38	58	2.84	0.0023	0.50	4.66	0.2
<b>Conglomerado</b>	-	-	UGB 15	1.68	6.25(2)	15.21(2)	45	0.30	0.0003	0.51	0.32	0.3
<b>Traquita (Toba)</b>	-	-	UGB 16	2.29	21.13	134.27	47	1.15	0.0005	0.51	3.51	0.3
<b>Toba Blanca</b>	-	-	UGB 17	1.76	6.25	15.21	54	0.50	0.0013	0.50	0.57	0.2
<b>Toba Salmón</b>	-	-	UGB 18	1.74	5.75	19.63	47	0.31	0.0005	0.51	0.75	0.3
<b>Vitrófito</b>	-	-	UGB 19	2.35	14.53	86.36	46	0.75	0.0004	0.51	3.32	0.3

**Nota:**  $r$ : Peso unitario del macizo rocoso.  $mb$ ,  $s$ ,  $a$ : Parámetros del macizo rocoso del criterio Hoek & Brown.  $\sigma_{ci}$ : Resistencia en compresión uniaxial de la roca "intacta" definido por Hoek et al.(2002).  $E$ : Módulo de Young o deformabilidad.  $mi$ : Parámetro de la roca intacta del criterio Hoek & Brown.  $\nu$ : Razón de Poisson.  $GSI$ : Índice Geológico de Resistencia (Hoek et al. 2013). (1) Para el escalamiento del macizo rocoso se consideró  $D=0.7$ . **Fuente:** Departamento de Geología Mina Caujone (2018).

#### 1.3.4. Zonas Inestables, Deslizamientos y Fallas

El departamento de geotecnia, diariamente, realizan monitoreos del movimiento de las zonas inestables mediante sus radares modelos MSR-300-059 y MSR-300-103, ambos de marca REUTECH, instalados en puntos estratégicas para su operación las 24 horas del día, y su modo de auscultación de datos de los equipos es mediante el lanzamiento de ondas electromagnéticas hacia las paredes de los taludes del tajo que tienen un alcance de 2.5 km. Este tipo de sistema no requiere de estaciones reflectoras (prismas) en los bancos para su medición, y en general el sistema utiliza las superficies de roca expuesta para cuantificar el desplazamiento y poderlo convertir en movimiento, ver figuras 12, 13 y 14. Ambos radares registran al 100% el monitoreo del tajo, su disponibilidad y utilización es superior al 95%. Su operación es normal en las condiciones climáticas adversas como presencia de lluvias fuertes, vientos y neblina. Adicionalmente, se dispone de una cámara CCTV, con energía autónoma, se encuentra enlazado al radar 103 y 59 para la ubicación remota de movimientos de acuerdo con los niveles de alerta de los taludes en movimiento (Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone, 2018).



**Figura 12.** Ubicación del Radar 059, Ubicado en el Talud Sur Oeste (539491.8, 84598.9, 3776.9), Monitorea Fase 8, Fase 6A y Fase 6B2. Fuente: Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone (2018).

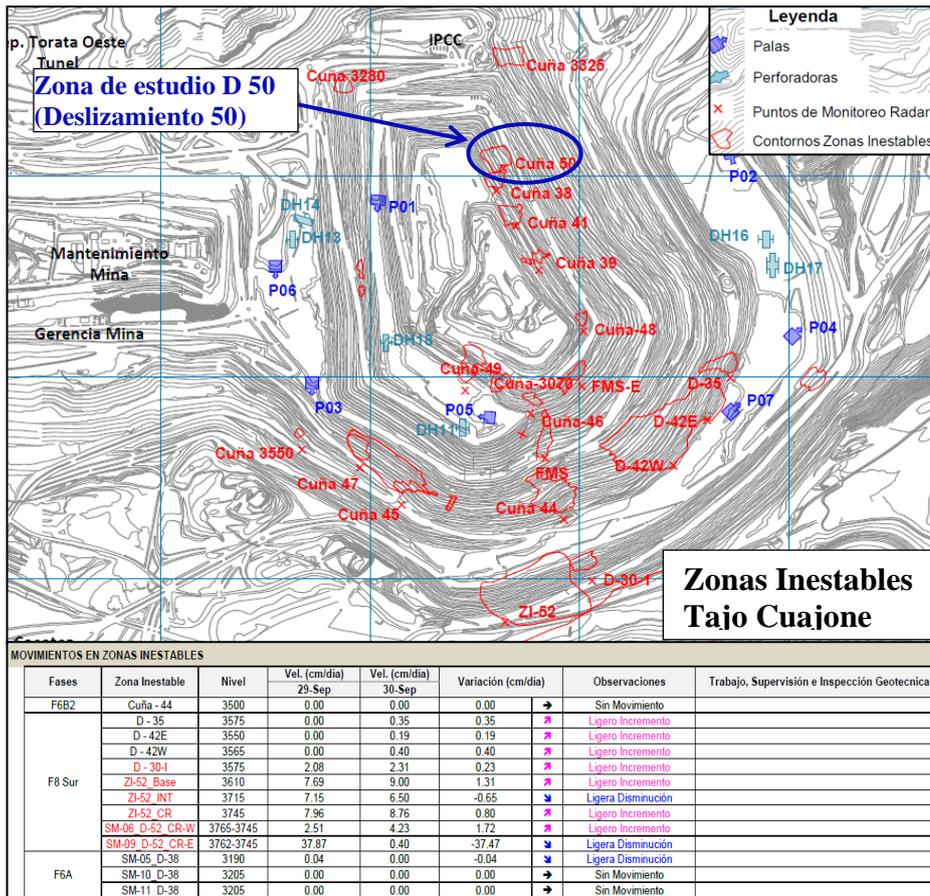


Figura 13. Plano de Zonas Inestables. Fuente: Departamento de Geología Mina Cuajone (2018).

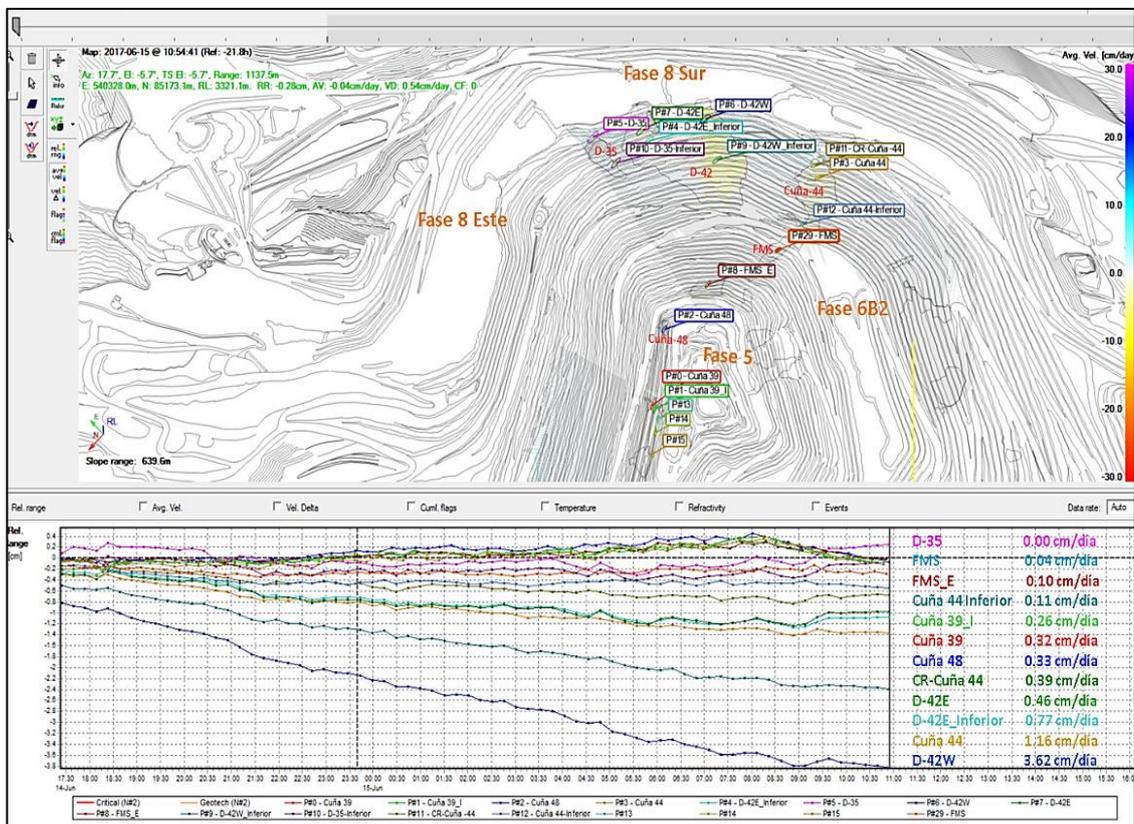


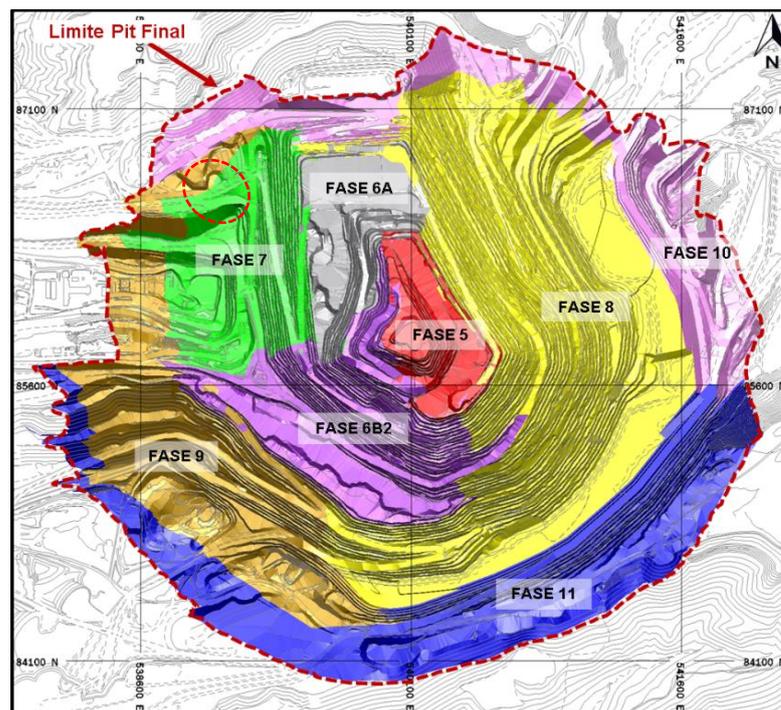
Figura 14. Vista del Software MSR HMI versión 10.0 Rev3. Radar 59. Fuente: Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone (2018).

## 1.4. OPERACIONES MINERAS

En la figura 15, se observa que la U.M. Cuajone está dividida en ocho fases de minado con las cuales alcanzará el límite final de minado.

Actualmente (Fines del 2017) se está minando las fases: 5, 6A, 6B2, 7 y 8. La mina se expande hacia la quebrada del río Torata, donde se encuentra la mayor cantidad de reservas, el diámetro del Pit actual es 3,1 Km. x 2,5 Km. y una profundidad actual de 930 m. desde el nivel 3880 al 2950. Cuajone es una mina a tajo abierto, cuya producción alcanza las 525 000 TM/día. Entre desmonte y mineral, con una ley promedio de 0,7 %Cu recuperable y un radio de desbroce 1: 4,75 (Champi Guzmán, 2015, p. 83).

El estudio se realizó al lado Este de la fase 6A (influencia del Deslizamiento 50).



**Figura 15.** Fases de Minado de Tajo Cuajone (Límite Final). Fuente: Departamento de Ingeniería Mina Cuajone (2018).

La altura de banco es de 15 metros con comunicación entre niveles por medio de rampas con una gradiente del 10% y carreteras (incluyendo rampas) con un ancho de 35 m. Los ángulos de talud de trabajo (operación) varían entre los 37° y 47° y de

banco de 60° a 75° (Champi Guzmán, 2015, p. 84). En el fondo de la fase 6A los taludes son a doble banco, es decir 30 m. En la figura 16 se puede apreciar el ciclo de las operaciones mineras.

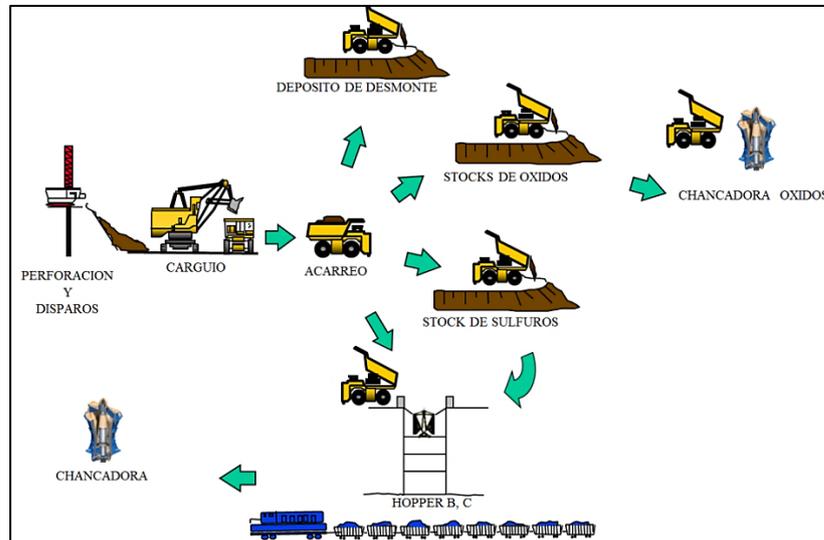


Figura 16. Diagrama Operativo Cuajone. Fuente: Departamento de Ingeniería Mina Cuajone (2018).

#### 1.4.1. Perforación y Disparos

Son las operaciones más importantes que influyen en la productividad de toda la operación minera. En la tabla 4 se detallan los equipos usados para el proceso de perforación.

Tabla 4.

Equipos Usados para Perforación en Mina Cuajone.

Código de Perforadora	Modelo	Cantidad de Perforadoras (Unid.)	Tipo de Perforadora	Para Taladros	Diámetro Actual de Taladro (pulg.)	Longitud Máxima de Perforación - Single Pass (m.)
D10	P&H 120A	2	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
D11	P&H 120A	2	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
D13	Bucyrus BE49RIII.	1	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
D14	Bucyrus BE49HR.	1	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
D16	P&H 320 XPC	2	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
D17	P&H 320 XPC	2	Eléctrica	Producción	12 1/4	19.8
<b>Sub Total</b>	-	<b>6</b>	-	-	-	-
DTH 1	Atlas Copco - Rock L8	1	Diesel	Pre corte	5	16.0
DTH 2	Sandvik - DR 560	2	Diesel	Pre corte	5	16.0
DTH 3	Sandvik - DR 560	2	Diesel	Pre corte	5	16.0
PEC 701	Sandvik - DX700	1	Diesel	Secundario	4	3.0
<b>Sub Total</b>	-	<b>4</b>	-	-	-	-

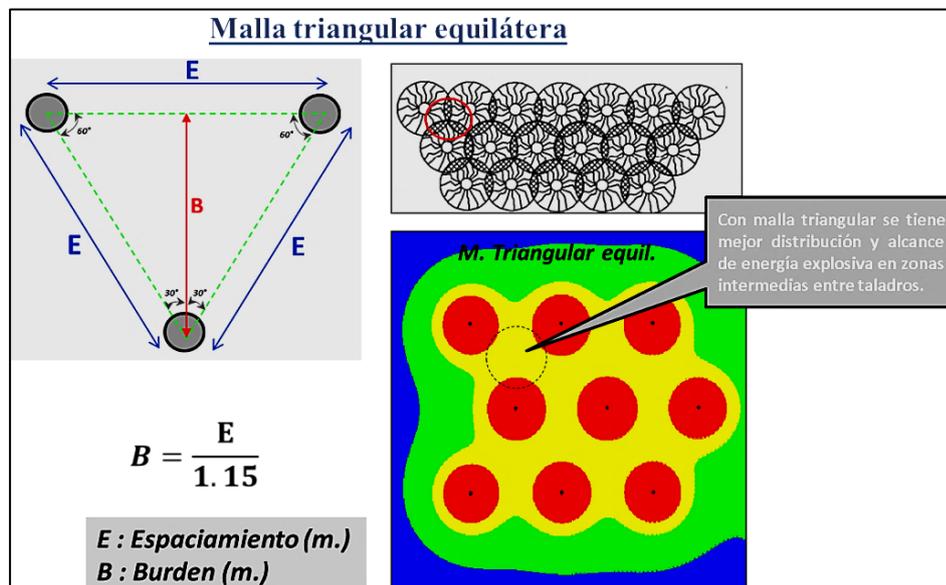
Nota: Actualmente se viene ensamblando la nueva Perforadora D18, Marca Catarpillar, Modelo MD6640, que reemplazará a la Perforadora D10 a mediados del 2018, debido a la antigüedad que esta presenta. Fuente: Diseño Propio (2018).

En la figura 17 se muestran las perforadoras usadas en producción.



**Figura 17.** Perforadoras para Producción de Mina Cuajone. Fuente: Diseño Propio (2018).

En mina Cuajone se usa malla triangular equilátera, debido a que se tiene mejor distribución de la energía del explosivo, como muestra en la figura 18.



**Figura 18.** Malla Triangular Equilátera Usada. Fuente: Diseño Propio (2018).

Para la voladura se usa la nueva tecnología Quantex (Mezcla Explosiva Quantex 70/30) que es un explosivo sensibilizado, compuesto por emulsión

gasificada químicamente con una solución gasificante L-8 y potenciado con un nitrato de alta densidad, véase en la figura 19 (EXSA S.A., 2015).

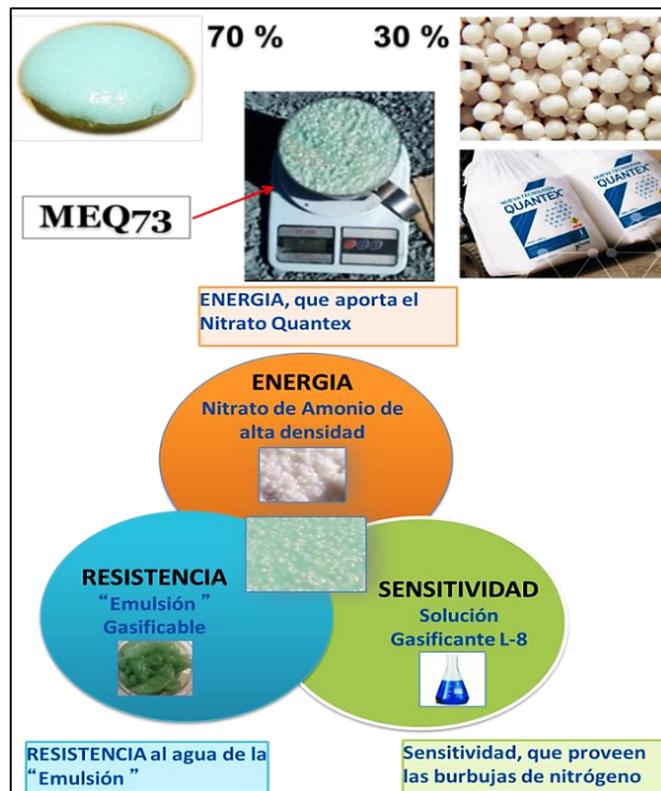


Figura 19. Tecnología Quantex. Fuente: EXSA S.A. (2015).

En la tabla 5 se muestran un resumen de los parámetros referenciales empleados para las mallas de perforación y ejecución de disparos.

**Tabla 5.**

*Parámetros de Perforación y Disparos*

Taladros	Tipo de Material	Malla	Diámetro	Explosivo Usado	Iniciador	Detonador	
		Referencial BxE (m.xm.)	de Taladro (pulg.)			Electrónico	No Eléctrico
<b>Producción</b>	Mineral	7.0X8.0	12 1/4	MEQ 70/30	Booster 2Lb	Ikon Extreme	Fanel **
<b>Producción</b>	Desmonte	10.0X11.0	12 1/4	MEQ 70/30	Booster 2Lb	Ikon Extreme	Fanel **
<b>Pre Corte</b>	-	2.0 *	5	Emulsión Encartuchada Famecorte	Cordón Detonante 5P	Ikon Extreme	Fanel **

*Nota:* \*En pre corte solo se tiene espaciamiento, \*\*Se usa como Back Up. **Fuente:** Diseño Propio (2018).

### 1.4.2. Acarreo, Transporte y Equipos Auxiliares

Luego de fragmentar la roca, el siguiente proceso minero es el acarreo y transporte de mineral o desmonte, donde se emplean equipos para este fin, así mismo se usan equipos auxiliares para mantenimiento de vías, regado vías, etc, las cuales se detallan la tabla 6 y 7.

**Tabla 6.**

*Equipos de Acarreo y Transporte de Mina Cuajone.*

Equipos de Carguío		Equipos de Acarreo
07 Palas Eléctricas	02 Cargadores Frontales	51 Volquetes Mineros
02 P&H 4100A, 56 yd <sup>3</sup> .	01 Le Tourneau 1800, 33 yd <sup>3</sup> .	10 Komatsu 830E, 218 t (240 ton).
01 P&H 2800XPB, 42 yd <sup>3</sup> .	01 Le Tourneau 2350, 50 yd <sup>3</sup> .	06 Caterpillar 793C, 793D, 231 t (255 ton).
01 Bucyrus 495BII, 56 yd <sup>3</sup> .	-	15 Komatsu 930E, 290 t (320 ton).
01 Bucyrus 495 HR, 73 yd <sup>3</sup> .	-	18 Caterpillar 797F, 363 t (400 ton).
01 Bucyrus 495 HR, 60 yd <sup>3</sup> .	-	02 Komatsu 930E-4SE, 290 t (320 ton).
01 Pala P&H 4100XPC, 74 yd <sup>3</sup> .	-	-

**Fuente:** Diseño Propio (2018).

**Tabla 7.**

*Equipos Auxiliares de Mina Cuajone.*

Equipos Auxiliares				
12 Tractores Sobre Orugas	06 Motoniveladoras	03 Cargadores Frontales	09 Tractores Sobre Llantas	05 Tanques de Regadío
04 Caterpillar D10-R	01 Caterpillar 16-H	01 Caterpillar 988H	02 Caterpillar 824-H	01 Cat-785D de 20,000 gal.
04 Caterpillar D10-T	02 Caterpillar 24-H	01 Caterpillar 966G	01 Caterpillar 834-G	
04 Caterpillar D11-T	03 Caterpillar 24-M	01 Caterpillar 992K	03 Caterpillar 834-H	01 Komatsu 830E de 20,000 gal.
-	-	-	02 Caterpillar 834-K	
-	-	-	01 Caterpillar 844-C	03 Cat-785C de 30,000 gal.

**Fuente:** Diseño Propio (2018).

## **CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN**

### **2.1. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1.1. Antecedentes Internacionales**

Moraga Hidalgo (2018) en su tesis de grado, titulada *“Características Geológicas y Geotécnicas Generales que Intervienen en la Tronadura y el Efecto de Daño en el Campo Lejano en Minería de Rajo Abierto”*, presentado en la Universidad de Concepción, en Chile, tenía como objetivo analizar las variables geológicas y geotécnicas más relevantes que inciden en la generación de daño sobre los macizos rocosos en campo lejano para

establecer un criterio de evaluación de daño que sea representativo y aplicable en el control de estabilidad de taludes en minería a tajo abierto, considerando el proceso desde la generación de energía explosiva, su transmisión por el macizo rocoso y su interacción con un mecanismo de inestabilidad. Concluyendo que en campo lejano uno de los mecanismos de daño corresponde al fallamiento de inestabilidades preexistentes en los taludes de un tajo y hay mucha importancia de la geología y la geotecnia en estos mecanismos.

Silva Castro (2013) en su tesis de doctorado, titulada *“Modelamiento de Vibración por Voladura Utilizando una Mejorada Técnica Signature Hole para Voladura de Bancos”*, Disertado en College of Engineering at the University of Kentucky, en E.E.U.U. tuvo como objetivo el de mejorar la técnica de Signature Hole con una nueva metodología. Los parámetros que incluyen el tiempo de iniciación, el tiempo de viaje de las ondas de vibración y la forma de onda de vibración generada por cada taladro tienen un comportamiento aleatorio y para aleatorizar la forma de onda de vibración para cada agujero, se desarrolló una ecuación basada en la serie de Fourier. Concluyendo que cada vez que se explota un taladro, la metodología genera una forma de onda de vibración aleatoria completa para dicho agujero utilizando distribuciones normales aleatorias para la amplitud de la señal, el contenido de frecuencia y la atenuación de la señal. La validación de la metodología se logró a través de varias pruebas de voladura de campo realizadas en una mina de carbón de tajo en West Virginia.

García Martín (2014) en su tesis de grado, titulada “*Análisis del Contenido en Frecuencias de Vibraciones por Voladura*” presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, España; tenía por objeto el análisis de las diferentes frecuencias y tipos de onda presentes en los registros de vibraciones de las voladuras. Se estudian así mismo la evolución de las frecuencias (en relación con la distancia y a la geología particular de cresta y plaza) y la ley de atenuación del terreno que relaciona la evolución velocidad de partícula en función de la distancia escalada. Concluyendo que en la primera parte del análisis se han distinguido frecuencias que se han asociado con los distintos tipos de ondas elásticas. Para barrenos individuales se asocian las ondas de superficie a frecuencias de 5 Hz a 6 Hz, las ondas S a frecuencias de 8 Hz y las ondas P a frecuencias de 12 Hz a 14 Hz. En los resultados de la voladura de producción es difícil distinguir estos trenes de ondas debido al efecto del retardo entre el barreno.

#### **2.1.1.2. Antecedentes Nacionales**

Peña Vizarreta (2014) en su tesis de grado denominado “*Modelamiento, Monitoreo y Control de las Vibraciones para Evitar Daños Inducidos por la Voladura de Rocas de una Operación Minera Superficial*” presentado en la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, menciona como objetivo principal de prevenir, mitigar, reducir y evitar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas para así proteger las estructuras en las comunidades aledañas a las operaciones mineras. Concluyendo que todos los resultados de

monitoreo de vibraciones inducidas por los disparos primarios fueron comparados con las normativas internacionales correspondientes, y están por debajo de los límites establecidos por dichas normativas internacionales de vibraciones.

### 2.1.2. Definición de Términos

#### a). Espaciamiento de Diseño y Espaciamiento efectivo

El espaciamiento de diseño es la dimensión lineal entre taladros de voladuras adyacentes que forman una fila, y se mide usualmente paralelo a la cara libre (es el espaciamiento de la perforación). Y el espaciamiento efectivo se refiere a la dimensión lineal entre taladros que detonan sucesivamente, y toma en consideración la dirección de la cara libre, como se aprecia en la figura 20 (McKenzie, 1994).

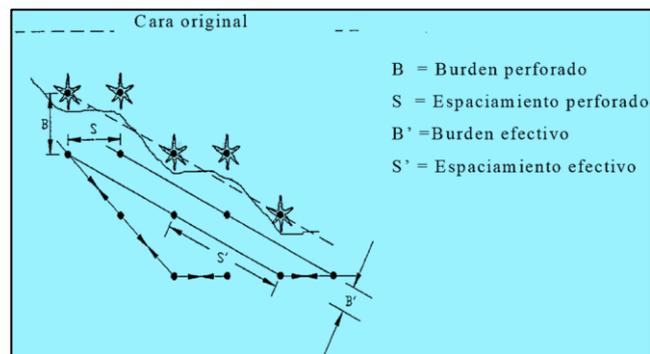


Figura 20. Definiciones de Burden & Espaciamiento nominal y efectivo. Fuente: McKenzie (1994).

#### b). Burden de Diseño y Burden Efectivo

El burden de diseño es la dimensión lineal entre el taladro y la cara libre, y se mide perpendicular a la dirección de la línea del taladro que constituye una fila (figura 20), y generalmente se refiere al burden perforado, significando que la dimensión lineal se hace a la cara libre existente del banco. El burden efectivo se refiere a la dimensión lineal entre el taladro y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de la

detonación del taladro, y toma en consideración la dirección de la iniciación (McKenzie, 1994).

**c). Distancia Escalar o Escalada (SD)**

Es un factor que relaciona efectos de velocidad pico partícula por voladura con similares cargas del mismo explosivo a variadas distancias. Y se obtiene al dividir la distancia en cuestión por una raíz exponencial del peso del explosivo por retardo. Más frecuentemente, la raíz exponencial es  $\frac{1}{2}$ , pero se han utilizado valores del orden de 0.3 a 0.5 (McKenzie, 1994).

Según Konya (1995, pp. 197-198), la distancia escalada es un desarrollo adicional de la Ley de Propagación de la USBM y es una forma práctica y efectiva de controlar la vibración. Está definida por la relación:  $SD = \frac{d}{\sqrt{W}}$  para cargas cilíndricas (L:  $D \geq 6:1$ ) y  $SD = \frac{d}{\sqrt[3]{W}}$  para cargas esféricas (L:  $D \leq 6:1$ ); donde “d” es la distancia del disparo a la estructura en metros y “W” es el peso máximo de carga por retardo en Kg, es decir, es la carga operante; “L” es la longitud de la columna explosiva y “D” es el diámetro del taladro.

**d). Factor de carga o Factor de Potencia**

Éste es el término usado para describir la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca; relacionado con las unidades de  $\text{Kg/m}^3$  o  $\text{Kg/ton}$  (McKenzie, 1994).

**e). Impedancia del Explosivo.**

La impedancia de un explosivo es el producto de su densidad y su velocidad de detonación. Idealmente los explosivos deben tener la misma impedancia que la roca (es el producto de la onda P y densidad de la

roca) que se va a fragmentar para efectuar la máxima transferencia de energía desde el taladro a la masa rocosa (McKenzie, 1994).

**f). Velocidad de Detonación (VOD)**

Es una medida del performance del explosivo para lograr la fragmentación de la roca; que se refiera a la rapidez al cual se desplaza la reacción de la detonación del explosivo por la columna de carga. Por las experiencias la VOD varía desde 3,000 m/s en anfos (y emulsiones gasificadas en diámetros pequeños con densidades de copa menores a 1.00 gr/cc), hasta 6,000 m/s en emulsiones gasificadas con densidades de copa 1.15 gr/cc en mayores diámetros (Aporte del Tesista, 2018).

**g). Densidad del Explosivo**

Es la relación entre la masa y el volumen del explosivo, y tiene influencia determinante sobre la velocidad de detonación y la sensibilidad. La densidad de los explosivos varía de 0.8 a 0.16 gr/cc (EXSA S.A., 2018, p. 40).

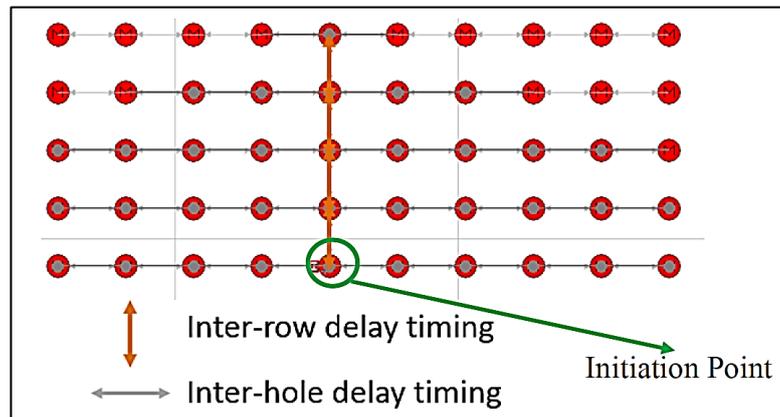
**h). Detonador Electrónico**

Es un tipo de dispositivo en el cual el retardo de disparo está controlado por una unidad de control electrónico digital y que es energizado por un dispositivo interno de energía de almacenamiento/generación/conversión, cuyo retardo de disparo es programado por un sistema de iniciación digital. El detonador electrónico tiene una dispersión de 0.01% que es casi nula (EXSA S.A., 2018, p. 85).

**i). Tiempo de Retardo en Diseño de Voladura**

El tiempo de retardo se define como el intervalo de tiempo entre detonaciones (Bender, 1999). Y hay dos tipos de temporización de

retraso, entre taladros y entre filas: **El tiempo de retardo entre taladros** es el intervalo de tiempo entre la detonación de los taladros en la misma fila. **El tiempo de retraso entre filas** es el intervalo de tiempo entre filas; como se puede apreciar en la figura 21 (Haotian, 2016, p. 17).



**Figura 21.** Ilustración de Tiempo de Retardo entre Taladros y Tiempo de Retardo entre Filas. Fuente: (Haotian, 2016, p. 17).

#### j). Selección del Retardo

El retardo tiene la habilidad de influenciar en el resultado de casi cada aspecto de la voladura como la fragmentación, estabilidad, excavabilidad (desplazamiento de pila), impacto ambiental, sobre quiebre y daño por vibraciones. Se ha mencionado en algunas literaturas que el retardo óptimo se relaciona al burden de los taladros, como por ejemplo el tiempo de retardo entre taladros varían de 3 a 15 ms/m de burden y el tiempo de retardo entre filas con valores tan altos como 26 ms/m (McKenzie, 1994, p. 65).

CINTEX (2004), menciona que generalmente el tiempo de retardo entre taladros varía de 4 ms a 25 ms y entre filas varían desde 25 ms hasta 100 ms.

Para la determinación de los tiempos de retardo, existen muchas reglas y formulaciones de varios autores como: Konya, Rossmanith, Ash,

Bauer, Bergmann, Fadeev, etc, lo han trabajado y descrito. Sin embargo, mediante el análisis de ondas elementales se pueden obtener tiempos de retardo idóneos para elevar las frecuencias y reducir las amplitudes.

#### **k). Mallas de Perforación**

Una distribución uniforme de explosivos requiere una distribución uniforme de taladros; por cual hay principalmente configuraciones rectangulares y trabadas, que al final el amarre es el quien define el diseño real. En Leiva (2007) se refiere que desde el punto de vista del uso eficiente de la energía de tensión (en rocas tenaces) los esquemas de diseño de malla más efectivos son los triangulares trabados y entre ellos el mejor es la que forma triángulos equiláteros, ya que es la que proporciona la mejor distribución de la energía del explosivo hacia la roca, ver anexo 8 (Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex [CINTEX], 2004).

#### **l). Secuencia y Dirección de Iniciación**

Según McKenzie (1994, p. 64), **la secuencia de iniciación** determina el orden en la cual los taladros cargados se detonan en una malla de voladura. Comúnmente los términos usados para describir la secuencia de iniciación incluyen a Cuña (V0, V1), Paralelo, Echelón, Trabado (triangular), Diamante, descritos en la figura 22, donde las líneas que unen los taladros indican el tiempo de la detonación del taladro. Los factores que influyen en la selección de la secuencia de iniciación incluyen el número de caras libres, dirección preferencial de desplazamiento de la roca quebrada, la orientación de los conjuntos de diaclasas principales y la ubicación de las estructuras sensibles a medio

ambiente. En general, la **dirección de iniciación** se refiere a la dirección del movimiento de la pila, que es normal (perpendicular) a las líneas de tiempo mostradas en la figura 23 o también se puede mencionar que la dirección de iniciación es la dirección del tren de ondas de la voladura.

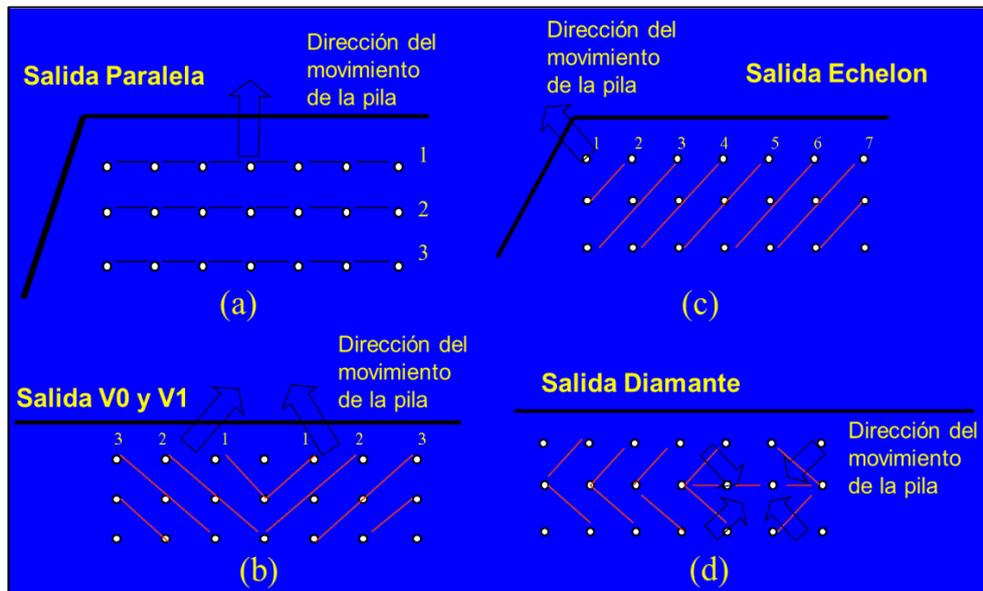


Figura 22. Esquema representativo del secuenciamiento de Iniciación. Fuente: CINTEX (2004).

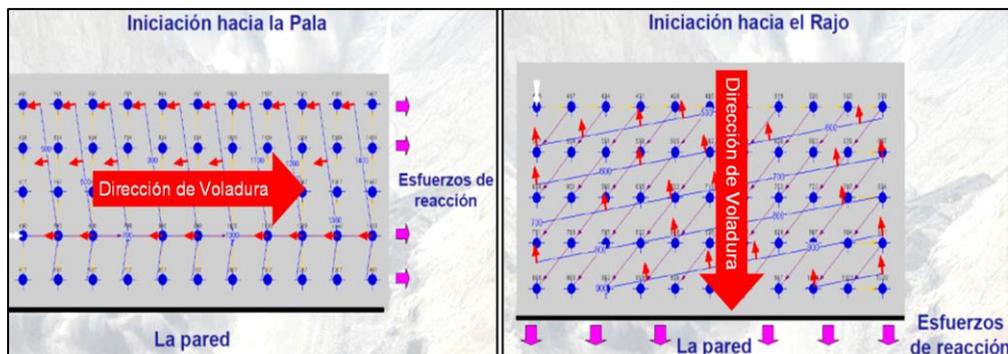


Figura 23. Esquema representativo de la Dirección de Iniciación. Fuente (Blastechnology, 2006).

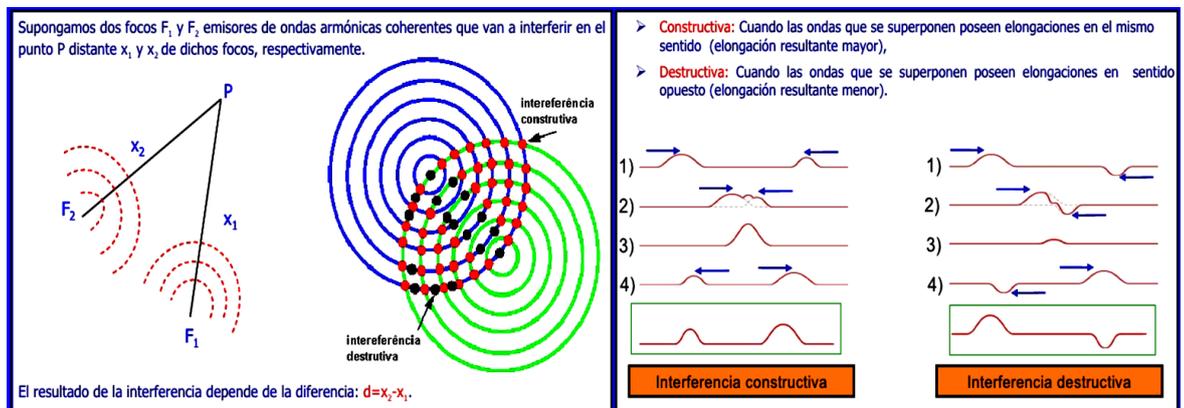
#### m). Velocidad de la Onda P ( $V_p$ )

La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda P se desplaza a través de la roca (ENAEX S.A., 2011).

#### n). Principio de Superposición de Onda

Es un fenómeno que se produce cuando dos o más ondas concurren (se encuentran) en un mismo punto, la perturbación (amplitud) resultante es igual a la suma de las perturbaciones que produciría cada

una por separado, gráficamente se aprecia en la figura 24. Este principio está relacionado al principio de Huygens (Zhang, 2016, pp. 24-29).



**Figura 24.** Principio de Superposición de Onda. Fuente: (Centro Educativo San Antonio María Claret, 2007, p. 51-52).

### o). Carga Operante (COp)

Es la máxima carga explosiva que interviene en el conjunto secuenciado de detonaciones de la voladura, con una secuenciación siempre superior a 8 milisegundos entre cada dos detonaciones independientes (Zhang, 2016, pp. 24-29).

También se define como la cantidad de explosivo de un taladro por el número de talados detonados en un mismo tiempo en Kg, con la siguiente ecuación:  $COp = We \times NT$ ; donde  $We$  es la cantidad explosivo por taladro (kg) y  $NT$  es el número de taladros detonado en un mismo tiempo (Cruzado Mendoza & Diaz Choroco, 2017, p. 40).

Por ejemplo, se tiene una voladura con una fila de 20 taladros detonados y retardados con detonadores electrónicos cada 17 ms entre taladro, y la carga de cada taladro es 800 kg de explosivo; entonces la carga operante estática máxima detonada es 800 kg. En cambio, si se tiene el mismo escenario pero con detonadores pirotécnicos, con retardos de superficie de 17 ms entre taladro y 600 ms de fondo; se debe tener una

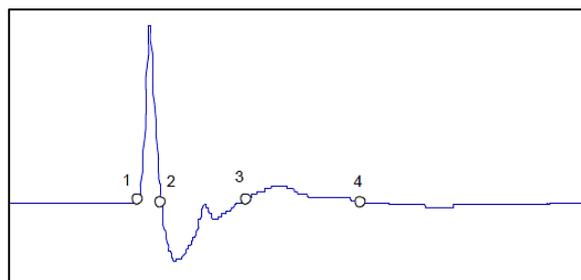
carga operante mayor a 800 kg, debido a la dispersión de retardo de fondo principalmente que haría que coincidan varios taladros con el mismo tiempo de detonación (Aporte del Tesista, 2019)

**p). Carga Operante Dinámica**

Este término básicamente se aplica a campo lejano, debido al principio de superposición de ondas por condiciones del terreno, secuencia de detonación, etc; que (a pesar que los taladros están retardados con mayor a 8 ms entre taladro y con detonadores electrónicos) hace que dos o más ondas en un determinado tiempo y distancia coincidan en un mismo punto, generando suma de ondas (mayor amplitud producto de ondas de dos o más taladros detonados), que puede significar mayor daño, más aún si las frecuencias son bajas según J. Accinelli (comunicación personal, 15 de octubre, 2017).

