

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MINAS**



**TESIS PROFESIONAL**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE  
EN LA REDUCCIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA  
EN MINERA YANACOCHA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO DE MINAS**

Presentado por:

Bach. Micky Denilson Araujo Gutiérrez

Asesor

**M. Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana**

Cajamarca-Perú

2021

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser la luz incondicional que ha guiado mi camino para ir cumpliendo cada objetivo en mi vida.

A mis padres Héctor Araujo y Maritza Gutiérrez por inculcarme valores, ser mi inspiración y soporte en mi desarrollo profesional.

A mi compañera de vida, por estar en todo momento brindándome comprensión, cariño y motivándome para cumplir mis objetivos.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi alma mater por haberme formado como profesional; a todos los docentes de mi escuela profesional de Ingeniería de Minas que compartieron sus conocimientos y experiencia laboral en cada clase, en especial a mi Asesor. M. Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, quién a través de su experiencia y sabiduría me guío en este proyecto.

Al Ing. Yorhino León, por su disponibilidad en todo momento, en el transcurso se convirtió en mi fuente de inspiración como profesional y sobre todo como persona. Así como al Ing. Jaime Aranibal por sus rápidas respuestas ante mis inquietudes y sobre todo por compartir sus conocimientos y experiencia.

A la empresa minera Yanacocha por darme la oportunidad de ser parte del equipo de PyV y brindarme las facilidades en el desarrollo de la presente tesis.

A mis compañeros y amigos; por ser parte de mi vida universitaria.

## ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
INDICE DE TABLAS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv

## CAPÍTULO I

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

## CAPÍTULO II

<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	3
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	3
<b>2.2 BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>4</b>
2.2.1 VIBRACIONES GENERADAS POR VOLADURA .....	4
2.2.2 TIPOS DE ONDAS ELÁSTICAS .....	8
2.2.3 MODELOS DE VIBRACIONES.....	11
2.2.4 DAÑO POR VOLADURA.....	16
2.2.5 TÉCNICA SÍSMICA DE CROSS HOLE .....	20
2.2.6 EQUIPOS DE MONITOREO DE VIBRACIONES .....	22
2.2.7 EQUIPOS DE ADQUISICIÓN.....	25
2.2.8 EQUIPOS DE ANÁLISIS.....	27
2.2.9 PRINCIPALES NORMATIVAS DE VIBRACIONES.....	28
<b>2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....</b>	<b>29</b>

## CAPÍTULO III

	Pág
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	30
<b>3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b> .....	30
<b>3.2 ACCESIBILIDAD</b> .....	30
<b>3.3 CLIMA Y VEGETACIÓN</b> .....	30
<b>3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	31
<b>3.5 PROCESO DE MINADO EN MINERA YANACOCCHA</b> .....	32
3.5.2 PERFORACIÓN .....	32
3.5.2 VOLADURA .....	37
3.5.3 CARGUÍO .....	49
3.5.4 ACARREO.....	44
<b>3.6 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>46</b>
3.6.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	46
3.6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	46
3.6.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	46
3.6.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	46
3.6.5 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	47
3.6.6 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	47
3.6.7 MUESTRA.....	47
3.6.8 UNIDAD DE ANÁLISIS.....	47
<b>3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b> .....	<b>48</b>
3.7.1 TÉCNICAS.....	48
3.7.2 INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.....	48
<b>3.8 PROCEDIMIENTO</b> .....	<b>50</b>
3.8.1 ETAPA PRELIMINAR DE GABINETE.....	50
3.8.2 ETAPA DE CAMPO.....	50
3.8.3 ETAPA DE GABINETE.....	50
<b>3.9 PERFILES ACTUALES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA</b> .....	<b>51</b>
3.9.1 DISEÑOS DE MALLAS EN EL TAJO QUECHER MAIN.....	61
3.9.2 KILOS DE EXPLOSIVO POR TALADRO.....	61
3.9.3 SECUENCIA DE VOLADURA EN EL TAJO QUECHER MAIN.....	62
3.9.2 RESULTADOS ACTUALES DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO.....	62
3.9.3 INFORMACIÓN GEOMECÁNICA.....	64
<b>3.10 INSTALACIÓN DE PRUEBA ESPECIAL</b> .....	<b>65</b>
3.10.1 ARREGLO DE LA PRUEBA ESPECIAL EN CAMPO CERCANO.....	66

## CAPÍTULO IV

	Pág
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	75
<b>4.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P (<math>V_p</math>) DEL MACIZO ROCOSO</b> .....	75
<b>4.2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (<math>V_p</math>) DE LA ROCA INTACTA</b> .....	79
<b>4.3 CÁLCULO DE LA VIBRACIÓN MÁXIMA (VPPC) POR EL MÉTODO GENERAL</b> .....	83
<b>4.4 CÁLCULO DE LA VIBRACIÓN MÁXIMA DE CONTROL DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA POR CRITERIO DE MACIZO ROCOSO</b> .....	85
<b>4.5 MODELO DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES DE CAMPO CERCANO EN EL NIVEL 4021 QUECHER MAIN</b> .....	87
4.5.1 MODELO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO APLICANDO EL MODELO DE HOLMBERG-PERSSON DELANTE DEL PRE CORTE.....	87
4.5.2 MODELO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO APLICANDO EL MODELO DE HOLMBERG-PERSSON DETRÁS DEL PRE CORTE.....	92
<b>4.6 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE</b> .....	96
<b>4.7 ANÁLISIS DE ONDA ELEMENTAL</b> .....	98
<b>4.8 PROPUESTA DE DISEÑO DE TALADROS EN ELTAJO QUECHER MAIN</b> ....	101
3.8.1 DISEÑO PROPUESTO PARA TALADROS DE 9 7/8 DE DIÁMETRO.....	101
3.8.2 DISEÑO PROPUESTO PARA TALADROS DE 10 5/8 DE DIÁMETRO.....	103
<b>4.9 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS</b> .....	106

## CAPÍTULO V

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	107
<b>5.1 CONCLUSIONES</b> .....	107
<b>5.2 RECOMENDACIONES</b> .....	108
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109
<b>ANEXOS</b> .....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rangos de vibración que influyen en daño al macizo rocoso.....	19
Tabla 2. Criterio de daño al macizo rocoso de Bauer y Calder 1971 .....	20
Tabla 3. Normativa internacional en el control de vibraciones .....	28
Tabla 4. Equipos de perforación.....	33
Tabla 5. Detalle de cada tipo de diseño de taladros.....	36
Tabla 6. Densidades de Agentes de voladura utilizados en Minera Yanacocha .....	38
Tabla 7. Características de explosivos de voladura utilizados en Minera Yanacocha. ....	39
Tabla 8. Kilos de explosivo por metro lineal utilizados en Minera Yanacocha.....	39
Tabla 9. Accesorios utilizados en Minera Yanacocha .....	40
Tabla 10. Equipos utilizados en servicio de voladura .....	40
Tabla 11. Equipos auxiliares utilizados en servicio de voladura.....	41
Tabla 12. Niveles de gases producto de la voladura.....	443
Tabla 13. Flota equipos de Carguío para el minado de material .....	44
Tabla 14. Variables de la investigación .....	46
Tabla 15. Tipo,Nivel,Diseño y método de Investigación .....	467
Tabla 16. Diseño de perfil de banco en el tajo Quecher Main.....	51
Tabla 17. Geometría de inclinación de los bancos-Quecher main .....	53
Tabla 18. Parámetros de taladros de 9 7/8 de pulgadas de la malla de pre corte y procedimiento -Quecher main 4021.....	55
Tabla 19. Parámetros de taladros de 9 7/8 de pulgadas de la malla de producción -Quecher main nivel 4021.....	55
Tabla 20. Configuración de taladros 10 5/8 de la malla de pre corte y procedimiento-Quecher main.....	59
Tabla 21. Configuración de taladros 10 5/8 de la malla de producción -Quecher main.....	59
Tabla 22. Diseño de malla de producción en Quecher main .....	61

	<b>Pág</b>
Tabla 23. Diseño de malla de procedimiento de Quecher main .....	61
Tabla 24. Factor de potencia en la zona de Quecher main 4021 .....	62
Tabla 25. Tiempos de salidas en las mallas de voladura Quecher Main 4021 ....	62
Tabla 26. Densidades acordes al tipo de alteración del tajo Quecher main .....	65
Tabla 27. Configuración de pozos para realizar la prueba especial de eficiencia de filtro de pre corte.....	74
Tabla 28. Cálculo de la velocidad de Onda P.....	78
Tabla 29. Datos Geotécnicos de la roca intacta .....	79
Tabla 30. Clasificación General de la roca intacta .....	80
Tabla 31. Clasificación Geomecánica Quecher main Nivel 4021 .....	80
Tabla 32. Dureza de terreno en Minera Yanacocha.....	81
Tabla 33. Clasificación de predicción Insitu utilizando índice de calidad de roca.....	82
Tabla 34. Valores geotécnicos para el cálculo del VPP .....	83
Tabla 35. Valores de criterio de daño.....	84
Tabla 36. Umbrales de VPP para Quecher main SG02 .....	84
Tabla 37. Valores geotécnicos del tajo Quecher main nivel 4021 .....	85
Tabla 38. Valores de criterio de daño.....	86
Tabla 39. Umbrales de VPP para Quecher main SG02 .....	87
Tabla 40. Datos del geófono G3 delante del light drilling y/o pre corte .....	90
Tabla 41. Factores de Holmberg & Persson G3.....	90
Tabla 42. Datos del geófono G1-G2 detrás del light drilling y/o pre corte .....	94
Tabla 43. Factores de Holmberg & Persson G1-G2.....	94
Tabla 44. Valores de las constantes K1,K2 de los modelos de H&P.....	97
Tabla 45. Rangos de filtros de Pre corte .....	98
Tabla 46. Parámetros propuestos para taladros de 9 7/8 de pulgadas de diámetro-Quecher main nivel 4021.....	102
Tabla 47. Parámetros propuestos de taladros de 10 5/8 de pulgadas de la malla de pre corte, buffer y producción -Quecher main 4021.....	105



## ÍNDICE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.....	5
Figura 2. Representación de amplitudes de Onda A1 y A26.....	6
Figura 3. Onda completa de vibración -tiempo de duración.....	6
Figura 4: Estimación de la velocidad de propagación (Vp).....	7
Figura 5. Representación de ondas internas.....	8
Figura 6. Dirección de la Onda de compresión (P).....	8
Figura 7. Dirección de la Onda transversal.....	9
Figura 8. Trayectoria de las partículas de la onda R.....	10
Figura 9. Ondas L y sus característicos movimientos.....	10
Figura 10. Esquema de estudio en campo lejano.....	12
Figura 11. Esquema de H&P en campo cercano.....	13
Figura 12. Proceso de detonación del explosivo.....	23
Figura 13. Modelo esquemático de fracturamiento por voladura.....	17
Figura 14. Esquema de Cross Hole.....	21
Figura 15. Sensibilidad de los geófonos.....	23
Figura 16. Interpretación de signos- geófonos.....	24
Figura 17. Instalación y orientación de un arreglo triaxial.....	24
Figura 18. Acoplamiento de geófonos.....	25
Figura 19. monitor de vibración Minimate Pro6.....	27
Figura 20. Alteración de sílice granular en el nivel 4021 del tajo Quecher main 4021 .....	31
Figura 21. Ciclo de minado de Minera Yanacocha.....	32
Figura 22. Perforadora Pit Viper 273 - Tajo Yanacocha.....	34
Figura 23. Línea de perforación de perforadoras Pit Viper 273. ....	35
Figura 24. Tipos de taladros de perforación .....	36
Figura 25. Mezcla explosiva Quantex 73.....	37
Figura 26. Reacción de gasificación (esponjamiento) de la MEQ. ....	38
Figura 27. Camionetas furgon de transporte de accesorios de voladura.....	41
Figura 28. Camión fábrica borable.....	42
Figura 29. Camión fábrica vaciable.....	42

	<b>Pág</b>
Figura 30. Niveles de gases producto de la voladura.....	43
Figura 31. Pala Hitachi EX5500 realizando carguío en el tajo Quecher Main.....	44
Figura 32. Camión gigante Cat en la vía de acarreo del tajo Quecher main.....	45
Figura 33. Porcentaje de taladros de filtración en el nivel 4021 del Tajo Quecher main.....	52
Figura 34. Perfil de carga de taladros de pre corte, buffer y producción con 9 7/8 pulgadas de diámetro.....	54
Figura 35. Contornos de vibración de los taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro.....	56
Figura 36. Criterio de daño PPV actual, Quecher Main-nivel 4021 para taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro.....	56
Figura 37. Perfil de carga de taladros de pre corte, buffer y producción con 10 5/8 pulgadas de diámetro.....	58
Figura 38. Contornos de vibración de los taladros de 10 5/8 de diámetro.....	60
Figura 39. Criterio de daño PPV actual en el nivel 4021 Quecher Main para taladros de 10 5/8 de diámetro.....	60
Figura 40. Monitoreo de vibraciones campo lejano del tajo Quecher main-2019 bajo la norma DIN4150 con límite 3 mm/s.....	63
Figura 41. Monitoreo de vibraciones campo lejano del tajo Quecher main-2020 bajo la norma DIN4150 con límite 3 mm/s.....	64
Figura 42. Vista de planta de esquema de prueba especial a desarrollar.....	66
Figura 43. Configuración de prueba especial en campo-vista de planta.....	68
Figura 44. Perfil del arreglo de los geófonos empotrados.....	69
Figura 45. Configuración de prueba especial en campo-vista de perfil.....	70
Figura 46. Esquema de Cross Hole-vista de planta.....	71
Figura 47. Esquema de Cross Hole - Vista de perfil.....	72
Figura 48. Técnica sísmica de Cross Hole.....	73
Figura 49. Vista de perfil de configuración de taladros para la prueba de eficiencia de filtro de taladros de pre corte. ....	74
Figura 50. Registro de vibraciones de los geófonos 1 y 2 detrás del light drilling y/o pre corte. ....	76
Figura 51. Registro de llegada de ondas del taladro N° 1 a los geófonos (G1-G2) .....	77

Figura 52.	Registro de vibraciones del geófono 3 Delante del Light Drilling.....	88
Figura 53.	Vista de perfil de un taladro en la prueba de H&P in situ.....	89
Figura 54.	Modelo matemático predictivo de las velocidades pico partículas y el factor H&P delante del light drilling y/o pre corte.....	91
Figura 55.	Registro de vibraciones de los geófonos triaxial G1 detrás del light drilling .....	93
Figura 56.	Modelo matemático predictivo de las velocidades pico partículas y el factor H&P detrás del light drilling.....	95
Figura 67.	Modelo de campo cercano detrás y delante de light drilling y/o pre corte.....	96
Figura 58.	Tiempo entre taladro (ms) vs amplificación de vibraciones (mm/s) - método de onda elemental.....	100
Figura 59.	Contornos de vibración de taladros de 9/8 de pulgada del diseño propuesto.....	101
Figura 60.	Comparación (\$/Ton) por tipo de taladro de control con diámetro de 9 7/8 pulg. ....	103
Figura 61.	Contornos de vibración de taladros de 10 5/8 de pulgada del diseño propuesto.....	104
Figura 62.	Criterio de daño propuesto de VPP por criterio de macizo rocoso para el nivel 4021 del tajo Quecher Main.....	104
Figura 63.	Comparación (\$/Ton) por tipo de taladro de control con diámetro de 10 5/8 pulg. ....	106

## ABREVIATURAS

P&V	: Perforación y Voladura
C-H	: Cross-Hole
H&P	: Holmberg-Persson
LD	: Light drilling o taladros de filtro
Cmr	: Criterio del macizo rocoso
B	: Burden
E	: Espaciamiento
FP	: Factor de potencia
Vp	: Velocidad de propagación de la Onda compresional "P"
Vs	: Velocidad de Propagación de la Onda transversal "S"
VR	: Velocidad de Propagación de la Onda Rayleigh "R"
VL	: Velocidad de Propagación de la Onda Love "L"
VPP	: Velocidad Pico partícula o PPV
VPPc	: Velocidad Pico Partícula crítica
HB	: Altura de banco (m)
BFA	: Ángulo de la cara del banco (°)
BW	: Ancho de berma (m)
IRA	: Ángulo inter rampa (°)
CB	: Banqueta o Catch Bench
DCL	: Densidad de carga lineal
G1-G3	: Geófonos triaxiales
G2	: Geófono uniaxial
P1-P9	: Pozos
$\lambda$	: Longitud de Onda
A	: Amplitud
Mpa	: Mega Pascales
$\Delta t$	: Diferencia de tiempos
$\varepsilon$	: Deformación sobre los macizos rocosos
$\sigma t =$	: Resistencia a la tensión (Mpa)
$\sigma c$	: Resistencia a la compresión
W	: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)

d	: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
q	: Densidad lineal de carga (Kg)
R0	: Distancia de medición, desde la carga (m)
H	: Longitud de carga (m)
Xs	: Longitud de taco (m)
Xo	: Profundidad de medición (m)
K	: Factor de velocidad
$\alpha$	: Factor de decaimiento o atenuación
E	: Módulo de Young o Young Modulus (Gpa)
V	: Coeficiente de Poisson o Poisson rat
RMR	: Valoración del macizo rocoso- Rock Mass Rating
RQD	: Índice de calidad de roca
UCS	: Resistencia a la Comprensión Simple
ms	: Milisegundos
mm/s	: Milímetros por segundo
mm/s <sup>2</sup>	: Milímetros por segundos al cuadrado

## RESUMEN

La investigación se realiza en el nivel 4021 del tajo Quecher Main de la empresa Minera Yanacocha ubicada a 45 kilómetros al norte de la provincia y Departamento de Cajamarca. Actualmente la malla de voladura está conformada por taladros de pre corte, procedimiento y producción. Entre ellos, el pre corte (light drilling) tiene un diseño donde una fila de taladros no está siendo cargada con explosivos con la finalidad que estos taladros puedan filtrar los niveles de vibración, así como amortiguar el efecto de presión de gases sobre el talud durante la iniciación de la voladura. El objetivo de la investigación es determinar la eficiencia del filtro de pre corte para la reducción de vibraciones por voladura, para ello se determinó perforar 12 taladros de prueba; de los cuales 9 taladros servirán de fuente sísmica para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda compresional P (prueba de Cross Hole) y eficiencia de filtro de pre corte; y los otros 3 taladros servirán de monitoreo a través de 02 geófonos triaxiales y 01 uniaxial. Los resultados obtenidos son los siguientes: la velocidad de la onda P es de 609 m/s, la velocidad pico de partícula crítico (VPPc) es de 1029 mm/s, PPV máximo de 257 mm/s, tiempo de acoplamiento de 11ms y de acuerdo al modelo de campo cercano aplicando el criterio de Holmberg & Persson el porcentaje de filtro de pre corte es de 0%; por lo que estos taladros no están cumpliendo la función de filtrar las vibraciones y evacuar los gases producto de la voladura.

**Palabras claves:** Modelo de Filtro de pre corte, Reducción de vibraciones, Cross Hole, Velocidad Pico Partícula, Modelo de Campo Cercano.

## ABSTRACT

The investigation is carried out at level 4021 of the Quecher Principal pit of the Minera Yanacocha company located 45 kilometers north of the province and Department of Cajamarca. Currently the blasting mesh is made up of pre-cut, procedure and production drills. Among them, the pre-cut has a design where a row of drills is not being charged with explosives so that these drills can filter the vibration levels, as well as damping the effect of gas pressure on the slope during the initiation of the drilling. blasting. The objective of the investigation is to determine the efficiency of the pre-cut filter for the reduction of vibrations by blasting, for this it was determined to drill 12 test holes; of which 9 holes will serve as seismic source for the calculation of the propagation speed of the compressional wave P (Cross Hole test) and efficiency of the pre-cut filter; and the other 3 holes will serve as monitoring through 02 triaxial geophones and 01 uniaxial. The results obtained are the following: the velocity of the P wave is 609 m / s, the peak critical particle velocity (VPPc) is 1029 mm / s, maximum PPV of 257 mm / s, coupling time of 11 ms and According to the near field model, applying the Holmberg & Persson criterion, the pre-cut filter percentage is 0%; Therefore, these drills are not fulfilling the function of filtering vibrations and evacuating the gases produced by the blasting.

**Key words:** Precut Filter Model, Vibration Reduction, Cross Hole, Peak Particle Velocity, Near Field Model.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

En el tajo Quecher main de minera Yanacocha, actualmente la malla de voladura está conformada por taladros de pre corte, procedimiento y producción. Entre ellos, el pre corte tiene un diseño donde una fila de taladros actualmente no está siendo cargada con explosivos con la finalidad que estos taladros puedan filtrar los niveles de vibración, así como amortiguar el efecto de presión de gases sobre las paredes durante la iniciación de la voladura. Pero se desconoce si este diseño, de no cargar los taladros de pre corte está siendo eficiente en filtrar las vibraciones producto de la voladura. Es por ello que se quiere cuantificar la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura, así como proponer optimizaciones y/o eliminación de estos sin tener que afectar la estabilidad de las paredes y/o taludes.

En tal sentido, planteamos la siguiente pregunta: ¿Cuánto es la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura en Minera Yanacocha?

Teniendo como objetivo general determinar la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura en Minera Yanacocha. Como objetivos específicos se va a: Calcular la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) a través de una técnica sísmica (Cross-Hole), Cuantificar el porcentaje de filtros de pre corte en la reducción de vibraciones por medio de los factores de velocidad de Holmberg-Persson.

Como hipótesis indicamos que: Al aplicar el filtro de pre corte se reducen las vibraciones causadas por voladura en un 20%. Como hipótesis específicas definimos que: Es posible determinar la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) a través de una técnica sísmica (Cross-Hole), El filtro de pre corte está siendo eficiente en disminuir las vibraciones según los factores de velocidad de Holmberg-Persson.



La justificación de la investigación es evaluar la eficiencia de los taladros de pre corte del tajo Quecher main en Minera Yanacocha, de tal manera que se pueda optimizar y/o eliminar los taladros sin alterar la estabilidad de las paredes y/o taludes y así generar un posible ahorro económico a partir de los resultados. En paralelo al ahorro generado se tendría mayor disponibilidad operativa de equipos de perforación.

El contenido de los capítulos se describe a continuación: En el capítulo II, Se menciona los antecedentes teóricos internacionales y nacionales de la investigación; así como las bases teóricas sobre vibraciones, modelos de vibraciones, técnica sísmica de Cross Hole, porcentaje de filtros, principales normativas de vibraciones y definición de términos básicos. Mientras que, en el capítulo III, se describe los materiales y métodos, donde mencionamos la ubicación geográfica para el desarrollo la investigación, proceso de minado, metodología de investigación y descripción del procedimiento. El capítulo IV, presenta los resultados obtenidos al final de la investigación, realizándose el análisis y la contrastación de la hipótesis planteada. Finalizando en el capítulo V, donde se muestra las conclusiones para cada objetivo planteado en el presente estudio, además de recomendaciones para futuras investigaciones.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

**Bravo (2018)**, en su investigación: Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence. Evalúa diferentes variables que puedan afectar el desempeño operativo. Reconoce las ventajas generales de la operación y realiza mejoras en la formulación de estándares de perforación y voladura. Concluye que es posible reducir la vibración mediante actividades de monitoreos adecuados, ajustar el tiempo de detonación de los explosivos y utilizar modelos matemáticos para predecir los daños. Recomienda, retardos mínimos para evitar el acoplamiento de la onda y reducir los daños en el campo lejano evitando deslizamientos en las diferentes zonas de la mina.

#### 2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

**Gomez (2019)**, en su investigación: Aplicación de modelo predictivo de daño (Cross Hole) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud (Tesis de pre grado) UNAM, Moquegua; afirma que esto se puede lograr determinando el nivel de energía de la resistencia de la roca y el nivel de energía disponible de los explosivos. Concluye que el efecto de la vibración se puede reducir generando un filtro pre cortado eficaz. Sin embargo, un buen filtro solo puede atenuar el 40% de la vibración cuando se transporta correctamente. Menciona que primero se debe prestar atención a la correcta implementación de la perforación y la correcta configuración de Perforación y Voladura para minimizar el impacto y esto permitirá su estabilidad y geometría del banco.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 VIBRACIONES GENERADAS POR VOLADURA**

Según Olofsson (1990), Cánovas (2016) y Exsa (2019) concluyen que, representan un estado de esfuerzos que se transmiten en el macizo rocoso como ondas sísmicas (movimiento ondulatorio) producto de la detonación del explosivo de los taladros de voladura, resultando en la fragmentación de la roca o llegando a un nivel crítico de daño.

Konya (1983) sostiene que, las ondas representan la transmisión de energía a través de la capa sólida de la tierra, éstas pueden ser generadas por la naturaleza y otras veces creadas por el hombre.

Floyd (2006) menciona que, los parámetros permiten medir y cuantificar cuando se analiza el movimiento de las ondas o vibración.

Los parámetros o variables más importantes se describen a continuación.

#### **a. Frecuencia**

Valdivia (2017), Bravo (2018) y Contreras (2019) indican que, representa el número de ciclos (vibraciones y/o oscilaciones) en un segundo por el cual la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión, se mide en ciclo/segundo o Herz(Hz). Está influenciada inversamente por el tamaño de la carga módulo de la roca, velocidad de detonación. Si la frecuencia es baja, mayor es el desplazamiento, y por lo tanto mayor es el daño en el medio en que se trasmite las vibraciones, por tanto, si la frecuencia es alta se minimizará el daño; Ver figura 1.

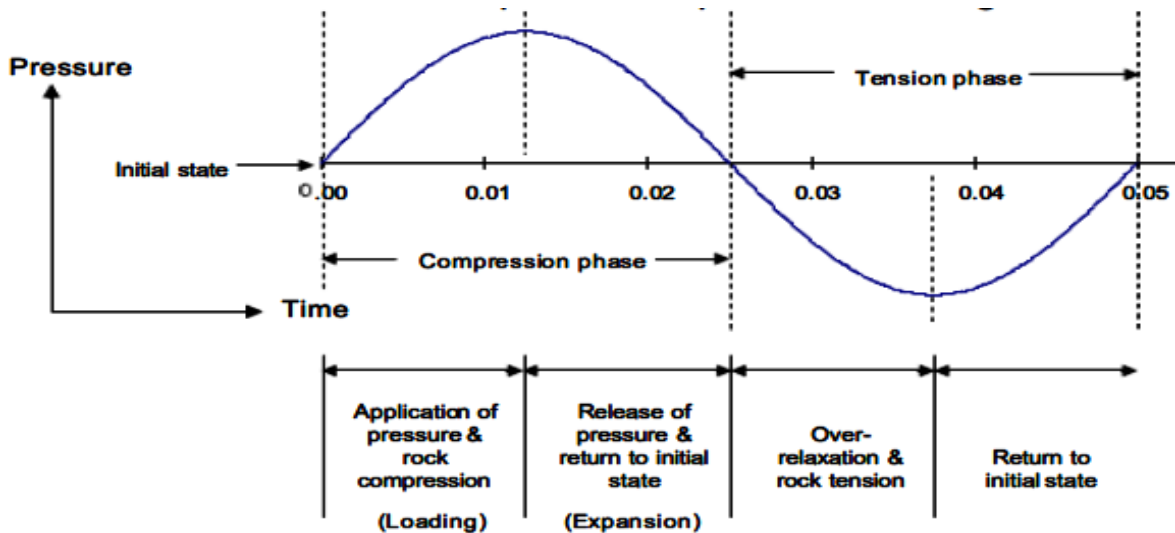


Figura 1. Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.

Fuente: Comentado por Valdivia, Bravo y Contreras

b. Longitud de la onda ( $\lambda$ )

De acuerdo con Cintex (2006) y Contreras (2009), es la distancia de cresta a cresta o de valle a valle (compresión y tensión), distancia que viaja la onda en un ciclo completo. Se mide en metros y es igual al período(s) de la onda multiplicado por la velocidad de propagación(m/s).

c. Amplitud (A)

Representa el valor equivalente al desplazamiento máximo de un punto desde su posición de reposo, el cual es un indicador del potencial daño y el potencial efecto de la fragmentación en la roca, puede representar velocidad en mm/s, aceleración en  $\text{mm/s}^2$  o desplazamiento en mm, dependiendo del equipo de monitoreo utilizado. En caso que las amplitudes varíen de ciclo en ciclo en una onda de vibración extendida, existen formas alternativas de describirlas como por ejemplo amplitud pico, promedio de amplitud y media de la raíz cuadrada ya que éstas son reportadas sólo como positivas o su valor absoluto. Cintex (2006), Valdivia (2017) y Ticlia (2019), se muestra en la figura 2.