**q). Zero Cross (ZC)**

Es la manera más común para estimar la frecuencia, donde se usan los tiempos a la cual la amplitud de la señal es cero para definir el periodo de la onda, o la mitad del periodo de la onda. Con este método, la frecuencia dominante usada por la mayoría de las personas es la frecuencia derivada a partir de una media-onda, cual tiene un valor absoluto de amplitud mayor, como se puede ver la figura 25 y (INSTANTEL, 2017).



**Figura 25.** Método de Zero Cross (ZC). Fuente: (ENAE S.A., 2011).

**r). Frecuencia Dominante**

En formas de ondas simples, no compuestas de muchas frecuencias diferentes, la frecuencia dominante en este caso puede estar en la onda con la máxima velocidad de partículas. Pero en formas de onda más complejas, la frecuencia dominante no es necesariamente la frecuencia a la velocidad máxima de partícula sino a la frecuencia con la mayor amplitud. Si esta frecuencia realmente contribuyó o no al valor máximo de la velocidad de la partícula y cuánto debe extrapolarse examinando de cerca la señal original. La frecuencia en el pico de una onda compleja generalmente no es una frecuencia única, sino que es una serie de ondas de diferentes frecuencias superpuestas (INSTANTEL, 2017).

**s). Método de Signature Hole**

Es un método que usa como base de dato (información de entrada) a las ondas elementales de taladros aislados, que contiene toda la información del terreno recorrido (La dispersión en el sistema de iniciación, la geología, la consistencia de los explosivos, los cambios en la trayectoria de vibración entre la fuente y el punto de monitoreo y la geometría de los taladros se considera en la metodología), los procesa, y genera información en forma de ondas que han sido aleatorizados con una serie de Fourier; esta información nos brinda la oportunidad de evaluar los niveles de vibración, tiempos de retardos idóneos para obtener altas frecuencias y que se podría complementar al esquema de Monte Carlo (Silva Castro, 2013, pp. 18-19). Rizky (2012), en su presentación nos menciona que el método de Signature Hole combinado

con detonadores electrónicos y software de modelado avanzado (blastware), proporciona un gran beneficio en la reducción del nivel de vibración. Sin cambiar la carga por retardo, hay reducción de VPP del 30% y el 70% y tiene mayor precisión para la predicción.

En la figura 26, se muestra un esquema de la técnica Signature Hole y más detallado en el anexo 8.

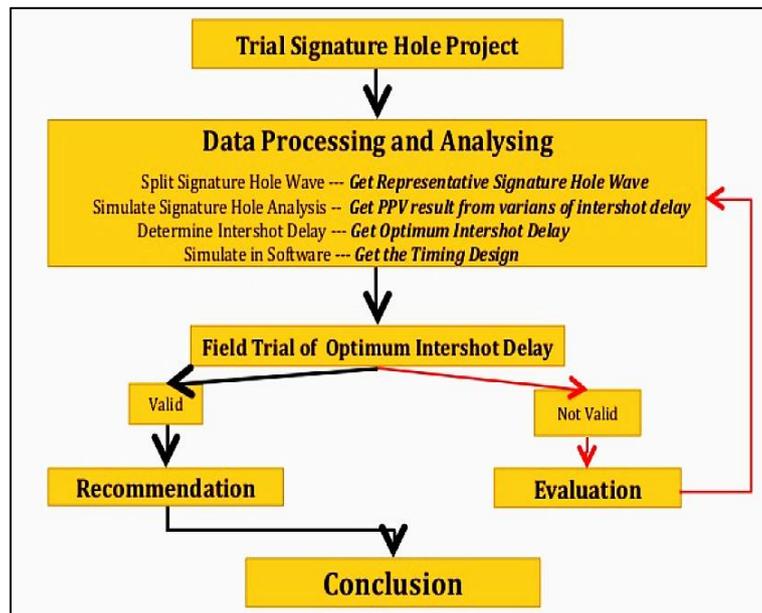


Figura 26. Esquema de la Técnica Signature Hole. Fuente: Rizky (2012), extraído de <https://es.slideshare.net>

#### t). Modelo de Monte Carlo

Es un método de análisis estadístico que permite obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas que dan resultados más precisos y exactos porque incorpora diseño de P&V, además información de la secuencia de detonación y considera la interferencia de las diferentes ondas producidas por cada uno de los taladros. En la práctica, las pruebas aleatorias se sustituyen por resultados de ciertos cálculos realizados con números aleatorios, en la figura 27 se ve el esquema del modelo de Monte Carlo (ORICA MINING SERVICES, 2010).

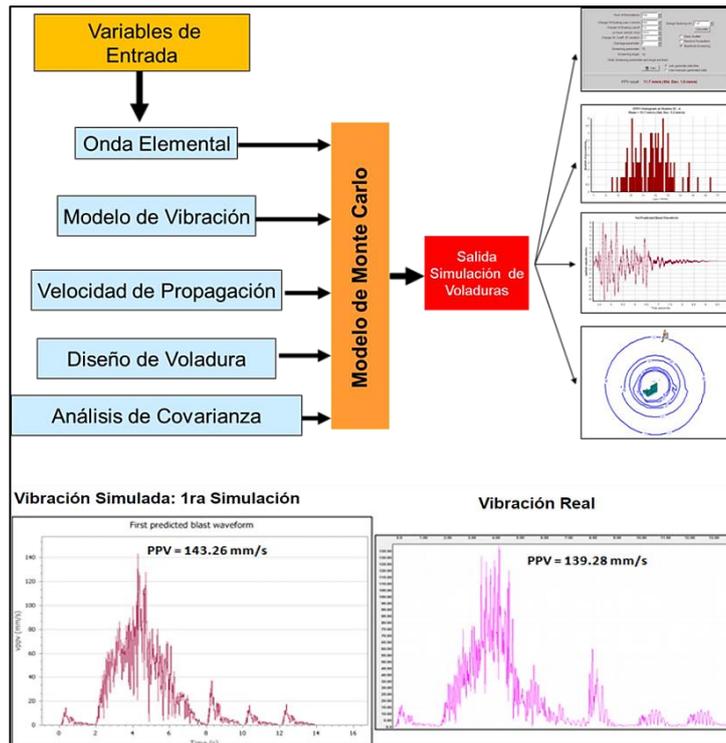
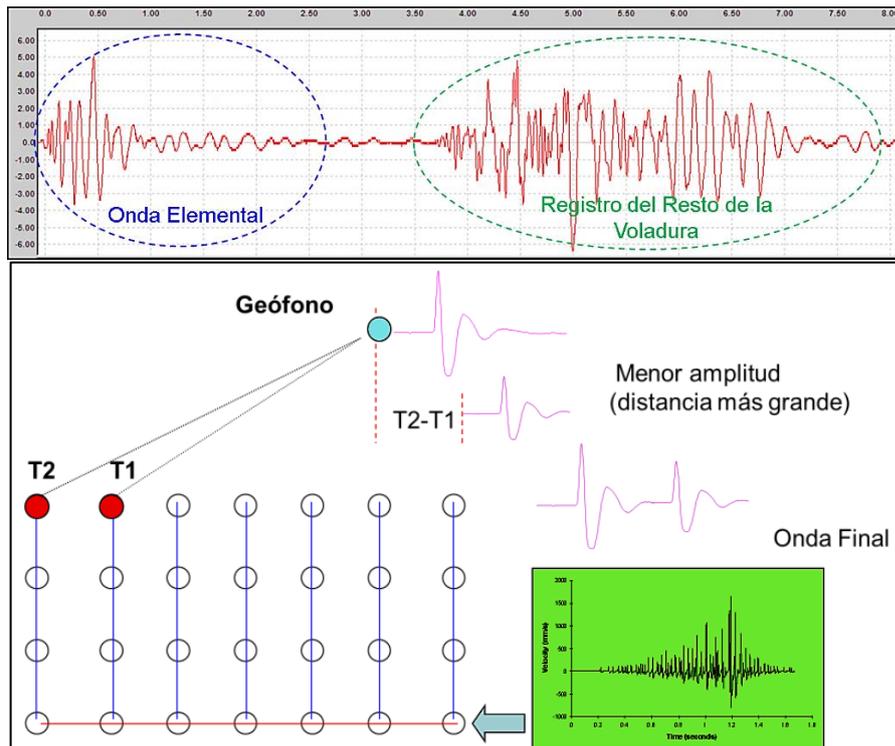


Figura 27. Modelo de Montecarlo. Fuente: (ORICA MINING SERVICES, 2010).

**u). Onda Elemental**

Es la vibración generada por un taladro capturado en el punto de interés, que tiene como objetivo principal generación de frecuencias altas en zonas de inestabilidad mediante la selección de aquellos tiempos de retardo que minimizan la posibilidad de acoplamiento constructivo (amplificación) de ondas (figura 28). Esta teoría utiliza el efecto de la superposición lineal de los trenes de ondas generadas por la detonación de las diferentes cargas explosivas de una voladura. Considerando el tiempo de viaje de cada una de las ondas y las diferencias de tiempo de la secuencia de salida. Con esto es posible predecir el registro de onda que se obtendría, determinando la velocidad máxima de partícula y las frecuencias dominantes ya que la onda recoge la información del macizo rocoso. Está información es reflejada en forma de amplitud y duración de la onda. (McKenzie, 2000) & (ORICA MINING SERVICES, 2010).



**Figura 28.** Esquema de Onda Elemental Basada en Teoría de Superposición. Fuente: (ENAEX S.A., 2011).

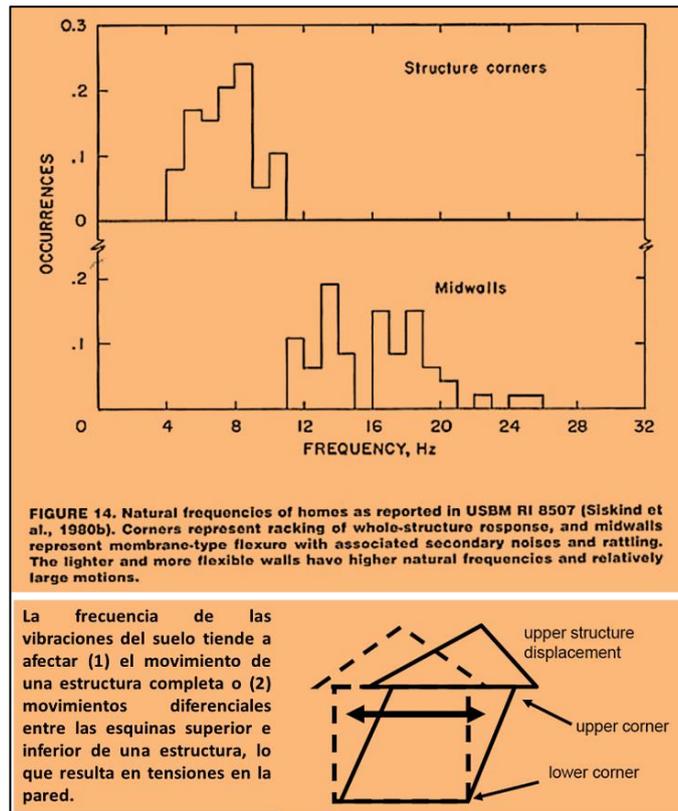
Blastechnology (2006) no menciona que la onda elemental nos permite evaluar los siguientes efectos:

- ❖ Tiempos y precisión de los retardos.
- ❖ Punto y dirección de iniciación.
- ❖ Tamaño y forma de voladura (no de pozos).
- ❖ Cargas variables (ej. Producción y buffer).
- ❖ El efecto amortiguado en zonas ya tronada.

#### v). **Resonancia de Vibración**

Resonancia se refiere cuando la frecuencia de la vibración coincide con la frecuencia natural o fundamental de una estructura dada; la estructura se sacudirá más vigorosamente que la vibración del suelo o la estructura resuena, generando mayor daño. En otras palabras, las vibraciones del suelo entrantes se amplifican en la parte superior de la estructura. La frecuencia natural de la mayoría de las estructuras

residenciales varía de 4 a 12 Hz (ver figura 29). Si la frecuencia del suelo es alta (superior a 20 Hz), se transfiere muy poca energía sísmica a la estructura, y la amplitud de la sacudida de la estructura duplica más estrechamente el nivel de vibración del suelo (OFFICE OF SURFACE MINING RECLAMATION AND ENFORCEMENT [OSMRE], 2017).



**Figura 29.** Esquema de Resonancia Natural. Fuente: <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/WYBlasterCertModules/8AdverseEffectsBlasting.pdf>

**w). La Transformada rápida de Fourier (FFT)**

Es un análisis matemático complejo desarrollado por el matemático francés Fourier, que establece que una señal oscilatoria puede ser representada por una serie de ondas armónicas sinusoidales que varían en amplitud, frecuencia y fase (véase figura 30). La FFT se puede usar para producir el Espectro de Amplitud (EA), mostrando las amplitudes de las PPV (en mm/s) asociadas con cada componente individual de frecuencia (GEOBLAST, 2018).

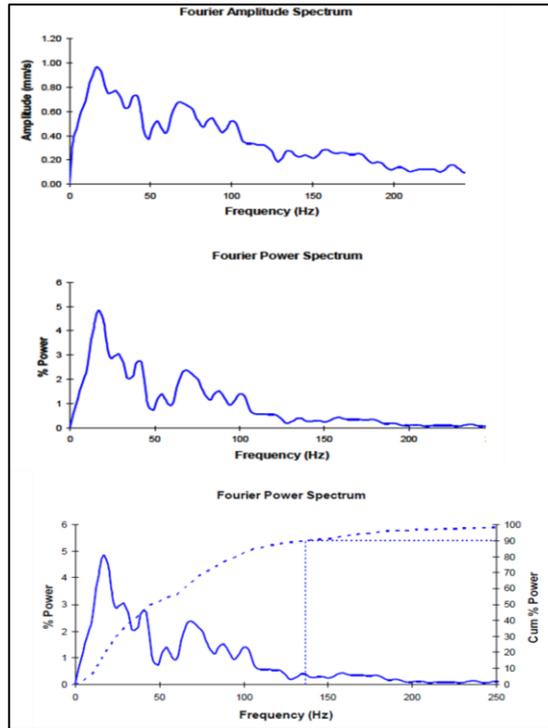


Figura 30. La Transformada Rápida de Fourier (FFT). Fuente: (ENAEX S.A., 2011).

### 2.1.3. Fundamentación Teórica

#### 2.1.3.1. Teoría de Voladuras

Cuando se dispara una carga explosiva cilíndrica en un taladro, la detonación se mueve hacia arriba por la columna explosiva desde el cebo, y una onda de tensión de alta presión viaja por el macizo rocoso en todas las direcciones. Las posiciones de las ondas de detonación y las ondas de estrés en diferentes momentos son las que se muestran en la figura 31 (Onlineminingexam, 2015).

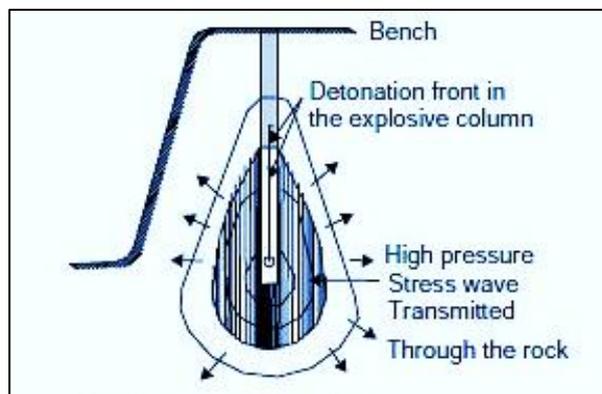
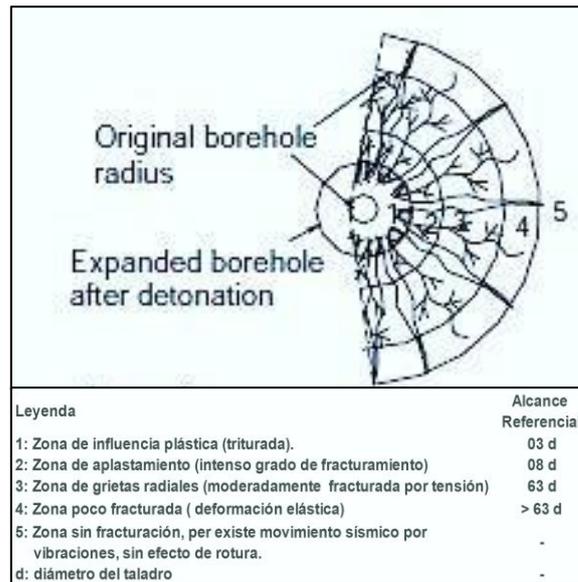


Figura 31. Disparando una Carga Cilíndrica. Fuente: <https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/>

En la figura 32 se muestra una sección horizontal justo en el proceso de la detonación del taladro sin cara libre, que describe como las ondas de choque de compresión dividen el área que rodea el taladro en fracturas radiales en diferentes puntos de tiempo, las cuales son cinco zonas (Onlineminingexam, 2015).

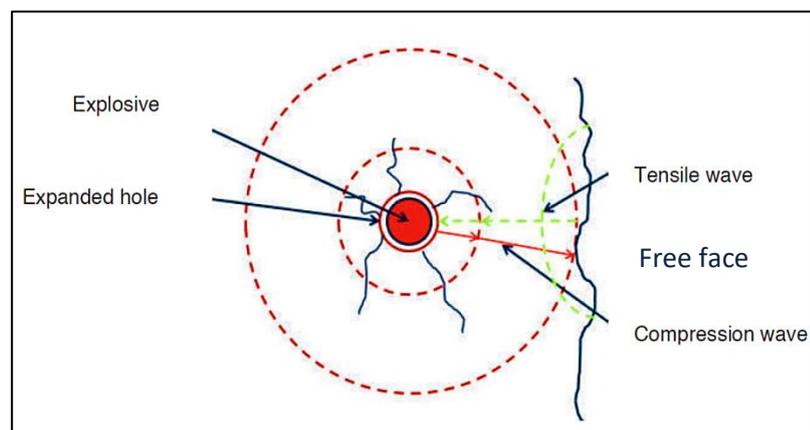


**Figura 32.** Ilustración de los Tipos de Fisuras en las Proximidades del Taladro Detonado.  
Fuente: <https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/>

Como lo enfatiza Bernaola Alonso, Castilla Gómez y Herrera Herbert (2013) la primera etapa es básica para la rotura de la roca ya que en ella es empleada la parte de energía del explosivo que corresponde a la onda de detonación y que no alcanza valores superiores al 10% de la energía total del explosivo, ni aún en el caso de explosivos de elevado poder rompedor ( p. 134).

En taladros con cara libre, las ondas de choque de la cara libre se reflejan como ondas de tensión; y para entender mejor el efecto que se produce cuando se detona una carga explosiva dentro de un taladro, Niklasson, Olsson, y Beyglou (2014) nos mencionan que la roca se ve afectada en tres pasos, vea figura 33.

- ❖ **Paso 1:** El orificio se expande debido a la alta presión. La presión dentro del taladro excede la resistencia a la compresión de la roca. Las paredes del taladro se pulverizan y se forman pequeñas fracturas en la roca alrededor del taladro.
- ❖ **Paso 2:** Las ondas de compresión y ondas de choque, se propagan en todas las direcciones desde la periferia del taladro con una velocidad igual a la velocidad sónica en la roca. A medida que estas ondas de choque se reflejan contra una roca libre, se transforman en ondas de tensión que regresan a la roca. Si se excede la resistencia a la tracción de la roca, aparecen fracturas más largas en la roca y la roca comienza a romperse.
- ❖ **Paso 3:** En el tercer paso, el volumen de gas liberado penetra las fracturas bajo una alta presión y expande las fracturas y finalmente lanza la roca hacia adelante (p.5).



**Figura 33.** Teoría de Voladuras. Fuente: Niklasson, Olsson, & Beyglou (2014).

En la tabla 8 se presentan algunos datos típicos de una detonación. El volumen de gas producido oscila de 150 litros/Kg a 1,100 litros/Kg y la presión dentro del taladro de perforación es de 6 GPa a 20 GPa, que supera con creces la resistencia de la roca (Niklasson, Olsson, & Beyglou, 2014, p. 5).

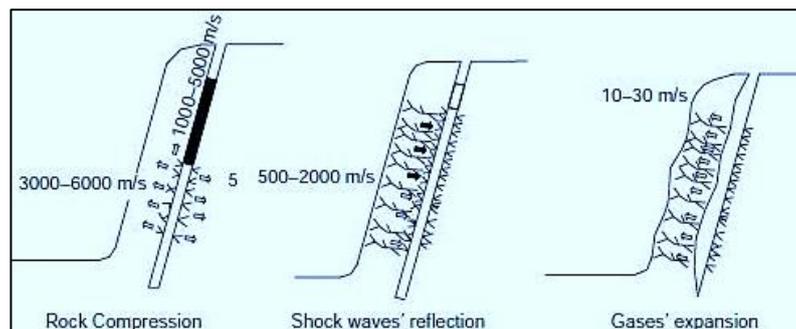
**Tabla 8.**

*Velocidad de Factores de Voladuras y Duración de Voladuras de Bancos.*

Importantes Factores de Voladura	Velocidad (m/s)	Duración (ms)
Detonación	2,000 – 8,000	2 - 3
Onda de Choque	4,000 –6,000	2 - 3
Fracturas	Ca. 1,000	5 -10
Flujo de Gas	100 –500	20 - 80
Movimientos del Banco	10 – 20	Algunos segundos

**Fuente:** Niklasson, Olsson, & Beyglou (2014).

En cualquier operación de voladura, solo el 3% de la energía explosiva es utilizada por la onda de compresión y las rocas se generarán si esta energía no es suficiente para regresar después de viajar a la cara libre. Las ondas de compresión solo aumentan las grietas radiales, pero las ondas de tensión hacen que la roca se fragmente. Y la rápida expansión de los gases en el taladro provoca flexión o giro. La presión del gas también causa grietas radiales a través de la masa de roca hasta la carga y luego su desplazamiento, ver figura 34 (Onlineminingexam, 2015).



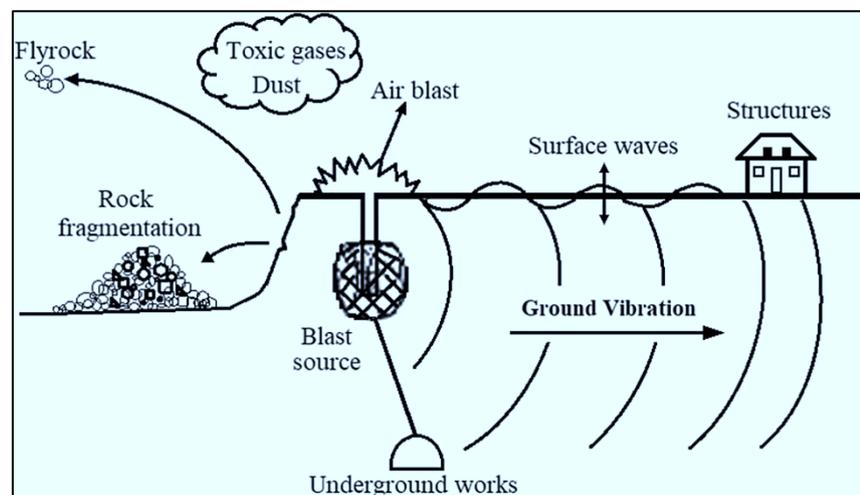
**Figura 34.** Fenómeno Físico en Voladura de Rocas. Fuente:

<https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/>

### 2.1.3.2. Descripción de las Vibraciones Producidas por las Voladuras de Rocas y sus Efectos

La detonación de una masa de explosivo confinada en el interior de un taladro en un macizo rocoso genera de una forma casi instantánea un volumen de gases a una presión y temperatura

elevadas que actúa sobre las paredes del taladro como un choque o impacto brusco, que se manifiesta en forma de onda de deformación. Esa onda de deformación/tensión transmitida es cilíndrica, en el caso de carga cilíndrica distribuida en el taladro, o esférica, en caso de carga puntual o esférica, aunque a considerable distancia del barreno con relación a su longitud puede considerarse como esférica. En definitiva, la tensión soportada por un elemento material será función inversa de la distancia. Se puede admitir que la transmisión de la vibración a partir de una distancia de taladros relativamente pequeña es en forma prácticamente elástica. Entonces se entiende por vibraciones a los fenómenos de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. El fenómeno de vibraciones queda caracterizado por una fuente o emisor, esto es, un generador de vibraciones (voladura), y por un objeto o receptor de las mismas (entorno), el fenómeno de las vibraciones se manifiesta mediante un movimiento ondulatorio (Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert, 2013, pp. 199-200). Véase en la figura 35.



**Figura 35.** Efectos de la Voladura al Área Circundante. Fuente: Bakhtavar & Yousefi (2018).

La energía contenida en los explosivos utilizados en los taladros de la mina está diseñada para romper y desplazar rocas y cuanto más energía disponible pueda utilizarse para ese propósito, más eficiente será la explosión. Sin embargo, parte de la energía no puede utilizarse para romper rocas y crea vibraciones en la roca y el aire circundantes (Siskind, 2000).

### 2.1.3.3. Ondas Sísmicas Inducidas por las Voladuras

Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert (2013), nos manifiestan que la interacción y propagación de ondas sísmicas en el terreno es un proceso complicado que combinan ondas internas (de cuerpo) y ondas superficiales como se detallan líneas abajo:

a) **Ondas Internas**, se propagan por el interior del sólido rocoso y tienen menor amplitud y longitud de onda, y son:

❖ **Onda P** (consideras ondas primarias, longitudinales o de compresión), las partículas se mueven de forma recíproca como las ondas acústicas del aire, es decir, la oscilación de las partículas es en la misma dirección en la que la onda se propaga; son de mayor celeridad y se transmiten tanto por el interior del medio como por su superficie en todo tipo de material (En el aire es 330m/s, en el agua es 1450m/s y cerca de 5000m/s en el granito).

❖ **Onda S** (consideradas ondas secundarias, transversales, de corte o cizalladura), se mueven perpendicularmente a la onda P, es decir, provocan la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección en que la onda se propaga (lo cual supone un mayor recorrido) y a una velocidad más lenta que la

onda P pero tiene mayor amplitud y contenido de energía, y sólo se transmiten en materiales susceptibles de soportar esfuerzos de corte (solo en medios sólidos). Se transmiten tanto por el interior del medio como por su superficie, pero en el caso de terrenos incoherentes están polarizadas según la superficie de separación de ambos medios.

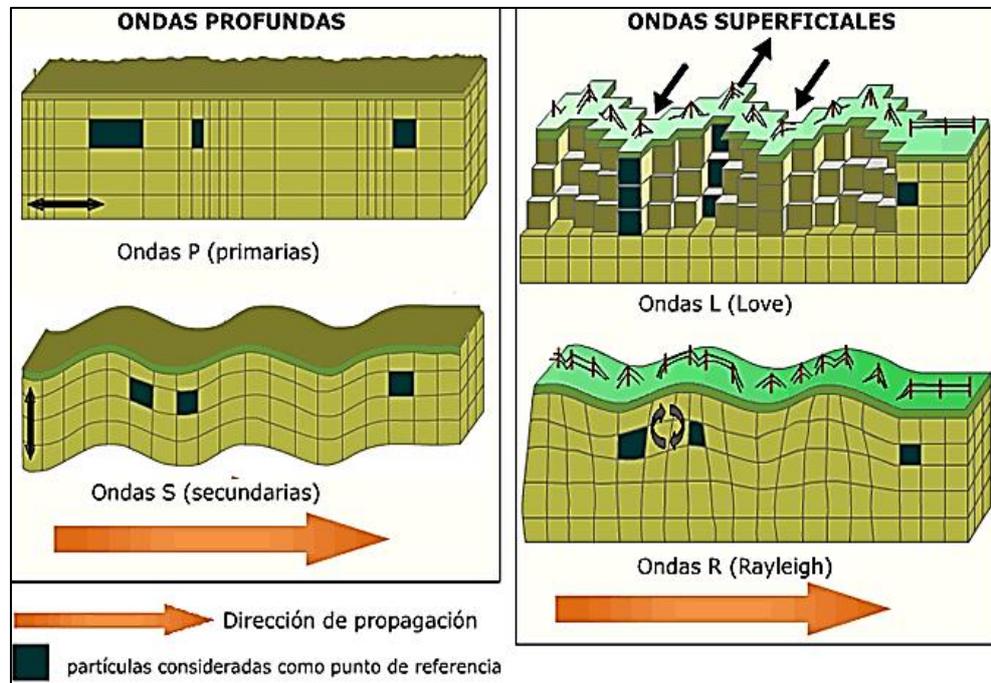
**b) Ondas Superficiales**, no poseen una propagación rápida, es decir, tienen frecuencia baja y, por ende, son más lentas que las ondas internas; se transmiten únicamente por la superficie del material y se caracterizan por tener mayor amplitud (transportan más energía) y por una disminución exponencial en la amplitud con la profundidad. Pueden ser registradas a grandes distancias, ya que, a diferencia de las ondas de cuerpo, sufren una dispersión geométrica con la distancia que es mucho menor. Se tiene las ondas Rayleigh R y las ondas Love L:

❖ **Onda R (Rayleigh)** caracterizada porque las partículas se mueven de forma elíptica en sentido antihorario y siempre existen en el plano radial y vertical, y no tienen componente transversal, pero se mueve más lentamente que la onda P y S. Es más importante cuando la fuente de vibración se encuentra cerca de la superficie. Esta onda provoca más daño ya que su amplitud es alta y su longitud de onda "largo".

❖ **Onda L (Love)** se caracteriza por la vibración de partículas del tipo de corte y solo están en la dirección transversal y horizontal, generan oscilaciones elípticas. Estas ondas están

confinadas a una zona superficial poco profunda y su velocidad es similar a la de las Rayleigh (pp. 200-201).

En la figura 36 se aprecia los tipos de ondas y sus movimientos.



**Figura 36.** Ondas Internas y Superficiales. Fuente:

[http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21\\_ondas\\_ssmicas.html](http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html)

Se puede demostrar teóricamente y se observa experimentalmente que la velocidad de las ondas es tal que:  $V_{R,L} < V_s < V_p$ . Donde  $V_p$ ,  $V_s$  y  $V_{R,L}$  son las velocidades de las ondas P, S y de ondas Rayleigh, Love respectivamente. Entre estas dos últimas no puede establecerse un orden de velocidades porque dependen de muchos factores y no siempre viajan con la misma velocidad (Ondas Sísmicas, párr. 8).

De todos estos tipos de ondas, solo tiene interés en el estudio de vibraciones por voladuras las **ondas P, S y R**; debido a que las ondas Love no pueden separarse de las anteriores por lo que su distinción teórica no tiene mayor interés práctico (Instituto Geológico y Minero de España [IGME], p. 26)

Qiu (2014) y [IGME], indican que la celeridad o velocidad de propagación de las ondas suele adoptarse y que es función de las características del material e independiente de la frecuencia y amplitud de la vibración. En el caso del semiespacio elástico homogéneo (medio isotrópico homogéneo), dichas velocidades vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

Velocidad de Onda P ( $V_p$ ):

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{(K+\frac{4}{3}\mu)}{\rho}} \dots\dots\dots(1)$$

Velocidad de Onda S ( $V_s$ ):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad del medio en que se propaga la onda,  $\nu$  es el coeficiente o relación dinámica de poisson,  $E$  es el módulo dinámico de Young;  $\lambda$  y  $G$  ( $\mu$ ) representan la primera (expresión matemática extensa sin significado físico) y la segunda (módulo de rigidez o de cizalla) constantes de Lamé respectivamente, y están en función de:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots\dots(3)$$

$$G = \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(4)$$

Siendo K (módulo de volumen o de incompresibilidad) que está en

función de:  $k = \frac{\lambda}{2(\lambda+G)} \dots\dots\dots(5)$

Velocidad de Onda R ( $V_r$ ):

$$V_r = K^2 V_s = \left(\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}\right)^2 \left(\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}\right) \dots\dots\dots(6)$$

$$V_r = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} V_s = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \left(\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}\right) = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \left(\sqrt{\frac{G}{\rho}}\right) \dots\dots\dots(7)$$

La velocidad de las ondas Rayleigh es directamente proporcional al de las ondas S, por lo que su velocidad se puede relacionar a  $V_r = 0.92V_s$  (Achenbach, 1975).

Conociendo las celeridades de los tres tipos de ondas fundamentales, puede predecirse fácilmente qué ondas llegarán a un punto dado suficientemente alejado del punto donde se produce la perturbación ([IGME], p. 27).

#### 2.1.3.4. Distribución de Energía en las Ondas

La estimación de la combinación del contenido de energía de las ondas P, S y R puede ayudar a predecir el potencial de daño. Fleetwood (2010) cita a Miller y Pursey (1955) quienes investigaron la distribución de la fuente de energía en los tipos de onda generados por una fuente sísmica de compresión oscilante no explosiva en medio espacio; resumen en las ecuaciones mostradas en la figura 37, el desglose de la energía de onda teórica o el trabajo realizado por cada tipo de onda como resultado de la fuente “W” (pp. 57-58).

$$W = W_c + W_{sh} + W_{sw} = 4.836 \left( \frac{\pi^3 v^2 a^4 P_0^2}{\rho V_c^3} \right)$$

$$W_c = 0.333 \left( \frac{\pi^3 v^2 a^4 P_0^2}{\rho V_c^3} \right)$$

$$W_{sh} = 1.246 \left( \frac{\pi^3 v^2 a^4 P_0^2}{\rho V_c^3} \right)$$

$$W_{sw} = 3.257 \left( \frac{\pi^3 v^2 a^4 P_0^2}{\rho V_c^3} \right)$$

Where

- $W_c$  = Power (energy) radiated in the compression wave
- $W_{sh}$  = Power radiated in the shear wave
- $W_{sw}$  = Power radiated in the surface (Rayleigh) wave
- $v$  = frequency of vibration
- $a$  = area of the circular plate source
- $P_0$  = initial stress factor related to the input source
- $\rho$  = density of the medium
- $V_c$  = compression wave velocity of the material

Figura 37. Ecuaciones de la Energía en las Ondas. Fuente: Fleetwood (2010).

Fleetwood (2010) cita a Woods (1968), quien ilustró gráficamente esta distribución de energía (figura 38), donde se aprecia también que las ondas sísmicas viajan en diferentes patrones (Onda P y S con patrón semiesférica, y onda R con patrón cilíndrico) y su distribución de energía de cada Onda.

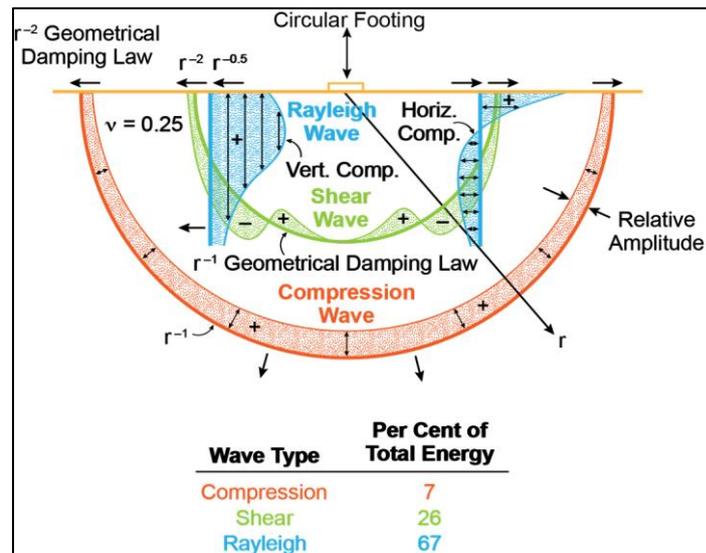
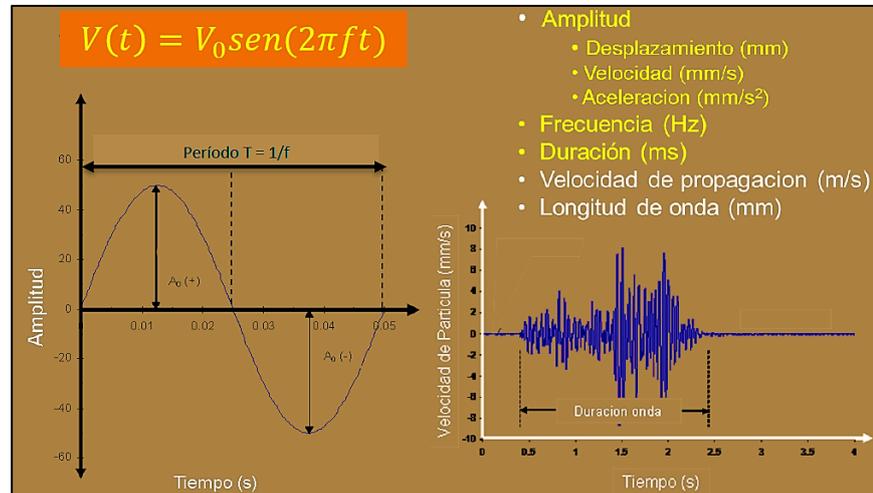


Figura 38. Distribución de la energía por tipo de ondas a partir de una fuerza normal aplicada cerca de la superficie según Woods (1968). Fuente: Fleetwood (2010).

### 2.1.3.5. Principales Componentes de una Onda de Vibración por Voladura

Según Kramer (1996), las principales características de las vibraciones son: la amplitud (expresada por el desplazamiento, velocidad y aceleración de las ondas), la frecuencia y la duración. Investigaciones emprendidas en diversos países son concordantes en admitir que los daños estructurales se correlacionan con la amplitud de las ondas sísmicas y que entre los parámetros físicos más representativos es la velocidad de vibración de partículas, véase figuras 39. Otras investigaciones realizadas demuestran que la afección transigente y permanente, son función inversa de la

frecuencia. Así, por ejemplo, una residencia es menos afectada por una vibración de velocidad pico a una frecuencia de 80 Hz, a comparación de una frecuencia de 10 Hz (Dowding, 1985).



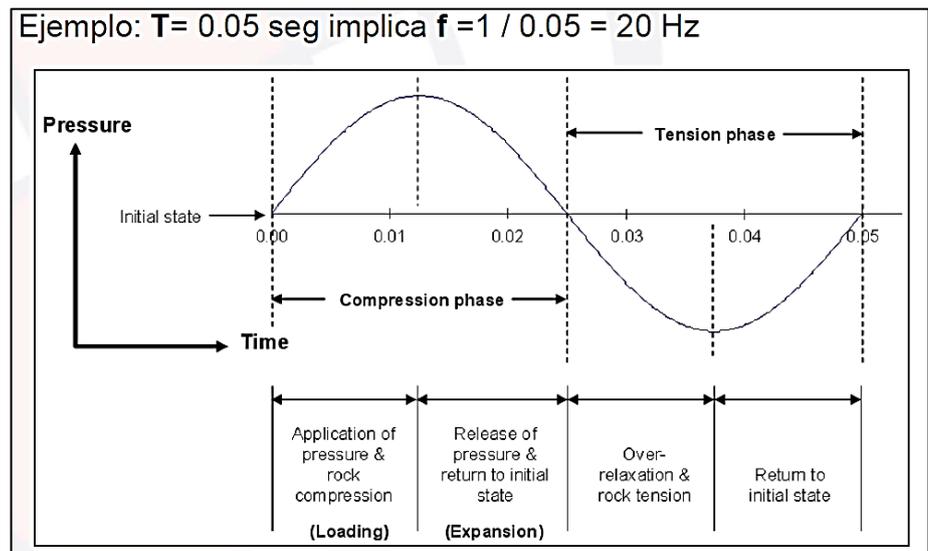
**Figura 39.** Principales Componentes de una Onda. Fuente: Geoblast (2018).

Las características del movimiento del suelo se pueden medir de varias maneras: Desplazamiento de partículas, velocidad de partícula, aceleración de partículas y frecuencia de vibración:

❖ **Amplitud (A):** Es el máximo nivel de esfuerzo a la cual el medio es expuesto (relacionado al movimiento de partículas individuales sujetas a esfuerzos). Es medida como velocidad de partícula, y es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca. La amplitud se puede relacionar también a desplazamiento y aceleración de partículas (GEOBLAST, 2018).

❖ **Frecuencia (F):** Es el número de veces por segundo que una partícula se desplaza hacia delante y atrás (completa un ciclo de compresión y tensión) y es medida en ciclos por segundo (Hz); se calcula relacionándolo con el periodo:  $f=1/T$  (GEOBLAST, 2018).

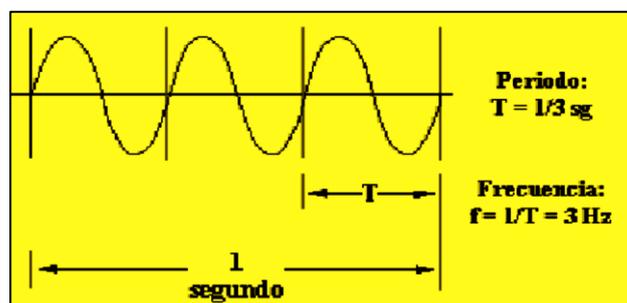
Véase figura 40.



**Figura 40.** Ejemplo de Cálculo de Frecuencia. Fuente: (GEOBLAST, 2018).

❖ **Duración de la Onda:** Es tiempo total que el medio está expuesto a la vibración, y depende de la duración de la voladura y de la distancia del punto de monitoreo a la voladura (GEOBLAST, 2018).

❖ **Periodo (T):** Es el tiempo que demora la onda (perturbación) en recorrer un espacio igual a la longitud de onda; es decir, es el tiempo en dar una vuelta o ciclo (GEOBLAST, 2018). Lo podemos expresar como:  $T=1/ f$  (véase figura 41).

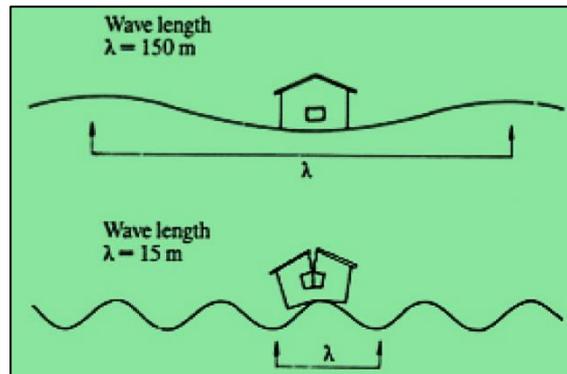


**Figura 41.** Cálculo de Periodo. Fuente: (ENAEX S.A., 2011).

❖ **Longitud de Onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia que viaja la onda en un ciclo completo de compresión y tensión, definida por la ecuación:

$$\lambda = \frac{V_{(p,s)}}{f} = V_{(p,s)} \times T, \text{ expresado en metros (GEOBLAST, 2018).}$$

La figura 42 ilustra un evento con onda sísmica de alta velocidad que produce una longitud de onda más larga y una onda de la misma frecuencia pero que viaja a menor velocidad. Si la longitud de la onda es corta, el riesgo de daños causados es mayor ya que está sujeto a un tipo de movimiento diferente.



**Figura 42.** El efecto de la Longitud de Onda y el Riesgo de Daños. Fuente: Copyright Sandvik Tamrock Corp. (1999).

❖ **Velocidad de propagación (V):** La velocidad es una medida de cuán lejos se mueve el punto de interés en un período de tiempo determinado; generalmente expresado en milímetros por segundo (mm/s). La velocidad por sí sola no causa daño. Una casa, un automóvil o una persona puede soportar altas velocidades sin daños; vemos esto cada vez que volamos en un avión de pasajeros (ORICA MINING SERVICES, p. 2). Es definida mediante la siguiente ecuación:  $V(t)=A_0*\text{Seno}(2\pi ft)$ .

❖ **Aceleración (a):** Es una medida de la rapidez con que el punto de interés cambia la velocidad durante un período de tiempo determinado. Esto generalmente se expresa en milímetros por segundo al cuadrado ( $\text{mm/s}^2$ ), o como un múltiplo de la aceleración gravitacional ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) o "g". La aceleración por sí sola no necesariamente causa daños, pero la aceleración diferencial entre

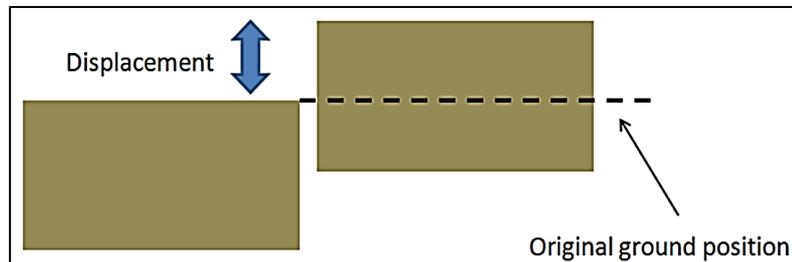
objetos o estructuras puede crear tensiones y tensiones dinámicas, causando daños (ORICA MINING SERVICES, p. 2).

Se puede calcular con la siguiente ecuación:  $a(t) = A_0 \cdot \text{Sen}(2\pi ft)$   
 $= 2 \pi f V(t)$ .

❖ **Desplazamiento (D):** Es la distancia que una partícula se mueve desde un punto de reposo. Se mide en milímetros (mm). El desplazamiento por sí solo no causa daños; tiene que estar sujeta a tensión, es decir el desplazamiento diferencial (tensión) es lo que finalmente causa daño (ORICA MINING SERVICES, p. 2).

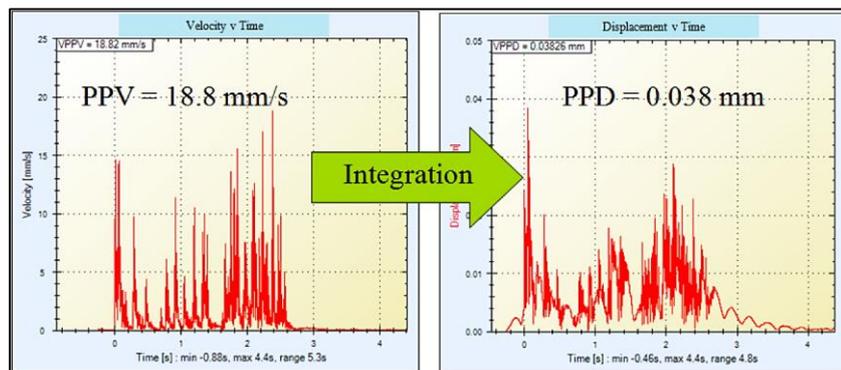
Se puede calcular el desplazamiento de partícula, mediante la siguiente ecuación:  $D(t) = A \times (2\pi ft) = \frac{V}{2\pi f}$  .....(8)

La figura 43 ilustra el desplazamiento de una partícula.



**Figura 43.** Grafica representativa del desplazamiento. Fuente: www.oricaminingservices.com | Document reference: 20028.

Al integrar la velocidad pico partícula obtenemos el desplazamiento de la partícula, como se ve en la figura 44 (GEOBLAST, 2018).

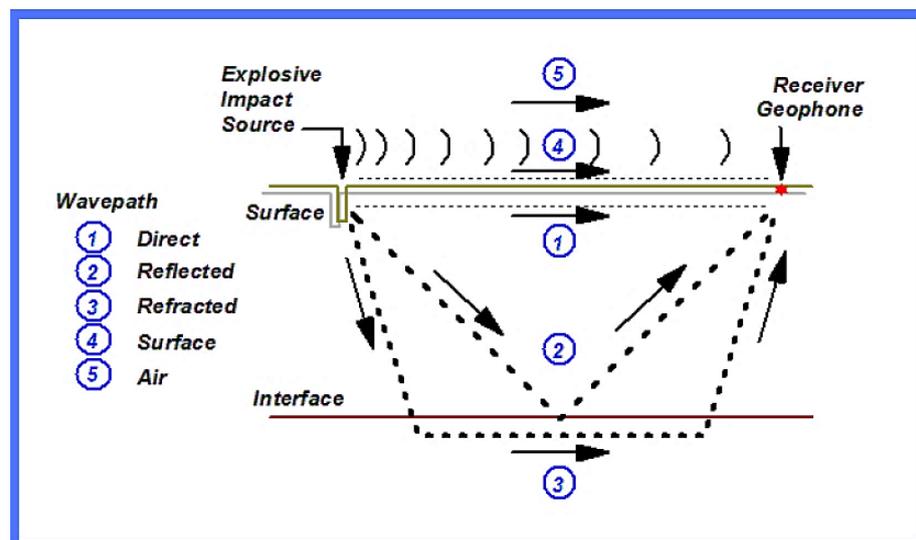


**Figura 44.** Integración de la Velocidad a lo Largo del Tiempo en el Desplazamiento. Fuente: ORICA MINING SERVICES.

### 2.1.3.6. Dirección de las Vibraciones por Voladura en el Terreno

Parte de la energía liberada por una explosión se propaga en todas las direcciones desde el taladro como ondas sísmicas con diferentes frecuencias y, por lo tanto, se amortigua por la distancia. Las ondas con altas frecuencias se amortiguan más rápidamente que las que tienen menor frecuencia. Las frecuencias más altas dominan a distancias cortas, mientras que las ondas con frecuencias más bajas dominan a una distancia más larga entre la explosión y los puntos de medición. La amplitud de la onda sísmica depende principalmente de la cantidad de cargas operantes, las condiciones de la roca, la distancia desde el sitio de la explosión y la geología del terreno que cubren. Además, el confinamiento es un factor al que a menudo se hace referencia (Niklasson, Olsson, & Beyglou, 2014, p. 7).

En la figura 45 se ilustra las diferentes formas en que las ondas pueden llegar a un punto. Otros factores son la carga y el espaciado, el tipo y el peso de los explosivos, el confinamiento y la sobrecarga (Richard, 2009, p. 3).



**Figura 45.** Ilustración de Ondas Sísmicas y de Aire Producida a Partir de un Impacto Explosivo (Según Chiappetta RF 1981). Fuente: [http://rpq.eu.com/pdfs/ground\\_vibrations.pdf](http://rpq.eu.com/pdfs/ground_vibrations.pdf)

En la figura 46 se aprecia los tipos de ondas que se generan en la detonación en un taladro y que son registradas por el geófono.

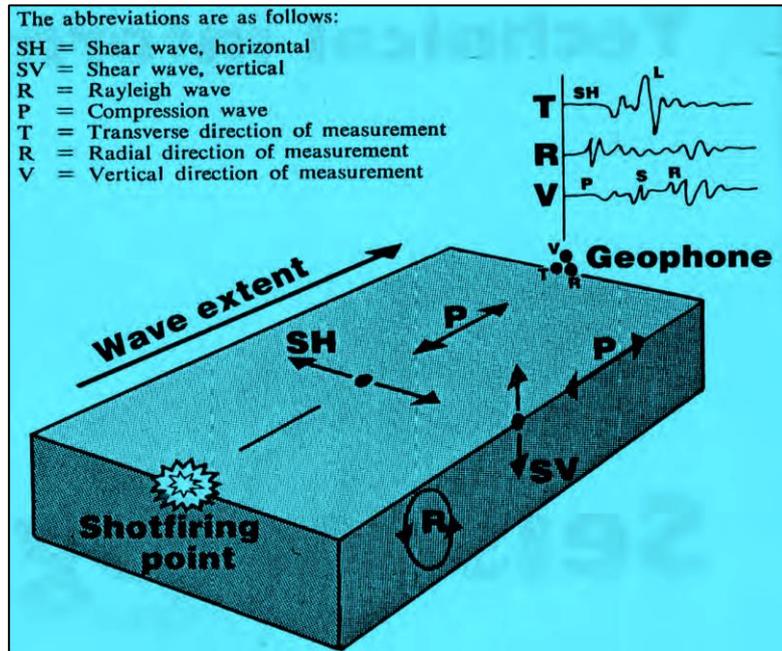


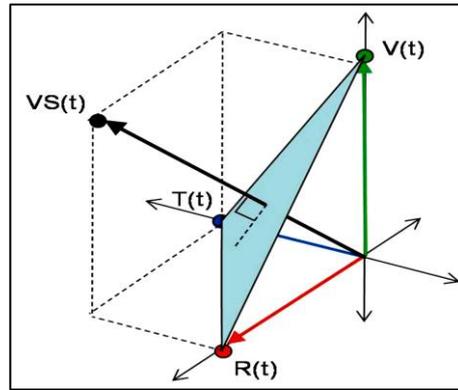
Figura 46. Ondas que se Generan al Momento de la Detonación de un taladro. Fuente: ISEE.

El movimiento de partículas medido resultante puede definirse por una longitud (amplitud) y dirección del vector basadas en las amplitudes y orientaciones medidas de los ejes del transductor. El movimiento de partículas de suma de vectores en el dominio del tiempo “VS (t)” se calcula utilizando la ecuación 8.

$$VS(t) = \sqrt{(R(t))^2 + T(t)^2 + V(t)^2} \dots\dots\dots(9)$$

Dónde: **R(t)** es la componente radial, **T(t)** es la componente transversal y **V(t)** es la componente vertical en el dominio del tiempo.

En la figura 47, se muestra la dirección del vector suma que representa un vector normal al plano que contiene los tres componentes para valores distintos de cero en los tres ejes (Fleetwood, 2010, pp. 69-70).



**Figura 47.** Ilustración del vector suma y sus componentes vectoriales. Fuente: (Fleetwood, 2010, pp. 69-70).

### 2.1.3.7. Atenuación de la Onda

Cabe mencionar que el macizo rocoso atenúa la onda. La intensidad de la atenuación dependerá de factores tales como: la cantidad de grietas o fracturas y el módulo de deformación de la roca. Las rocas con un bajo módulo tienden a presentar una deformación plástica, resultando en una gran pérdida de energía, mientras que rocas con un alto módulo se comportan de manera elástica, removiendo pequeñas cantidades de energía al paso de la onda (Bravo Sánchez, 2018, p. 25).

Según Barkan (1962), se distinguen así dos tipos de atenuación:

➤ **Atenuación geométrica:** En medios homogéneos, elásticos e isótropos, la amplitud de una onda vibracional disminuye a medida que avanza a través del macizo rocoso (se atenúan inversamente proporcional a la distancia de la fuente sísmica), y se puede calcular con la relación:  $FAG = I/(Rxn)$ .

Donde, **FAG:** es el Factor de atenuación geométrica de la onda, **R:** es la Distancia entre el punto de la perturbación y el de recepción (m), y **n:** es la Constante que depende del medio en que se propaga la onda.

➤ **Atenuación inelástica:** Debido a que el macizo rocoso no se comporta como un medio homogéneo, elástico e isotrópico, las ondas al encontrarse con estructuras inelásticas pierden parte de la energía mecánica transferida por la onda a la roca. El factor de atenuación inelástica está definido por  $FAI = \exp(-I \times R)$ .

Donde, **FAI:** es el Factor de atenuación inelástica de la onda, **R:** es la Distancia entre el punto de la perturbación y el de recepción (m), y **I:** es el coeficiente de atenuación de la onda.

En síntesis, en la tabla 9, se resume la influencia de mecanismos de atenuación de energía (Moraga Hidalgo, 2018, p. 70).

**Tabla 9.**

*Resumen sobre influencia de mecanismos de atenuación de energía.*

Mecanismo de atenuación		Influencia sobre la atenuación del PPV
Atenuación geométrica		PPV disminuye de manera exponencial con respecto a la distancia del foco emisor de energía.
	Litología.Alteración	Mineralogía y textura determinan fricción en matriz rocosa
Atenuación friccional y dispersión en el espacio	Grado de fracturamiento	Mayor grado de fracturamiento aumenta la pérdida por fricción en discontinuidades y dispersión de la energía en el espacio.
	Presencia de agua	Saturación de agua aumenta pérdida de energía.
	Discontinuidades mayores	Atenuación está controlada por el espesor, orientación, tipo de relleno y espectro de frecuencia de la onda.

**Fuente:** Moraga Hidalgo (2018, p. 70).

### 2.1.3.8. Daño por Voladura en Taludes

Tovar Lloclla (2015), nos describe que el daño inducido por voladura es todo cambio que reduce las propiedades resistentes del macizo rocoso como material físico, causado por tres mecanismos:

- a) A través de la generación de nuevas fracturas al ser superada la resistencia dinámica de la roca.
- b) Por extensión y apertura de fracturas existentes debido a una excesiva presión de gases.

c) Al provocar inestabilidad de un mecanismo de falla (falla plana, cuña, vuelco, deslizamiento circular, etc) que en condiciones estáticas era estable.

La importancia de cada uno de ellos depende de la distancia de la zona afectada con respecto a la secuencia de voladura, en ese sentido, es común que se evalúe el daño en dos campos (p.29).

Partiendo bajo la premisa de que la vibración es un esfuerzo que induce fracturamiento, se puede relacionar a que la vibración presente dentro de la malla volada impacta en el resultado de la fragmentación y a la vibración que se desplaza fuera de la voladura impacta como daño, como se ilustra el en la figura 48 y líneas abajo.

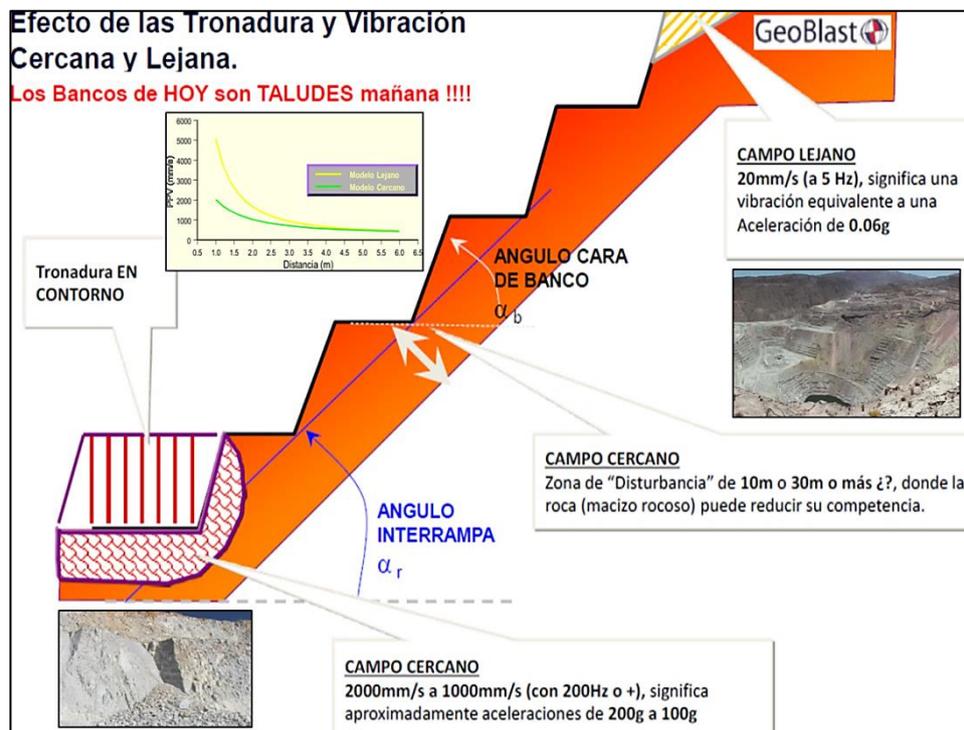
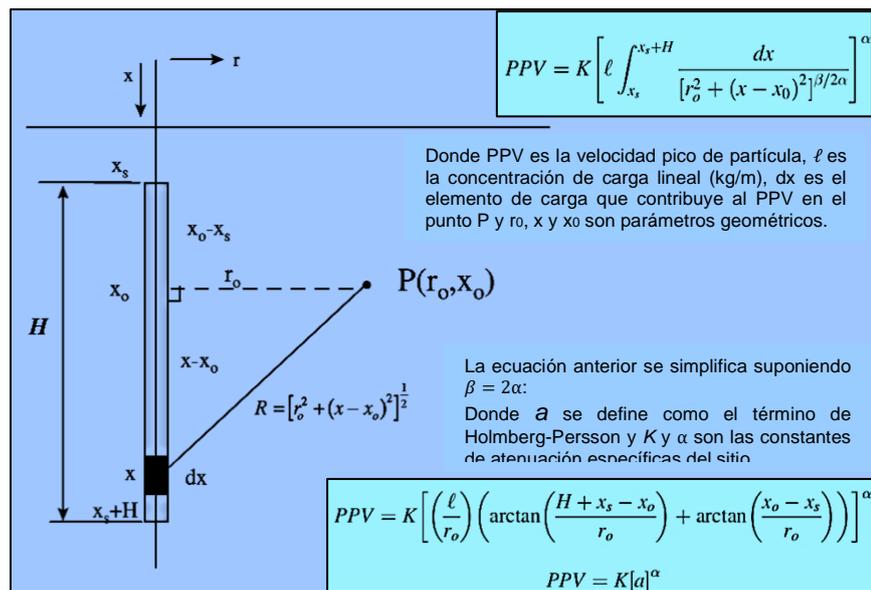


Figura 48. Impacto de Vibraciones a Campo Cercano y Lejano. Fuente: (GEOBLAST, 2019).

❖ **Daño en campo cercano**, considerados para monitoreos a una distancia menor a 5 veces la longitud de la carga explosiva (menores a 50.0 metros), y el modelo más empleado es el propuesto por

Holmberg & Persson (H&P), que indica que “la onda sísmica se desplaza en el macizo rocoso en una forma elíptica, decreciendo (atenuándose) en la distancia y que el daño en el entorno al taladro cargado, es la resultante del quiebre en este entorno elástico y homogéneo del medio en el que se trasmite”, como se puede ver en la figura 49 (Tovar Lloclla, 2015, p. 29).



**Figura 49.** Diagrama esquemático de los parámetros de Holmberg & Persson para modelar la atenuación de velocidad pico partícula. Fuente: Tovar Lloclla (2015).

El factor que tiene el mayor impacto en la vibración pico (VPP) es la carga lineal, que se controla por una combinación de diámetro del taladro y densidad de carga. Este modelo no considera el tamaño de la voladura ni la influencia de la secuencia, ni retardos. Asimismo, no contempla el grado de confinamiento del explosivo. Luego, los resultados que se obtienen a través del modelo serán superiores a los encontrados en terreno (ORICA MINING SERVICES, 2010). Basado en los estudios de Holmberg (1993) & Persson et al. (1997), el fenómeno de daño resulta de inducir deformación por una onda uní axial, que, para un medio elástico, descrito por la ecuación 9.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \geq \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_p} \Rightarrow VPP_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma \times V_p}{E} \dots\dots\dots(9)$$

Con  $\varepsilon$ : deformación inducida,  $\sigma$ : esfuerzo generado,  $E$ : módulo de Young,  $V_{m\acute{a}x}$ : la velocidad de partícula crítica (VPP máx), y  $V_p$ : la velocidad de la onda P de la roca.

❖ **Daño en campo lejano:** Referidos por McKenzie (1994) para distancias mayores a 5 veces la longitud de la carga explosiva, zonas donde se requiere controlar el daño a estructuras producido por las vibraciones y se debe tener en cuenta que **las pérdidas friccionales de la energía vibracional** en un medio no elástico a medida que se aleja de la fuente por ejemplo en rocas competentes de módulos altos presentan una baja fricción interna y se puede aproximar al comportamiento elástico, al decrecer la competencia y los módulos de la roca, las pérdidas friccionales aumentan lo que atenúa la energía vibracional; y por otro lado la propagación geométrica del frente de la onda que se expande, la cual a una distancia muy cercana del taladro es plana a medida que se aleja se torna cilíndrica y finalmente esférica (campo lejano). Este modelo nos permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones en campo, donde se deben obtener principalmente tres antecedentes: El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga explosivo, La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones y La distancia de la carga al punto de medición del nivel de vibraciones.

*“Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto es el de DEVINE&DUVALL puesto*

que, al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga” (CINTEX, 2006, pág. 71).

Para estimar el nivel de vibración PPV (velocidad pico partícula) a campo lejano, a cualquier distancia “d” desde una voladura que contiene un peso de explosivo “W” hasta el punto de monitoreo, se usa una ecuación (10) de carga escalar:

$$PPV = K \times d^{\alpha} \times W^{-\beta} \dots\dots\dots(10)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  (Factores de decaimiento o atenuación de la roca por sus características geológicas), y K (intercepto, controlado principalmente por características del explosivo, por características de la malla disparada, etc) son constantes específicas del lugar (in situ) que se determinan por regresión lineal.

Devine y Duvall para su modelo de campo lejano establecen  $\alpha=2\beta$ , por lo que la ecuación 10 se simplifica a:

$$PPV = K \times \left(\frac{d}{\sqrt{W}}\right)^{\alpha} \dots\dots\dots (11)$$

Para determinar el modelo, se puede tomar logaritmos de la ecuación y ajustar una recta por mínimos cuadrado para obtener diferentes valores de amplitud, de los cuales se identifican las diferentes cargas que lo generaron y las distancias de las cargas al punto de medición; como se puede apreciar en la figura 50 (ENAEX S.A., 2011).

GEOBLAST (2019) refiere que una vez determinadas las ecuaciones de vibraciones se ajustan estas a modo de establecer un modelo representativo y confiable; este ajuste consiste en desplazar paralelamente el modelo obtenido, de modo que cubra un mayor

número de puntos recogidos en terreno en rangos que oscilan entre un 80% y 95% de confiabilidad y adoptar así un factor de seguridad. El proceso de ajuste no significa cambiar los valores de los datos recogidos en terreno, sino darles una interpretación estadística más conservadora y por lo tanto más segura.

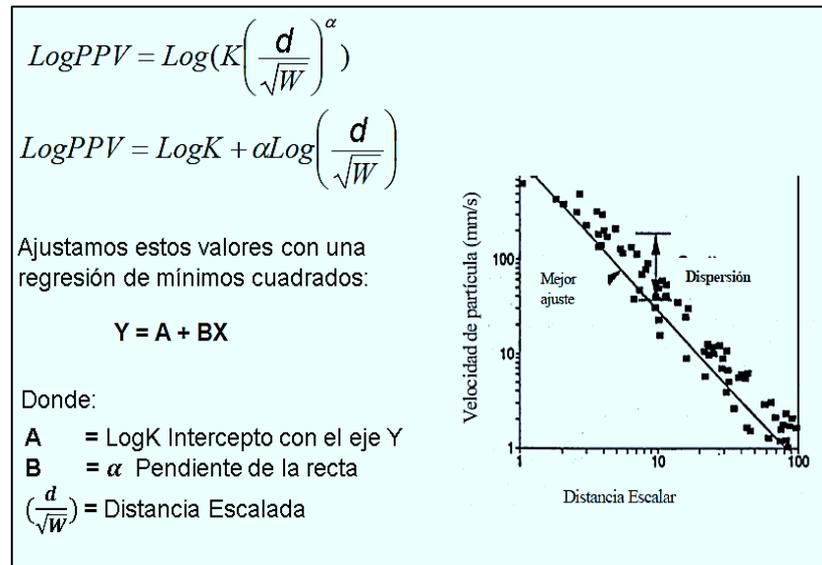


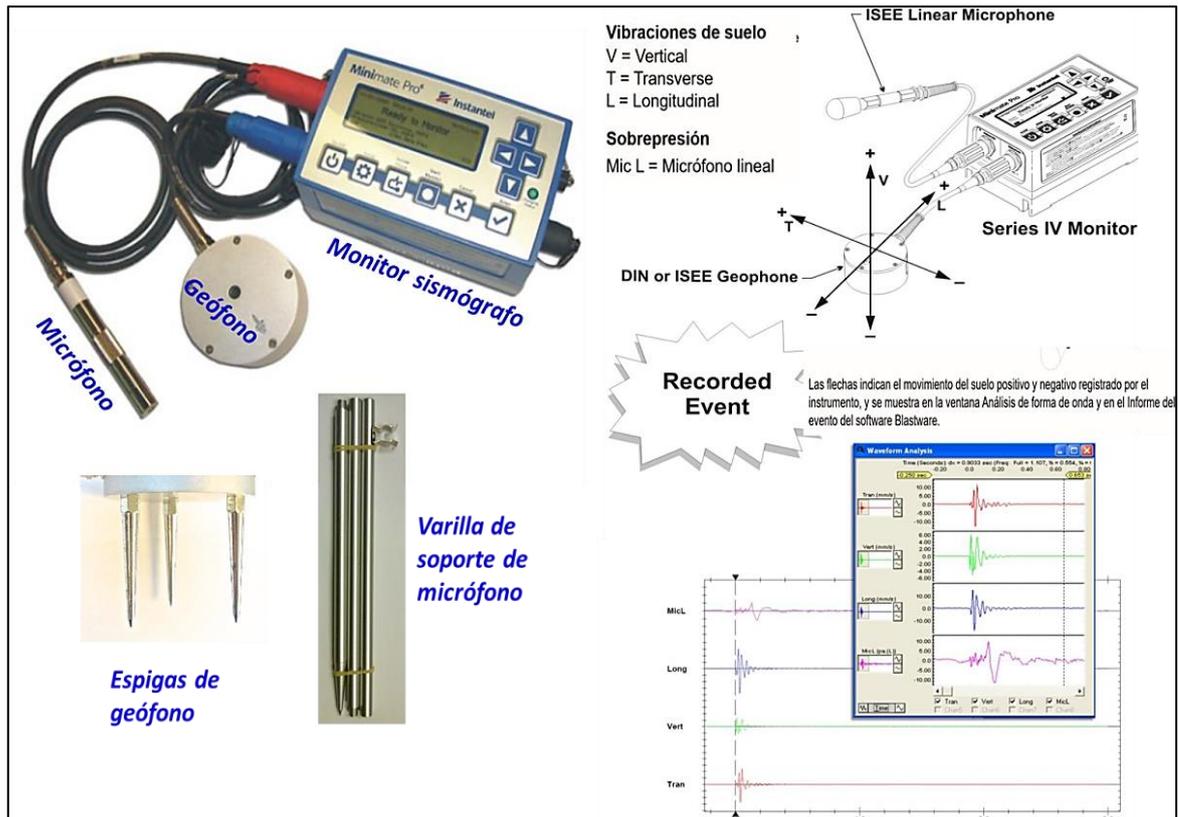
Figura 50. Ajuste para Modelo de Vibraciones a Campo Lejano. Fuente: (DynoConsult, 2006).

### 2.1.3.9. Monitoreo y Análisis de las vibraciones

#### a) Equipos de Medida de las Vibraciones por Voladura

Para el monitoreo de vibraciones por voladuras se usan equipos denominados sismógrafos que constan de los siguientes componentes (véase figura 51):

- ❖ Una serie de sensores o elementos para captar el ruido y las vibraciones del terreno transformándolos en impulsos eléctricos (micrófonos y geófonos).
- ❖ Un módulo de memoria para el almacenamiento de datos
- ❖ Accesorios adicionales: 03 espigas para empotrar geófono y una varilla de soporte de micrófono (INSTANTEL, 2017).

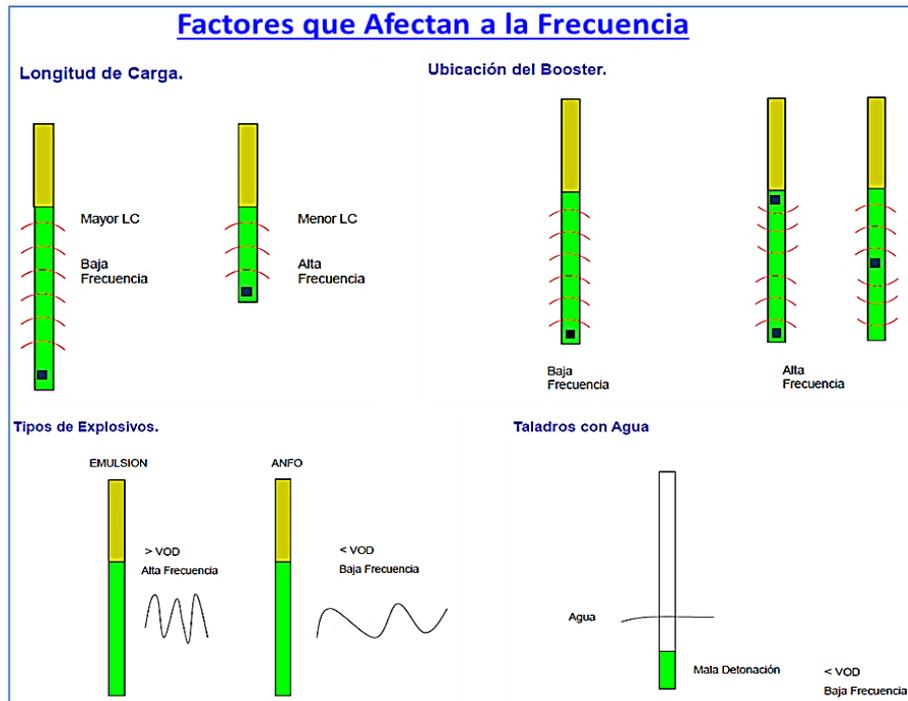


**Figura 51.** Equipo de Medición de Vibraciones. Fuente: Diseño Propio, adaptada de INSTANTEL (2017).

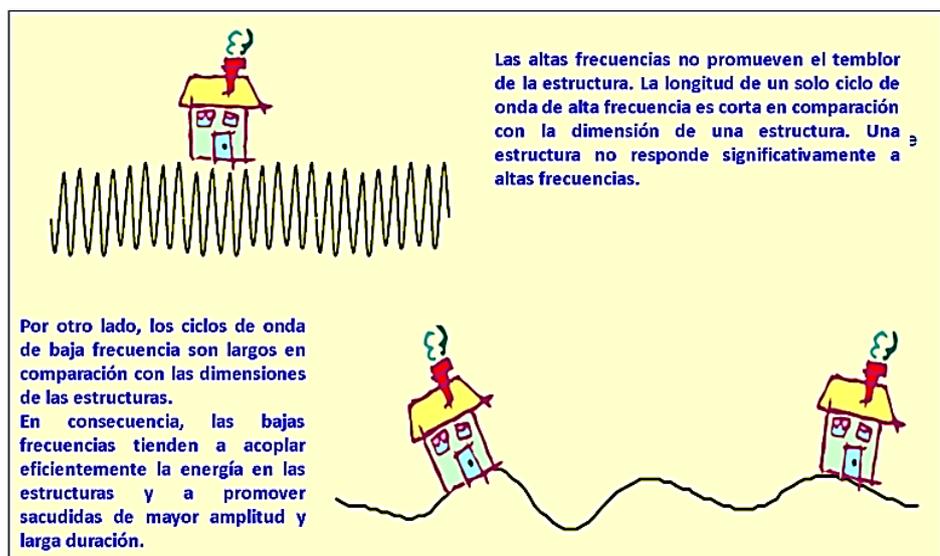
La forma de fijación de estos aparatos al terreno dependerá lógicamente de la superficie de fijación y de la magnitud esperable del movimiento (véase anexos 10 y 11).

### b) Análisis de Frecuencias

Para el análisis de frecuencias se debe tener algunas consideraciones, como son: cada componente sinusoidal de las ondas, tienen su propia frecuencia característica, la frecuencia de las vibraciones cercanas a un taladro de 10m de carga está en el rango de (1/0.008) a (1/0.014), es decir entre 125Hz a 70Hz, dependiendo del módulo de la roca, similarmente, la frecuencia de vibraciones muy cercanas a cargas de 2m de largo oscila en un rango de 250Hz a 500Hz (GEOBLAST, 2018). Véase figuras 51 y 52.



**Figura 52.** Factores que Afectan a la Frecuencia. Fuente: (ORICA MINING SERVICES, 2010).



**Figura 53.** Esquema de Altas y Bajas Frecuencias. Fuente: OSMRE (2017).

Amick (1999) señala que las vibraciones de una frecuencia más alta decaen más rápido que las de una frecuencia más baja.

### 2.1.3.10. Normativas de control de vibraciones

Existen normas en cada país, que han adoptado según sus características antrópicas o del carácter nacional, sin embargo, todas son parecidas en cuanto a que:

- a) Consideran varios tipos de estructuras habitacionales, según el nivel de resistencia a priori y excluyen estructuras especiales tal como túneles, puentes, presas, etc. que son más resistentes, pero requieren estudios especiales cuando las explosiones se hacen muy cerca.
- b) Se varía la velocidad de vibración límite respecto de la frecuencia, de forma directamente proporcional a la misma.
- c) Se establecen criterios de cálculo de la frecuencia dominante basados en el análisis FFT de los registros de vibraciones.

Los estudios de registro y control de vibraciones se realizan para cumplir una normativa particular que en realidad es un criterio de prevención de daños relacionados con estructuras próximas que puedan verse afectadas. La tabla 10 muestra algunas de las normativas internacionales (Pérez Cosío, 2019, p. 70)

**Tabla 10.**

*Normativas Internacionales Sobre Control de Vibraciones.*

<b>País</b>	<b>Normativa</b>
Alemania	DIN 1450 (1999a, b)
Brasil	CETESB D7.013 (1992)
Escocia	PAN50 (2000)
Estados	USBM RI8507 (1980)
España	UNE 22.281/93
India	IS-6922 (1973)
Internacional	ISO 4866 (1990)
Italia	UNI 9914 (1990)
Nueva	NZS 4403 (1976)
Portugal	NP2074 (2004)
Reino	BS 7385 (1993)
Suecia	SS 460 48 46 (1989)
Suiza	SN 640 312a

Fuente: (Pérez Cosío, 2019, p. 70)

En la mina Cuajone los registros de vibraciones de las voladuras se comparan con la norma U. S. Bureau of Mines (USBM

RI 8507, 1980), sin embargo, para el presente estudio usaremos la Norma UNE 22.381.93 (norma española) que es más riguroso en cuanto a daño de estructuras.

❖ **Norma Española UNE (22-381-93)**

Pérez Cosío (2019, p. 70), manifiesta que la Norma Española UNE 22-381-93, es la norma que controla todo lo que tiene que ver con la utilización de explosivos en España, esta norma se apoya en la norma Alemana DIN 4150 ya que antes de esta norma era la alemana que se aplicaba en España. Esta norma se ejecuta en todos los trabajos que se lleve a cabo la utilización de explosivos como eje central de la actividad, dentro de estos tipos de trabajos tenemos: minería, obras de carreteras, demolición de edificios, remoción de terreno a gran escala etc. Como ya es sabido la norma UNE 22-381 nos presenta una clasificación de las estructuras, las cuales son:

- i) Grupo I: Edificios y naves industriales
- ii) Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreación, edificios de estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no representan sensibilidad a vibraciones sísmicas.
- iii) Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que si presentan debilidad contra vibraciones sísmicas.

En tabla 11 se observa los valores máximos para la seguridad de la estructura en función del tipo de estructura que se vea afectada por las vibraciones, por lo que se entiende que la vibración no podrá exceder la velocidad (De Los Santos Batista, 2016, p. 70).

**Tabla 11.**

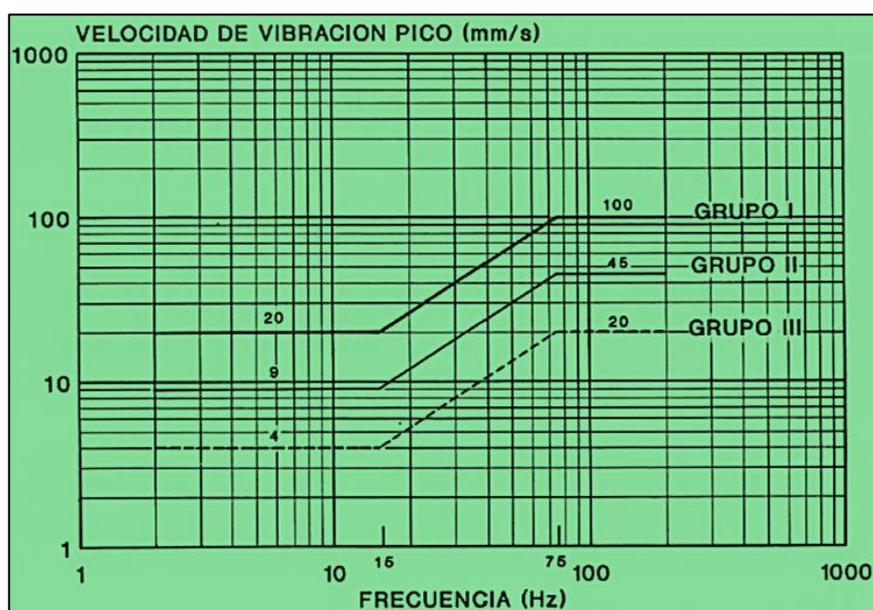
*Criterio de Prevención de Daño Norma UNE22-381.*

UNE 22-381		2 - 15 HZ	15 - 75 HZ	>75 HZ
		Velocidad	Desplazamiento	Velocidad
		mm/s	mm/s	mm/s
Tipo de Estructura	I	20	0,212	100
	II	9	0,095	45
	III	4	0,042	20

Fuente: (De Los Santos Batista, 2016).

En la tabla 11 nos explica claramente cómo van las velocidades, pero tal como expone la norma, se puede notar que en las frecuencias que van de 15Hz a 75 Hz hay que calcular la velocidad en función del desplazamiento.

En la figura 54 podemos observar que se muestra la relación de la frecuencia con la velocidad pico según la norma UNE 22-381, dependiendo del tipo de frecuencia y su velocidad también podremos saber si cumple con el requisito para el grupo de edificio que se encuentra cerca (De Los Santos Batista, 2016, p. 71-72).



**Figura 54.** Límites del criterio de prevención de daños de la norma española.  
Fuente: (De Los Santos Batista, 2016).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. EL PROBLEMA**

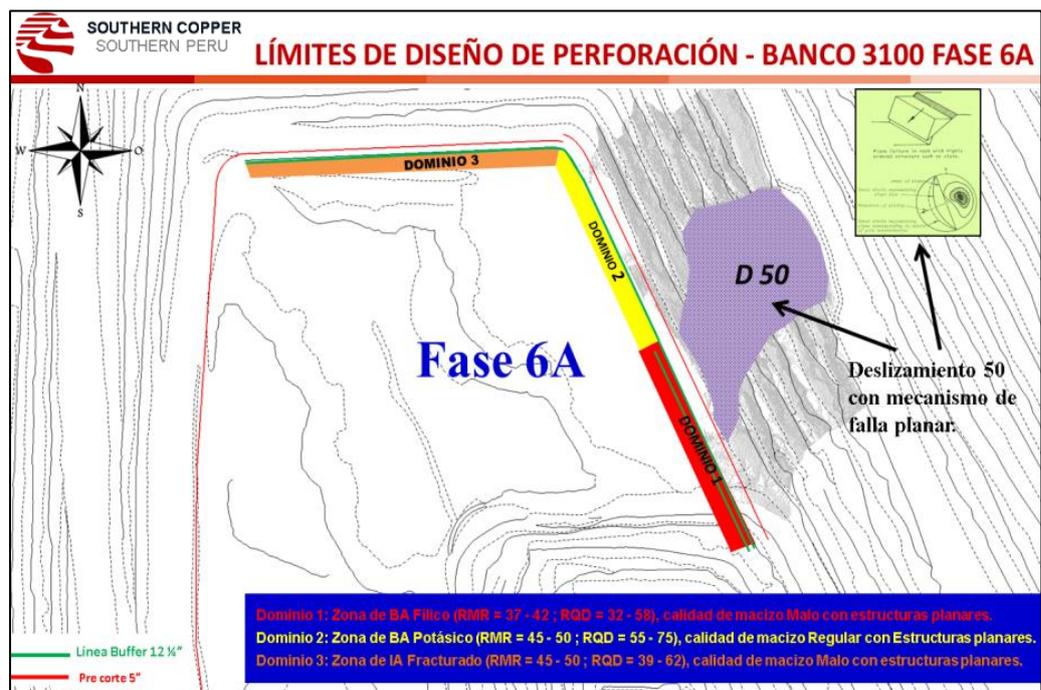
##### **3.1.1. Descripción De La Realidad Problemática**

La Unidad Minera Cuajone de SPCC, viene profundizando su tajo para poder extraer sus reservas probadas de mineral de mayor ley; y en ese proceso se han presentado diferentes condiciones adversas de taludes inestables, generadas por las vibraciones de voladuras quizá en campo cercano (voladuras a menos de 50 m.) o en el campo lejano (voladuras a más de 50 m.) que retrasan y/o modifican el plan de minado; por la cual el proceso de voladura es la más involucrada y quizá criticada en la actividad minera, y su ejecución debe ser tan intachable para no tener consecuencias adversas en todo el proceso de la mina. Los tiempos de retardos entre taladros

empleados en los diseños de amarre en zonas de mineral varía de 6ms hasta 9ms y en desmonte de 7ms hasta 14ms, y en el monitoreo de vibraciones en el campo medio y campo lejano (distancias que van desde 50.0 metros hasta 800.0 metros) de las voladuras ejecutadas con esos retardos, se han obtenido algunos registros de velocidad pico partícula (VPP) que superan los límites permisibles, pero con frecuencias dominantes muy bajas.