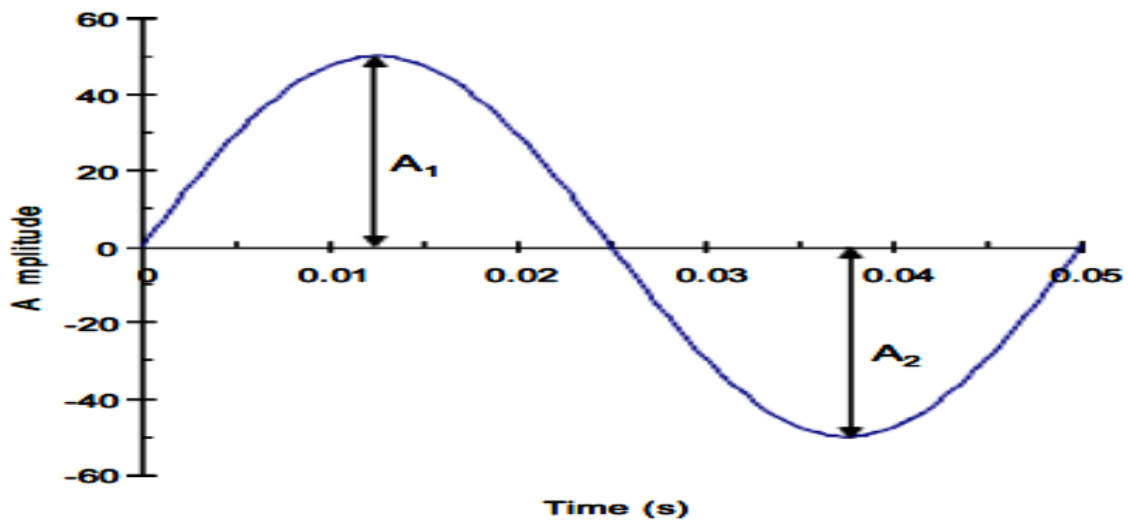


Figura 2. Representación de amplitudes de Onda A1 y A2  
 Fuente: Creado por Cintex; comentado por Valdivia y Ticlia.

d. Duración de la vibración

En términos generales, la duración de la vibración es aproximadamente 200 a 300 milisegundos (ms) más larga que la duración de la voladura, esto incrementándose con el aumento de la distancia de propagación, en tal sentido la velocidad pico (máxima) de las vibraciones dependerá del registro completo de la duración de la onda, el cual mostrará un tiempo pausado previo (pre trigger) al comienzo del registro de vibración, y un tiempo después del paso de la onda, se evidencia la figura 3 (Cintex, 2006).

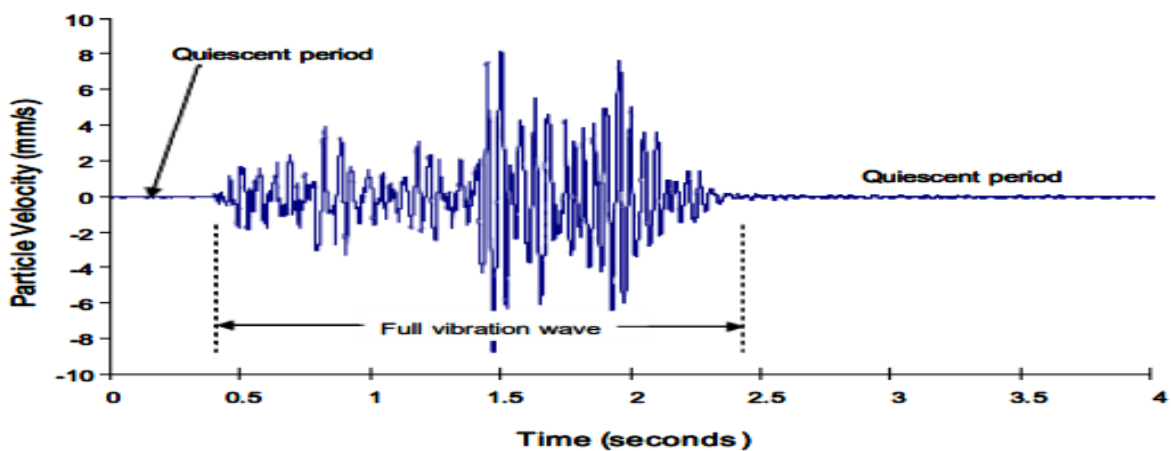


Figura 3. Onda completa de vibración - tiempo de duración

Fuente: Cintex 2006.

e. Velocidad

Representa la rapidez (m/s) con la que una partícula se mueve cuando deja su punto de reposo. La velocidad de propagación de la onda P “Vp” se calcula usando la ecuación simple  $V_p = d / t$ , donde d es la distancia de propagación y t es el tiempo de propagación. Se puede medir usando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y midiendo la diferencia de tiempo de llegada de cada señal. En la Figura 4, los geófonos están separados por 300 metros, la diferencia de tiempo de llegada t es de 80 ms y la velocidad de propagación correspondiente es de 3750 m/s. El “Vp” de la mayoría de las rocas está entre 3000 m /s y 500 m/s. (Cintex 2006).

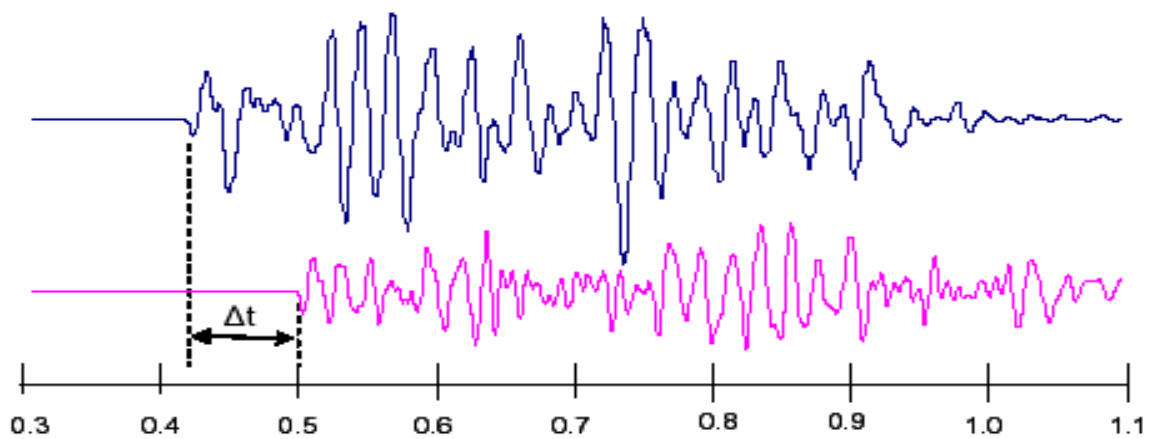


Figura 4. Estimación de la velocidad de propagación (Vp)

Fuente: Cintex 2006.

El movimiento ondulatorio genera dos tipos de ondas: ondas internas (primarias o de compresión) y ondas superficiales (transversales o de cizallamiento) (Valdivia 2017).

## 2.2.2 TIPOS DE ONDAS ELÁSTICAS

### a. Ondas Internas (body waves)

Chiappeta (2014) mencionan que, se propagan por el interior del sólido rocoso y dentro de las cuales se encuentran: las ondas longitudinales, de compresión o principales (P) y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias (S). Como muestra la figura 5.

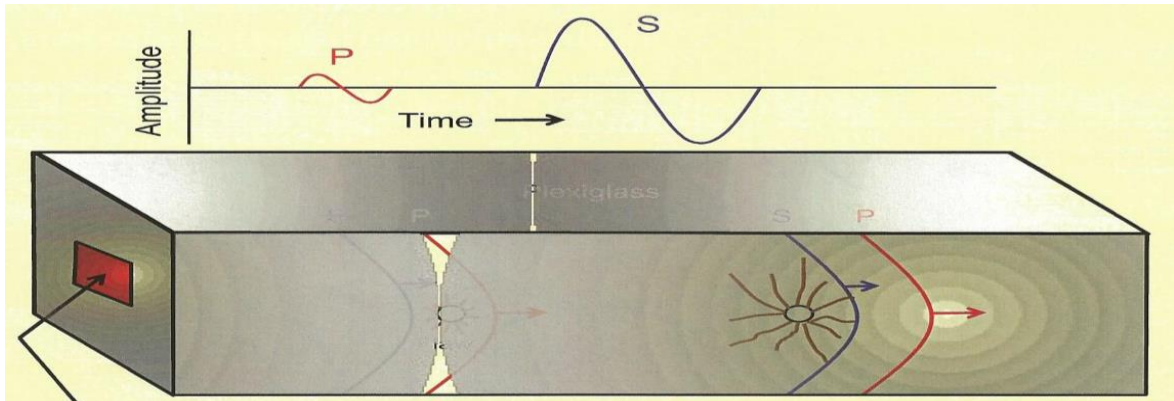


Figura 5. Representación de ondas internas

Fuente: Chiappeta 2014

- Ondas Longitudinales, compresión o principales (P)

Son denominadas también “compressional wave”, es la onda más rápida y de mayor amplitud que viaja a través del suelo, por lo que es la primera que se registra. Aquí las partículas de onda se mueven en la misma dirección que la propagación y de la onda. Producen cambios de volumen, pero no de forma en el material en el que se propagan (Romero 2016) Ver figura 6.

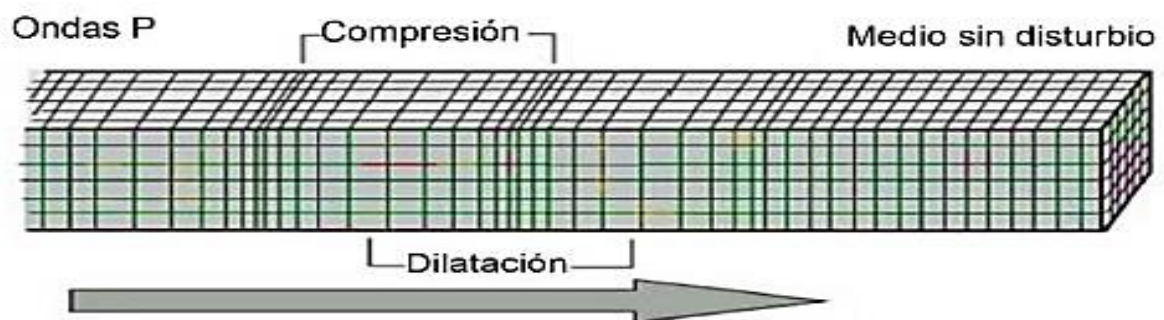


Figura 6. Dirección de la Onda de compresión (P)

Fuente: Romero 2016

- Ondas transversales, de cizalladura o secundarias (S)

Denominadas “Wave share”, estas presentan una velocidad entre 50 – 60% de la velocidad de la onda P, las partículas de onda se mueven perpendicular a la dirección en la que se propaga la onda. Producen cambios de forma en los materiales en los que se propaga, pero no de volumen. Ver figura 7 (Áviles y Barzallo,2016).

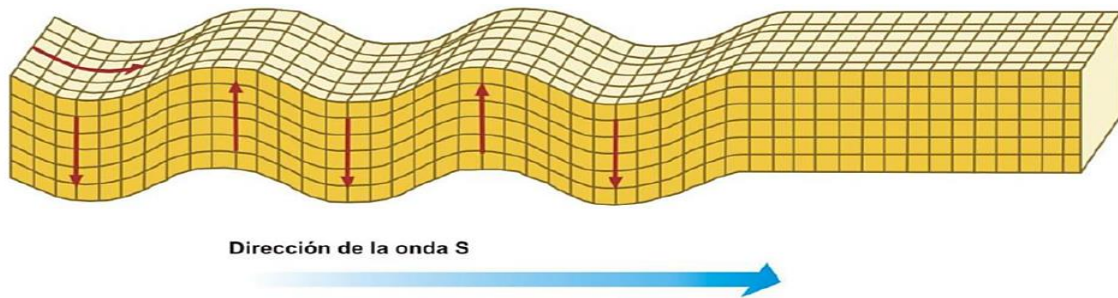


Figura 7. Dirección de la Onda transversal

Fuente: Áviles y Barzallo 2016.

El cálculo de la velocidad longitudinal y transversal se realiza se la siguiente manera:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad v_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

Ecuación 1. velocidad longitudinal y transversal

Dónde:

$E$ : módulo de Young o Young Modulus (Gpa)

$\nu$ : coeficiente de poisson o Poison's ratio

$v_L$ : velocidad longitudinal

$v_T$ : velocidad transversal

- b. Ondas superficiales (Surface Waves)

Son generadas como resultado de la interacción de las ondas P y S con la superficie, éstas son: las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (L). este tipo de onda es muy importante en sismología, como una manera de escribir algunas olas causadas por los terremotos. Según Córdova (2010) y ISEE (2011).



- Ondas Rayleigh (R)

Son generadas en la superficie en respuesta a la interacción de las ondas P y S en la superficie. Algunas semejanzas tienen con las ondas del océano en las cuales el movimiento de la partícula es elíptico, así como son las principales causantes de las sacudidas durante la ocurrencia de un terremoto. Ver figura 8 (Córdova 2010).

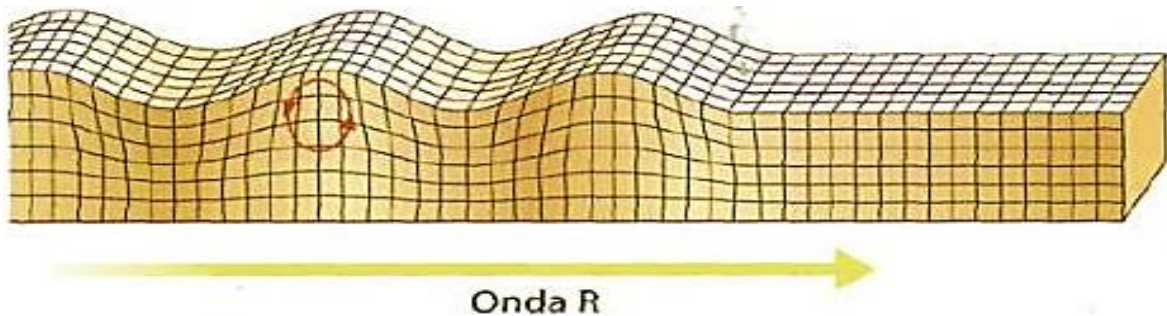


Figura 8. Trayectoria de las partículas de la onda R.

Fuente: Córdova 2010.

- Ondas Love (L)

Ocurren solo en donde un medio con ondas S de baja velocidad suprayace a una capa con onda S de mayor velocidad. El movimiento de partículas ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda, pero paralelo a la siguiente superficie, como se muestra en la figura 9 (Trujillo 2018).

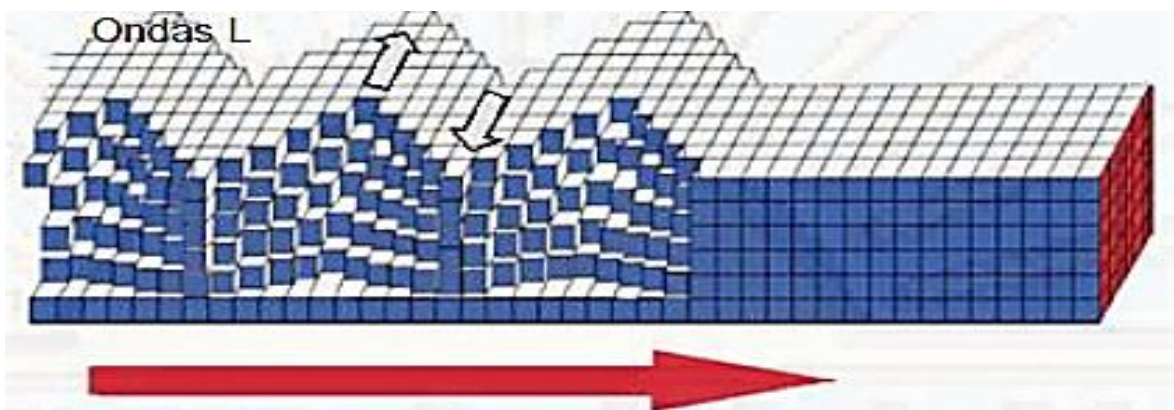


Figura 9. Ondas L y sus característicos movimientos

Fuente: Trujillo 2018.

### 2.2.3 MODELOS DE VIBRACIONES

Existen modelos de predicción de campo lejano y campo cercano, basados en el principio de similitud geométrica. Estos modelos se utilizan para estimar la vibración (VPP) en función de la distancia al punto de interés (D) y el peso de la carga explosiva (W) por retardo (carga instantánea). Sin embargo, ninguno de los modelos consideró factores influyentes como el tamaño y la geometría de la explosión, el tiempo de retardo, la secuencia de inicio o el factor de carga. La ecuación general a obtener tiene la siguiente forma. (Davey Bicford 2013 y Exsa 2019).

$$PPV = K * \left(\frac{D}{Q^\alpha}\right)^{-\beta}$$

Ecuación 3. Ecuación general para obtener el PPV.

La expresión  $\frac{D}{Q^\alpha}$  es conocida como distancia escalar y busca relacionar los niveles de vibración provocados a diferentes distancias y para diferentes cantidades del mismo explosivo. Para determinar el valor de la constante, la prueba se realiza midiendo la vibración producida por un explosivo conocido a una distancia conocida. El ajuste de cálculo de los datos obtenidos permite obtener K,  $\alpha$  y  $\beta$ , así como otros dos parámetros que muestran la precisión del ajuste (coeficiente de correlación y desviación estándar). Un coeficiente de correlación cercano a 1 indica que el fenómeno corresponde al modelo aplicado (Cereceda 2015).

#### a. Modelo de Campo Lejano: Devine & Duvall

Se considera campo lejano a distancias superiores a tres y/o cinco veces la longitud o altura de la carga. Se considera a las vibraciones que afectan directamente a las estructuras fuera del tajo. Este modelo de vibración nos permite predecir el nivel de vibración mediante mediciones in situ para controlar la estabilidad de la estructura (Contreras 2009). Hay diversos postulados matemáticos, que se usan para monitorear y cuantificar la vibración, pero el más comúnmente usado es el modelo matemático de Devine & Duvall, que es aplicado para modelar cargas individuales; como se muestra en la ecuación 3.

$$PPV = K * \left[ \frac{d}{\sqrt{W}} \right]^\alpha$$

Ecuación 4: Ecuación de Devine y Duvall (1963).

Donde:

PPV: Velocidad Pico de Partícula (mm/s)

W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)

d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando

K,  $\alpha$ : constantes de factor de la roca

El parámetro  $\alpha$  en la ecuación de Devine, está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo, el valor de K se controla principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo. Los factores que controlan la transferencia de la energía del explosivo desde el taladro a la roca son la densidad y la velocidad de detonación del explosivo, producto que representa la característica de impedancia Z (Contreras 2009). Ver figura 10.

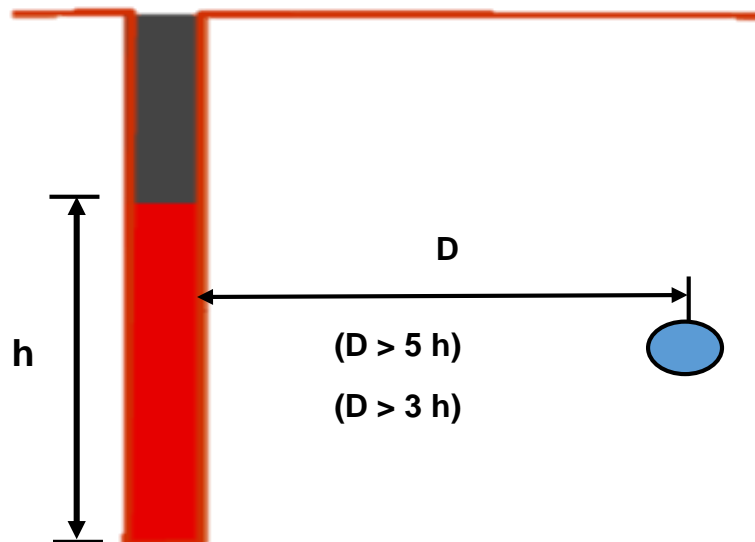


Figura 110. Esquema de prueba para análisis de vibraciones en campo lejano

b. Modelo de campo cercano: Holmberg & Persson

Este modelo generalmente se aplica al área más cercana a la carga explosiva (el área donde ocurre mayor fracturamiento) menos de 3 veces y / o 5 veces la altura de la carga explosiva, esta ecuación puede ser modificada para tomar en cuenta la longitud de una carga de forma cilíndrica (Exsa 2020).

El análisis puede utilizar la ecuación descrita por Holmberg y Persson (1977) y el modelo de campo cercano como herramientas de cálculo para evaluar el comportamiento de vibración en el entorno inmediato y más cercano de la explosión; donde  $k$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que dependen de la roca.

En la representación gráfica de la Figura 11, el modelo H&P, la columna de explosivos se divide en una serie de cargas cilíndricas infinitesimales, cada uno de los cuales tiene una longitud de " $dx$ ", donde " $q$ " es el peso por unidad de longitud de cada una de ellas. Luego, el peso total de cada parte del explosivo, es expresado por la Ecuación 4. Holmberg y Persson (1977).

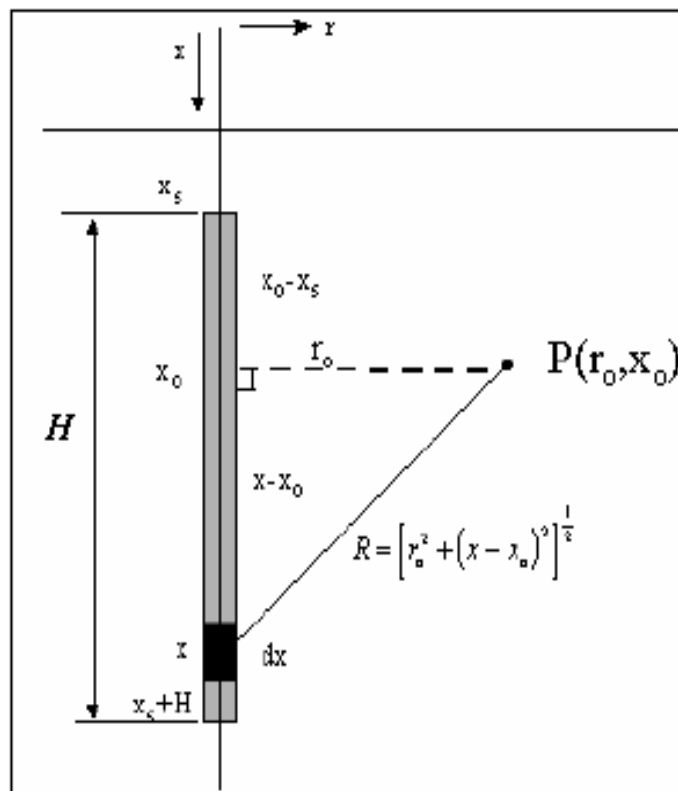


Figura 11. Esquema de H&P en Campo Cercano

Fuente: Holmberg y Persson (1977).

$$W = q * dx$$

Ecuación 5: Peso total de cada porción del explosivo

Dueñas (2018) opinó que, como se mencionó anteriormente, la ecuación general de la velocidad de las partículas es función del peso de la carga total (W) y la distancia (R) desde el centro de una carga esférica al punto en que se desea saber la velocidad. Por lo tanto, se forma la ecuación 5:

$$V = K \left( \frac{W^\alpha}{R^\beta} \right)$$

Ecuación 6: Ecuación general de la velocidad de partícula

Como se puede apreciar en la Figura 11,  $R = [(r - r_0)^2 + (x - x_0)^2]^{0.5}$ , por lo que la diferencial de la velocidad está definida como la ecuación 6:

$$dV = K \cdot q \cdot dx [(r - r_0)^2 + (x - x_0)^2]^{0.5}$$

Ecuación 7: Diferenciales de la velocidad pico partícula.

Dado que es interesante comprender el impacto global de la columna explosiva en el punto P, se puede ignorar la diferencia de tiempo entre la llegada de las vibraciones generadas por diferentes partes explosivas. Además, la amplitud máxima de vibración se utiliza independientemente de la dirección del punto de llegada (Dueñas 2018).

Según Holmberg y Persson (1977), la velocidad se puede calcular mediante la integración de la fórmula anterior. Los límites de la integración son:  $X_s$  (fondo del taco) y  $X_s + H$  (fondo de la columna explosiva). Aunque se puede evaluar cualquier valor de  $\alpha$  y  $\beta$ , se considera que es uno de los casos especiales de la ecuación general más aplicable al modelo, Ecuación 7:

$$V = K \left( \frac{R}{W^{0.5}} \right)^\beta$$

Ecuación 8: Ecuación general de mejor ajuste al modelo de H&P

Por lo tanto, de acuerdo con el modelo sueco de Holmberg y Persson (1977), la ecuación de la velocidad máxima de las partículas será:

$$PPV = K * \gamma^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dx}{[R_0^2 + (R_0 * \operatorname{tg}\phi - x)^2]^{\frac{\beta}{2\alpha}}} \right]^\alpha$$

Ecuación 9: Modelo de velocidad Holmberg y Persson (1977)

De donde se tendrá que  $\alpha = \frac{\beta}{2}$ , integrando la ecuación sería:

$$PPV = K * \left[ \left( \frac{\gamma}{R_0} \right) \left[ \arctan\left( \frac{H + X_s - X_0}{R_0} \right) + \arctan\left( \frac{X_0 - X_s}{R_0} \right) \right] \right]^\alpha$$

La ecuación anterior se puede simplificar en:

$$PPV = K(H\&P)^\alpha$$

Donde:

$q$  = Densidad lineal de carga [kg]

$R_0$  = Distancia de medición, desde la carga [m]

$H$  = Longitud de carga [m]

$X_s$  = Longitud de taco [m]

$X_0$  = Profundidad de medición [m]

$K$  = Factor de velocidad

$\alpha$  = Factor de decaimiento o atenuación

La ecuación H&P muestra que el factor que tiene el mayor impacto en la vibración máxima (pico) y en el daño no es el peso de la carga por retardo como se evidencia en la ecuación de Devine, sino la carga lineal, que es una combinación controlada por el diámetro del taladro y la densidad de carga (Contreras 2009).

Bravo (2018) menciona que, este modelo no considera el tamaño, secuencia y tiempos de iniciación de la voladura. Asimismo, no considera el grado de contención de explosivos.

## 2.2.4 DAÑO POR VOLADURA

Cuando se detona una carga explosiva su masa se transforma en gases a alta presión y temperatura, el efecto dinámico de la explosión genera una onda de choque (y no el hecho que se generen grandes presiones). La onda viajará a través del entorno, con forma cilíndrica al principio y esférica después. La figura 12 muestra el proceso de detonación:

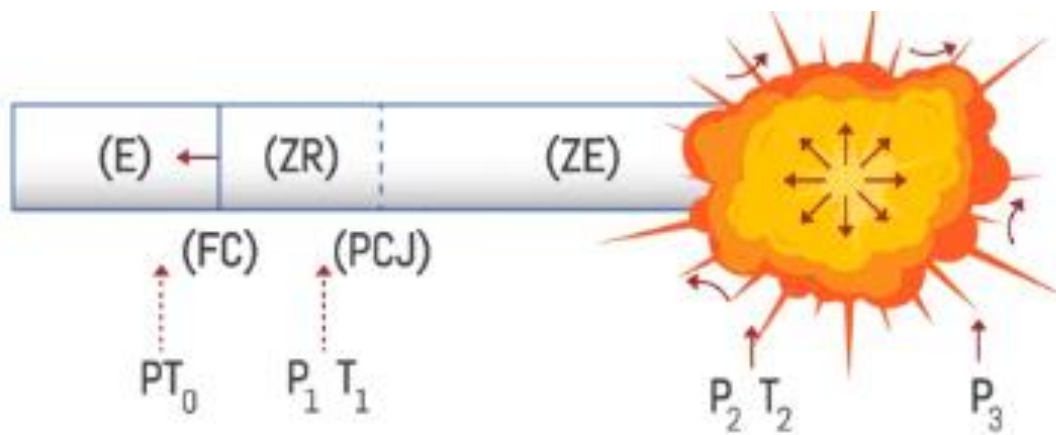


Figura 12. Proceso de detonación del explosivo  
Fuente: Exsa 2020.

Donde:

E: Explosivo aún sin reaccionar.

ZR: Zona de reacción.

ZE: Zona de explosión.

FC: Frente de choque de la onda de detonación.

PCJ: Plano de Chapman –Jouget (Límite de zona reacción hacia explosión)

PT0= Presión cero

P1T1=Presión y temperatura de reacción

P2T2= Presión y temperatura de explosión

P3= Presión de trabajo (efecto mecánico)

La figura 12 muestra todas las fases y efectos del proceso de detonación de un explosivo confinado en un taladro de voladura, desde el explosivo sin reaccionar hasta ensanchamiento del taladro por la presión de los gases en expansión.

Moraga (2018) sostiene que, el daño de los macizos rocosos es causado por tres mecanismos diferentes los cuales serán considerados como estándares de daño: Crear nuevas grietas superando la resistencia dinámica de la roca, la presión de aire excesiva provoca la extensión y apertura de las grietas existentes, inestabilidad de los mecanismos de falla (falla plana, cuña, vuelco, deslizamiento circular) que en condiciones estáticas era estable. Para la presente investigación detallaremos el daño en campo cercano.

a. Daño en campo cercano

McKenzie (1994) menciona que, el daño causado por la voladura es directamente proporcional a la energía de la onda de choque generada por la detonación de los explosivos, la cual se relaciona con la velocidad máxima (pico) de partícula (VPP) o PPV por sus siglas en inglés (peak particle velocity).

Moraga (2018) sostiene que, la velocidad máxima de las partículas suele estar relacionado con la capacidad de provocar nuevas fracturas en la roca debido a su relación con la deformación (válida para la condición de confinamiento del macizo rocoso en las zonas cercanas a la carga explosiva). Como se muestra en la Figura 13.