J. Accinelli (comunicación personal, 15 de octubre, 2017) esas frecuencias dominantes bajas generan esfuerzos más energéticos en los taludes, incrementando el daño asociado a esfuerzos post voladura mediante el desplazamiento de estructuras.

La zona de estudio son los taludes de la fase 6A lado Este, que tiene roca andesita basáltica fílica y potásica, y andesita intrusiva fílica, que pertenecen a la UGB 06, 07 y 10, y dominios estructurales 1, 2 y 3, donde se ha generado la zona inestable D50 que es una estructura de falla planar, véase la figura 55.



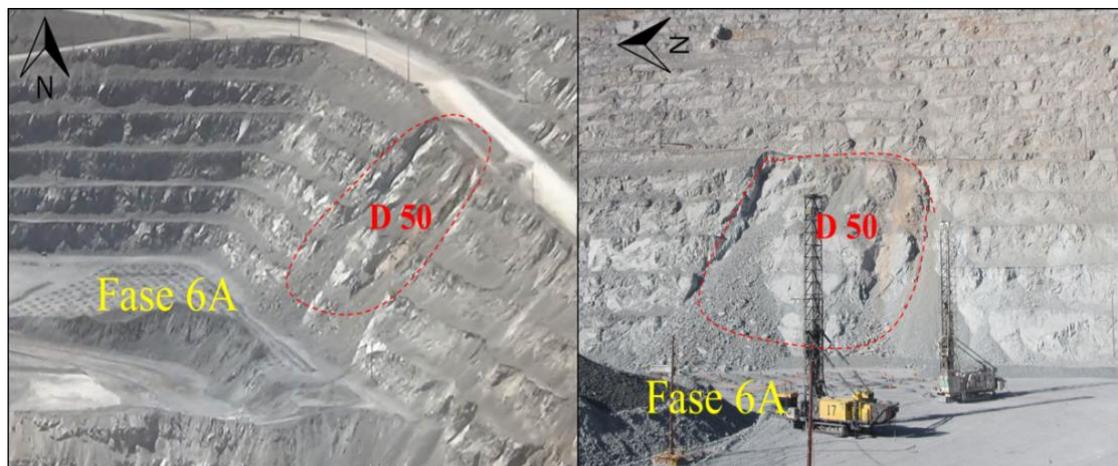
**Figura 55.** Muestra los Dominios Estructurales Cercanos al Deslizamiento 50 en Fase 6A.  
 Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017).

### 3.1.2. Planteamiento y formulación del problema

#### Identificación y Selección Del Problema

Algunas voladuras en terrenos no favorables están generando impacto negativo hacia las paredes de taludes de la fase 6A lado este, que finalmente se traduce en generación e incremento del Deslizamiento 50, generando condiciones inseguras, retrasos y cambios en el plan de minado, véase la figura 56.

Las voladuras generan movimientos sísmicos de partículas que llevan energía, y se mueven en todas direcciones y con mayor intensidad a la dirección de la patada de la voladura, y el empleo de tiempos de retardos cortos en terrenos desfavorables generan superposición de ondas sísmicas en un determinado espacio y en un determinado tiempo, y la carga operante estática se suma, es decir se tornan en carga operante dinámicas, incrementando las velocidades pico partículas, generando finalmente mayor daño a los taludes de la fase 6A. La intensidad del daño se verá afectada más aún si las frecuencias dominantes a campo lejano son bajas incrementando el desplazamiento de partículas (J. Accinelli, comunicación personal, 15 de octubre, 2017).



**Figura 56.** Fotografía de la Fase 6A Este y el Deslizamiento 50. Fuente: Diseño Propio.

## **Formulación Del Problema**

### **Problema Principal**

¿El control de vibraciones por voladura minimizará los efectos de daño en la mina Cuajone - Southern Perú Copper Corporation, en el año 2017?

### **Problemas Secundarios**

- ¿De qué manera se minimiza los efectos de daño por voladura en las paredes del talud de Fase 6A Este de la mina Cuajone, con el análisis de los registros sísmicos tomados a diferentes distancias del punto de inicio?
- ¿Cómo se determina el máximo valor del desplazamiento de partícula y las frecuencias dominantes que generan daño para reducir los efectos asociados a esfuerzos post voladuras de la mina Cuajone- Southern Perú, en el año 2017?
- ¿De qué manera se reduce las vibraciones por voladuras con la aplicación de tiempos de retardos idóneos?
- ¿Cómo se determina la carga operante dinámica para minimizar la superposición de ondas sísmicas por voladura?

### **3.1.3. Objetivos**

#### **Objetivo General**

- **Determinar** el control adecuado de vibraciones por voladuras para minimizar los efectos de daño en la mina Cuajone - Southern Perú Copper Corporation, en el año 2017.

#### **Objetivos Específicos**

- **Evaluar** el impacto por voladura a las paredes del talud de Fase 6A Este de la mina Cuajone de SPCC, en el año 2017, con el análisis de los

registros sísmicos tomados a diferentes distancias del punto de inicio.

- **Calcular** el desplazamiento de partícula y las frecuencias dominantes para reducir los efectos asociados a esfuerzos post voladura.
- **Definir** los tiempos de retardos idóneos para reducir las vibraciones por voladura.
- **Determinar** la carga operante dinámica para minimizar la superposición de ondas sísmicas por voladuras.

### **3.1.4. Justificación**

#### **3.1.4.1. Justificación Legal**

El Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN, 2016) es el ente regulador y supervisor del cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería del **D.S. 024-2016-EM**; que en su título IV, capítulo II, Subcapítulo II, Art. 268, exige el control de vibraciones de las voladuras, el cual indica que *“El titular de actividad minera está obligado a monitorear las vibraciones resultantes de la voladura para tomar las medidas correctivas, de ser necesario”* (Decreto Supremo N° 024-2016 EM, 2016). Y en cumplimiento a este decreto, es importante la realización del presente estudio.

También tenemos la **Guía Ambiental para la Perforación y Voladuras en Operaciones Mineras** que menciona los límites Vpp máximos ( Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 1995).

No existen normativas en Perú que regulen la prevención de daños a instalaciones y estructuras post voladura, por lo cual es necesario recurrir a normas internacionales.

**Las Normativas internacionales** para control de vibraciones nos dan parámetros o límites que no debemos superar en las voladuras; y en la mina Cuajone los registros de las vibraciones de las voladuras se compara con la norma U. S. Bureau of Mines (USBM RI 8507, 1980), sin embargo, para el presente estudio usaremos la Norma UNE 22.381.93 (norma española) que es más riguroso en cuanto a daño de estructuras.

#### **3.1.4.2. Justificación Técnica Económica**

Al producirse algún deslizamiento de bloque del talud inestable, se genera condiciones inseguras y para volver a estabilizarlos o limpiar los taludes se requiere de equipos, es decir, incremento de costos imprevistos y adicionalmente se genera cambios en el plan de minado de mineral de fondo de mina.

El análisis de las ondas sísmicas de los registros de vibraciones de cada voladura, con el software JKSimblast y el software Blastware, nos permitirá determinar la carga operante dinámica, determinar la velocidad pico partícula, determinar la frecuencia dominante y finalmente el desplazamiento de partícula. Y a partir de ellas se podrá modelar y calcular el desplazamiento limite que no debería superar cada voladura y su atenuación en función a la distancia, para evitar efectos de impacto, además se podrá determinar los tiempos de retardos óptimos para no obtener velocidades pico partículas con frecuencias dominantes altas por superposición de ondas, ya que las de frecuencias bajas generan mayor daño al macizo rocoso.

### **3.1.5. Limitaciones**

Las limitaciones que se consideraran en este estudio base, utilizable por los Equipos de Soporte Técnico de EXSA, tienen relación con el posible incremento del P80 del mineral de alta ley cercanos a las zonas de deslizamiento; es decir se podría conseguir fragmentación gruesa en la zona de mineral que tiene alto work index, debido a que quizá se incremente los tiempos de retardo entre taladros y filas, y una posible reducción del factor de potencia ya sea por ampliación de malla o con empleo de carga desacoplada (deck), para minimizar el impacto.

Sin embargo, el presente estudio pretende tener un equilibrio entre la reducción de impacto de daño a los taludes por voladura y la conservación de la fragmentación adecuada para la zona de mineral y mejor aún, quizá llegar a mejorar este último aspecto.

Los resultados que se puedan obtener de este estudio, es solamente aplicable a la fase 6A, teniendo que hacer similares procedimientos para otras fases que tienen otras condiciones de terreno.

### **3.1.6. Alcances**

Con el análisis y criterios de daño de cada voladura se pueden predecir y minimizar los impactos de voladuras, ya que en el análisis de diseño si se llegara a tener valores que no sean favorables, se pueden modificar los diseños, la cual se pueden realizar y analizar con la herramienta TIMEHEX del software JKSimblast (jKtech, 1998). Y para optimizar el análisis post voladura se usa el software Blastware (Instantel, 2010).

El alcance del presente trabajo es a nivel de la mina Cuajone - Southern Perú, que se presenta al Departamento de Perforación y Disparos, y para fines de

estudio y conocimiento de la “FIMGM” de mi alma mater “Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo”.

## **3.2. HIPÓTESIS**

### **3.2.1. Hipótesis General**

- El control de vibraciones por voladura minimizaría los efectos de daño en la Mina Cuajone - Southern Perú Copper Corporation, en el año 2017.

### **3.2.2. Hipótesis Específicas**

- El impacto por voladura en las paredes del talud de Fase 6A Este de la mina Cuajone SPCC, en el año 2017, se minimiza con el análisis de los registros sísmicos tomados a diferentes distancias del punto de inicio.
- El cálculo del desplazamiento de partícula y el cálculo de las frecuencias dominantes nos permite reducir los efectos asociados a esfuerzos post voladura.
- Las vibraciones por voladuras se minimizan con la aplicación de tiempos de retardos idóneos.
- El cálculo de la carga operante dinámica minimiza la superposición de ondas sísmicas por voladuras.

## **3.3. VARIABLES**

### **Variable Independiente**

Control de Vibraciones por voladura

### **Variable Dependiente**

Minimizar los Efectos de Daño en Mina Cuajone

### 3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1. Tipo De Investigación

El tipo de investigación que se desarrollará está basado en las descripciones de investigación científica de Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista (2014) y Robles (2019), mostrados en el anexo 12 y 13; de las que se extrae lo siguiente:

**Según la Finalidad: Es Aplicada**, porque se basa en los descubrimientos y hallazgos de la investigación que se pueden aplicar para la solución directa e inmediata de los problemas que se presentan.

**Según su Alcance: Es Explicativa**, porque no solo describe y relaciona, sino requiere encontrar las causas (el por qué y el para qué) de un fenómeno.

**Según su Diseño: Es Cuasi Experimental**, porque busca la relación entre la causa y efecto con preprueba - posprueba, y no existe aleatorización de variable porque la manipulación es de selección, no intencional.

**Según su Enfoque: Es Cuantitativo**, se basa en la medición numérica.

**Según su Fuente de Datos: Es Investigación de Campo**, porque hay interacción con el objeto de estudio directamente por la observación y registro de fenómenos

#### 3.4.2. Población Y Muestra

##### 3.4.2.1. Población

Oseda y Dulio (2008, p. 120) menciona que “La población es el conjunto de individuos que comparten por lo menos una característica, sea una ciudadanía común, la calidad de ser miembros de una asociación voluntaria o de una raza, la matrícula en una misma universidad, o similares”.

Para esta investigación, la población estará representada por una fase de minado del Tajo Cuajone (Fase 6A) donde se ejecutan los proyectos de perforación, voladura y monitoreo de vibraciones, en el año 2017.

#### **3.4.2.2. Muestra**

La muestra base será los Análisis de registros sísmicos en campo lejano respecto al Deslizamiento 50 en la fase 6A Este, en los bancos 3115 y 3100, en el año 2017.

### **3.4.3. Técnicas E Instrumento De Recolección De Datos**

#### **3.4.3.1. Técnicas**

**La observación experimental y ensayos**, ya que los datos que se obtienen son de condiciones relativamente controladas por el investigador y particularmente porque las variables pueden ser manipuladas. En este caso el monitoreo de vibraciones se cuantificará en el registro de los geófonos y sismógrafos de las voladuras a diferentes condiciones (mediciones prospectivas en campo para determinar valores confiables de las variables que intervienen en la aplicación del modelamiento predictivo de vibraciones en campo lejano).

#### **3.4.3.2. Instrumentos**

**La ficha de observación de datos;** ya que los datos obtenidos en campo de los registros de vibraciones medido con los sismógrafos son descargados y analizados en el software Blastware (para obtener VPP, Frecuencias dominantes, ondas elementales y

tiempos de retardos idóneos) y llenados en el formato de control de vibraciones del área de asistencia técnica de EXSA SA.

De similar forma se realiza la simulación de los diseños de carga y amarre de los proyectos a volarse con el software JKSimblast, para determinar la carga operante dinámica y luego se registra en el formato de control de voladuras del área de asistencia técnica de EXSA SA., véase las figuras 57 y 58.

Tabla N° 1

	SISTEMA DE GESTION EN CALIDAD								CÓDIGO: exsa_vib_2017	
	FORMATO: REGISTRO DE VIBRACIONES EN CAMPO								VERSIÓN N°: 01 FECHA: 15.08.17 Página 4 de 6	
Semana : _____ Del : _____ al _____										
Nº	FECHA	PROYECTO	NIVEL	ZONA	Nº TALADROS	VPP (mm/s) REGISTRADO	COORDENADA PTO CONTROL	DISTANCIA (m)	CARGA OPERANTE Y TIPO	FRECUENCIA
Proceso: Gestión Comercial						ISO 9001 / ISO 14001 / OHSAS 1800				

Figura 57. Ficha de Observación. Fuente: Asistencia Técnica EXSA S.A.



Figura 58. Esquema de Instrumentación de Monitoreo de Vibraciones. Fuente: Diseño Propio, Adaptada de Geoblast.

#### **3.4.4. Forma de tratamiento de los datos**

El procedimiento para la obtención de la información de campo para el análisis de los datos fue el siguiente:

- Isolar taladros en los disparos para obtención de ondas elementales.
- Registro de ondas elementales con geófonos y sismógrafos superficiales a campo medio y a campo lejano.
- Descarga y análisis de registros de vibraciones con software Blastware.

#### **3.4.5. Forma de análisis de las informaciones**

Análisis avanzados para cálculo de frecuencias dominantes, desplazamiento de partícula y amplitud crítica; así mismo para determinación de tiempos de retardos idóneos para no generar daño al talud.

Monitoreo de subsecuentes disparos para realizar el análisis comparativo de los resultados obtenidos y determinar si existe daño al talud.

## **CAPÍTULO VI**

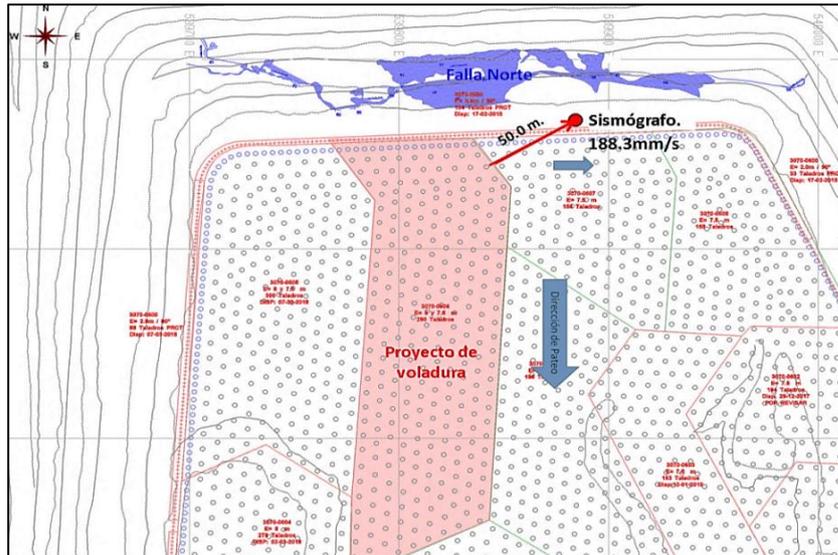
### **RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

Para poder ejecutar comparaciones de resultados antes y después de aplicar algún posible cambio en la perforación y/o voladura, es necesario partir de una línea base y luego seguir con la ejecución y análisis de resultado de la prueba.

##### **4.1.1. Línea Base**

Los monitoreos de vibraciones de las voladuras ejecutadas antes de la prueba, generalmente se realizaron a 50 m. (véase figura 59), distancia que está en el límite entre campo cercano y campo lejano; por lo que los valores de VPP están entre 100 mm/s, a 200mm/s; siendo éstas distancias de monitoreo no recomendables para el modelamiento de campo lejano. Los registros de vibraciones se aprecian en el anexo 14.



**Figura 59.** Esquema de Monitoreo de Vibraciones a 50 m. Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017).

El desplazamiento de bloques se origina por efectos de la energía asociada a baja frecuencia (voladuras a campo lejano) que se dan a distancias mayores a 50 m., la cual en muchos casos genera resonancias que producen el impacto de daño (frecuencias naturales de taludes son iguales o cuasi iguales a la frecuencias del movimiento vibratorio) y se requiere controlar, por lo que es necesario definir la captación de los pulsos respecto a los proyectos de voladura en distancias mayores a 100 m. hasta los 600 m. (véase figura 60).



**Figura 60.** Se muestra el Deslizamiento 50 (D50) por Efecto de Energía Asociada a Bajas Frecuencias en el Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio.

Los promedios de VPP a campo cercano son similares VPP límites (véase tabla 12 y anexo 15), ya que en su mayoría no superan los límites

permisibles. Eso ratifica que los daños a los taludes se generan por efecto de voladuras a campo lejano.

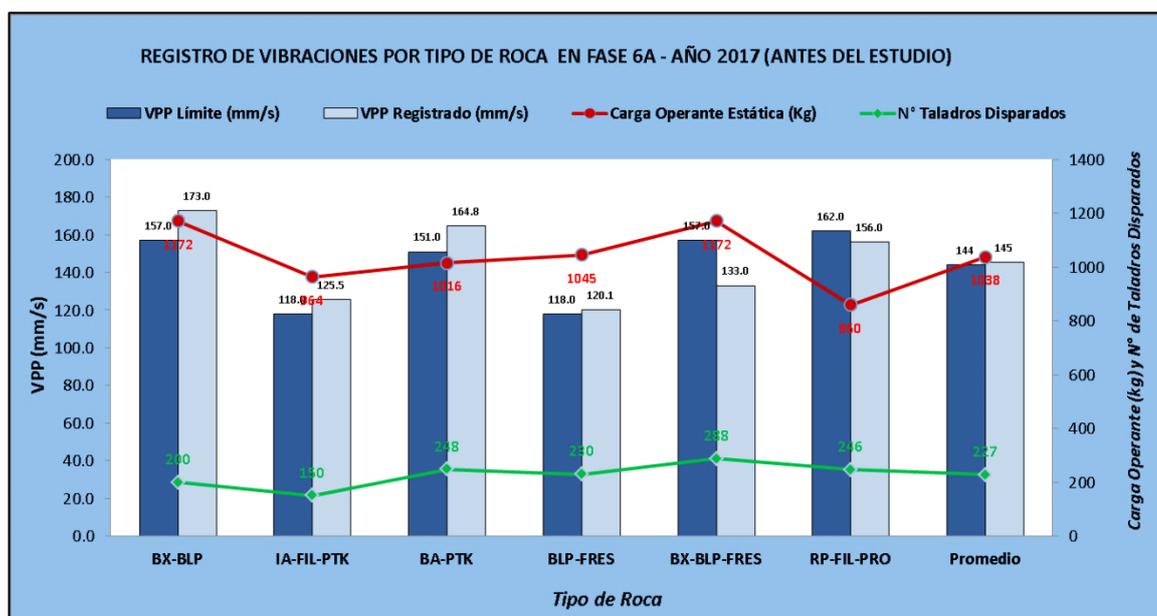
**Tabla 12.**

*Resumen de Vibraciones por Tipo de Roca en Fase 6A - Año 2017 (Antes de las Pruebas).*

Tipo de Roca	Distancia de Monitoreo (m)	VPP Registrado (mm/s)	VPP Límite (mm/s)	N° Taladros Disparados	Carga Operante Estática (Kg)
<b>BX-BLP</b>	50.0	173.0	157.0	200	1172
<b>IA-FIL-PTK</b>	50.0	125.5	118.0	150	964
<b>BA-PTK</b>	50.0	164.8	151.0	248	1016
<b>BLP-FRES</b>	50.0	120.1	118.0	230	1045
<b>BX-BLP-FRES</b>	50.0	133.0	157.0	288	1172
<b>RP-FIL-PRO</b>	50.0	156.0	162.0	246	860
<b>Promedio</b>	<b>50.0</b>	<b>145</b>	<b>144</b>	<b>227</b>	<b>1038</b>

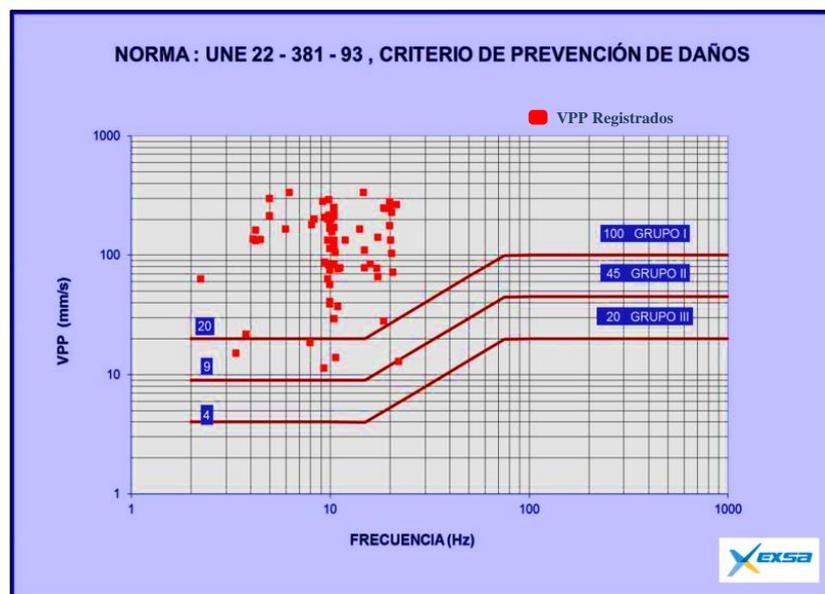
**Nota:** Significado de simbología de tipos de roca está en la figura 6. **Fuente:** Modificado de Base de Datos de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

En la figura 61 se aprecia que los registros promedios de vibraciones no superan a los límites permisibles (VPP Límite).



**Figura 61.** Gráfica de Registros de Vibraciones por Tipo de Roca Antes del Estudio. Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

En la figura 62 se puede apreciar que la mayoría de los registros tienen bajas frecuencias, y están por encima del GRUPO I (criterio de daño de la norma UNE-381-93), y podemos concluir que los valores de VPP están entre 20 mm/s y 9 mm/s, los cuales corresponderían a distancias mayores a 100 m, nos indica que el nivel de daño se define dentro del GRUPO II, lo cual sugiere que ciertas estructuras presentan especial sensibilidad a las vibraciones. Ningún valor se encuentra por debajo del GRUPO III con lo cual definimos que para zonas consideradas críticas no se está considerando mitigar el impacto, esto por el efecto de la baja frecuencia asociada al pulso resultante del proyecto de voladura.



**Figura 62.** Análisis de Frecuencias de la Voladuras Antes de la Prueba con la Norma UNE 22-381-93. Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

#### 4.1.2. Planificación y Ejecución de Estudio Inicial

❖ **Planificación:** Por la necesidad de tener información del comportamiento de las vibraciones por voladura en el campo lejano, se realizó un estudio inicial de mediciones a diferentes distancias de un taladro aislado para obtener la onda elemental. El estudio se ejecutó en el **Proyecto 3100-603** en la fase 6A cerca al deslizamiento 50 (disparado el día 22-08-2017) y se

dispuso (instaló) de cuatro estaciones de monitoreo para la toma de datos, como se aprecia en las figuras 63 y 64. Los parámetros de perforación, el diseño de carga y el diseño de amarre del proyecto 3100-603 se muestran en el anexo 16 y 17.

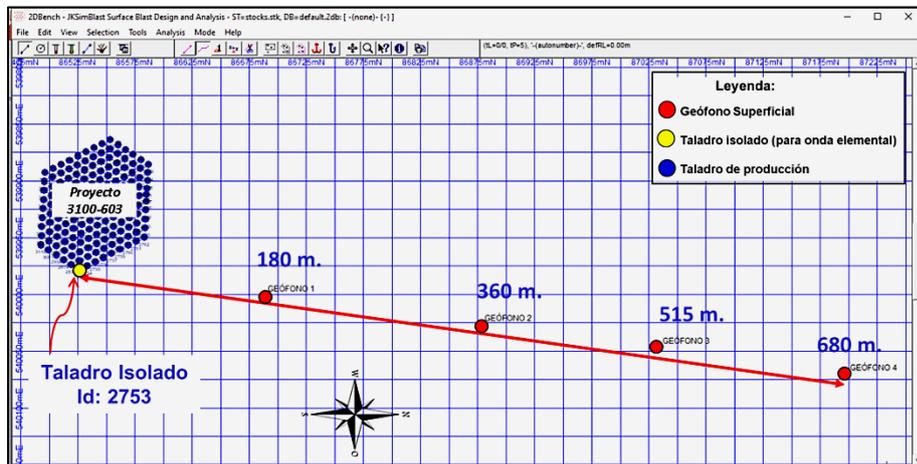


Figura 63. Vista en Planta de Taladro Isolado y Puntos de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio.

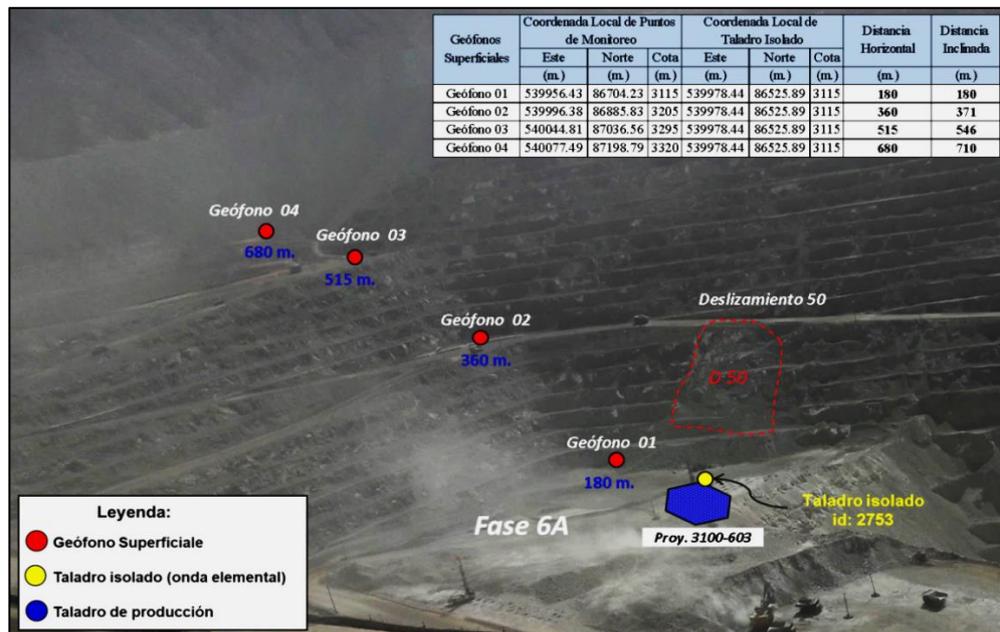
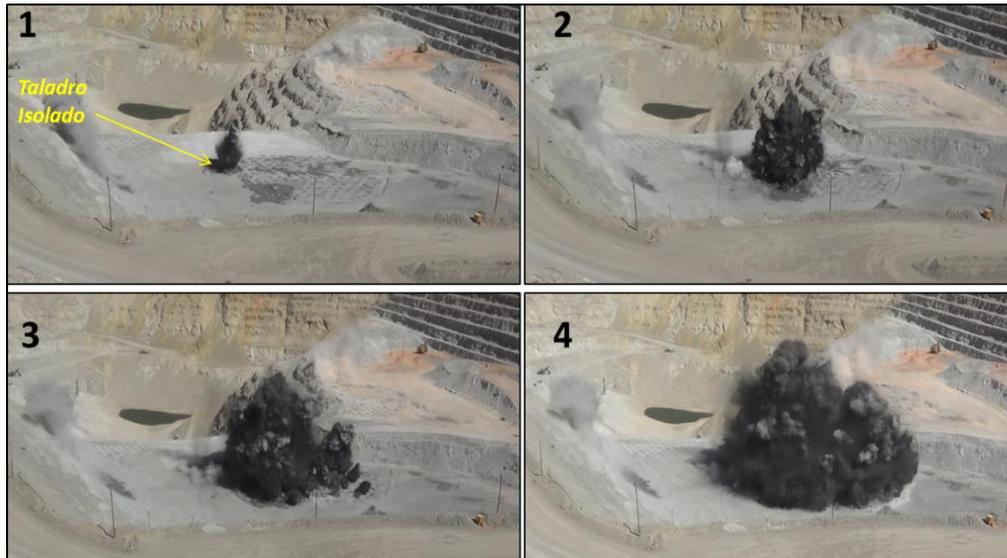


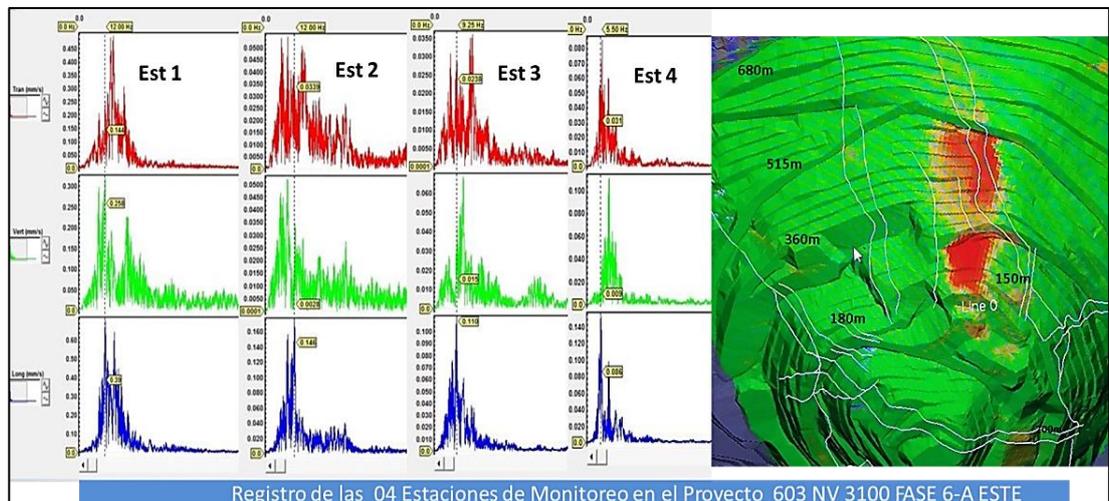
Figura 64. Foto de Ubicación de Taladro Isolado y Puntos de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio.

❖ **Ejecución:** El taladro aislado ha sido cargado con 1,072 Kg de mezcla explosiva Quantex 75/25 y detonado en 8,000 ms (6 segundos después del pre corte y 6 segundos antes de la producción); en la figura 65 se observa la secuencia de detonación.



**Figura 65.** Secuencia de Detonación Proyecto 3100-603. Fuente: Adaptada de Base de Datos de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

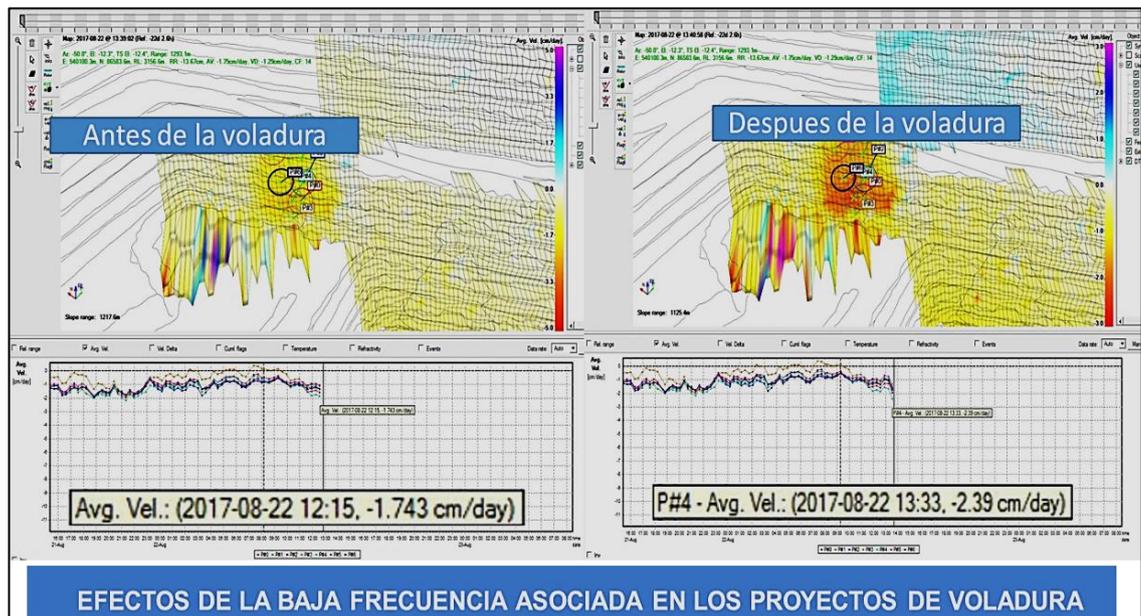
Post voladura se recogen los geófonos y sismógrafos de las 04 estaciones; se descargan y analizan los registros de los sismógrafos con el software Blastware, como se muestran en la figura 66 y anexos del 18 al 21.



**Figura 66.** Registros de Vibraciones Visualizados con Software Blastware. Fuente: Base de Datos de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone (2017).

Así mismo, se comparó la información del movimiento del Deslizamiento 50 (D50) antes y post disparo (información extraída del sistema Georadar del Departamento de Geotecnia de Cuajone), donde se puede apreciar un ligero incremento del desplazamiento de 1.74 cm/día a 2.39 cm/día (ver figura 67), y dichos desplazamientos no son considerados

críticos. El departamento de Geotecnia de SPCC de Cuajone, considera desplazamiento crítico a partir de **10.0 cm/día** (ver límites en anexo 22).



**Figura 67.** Control de Georadar Geotécnico Antes y Post Voladura. Fuente: Departamento de Geotecnia Mina Cuajone (2017).

## 4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

### 4.2.1. Análisis de Amplificación, Frecuencia y Desplazamiento

Los registros de vibraciones obtenidos (datos), se ingresan a la tabla 13, para procesarlos con la ecuación 8 y analizar el comportamiento de la frecuencia en relación con la distancia.

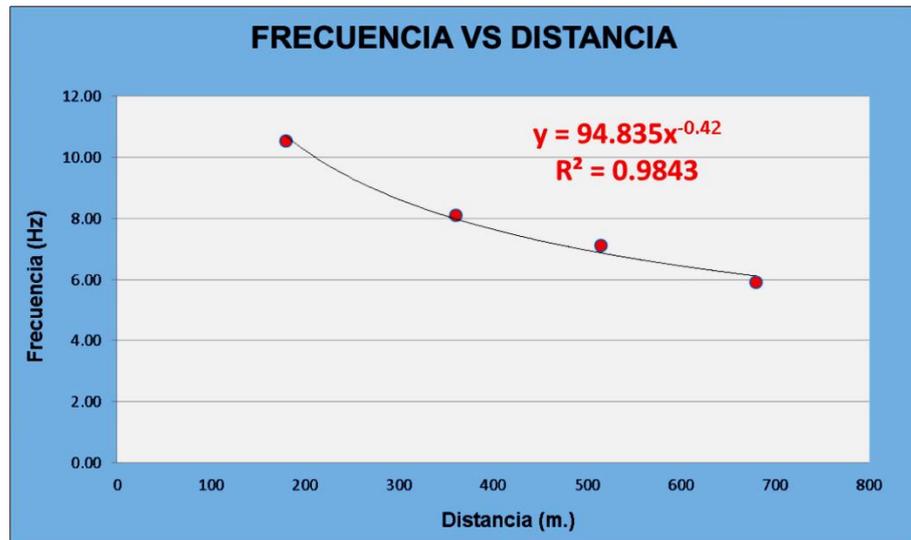
**Tabla 13.**

*Frecuencia y Desplazamiento Calculadas en las Cuatro Estaciones.*

Distancia	Frecuencia	VPP Tran	VPP Vert	VPP Long	VPP Suma	Desplazamiento
(m)	(Hz)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	(mm)
180	10.53	95.76	204.54	19.01	226.65	0.29
360	8.11	12.23	16.30	56.06	59.65	0.24
515	7.10	8.89	11.81	27.18	30.93	0.20
680	5.90	7.49	6.22	19.05	21.38	0.17

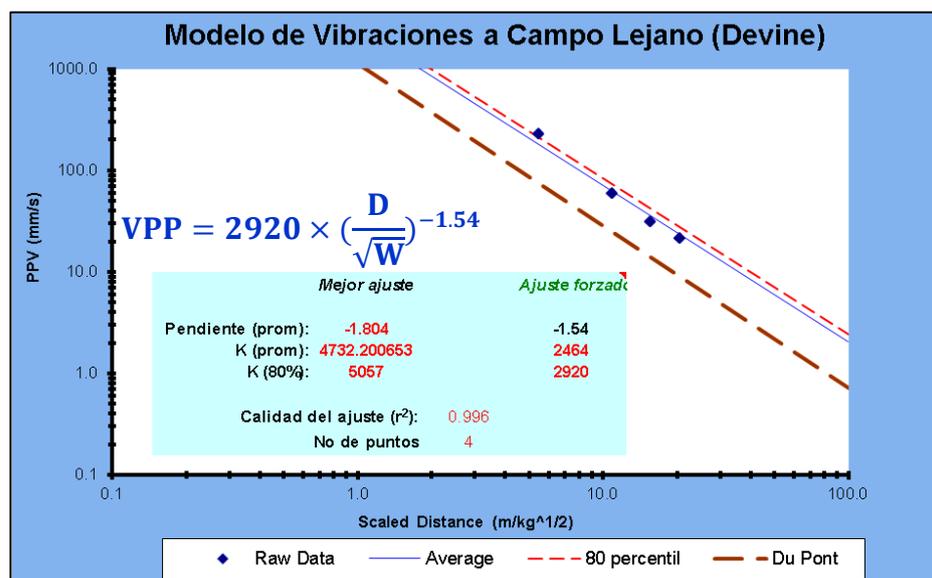
Fuente: Diseño Propio, Datos Procesados con Software BLASTWARE y ecuación 8.

Utilizando los datos de la tabla anterior se generan curvas para modelar el comportamiento de la partícula. En la figura 68 se tiene un porcentaje de variación  $R^2 = 0.98$ , y se aprecia que la frecuencia es menor a mayor distancia; lo que se desea es tener frecuencias altas a mayor distancia.



**Figura 68.** Gráfica de Comportamiento de la Frecuencia en la Distancia. Fuente: Diseño Propio.

Modelando con la ecuación de Devine y ajustado a un percentil igual a 80%, tenemos el modelo de campo lejano (ver figura 69).



**Figura 69.** Modelo de Devine para Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio.

Utilizando la ecuación de tendencia del comportamiento de la frecuencia versus la distancia ( $Y = 94.835X^{-0.42}$ ) mostrado en la figura 68,

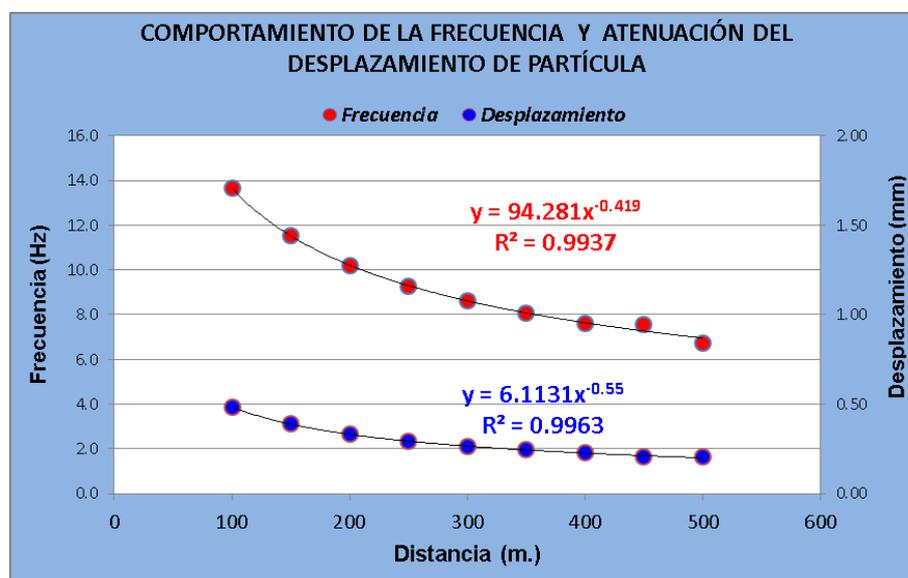
elaboramos la tabla 14 y la gráfica 70, haciendo corridas para varias distancias a campo lejano.

**Tabla 14.**

*Cálculo de la Frecuencia y Desplazamiento de Partícula.*

Distancia	Frecuencia	VPP	Desplazamiento
(m)	(Hz)	(mm/s)	(mm)
100	13.7	41.59	0.48
150	11.5	28.07	0.39
200	10.2	21.23	0.33
250	9.3	17.1	0.29
300	8.6	14.33	0.27
350	8.1	12.34	0.24
400	7.6	10.84	0.23
450	7.6	9.67	0.20
500	6.7	8.73	0.21

Fuente: Diseño Propio.



**Figura 70.** Comportamiento de la Frecuencia y Atenuación del Desplazamiento de Partícula a Campo Lejano. Fuente: Diseño Propio.

La atenuación del desplazamiento con respecto a la distancia se obtiene mediante la ecuación mostrada en la figura 70, y de esa manera se determina el valor mínimo de desplazamiento asociado a un valor límite de

0.21 mm. para una distancia de 500 m. (norma UNE-381-93). Es decir, el desplazamiento a 500 m. **no debe superar 0.21 mm.** En la figura 71, se aprecia que el par frecuencia y VPP están dentro del Grupo I y II.

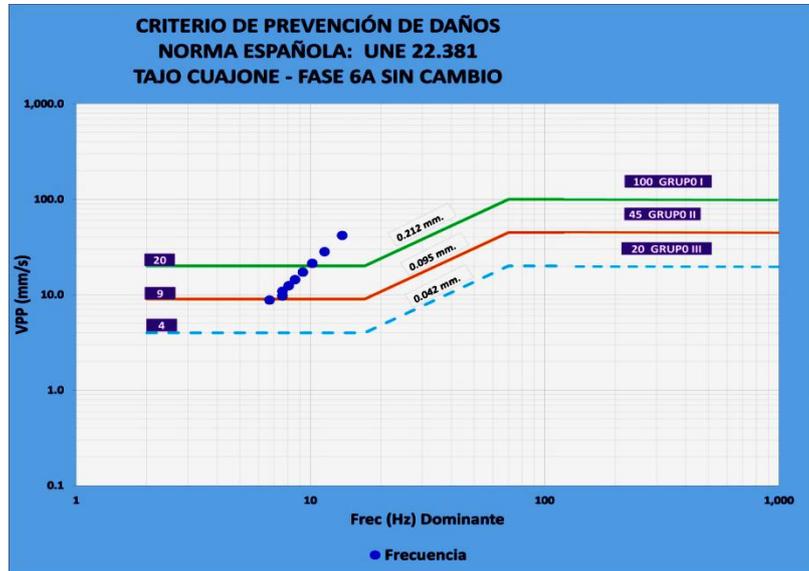
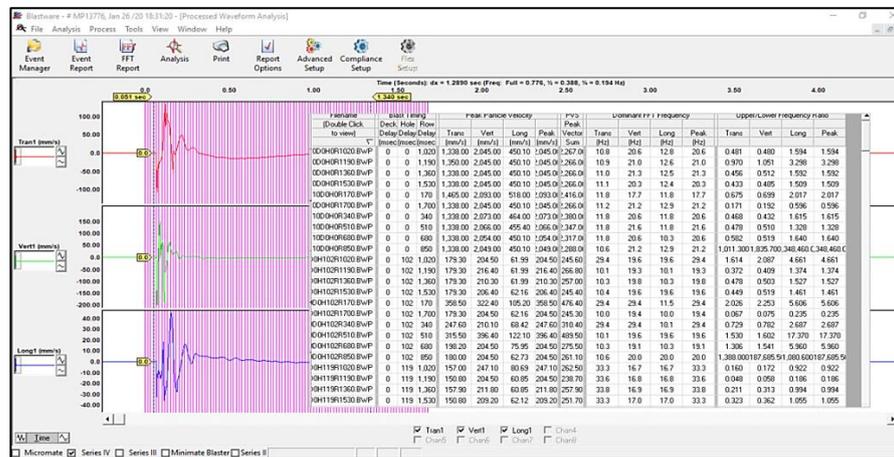


Figura 71. Análisis de Resultados con Criterio de Prevención UNE 22.381. Fuente: Diseño Propio.

#### 4.2.2. Análisis de Onda Elemental para Determinar Tiempos de Retardo

Las ondas elementales registradas en las cuatro estaciones a diferentes distancias en campo lejano, se procesan c/u mediante el software BLASTWARE, con su herramienta Signature Hole, para determinar los tiempos de retardos idóneos a usar entre taladros para generar frecuencias altas y reducir en consecuencia el desplazamiento, ver figura 72.



Graficando la información procesada mediante el signature hole de las 04 ondas elementales (de las 04 estaciones a diferentes distancias), tenemos el comportamiento de las amplitudes y tiempos idóneos, ver figuras 73 al 76.

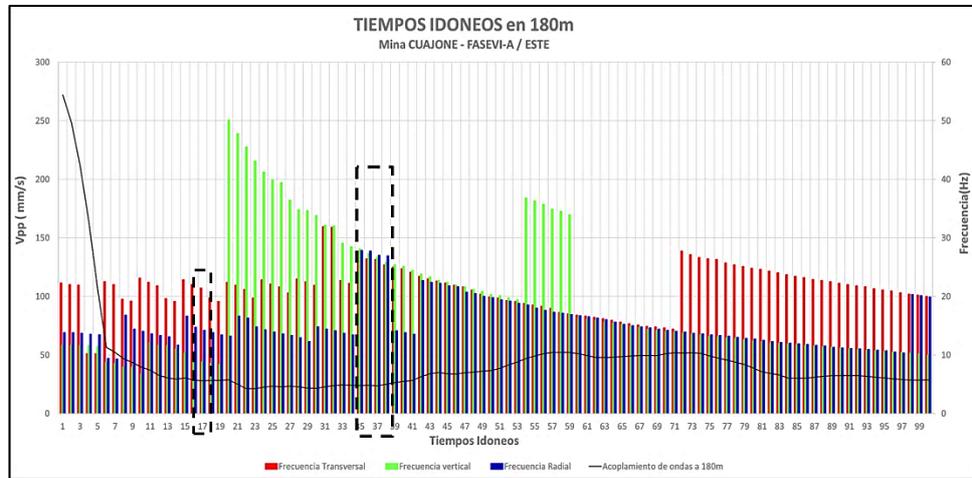


Figura 73. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 01 a 180 m. Fuente: Diseño Propio.

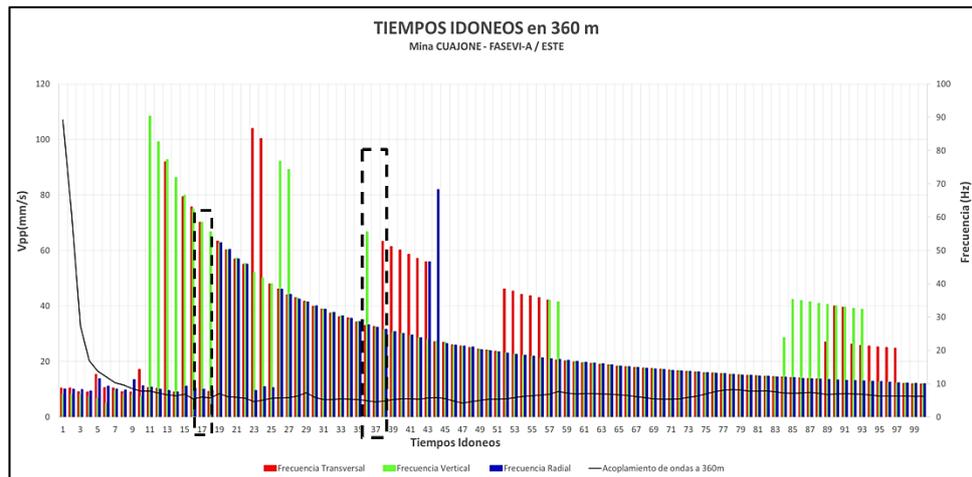


Figura 74. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 02 a 360 m. Fuente: Diseño Propio.

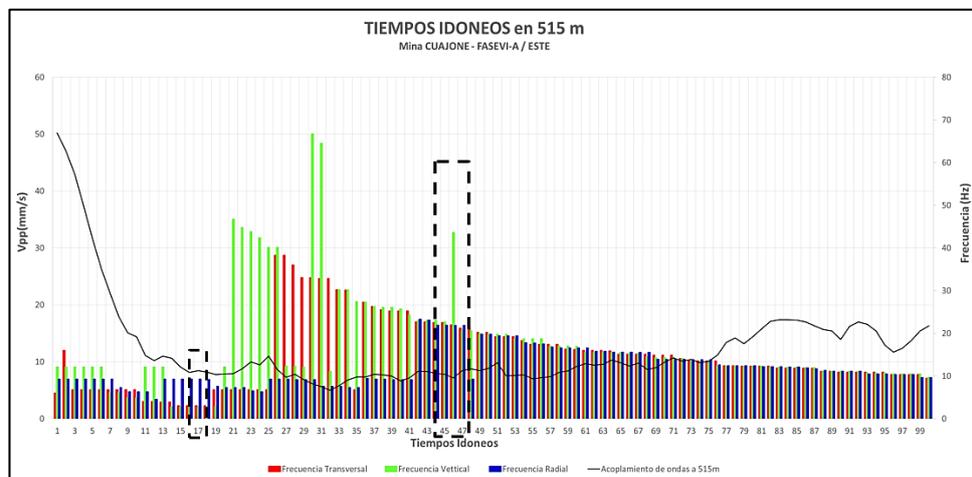


Figura 75. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 03 a 515 m. Fuente: Diseño Propio.

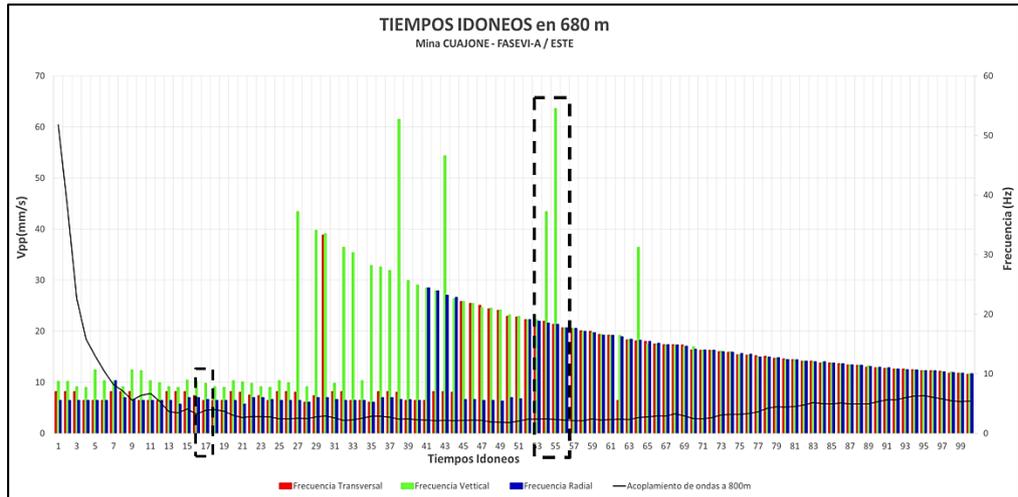


Figura 76. Tiempos de Retardos Óptimos en la estación 04 a 680 m. Fuente: Diseño Propio.

### 4.2.3. Análisis de Frecuencias Aplicando el Espectro de la Energía de Fourier

Mediante el software Blastware, el modo avanzado se determina la relación energía y frecuencia. En el resultado procesado se observa el comportamiento de la energía asociada a la frecuencia para tiempos de retardo definidos, en lo cual se resume que tiempos de retardo mayores a 100 ms deberían de utilizarse entre filas porque incrementan el nivel de energía, pero en Alta Frecuencia, ver figura 77.

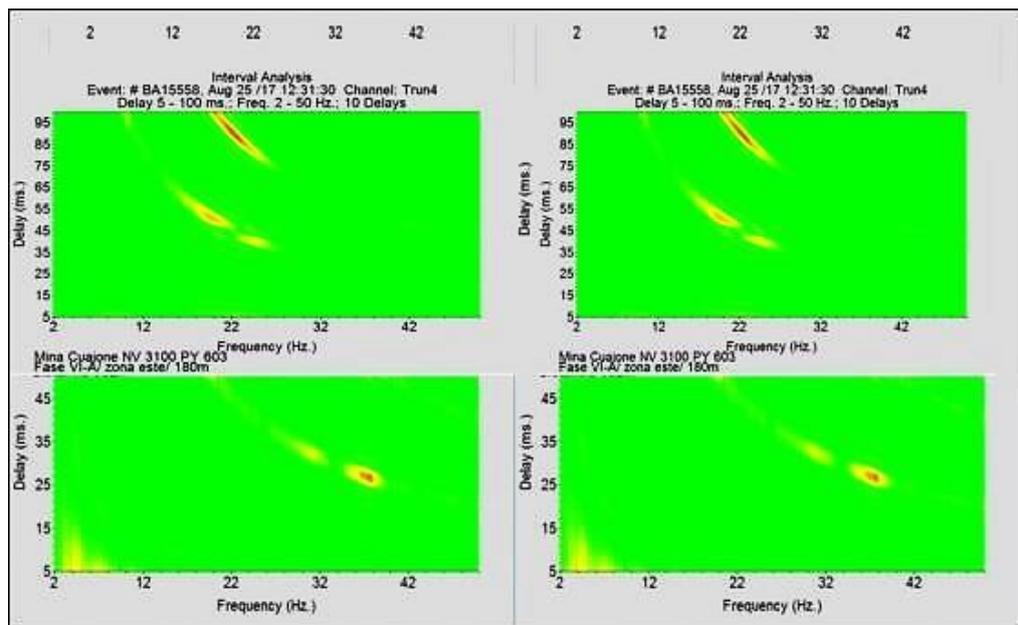


Figura 77. Análisis Energético de Frecuencia y Tiempos de Retardo en Software Blastware. Fuente: Diseño Propio.

### 4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la tabla 15 se muestra el resumen de los tiempos óptimos recomendados para tener menor amplificación y frecuencias altas, hallados según las distancias.

**Tabla 15.**

*Tiempos de Retardos Óptimos Según la Distancia.*

Distancia de Monitoreo de Onda Elemental (m.)	Ventana de Tiempo de Menor Amplificación por Método Signature Hole	
	Mínimo (ms)	Máximo (ms)
180	35	39
360	35	38
515	44	48
680	53	55

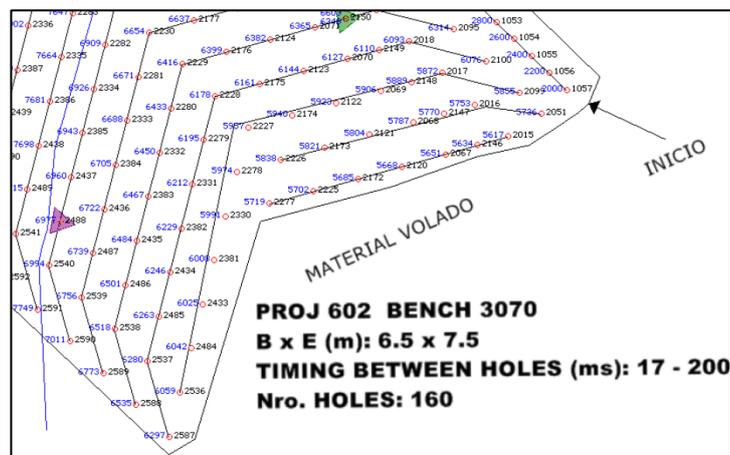
Fuente: Diseño Propio.

#### 4.3.1. Cambio de Tiempos de Retardos en los Diseños de Amarre.

De acuerdo con los cálculos realizado anteriormente, se recomendó tiempos de retardo de 35 ms a 55 ms entre taladro. Sin embargo, dichos tiempos son muy altos, porque puede traer desventaja en los resultados de fragmentación, ya que la fase 6A es zona de mineral.

Por tal motivo en coordinación entre la Gerencia Mina y Jefatura del Departamento de Perforación y Disparos de SPCC Cuajone para no ser muy osados, y **buscando un equilibrio** entre la adecuada fragmentación y reducción de daño a los taludes, **se decidió usar el 50% del menor tiempo de retardo recomendado (35 ms) para lograr reducir la amplificación;** es decir, usar **17 ms** de tiempo de retardo entre taladros en todos los proyectos a volarse (anteriores tiempos de retardos usados: 5ms a 11ms), y **secuenciados tiro a tiro** para reducir acoplamiento de onda en campo lejano, es decir,

termina de detonar los taladros de una fila y luego de 17 ms inicia la otra fila (considerando 100 ms de retardo mínimo entre filas), véase figura 78.



**Figura 78.** Diseño de Amarre con 17 ms de Tiempo de Retardo entre taladros. Fuente: EBS ORICA (2017).

#### 4.3.2. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyectos Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros

Se ha realizado el análisis a 10 proyectos volados con 17ms de retardados entre taladros y secuenciado tiro a tiro; y todos los monitoreos se han realizado en el **Deslizamiento 50**, que es la zona de interés. A continuación, se describe la metodología del análisis realizado:

**Análisis de Proyecto 3100-605/606:** Se ubicó el geófono y sismógrafo en la cabeza del D50, para monitorear la voladura del proyecto 3100-605/606, ver figura 79.



**Figura 79.** Ubicación del Punto de Monitoreo. Fuente: Diseño Propio.

Realizar el diseño de amarre con el software JKSIMBLAST, para hacer el analisis avanzado (Similar al Modelo de Montecarlo), ver figura 80.

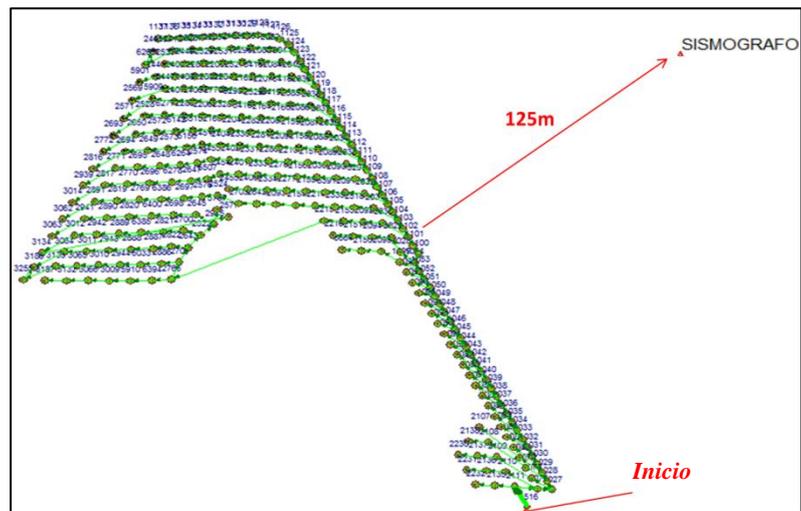


Figura 80. Diseño de Amarre Transcrito en JKSIMBLAST. Fuente: Diseño Propio.

Post Voladura se descarga el registro de vibraciones y se analiza con el software Blastware, para hallar la VPP y las frecuencias dominantes, ver figura 81.

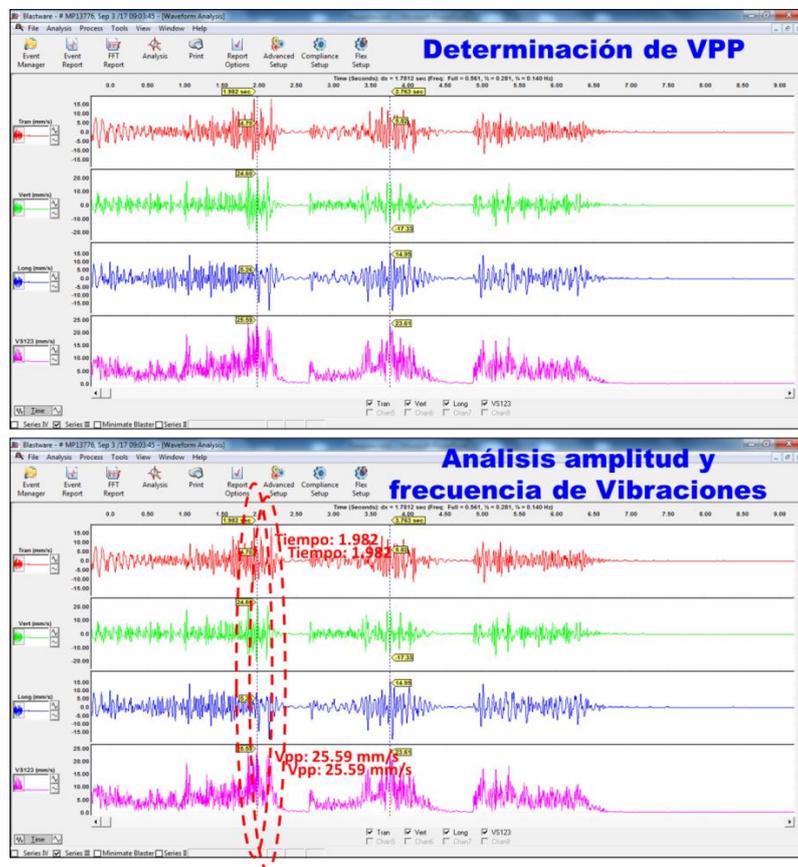


Figura 81. Cálculo de las VPP y las Frecuencias Dominantes. Fuente: Diseño Propio.

Una vez diseñado la voladura con software JKSIMBLAST; mediante su herramienta TIMEHEX, ingresamos la velocidad de onda P como dato y se calcula el tiempo de ventana y la carga operante dinámica (ver figura 82).

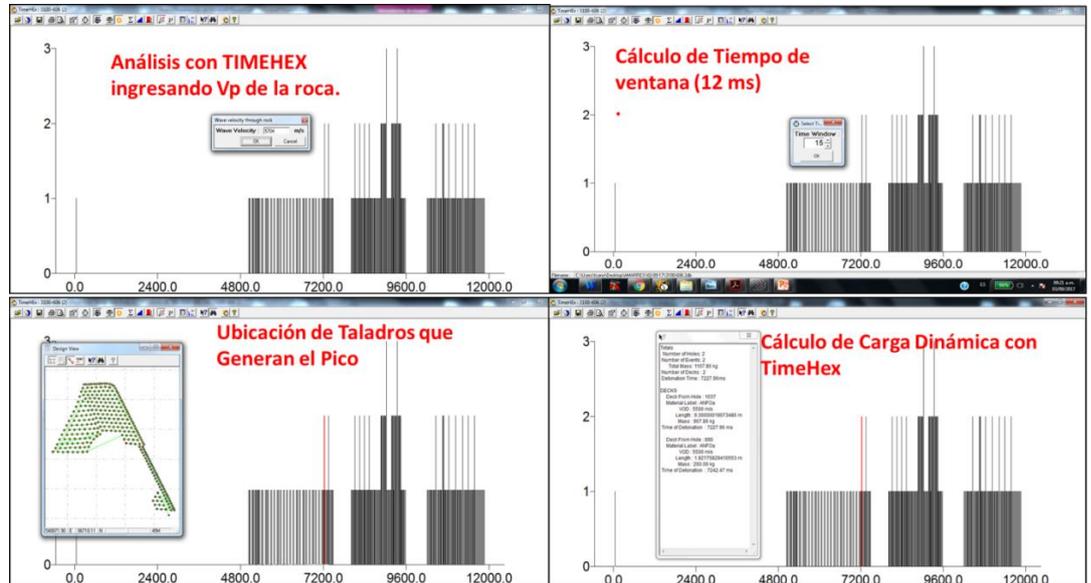


Figura 82. Análisis Avanzado de Herramienta TIME HEX. Fuente: Diseño Propio.

Posteriormente se ubican los taladros que generaron el pico (la mayor amplitud) y según el orden de la detonación, se tiene que el pico se genera entre los taladros 65 y 66 (id: 5664 y 1054), los cuales tienen un tiempo de ventana de 17ms. Para reducir este pico se debe ampliar el tiempo entre estos taladros, pudiendo ser el doble (34ms) o mayores a estos (ver figura 83).

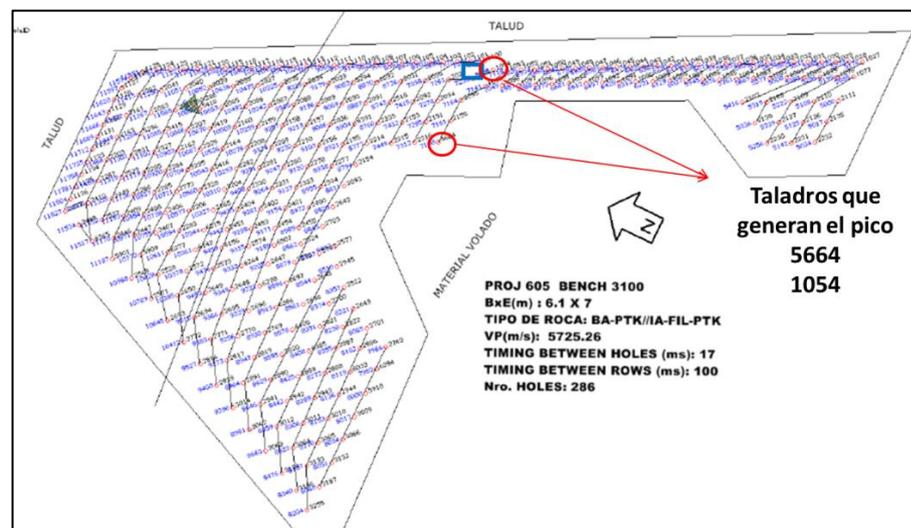


Figura 83. Taladros que Generan Mayor Amplitud. Fuente: Diseño Propio.

Finalmente, resumiendo este análisis se tiene lo siguiente:

- Tiempos – taladros: 17 ms.
- Distancia de monitoreo: 125 m
- Carga Dinámica: 2 taladros (1,167 Kg.)
- Frecuencia: 15.13 Hz
- VPP: 25.92 mm/s
- Desplazamiento: 0.27 mm (calculado con la ecuación 8).
- Distancia de monitoreo: 125 m

Los 10 proyectos volados con 17 ms de retardo entre taladro se han monitoreado a campo lejano (en el D50) y se observa que la mayoría de los registros nos dan un desplazamiento de partícula menor al límite (< 0.211 mm.), como se puede apreciar en el resumen de la tabla 16 (El de talle del análisis de los 09 proyectos restantes se pueden apreciar en los anexos del 24 al 32).

**Tabla 16.**

*Resultado de Análisis con TIME HEX y BLASTWARE.*

Proyecto	Distancia	Tiempo	Carga	Carga	VPP	Frecuencia	Desplaz.	Tiempo
	Horizontal	de	Operante	Operante		Dominante		
	al monitor	Ventana	Estática	Dinámica	(mm/s)	(Hz)	(mm)	entre
	(m.)	ms	(Kg.)	(Kg.)				taladro
								(ms)
<b>3100-602</b>	375	12	968	1936	8.32	34.00	0.039	17
<b>3100-605/606</b>	125	15	967	1167	25.59	15.13	0.269	17
<b>3100-607</b>	191	17	1016	2032	9.58	10.38	0.147	17
<b>3130-625</b>	590	16	1020	2040	1.25	8.00	0.025	17
<b>3100-608</b>	299	16	1016	2032	4.73	13.75	0.055	17
<b>3115-617</b>	755	17	1072	2144	1.16	6.88	0.027	17
<b>3115-618</b>	844	16	1068	2136	1.01	7.25	0.022	17
<b>3115-619</b>	716	16	1068	2136	2.57	6.25	0.065	17
<b>3115-615</b>	400	30	1071	3215	3.23	12.13	0.042	17
<b>3115-616</b>	550	30	985	2955	2.88	6.38	0.072	17

Fuente: Diseño Propio.

Graficando los datos obtenidos, se tiene modelos de comportamiento de la frecuencia y de atenuación del desplazamiento de partícula, mostrados en la figura 84.

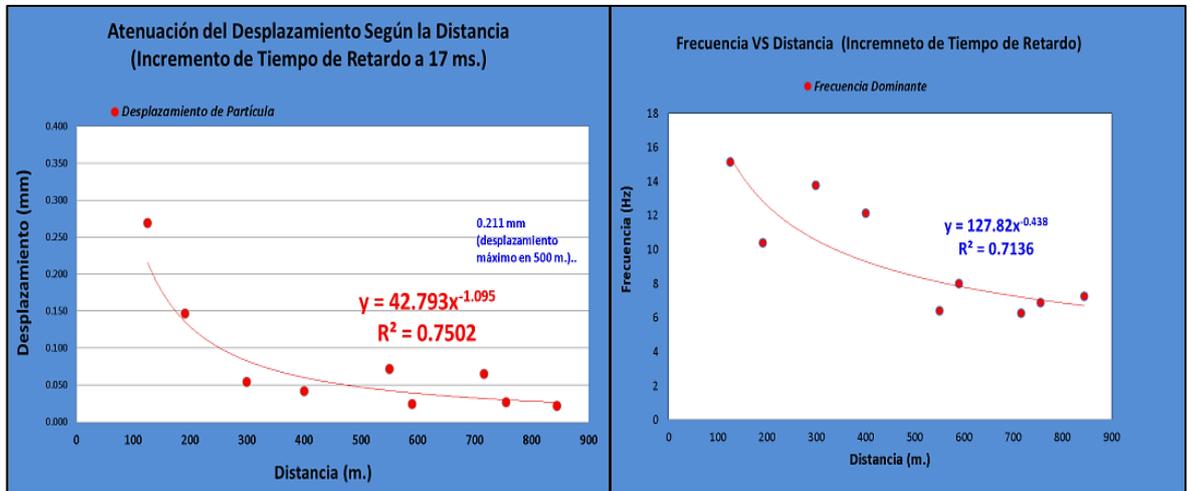


Figura 84. Muestra el Modelo de Atenuación del Desplazamiento de Partícula. Fuente: Diseño Propio.

Haciendo el comparativo con la norma UNE 22.381, se observa que la amplitud está en su mayoría por debajo del GRUPO III, que indica que las vibraciones no generan daño a la estructura. Ver figura 85.



Figura 85. Comparativo de Frecuencias con el Criterio de Prevención UNE 22.381. Fuente: Diseño Propio.

#### **4.4. APORTES DEL TESISISTA**

Se han conceptualizados algunos términos usados en la U.M. que se han empleado en el presente estudio (carga dinámica).

Se ha estandarizada la metodología de análisis avanzado de proyectos volados para el cálculo del desplazamiento de partícula.

Se ha contribuido con conocimientos (conceptos) externos que son muy selectos y valiosos para estudios similares de voladura de rocas.

Aplicación en las voladuras de tiempos de retardos calculados con el análisis de ondas elementales para cautelar estructuras.

## CONCLUSIONES

1. En esta tesis con la metodología del análisis de vibraciones aplicada en la prueba inicial y aplicación de los nuevos parámetros de secuencia de iniciación (en la segunda etapa) se determinó el control adecuado de vibraciones por voladuras para minimizar los efectos de daño en la mina Cuajone – SPCC, en el año 2017.
2. En esta tesis se evaluó el impacto a campo lejano en las paredes del talud de Fase 6A Este de la mina Cuajone de SPCC concluyendo que si hay impacto por efectos de la energía asociada a bajas frecuencias por voladuras con los tiempos de retardos entre taladros de 5 ms a 11 ms usados antes de la ejecución de cambios con el estudio, que superaron en la mayoría de los casos el NIVEL I de la Norma UNE 22-381-93, y el impacto de daño se reduce favorablemente con la incremento de los tiempos de retardo idóneos entre taladros de 17 ms empleados posteriormente.
3. En esta tesis (con la prueba inicial) se calculó el desplazamiento de partícula en las 04 estaciones (0.29 mm, 0.24 mm, 0.20 mm y 0.17 mm), observado que en 02 estaciones han superado el límite de 0.21 mm (Según norma UNE 22-381-93) en 38% y 14%; a distancias menores a 500 m; y en la segunda etapa de la prueba, aplicando los cambios de ampliación de tiempos de retardo a 17 ms, en los 10 proyectos volados, se observa que los desplazamientos de partícula en su mayoría son menores al límite de la norma UNE 22-381-93. (< 0.211 mm) con frecuencias dominantes más favorables.
4. En esta tesis mediante el análisis de las ondas elementales se definió los tiempos de retardos idóneos entre taladros que va en el rango de 35 ms y 55 ms para reducir las vibraciones por voladura creando interferencias de la energía asociada al tren de ondas a campo lejano, y se definió el tiempo de retardo de equilibrio igual a 17 ms (50% del menor tiempo de retardo calculado “35 ms”) para garantizar una adecuada fragmentación y reducción de daño a los taludes. Se definió que los tiempos de retardo

entre filas de acuerdo con el análisis del comportamiento de la energía asociada a la frecuencia deben ser mayores a 100 ms y secuenciado tiro a tiro para reducir acoplamiento de onda en campo lejano, es decir, termina de detonar los taladros de una fila y luego de 17 ms inicia la otra fila (considerando 100 ms de retardo mínimo entre filas).

5. En esta tesis se determinó que la carga operante dinámica máxima es igual a la carga de tres taladros en un tiempo de ventana de 17 ms para minimizar la superposición de ondas sísmicas por voladuras y en la segunda etapa de la prueba aplicando los cambios de ampliación de tiempos de retardo a 17 ms, en los 10 proyectos volados, las cargas operantes dinámicas determinadas no superan la carga de tres taladros.

## RECOMENDACIONES

1. Se sugiere determinar más oportunidades de mejora para completar la metodología empleada de control de vibraciones, con más mediciones de ondas elementales a diferentes distancias, estudios de resonancias de los taludes, entre otros.
2. Se sugiere evaluar el impacto de vibraciones en otras fases de la mina, donde se tenga zonas inestables.
3. Se recomienda enlazar los desplazamientos de partícula calculados en los monitoreos de vibraciones con los registros de desplazamientos obtenidos del monitoreo de los Georadares de la mina.
4. Se recomienda realizar más mediciones de ondas elementales para elaborar un plano de zonas inestables con sus respectivos tiempos de retardos idóneos definidos. Se recomienda usar tiempos de retardo entre taladro de 35 ms a 55 ms en zonas muy críticas de la fase 6A Este.
5. Se recomienda reducir la carga operante dinámica de 03 taladros determinado en este estudio, para tener menor impacto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bakhtavar, E., & Yousefi, S. (2018). *Análisis del Riesgo de Vibración del Suelo en las Infraestructuras Mineras [Traducido al español de Analysis of ground vibration risk on mine infrastructures]*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2008-0>
- Bernabé Tapia, H. (2002). *Geología y Génesis de Cuajone*. (Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/12070>.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Minas.
- Blastechnology. (30 de Octubre de 2006). Foco en Daño. *I Congreso de Minería y Medio Ambiente - UNASAM-FIMGM*. Huaraz, Perú.
- Bravo Sánchez, I. L. (2018). *Estudio de Vibraciones Inducidas por Tronadura en Minera Spence*. (Tesis de grado), Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex [CINTEX]. (2006). *Manejo de Explosivos & Técnicas de Tronadura*. Manual Electrónico, Santiago de Chile.
- Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex [CINTEX]. (Mayo, 2006). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Manual Electrónico, Santiago de Chile.
- Centro Educativo San Antonio María Claret. (2007). *Vibraciones y Ondas*. PDF de Seminario de Física y Química, Recuperado de: <https://es.slideshare.net/everwrest/vibraciones-y-ondas>. Las Plamas, España.
- Champi Guzmán, M. A. (2015). Reducción De Las Demoras Operativas Y Optimización De Tiempos Por Abastecimiento De Combustible Con El Sistema Vr - 300 Gpm.

- En Los Volquetes De Mina - Unidad Operativa Cuajone. (*Tesis de Grado*).  
*Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. Arequipa.
- Concha, O., & Bernabé Tapia, H. (Diciembre de 1999). Geología y Génesis de la Mina Cuajone. *Trabajo Presentado en el Seminario de Exploración y Metalogenia de Yacimientos Polimetálicos de la Universidad Nacional de Ingeniería*. Lima, Perú.
- Cruzado Mendoza, F. B., & Diaz Choroco, K. A. (2017). *Análisis de la Máxima Carga Operante en las Vibraciones a Campo Lejano Generadas por Voladuras, en Minera Cerro Negro S.A., Cajamarca - 2017*. Tesis de Grado, Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Cajamarca, Lima.
- De Los Santos Batista, P. M. (Julio de 2016). Comparación de Normas Internacionales para su Aplicación en la Republica Dominicana en Voladuras. (*Tesis de Maestría*). *Universidad Politecnica de Cataluña*. Cataluña, España.
- Decreto Supremo N° 024-2016 EM. (26 de Julio de 2016). *Artículo 268 [Título II, Subcapítulo II]. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería*.  
Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-reglamento-de-seguridad-y-salud-ocupacional-en-mine-decreto-supremo-n-024-2016-em-1409579-1/>
- Departamento de Geología Mina Cuajone. (2012). Plano de Geología Local. Mina Cuajone.
- Departamento de Geología Mina Cuajone. (Noviembre de 2015). Proceso Productivo del Cobre Mina Cuajone. Mina Cuajone.
- Departamento de Ingeniería Mina Cuajone. (Enero de 2018). Planeamiento de Minado Estratégico de Mina Cajone 2018. Mina Cuajone.
- DynoConsult. (2006). Modelamiento de Vibraciones (ppt). Perú.

- ENAEX S.A. (11 de Agosto de 2011). De un Modelo de Vibraciones Estático a uno Dinámico. Santiago, Chile.
- ENPERU. (10 de Agosto de 2019). *Vías de Acceso a Moquegua*. Obtenido de <https://www.enperu.org/vias-de-acceso-moquegua-como-llegar-informacion-util-sitios-turisticos-moquegua.html>
- EXSA S.A. (2015). Soluciones Exsactas en Fragmentación de Rocas. Lima.
- EXSA S.A. (2018). *Manual Práctico de Voladura* (5 ed.). Lima, Perú.
- Fleetwood, K. G. (Diciembre de 2010). *Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Voladuras de Campo Cercano para la Predicción de Daños por Voladura [Traducido al español de Near-Field Blast Vibration Monitoring and Analysis for Prediction of Blast Damage in Sublevel Open Stopping]*. Recuperado el 15 de Julio de 2019, de Escuela de Minas de Australia Occidental, Departamento de Ingeniería y Topografía de Minería de la Universidad Curtin, Australia.: <http://hdl.handle.net/20.500.11937/519>
- García Martín, P. (2014). *Análisis del Contenido en Frecuencias de Vibraciones por Voladura*. Tesis de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid, España. Recuperado de [http://oa.upm.es/30845/1/PFC\\_Pablo\\_Garcia\\_Martin.pdf](http://oa.upm.es/30845/1/PFC_Pablo_Garcia_Martin.pdf).
- GEOBLAST. (2018). Capacitación Instantel. Lima, Perú.
- GEOBLAST. (12 de Setiembre de 2019). Criterios de Daño por Vibraciones en Campo Cercano y Campo Lejano. *Capacitación Asistencia Técnica*. Lima, Perú.
- Guerra Molina, J. G. (2012). *Reducción de Costos Operativos Método del Reemplazo de Equipo Mina*. (Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10881>.

- Haotian, N. (5 de Noviembre de 2016). *Evaluación y Aplicación Potencial del Análisis de Distribución de Energía 4D en el Diseño de Voladuras (Traducido al español de Evaluation and Potential Application of 4D Energy Distribution Analysis in Blast Design)*. Recuperado el 10 de Agosto de 2018, de (Tesis de Grado), Universidad de Queensland.: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:416037>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Quinta ed.). México: McGraw-Hill. Obtenido de <https://www.tesiseinvestigaciones.com/tipo-de-investigacioacuten-a-realizarse.html>
- INGEMMET. (18 de Mayo de 2018). *Caracterización Petromineralógica de los Yacimientos Toquepala y Cuajone*. (J. C. Lionel Fídel Smoll, Ed.) Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1521>
- Instantel. (2010). *Blastware*, (10.10) [Software]. Obtenido de <https://www.instantel.com/resources>
- INSTANTEL. (2017). *Manual de Operación de Minimate Pro*. Obtenido de <https://www.instantel.com/resources>
- Instituto Geológico y Minero de España [IGME]. (s.f.). *Establecimiento de una Red de Medición y Análisis de Vibraciones Ocasionadas por Voladuras Industriales en Rocas Ígneas*. Informe Recuperado de: [http://info.igme.es/SidPDF/019000/432/Memoria/19432\\_0002.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/019000/432/Memoria/19432_0002.pdf).
- jKtech. (1998). *JKSimBlast*, (2.11.03) [Software]. Obtenido de <https://jktech.com.au/>
- Konya, C. J. (1995). *Diseño de Voladura (Traducido al español de Blast Design)* (Primera ed.). Montville, Ohio 44064, U.S.A.
- Ministerio de Energía y Minas [MINEM]. (Setiembre de 1995). *Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras*. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/perforacion.pdf>

- McKenzie, C. (1994). *Estado del Arte de la Tronadura*. Enaex S.A., Santiago de Chile.
- Moraga Hidalgo, G. N. (2018). *Características Geológicas y Geotécnicas Generales que Intervienen en la Tronadura y el Efecto de Daño en el Campo Lejano en Minería de Rajo Abierto*. (Tesis de Grado), Universidad de Concepción, Concepción, Chile.  
Recuperado de: <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/3128>.
- Niklasson, B., Olsson, M., & Beyglou, A. (Julio de 2014). *¿El Confinamiento De Carga Afecta El Nivel De Vibración En La Voladura? [Traducido al español de Does Charge Confinement Affect The Vibration Level In Blasting?]*. Estocolmo, Suecia.  
Recuperado el Agosto de 10 de 2019, de  
[http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/294/BeFo\\_Rapport\\_132\\_webb.pdf](http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/294/BeFo_Rapport_132_webb.pdf)
- OFFICE OF SURFACE MINING RECLAMATION AND ENFORCEMENT [OSMRE].  
(24 de Abril de 2017). *Control de los Efectos Adversos de la Voladura [Traducido al español de Controlling the Adverse Effects of Blasting]*. Recuperado el 20 de Julio de 2018, de  
<https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/WYBlasterCertModules/8AdverseEffectsBlasting.pdf>
- Ondas Sísmicas*. (s.f.). Recuperado el 12 de Enero de 2019, de  
[https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html)
- Onlineminingexam. (8 de Diciembre de 2015). *Explosivos y Voladura-Parte 3 [Traducido al español de Explosives and Blasting-Part 3]*. Recuperado el 12 de Agosto de 2019, de <https://onlineminingexam.wordpress.com/2015/12/08/explosives-and-blasting-part-3/>
- ORICA MINING SERVICES. (2010). *Control de Vibraciones y Frecuencias (ppt)*. Perú.