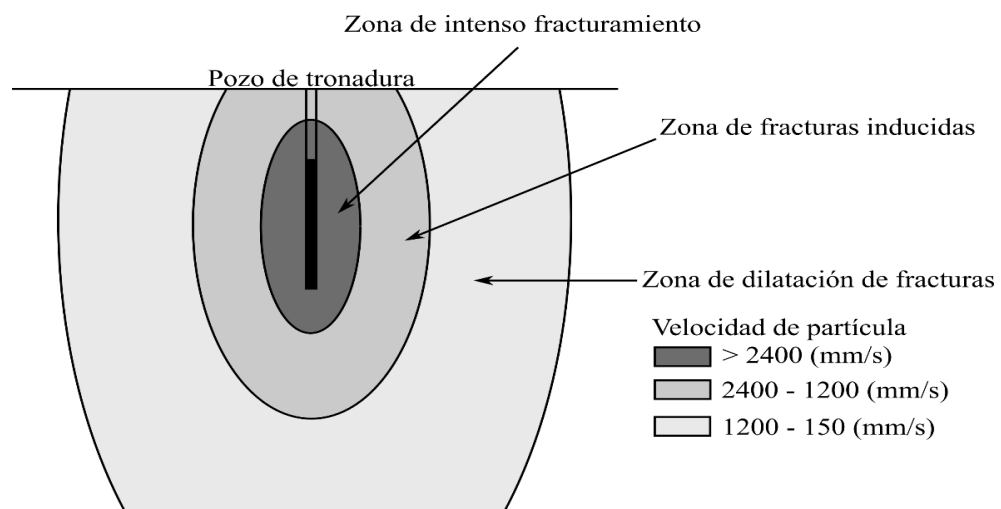


Figura 13. Modelo esquemático de fracturamiento por voladura.

Fuente: Moraga 2018.



El proceso de voladura solo produce ondas de compresión (ondas P), que se transforman gradualmente en ondas de corte (ondas S) cuando golpean una superficie discontinua, y se transforman gradualmente en ondas superficiales cuando alcanzan la interfaz entre el macizo rocoso y la atmósfera. Considerando los parámetros de la onda P, la deformación del producto de la tensión aplicada relacionada con la vibración en el macizo rocoso se relaciona con la Ecuación 9. Relación de PPV con la deformación (Troncoso 2019).

$$\varepsilon = \frac{\text{PPV}}{V_p}$$

Ecuación 10. Relación de PPV con la deformación

La ecuación anterior presenta la relación entre los niveles de vibración pico, PPV (mm/s) y la deformación inducida ( $\varepsilon$ ) para una masa rocosa de velocidad de onda compresional ( $V_p$ ).

De acuerdo con la Ley de Hooke, y asumiendo un comportamiento elástico de la roca, la velocidad de partícula crítica ( $V_{PP_{\text{crítica}}}$ ) que la roca puede soportar antes de que ocurra una falla por tensión, se puede determinar conociendo la resistencia a la tensión  $\sigma_t$  (Pa), el módulo de Young E (N/m<sup>2</sup>), y la  $V_p$  (m/s), para ello se usa la ecuación 10 Troncoso (2019).

$$\text{PPV}_{\text{CRÍTICO}} = \frac{\sigma_t * V_p}{E}$$

Ecuación 11: PPV crítico en función a ley de Hooke

A partir de la velocidad de partícula crítica de la roca se establecen 3 zonas de daño o alteración al macizo rocoso en función de la velocidad crítica de partícula (PPVc), la cual se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos de vibración que influyen en daño al macizo rocoso

RANGO DE VIBRACIÓN	TIPO DE DAÑO
<b>MAYOR DE 4*PPV(Critica)</b>	Intenso Fracturamiento
<b>MAYOR DE 1*PPV(Critica)</b>	Creación de nuevas Fracturas
<b>MAYOR DE 1/4*PPV (Critica)</b>	Extensión de Fracturas Pre – existentes

Fuente: Criterio de daño (Mackenzie 1994).

El criterio más utilizado para calcular el nivel de vibraciones crítico en un determinado macizo rocoso en campo cercano, se muestra en la ecuación 11:

$$PPV_{cmr} = \frac{(\sigma_t * \exp\left(\frac{RMR - 100}{27}\right) * V_p \text{cross - hole}}{E * \exp\left(\frac{RMR - 100}{36}\right)}$$

Ecuación 12: PPV crítico en función al criterio del macizo rocoso Bravo (2018)

Dónde:

PPV<sub>cmr</sub>: Velocidad pico partícula

$\sigma_t$ = Resistencia a la tensión (Mpa)

V<sub>p</sub> = velocidad de la onda P, calculada por método de Cross-Hole (m/s)

RMR= Valoración del macizo rocoso- Bieniawski (1972)

Bauer y Calder (1971) postulan que, los efectos sobre el macizo rocoso en función a la velocidad de partícula como se muestra en la Tabla 2. Estos están divididos en cuatro grupos desde un valor donde la roca permanecerá sana hasta un valor mayor a 2500 mm/s dónde el macizo rocoso termina totalmente agrietado.

Tabla 2. Criterio de daño al macizo rocoso de Bauer y Calder 1971

<b>Efectos sobre el macizo rocoso</b>	<b>Velocidad de partícula (mm/s)</b>
No hay peligro en roca sana	<250
Puede aparecer descostramiento en lajas por rotura de tracción	250-650
Grandes roturas por tracción o algunas grietas radiales	650-2500
Agrietamiento total del macizo rocoso	>2500

Fuente: Datos tomados de "Manual de perforación y voladura de rocas" (Jimeno 1994).

### 2.2.5 TÉCNICA SÍSMICA DE CROSS HOLE

Scherpenisse (2006) afirma que, es una medición directa de los cambios experimentados por la roca, permite realizar una evaluación cuantitativa de la condición de la roca a través de la medición de los cambios que sufre una onda de características conocidas a medida que viaja por el macizo rocoso, los cambios experimentados por la onda son: tiempo de viaje, cambios en la frecuencia y atenuación de la amplitud.

La técnica de Cross Hole es un arreglo de instrumentación orientada a determinar en forma local (a nivel de banco) valores de la Velocidad de Onda Sísmica ( $V_p$ ), para estos efectos se debe realizar una configuración geométrica de geófonos al interior del macizo rocoso (empotrados y cementados para garantizar una configuración solidaria al macizo rocoso) y generar ondas sísmicas mediante la detonación de cargas explosivas (Orica 2019).

La figura 14 muestra el esquema de distribución de geófonos (uniaxial y/o triaxial) en relación con la ubicación de las fuentes energéticas a utilizar, esto nos permitirá determinar la velocidad de la onda P.

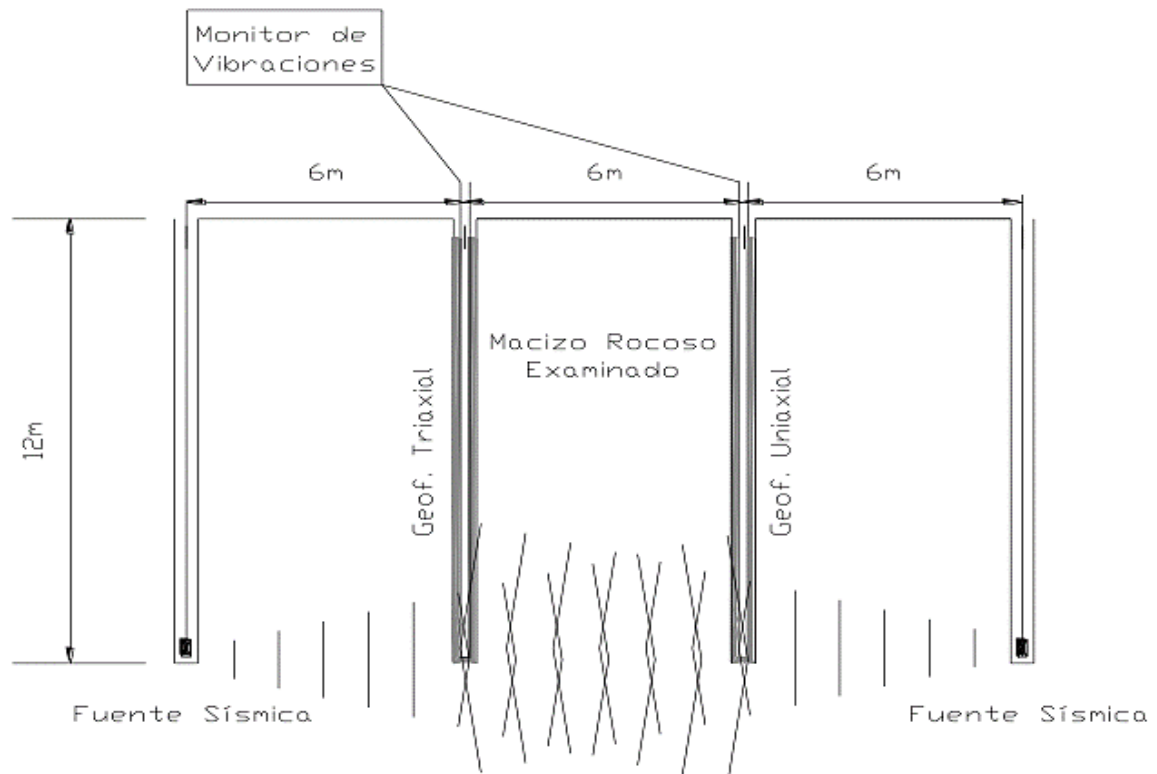


Figura 14. Esquema de Cross Hole a nivel de banco

Fuente: Orica 2019

Los valores de Velocidad de Onda P ( $V_p$ ) son obtenidos a través de una medición directa.

$$V_p = D/T$$

Ecuación 13: velocidad de la onda P en función de distancia y tiempo

Dónde:

D: distancia entre geófonos (m).

T: diferencia de tiempo de arribo de la onda en los 02 geófonos (s)

Para la instalación de los geófonos se debe tener las siguientes consideraciones: Es necesario realizar por lo menos 2 perforaciones dentro del macizo rocoso, dentro de las cuales se ubican las fuentes y los detectores. La profundidad de los geófonos es de la mitad del banco, para asegurar que no se encuentren en una zona dañada por disparos en el banco superior.

La carga (fuente sísmica), debe aproximarse a una carga esférica es decir menor a 6 veces el diámetro del taladro y la distancia entre los geófonos debe ser tal que se pueda notar la diferencia de llegada de las ondas (efectos en la precisión del cálculo).

## 2.2.6 EQUIPOS DE MONITOREO DE VIBRACIONES

Respecto a los instrumentos y/o equipos utilizados para realizar el monitoreo de vibraciones, existen muchas alternativas. Esta investigación se realizó con los siguientes equipos especializados:

### a. Transductores (sensores)

Los transductores se utilizan para medir la velocidad o aceleración de partículas (vibraciones) del suelo, son usualmente instalados en un arreglo triaxial, y la señal de cada uno es recolectada separadamente. (Giraldo 2010) destaca que, la característica de los datos está ligado al tipo de transductor utilizado, técnica y orientación de su instalación, las señales de salidas de los transductores se registran como una señal análoga o convertidas en señal digital y grabadas.

En la actualidad existen dos tipos de transductores para medir vibraciones en el terreno, como el geófono y el acelerómetro, la elección de ellos dependerá de la precisión, costo y relación señal ruido; enfatizando que en la presente investigación utilizaremos geófonos para realizar las mediciones.

- Geófono: Es el encargado de captar las vibraciones mecánicas y convertirlas en corriente eléctrica, que se transmite por cable al amplificador, que a su vez las registra en la memoria, y luego transmite toda la data a un microcomputador. Los datos resultantes son suministrados en términos de velocidad y frecuencia. (Cintex 2006)

Las velocidades de partículas son representadas por un vector de tres componentes el cual tiene la dirección vertical, la longitudinal y la transversal. La velocidad máxima no ocurre simultáneamente en las tres direcciones, de este modo, lo que debe medirse de acuerdo a los estándares técnicos, es la velocidad

resultante en cada intervalo de tiempo de tal manera que se pueda alcanzar la velocidad máxima. Estos se pueden instalar en la superficie (a menudo se utiliza para medición de campo lejano) o dentro del macizo rocoso (útil para medición de valores de campo cercano) (Cintex 2006). Tienen las siguientes características:

- Frecuencia de registro: Existen geófonos de 14Hz y 28 Hz, capaces de medir frecuencias con perfecta precisión a partir de dichos intervalos.
- Sensibilidad: indica la magnitud máxima de vibraciones que pueda recibir un geófono (mm/s) como muestra la Figura 15.

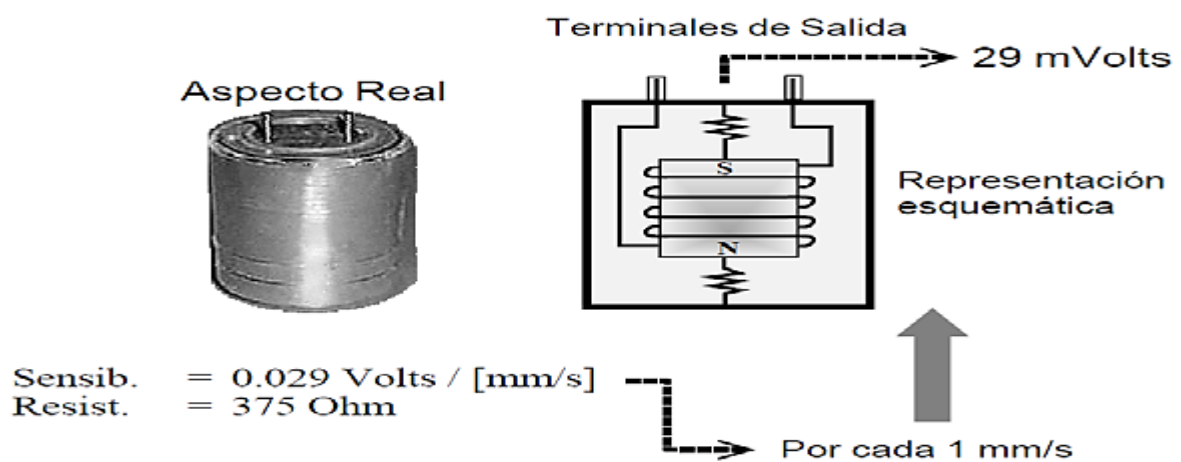


Figura 15. Sensibilidad de los geófonos

Fuente: Cintex 2006

- Desplazamiento: comúnmente los geófonos utilizados tienen un desplazamiento máximo de 2mm para el momento de movimiento.
- Dirección: se trazará según la dirección por dónde sea percibida por los geófonos, además es necesario tener en cuenta que cada carga genera una onda de vibración lo cual sumando a la dirección y ubicación que nos da el geófono nos permite saber la ubicación exacta del taladro detonado, como se puede observar en la figura 16 (Scherpenisse 2006).

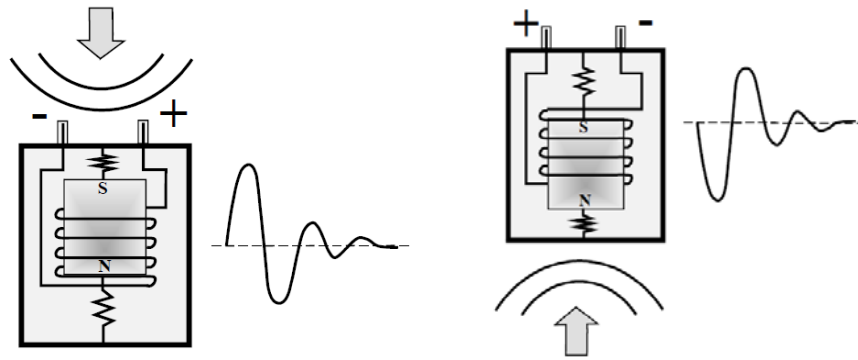


Figura 16. Interpretación de signos- geófonos

Fuente: Scherpenisse 2006.

La instalación y forma de orientación de los geófonos es muy importante ya que los datos obtenidos tienen relación directa en este sentido, la relación ortogonal entre las 3 componentes de una disposición triaxial se logra ubicando cada una de las tres componentes sobre las caras opuestas de un pequeño trozo de barra en ángulo rígido no conductor, como se muestra en la figura 17 (Exsa 2019).

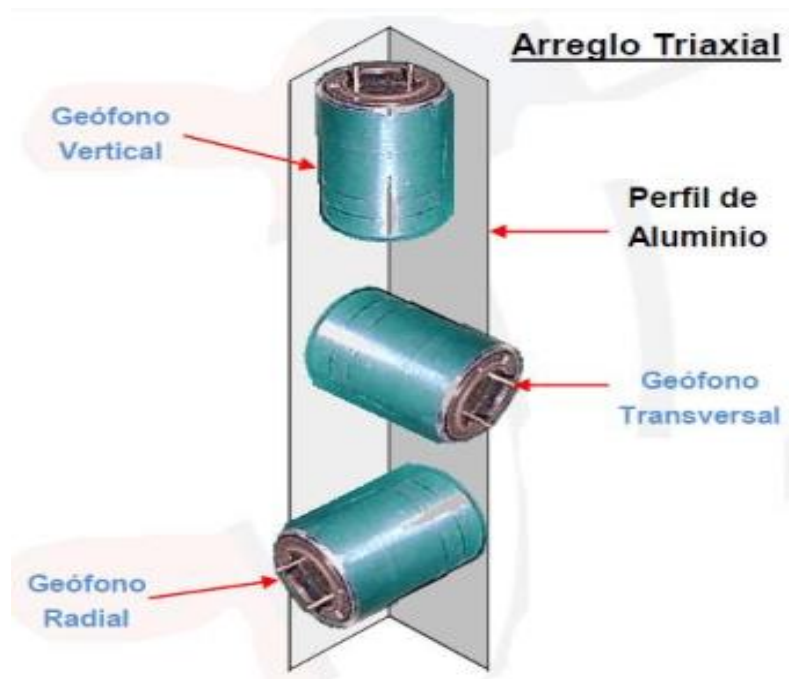


Figura 17. Instalación y orientación de un arreglo triaxial

Fuente: Exsa 2019

Cuando los cables están conectados, el conjunto es localizado dentro de un trozo de tubo de PVC de (50-70 mm) preferiblemente de un diámetro muy similar al del geófono, y se sumerge en una mezcla de resina (pegamento), que actúa como aislamiento eléctrico entre los transductores. De esta forma, se consigue un

elemento integrado que ahora se puede instalar en el macizo rocoso en lo que respecta a la orientación y una buena conexión; cemento con propiedades del hormigón como se muestra en la figura 18 (Scherpenisse 2006).

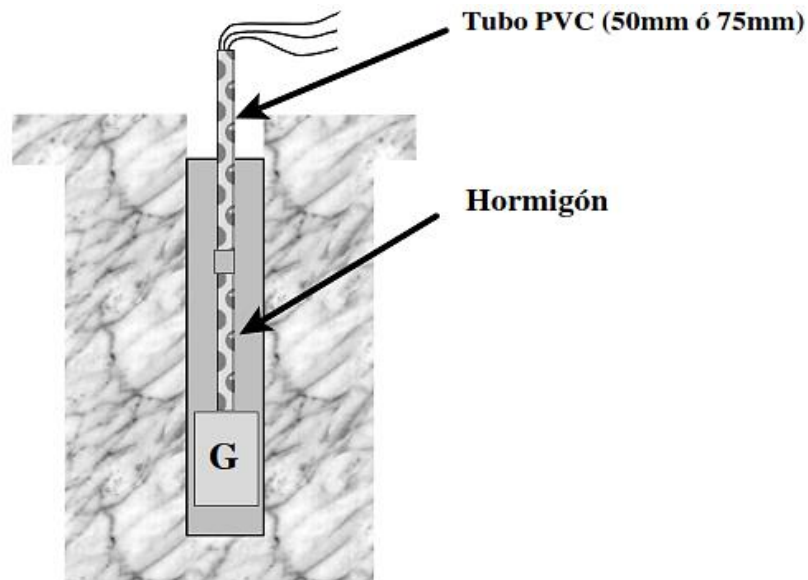


Figura 18. Acoplamiento de geófonos

Fuente: Scherpenisse 2006

## 2.2.7 EQUIPO DE ADQUISICIÓN

Permite medir las vibraciones. En la presente investigación se utilizó un transductor de la marca Instantel que ofrece de 2 a 300 hz en un paquete redondo, este puede ser instalado en el piso, pared o techo usando una variedad de procedimientos de instalación incluyendo pernos de burbujas, varilla de montaje, o una placa niveladora opcional con un pie nivelador y un nivel de burbuja integrado, a continuación, describiremos el equipo de adquisición Mímate pro6-instantel (Instantel 2017).

### a. Minimate Pro6-Instantel

Es un monitor de sonido, sobrepresión y vibración, permite ver la vibración de pico y las frecuencias de cruce cero inmediatamente después de cada evento, así como datos destacados, incluyendo operador, activación, duración y vibración máxima y sobrepresión, también están disponibles para su revisión, directamente en las



pantallas de los monitores y se ajusta a cualquier canal con una variedad de sensores; los geófonos, acelerómetros, hidrófonos y un canal de micrófono. (Instantel 2017). Se muestra la figura 19.

El Minimate Pro6 ofrece 64 MB de memoria, robustez mejorada, incluyendo conectores y una caja de metal, y resistencia al agua. Para instalaciones remotas, la función Auto Call Home de Instantel transferirá automáticamente archivos de evento del campo a la oficina tal y como se grabaron usando una variedad de módems inalámbricos. Con 6 canales de adquisición de datos que serán usados en la presente investigación en análisis de voladuras en campo cercano y lejano. (Instantel 2017).

El equipo se puede activar por cable cortado el cual se activa con el inicio de la voladura y por umbral el cual se activa una vez que se supera un determinado nivel de perturbación. El equipo cuenta con una característica importante, la cual se describe a continuación:

-Sample rate (SR): sugiere la contabilización del número de datos (velocidad de partículas) que registra el equipo por unidad de tiempo, este dependerá de la frecuencia máxima de la onda, generalmente se estima 10 veces la frecuencia máxima de la onda. ejemplificando, una medida en campo cercano equivalente a una frecuencia de 300Hz, el SR debe ser del orden de 3000 muestras por segundo o tomar un dato cada 0,333 ms. (Instantel 2017).

-Pre trigger: indica el intervalo de tiempo antes de iniciar la detonación de una carga explosiva para luego dar pase al análisis de geófonos. (Instantel 2017).



Figura 19. monitor de vibración Minimate Pro6

Fuente: (Instantel 2017).

## 2.2.8 EQUIPOS DE ANÁLISIS

La información de vibración se suele realizar en un ordenador mediante un software (Blastware) con funciones para una gestión integrada de la forma de onda, y donde las tareas más importantes que se deben realizar son las siguientes:

- Desplegar múltiples señales.
- Amplificación de partes de la señal total (efecto zoom).
- Cursor móvil sobre la señal para un análisis acucioso de los tiempos y amplitudes
- Generar el vector suma de tres componentes ortogonales.
- Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia.
- Filtro de frecuencia.
- Comunicación externa hacia impresora o plotter

Luego para hacer el modelamiento de vibraciones en campo cercano se utiliza el software Microsoft Excel y para la simulación se utiliza el software Jk-Bench.

## 2.2.9 PRINCIPALES NORMATIVAS DE VIBRACIONES

Actualmente se mide y se compara con los estándares internacionales de vibración. Estos estándares permiten determinar si se alcanza el nivel de vibración y / o estructura que puede causar daño a un macizo rocoso en particular (Davey Bicford, 2013).

Cospedal (2019) enfatiza que, el control actual del impacto de la vibración de voladura se logra cumpliendo con el nivel recomendado por la norma, pero también se puede lograr diseñando el proceso que provoca la vibración, por ejemplo, limitando la carga para reducir la vibración causada por voladuras o realizar voladuras en secuencia, la energía transmitida de esta manera se distribuye en el tiempo, reduciendo así la velocidad máxima de vibración. La Tabla 3, muestra las normas internacionales más relevantes que se utilizan como guía a criterio del autor.

Tabla 3. Normativa internacional en el control de vibraciones

<b>País de procedencia</b>	<b>Nombre de normativa</b>	<b>Año</b>
Alemania	DIN 4150	1976(1999&2001)
Brasil	CETESB D7.013	2000
Escocia	PAN50	2002
Estados Unidos	USBM RI 8507	1982
España	UNE 22-381-93	1995
Francia	GFEE	2003
Internacional	ISO 4866	1992
Italia	UNI 9916	1993
Nueva Zelanda	NZS 4403	1990
Portugal	NP 2074	1985
Reino Unido	BSI 7385	1995
Suecia	SS 460 48 46	1993
Suiza	SN 640 312a	1994

Fuente: Cospedal 2019.

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Vibración.** Representan un estado de esfuerzos (energía) que se transmiten en el macizo rocoso como ondas sísmicas (movimiento ondulatorio) producto de la detonación del explosivo de los taladros de voladura (Exsa 2019).

**Voladura de pre corte.** Consiste en crear en el cuerpo de roca una discontinuidad o plano de fractura (grieta continua) antes de disparar la voladura principal o de producción, mediante una fila de taladros generalmente de pequeño diámetro, muy cercanos, con cargas explosivas desacopladas y disparos instantánea (Tovar 2015).

**Light Drilling.** Taladros de la malla de pre corte que sirven para filtrar los niveles de vibración, así como para amortiguar el efecto de presión de gases en los taludes durante la iniciación de la voladura. (Yanacocha 2020).

**Modelo.** Es una representación parcial de la realidad que refiere a que, a la imposibilidad de explicar una totalidad, e involucrar el total de las variables que esta pueda tener, por lo que se puede llegar a la conclusión de que el modelo hace referencia a la explicación de un fenómeno o proceso específico (Gomez 2019).

**Campo cercano.** Término que describe el nivel de vibraciones cercanas a una columna larga de explosivos. Generalmente, cuando se mide tan cerca, como aproximadamente 5 longitudes de la carga de una columna de explosivo, los niveles de vibración son llamado de campo cercano, y requiere la aplicación de ecuaciones complejas para la predicción. En el campo cercano es probable que se dañe la roca por la iniciación de fracturas frescas y por la dilatación de fracturas existentes. (Tovar 2015).

**Onda de compresión P.** Las partículas oscilan en la misma dirección de propagación (Albino 2015).

**Airblast.** Sobrepresión de aire inducida por voladura medible por medio de micrófonos (Davey Bickford 2013).

**Frecuencia.** Cuantos ciclos de compresión y tensión transmiten por segundo (Lozada 2017).

**Factor de carga.** Este es el término usado para describir la cantidad de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca, por eso tiene las unidades de  $\text{kg}/\text{m}^3$  o  $\text{kg}/\text{ton}$  (Chiappetta 2014).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

Las operaciones de Minera Yanacocha están ubicadas a 45 kilómetros al norte de la ciudad de Cajamarca y 800 kilómetros al noreste de la ciudad de Lima, entre los 3500 y 4100 metros sobre el nivel del mar. Las actividades se desarrollan en cuatro cuencas: Quebrada Honda, cuenca del río Chonta, cuenca del río Porcón y cuenca del río Rejo, como se puede evidenciar en el Anexo N° 1.

#### **3.2 ACCESIBILIDAD**

El acceso a Minera Yanacocha desde la ciudad de Cajamarca está a 48 km, la vía terrestre principal es con dirección a la provincia de Hualgayoc, todo su trayecto toma aproximadamente 60 minutos de viaje hasta llegar a la Garita Huandoy que es el acceso principal.

#### **3.3 CLIMA Y VEGETACIÓN**

El clima del distrito minero de Yanacocha es variante con temporada de lluvias y estación seca. El clima es frío y la temperatura está por debajo de los 3 °C, por lo que las heladas continúan durante la temporada de lluvias. En la estación seca, fuerte luz solar, fuertes vientos y temperaturas superiores a 20 ° C. Por lo general el periodo lluvioso se presenta entre los meses de Octubre – Abril con un clima frío, lluvias ligeras, granizo, tormenta y humedad hasta 75%. Por otro lado, el periodo seco se presenta entre los meses de mayo-octubre, La temperatura máxima supera los 20°C y el clima en la tarde se torna más fresco e incluso con presencia de fuertes vientos que pueden alcanzar los 40 Km / h (Senamhi 2020)

### 3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

El tipo de terreno en donde se realizaron las pruebas presenta alteraciones sílice granular (Figura 20), esta roca macroscópicamente contiene >90% de sílice y la textura es granular, deleznable, en algunos casos sacaroideos; tiene intensidades de granular mayor de 1 (debe ser 2 o 3 de intensidad). El Anexo N° 2 muestra las alteraciones litológicas de Minera Yanacocha.

La sílice granular se forma debido a la lixiviación ácida, como producto de la condensación de los fluidos hidrotermales, especialmente el  $H_2S$ , al mezclarse con las aguas subterráneas y generalmente se encuentra en los niveles más altos del sistema. El azufre nativo es un constituyente común en esta alteración. La sílice granular se divide en dos grupos:

El primer grupo sílice granular (SG2) donde el material es una arena sacarosa con visible presencia de fragmentos gruesos y menor presencia de fragmentos silíceos finos y el fragmento se disgrega difícilmente con un lápiz de dureza y el segundo grupo de sílice granular (SG3) donde el material es una arena fina silícea sacarosa sin presencia de fragmentos grandes y se disgrega fácilmente al ejercer fuerza con la mano.