ORICA MINING SERVICES. (s.f.). *Selección de Límites de Voladuras para Canteras y Proyectos de Construcción Civil (Traducido al español de Selection of Blasting Limits for Quarries and Civil Construction Projects)*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2018, de Document reference: 200281: ORICA MINING SERVICES

Peña Vizarreta, Y. J. (2014). *Modelamiento, Monitoreo y Control de las Vibraciones para Evitar Daños Inducidos por la Voladura de Rocas de una Operación Minera Superficial*. (Tesis de Grado), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Pérez Cosío, J. (2019). *Utilización de la Medida de Vibraciones en Voladuras para el Conocimiento de los Daños al Macizo de Roca Ornamental. (Tesis de Doctorado)*, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.

Provías Nacional [PVN]. (10 de Agosto de 2019). *Itinerario de Rutas DGC-MTC*.

Obtenido de <https://gis.pvn.gob.pe/servicios/distancias/index.htm>

Qiu, B. (23 de Enero de 2014). *Numerical Study on Vibration Isolation by Wave Barrier and Protection of Existing Tunnel Under Explosions [Tesis Doctoral]*. Recuperado el 25 de Mayo de 2019, de INSA de Lyon: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127493>

Richard. (Febrero de 2009). *Voladura & Medio Ambiente Vibraciones de Tierra (Traducido al español de Blasting & The Environment Ground Vibrations)*.

Recuperado el 20 de Enero de 2019, de

[http://rpq.eu.com/pdfs/ground\\_vibrations.pdf](http://rpq.eu.com/pdfs/ground_vibrations.pdf)

Rizky, M. (2012). *Análisis de Optimización de Tiempos de Retado Usando Signature Hole [Traducido al español de Analysis of Optimum Intershot Delay Arrangement Using Signature Hole Method to Control Ground Vibration at Pit Pinang South , PT Kaltim Prima Coal, Sangatta]*. Obtenido de Universitas Sriwijaya, Indonesia:

<https://es.slideshare.net/MuhamadRizky13/vibration-control-using-signature-hole-method-thesis-be-mining-universitas-sriwijaya>

Robles, D. (20 de Octubre de 2019). *Investigación Científica*. Obtenido de

<https://investigacioncientifica.org/tipos-investigacion-cientifica/>

San Juan Vergara, B. A. (2014). *Análisis del Grado y Patrón de Fracturamiento de Macizos Rocosos. Caso de Estudio: Pared Sureste del Yacimiento Tipo Pórfido Cuprífero Cuajone, Departamento de Moquegua, Perú*. (Tesis de Grado, Universidad de Chile). Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130994>.

Sánchez Medina, M. M. (2012). Estudio del Uso de Detonadores Electrónicos para Incrementar la Eficiencia de Fragmentación en Roca Ba-Ptk (Andesita Basáltica Potásica) E.E. Orica Mining Service S.A. Mina Cuajone. (*Tesis de Grado*). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

Silva Castro, J. J. (2013). *Modelamiento de Vibración por Voladura Utilizando una Mejorada Técnica Signature Hole para Voladura de Bancos [Traducido al español de Blast Vibration Modeling Using Improved Signature Hole]*. (Tesis Doctoral), College of Engineering at the University of Kentucky, Lexington, Kentucky, EE.UU. Recuperado de: <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/DissertationsThesis/SilvaDissertation2012.pdf>.

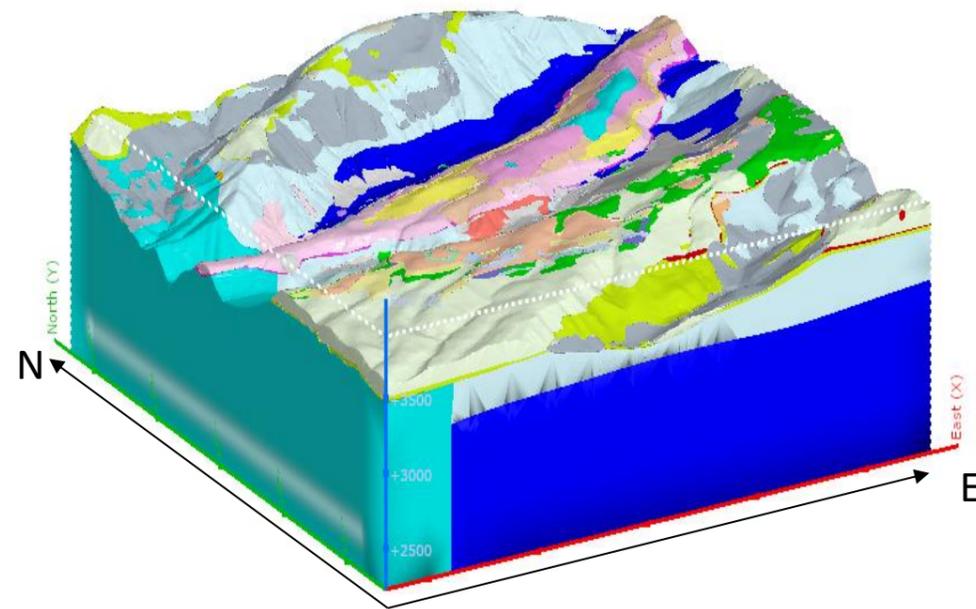
Siskind, D. (2000). *Vibraciones de Voladuras (Traducido al español de Vibrations from Blasting)* (Primera ed.). Cleveland, OH, USA: International Society of Explosives Engineers.

Superintendencia de Geotecnia Mina Cuajone. (Diciembre de 2018). Evaluación de la Estabilidad Física del Tajo. *Plan de Minado 2018*. Mina Cuajone.

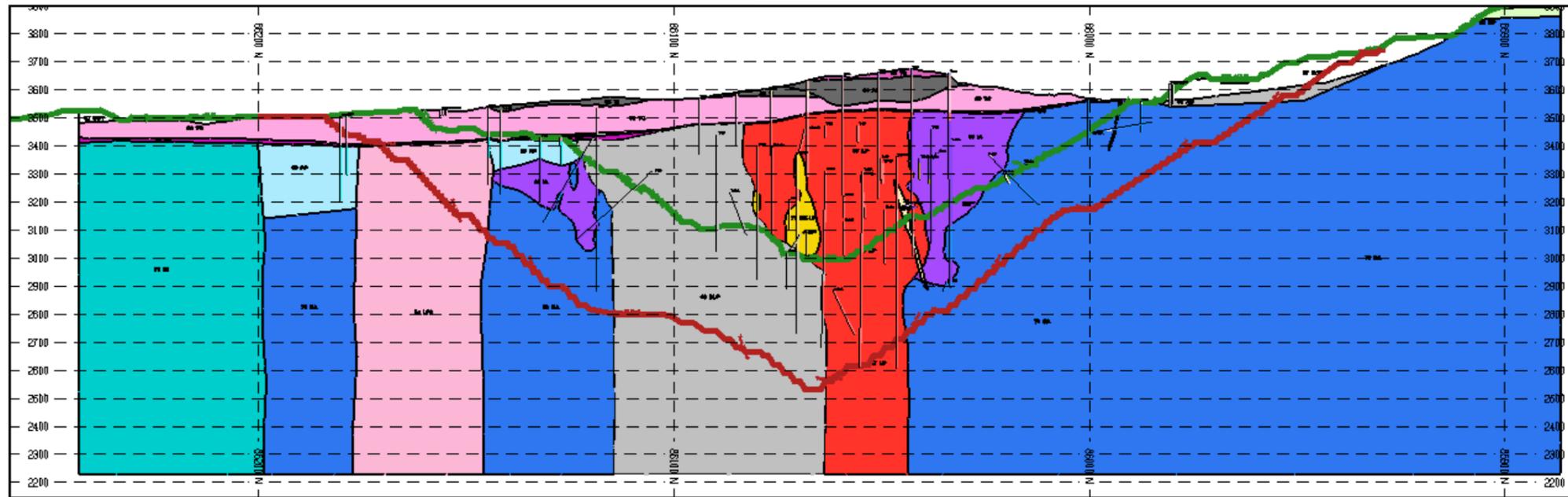
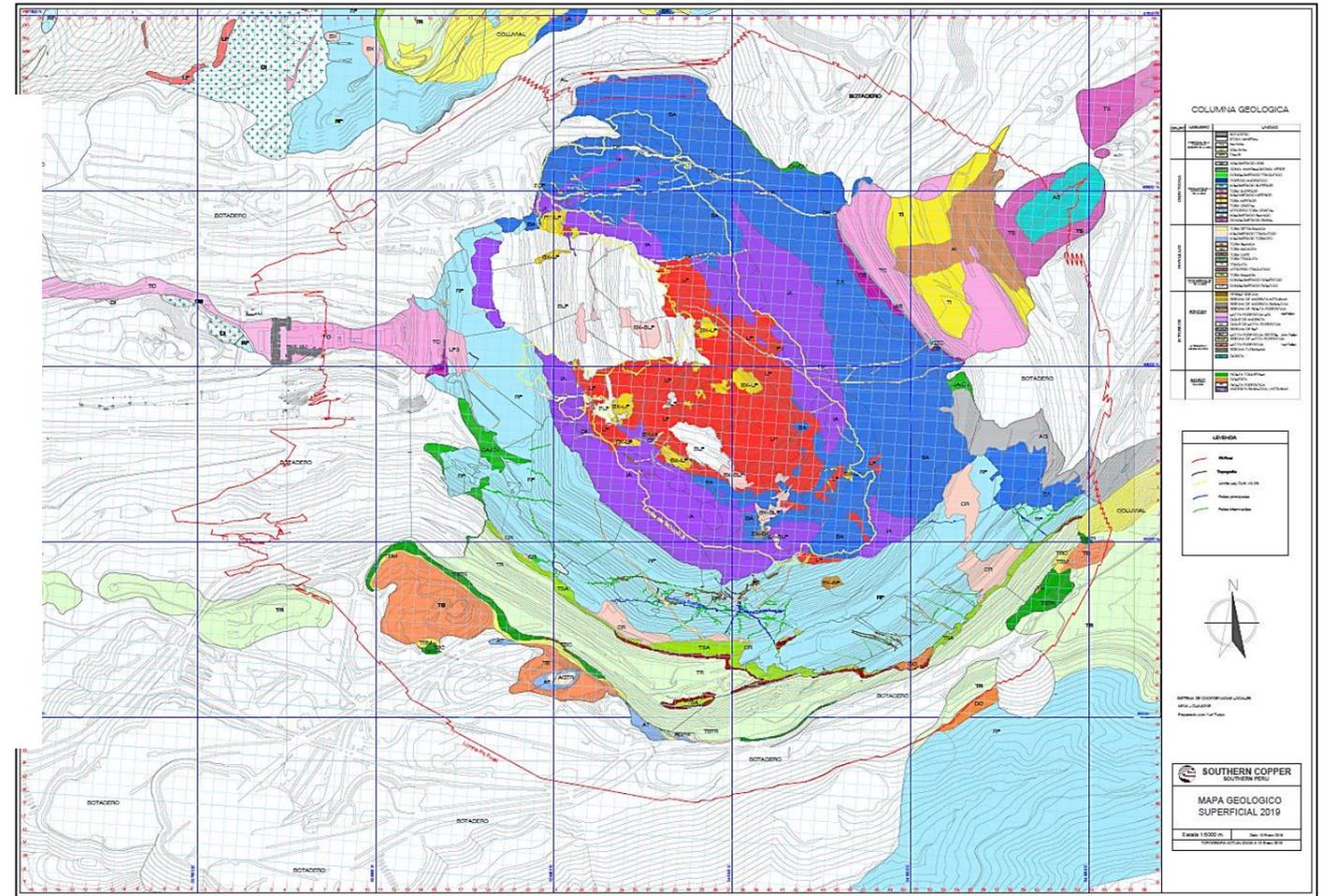
- Tovar Lloclla, F. A. (2015). *Aplicación del Principio de la Velocidad Pico Partícula (VPP), para Minimizar el Daño al Macizo Rocoso-Utilizando Retardos- Veta Lourdes Consorcio Minero Horizonte - La Libertad.* (Tesis de Grado), Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- WSP PERU SA. (19 de Diciembre de 2017). *II Actualización del Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera Cuajone.* Obtenido de [http://www.energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/Estudios\\_Ambientales/PC/PC\\_2da\\_Actualizaci%C3%B3n\\_Unidad\\_Minera\\_Cuajone.pdf](http://www.energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/Estudios_Ambientales/PC/PC_2da_Actualizaci%C3%B3n_Unidad_Minera_Cuajone.pdf)
- Zhang, Z.-X. (2016). *Voladura y Fractura de Rocas (Traducido al español de Rocas Rock Fracture and Blasting Theory and Applications)* (Primera ed.). (A. Wolff, Ed.) Oxford, EE.UU.: Joe Hayton.

## **ANEXOS**

Anexo 1. Vista en Sección del Modelo de Roca

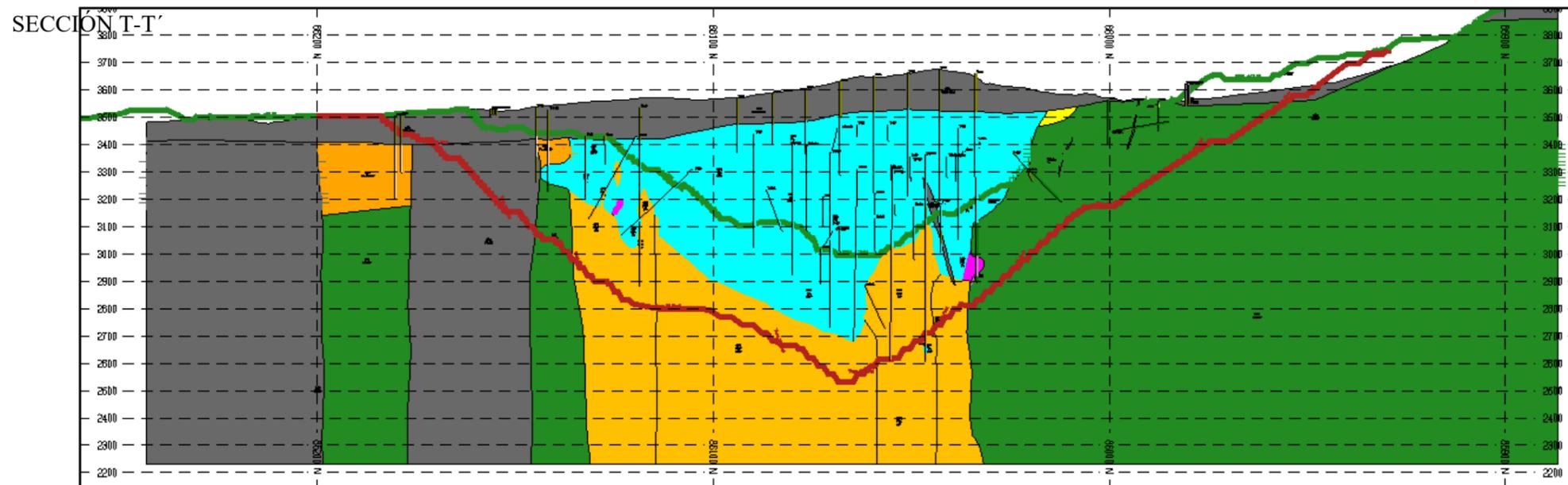
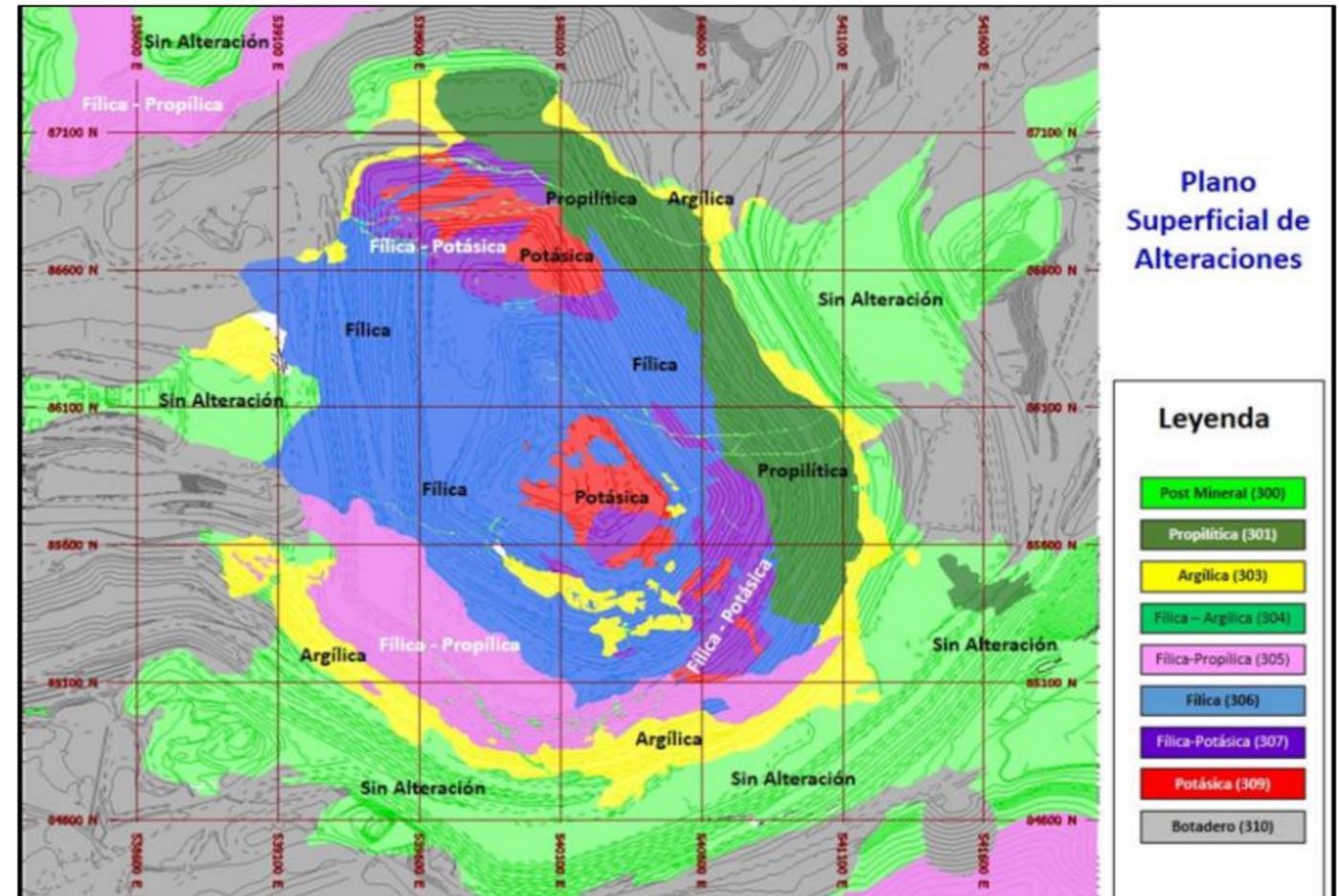
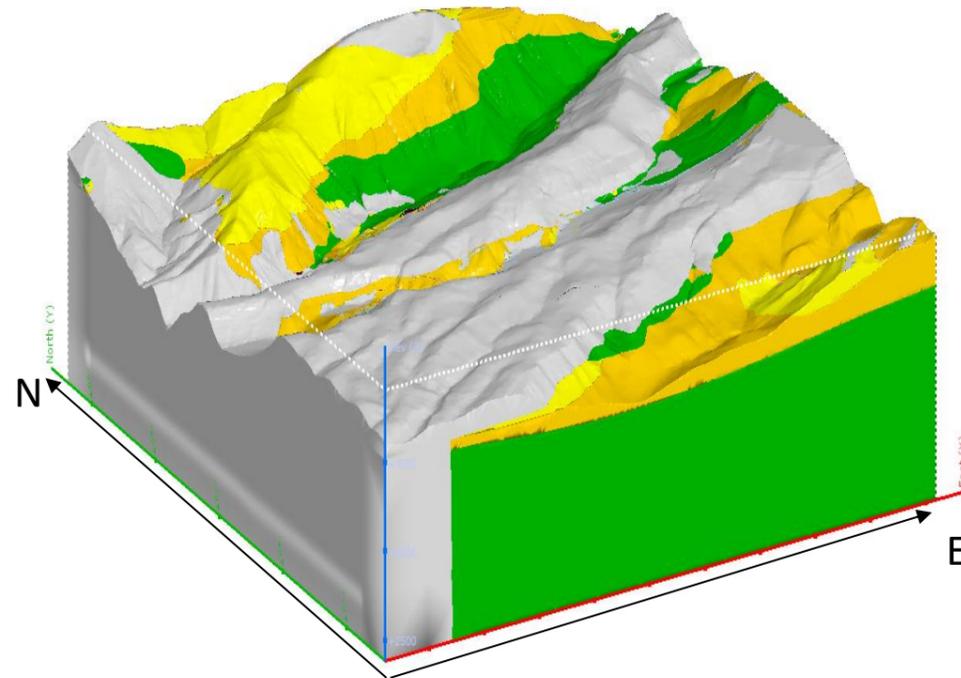


SECCIÓN T-T'



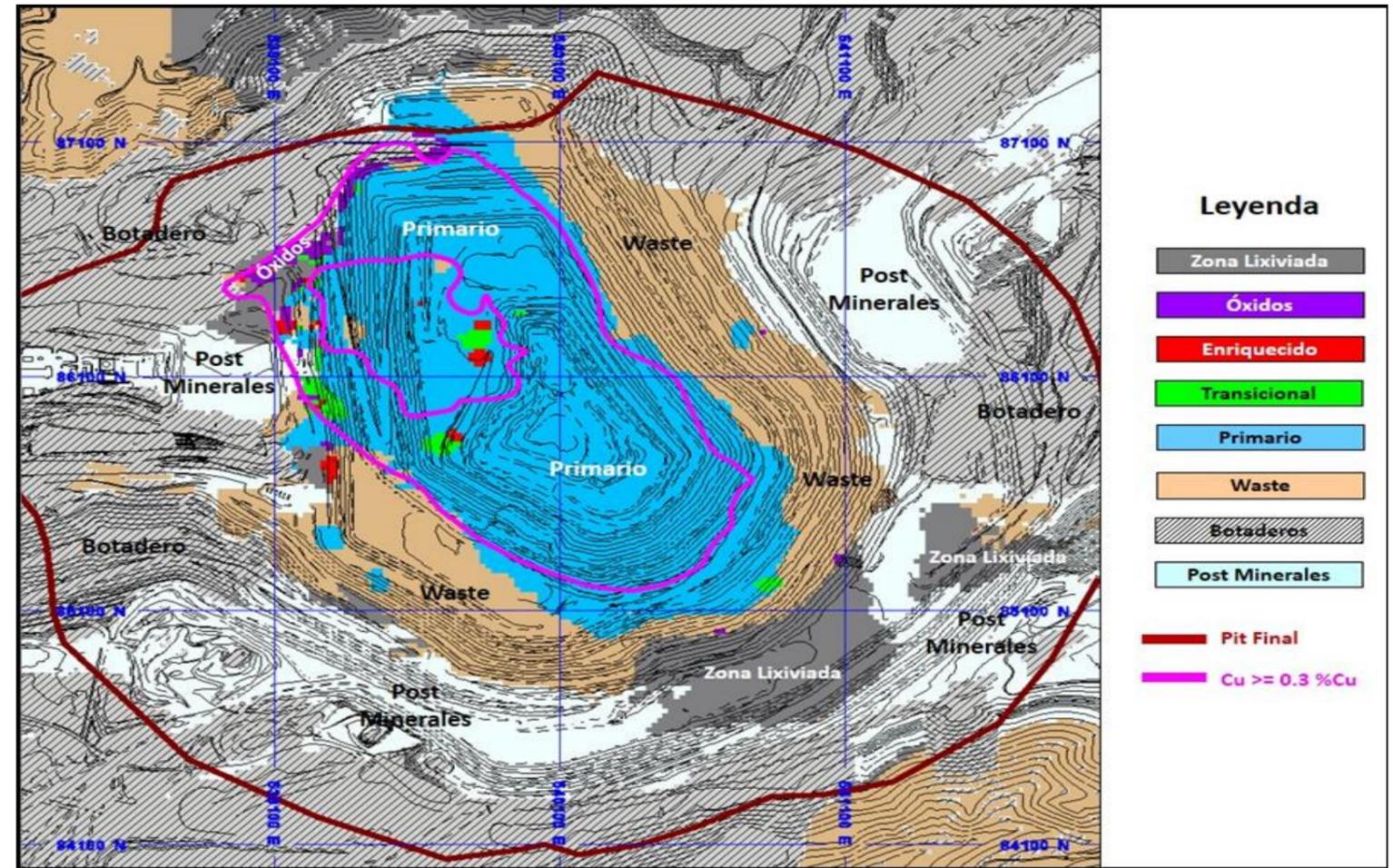
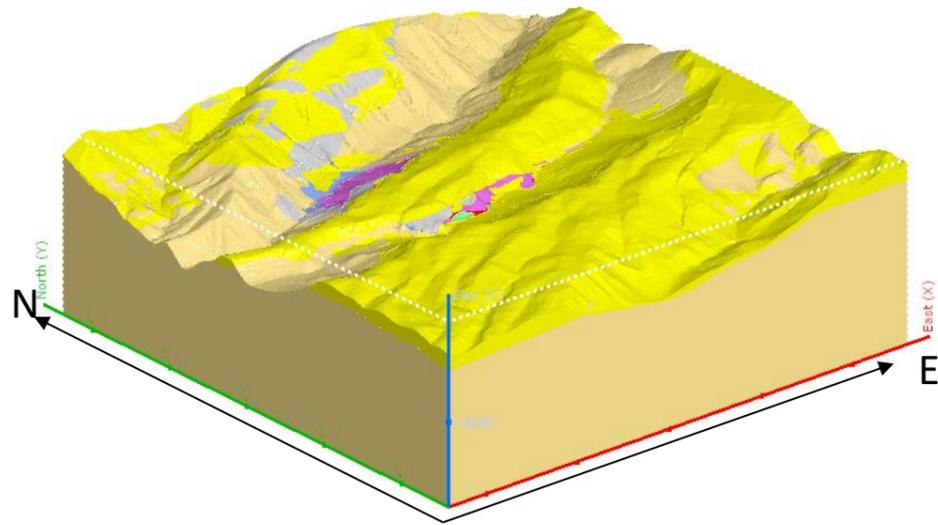
Fuente: Departamento de Geología – Mina Cuajone

Anexo 2. Vista en Sección del Modelo de Alteración

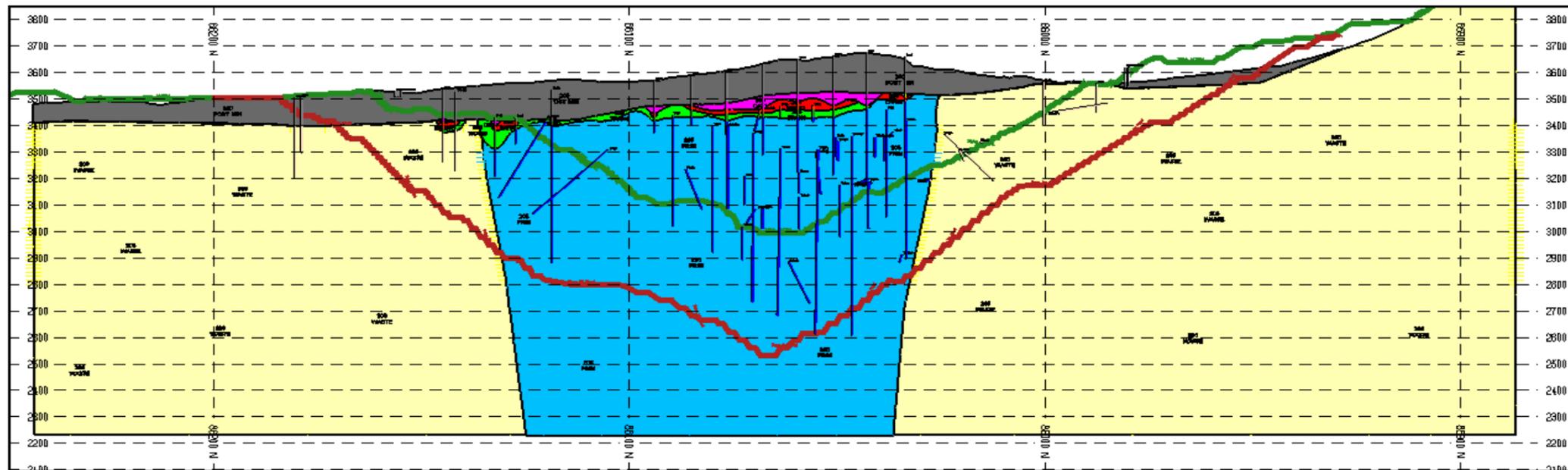


Fuente: Departamento de Geología – Mina Cuajone

Anexo 3. Vista en Sección del Modelo de Mineralización

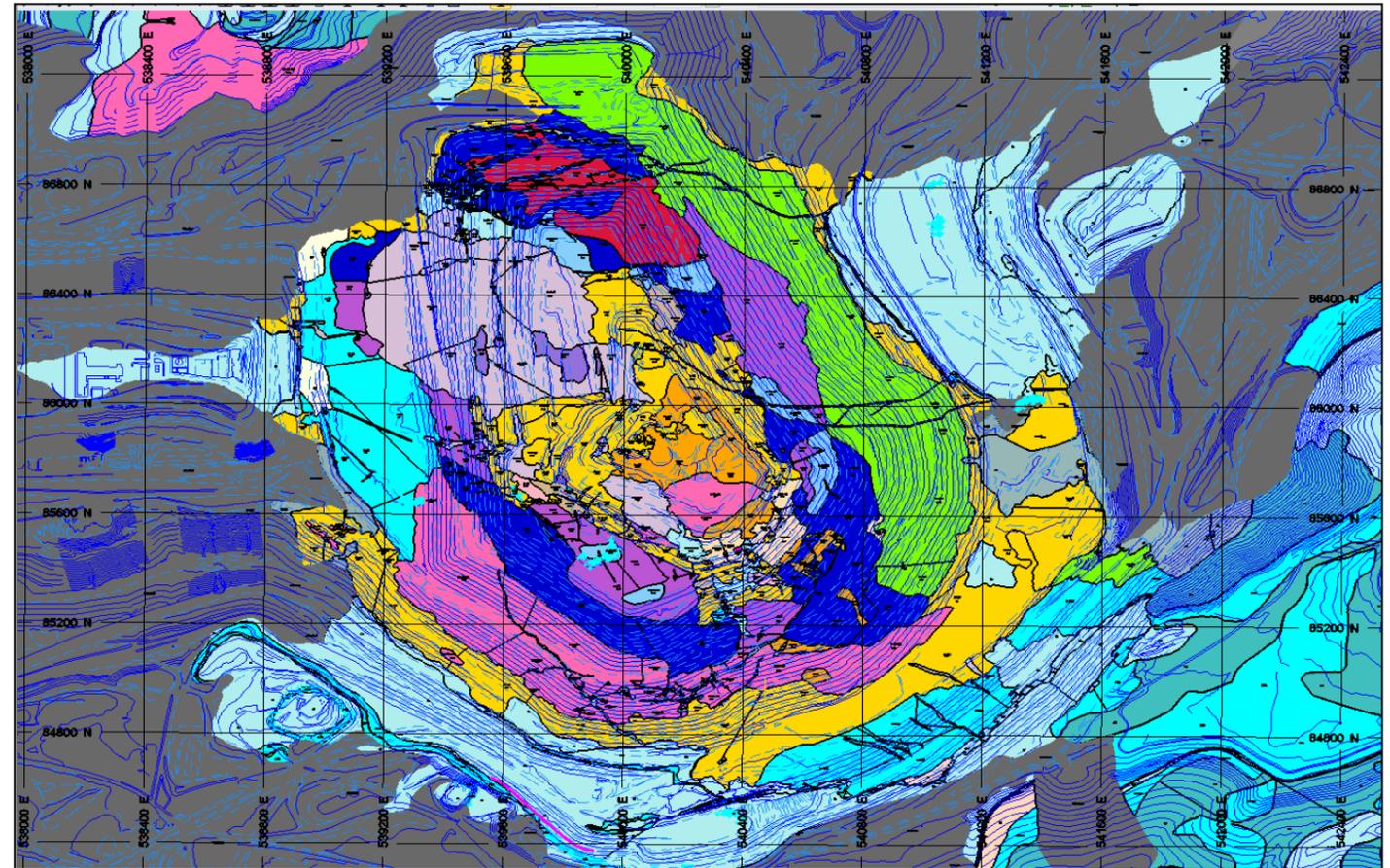
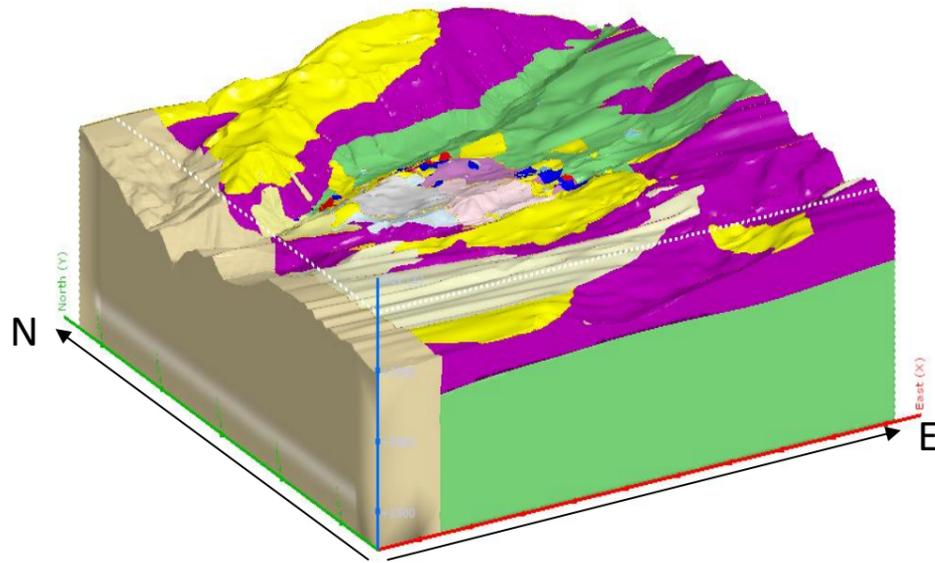


SECCIÓN T-T'

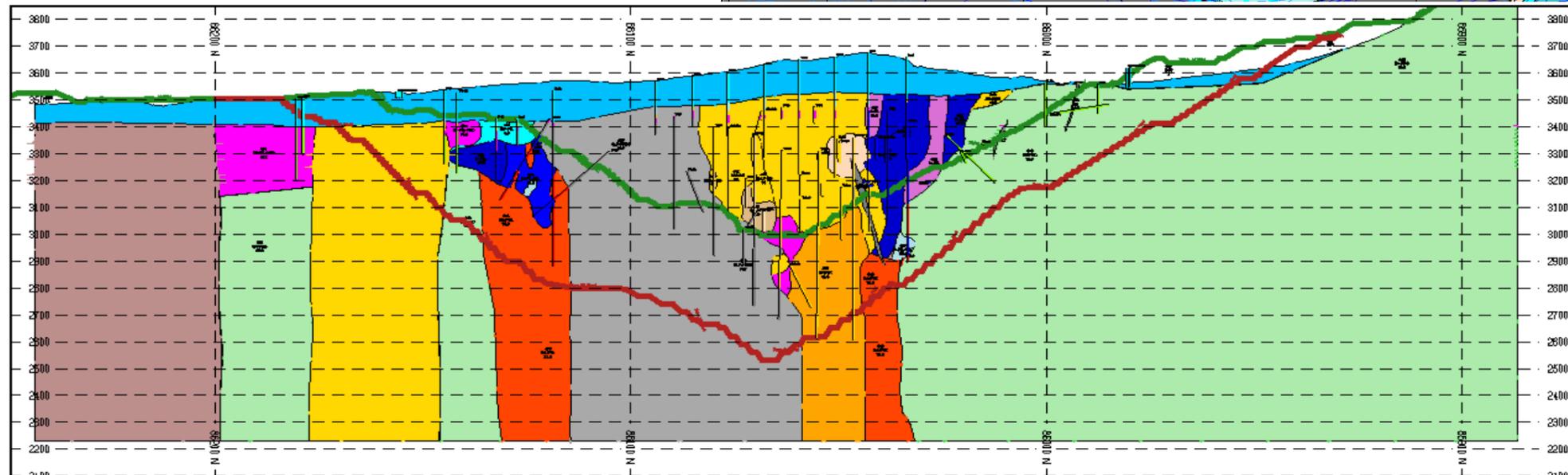


Fuente: Departamento de Geología – Mina Cuajone

Anexo 4. Vista en Sección del Modelo de Work Index

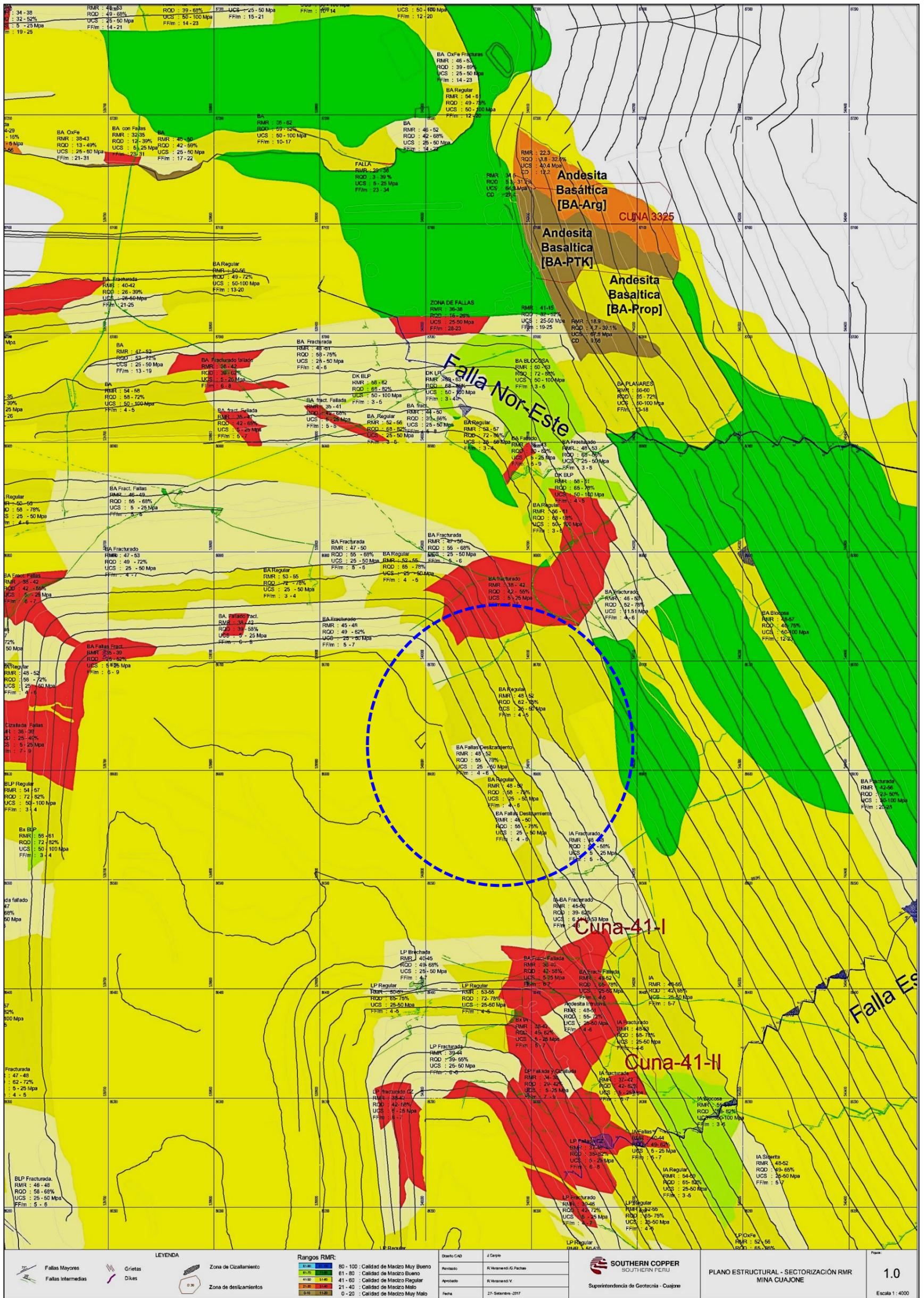


SECCIÓN T-T'



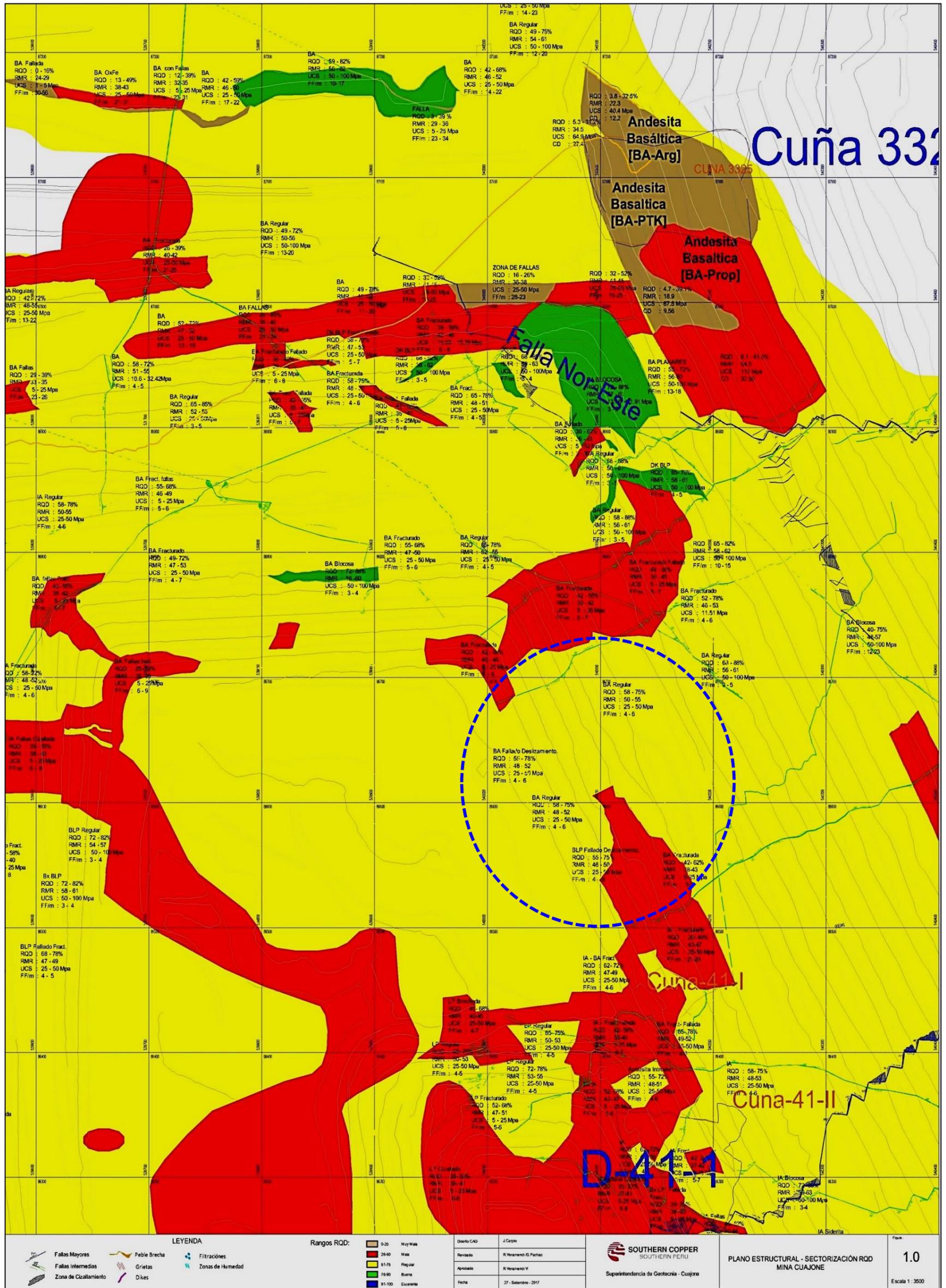
Fuente: Departamento de Geología – Mina Cuajone

Anexo 5. Plano de Caracterización RMR de Mina Cujajone al 27/09/2017



Fuente: Departamento de Geotecnia SPCC (2018).