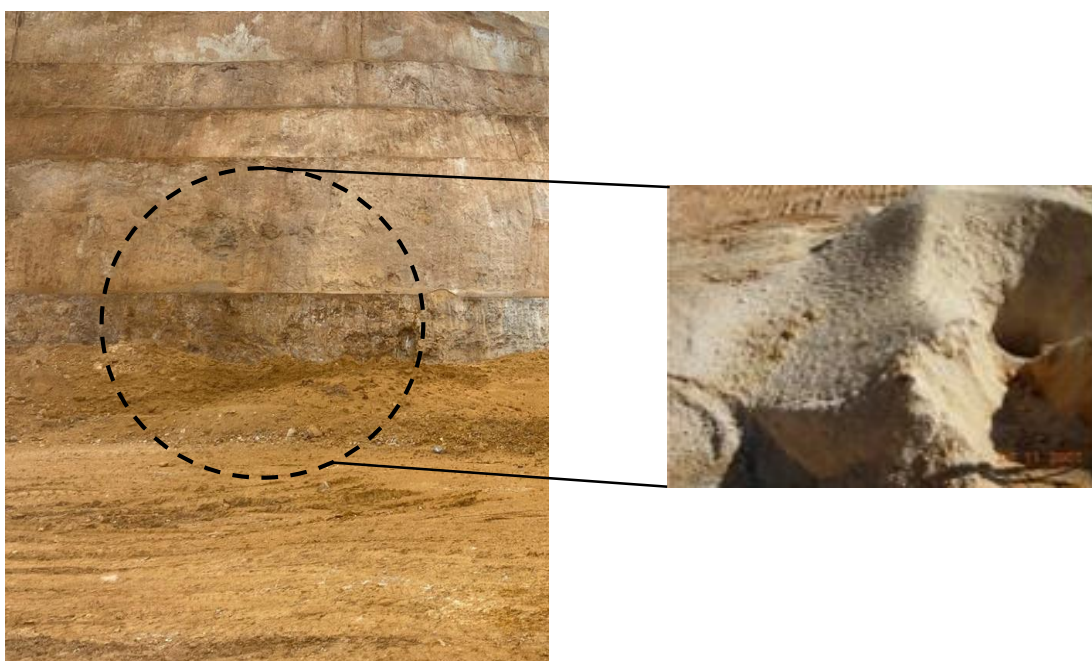


Figura 20. Alteración de sílice granular en el nivel 4021 del tajo Quecher Main

### 3.5 PROCESO DE MINADO EN MINERA YANACOCHA

El proceso operativo de minado en Minera Yanacocha en torno a las cuales gira toda la operación de extracción se divide en cuatro etapas: Perforación, Voladura, Carguío y Acarreo (Figura 21). Actualmente se minan los siguientes tajos mediante este proceso: Yanacocha, Quecher main, Chaquicocha, Tapado Oeste Layback.

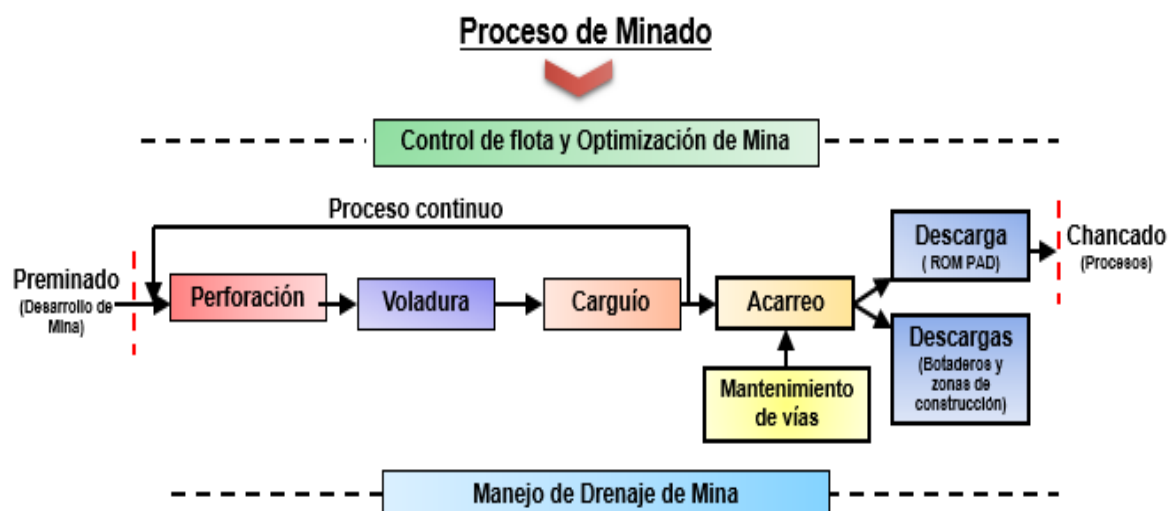


Figura 21. Ciclo de minado en Minera Yanacocha  
Fuente: Minera Yanacocha 2018.

#### 3.5.1 PERFORACIÓN

Es la primera actividad del ciclo de minado de producción que consiste en realizar taladros (blast holes-huecos cilíndricos) de acuerdo a la altura del banco a minar, estos posteriormente serán cargados con agentes de voladura. En minera Yanacocha los equipos que actualmente se utilizan para perforar tienen un sistema rotativo (Pit Viper-DML) y roto-percutivo con martillo en fondo (Rock Drill). El diámetro de perforación para cada tipo de perforadora se detalla en la Tabla 4 mostrado a continuación.

Tabla 4. Equipos de perforación

Flota de Equipos de Perforación	Unidades	Diámetro de Brocas (pulg)
Pit Viper AC PV271	3	10 5/8 - 9 7/8
DML	1	9 7/8
Rock Drill L8	1	5

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Cada equipo de perforación tiene una profundidad máxima de perforación acorde al tipo de malla a perforar; a continuación, se detalla:

- Pit Viper 271: Tienen un sistema de alta precisión y pueden perforar aproximadamente 14 metros en una corrida y 22 metros de profundidad con adición de barras, su uso es para perforar taladros de producción. Ver figura 22
- DML: Al igual que las Pit Viper cuentan con un sistema de alta precisión y perfora en una pasada aproximadamente 10 metros y con adición de barra hasta 13 metros de profundidad, se utilizan para perforar taladros de procedimiento (buffer) y algunas veces para taladros de producción.
- Rock Drill: Se utilizan por lo general para perforar taladros inclinados en pre corte y perfora aproximadamente 48 metros como máximo.





Figura 22. Perforadora Pit Viper 273 - Tajo Yanacocha

La línea de perforación (Drill pipe) de manera general que se utiliza en Minera Yanacocha es: Olla centralizadora, Estabilizador (bit sub), barra superior, barra inferior, Adaptador superior (top sub), Shock Absorber (amortiguador), broca tricónica. Para mejor detalle se muestra en la Figura 23.

En Minera Yanacocha se tiene 3 tipos de diseño de mallas de perforación mostrados en la Figura 24, las cuales cumplen diferentes funciones acordes con las necesidades, fases de la mina y resultados a obtener. Se detalla a continuación:

- **Pre corte:** Representa la primera fila de taladros, cumplen la función de control de paredes (Wall control), consiste en provocar un plano de rotura (grieta) coincidiendo con la superficie del talud, la voladura de estos dependerá de la dureza del macizo rocoso, tienen una inclinación de  $70^\circ$  a  $75^\circ$ . La detonación dependerá de la dureza del macizo rocoso. Actualmente estos taladros no se cargan, sirven de filtro para minimizar las vibraciones, tienen una inclinación de  $90^\circ$ .

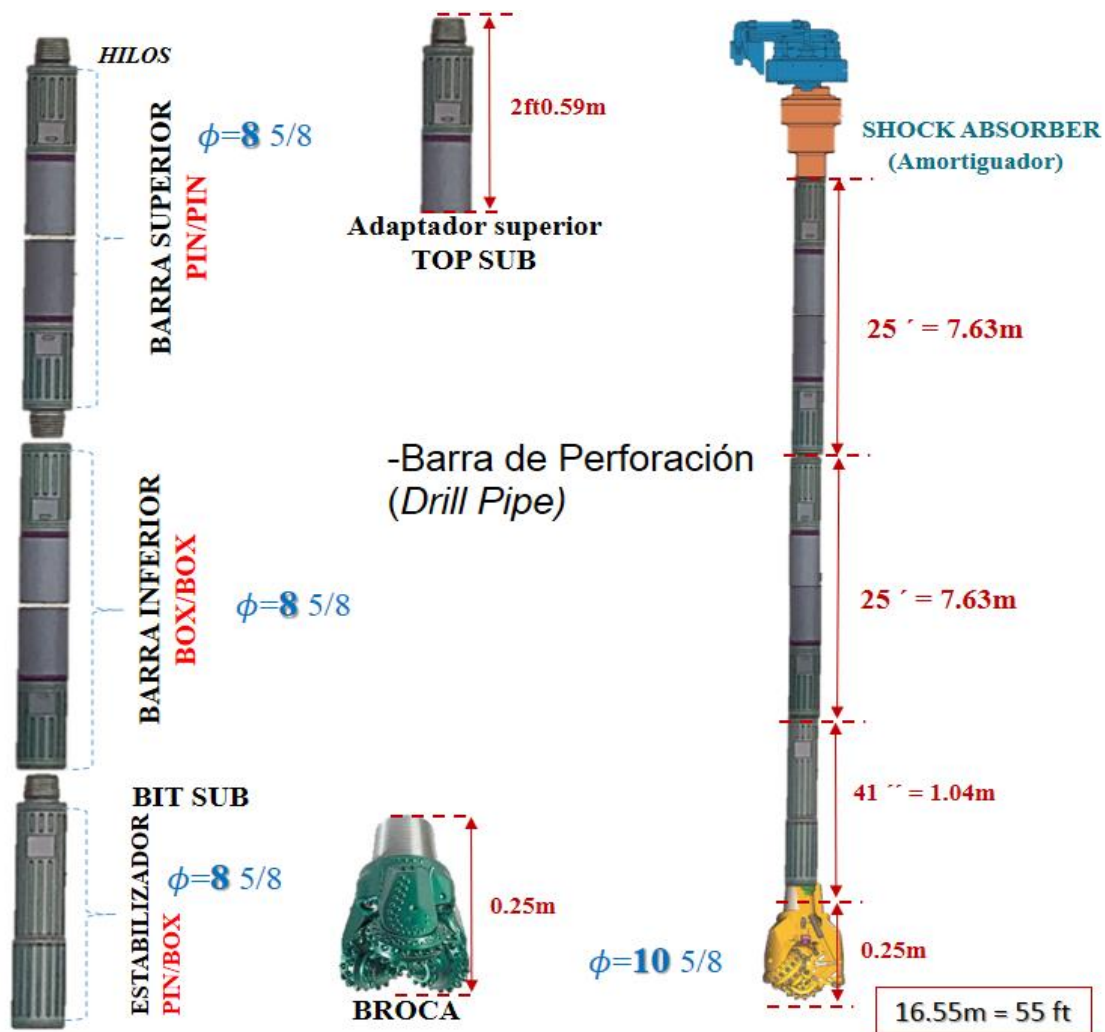


Figura 23. Línea de perforación de perforadoras Pit Viper 273.

- **Procedimiento (Buffer):** Tienen la finalidad de apoyar a las líneas de pre corte, amortiguando la energía de la voladura para no generar daño en los taludes de la zona disparada, constan de un paquete de 3 filas denominadas adyacente, primera de producción y segunda de producción.
- **Producción:** Su función es fragmentar de manera óptima el material maximizando la producción de la voladura.

La figura 24, muestra desde una vista perfil los tipos de taladros (Pre corte, Procedimiento, Producción) utilizados actualmente con su respectiva nomenclatura.

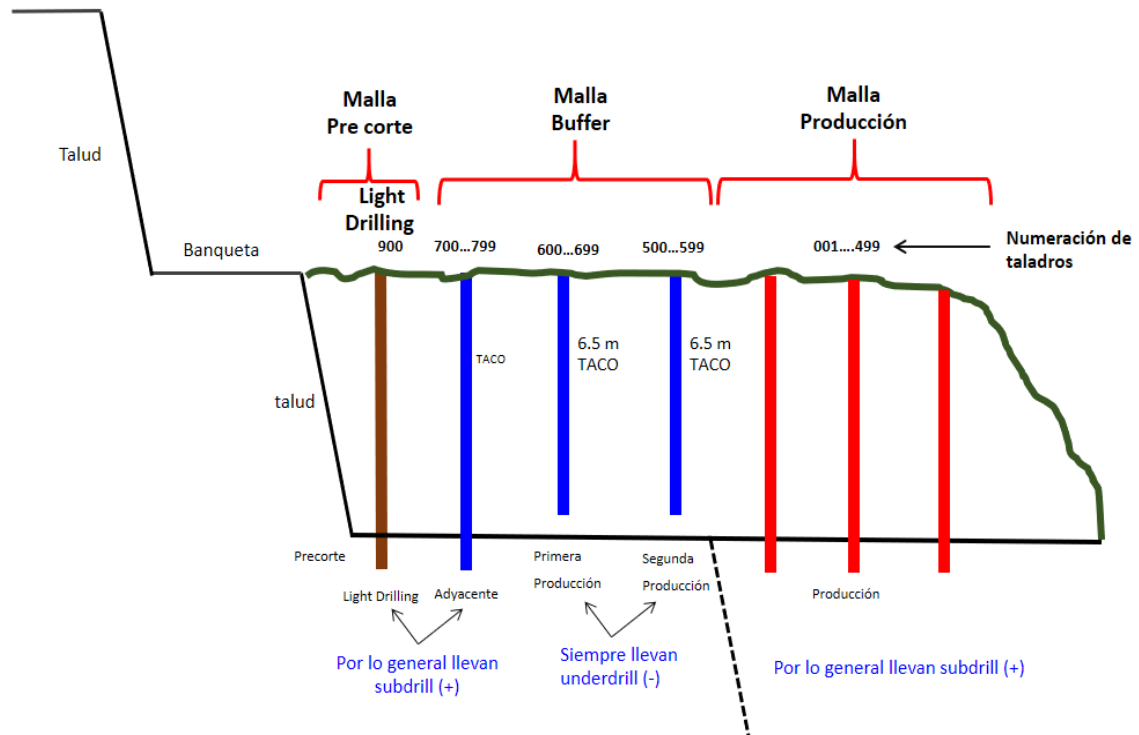


Figura 24. Tipos de taladros de perforación

Fuente: Minera Yanacocha 2020

La tabla 5, indica los parámetros de diseño para cada tipo de taladros de pre corte, procedimiento y producción con su respectivo diámetro y espaciamiento utilizados actualmente.

Tabla 5. Detalle de cada tipo de diseño de taladros

Tipo de diseño	Diámetro (pulg)	Equipo de Perforación	Carga Explosiva	Espaciamiento (m)
Pre corte	5	Rock Drill L8	Si	1.8
Light Drilling	10 5/8	PV 271	No	2m
Procedimiento	9 7/8	IR DML	Si	5-6
Producción	10 5/8	PV 271	Si	7-8

Fuente. Minera Yanacocha 2020.

### 3.5.2 VOLADURA

Minera Yanacocha tiene varios frentes de minado, cada uno de ellos con diferente tipo de litología es por ello que se utiliza diversas mezclas explosivas. Los agentes y explosivos de voladura principalmente utilizados se detallan a continuación:

- a. Emulsión gasificada: Mezcla compuestas básicamente por una solución oxidante de Nitrato de Amonio y agua, por un combustible insoluble en agua, un agente emulsificante y por elementos sensibilizadores y potenciadores, tiene alta resistencia al agua y baja probabilidad de producir gases nitrosos
- b. Mezcla explosiva Quantex: Mezcla de Nitrato de Amonio Quantex (de alta densidad) con emulsion gasificable. Que luego se sensitiviza con burbujas de nitrógeno, por reacción química con una solución de nitrito de sodio. De este último la formación de burbujas produce un aumento de volumen, que denominamos esponjamiento como se muestra en la figura 25.



Figura 25. Mezcla explosiva Quantex 73  
Fuente: Minera Yanacocha 2020

Este explosivo (Mezcla explosiva Quantex) a medida que progresa el tiempo de reacción, disminuye la densidad, como se muestra en la figura 26, en un gráfico de densidad vs tiempo.

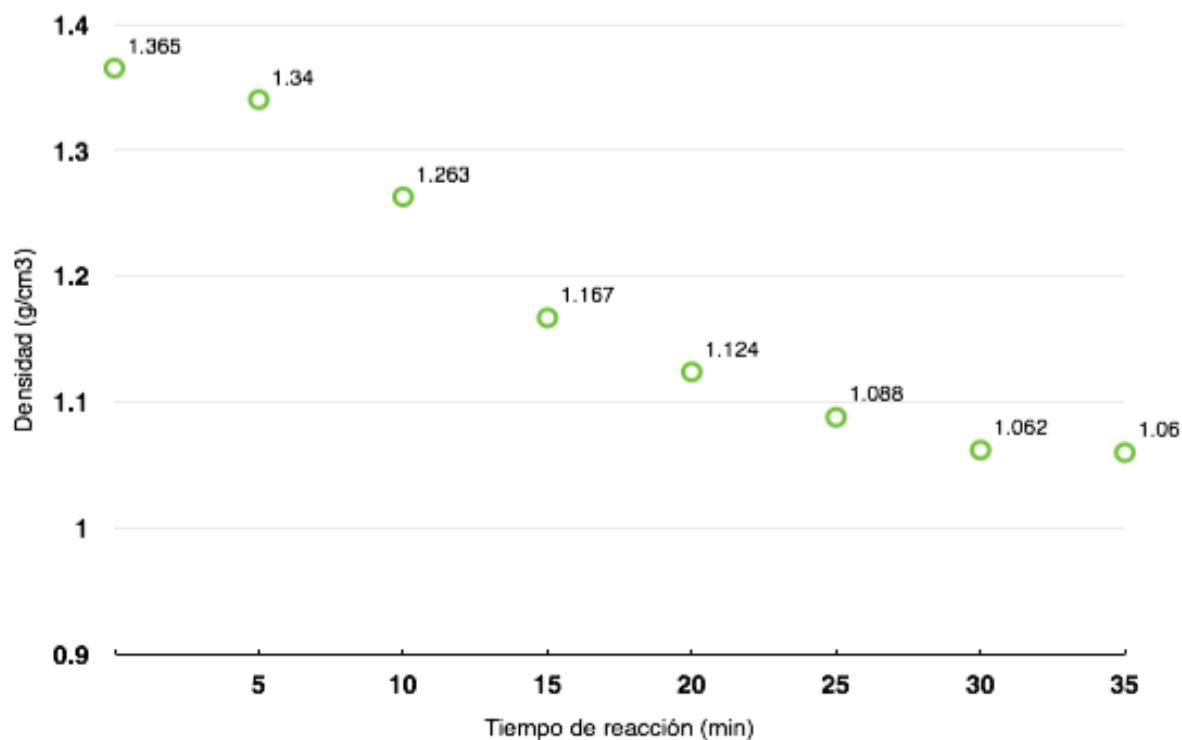


Figura 26. Reacción de gasificación (esponjamiento) de la mezcla explosiva Quantex.  
Fuente: Minera Yanacocha, 2020.

Las densidades de los agentes de voladura utilizados actualmente en Minera Yanacocha como Slurrex, Nitrato de amonio, Petróleo se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Densidades de Agentes de voladura utilizados en Minera Yanacocha

Agentes de voladura	Densidades
Slurrex G	1.36 ( $\pm 0.04$ )
Nitrato de Amonio Quantex	0.94 ( $\pm 0.04$ )
Nitrato de Amonio Enaex	0.74 ( $\pm 0.01$ )
Petróleo	0.85 ( $\pm 0.01$ )

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Las características de explosivos de voladura como composiciones, densidad, velocidad de detonación (VOD) y resistencia al agua para el Anfo, Anfo pesado(Emulsión+Anfo) se detalla en la tabla 7. Para este último su composición es de acuerdo al porcentaje de mezcla, por ejemplo, un HA-46 significa 40% de emulsión y 60% de Anfo.

Tabla 7 .Características de explosivos de voladura utilizados en Minera Yanacocha.

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
ANFO	0	100	0.80 (±0.01)	3800 - 4500	Nula
HA-46	40	60	1.15 (±0.01)	5000 - 5200	Baja
HA-73	70	30	1.30 (±0.01)	4300 - 4500	Excelente

Fuente: Exsa 2016

Para la tabla anterior considerar:

-Mezcla explosiva: emulsión G + Nitrato prillex

-HA: Anfo pesado

-Rangos de VOD (Velocidad de detonación): Diámetros de 10 5/8

En la tabla 8 se detalla los kilos de explosivo de las mezclas explosivas por metro lineal utilizados en Minera Yanacocha para diámetros de perforación estandarizados.

Tabla 8. Kilos de explosivo por metro lineal utilizados en Minera Yanacocha

Mezclas Explosivas	Kilos de explosivo por metro lineal		
	5"	9 7/8"	10 5/8"
ANFO	10.1	39.6	45.8
HA-46	14.6	56.9	65.8
HA-73	16.5	64.3	74.4

Fuente: Exsa 2016.

Los accesorios de voladura utilizados para la configuración y el amarre de taladros de pre corte, procedimiento y producción se detallan a continuación en la tabla 9; estos accesorios tienen diversas funciones tales como: conectar taladros, retardos, iniciar la columna explosiva. Considerando que cada accesorio de voladura tiene que estar acorde al tipo de terreno a fragmentar.

Tabla 9. Accesorios utilizados en Minera Yanacocha

Accesorios de Voladura	característica
Booster	450 gr-1 LB
Cordon Detonante:	5P & 10P
Detonator nonel:	17,25,35,42,65,100,600 MS
Conector Biridireccional	200 MS
Detonador eléctrico	Digishot Plus
Separator Blasting	
Cámara de aire	Taponex- Explodeck
Cable eléctrico	roll x 200mt

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Para el traslado de los explosivos desde las canchas de nitrato (almacén) hacia el área a disparar se utilizan camiones fábrica de gran capacidad adecuados con sistemas vaciables y bombeables. Los camiones utilizados para este servicio en minera Yanacocha se detallan en la tabla 10 con sus respectivas marcas y capacidades

Tabla 10. Equipos utilizados en servicio de voladura.

UND	EQUIPO	CAPACIDAD	
		NITRATO DE AMONIO	EMULSIÓN
1	Camión fábrica Mack	8 Tn	12 Tn
1	Camión fábrica Scania Q-26	8 Tn	12 Tn
1	Camión Q-207 Mack	8 Tn	12 Tn

Fuente: Exsa 2020

Para el traslado de los accesorios de voladura mencionado en la tabla anterior se utilizan camiones especiales o camionetas. Así como también para el tapado final de taladros se utilizan equipos auxiliares de línea amarilla detallados en la tabla 11.

Tabla 11. Equipos auxiliares utilizados en servicio de voladura.

UND	EQUIPO AUXILIAR	MODELO
1	Minicargador	246D3
2	Camionetas furgon	Hilux 2017

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

La figura 27 muestra las unidades (camionetas) denominadas furgon en donde se realiza el traslado de accesorios de voladura.



Figura 27. Camionetas furgon de transporte de accesorios de voladura.

Fuente: Minera Yanacocha 2020

Para el carguío de explosivo en los taladros se utiliza dos sistemas: bombeable (taladros con agua) y vaciable (taladros vacíos); se cuenta con un camión especial para cada sistema, para mejor detalle se muestra en la figura 28 y 29.





Figura 28. Camión fábrica bombeable  
Fuente: Minera Yanacocha 2020.



Figura 29. Camión fábrica vaciable  
Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Luego de llenar los taladros con explosivo, se procede a dar inicio a las mallas de la voladura.

La calidad de gases producto de la voladura en minera Yanacocha se divide en 6 niveles, cada uno de estos niveles está en función de los gases nitrosos generados en la malla de voladura. Para mayor detalle se muestra la tabla 12.

Tabla 12. Niveles de gases producto de la voladura.

Nivel	Gases Nitrosos	% malla
0	No Humos	0 %
1	Leve-Humos color amarillo	<15%
2	Menor-Humos de color amarillo/anaranjado	<30%
3	Moderado-Humos color anaranjado	<50%
4	Significante-Humos color anaranjado	>50%
5	Alto-Humos color anaranjado/rojo	>75%

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Los niveles de gases están entre leve (0) y alto (5) mencionados en la tabla 12, para mejor detalle se muestra la figura 30 con las apariencias típicas de estos.



Figura 30. Niveles de gases producto de la voladura.

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

### 3.5.3 CARGUÍO

Post voladura y disipación gases, el material volado tiene que ser cargado. Actualmente Yanacocha tiene una flota de equipos de carguío (Tabla 13), de los cuales destacan por su mayor tamaño las 04 palas hidráulicas Hitachi EX5500, para referencia se muestra en la figura 31. (Minera Yanacocha 2020).

Los equipos de carguío cuentan con modernos sistemas de control y comunicación, tanto para su producción (tasa de excavación, consumo de combustible, precisión de minado, etc.) así como su ubicación. Tienen un sistema de posicionamiento global de alta precisión que permite conocer sus ubicaciones exactas en la operación. Además, Yanacocha cuenta con el sistema de gestión de flotas (Dispatch), el cual permite maximizar la producción y eficiencia de los equipos de carguío y acarreo (Minera Yanacocha 2020). En la tabla 13 se describe la flota de equipos de acarreo que se tiene en la actualidad.

Tabla 13 .Flota equipos de Carguío para el minado de material

Flota de equipos	# Unidades	Capacidad cucharón (m <sup>3</sup> )
Hitachi EX5500 Pala	2	29.0 – 30.6
Hitachi EX2500 Excavadora	4	17.0
Cat 994 Cargador sobre ruedas	1	14.0 – 36.0

Fuente: Minera Yanacocha 2020.



Figura 31. Pala Hitachi EX5500 realizando carguío en el tajo Quecher Main

### 3.5.4 ACARREO

El material fragmentado es minado por las palas, cargadores y es transportado a los diferentes puntos de destino mediante camiones Caterpillar. Casi toda la flota de acarreo está compuesta por camiones Cat 793, con capacidad de 240 toneladas métricas, los cuales transportan el material a las pilas de lixiviación, depósitos de desmonte, Gold Mill o hacia stock piles (Minera Yanacocha 2020)

Al igual que la flota de equipos de carguío y de perforación, los camiones cuentan con modernos sistemas de comunicación y ubicación, que cual permite conocer su ubicación en tiempo real e información operativa como: carga máxima (Payload), consumo combustible, velocidad, Indicadores de rendimiento (KPI's). Además, todos los camiones tienen incorporado un sistema de navegación, el cual le permite al operador conocer la ruta a seguir según la asignación del Despacho.

La figura 32 muestra un camión Cat 793 en la vía de acarreo del tajo Quecher Main transportando mineral que fue volado previamente en un banco inferior, se evidencia en esta figura que el camión transporta a su máxima capacidad.



Figura 32. Camión gigante Cat 793 en la vía de acarreo del tajo Quecher main

### 3.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.6.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Se logró identificar las siguientes variables. Variable dependiente o efecto es la eficiencia de filtro de pre corte. Y las variables independientes o causa son los factores de vibración por voladura (k,Alpha), tal como muestra la tabla 14.

Tabla 14. Variables de la investigación

<b>Variables</b>	
<b>Variable independiente (causa)</b>	<b>Variable dependiente (efecto)</b>
Factores de vibraciones por voladura	Eficiencia de filtro de pre corte.

#### 3.6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo aplicada, ya que utilizaremos los conocimientos en la práctica de investigación. A través de modelos de vibraciones para cuantificar la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura.

#### 3.6.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Descriptivo- Correlacional -Explicativo, ya que vamos describir la situación actual y características de la población de estudio, para luego evaluar el grado de asociación entre las dos variables y finalmente explicar el porqué de la investigación.

#### 3.6.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es experimental, porque se llevó acabo la prueba in situ para luego ser analizar y cuantificar el porcentaje de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones por voladura.

### 3.6.5 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación es Cuantitativo- Analítico, ya que vamos a cuantificar y analizar el porcentaje de filtros. El cual se resume en la tabla 15.

Tabla 15. Tipo, Nivel, Diseño y método de Investigación

<b>Clasificación</b>	<b>Categoría</b>
Tipo	Aplicada
Nivel	Descriptivo-Correlacional y Explicativo
Diseño	Experimental
Método de investigación	Cuantitativo Analítico

### 3.6.6 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio serán los taladros de pre corte del tajo Quecher main en la empresa Minera Yanacocha.

### 3.6.7 MUESTRA

La muestra corresponde a 9 taladros del tajo Quecher main.

### 3.6.8 UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis para la presente investigación será el rango o porcentaje (%) de filtros en vibraciones.

## 3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

### 3.7.1 TÉCNICAS

- Análisis Documental: verificar técnicamente voladuras realizadas anteriormente, analizar daño de paredes, diseños de mallas de voladura, parámetros de perforación; así como toda la información pertinente a la investigación.
- Observación directa: consta de la verificación y corroboración a través del estudio de vibraciones en campo cercano, considerando el daño generado por voladura cercanas a las mismas; además de la inspección del estado de las paredes.

### 3.7.2 INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

Los instrumentos a utilizar en el presente estudio son:

- Formatos de medición de vibraciones, para el cálculo de la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) y determinación de la velocidad pico partícula y/o umbral de daño.
- Modelos de vibraciones en campo cercano, para cuantificar la eficiencia de filtro de pre corte.
- Softwares para análisis de vibraciones (Blastware) y diseño de blast holes (Jk Simblast). Word y M. Excel para la elaboración del informe, tablas y cuadros estadísticos.

Los equipos utilizados en la presente investigación son los siguientes:

- Perforadora Pit Viper con diámetro de 9 7/8, 10 5/8 y 5 pulgadas, permite realizar los taladros para el arreglo de perforación de la prueba.
- Fuentes sísmicas, se requiere que los 9 taladros estén cargados ya que servirán de prueba.
- Detonadores electrónicos, servirán para iniciar la carga explosiva.

- Bench box y Base Station, equipos a través del cual se programa el inicio de la voladura.
- Detritos de perforación, utilizado de taco en los taladros de prueba.
- 01 Sismógrafo de 6 canales marca Instantel-Minimate Pro6, servirá para la medición de vibraciones (digitalización).
- (01) Geófonos Uniaxial y (02) Triaxiales, son de marca instantel y se empotrarán para captar las vibraciones; es importante conocer la vibración máxima, sensibilidad y resistencia de estos.
- 01 caja de conexión entre geófono y sismógrafo, para leer la información de las vibraciones.
- Llave USB Blastware, permite activar la configuración avanzada del software.
- Tubería de PVC con un diámetro de 2.5", para la instalación de los geófonos.
- Pegamento, que servirá para pegar los geófonos y la tubería.
- Acoples para tubería de PVC, cinta adhesiva, para acoplar los geófonos y la tubería.
- Cemento de construcción, agua, grava, palana; que servirá para preparar concreto y tapar los taladros donde se ubican los geófonos.
- Tacho grande, donde se almacenará el agua para preparar el concreto.
- 01 multímetro y/o multitester, sirve para medir la resistencia de los geófonos.
- Conos de seguridad, para la restricción del área de prueba.
- Marcador indeleble, que servirá para marcar enumerar los tubos y diferenciar el tipo de geófono.
- Cámara fotográfica, será de importancia para tomar evidencias y así validar nuestro proyecto de investigación.
- Wincha y/o cinta métrica, para tomar medidas entre taladros del arreglo de perforación.



## **3.8 PROCEDIMIENTO**

### **3.8.1 ETAPA PRELIMINAR DE GABINETE**

Se procedió con la elaboración del plan de trabajo considerando las pruebas a realizar en el tajo Quecher Main - nivel 4021 de Minera Yanacocha, así como la revisión de estudios bibliográficos, papers, informes y extracción de información de la base de datos del área de perforación y voladura de la empresa Minera Yanacocha; esta información tenía que tener relación con el tema de vibraciones producidas por voladura en tajo abierto, haciendo descarte de muchos que no tenían relación, siendo seleccionados los mencionados en los antecedentes y bases teóricas de la presente investigación.

### **3.8.2 ETAPA DE CAMPO**

En conjunto con el área de perforación y voladura definió el sector de la prueba especial nivel 4020 del tajo Quecher Main-Minera Yanacocha correspondiente a una zona ubicada dentro de sílice granular 02.

El carguío se realizó utilizando explosivo MEQ73 a 1.10 gr/cc de densidad, correspondiente al tipo de explosivo usado en el sector de prueba. Se debe considerar además realizar las perforaciones para la instalación de geófonos con al menos 48 horas de anticipación a la voladura del estudio, ya que el fraguado influye en los resultados del modelo de campo cercano. De igual forma las condiciones del macizo rocoso se debe solicitar al área de geotecnia. Finalmente es importante el levantamiento topográfico de los taladros perforados, los cuales también son vitales para el cálculo de la  $V_p$ .

### **3.8.3 ETAPA DE GABINETE**

Una vez realizada las pruebas en campo y la recopilación de información se procedió a realizar el análisis de la información.

### 3.9 PERFILES ACTUALES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN TALADROS DE CONTROL

Actualmente los taladros de pre corte (fila 900) del tajo Quecher main, no están siendo cargados, sino más bien el 98% sirven de filtro para minimizar las vibraciones causadas por voladura y el 2% sirve para el diseño de taludes, los taladros de las líneas 600, 700 y producción son cargados con mezcla explosiva Quantex 73 (MEQ-73) con una densidad de 1.10 gr/cm<sup>3</sup>, el diseño de carga de estos taladros es acorde a los diámetros de perforación. La Figura 33, muestra en resumen los patrones y porcentajes de taladros que sirven de filtro y pre corte.

El diseño actual de los perfiles de los bancos del tajo Quecher; está en función de parámetros como altura de banco, ángulo de la cara del banco, ancho de berma y ángulo inter rampa que al momento de minar se deben respetar los datos parámetros propuestos. Estas variables de diseño se detallan en la tabla 16.

Tabla 16. Diseño de perfil de banco en el tajo Quecher Main.

Geometría	valor
Tipo de roca	Sílice granular 2 / Sílice alunita 1
HB o Altura de banco (m)	20
BFA o Ángulo de la cara del banco (°)	70
BW o Ancho de berma (m)	9.5
IRA o Ángulo inter rampa (°)	50

Fuente: Minera Yanacocha, 2020.

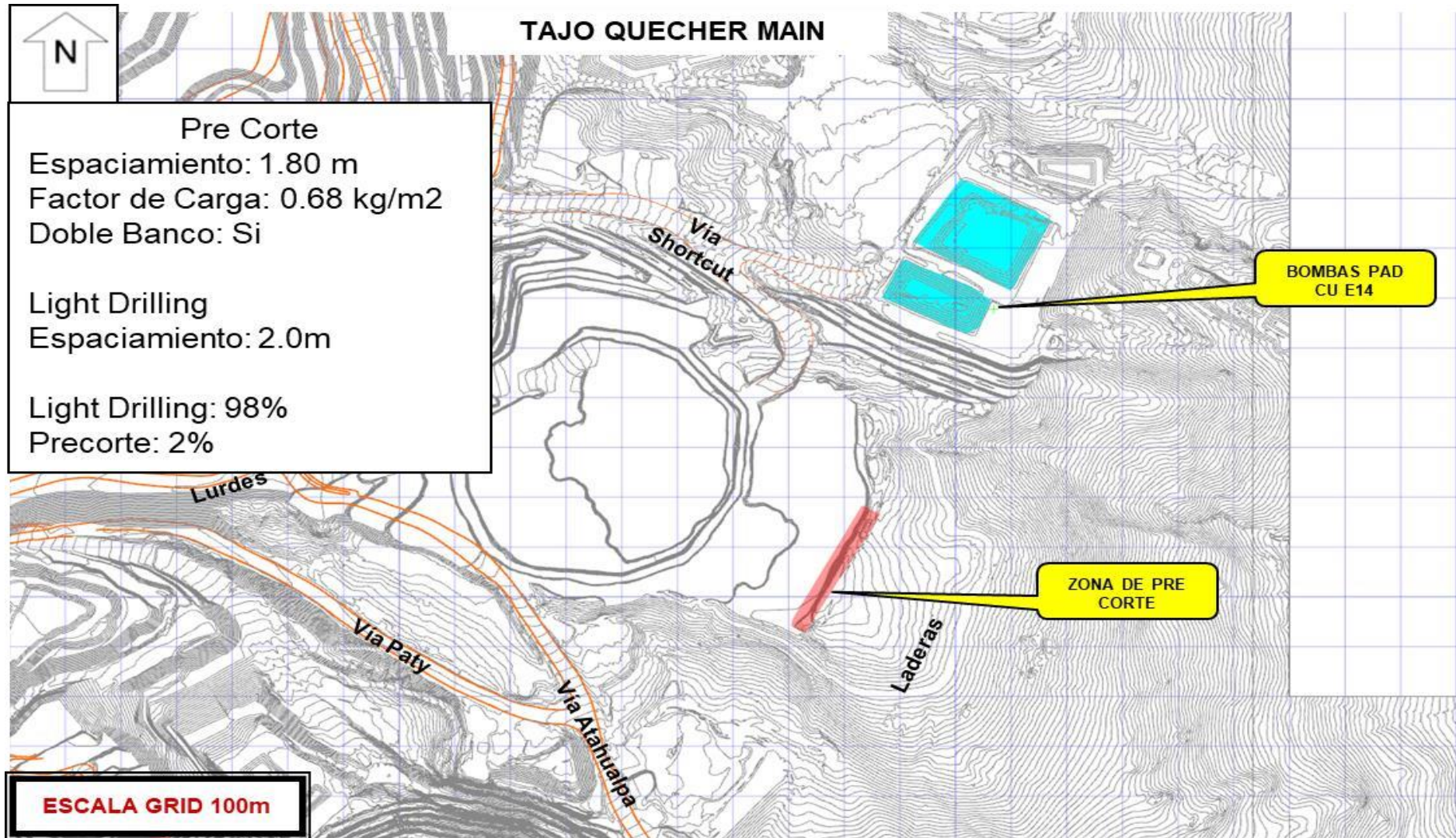


Figura 33. Porcentaje de taladros de filtración en el nivel 4021 del Tajo Quecher main

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

La geometría de inclinación de estos bancos en nivel 4021 del tajo Quecher main, tienen los parámetros como ángulo de inclinación, altura de banco, ancho de berma; que para mejor detalle se detallan en la tabla 17.

Tabla 17. Geometría de inclinación de los bancos-Quecher main

Geometría de inclinación	
Ángulo de inclinación desde la vertical (°)	70
Altura de banco (m)	10
Ancho de berma (m)	9.5
Siguiente ángulo de inclinación (°)	70
Siguiente altura de banco (m)	10
Siguiente ancho de berma (m)	9.5
Previo ángulo de inclinación (°)	70
Previo ancho de berma (m)	9.5

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

La figura 34 muestra que, los taladros de pre corte (fila 900) y/o taladros de alivio conocidos como light drilling no están siendo cargados sino estos actualmente sirven de filtro para minimizar las vibraciones causadas por voladura.

En la figura 34 se muestra el perfil de carga de taladros con diámetro de 9 7/8 de pulgadas de diámetro.

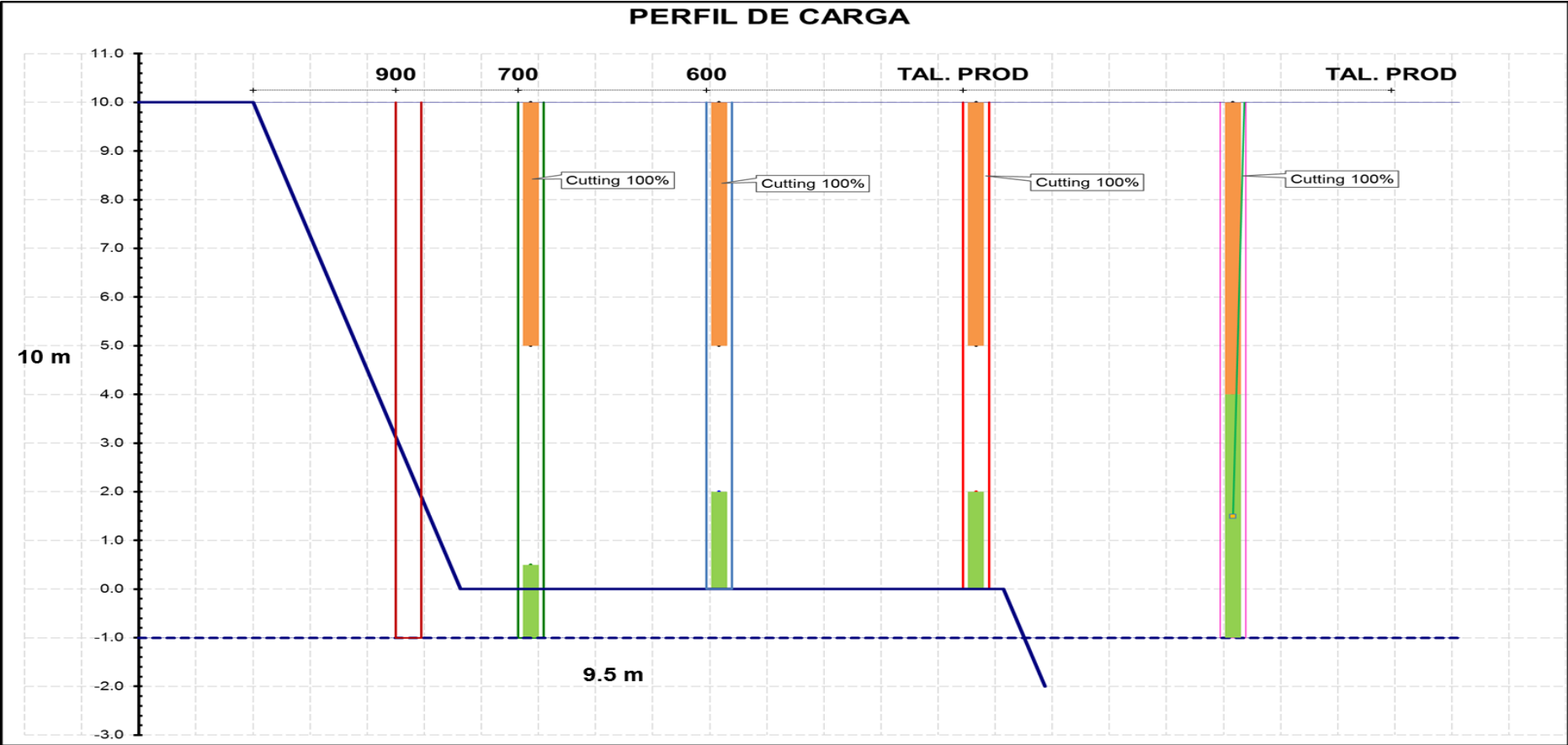


Figura 34. Perfil de carga de taladros de pre corte, procedimiento y producción con 9 7/8 pulgadas de diámetro

Fuente: Minera Yanacocha 2020

En las tablas 18 y 19 se describe los parámetros de los taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro para la malla de pre corte, procedimiento y producción.

Tabla 18. Parámetros de taladros de 9 7/8 de pulgadas de la malla de pre corte y procedimiento -Quecher main 4021

Parámetros de talados de voladura	Fila 700	Fila 600
Taco (m)	5	5.0
Aire (m)	4.5	3.0
Carga Superior (m)	0	0.0
Carga inferior	1.5	2.0
Explosivo (kg)	82.7	110.3
Factor de Carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.245	0.211

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Tabla 19. Parámetros de taladros de 9 7/8 de pulgadas de la malla de producción - Quecher main nivel 4021

Parámetros de taladros de voladura	Producción línea 1	Producción línea 2
Taco (m)	5	6.0
Aire (m)	3	0.0
Carga Superior (m)	0	0.0
Carga inferior	2	5.0
Explosivo (kg)	110.3	275.8
Factor de Carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.211	0.2

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

La Figura 35 muestra desde una vista de perfil, los contornos de vibración en los taladros de 9 7/8 de pulgada de diámetro para el nivel 4021 del tajo Quecher Main.

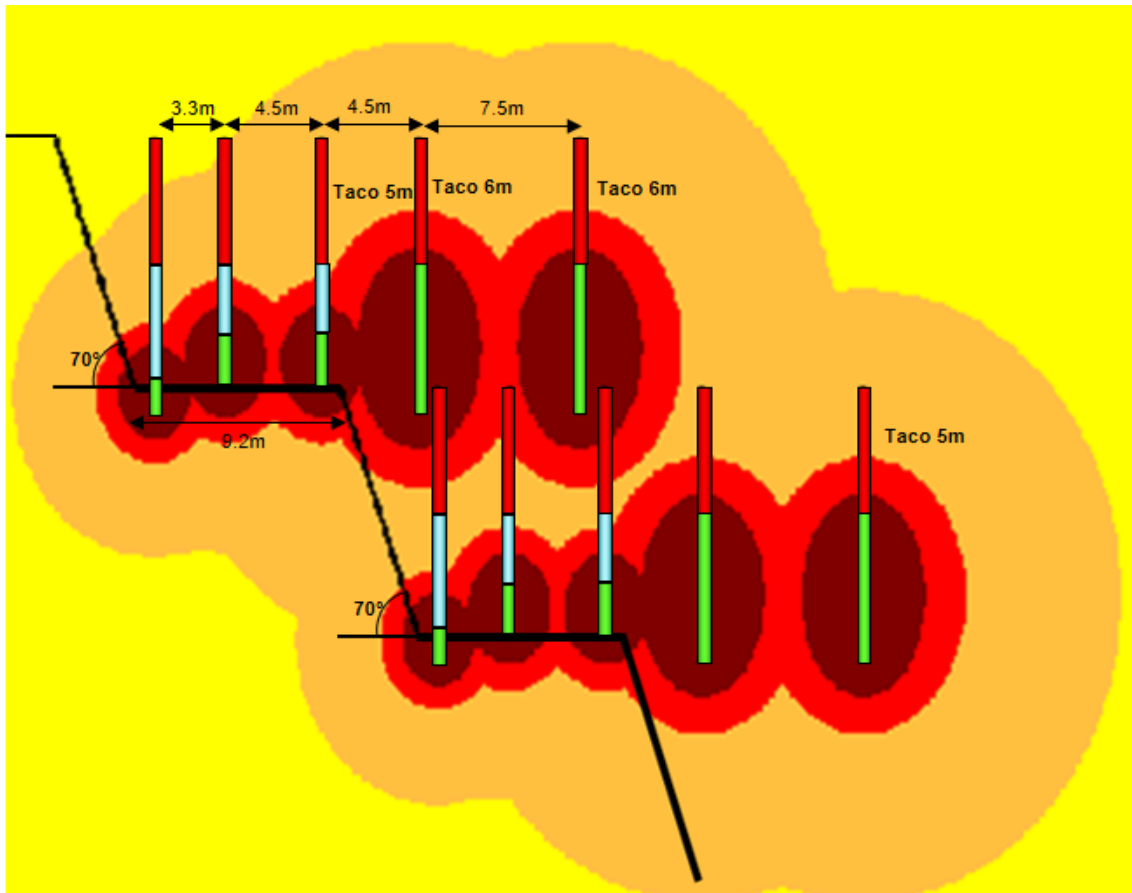


Figura 35. Contornos de vibración de los taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro.

Fuente: Minera Yanacocha 2020

El criterio de daño actual en función del límite de vibración para estos taladros de 9 7/8 se detalla a continuación en la figura 36.

CRITERIO DE DAÑO (mm/s)			
Criterio	Límites de PPV (mm/s)		Efecto
< 1/4 x PPV <sub>c</sub>	0	515	<< No genera daño
(1/4 x 1) x PPV <sub>c</sub>	515	2059	Extensión de fracturas
(1-4) x PPV <sub>c</sub>	2059	8237	Creación de nuevas fracturas
(4-8) x PPV <sub>c</sub>	8237	16473	Intenso fracturamiento
> 8 x PPV <sub>c</sub>	16473	∞+	>> fracturamiento mayor

Figura 36. Criterio de daño PPV actual, Quecher Main-nivel 4021 para taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro

Fuente: Minera Yanacocha 2020

La Figura 35 evidencia que los taladros de la fila 700 tienen sobre perforación y/o sub drilling que está ocasionando un intenso fracturamiento en la pared del talud de acuerdo al criterio de daño de la velocidad pico partícula desarrollada por el criterio de macizo rocoso, así como existe la oportunidad de la eliminación de los taladros de la fila 500 ya que está a 40 cm de la futura cresta, esto evidencia también un daño inminente en la cresta del siguiente banco.

En ese contexto además de evaluar la eficiencia de filtro de los taladros de pre corte se realizará también la evaluación de estos taladros de la primera fila de producción con la finalidad de ampliar el burden hasta 7.5 metros, para esto se evaluará y corroborará con el estudio de vibraciones en campo cercano en base al criterio de daño obtenido del Cross Hole, simulaciones de perfil de Perforación y Voladura, validación en campo, cuyos resultados se mostrarán en el siguiente capítulo.

En la figura 37 se muestra el perfil carga de los taladros de 10 5/8 pulgadas de diámetro para taladros de pre corte, procedimiento y producción, considerando que la altura de banco es de 10 metros y el ancho de berma de 9.5 m. Así como también se muestra en la tabla 20 y 21 los parámetros de estos taladros de 10 5/8 pulgadas de diámetro.

En la figura 38 de igual manera se puede evidenciar que, los taladros de la fila 700 (pre corte) tiene sobren perforación y/o sub drilling que está ocasionando un intenso fracturamiento en la pared del talud de acuerdo al criterio de daño de la velocidad pico partícula desarrollada por el criterio de macizo rocoso, así como existe la oportunidad de la eliminación de los taladros de la fila 500. Si bien en la figura 38 no se muestra los taladros de pre corte de la fila 900 conocidos como light drilling estos al igual que los taladros de 9 7/8 pulgadas de diámetro tampoco están siendo cargados sino sirven de filtro para minimizar las vibraciones causadas por voladura. En ese contexto además de evaluar la eficiencia de filtro de los taladros de pre corte de 10 5/8 pulgadas de diámetro, realizará también la evaluación de los taladros de la fila 500 con la finalidad de ampliar el burden hasta 7.5m y convirtiéndolo de esta forma a la fila 500 en taladros de producción, para esto se evaluará y corroborará con el estudio de vibraciones en campo cercano en base al criterio de daño obtenido del Cross Hole, simulaciones de perfil de Perforación y Voladura, validación en campo, cuyos resultados se mostrarán en el siguiente capítulo.



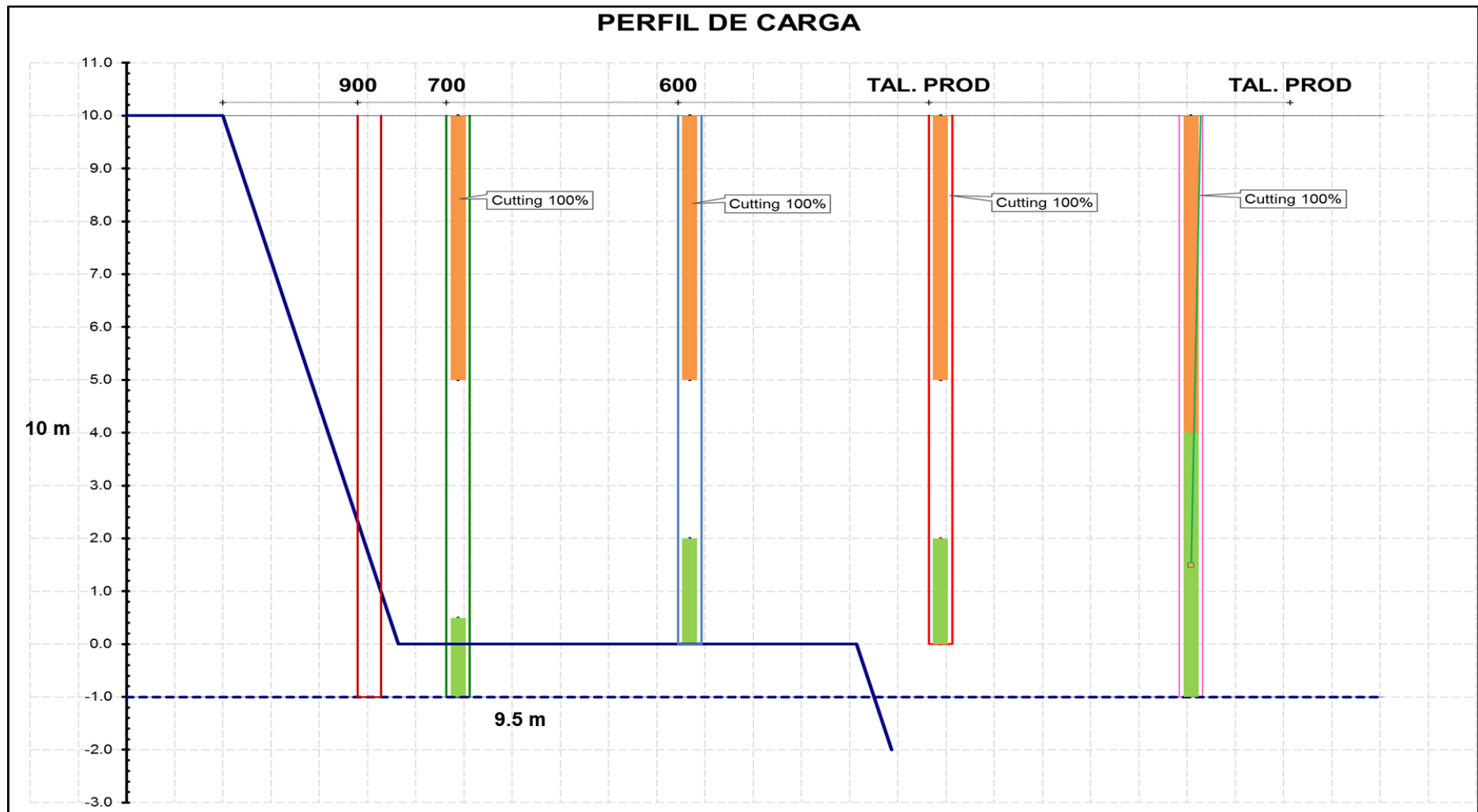


Figura 37. Perfil de carga de taladros de pre corte, procedimiento y producción con 10 5/8 pulgadas de diámetro

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Tabla 20. Configuración de taladros 10 5/8 de la malla de pre corte y procedimiento-Quecher main

Parámetros de blast Hole	Fila 700	Fila 600
Burden (m)	3.3	4.5
Espaciamiento (m)	4.8	6.5
Sobre perforación (m)	1.0	0.0
Taco (m)	5	5.0
Aire (m)	4.5	3.0
Carga Superior (m)	0	0.0
Carga inferior	1.5	2.0
Explosivo (kg)	95.8	127.7
Factor de Carga (kg/m3)	0.187	0.211

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Tabla 21. Configuración de taladros 10 5/8 de la malla de producción -Quecher main

Parámetros de blast Hole	Producción línea	Producción línea
	1	2
Burden (m)	4.5	4.5
Espaciamiento (m)	6.5	6.5
Sobre perforación (m)	0.0	0.0
Taco (m)	5.0	6.0
Aire (m)	3.0	0.0
Carga Superior (m)	0.0	0.0
Carga inferior	2.0	5.0
Explosivo (kg)	127.7	319.3
Factor de Carga (kg/m3)	0.211	0.252

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

La figura 38 muestra desde una vista perfil, los contornos de vibración en los taladros de 10 5/8 de pulgada de diámetro del nivel 4021-Quecher main.

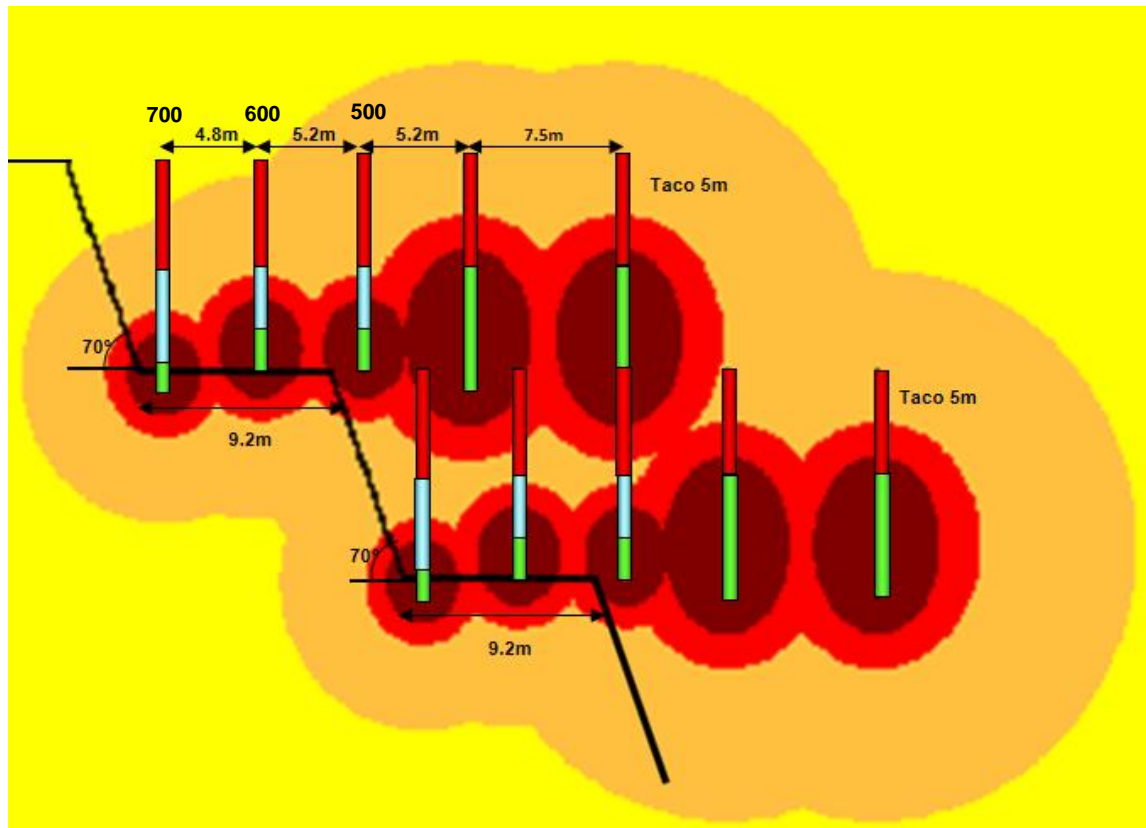


Figura 38. Contornos de vibración de los taladros de 10 5/8 de diámetro

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

El criterio de daño para estos taladros de 10 5/8 pulgadas de diámetro se detallan a continuación, en la figura 39:

CRITERIO DE DAÑO (mm/s)			
Criterio	Limites de PPV (mm/s)		Efecto
< 1/4 x PPVc	0	515	<< No genera daño
(1/4 x 1) x PPVc	515	2059	Extensión de fracturas
(1-4) x PPVc	2059	8237	Creación de nuevas fracturas
(4-8) x PPVc	8237	16473	Intenso fracturamiento
> 8 x PPVc	16473	∞+	>> fracturamiento mayor

Figura 39. Criterio de daño PPV actual en el nivel 4021 Quecher Main para taladros de 10 5/8 de diámetro

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

### 3.9.1 DISEÑOS DE MALLAS EN EL TAJO QUECHER MAIN

El diseño de las mallas de producción y procedimiento en función de burden y espaciamiento acorde al diámetro de perforación, se detalla a continuación en las tablas 22 y 23 respectivamente:

Tabla 22. Diseño de malla de producción en Quecher main

Tipo	Diámetro	Diseño de malla
Producción	10 5/8	7 x 8
		7.5 x 8.5
		7.5 x 8.7
		8.0 x 9.0
		8.5 x 9.5
	9 7/8	4.5 x 5.5
		7.5 x 8.5
		8.0 x 9.0

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Tabla 23. Diseño de malla de procedimiento de Quecher main

Tipo	Diámetro	Diseño de malla
procedimiento	10 5/8	5.2 x 6.5
		3.5 x 5.0
	9 7/8	4.5 x 6.5
		3.3 x 4.8

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

### 3.9.2 KILOS DE EXPLOSIVO POR TALADRO

Esto es importante, ya que a mayores kilos mayor vibración y menores kilos menor vibración a menor densidad del explosivo se tendrá menor vibración y viceversa; el rango de kilogramos por taladro en las mallas de producción es de 300 kg/ Tal a 390 kg/Tal. En la zona de Quecher main se tiene un factor de potencia aproximado de entre 0.22 - 0.24 kg/Tn esto acorde al terreno y dureza, se detalla en la tabla 24.