Anexo 6. Plano de Caracterización RQD de Mina Cujajone al 27/09/2017



Fuente: Departamento de Geotecnia SPCC (2018).

## Anexo 7. Ensayos de Laboratorio y Propiedades de la Roca Intacta del Tajo

Unidades Geotécnicas Básicas				Propiedades Índice		Ensayos Mecánicos		Propiedades Mecánicas		Propiedades Mecánicas Dinámicas		Roca Intacta		Módulos Dinámicos	
Litología	Alteración	Mineralización	Unidad Geotécnica	$\gamma$	$n$	$TI$	$UCS$	$E$	$\nu$	$Ed$	$vd$	$mi$	$\sigma_{ci}$	$V_p$	$V_s$
				(Ton/m3)	(%)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(Mpa)	(m/s)	(m/s)		
Latita	Fresca-Fílica	Primario-Waste	UGB 1	2.65	2.4	6.69	79.6	32.2	0.23	79.5	0.2	16.05	89.91	5684.07	3473
	Potásica	Primario	UGB 2	2.61	2.4	5.9	103.6	45.7	0.23	67.2	0.2	13.39	94.32	5228.48	3189.56
Riolita Porfírica	Fílica Argílica	Primario-Waste	UGB 3	2.58	3.6	8.97	72.9	26.7	0.18	44.3	0.25	8.71	73.36	4383.6	2521.34
	Argílica	Ox-Lix-Enr-Trans	UGB 4	2.54	3.2	5.74	28.8	45.8	0.14	60.5	0.24	14.8	31.14	5177.92	3028.59
	Propilítica Pro.Fílica	Waste	UGB 5	2.62	2	7.24	122.5	55	0.23	67.4	0.22	18.29	128.72	5352.71	3193.64
Andesita Basáltica	Propilítica Fílica_Potásica	Primario-Waste	UGB 6	2.74	2.3	6.36	78.5	25.4	0.19	74.2	0.22	13.59	86.56	5362.88	3215.82
	Potásica	Primario	UGB 7	2.74	3	4.95	86.3	32.1	0.23	81.4	0.2	18.71	92.62	5704.47	3496.42
	Propilítica	Waste	UGB 8	2.78	1.3	8.9	133.9	56.4	0.23	85.84	0.23	15.69	135.38	5943.25	3494.91
Andesita Intrusiva	Fílica	Primario-Waste	UGB 9	2.73	3	5.3	69.7	28	0.25	65.1	0.24	12.95	68.19	5239.05	3067.33
	Propilítica	Waste	UGB 10	2.69	2.2	11.7	175	57.7	0.26	62.8	0.25	15.49	171.01	5252.89	3019.73
Brecha de Andesita	Fílica	Waste	UGB 11	2.77	1.8	6.07	204.8	54.6	0.25	80.1	0.23	9.29	190.92	5725.26	3375.24
		Primario	UGB 12	2.67	2.6	4.02	121.1	51.7	0.26	68.4	0.2	19.16	84.77	5319.55	3250.46
Toba Inferior	-	-	UGB 13	1.93	26.9	0.87	17.5	5.1	0.16	12.6	0.24	8.97	15.25	2792.08	1615.41
Toba Cristal	-	-	UGB 14	2.29	7.7	2.95	83.7	26.2	0.29	15.2	0.3	28.55	80.38	2904.08	1527.4
Conglomerado	-	-	UGB 15	1.68	9.9	-	-	-	-	-	-	-	-	2678.66	1895.86
Traquita (Toba)	-	-	UGB 16	2.29	6.4	6.04	123	39.6	0.22	38.1	0.23	21.13	134.27	4307.87	2548.92
Toba Blanca	-	-	UGB 17	1.76	25.3	2.3	15.3	4.1	0.23	7.1	0.26	6.25	15.21	2223.74	1214.35
Toba Salmón	-	-	UGB 18	1.74	20.7	1.6	21.9	8.5	0.25	11.8	0.22	5.75	19.63	2678.66	1595.86
Vitrófiro	-	-	UGB 19	2.35	1.9	5.92	83.1	39.9	0.22	49.1	0.22	14.53	86.36	4912.21	2909.86

**Nota:** UCS: Resistencia de la compresión uniaxial. TI: Tracción indirecta ("método brasileño")  $\gamma$ : Peso unitario del macizo rocoso.  $mi$ : Parámetro de la roca intacta del criterio Hoek & Brown.  $\sigma_{ci}$ : Resistencia en compresión uniaxial de la roca "intacta" definido. **Fuente:** Departamento de Geotecnia SPCC (2018).

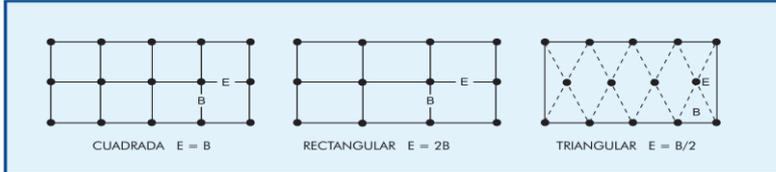
## Anexo 8. Diseños de Mallas de Perforación.



### d. Malla

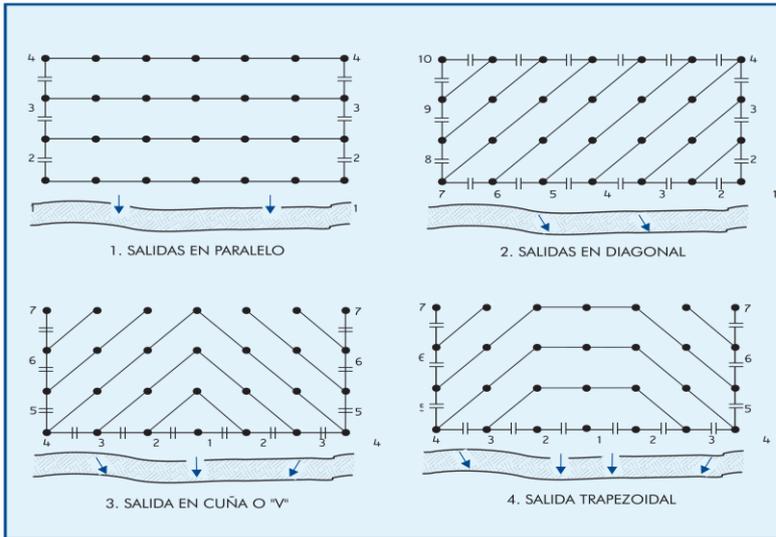
Es la forma en la que se distribuyen los taladros de una voladura, considerando básicamente a la relación de burden y espaciamiento y su directa vinculación con la profundidad de taladros.

En el diseño de una voladura de banco se puede aplicar diferentes trazos para la perforación, denominándose malla cuadrada, rectangular y triangular o alterna, basándose en la dimensión del burden.



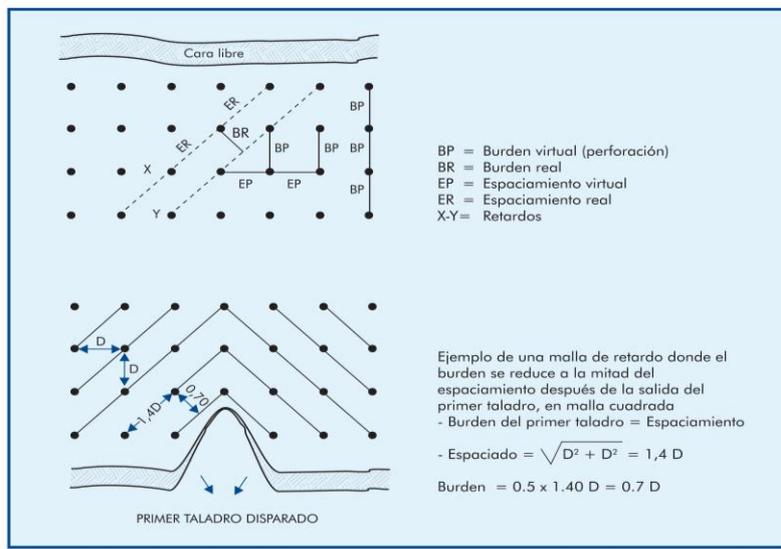
Distintas formas de amarre de los accesorios y diferentes tiempos de encendido de los taladros se aplican para obtener la más conveniente fragmentación y forma de acumulación de la pila del material roto para las posteriores operaciones de carguío y transporte del material volado.

Los diseños de amarre de las conexiones entre taladros de los trazos de perforación anteriores, determinan el diseño de mallas de salida, siendo las más empleadas la longitudinal, cuña, diagonal (echelón) trapezoidal y las combinadas. Ejemplos con malla cuadrada.



El burden virtual o de perforación se mantiene invariable si se disparan todos los taladros de una voladura simultáneamente, ya que los taladros no tienen retardos. Esto se aprecia en la malla paralela. El burden, puede sin embargo, variar según como sea la

distribución de los tiempos de encendido de los taladros cuando se utilicen detonadores de retardo, dando lugar al burden "real" o efectivo, de menor longitud que el virtual, como se observa en las salidas diagonales en el gráfico.



Fuente: (EXSA S.A., 2018)



## Anexo 10. Procedimiento para Instalación de Geófono Estándar.

### *Procedimiento para Instalación del Geófono Standar*

- **Determinación de la ubicación del Geófono; como primera prioridad deben ser ubicados cercanos a la pared del talud, para controlar el daño a estos, también pueden colocarse en la dirección de la patada para medir el máximo VPP del disparo; siempre teniendo en cuenta la seguridad del Sismógrafo.**
- **Se debe tener en cuenta los siguientes criterios para su ubicación:  
La distancia medida debe ser perpendicular al lado más próximo del proyecto de voladura.  
Los sismógrafos deben ser ubicados a un mínimo de 50m. para el control de taludes.  
Se colocara el sismógrafo a 50m, para el modelamiento de los PPV.**
- **La instalación del Geófono en terreno compacto se cava unos 15cm. a 20cm. se coloca el Geófono asentándolo bien en la roca.**



- **Colocar el Geófono con la flecha en dirección perpendicular al lado más próximo al proyecto de voladura, excepto cuando esta ubicado en la dirección diagonal de la malla, en este caso la flecha debe coincidir con la diagonal; luego compactar y rellenar con material detritus por los costados, y colocar un peso de aproximado de 5Kg. encima del Geófono (bolsa con arena).**
- **Configurar el Sismógrafo, con los parámetros adecuados para la medición (nivel de trigger, máximo rango, tiempo de grabación, fecha y hora); teniendo en cuenta el nivel de batería y la capacidad de la memoria.**
- **Conectar el Geófono al Sismógrafo, en el puerto adecuado llamado GEO.**
- **Encender el sismógrafo e iniciar el monitoreo, de preferencia minutos antes del disparo; para que éste no sea activado por el paso de camionetas u otros equipos.**
- **Cubrir el Geófono y sismógrafo con una caja de acero, para evitar que estos sean dañados por la proyección de rocas del disparo, y señalar el lugar con conos, letreros y/o pintura.**
- **Después de realizar el monitoreo, apagar el Sismógrafo, y descubrir el Geófono teniendo cuidado de que éste sea dañado.**



58

Fuente: Tutorial EXSA S.A. (2013).

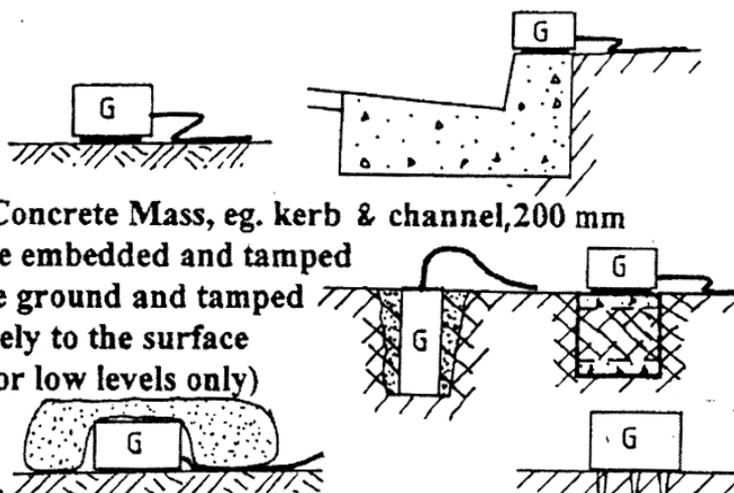
## 1. GEOPHONE ATTACHMENT

Insecure Geophone mounting results in higher vibration levels. Geophones should be oriented in the direction of the blast.

### Recommended

Plastibonded to :

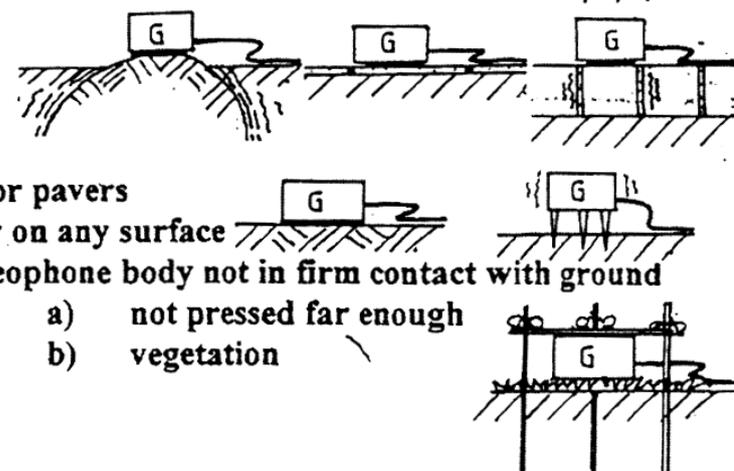
- Solid Rock
- Substantial Concrete Mass, eg. kerb & channel, 200 mm concrete cube embedded and tamped
- Sunk into the ground and tamped
- Spiked securely to the surface
- Sand bags (for low levels only)



### Not Recommended

Plastibonded to :

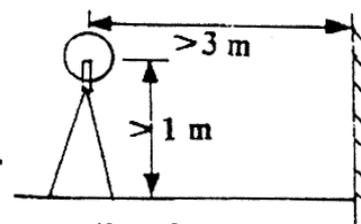
- Loose Rock
- Thin concrete
- Loose bricks or pavers
- Sitting loosely on any surface
- Spiked, but geophone body not in firm contact with ground because of
  - a) not pressed far enough
  - b) vegetation



## 2. MICROPHONE

Microphone should be :

- at least 1 m above ground surface
- 3 m away from buildings, fences, etc.
- fitted with a windshield
- oriented to be most uniformly sensitive to vibration.
- Secured to prevent being blown over.



Fuente: Blast Vibration Course (TERROCK)

## Anexo 12. Tipos de Investigación Científica.



Fuente: Robles (2019).

## Anexo 13. Tipos de Investigación.



Fuente: Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista (2014).

### Anexo 14. Base de Dato de Vibraciones de Fase 6A antes de las Pruebas.

 Resumen de Vibraciones de Fase 6A - Año 2017 (Antes de las Pruebas) <span style="float: right;">Formato: SIVE-CUA-045</span>									
Fecha	Fase	Nivel	Proyecto	Tipo de Roca	Distancia de Monitoreo (m)	VPP Registrado	VPP Límite	N° Taladros	Carga Operante Estática (Kg)
26/01/2017	6A	3160	621	BX-BLP	50.0	220.0	157.0	200	1172
31/01/2017	6A	3160	630	IA-FIL-PTK	50.0	75.0	118.0	52	1082
02/02/2017	6A	3160	620	BX-BLP	50.0	245.9	157.0	66	1172
04/02/2017	6A	3145	604	BA-PTK	50.0	178.7	151.0	261	1082
07/02/2017	6A	3145	606	BA-PTK	50.0	132.0	151.0	203	1078
12/02/2017	6A	3145	605	BA-PTK	50.0	206.0	151.0	156	1027
19/02/2017	6A	3145	607/608	BA-PTK	50.0	116.0	151.0	440	1027
01/03/2017	6A	3145	609	BA-PTK	50.0	122.0	151.0	188	1027
04/03/2017	6A	3160	619	BLP-FRES	50.0	73.6	118.0	292	1172
16/03/2017	6A	3145	610	BA-PTK	50.0	203.0	151.0	266	975
04/04/2017	6A	3130	601	BA-PTK	50.0	214.0	151.0	333	975
08/04/2017	6A	3145	613	BLP-FRES	50.0	192.0	118.0	238	975
11/04/2017	6A	3130	602	BA-PTK	50.0	160.0	151.0	315	975
22/04/2017	6A	3130	604	BA-PTK	50.0	190.0	151.0	157	1027
01/05/2017	6A	3145	617	BX-BLP-FRES	50.0	133.0	157.0	288	1172
05/05/2017	6A	3145	615	BLP-FRES	50.0	82.6	118.0	206	1016
11/05/2017	6A	3145	616	BLP-FRES	50.0	103.0	118.0	182	1016
13/05/2017	6A	3130	606	BA-PTK	50.0	216.0	151.0	168	1027
20/05/2017	6A	3325	656	RP-FIL-PRO	50.0	216.0	162.0	246	860
25/05/2017	6A	3130	610	BA-PTK	50.0	95.0	151.0	245	1016
20/06/2017	6A	3115	601	IA-FIL-PTK	50.0	113.0	118.0	254	964
04/07/2017	6A	3115	604	IA-FIL-PTK	50.0	134.0	118.0	146	964
09/07/2017	6A	3115	605	IA-FIL-PTK	50.0	200.0	118.0	148	964

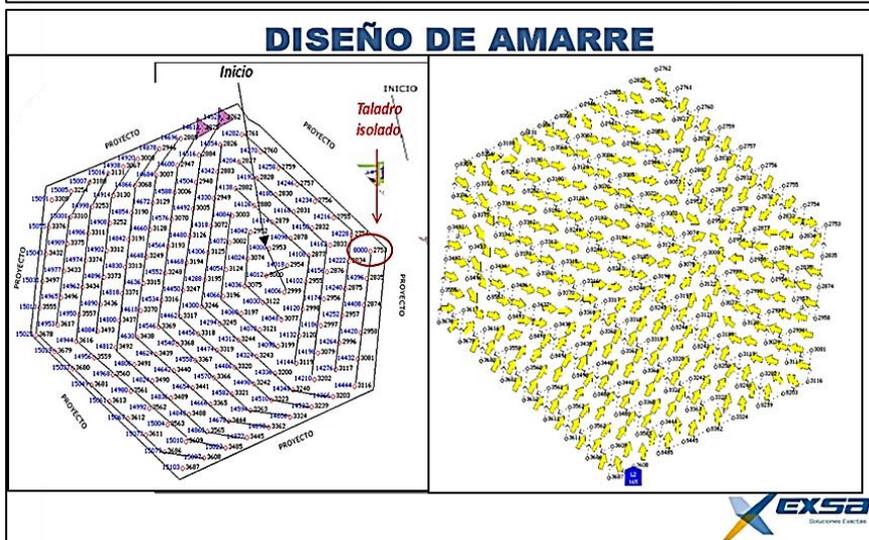
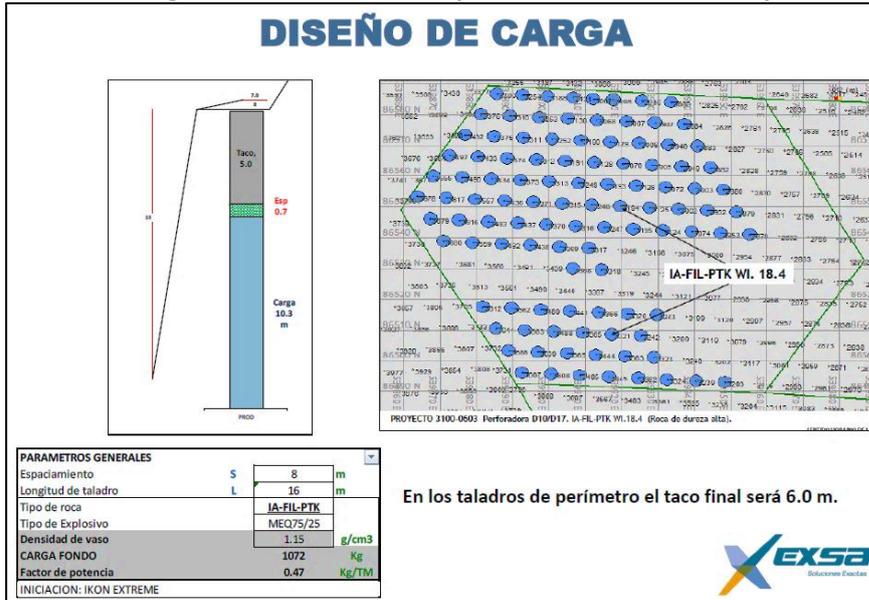
Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

### Anexo 15. VPP Límites por Tipo de Roca.

LITOLOGÍA	ALTERACIÓN	TIPO DE MATERIAL	UNIDAD GEOTÉCNICA BÁSICA	ENSAYOS MECÁNICOS	PROPIEDADES MECÁNICAS DINÁMICAS	MÓDULOS DINÁMICOS		VPP Crit	VPP crit/4
				UCS	E	Velocidad (m/s)		mm/s	mm/s
				Mpa	Gpa	Vp	Vs		
LATITA	FRESCA - FILICA	PRIMARIO - WASTE	UGB1	79.6	79.5	5684.07	3473	474	118
	POTÁSICA	PRIMARIO	UGB2	103.6	67.2	5228.48	3189.56	537	134
RIOLITA PORFIRITICA	FILICA - ARGILICA	PRIMARIO - WASTE	UGB3	72.9	44.3	4383.6	2521.34	481	120
	ARGILICA	OX-LIX-ENR-TRANS	UGB4	28.8	60.5	5177.92	3028.59	246	61
	PROPILITICA - PRO. FILICA	WASTE	UGB5	122.5	67.4	5352.71	3193.64	649	162
ANDESITA BASALTICA	PROPILITICA-FILICA_POTÁSICA	PRIMARIO - WASTE	UGB6	78.5	74.2	5362.88	3215.82	378	94
	POTÁSICA	PRIMARIO	UGB7	86.3	81.4	5704.47	3496.42	605	151
	PROPILITICA	WASTE	UGB8	133.9	85.84	5943.25	3494.91	927	231
ANDESITA INTRISUVA	FILICA - ARGILICA	PRIMARIO - WASTE	UGB9	69.7	65.1	5239.05	3067.33	374	93
	PROPILITICA	WASTE	UGB10	175	62.8	5252.89	3019.73	915	228
BRECHA ANDESITA	FILICA	WASTE	UGB11	204.8	80.1	5725.26	3375.24	915	228
	FILICA		UGB12	121.1	68.4	5319.55	3250.46	628	157
TOBA INFERIOR			UGB13	17.5	12.6	2792.25	1615.41	323	80
TOBA CRISTAL			UGB14	83.7	15.2	2904.08	1527.4	1066	266
CONGLOMERADO			UGB15	-	-	2289.22	1423.35		
TRAQUITA (Toba)			UGB16	123	38.1	4307.87	2548.92	869	217
TOBA BLANCA			UGB17	15.3	7.1	2223.74	1214.35	369	92
TOBA SALMON			UGB18	21.9	11.8	2678.66	1595.86	331	82
VITROFIRO			UGB19	83.1	49.1	4912.21	2909.86	554	138

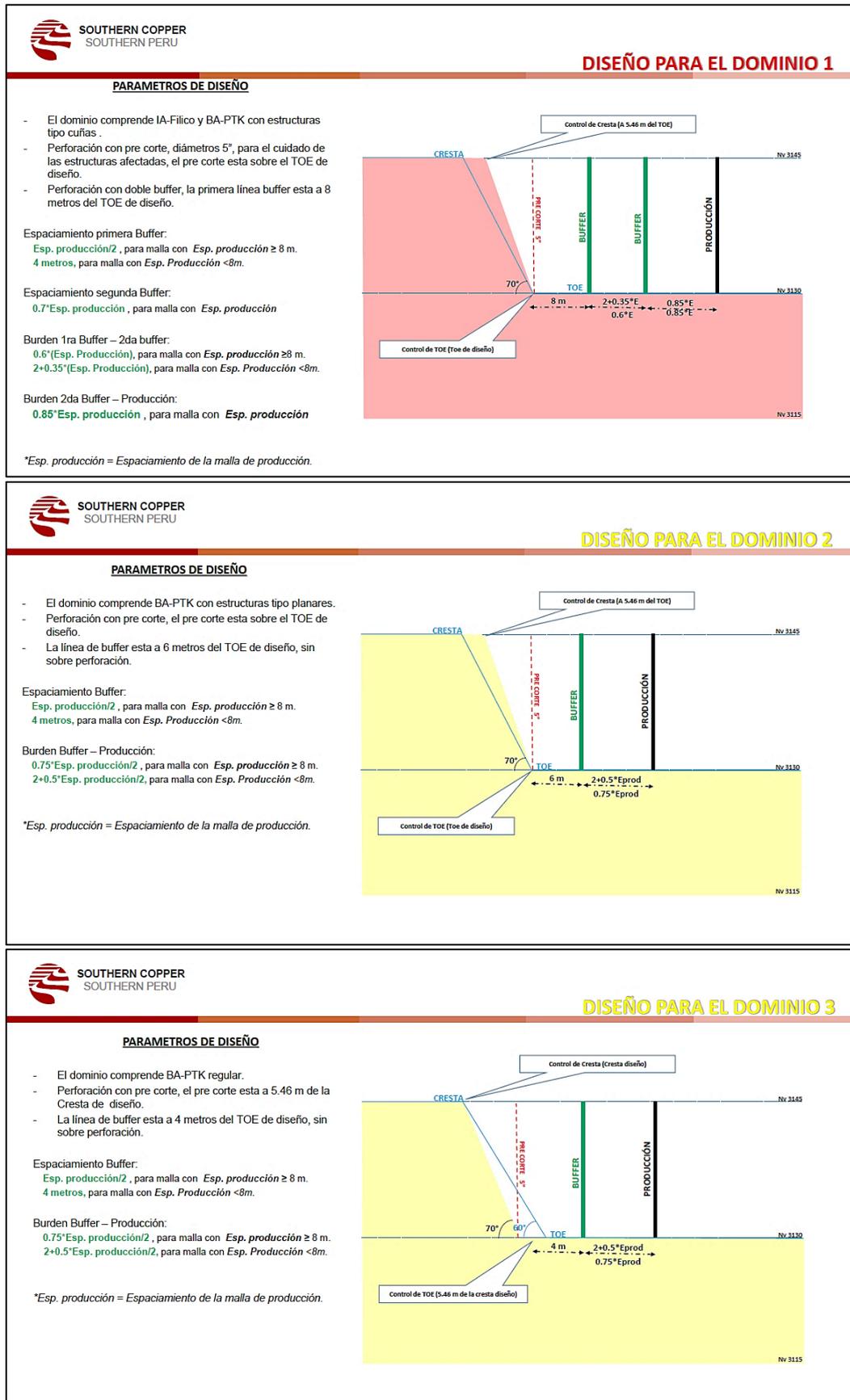
Fuente: Departamento de Geotecnia Cuajone (2018).

Anexo 16. Diseño de Carga, Diseño de Amarre y Post Voladura del Proyecto 3100-603.

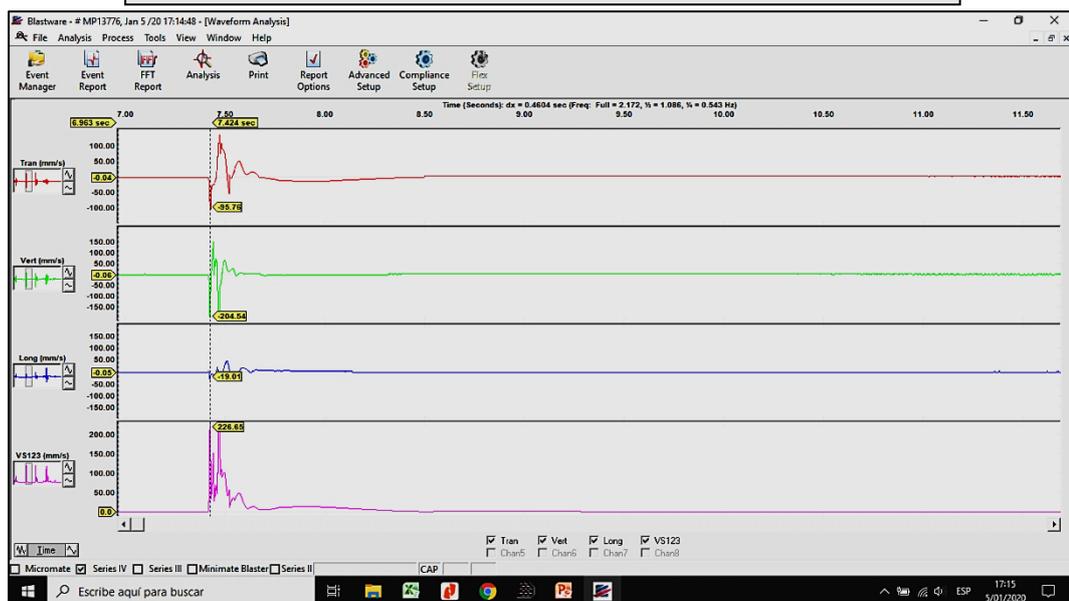
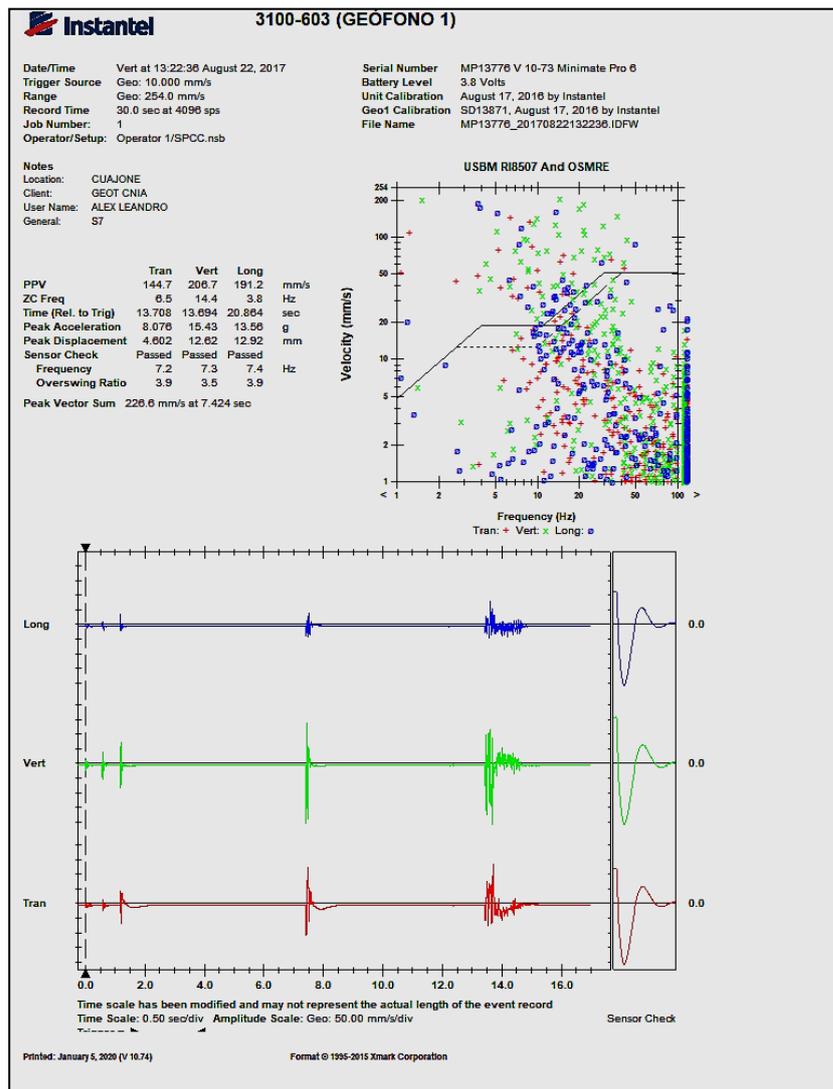


Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 17. Parámetros de Diseño de Perforación de la Zona de Estudio.

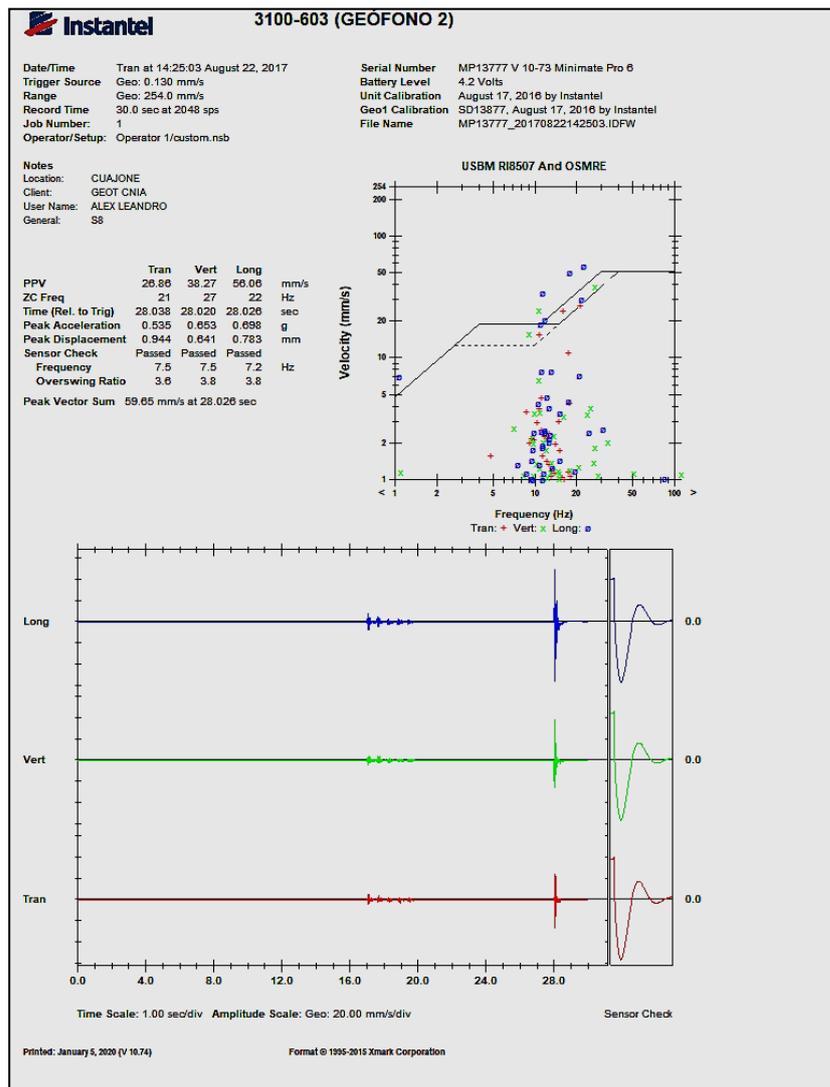


## Anexo 18. Registro de Vibraciones en Estación 01 (A 180 m).



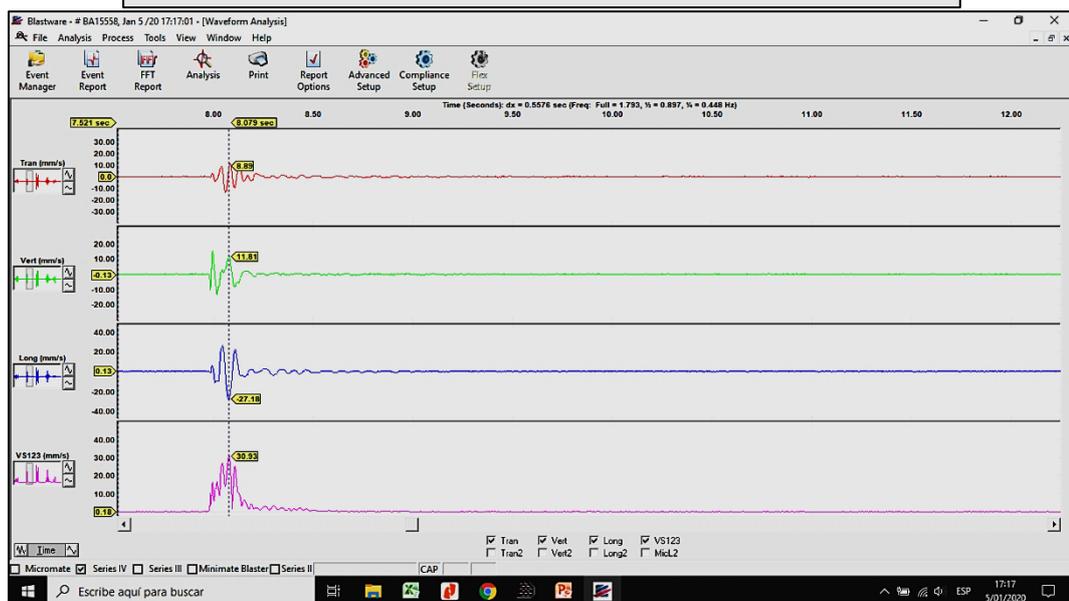
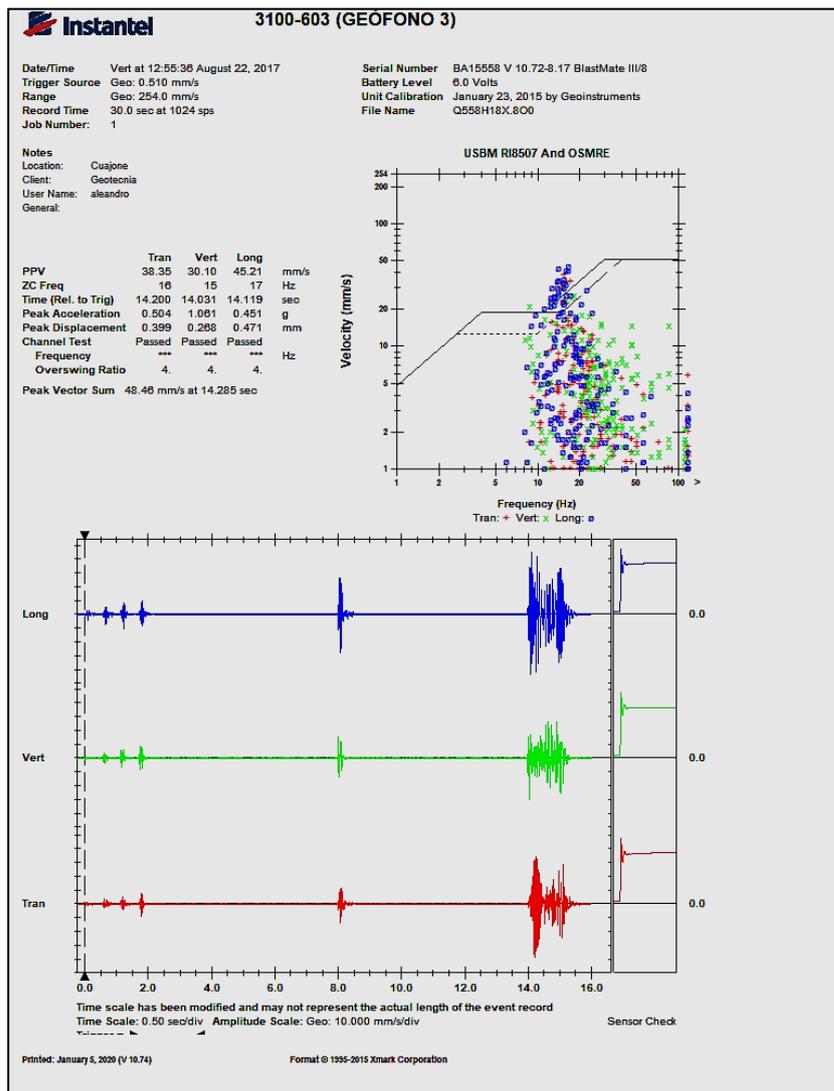
Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 19. Registro de Vibraciones en Estación 02 (A 360 m).