Tabla 24. Factor de potencia en la zona de Quecher main 4021

Mina	dureza	Factor de potencia
Quecher main	Duro	0.24
	Medio	0.22
	Suave	0.22

Fuente: Minera Yanacocha 2020

### 3.9.3 SECUENCIA DE VOLADURA EN EL TAJO QUECHER MAIN

Los tiempos entre taladros, filas, decks, taladros buffer se detallan en la Tabla 25, haciendo mención que en la presente investigación calcularemos también el mejor tiempo de tal manera que se pueda disminuir las vibraciones.

Tabla 25. Tiempos de salidas en las mallas de voladura Quecher Main 4021

Tiempos	Intervalos (ms)
taladros	3 - 17
filas	109 - 200
decks	40 - 47
Taladros Buffer	90 - 123 - 125

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

### 3.9.4 RESULTADOS ACTUALES DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO

La voladura es un complicado dilema con alcance de paradoja toda vez que, por un lado, se desea maximizar la energía entregada por el explosivo para fragmentar lo mejor posible una parte del macizo rocoso mientras que por el otro lado, el deseo de minimizar la energía del mismo hacia la otra parte del macizo rocoso (remanente) para así producir el menor daño posible. En minera Yanacocha, específicamente en el tajo Quecher Main se rige a normas internacionales para controlar y/o disminuir las vibraciones, tomando como referencia normas internacionales como la norma alemana DIN 4150 mostrado en la Tabla 4.

La Figura 40 y 41 muestran la velocidad vs la frecuencia dominante de monitoreos del año 2019 y 2020 respectivamente. En el año 2019, la gráfica de la Figura 40 muestra que la vibración estaba superando los límites máximas (PPV) de acuerdo a la norma DIN 4150.

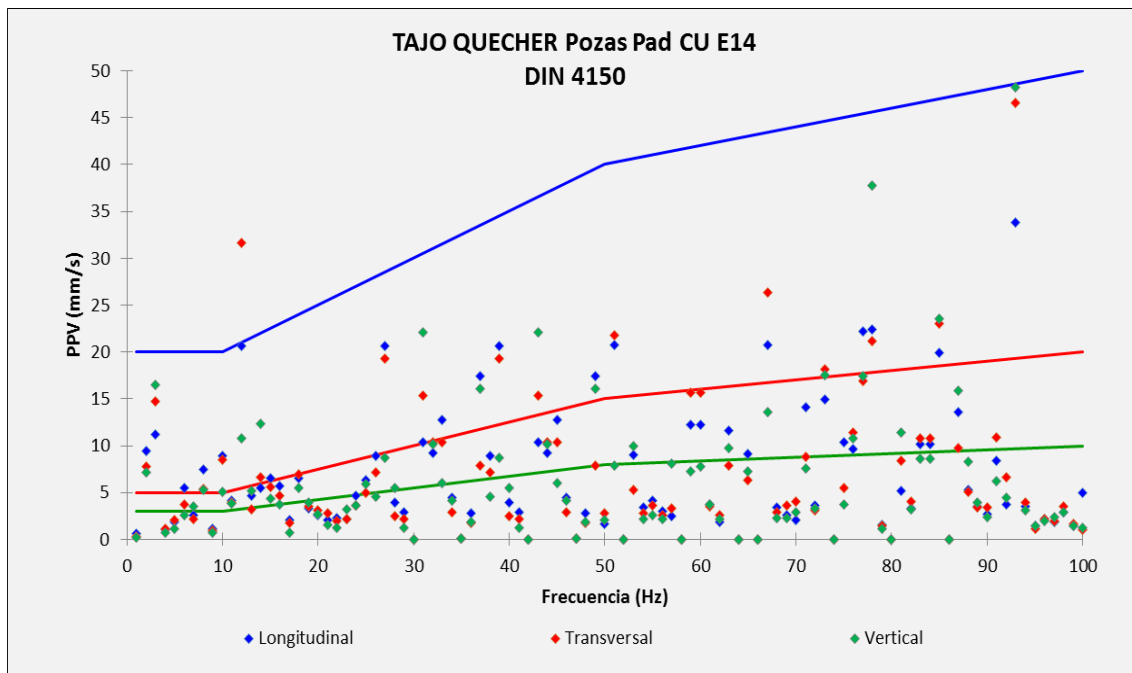


Figura 40. Monitoreo de vibraciones campo lejano del tajo Quecher main-2019 bajo la norma DIN4150 con límite 3 mm/s  
Fuente: Minera Yanacocha 2019.

El gráfico de la figura 40 muestra, los puntos de la velocidad (eje "Y") y frecuencia (eje "X") en los tres ejes medidos (Vertical, Transversal y Longitudinal), a través de estos valores uno puede controlar si estoy realizando bien o mal mi voladura. De acuerdo a este gráfico los valores superan la curva I que exige la norma alemana DIN 4150. Es por ello que en ese entonces se buscó mejoras en el área de voladura de tal manera que se reduzca las velocidades y frecuencias de las voladuras.

La figura 41 muestra que, para el año 2020 los datos de vibraciones en campo lejano medidos desde el pozo del pad carachugo 14 cercanas al tajo Quecher main, donde la gran mayoría de medidas no logran superar el límite máximo de 10 mm/s (línea verde), siendo esto un resultado favorable, los datos corresponden hasta julio del año 2020.

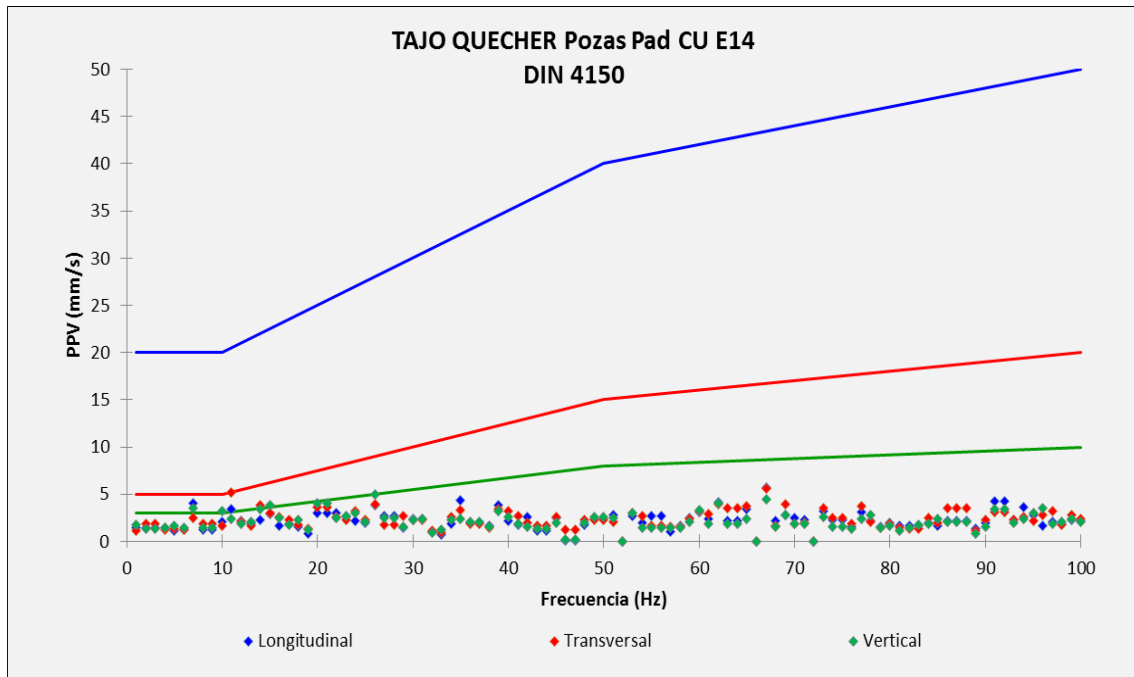


Figura 41. Monitoreo de vibraciones campo lejano del tajo Quecher main-2020 bajo la norma DIN4150 con límite 3 mm/s

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

En cada realidad minera se debe calcular los niveles de vibraciones críticos, con ello vamos a poder evaluar, controlar y/o mejorar los resultados de voladura. Considerando que en el ámbito internacional y nacional, las vibraciones producidas por las voladuras tienen gran posibilidad de causar daños en instalaciones, y los relacionan a ciertos niveles de vibraciones máximas. Por ello se recomienda tener un patrón base de comparación de vibración límite para prevenir daños. Los valores máximos son encontrados por medio de mediciones y reconocimiento de daños en las instalaciones, incluyen cierto margen de seguridad, y son en muchos casos parte de una legislación o normativa técnica.

### 3.9.5 INFORMACIÓN GEOMECÁNICA

Actualmente en el tajo Quecher main de Minera Yanacocha, se tienen densidades acordes al tipo de alteración como se muestra en tabla 26.

Tabla 26. Densidades acordes al tipo de alteración del tajo Quecher main.

Dureza	Alteración	Código	Densidad
Muy duro/Duro	Sílice masiva	SM	2.28
duro	Sílice vuggy	SV	1.98
duro-medio	Sílice granular 2	SG2	1.94
medio	Sílice granular 3	SG3	1.47
duro / medio	Sílice alunita	SA	2.24
duro/medio/suave	Sílice arcilla	SC	2.13
medio/suave	Propilítico	PRO	2.29
suave	Arcilla 3	ARG	1.93

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

### 3.10 INSTALACIÓN DE PRUEBA ESPECIAL

Para instalación de la prueba especial del presente trabajo de investigación se consideró un arreglo de 09 cargas explosivas de aproximadamente 100 kilogramos de Mezcla explosiva Quantex 73 en un diámetro de perforación de 9 7/8 de pulgada (utilizado actualmente) y 5 pulgadas (Prueba especial de Cross Hole). Estas cargas fueron detonadas secuencialmente mediante el sistema de iniciación electrónico Digishot pus. La señal de cada onda sísmica generada por cada carga fue registrada por dos geófonos triaxiales y un uniaxial, ubicados linealmente al centro de la secuencia explosiva.

Adicional a ello se puede precisar que, la información necesaria para analizar y presentar resultados son las condiciones geo estructurales del macizo rocoso, las cuales determinarán en gran medida los resultados de la prueba especial realizada, por tanto, es importante los datos que solicitaremos al área geotecnia de Minera Yanacocha.

Los datos requeridos y utilizados en la presente investigación son: Resistencia compresión uniaxial (UCS), Resistencia tensional Dinámica, Módulo de Young (E), Módulo de poisson, Índice de calidad de roca (RQD), RMR, Ángulo de cara del banco o Bench Face Angle (BFA), Ángulo inter rampa o Inter Ramp Angle (IRA), Altura de banco o Bench Height (BH), banqueteta o Catch Bench (CB).



### 3.10.1 ARREGLO DE LA PRUEBA ESPECIAL EN CAMPO CERCANO

En el nivel 4021 del tajo Quecher Main, se adecuó el arreglo especial de perforación para realizar la prueba en campo cercano, para ello en conjunto con el área de perforación y voladura se determinó perforar 12 taladros (pozos) de los cuales cada uno cumplirá un rol importante para el cálculo de la eficiencia de taladros de pre corte, para una mejor comprensión se detalle a continuación:

9 taladros (pozos) servirán de fuente sísmica (cargas cilíndricas) para realizar las pruebas especiales; de estos, 4 taladros de 9 7/8" de pulgadas de diámetro ubicados en fila sirven para el cálculo de la velocidad de la onda P (prueba de Cross Hole) y 5 taladros de 9 7/8" de diámetro ubicados en fila para las pruebas de eficiencia de filtro de pre corte, considerando que este diámetro es característico en perforación de filas de producción. Los 3 últimos taladros servirán de monitoreo, los cuales tendrán un diámetro de 5 pulgadas para la ubicación de 02 geófonos triaxiales y 01 uniaxial; esta instalación se evidencia en el esquema de instalación desde una vista de planta en la Figura 42 y en el Anexo N°3.

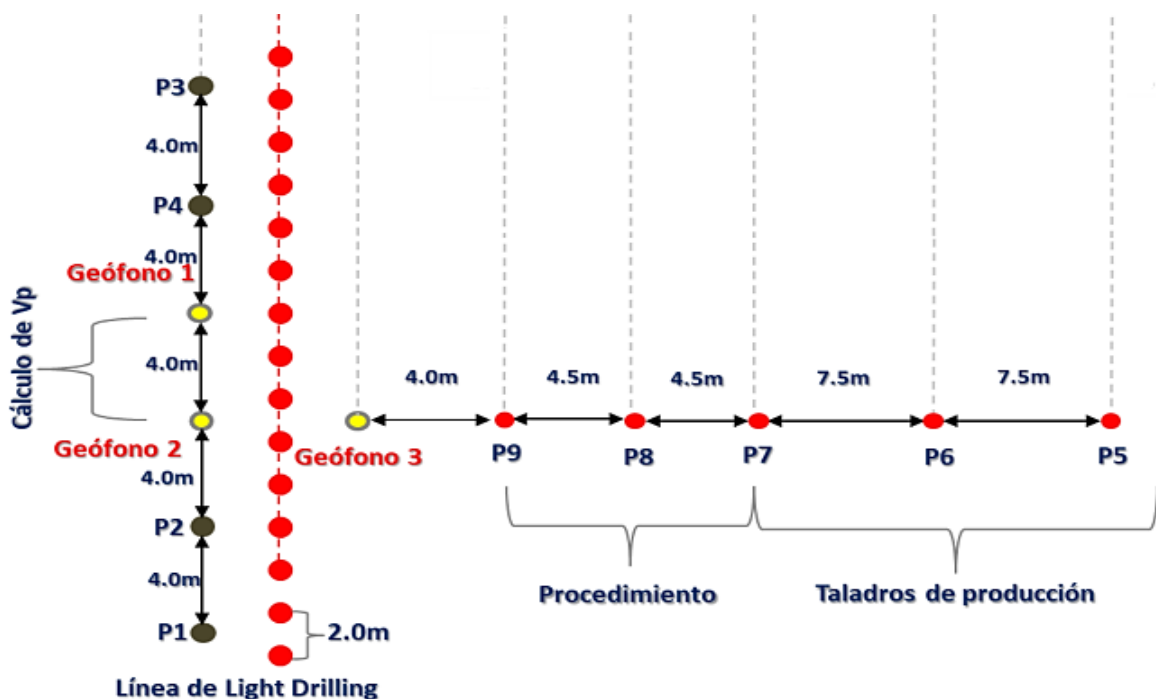





Figura 42 Vista de planta de esquema de prueba especial a desarrollar

Donde:

-  03 Taladros 5 Pulgadas ubicación de geófonos
-  04 Taladros 5 Pulgadas – Fuente sísmica APD
-  05 Diámetro de taladros 10 5/8 y/o 9 7/8 Pulgadas

Adicional a ello se consideró tomar 4 taladros de la línea de pre corte (light drilling) mostrados en la figura 42, los cuales servirán para medir el nivel de filtración a través de los geófonos triaxiales N°1 (G1) y N°3 (G3) a partir de las cargas explosivas de los pozos P5, P6, P7, P8 y P9.

La Figura 43 muestra el arreglo de perforación in-situ para la prueba especial de Cross Hole y eficiencia de filtro en el nivel 4021 del Tajo Quecher main, correspondiente a una zona ubicada dentro la sílice granular 02. Este arreglo como se mencionaba contiene:

- 2 geófonos triaxial (G1 Y G3).
- 1 geófono uniaxial (G2).
- 09 cargas explosivas de fuente sísmica (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9).
- 1 sismógrafo marca Instantel de 8 canales.

Como se puede mostrar en la figura 43, los taladros de pre corte y/o light drilling no se les está considerando en el total de pozos perforados por estos mismos serán analizados, ya que estos taladros actualmente están siendo perforados pero no cargados con agentes explosivos con la finalidad de que estos taladros puedan filtrar los niveles de vibración, así como también amortiguar el efecto de presión de gases sobre las paredes durante la iniciación de la voladura, pero se desconoce si este diseño, de no cargar los taladros de pre corte está siendo eficiente en filtrar las vibraciones producto de la voladura, es allí la problemática a solucionar verificando su eficiencia.

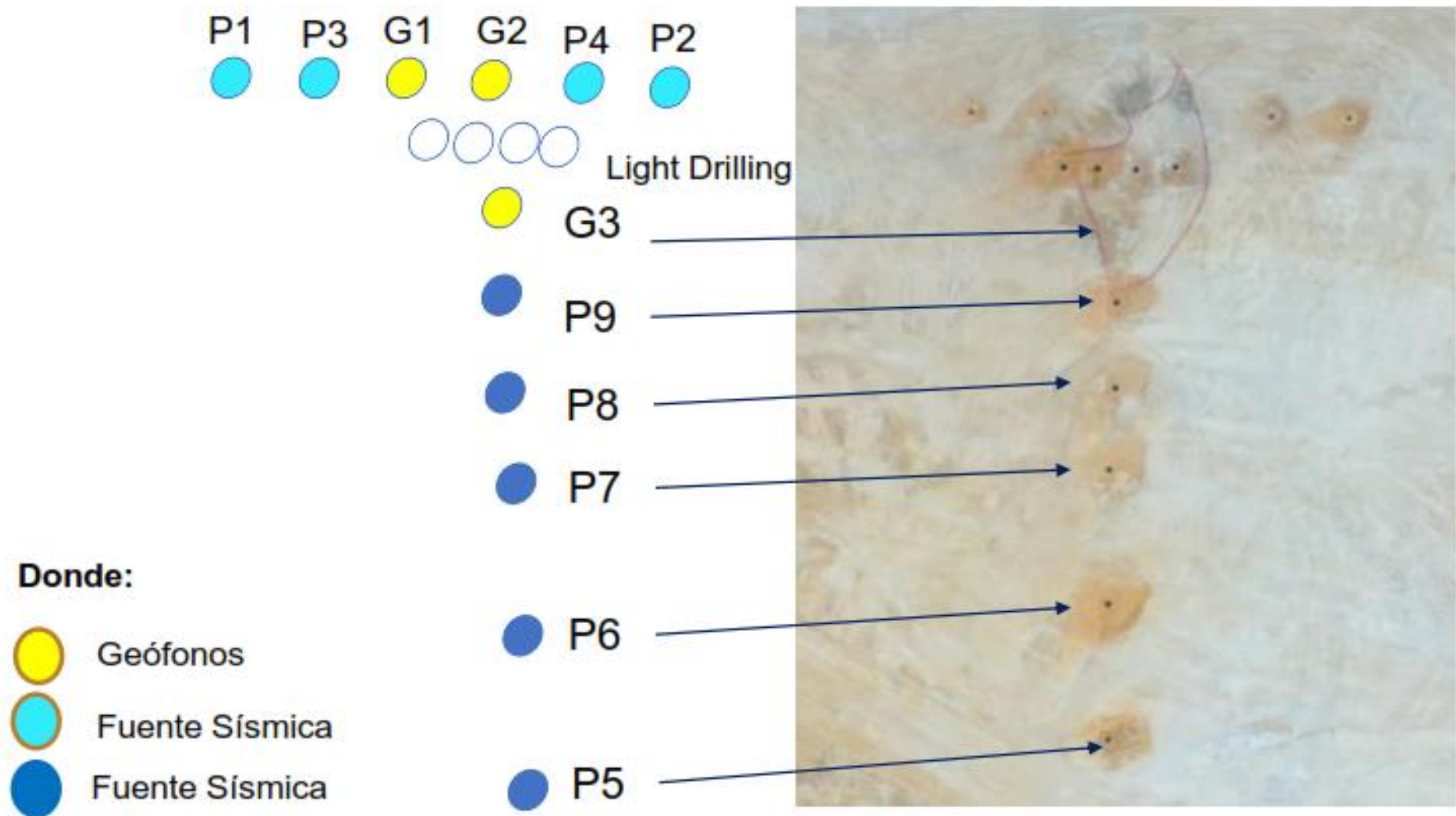


Figura 43. Configuración de prueba especial en campo-vista de planta

Para la instalación de los geófonos se recomienda que la altura del taladro donde se ubicará los geófonos sea la mitad del banco para poder captar las ondas de vibración producto de la voladura, para nuestro caso será de 6 metros.

La instalación de los geófonos empotrados (G2-uniaxial y G1-G3 triaxiales) en los taladros tendrá el siguiente arreglo desde una vista de perfil (Figura 44), consideremos que los materiales y diseño son el éxito de los resultados a obtener.

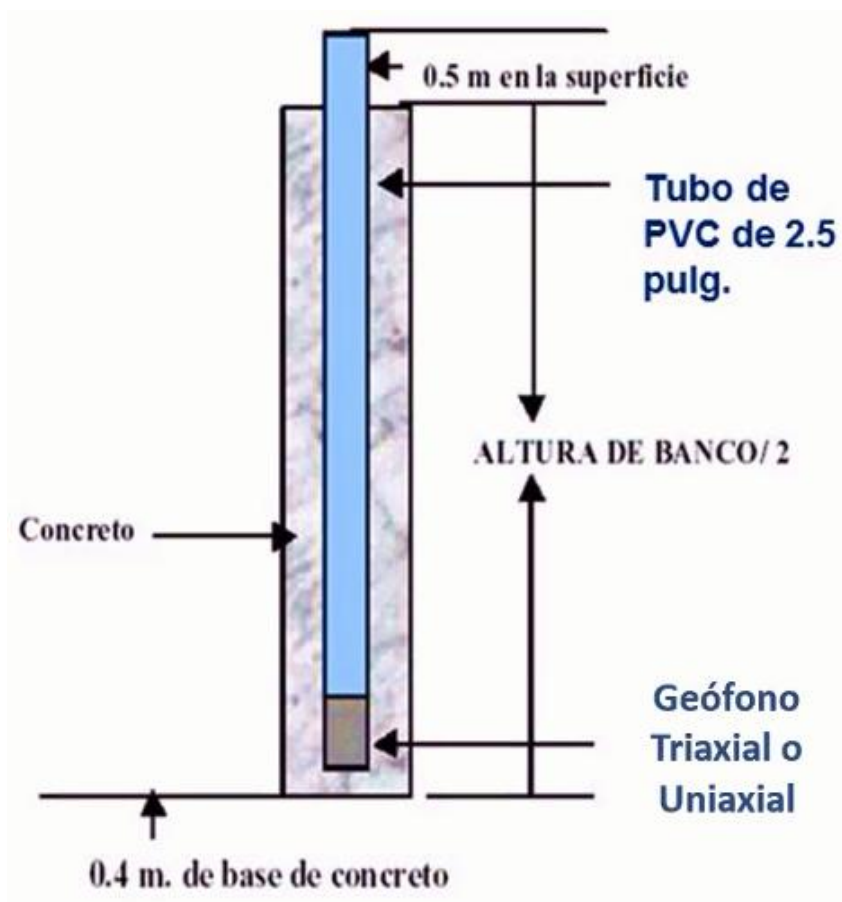


Figura 44. Perfil del arreglo de los geófonos empotrados.

Desde una vista de perfil, el arreglo de perforación se observaría como se muestra en la figura 45:

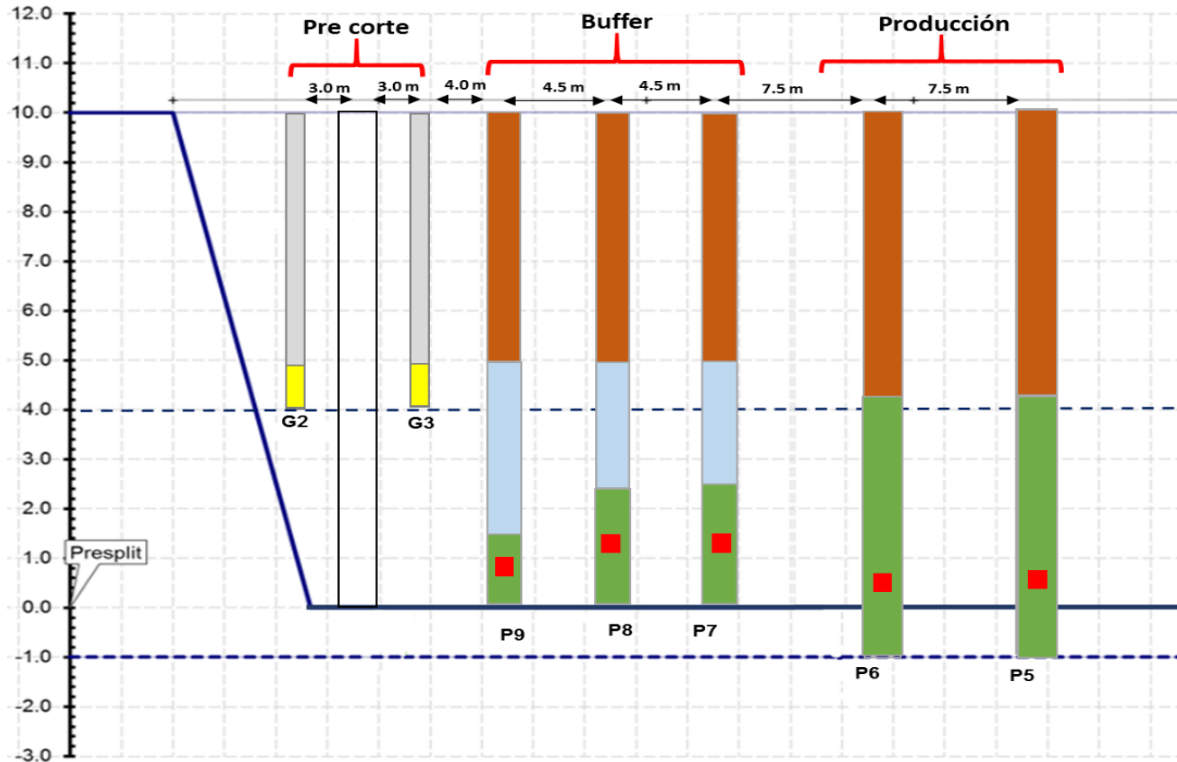


Figura 45. Configuración de prueba especial en campo-vista de perfil

Donde:

Color plomo: Cemento.

Color amarillo: Geófonos (uniaxial y triaxial)

Color rojo: Detonadores.

Color verde: Mezcla explosiva Quantex-73.

Color marrón: Taco.

Color celeste: Aire.

Como se observa en la Figura 45 la fila dónde están ubicados los pozos y/o taladros P1, P2, P3, P4 y el pozo dónde se ubicará el geófono N°1 (G1) no se notarían desde una vista perfil ya que estos están delante de los taladros de pre corte y/o light drilling, pero si tendríamos la vista de los pozos dónde se ubicarán el geófono N° 2 y N° 3 (G2-G3), así como también la vista de los pozos que servirán para la prueba de eficacia de filtro P5, P6, P7, P8, P9.

Consideremos que los geófonos N°1 y N°2 (G1-G2) servirán para calcular la velocidad de la onda P a través de la prueba de Cross Hole y en paralelo el geófono N°1 (G1) que está detrás de los taladros de pre corte y/o light drilling y el geófono N°3 (G3) que está delante de los taladros de pre corte y/o light drilling se utilizará calcular la eficiencia de filtro.

Como se mencionó los pozos para calcular la velocidad de la onda P a través de la prueba de Cross Hole (P1, P2, P3, P4) que no se lograron ver desde una vista perfil en la figura 46, se muestra a continuación desde una vista de planta en la figura 46 para una mejor comprensión:

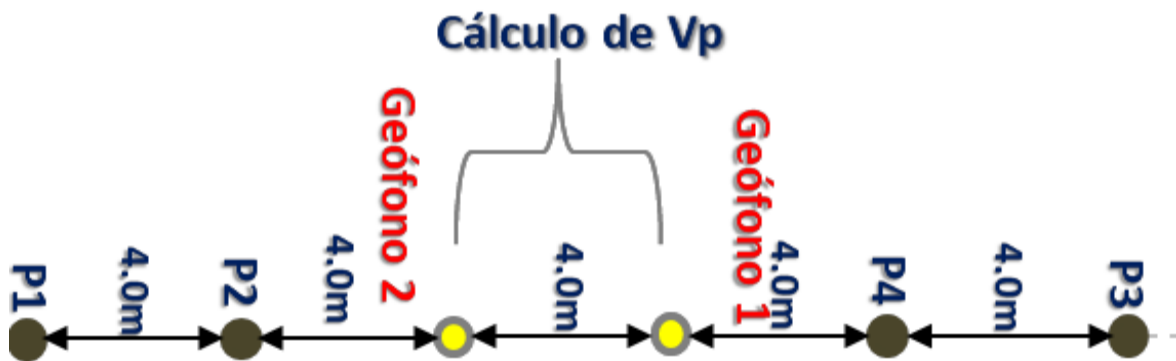


Figura 46. Esquema de Cross Hole-vista de planta

Entonces, para obtener la velocidad de la onda P, se determinó utilizar 4 taladros de prueba (P1, P2, P3, P4) y dos geófonos (G1-G2) uno triaxial y otro uniaxial; considerando que la distancia entre geófono 1 y geófono 2 será de 4 metros, tal como se muestra en la Figura 46 (puntos color amarillo) y la distancia entre los taladros prueba sísmica (puntos plomos) de igual manera de 4 metros.

Desde otro punto de vista y para mejor entendimiento, el esquema que servirá para el cálculo de la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) a través de la prueba de Cross Hole, se muestra en la Figura N° 47.

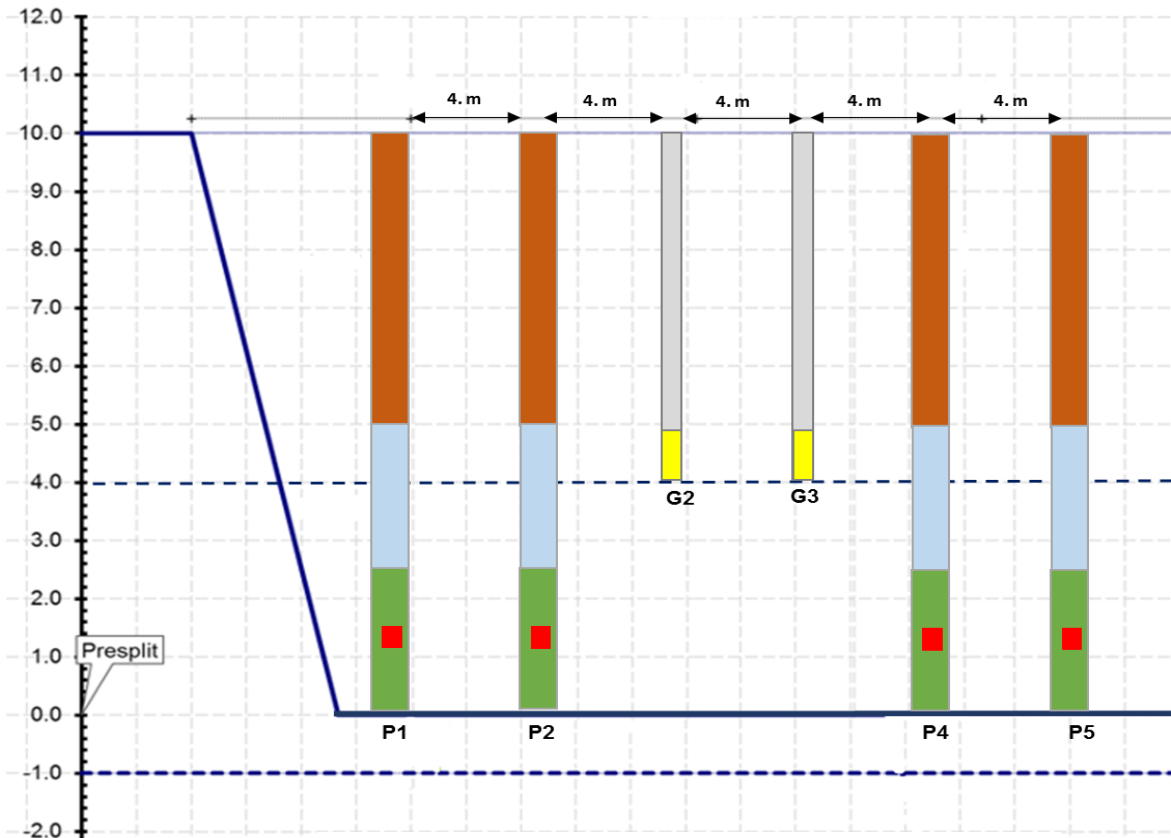


Figura 47. Esquema de Cross Hole - Vista de perfil

Entonces la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) promedio se calculará través de la siguiente ecuación 12 mencionada anteriormente:

$$(V_p) \text{ m/s} = \frac{\text{Distancia entre geófonos triaxial y uniaxial}}{\text{tiempo de llegada de ondas a geófonos}}$$

Para una mejor comprensión la figura 48 muestra la prueba especial de Cross Hole para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda P, para luego con este valor calcular el umbral o límite de daño de la zona de interés.

Una vez obtenido la velocidad de la onda P, se calcula la velocidad pico partícula máxima (límite de daño) o determinación del umbral para la zona de interés posterior a ello proponer nuevos diseños. Luego se procede con la prueba de eficiencia filtro de taladros de pre corte, a través del geófono triaxial (G1) y geófono triaxial (G3) que están ubicados detrás y delante del pre corte y/o light drilling respectivamente.

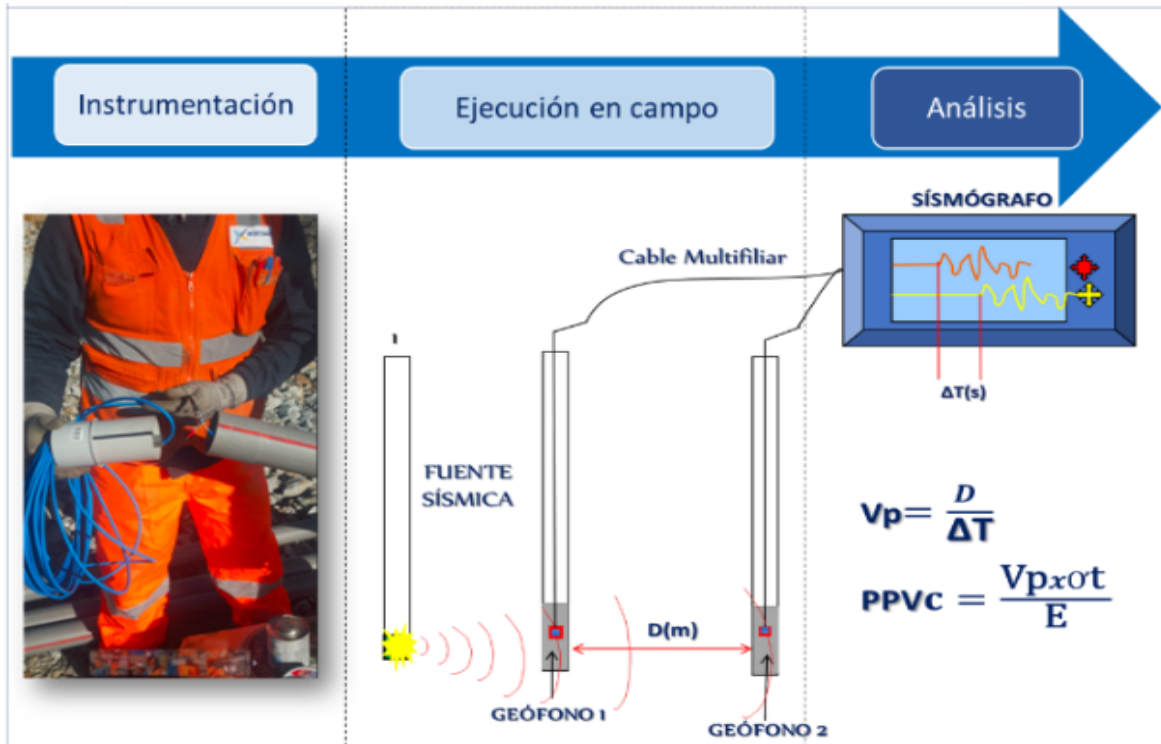


Figura 48. Técnica sísmica de Cross Hole

Para las pruebas se debe considerar:

- La detonación de la voladura se prueba deber ser antes de realizarse cualquier voladura primaria, ya que el geófono al momento que siente el movimiento de algo, inmediatamente empieza a registrar.
- Siempre se detona desde el taladro más alejado del geófono hacia el taladro más cercano (adyacente) al geófono
- El tiempo entre taladros debe ser útil para el posterior análisis con la metodología de onda elemental, que sirve para encontrar los tiempos adecuados entre taladros para minimizar las vibraciones en un punto específico.
- Si es posible post voladura recuperar el geófono.

La configuración de los 9 taladros utilizados para la prueba de eficiencia de filtro de pre corte y cálculo de la velocidad de la onda P, se detalla en la tabla 27.



Tabla 27. Configuración de pozos para realizar la prueba especial de eficiencia de filtro de pre corte.

N° pozo	H-MEQ 73	H-Aire	H-Taco	SD
1	1.5	3.5	5.0	0
2	1.5	3.5	5.0	0
3	1.5	3.5	5.0	0
4	1.5	3.5	5.0	0
5	5.3	0	5.0	1
6	5.3	0	5.0	1
7	2.3	2.5	8.0	0
8	2.5	2.5	8.0	0
9	1.5	3.5	8.8	0

La Figura 49 muestra el perfil de configuración final de los taladros P5, P6, P7, P8, P9, que servirán para la prueba de eficiencia de filtro de pre corte. Así mismo para calcular la distancia del primer taladro con carga al geófono N°1, se debe considerar la siguiente relación empírica:

$$1.5 \leq \frac{\text{Distancia (m)}}{DCL}$$

Ecuación 14. Relación de distancia del primer taladro al geófono N°1

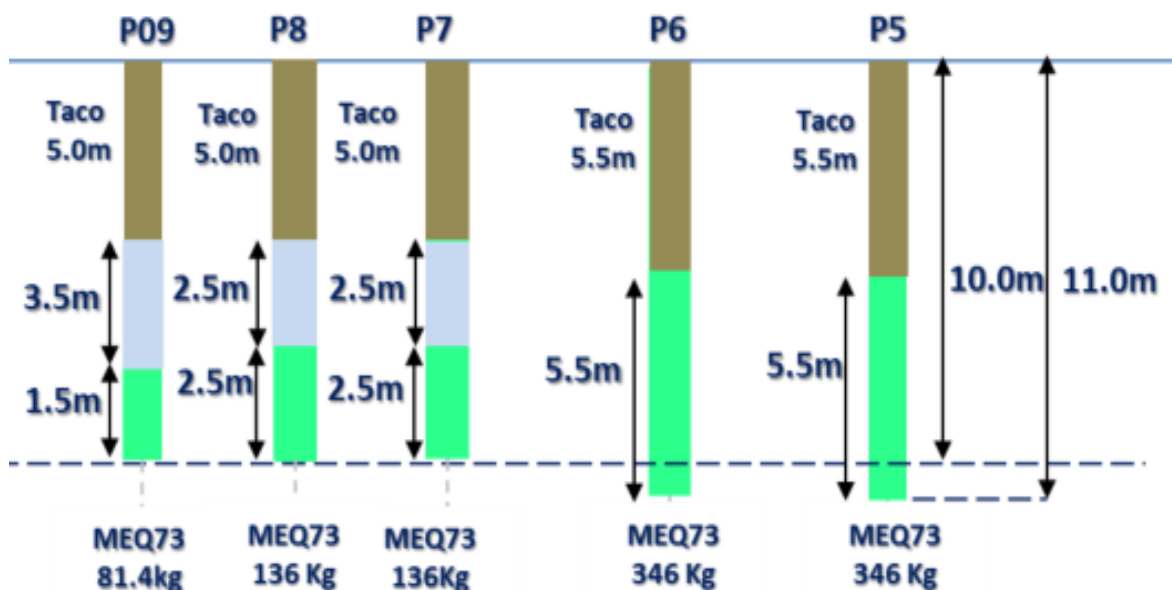


Figura 49. Vista de perfil de configuración de taladros para la prueba de eficiencia de filtro de taladros de pre corte.

## **CAPÍTULO IV.**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA P (VP) DEL MACIZO ROCOSO:**

La figura N°50 muestra el registro completo de los dos eventos sísmicos producidos por la detonación de los taladros, el primer registro es para prueba de Cross Hole con el fin de determinar la Velocidad de Onda P ( $V_p$ ) y el segundo registro para el obtener las vibraciones detrás del light drilling y/o pre corte para el cálculo de la eficiencia de filtro. Los tres primeros registros de los ejes (transversal, vertical y longitudinal) pertenecen al geófono triaxial(G1) y el cuarto registro (Longitudinal) al geófono uniaxial (G2).

Del análisis de los eventos se obtienen los deltas de tiempo entre los registros de los dos geófonos, se utiliza el eje longitudinal del geófono triaxial para el análisis.

Realizando un análisis de la figura 50, se muestran registros limpios de la detonación de los taladros después de cierto intervalo de tiempo, considerando que los taladros más cercanos a los geófonos de registro tendrán mayor velocidad pico partícula.

La Figura 51, muestra el registro de vibración de la carga N° 01. En esta figura se observa que la diferencia del tiempo de arribo de las ondas a cada uno de los geófonos (G1-G2) fue de 0.0061 seg.

De igual manera es el registro de la diferencia del tiempo de arribo de las ondas a cada uno de los geófonos 1 y 2 de las cargas (taladros) N° 2, 3 y 4, cuyos resultados se muestran en adelante.

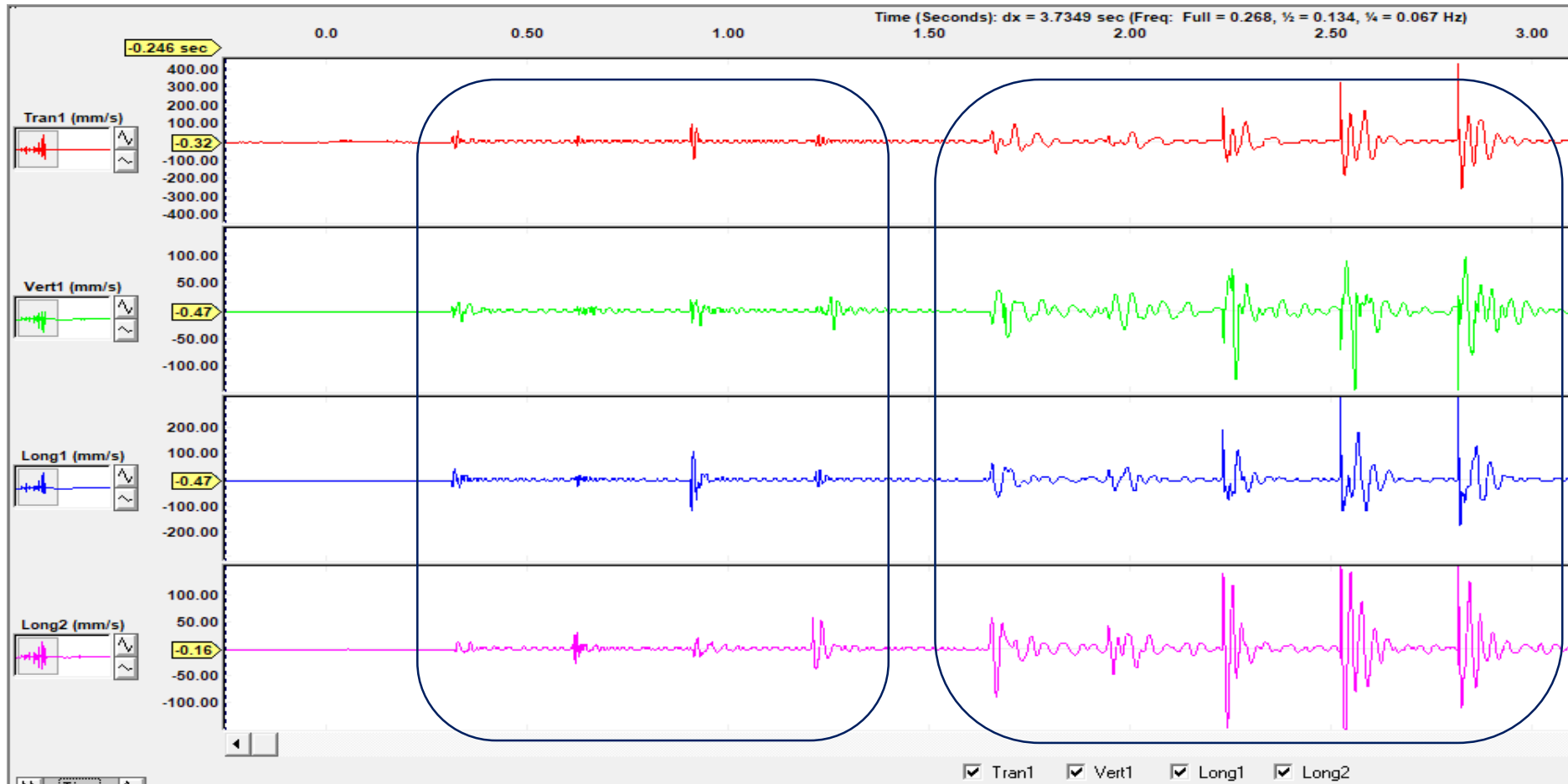


Figura 50. Registro de vibraciones de los geófonos 1 y 2 detrás del light drilling y/o pre corte



Figura 51. Registro de llegada de ondas del taladro N° 1 a los geófonos (G1-G2)

La distancia entre el geófono N° 1 y geófono N°2 (G1-G2) en el campo fue:

$$Distancia(m)_{G1-G2} = 3.87$$

Considerando los deltas de tiempo de las lecturas de la vibración entre los dos geófonos y la distancia entre los taladros de prueba (G1-G2), se calculó la velocidad de la Onda P (velocidad de propagación) para la zona de Quecher main nivel 4021 aplicando la ecuación 13.

$$V_p (m/s) = \frac{Distancia \text{ entre geófonos triaxial y uniaxial}}{tiempo \text{ de llegada de ondas a geófonos}}$$

La Tabla N° 28 muestra la variación de tiempo de arribo de ondas y la determinación de la velocidad de Onda P (velocidad de propagación) en la zona, cuyo valor resultante fue de 609 m/s, este valor representa un dominio de característica baja.

Tabla 28.Cálculo de la velocidad de Onda P

<b>Fuente sísmica</b>	<b>Cálculo</b>	
Taladro	$\Delta$ tiempo	Vp
P1	0.0061	634.42623
P2	0.0075	516
P3	0.005	774
P4	0.00757	511.228534
<b>Vp promedio (m/s)</b>		<b>609</b>

## 4.2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ( $V_p$ ) DE LA ROCA INTACTA

Para calcular la velocidad de propagación de la onda P ( $V_p$ ) de la roca intacta, se solicitó al área de geotécnica y geología de Minera Yanacocha, los siguientes parámetros geotécnicos a utilizar:

Resistencia compresión uniaxial (UCS).

Resistencia tensional Dinámica.

Módulo de Young (E).

Módulo de Poisson.

Índice de calidad de roca (RQD).

RMR.

Cuyos valores de las pruebas se describen en la tabla 29, que servirán posteriormente para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda P ( $V_p$ )

Tabla 29. Datos Geotécnicos de la roca intacta

<b>Características de la roca</b>	
Tipo de roca	SG2
Densidad (KN/m <sup>3</sup> )	19
Módulo de Young (Gpa)	0.96
Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)	23.42
Resistencia a la tracción (Mpa)	2.7
Módulo de Poison	-
Frecuencia de fracturamiento	16-24 F/m aprx
Índice de calidad de roca (RQD)	5.17
RMR	45

Con estos valores podemos realizar la clasificación de ingeniería de acuerdo a (Deere 1989) para identificar la calidad del macizo rocoso e índice de velocidad real como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30. Clasificación General de la roca intacta

<b>CLASIFICACIÓN GENERAL</b>				
RQD (%)	RQD (%) Real	Índice de velocidad	Índice de velocidad REAL	Descripción
0-25	<b>5.17</b>	0.00 - 0.20	<b>0.17</b>	Muy pobre
25-50		0.20 - 0.40		Pobre
50-75		0.40 - 0.60		Moderada
75-90		0.60 - 0.80		Buena
90-100		0.80 - 1.00		Excelente

Fuente: Índice de calidad de la roca según Deere 1989.

Acorde a la tabla 30, el macizo rocoso es de calidad muy pobre (RQD=5.17) y un índice de velocidad de 0.17 cuyo valor representa una velocidad muy pobre.

Para clasificar el macizo rocoso de acuerdo al valor que se obtuvo en el laboratorio que tiene un valor (RMR) de 45, se utilizará la clasificación Geomecánica de RMR (Bieniawski, 1989), como se en la Tabla N° 31.

Tabla 31. Clasificación Geomecánica Quecher main Nivel 4021

R.M.R.	Calificación del Macizo Rocosó	Clase
81 - 100	Muy bueno	I
61 - 80	Bueno	II
<b>41 - 60</b>	<b>Medio</b>	<b>III</b>
21 - 40	Malo	IV
0 - 20	Muy malo	V

Fuente: Clasificación de la roca según Bieniawski 1989.

De acuerdo a la clasificación del macizo rocoso el tipo de roca sería de calidad media, clase III. Pero acorde a la clasificación de dureza de terreno de Minera Yanacocha, la zona dónde se realizó la prueba especial para el cálculo de eficiencia de filtro de pre corte sería una roca tipo R2 como se muestra en la tabla N°32

Tabla 32. Dureza de terreno en Minera Yanacocha

TABLA DE DUREZA DEL TERRENO			
ISRM	Mts/Hr	(Mpa)	Clasificación
R6	0 - 20	> 250	Duro
R5	0 - 20	100 - 250	Duro
R4	21 - 30	50 - 100	Duro
R3	31 - 50	25 - 50	Medio
<b>R2</b>	<b>&gt; 51</b>	<b>5 a 25</b>	<b>Suave</b>
R1	> 51	1 a 5	Suave
R0	> 51	0.25 a 1	Suave

Fuente: Minera Yanacocha 2020.

Para el cálculo de la velocidad de la onda P ( $V_p$ ) de la roca intacta aplicaremos la ecuación 1, presentada en el Capítulo II:

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

Donde:

$E$ : módulo de Young o Young Modulus (Gpa)

$\nu$ : coeficiente de poisson o Poisson's ratio

$\rho$ : Densidad de la roca ( $\text{KN}/\text{m}^3$ )

Estos valores se encuentran en la Tabla 29, por tanto, reemplazando en la ecuación anterior el valor de la velocidad de la onda P de la roca intacta es:

$$V_p = \sqrt{\frac{0.96(1 - 0)}{1.938(1 + 0)(1 - 2 * 0)}}$$

$$V_{p\text{-roca intacta}}(m/s) = 711$$



De manera resumida en la tabla 33 se presenta la clasificación de ingeniería para roca in-situ con los valores de la velocidad de propagación (Vp) del macizo rocoso y la roca intacta calculados anteriormente:

Tabla 33. Clasificación de predicción Insitu utilizando índice de calidad de roca.

<b>CLASIFICACIÓN DE INGENIERÍA PARA ROCA INSITU</b>						
<b>CLASIFICACIÓN GENERAL</b>		<b>VP ROCA INTACTA</b>	<b>Vp MACIZO ROCOSO</b>		<b>DESCRIPCIÓN</b>	
<b>RQD (%)</b>	<b>RQD (%) Real</b>	<b>Velocidad sísmica (m/s)</b>	<b>velocidad sísmica (m/s)</b>	<b>velocidad sísmica (m/s)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción sísmica</b>
0-25	<b>5.17</b>	2400	<b>711</b>	<b>609</b>	<b>Muy pobre</b>	<b>Baja velocidad</b>
25-50		2400 - 3500			Pobre	Baja velocidad
50-75		3500 - 4300			Moderada	Velocidad intermedia
75-90		4300 - 4900			Buena	Alta Velocidad
90-100		4900 - 6700			Excelente	Alta Velocidad

Fuente: Clasificación según Bieniawski (1989) con datos obtenidos en el tajo Quecher main nivel 4021

Como se muestra en la Tabla N° 33 el valor de la onda de propagación (Vp) de la roca intacta es superior respecto a la del macizo rocoso por un 17%, para la presente investigación y por experiencia del área de asistencia técnica se trabajará con la velocidad de propagación de la onda P (Vp) del macizo rocoso que fue calculado de manera experimental in situ. A través de este valor de la Vp se calculará la vibración máxima de control o velocidad pico partícula (VPP) O PPV por sus siglas en inglés.

### 4.3 CÁLCULO DE LA VIBRACIÓN MÁXIMA DE CONTROL DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA (VPPC) O PPVC POR MÉTODO GENERAL

Dentro de las propiedades de las rocas, existe su capacidad de soportar esfuerzos, y se conoce como esfuerzo dinámico máximo (velocidad pico partícula) PPV. Aplicaremos la ecuación N°10 que muestra el principio de daño de Holmberg & Persson el cual relaciona la velocidad de propagación de la onda P (Vp) con los parámetros geomecánicos, los cuales fueron calculados anteriormente.

$$PPV_{CRÍTICO} = \frac{\sigma_t * V_p}{E}$$

Donde:

$\sigma_t$  (Pa): Resistencia a la tracción

Vp (m/s): Velocidad de propagación de la onda-macizo rocoso

E (N/m<sup>2</sup>): Módulo de Young

Conociendo el valor de la velocidad de la onda p (Vp)del macizo rocoso (609 m/s) y de los parámetros geotécnicos de la zona de interés como se muestra en tabla 34, se calculará el umbral de daño aplicando el criterio general de Holmberg & persson.

Tabla 34.Valores geotécnicos para el cálculo del VPP

Característica	valor
Módulo de Young (Gpa)	0.96
Resistencia a la tracción (Mpa)	2.7
Vp macizo rocoso (m/s)	609
RMR	45

Fuente: Fuente minera Yanacocha 2020

Reemplazado en la ecuación N° 10, con lo valores de la tabla N°34 se tiene el valor del PPV crítico(mm/s) es el siguiente:

$$PPV_{CRÍTICO} = \frac{2.7 * 609}{0.96}$$

$$PPV_{CRÍTICO} = 1713$$

El valor de la velocidad pico partícula máximo (PPVc) obtenido en el nivel 4021 del tajo Quecher main es 1713 mm/s y como valor crítico de no generar daño el valor de 428 mm/s como se muestra en la tabla 35.

Tabla 35.Valores de criterio de daño.

Velocidad Pico partícula	
VPP crítico (mm/s)	PPV máximo (mm/s)
1713	428

La Tabla N°36 muestra los valores del umbral de daño de Holmberg & Persson, los que están clasificados de acuerdo al potencial fracturamiento que ocurre cuando se está dentro de alguno de los rangos de velocidad pico partícula (VPP) o PPV por sus siglas en inglés (Peak Particle Velocity).

El principal objetivo es tener valores debajo de la VPP o PPV máximo para no extender fracturas preexistentes, esto considerando la fórmula general para el cálculo del PPV.

Tabla 36.Umbrales de VPP para Quecher main SG02

CRITERIO DE DAÑO VPPc (mm/s)			
Rangos de criterio de daño VPPc	mr		Efecto/ condición de macizo
<1/4 x PPVc	0	428	<< no genera daño
(1/4 x 1 ) x PPVc	428	1713	Extensión de fractura
( 1 - 4 ) x PPVc	1713	6851	Creación de nuevas fracturas
( 4 - 8 ) x PPVc	6851	13703	Intenso fracturamiento
> 8 x PPVc	13703	∞ +	>> fracturamiento mayor

Lo primordial de ahora en adelante en este nivel 4021 del tajo Quecher Main el PPV no debería exceder de  $1/4 \times \text{PPVc}$  sino más bien tener valores debajo para no extender fracturas preexistentes, esto considerando la fórmula general para el cálculo del PPV.

#### 4.4 CÁLCULO DE LA VIBRACIÓN MÁXIMA DE CONTROL DE LA VELOCIDAD PICO PARTÍCULA (VPPC) O PPVC POR CRITERIO DE MACIZO ROCOSO

Para la presente investigación y por juicio de experiencia el cálculo de la velocidad pico partícula (PPV o VPP) se realizará por medio del criterio del macizo rocoso aplicando la ecuación N° 11, la cual relaciona la velocidad de propagación de la onda ( $V_p$ ) del estudio de cross-hole realizado in situ, el RMR, Módulo de Young y la resistencia traccional del macizo rocoso.

$$PPV_{cmr} = \frac{\left( \sigma_t * \exp\left(\frac{RMR - 100}{27}\right) * V_{p\text{cross-hole}} \right)}{E * \exp\left(\frac{RMR - 100}{36}\right)}$$

Donde:

$\sigma_{t\text{ mr}}$  (Pa): Resistencia a la tracción del macizo rocoso.

$V_{p\text{ mr}}$  (m/s): Velocidad de propagación de la onda P en el macizo rocoso.

$E_{\text{ mr}}$  (N/m<sup>2</sup>): Módulo de Young del macizo rocoso.

De los cuales estos valores como módulo de Young, Resistencia a la tracción y  $V_p$  del macizo rocoso se conocen y detallan en la tabla 37:

Tabla 37. Valores geotécnicos del tajo Quecher main nivel 4021

Característica	valor
Módulo de Young (Gpa)	0.96
Resistencia a la tracción (Mpa)	2.7
$V_p$ macizo rocoso (m/s)	609
RMR	45

Aplicando la ecuación N° 11 para el cálculo de la velocidad pico partícula (VPP) por criterio del macizo rocoso, el resultado es el siguiente:

$$PPV_{cmr} = \frac{(2.7 * \exp(\frac{45 - 100}{27}) * 609)}{0.96 * \exp(\frac{45 - 100}{36})}$$

$$PPV_{cmr} = 1029$$

La Tabla N° 38 muestra los valores obtenidos de PPV para el nivel 4021 del tajo Quecher main, teniendo como valor crítico 1029 mm/s y como valor máximo de no generar daño es 257 mm/s, siendo estos valores inferiores a los calculados por el criterio de roca intacta.

Tabla 38. Valores de criterio de daño.

Velocidad Pico partícula	
PPV crítico (mm/s)	PPV máximo (mm/s)
1029	257

Al obtener un PPV crítico inferior al calculado anteriormente, la investigación resultará más segura y precisa, ya que el cuidado de las paredes será mucho mayor.

La Tabla N°39 muestra los valores del umbral de daño de Holmberg & Persson, que están clasificados de acuerdo al potencial fracturamiento que ocurre cuando se está dentro de alguno de los rangos de VPP.

El principal objetivo es tener valores debajo de la VPP máximo para la no extensión de fracturas preexistentes.