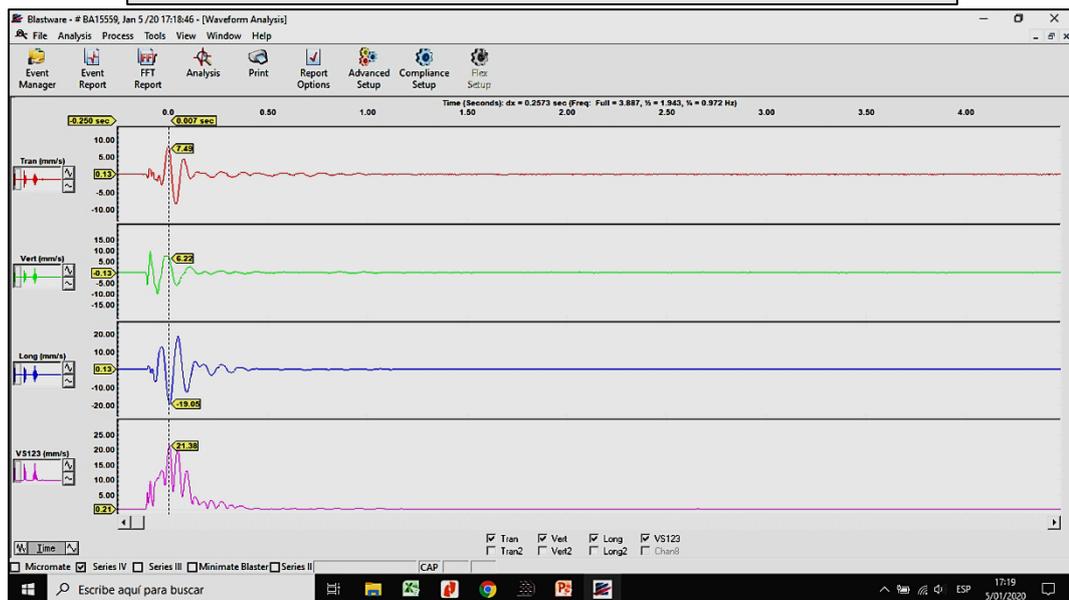
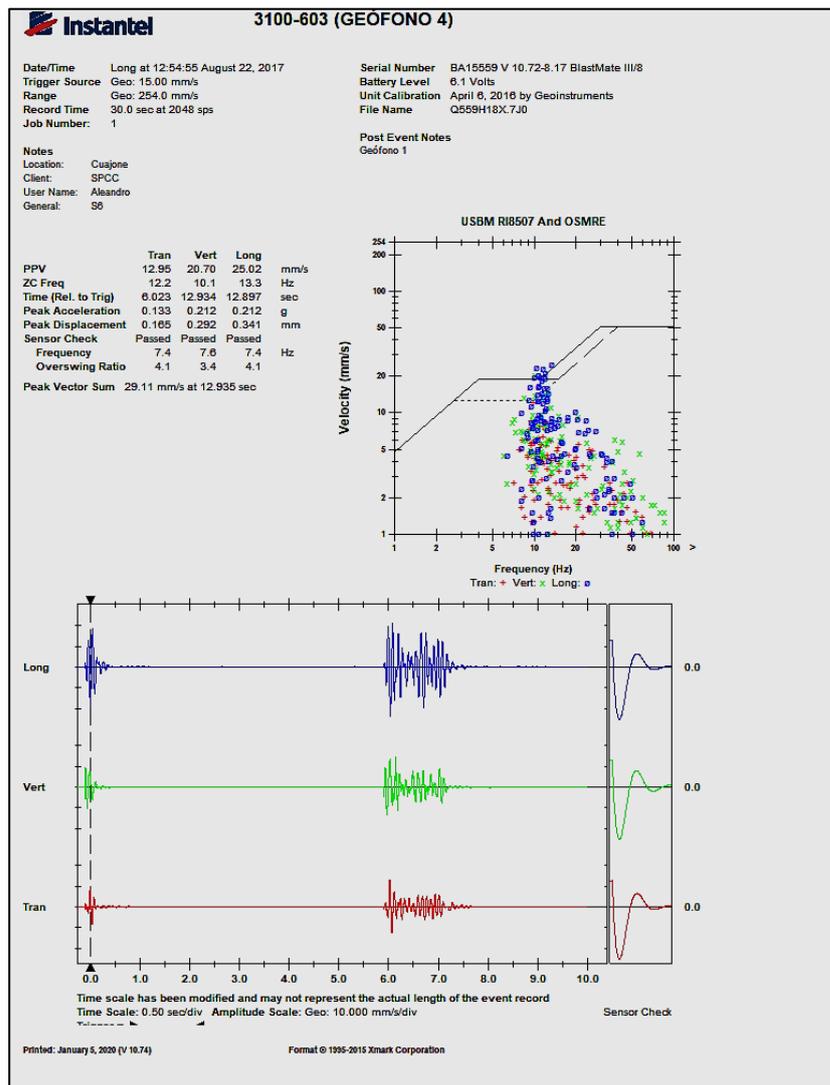
Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 20. Registro de Vibraciones en Estación 03 (A 515 m).



Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 21. Registro de Vibraciones en Estación 04 (A 680 m).



Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 22. Valores Límites de Desplazamiento para Georadar.

TALUD	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (cms/día)	CONDICIONES DE TERRENO	DESARROLLO DE LA EXPLOTACION Y/O ACCESO
ACCESOS FONDO DE MINA, FASE 5, FASE 6A	< a 5 cms/día	No se presentan caídas de material condición estable	Libre acceso
	5 a 10 cms/día	Esporádica caída de materiales se construye pretil de seguridad, condición Transgresiva	Libre acceso
		Constante caída de material pretil de seguridad construido, agrietamientos incipientes. Condición Transgresiva	Se restringe acceso a vehículo menor
	10 a 15 cms/día	Esporádica caída de materiales pretil de seguridad construido evolución de agrietamientos, condición Transgresiva	Sin acceso a vehículo menor, reparación de acceso si es necesario.
Constante caída de material, grietas y asentamientos leves en acceso, condición Transgresiva.		Se restringe acceso y se repara, después de evaluación se decide tipo de restricción a vehículos y equipos	
> a 15 cms/día	Constante caída de material, Grietas y asentamientos continúan evolucionando aún después de reparación condición Crítica.	Se cierra totalmente acceso, evaluación, recomendación y alternativas de solución.	
DESARROLLO DE FASES TALUD SUR OESTE	< a 5 cms/día	No se presentan grietas ni caídas de material condición Estable	Desarrollo normal a todo lo ancho, tanto en carguo como en perforación
	5 a 15 cms/día	No se presentan caída de materiales, Grietas incipientes, pero existe una condición Transgresiva	Desarrollo normal a todo lo ancho, tanto en carguo como en perforación, se mantiene atención en el desarrollo
		Se presentan Grietas en evolución, caídas esporádica de materiales, condición Transgresiva	Desarrollo sólo por franja externa, construcción de pretiles de seguridad para trabajos de perforación y carguo
	15 a 20 cms/día	Caída de materiales intermitente, evolución paulatina de fracturas leve asentamiento en pared, condición Transgresiva.	Desarrollo sólo por franja externa, construcción de pretiles de seguridad para trabajos de perforación y carguo
		Constante caída de material, evolución de fracturamiento y Asentamiento en el talud, condición Progresiva	Extracción por franja externa, se detiene perforación se mantienen pretiles, evaluación.
> a 20 cms/día	Asentamiento diferencial, Constante caída de material, fracturamiento evolucionan y dejan bloques inestables, condición Crítica	Se detiene completamente extracción.	

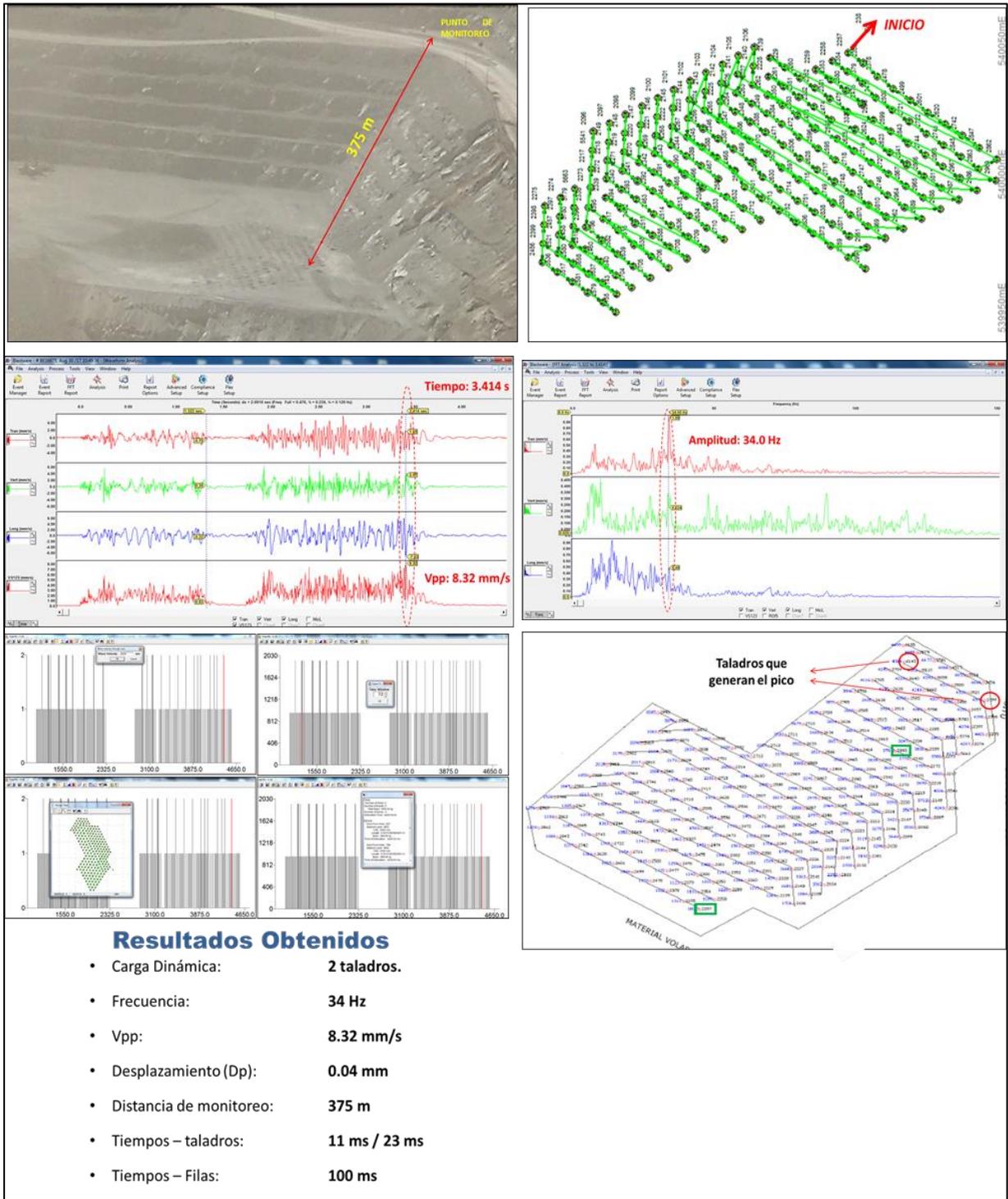
Fuente: Departamento de Geotecnia Cuajone (2017).

## Anexo 23. Base de Datos de Vibraciones y Análisis de Desplazamiento de Partícula en Deslizamiento 50 (Fase 6A) Post Pruebas.

ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTO DE PARTÍCULA																						
Asistencia Técnica: Alfredo Maypú / Miguel Gonzalez																						
Formato: SIVE																						
Fecha Voladura	Fase	Banco	Proyecto	Punto de Monitoreo			Distancia Horizontal al monitor (m.)	Distancia Inclínada al monitor (m.)	Tiempo de Ventana (ms)	Carga Operante Estática (Kg.)	Carga Operante Dinámica (Kg.)	Vpp (mm/s)	Frecuencia Dominante (Hz)	Desplazamiento (mm)	N° de taladros Disparados	Factor de Potencia (Kg/ton)	Esp. (m)	Burden (m)	Tiempo retardo entre taladro (ms)	Tiempo retardo entre filas (ms)	Tipo de Roca	Vp (m/s)
				E	N	COTA																
26/08/2017	6A	3100	602	540062.8	86876	3200	375	388	12	968	1936	8.32	34.00	0.039	222	0.53	7.0	6.1	17	>100	BA-PTK	5239
02/09/2017	6A	3100	605/606	540122.8	86687	3187	125	152	15	967	1167	25.59	15.13	0.269	287	0.59	7.0	6.1	17	>100	BA-PTK	5704
06/09/2017	6A	3100	607	540122.8	86687	3187	191	210	17	1016	2032	9.58	10.38	0.147	195	0.45	8.0	7.0	17	>100	BA-PTK	4500
06/09/2017	6A	3130	625	540122.8	86687	3187	590	593	16	1020	2040	1.25	8.00	0.025	48	0.45	8.0	7.0	17	>100	BLP-FRES	4000
09/09/2017	6A	3100	608	540122.8	86687	3187	299	311	16	1016	2032	4.73	13.75	0.055	81	0.45	8.0	7.0	17	>100	BA-PTK	4500
09/09/2017	6A	3115	617	540122.8	86687	3187	755	758	17	1072	2144	1.16	6.88	0.027	301	0.48	8.0	7.0	17	>100	BLP-FRES	3500
13/09/2017	6A	3115	618	540122.8	86687	3187	844	847	16	1068	2136	1.01	7.25	0.022	300	0.48	8.0	7.0	17	>100	BX-LP-QS	4500
18/09/2017	6A	3115	619	540122.8	86687	3187	716	720	16	1068	2136	2.57	6.25	0.065	169	0.48	8.0	7.0	17	>100	BLP-FRES	5684
20/09/2017	6A	3115	615	540122.8	86687	3187	400	406	30	1071	3215	3.23	12.13	0.042	180	0.48	8.0	7.0	17	>100	BLP-FRES	5684
23/09/2017	6A	3115	616	540122.8	86687	3187	550	555	30	985	2955	2.88	6.38	0.072	345	0.67	6.5	5.7	17	>100	BX-BLP-FRES	4500

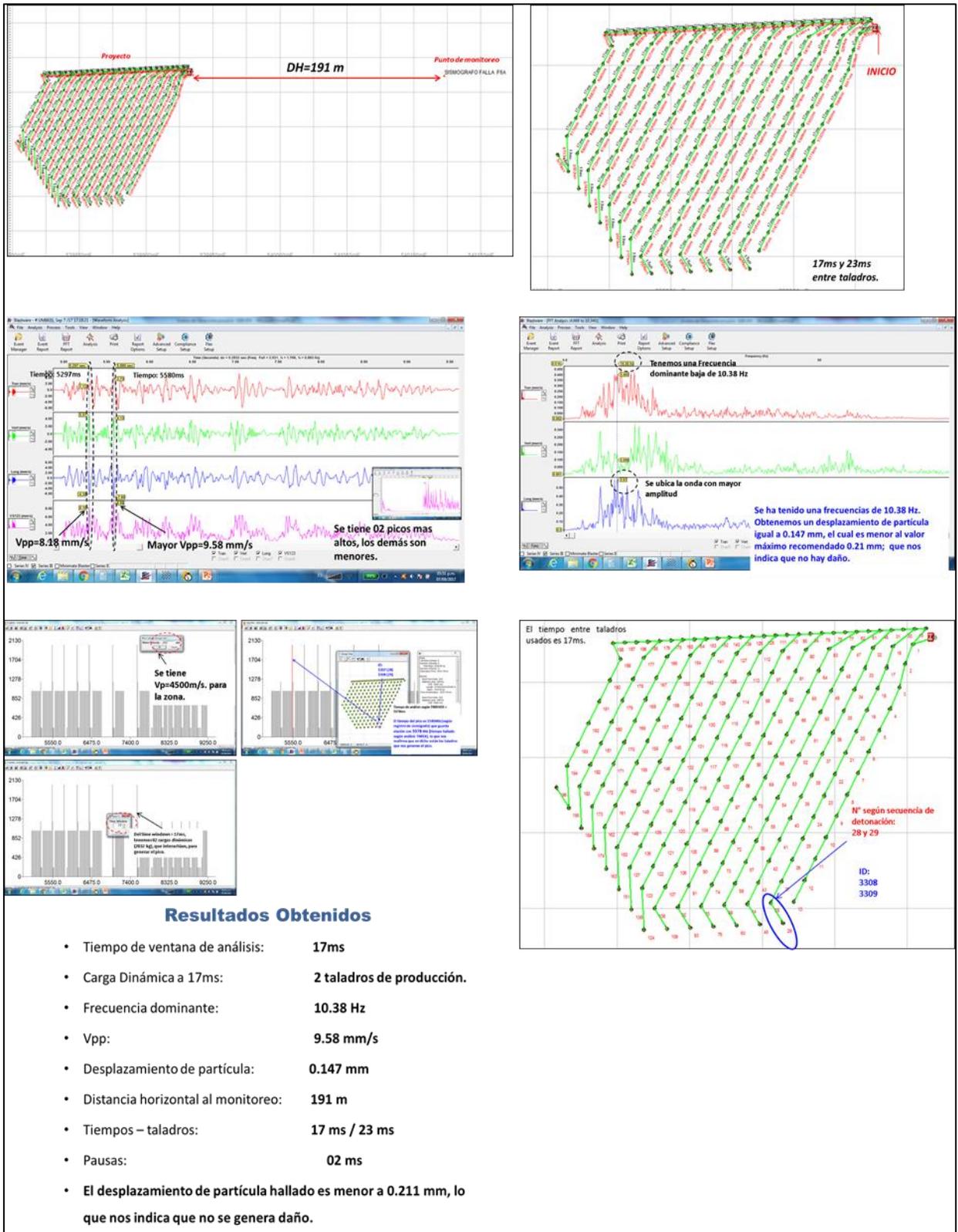
Fuente: Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 24. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 310-0602 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



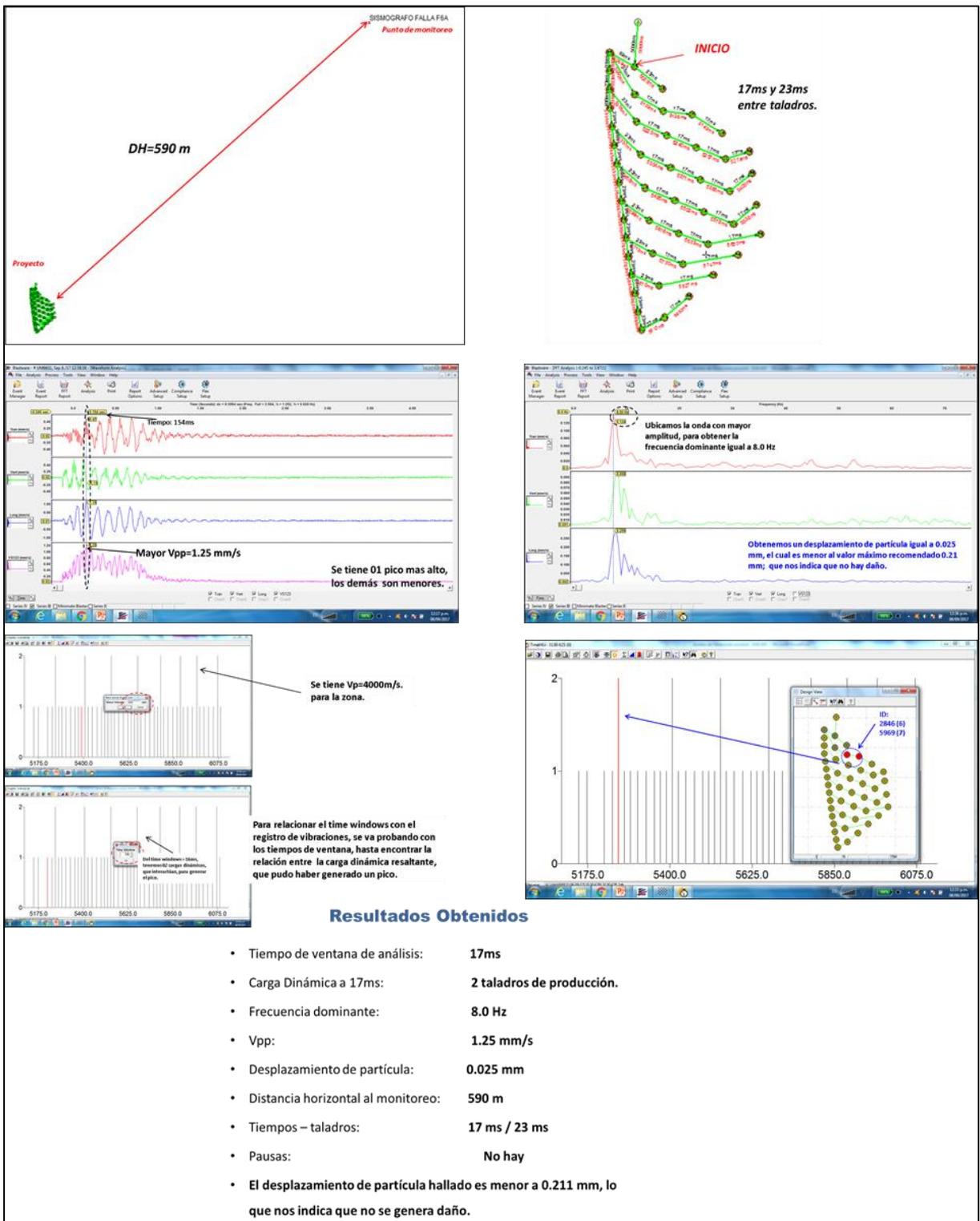
Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 25. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3100-0607 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



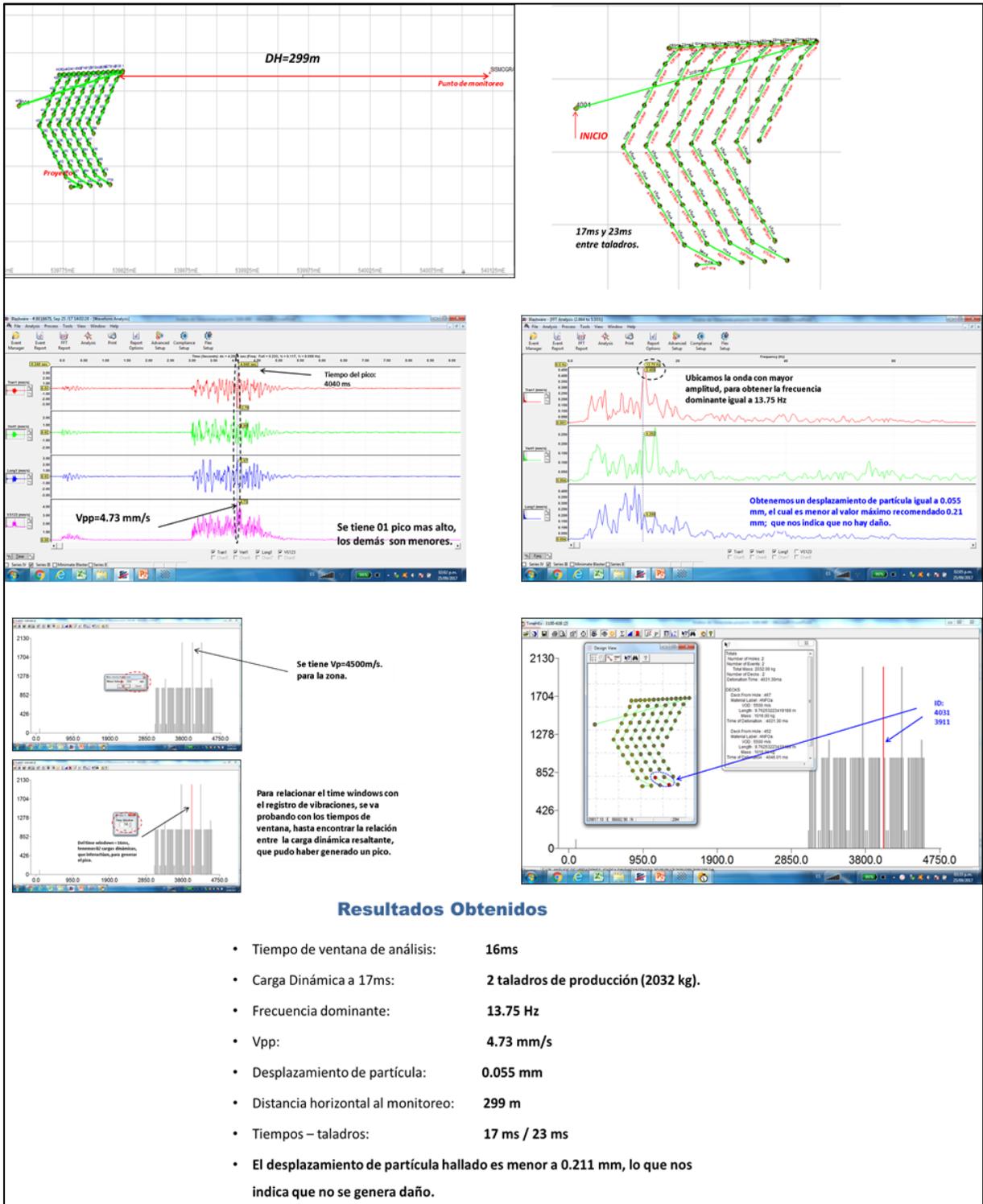
Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 26. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3130-0625 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



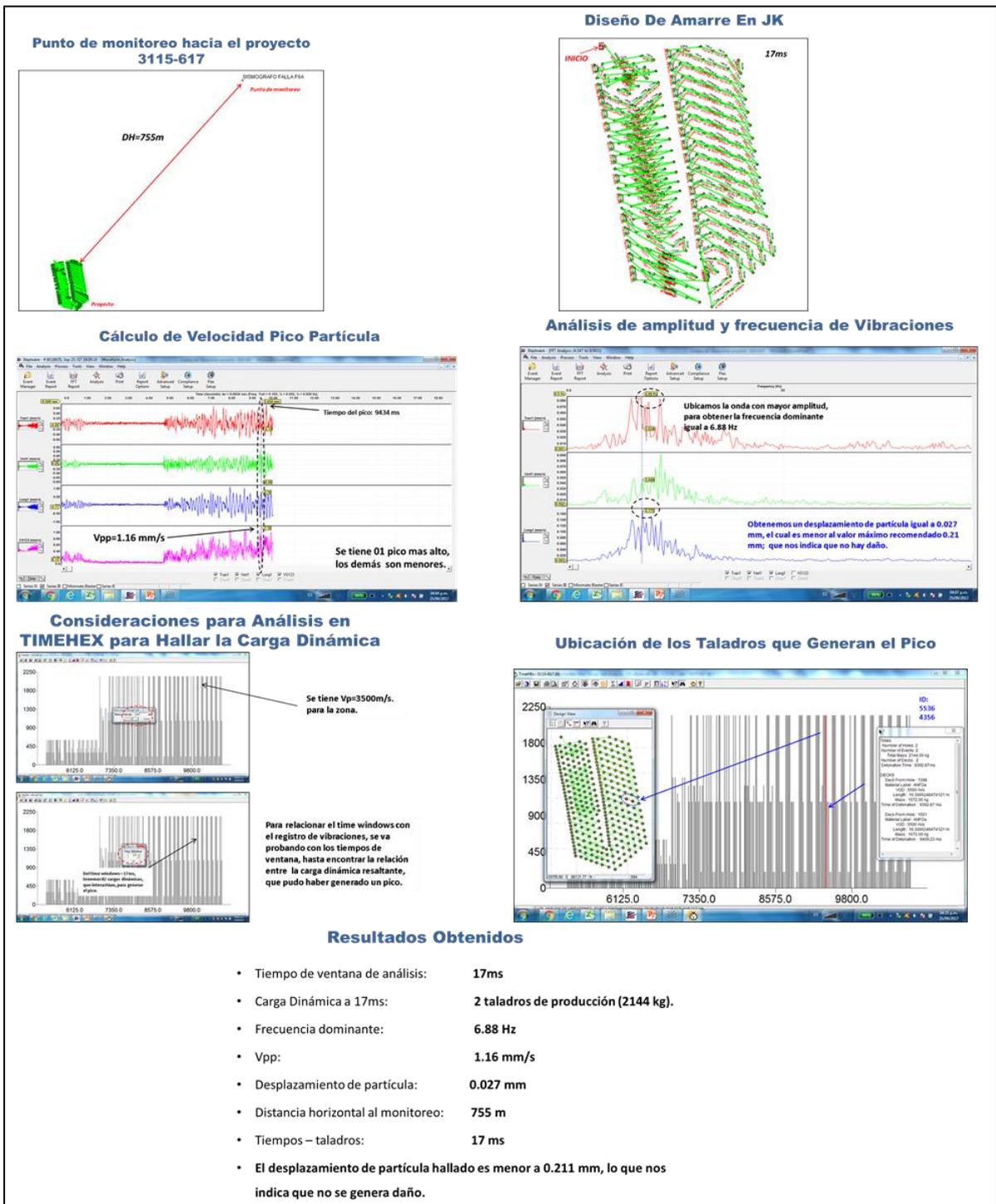
Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 27. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3100-0608 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



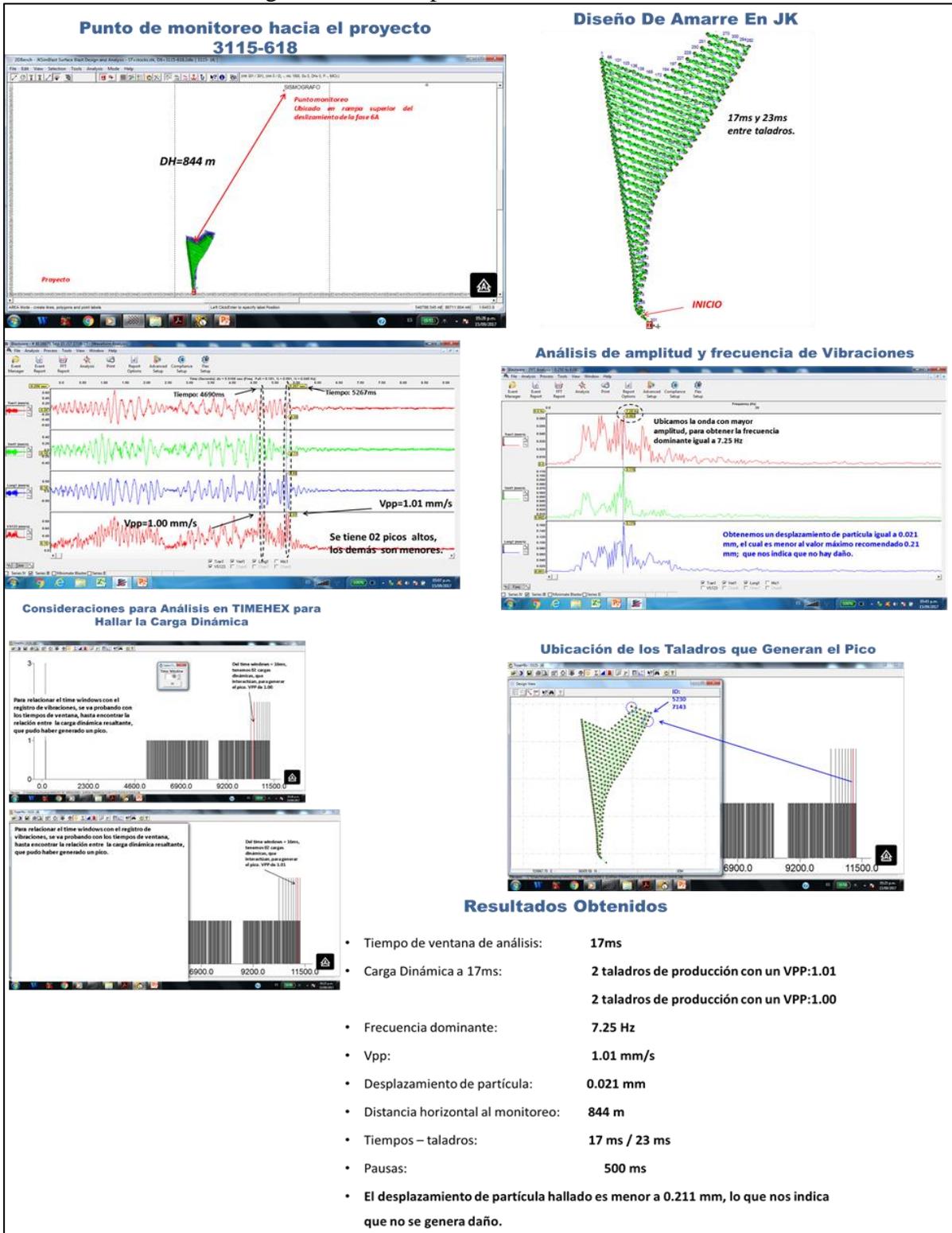
Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 28. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0617 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



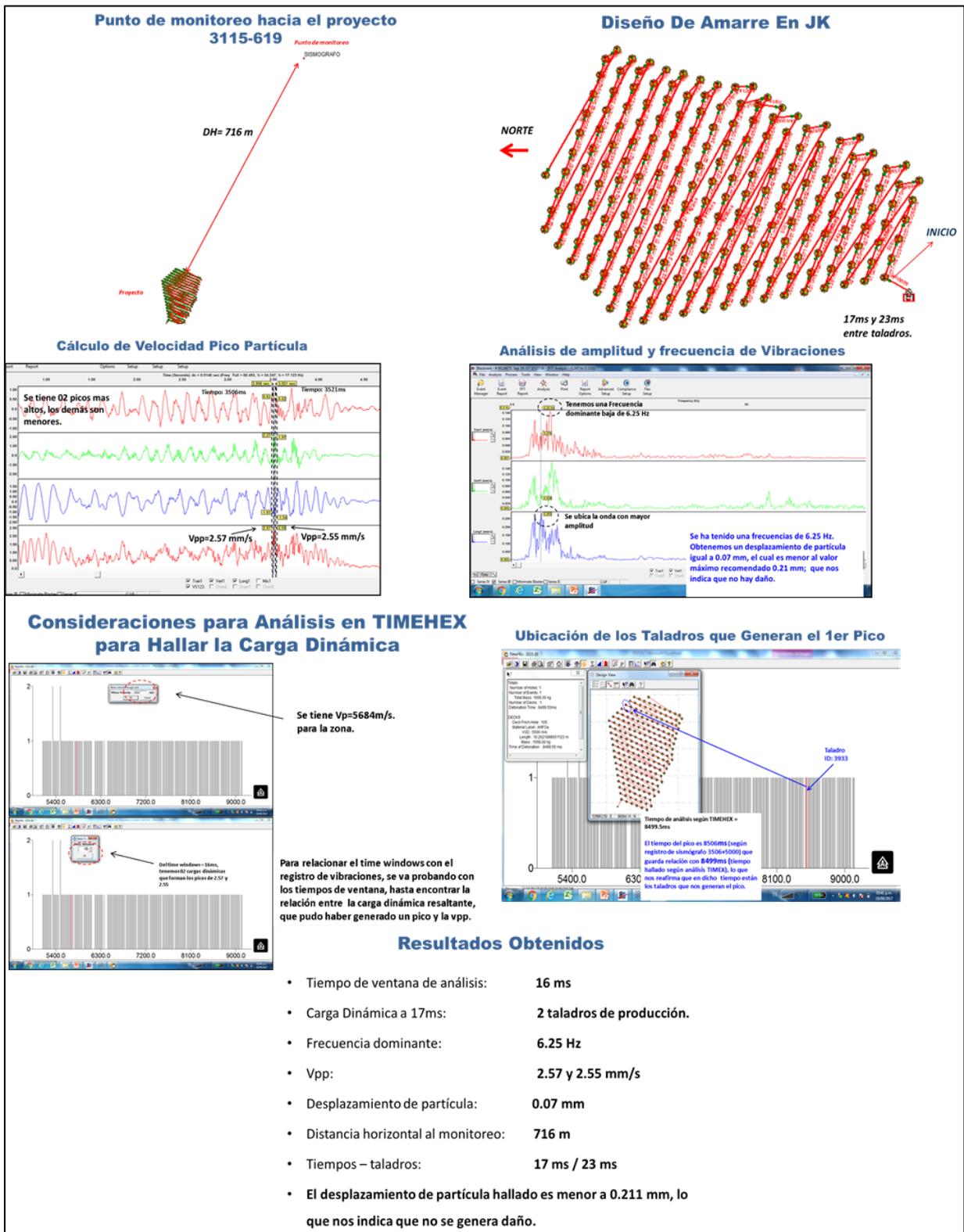
Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cujajone.

## Anexo 29. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0618 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 30. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0619 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

# Anexo 31. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0615 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.

### Punto de monitoreo hacia el proyecto 3115-615

**Cálculo de Velocidad Pico Partícula**

### Consideraciones para Análisis en TIMEHEX para Hallar la Carga Dinámica

Para relacionar el time windows con el registro de vibraciones, se va probando con los tiempos de ventana, hasta encontrar la relación y donde haya una carga dinámica resaltante que pudo haber generado un pico mayor.

### Diseño De Amarre En JK

### Análisis de amplitud y frecuencia de Vibraciones

Se ha tenido frecuencias MEDIAS. Calculando el desplazamiento, obtenemos un desplazamiento de partícula igual a 0.043 mm, el cual nos indica que no hay daño en el punto de monitoreo.

### Ubicación de los Taladros que Generan el Pico

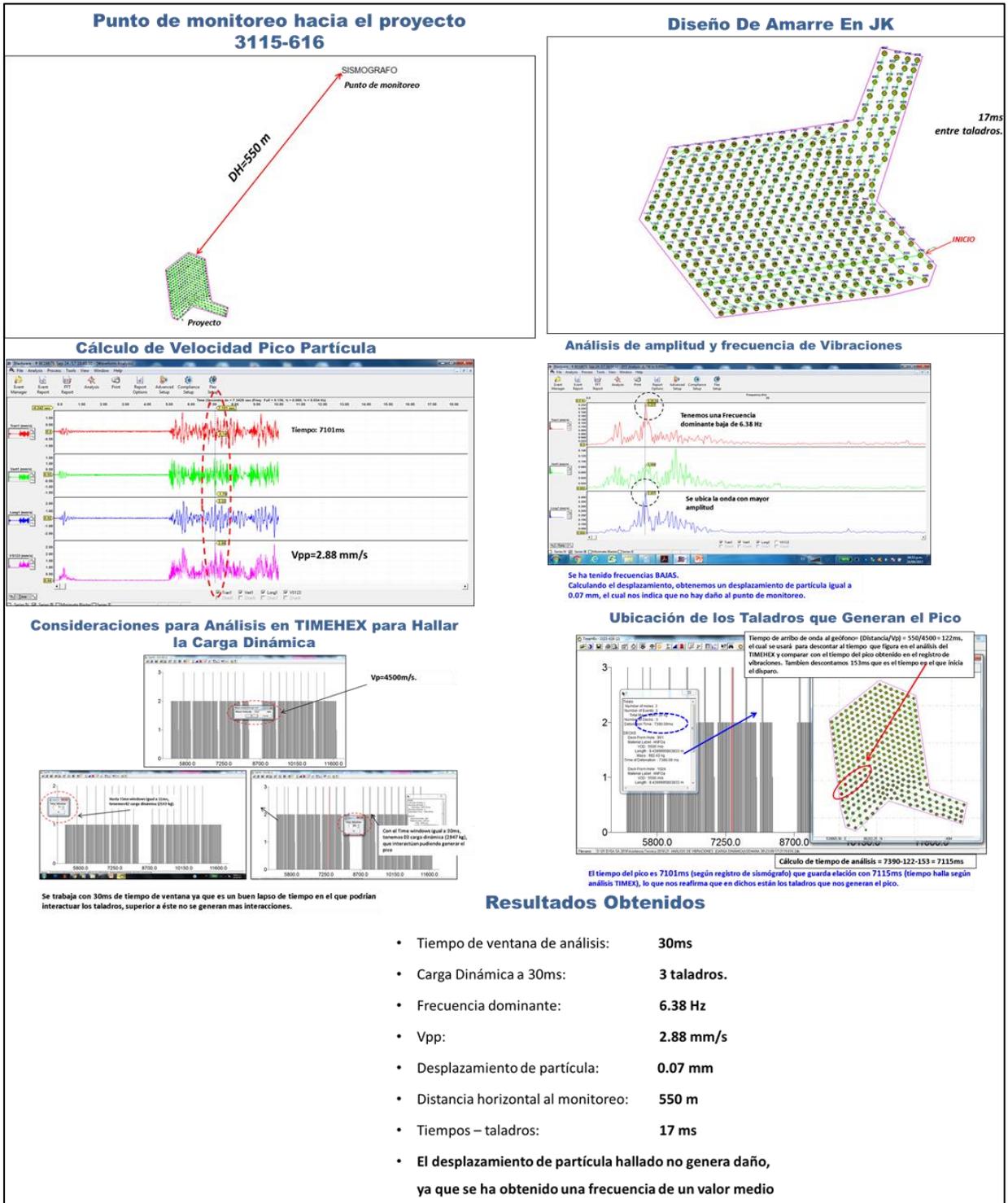
El tiempo del pico es 622ms (según registro de sismógrafo) que guarda relación con 6634ms (tiempo halla según análisis TIMEHEX), lo que nos reafirma que en dichos están los taladros que nos generan el pico.

### Resultados Obtenidos

- Tiempo de ventana de análisis: **30ms**
- Carga Dinámica a 30ms: **3 taladros.**
- Frecuencia dominante: **12.13 Hz**
- Vpp: **3.25 mm/s**
- Desplazamiento de partícula: **0.043 mm**
- Distancia horizontal al monitoreo: **403 m**
- Tiempos – taladros: **17 ms**
- El desplazamiento de partícula hallado no genera daño, ya que se ha obtenido una frecuencia de un valor medio

Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.

## Anexo 32. Monitoreo y Análisis de Vibraciones de Proyecto 3115-0616 Volados con 17 Milisegundos de Tiempo de Retardo Entre Taladros.



Fuente: Diseño Propio, adaptada de BD de Asistencia Técnica EXSA – SIVE Cuajone.