Tabla 39. Umbrales de VPP para Quecher main SG02.

<b>CRITERIO DE DAÑO VPPc (mm/s)</b>			
<b>Rangos de criterio de daño VPPc</b>	<b>mr</b>		<b>Efecto/ condición de macizo</b>
<1/4 x PPVc	0	257	<< no genera daño
(1/4 x 1 ) x PPVc	257	1029	Extensión de fractura
( 1 - 4 ) x PPVc	1029	4118	Creación de nuevas fracturas
( 4 - 8 ) x PPVc	4118	8235	Intenso fracturamiento
> 8 x PPVc	8235	∞ +	>> fracturamiento mayor

La velocidad pico partícula (1/4 PPVc) por criterio de roca intacta es 428 mm/s mientras que por criterio de macizo rocoso es 257 mm/s esto indica que, por este último criterio es 60% más riguroso, el cual implica que se obtendrán mejores resultados ya que el límite de PPV para el cuidado de las paredes es menor.

#### **4.5 MODELO DE ATENUACIÓN DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO EN EL NIVEL 4021 QUECHER MAIN**

A través de las ondas generadas por la detonación de los 05 taladros y/o pozos P5, P6, P7, P8, P9, se generó un modelo matemático predictivo por medio de las velocidades pico partículas y el factor H&P tanto delante como detrás de los taladros de pre corte y/o light drilling; así como se realiza el análisis de onda elemental (tiempos adecuados entre taladros) propias de la zona estudiada. Se debe considerar que los taladros más cercanos a los geófonos generan picos más de PPV (velocidad pico partícula) respecto a los taladros más lejanos a los geófonos. Los resultados se muestran en la tabla 40 y 41

##### **4.5.1 MODELO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO APLICANDO EL MODELO DE HOLMBERG-PERSSON DELANTE DEL PRE CORTE**

La figura 52 muestra el registro de vibraciones de los 5 taladros ubicados delante del light drilling medidos a través del geófono triaxial (G3) en los tres ejes (transversal, vertical y longitudinal). consideremos que en el presente modelo de H&P se trabajará con el PPV suma.

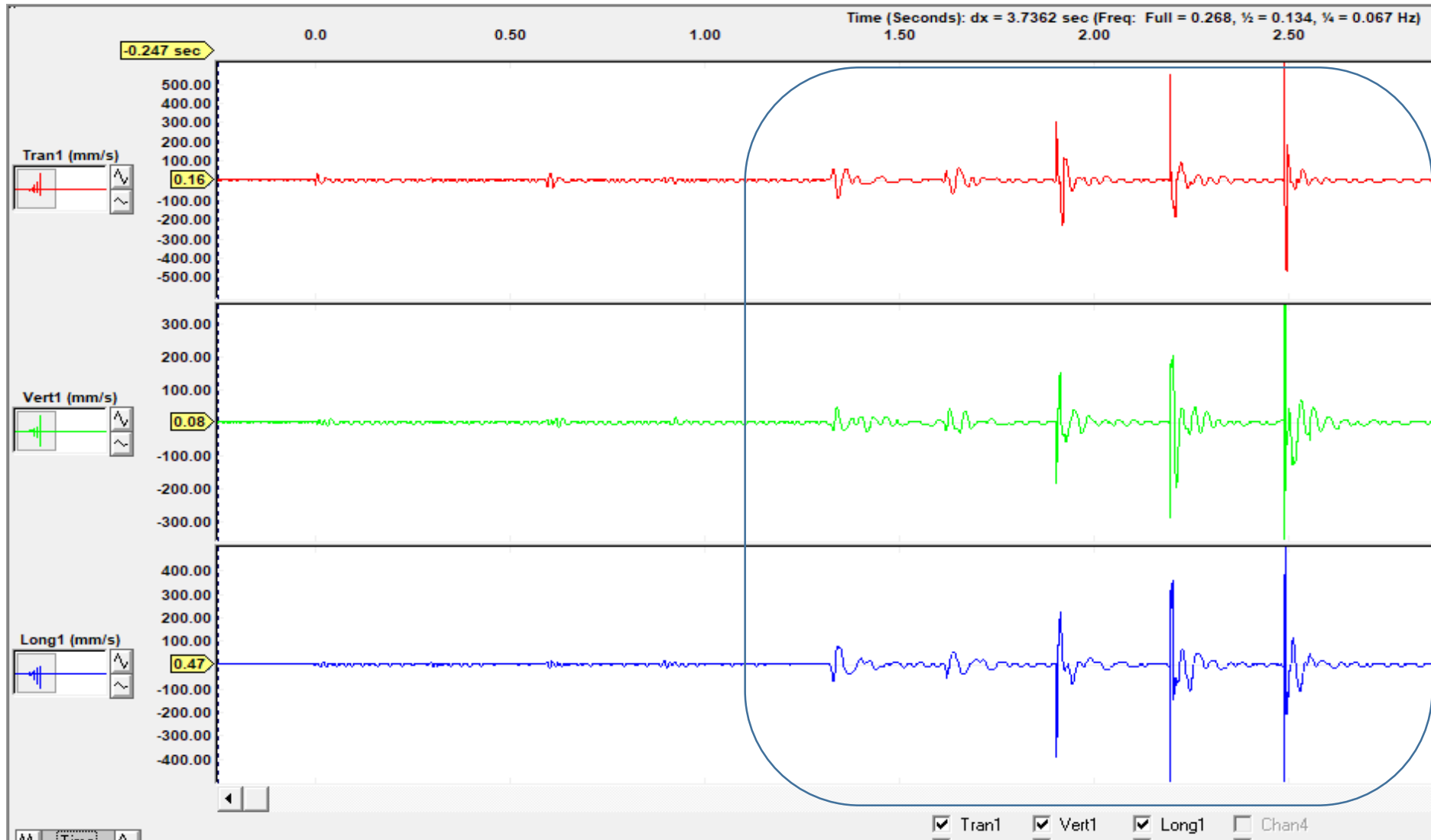


Figura 52. Registro de vibraciones del geófono 3 Delante del Light Drilling

En la figura 53, se visualiza la detonación de 5 taladros (P5, P6, P7, P8, P9) cuyos resultados se muestran en la tabla 39.

Para aplicar el modelo de campo cercano de Holmberg & Persson se requieren como se mencionó anteriormente las siguientes variables:

- $q$  = Densidad lineal de carga [kg]
- $R_0$  = Distancia de medición, desde la carga [m]
- $H$  = Longitud de carga [m]
- $X_s$  = Longitud de taco [m]
- $X_0$  = Profundidad de medición [m]
- $K$  = Factor de velocidad
- $\alpha$  = Factor de decaimiento o atenuación

Para mejor comprensión se muestra la Figura 53

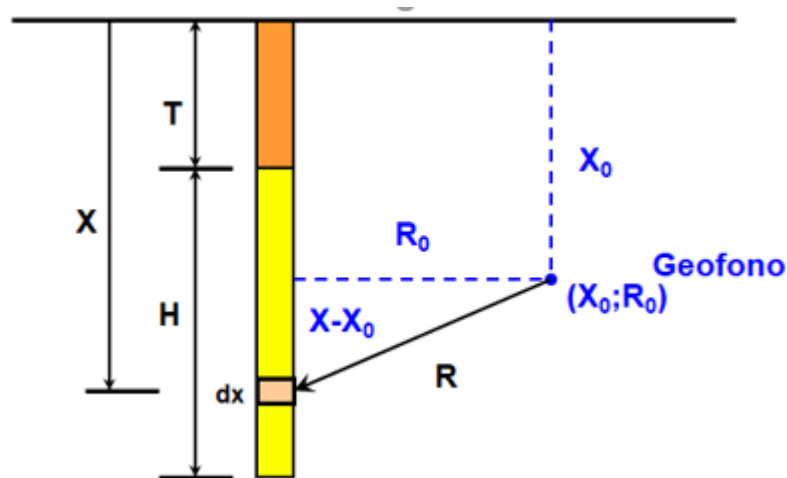


Figura 53. Vista de perfil de un taladro en la prueba de H&P in situ.

A partir del modelo generado se calculará el factor H&P, K y Alfa, aplicando la ecuación 8, para luego analizar la eficiencia del filtro de pre corte. Estos resultados se muestran en las Tablas 40 y 41. En la tabla 40, verificamos que el taladro (P9) más cercano al geófono nos brinda un mayor PPV respecto a los demás.



Tabla 40. Datos del geófono G3 delante del light drilling y/o pre corte

Geo	Taladro	Altura	Long.	Peso	Carga	Taco	Prof.	Tiempo	Distancia	PPV
		Taladro	Carga	real	lineal	Xs	Xo	Detonación	medición	medido
		[m]	[m]	[Kg]	[kg/m]	[m]	[m]	[ms]	Ro [m]	[mm/s]
G-3	P9	10.3	1.5	84	60.9	8.8	7.0	1500	4.29	1778.00
G-3	P8	10.3	2.3	140	60.9	8.0	7.0	1800	8.99	880.00
G-3	P7	10.3	2.3	140	60.9	8.0	7.0	2100	13.42	518.00
G-3	P6	10.3	5.3	309	60.9	5.0	7.0	2400	20.80	84.00
G-3	P5	10.3	5.3	309	60.9	5.0	7.0	2700	28.26	125.00

Tabla 41 .Factores de Holmberg & Persson G3.

Factor	PPV medido	Log(PPV)	Log(H&P)
H&P	[mm/s]		
3.670	1778.00	3.25	0.56
1.631	880.00	2.94	0.21
0.757	518.00	2.71	-0.12
0.741	84.00	1.92	-0.13
0.403	125.00	2.10	-0.39

La confiabilidad de este modelo por defecto es del 50%, quiere decir que la mitad de los puntos están bajo la línea y la otra mitad por encima de la línea. Es importante considerar que el modelo al 50% de confiabilidad permite ajustar siempre la estimación de vibraciones al nivel más alto medido, de esta manera se expresa la predicción de vibraciones sin subestimar la posible amplitud en el macizo rocoso. Es por ello que, al aumentar este nivel de confiabilidad, se debe revisar los PPV real vs el PPV predictivo al momento de hacer una propuesta.

Para generar el modelo de campo cercano de Holmberg & Persson, como muestra la figura 54, tomaremos los valores de factor H&P y PPV suma medidos; a partir de ello se obtendrá K y Alfa

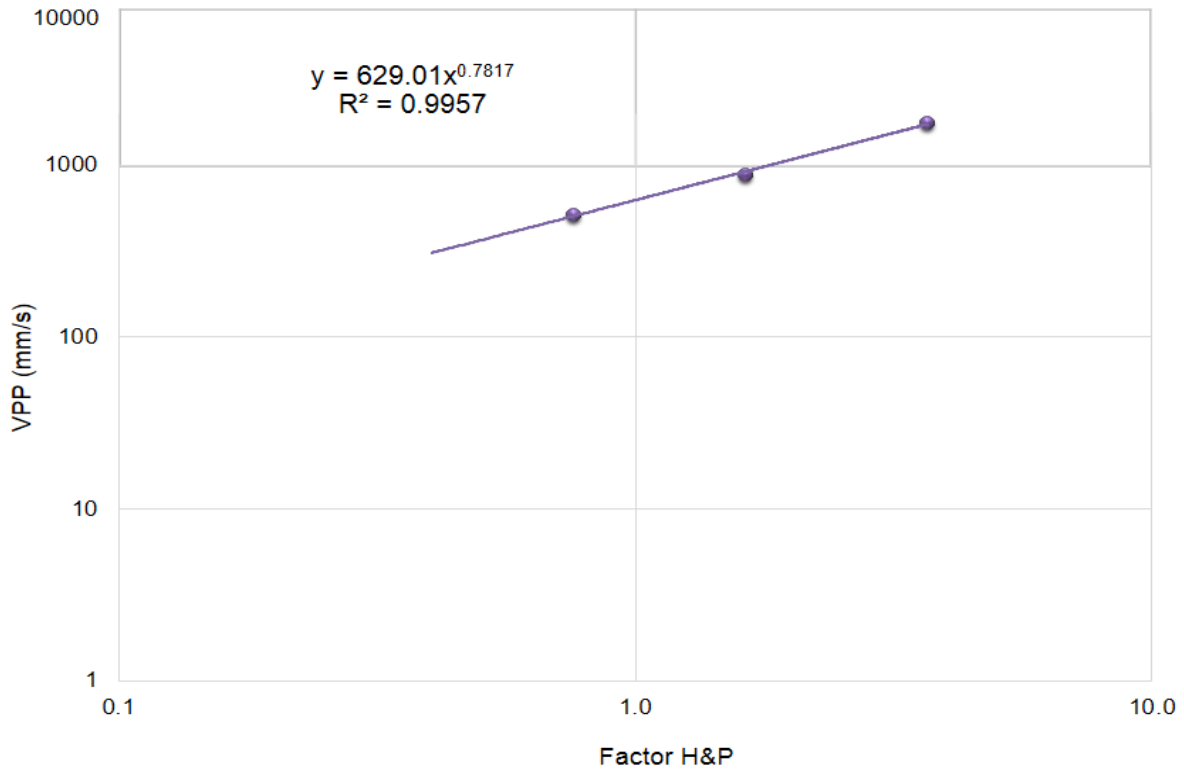


Figura 54. Modelo matemático predictivo de las velocidades pico partículas y el factor H&P delante del light drilling y/o pre corte

De manera resumida la ecuación con una confiabilidad del 50% de la velocidad pico partícula por el criterio de Holmberg & Persson que representa el comportamiento de vibraciones en campo cercano, resulta de la siguiente manera:

$$PPV = 629.01(H\&P)^{0.7817}$$

Ecuación 15. Modelo de H&P en campo cercano delante del light drilling – Quecher main nivel 4021

Dónde:

$$k1 = 629.01$$

$$\alpha = 0.7817$$

$$R^2 = 0.9957$$

Se evidencia en la Figura 54 los valores de: K=629.01, Alfa= 0.7817 y un coeficiente de determinación de 99.57 %. De estos resultados utilizaremos en valor de K, para calcular la eficiencia del filtro del pre corte y/o light drilling y se realizará las propuestas.

#### 4.5.2 MODELO DE VIBRACIONES EN CAMPO CERCANO APLICANDO EL MODELO DE HOLMBERG-PERSSON DETRÁS DEL PRE CORTE

La Figura 55, muestra el registro de vibraciones de los 5 taladros, a través de los geófonos (G1-G2) ubicados detrás del light drilling y/o pre corte en los tres ejes (transversal, vertical y longitudinal), consideremos que en el presente modelo de H&P se trabajará con el PPV suma.

De igual manera que en el modelo de campo cercano delante de light drilling, a partir de estos registros se calculará el factor H&P, K y Alfa aplicando la ecuación 8, para luego analizar la eficiencia de filtro de pre corte. Estos valores se muestran en las Tablas 42 y 43.

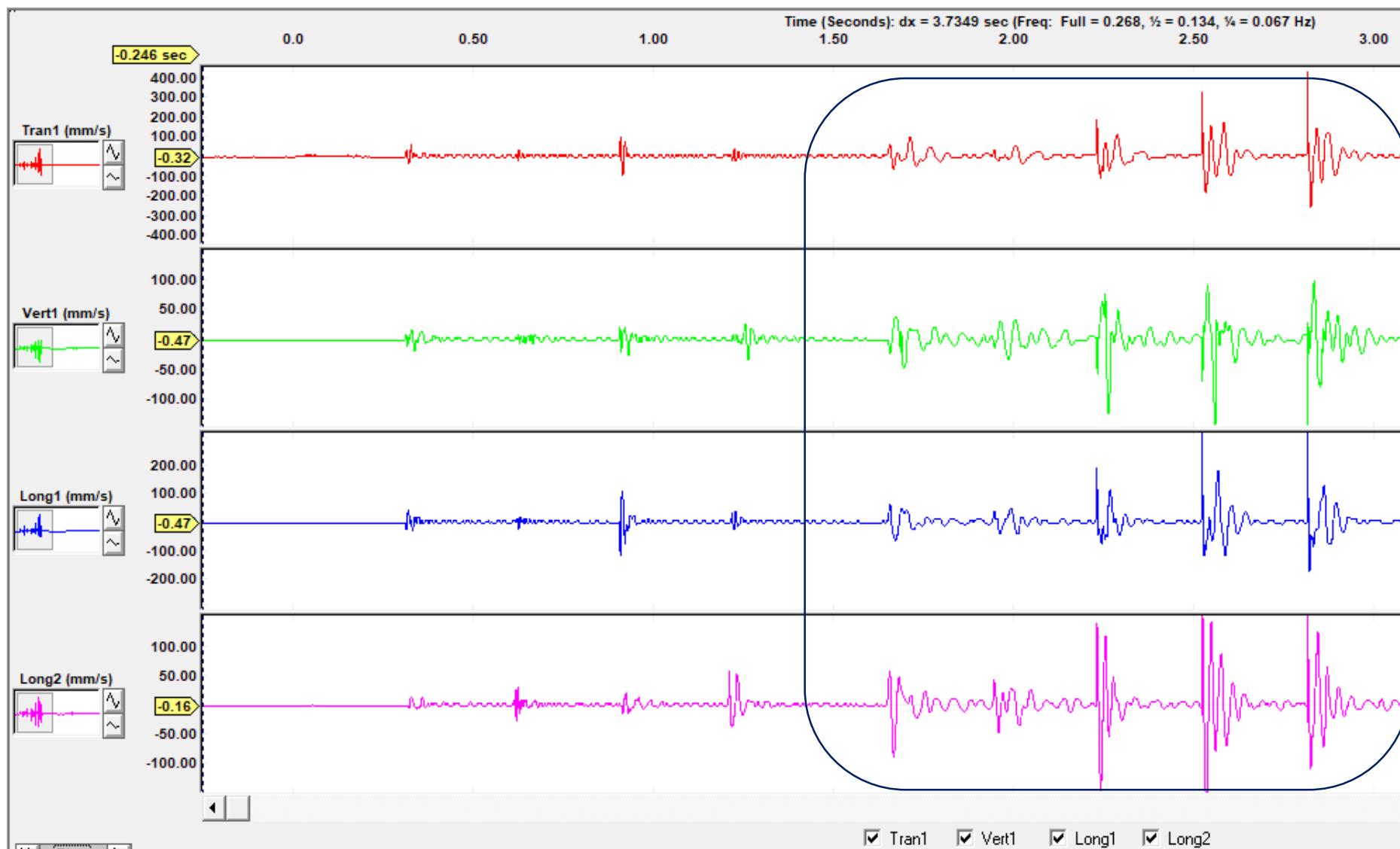


Figura 55. Registro de vibraciones de los geófonos triaxial G1 detrás del light drilling

Tabla 42. Datos del geófono G1-G2 detrás del light drilling y/o pre corte.

Geo	Tala dro	Altura	Long.	Peso	Carga	Taco	Prof.	Tiempo	Distancia	PPV
		Taladro	Carga	real (Q73)	lineal	Xs	Geof	Detonación	medición	medido
		[m]	[m]	[Kg]	[kg/m]	[m]	Xo [m]	[ms]	Ro [m]	[mm/s]
G-1	P9	10.3	1.5	84.0	60.9	8.8	7.0	1500	10.50	623.40
G-2	P8	10.3	2.3	140.0	60.9	8.0	7.0	1800	15.20	488.00
G-2	P7	10.3	2.3	140.0	60.9	8.0	7.0	2100	19.60	269.80
G-2	P6	10.3	5.3	309.0	60.9	5.0	7.0	2400	27.00	68.00
G-2	P5	10.3	5.3	309.0	60.9	5.0	7.0	2700	34.40	96.90

Tabla 43. Factores de Holmberg & Persson G1-G2

Factor	PPV medido	Log(PPV)	Log(H&P)
H&P	[mm/s]		
0.781	623.40	2.79	-0.11
0.593	488.00	2.69	-0.23
0.360	269.80	2.43	-0.44
0.441	68.00	1.83	-0.36
0.272	96.90	1.99	-0.57

El modelo matemático de las velocidades pico partículas y el factor H&P detrás del pre corte y/o light drilling generado a partir de estos valores se muestra en la Figura 56.

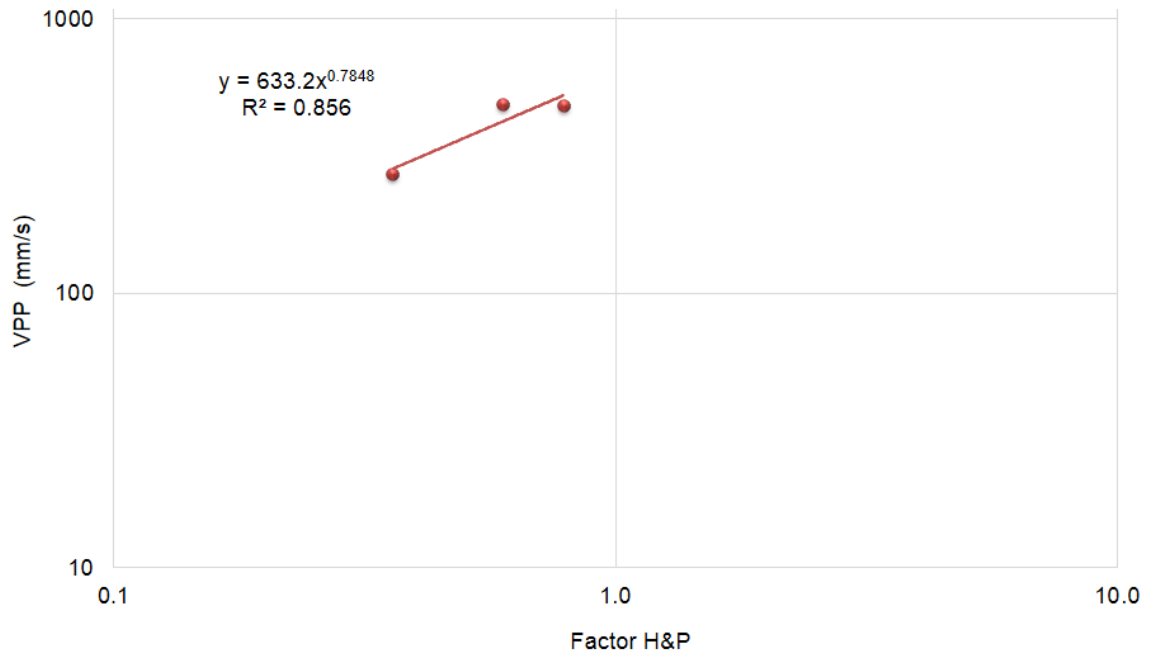


Figura 56. Modelo matemático predictivo de las velocidades pico partículas y el factor H&P detrás del light drilling

Como el caso anterior el valor de confiabilidad dependerá de lo que busco predecir y/o proponer.

De manera resumida la ecuación con una confiabilidad del 50% de la velocidad pico partícula por el criterio de Holmberg & Persson detrás del light drilling, se muestra a continuación:

$$PPV = 633.02(H\&P)^{0.7848}$$

Ecuación 16 Modelo de H&P en campo cercano detrás del light drilling – Quecher main nivel 4021

Dónde:

$$k = 633.2$$

$$\alpha = 0.7848$$

$$R^2 = 0.856$$

Se utilizará el valor de K para el cálculo de eficiencia de filtro de pre corte.

#### 4.6 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE

Para calcular la eficiencia de filtro de pre corte, se requiere los valores “K1 y K2” obtenidos en los modelos generados delante y detrás del light drilling y/o pre corte.

La Figura N°57 muestra el modelo de campo cercano - Holmberg Persson (H&P) obtenidos a través del geófono N°1, N°2 (G1), detrás del pre corte y/o light drilling y del geófono N°3 (G3) delante del pre corte respecto a los pozos P5, P6, P7, P8, P9.

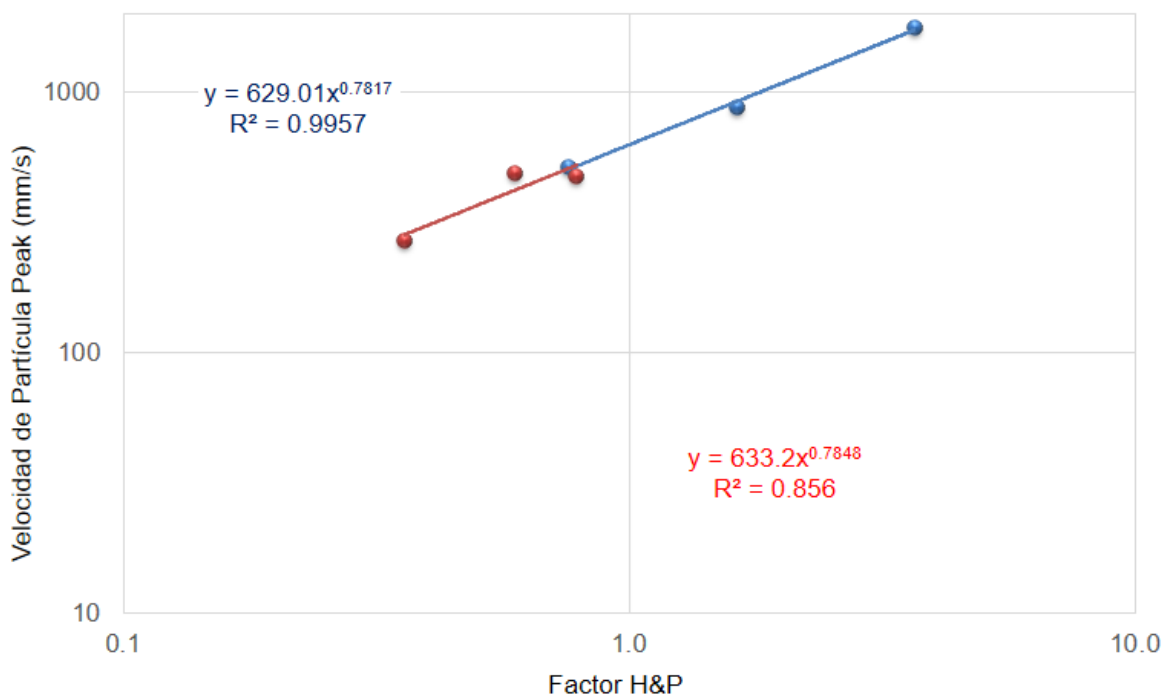


Figura 57. Modelo de campo cercano detrás y delante de light drilling y/o pre corte

De manera resumida se muestra la Tabla 44 con los valores de velocidad K1 obtenido del modelo de campo cercano (H&P) delante del pre corte y el valor K2 obtenido del modelo de Holmberg Persson detrás del pre corte; estos valores servirán para el cálculo de la eficiencia de filtro de pre corte en la reducción de vibraciones.

Tabla 44. Valores de los factores de velocidad K1, K2 obtenidos a través del modelo matemático de H&P

Ubicación	Factor de velocidad K
Factor de velocidad delante del pre corte (K1)	629.01
Factor de velocidad detrás del pre corte (K2)	633.2

Aplicaremos la ecuación 16 para calcular el nivel de atenuación de los taladros pre corte

$$\%filtro = \left( \frac{K1 - K2}{K1} \right) \times 100$$

Ecuación 17. Cálculo de porcentaje de filtros en pre corte

Dónde:

K1: Proviene del modelo de campo cercano delante del pre corte

K2: Proviene del modelo de campo cercano detrás del pre corte

Reemplazando en la ecuación 16, se tendría el siguiente resultado:

$$\%filtro = \left( \frac{629.01 - 633.2}{629.01} \right) \times 100$$

$$\%filtro = 0$$

De acuerdo al valor obtenido se proponen optimizaciones ya que filtros menores a 20% deben ser reevaluados y obtener diseños alternativos considerando la eliminación del pre corte ya que no está cumpliendo la función de filtrar vibraciones y evacuar los gases de la voladura. Dentro de la clasificación de rangos de filtro, actualmente estos taladros son muy malos tal como su muestra en la tabla 45.



Tabla 45 .Rangos de filtros de Pre corte

Rango de filtro	Calificación
<b>&lt;20</b>	<b>Muy malo</b>
21 - 30	Malo
31 - 40	Regular
41 - 54	Bueno
55 - 65	Muy bueno
> 65	Excelente

#### 4.7 ANÁLISIS DE LA ONDA ELEMENTAL

La onda elemental es el registro de vibración que genera un solo taladro al detonar su carga explosiva. Esta onda recoge la información del macizo rocoso, dado que la forma, amplitud y duración de esta onda son resultado de las condiciones del macizo rocoso y la carga detonada.

La importancia de conocer la Onda elemental es que mediante el análisis de esta nos permite obtener tiempos que generen el menor nivel de vibración y así no dañar el talud.

El aporte de vibraciones de cada taladro (onda elemental) y según la secuencia del disparo, estas pueden estar produciendo interferencia constructiva entre ellas, en cuyo caso los niveles de vibración se incrementan ya que las amplitudes se suman; mientras que, si la secuencia del disparo es tal que la interferencia entre las ondas es destructiva, los niveles de vibración son menores. Consiste en encontrar el tiempo entre taladros “t” de tal manera que, al sumar las ondas elementales generadas por los taladros, nos dé un registro de vibraciones con el menor nivel de vibraciones.

Para la zona de Quecher main, sílice granular la onda elemental se obtuvo de la detonación de un taladro de producción cargado con 331 kg de MEQ-73 a unos 35m de distancia de la zona de registro. Teniendo la Onda Elemental y con la ayuda de un software especializado se procede con el análisis de la amplificación de la

onda para cada uno de los ejes a diferentes tiempos de retardo, lo que se hace es una iteración de la onda a distintos tiempos de retardo entre taladro, se suman estas ondas y se obtiene un valor de VPP(mm/s) el cual es dividido entre el valor original para obtener la amplificación para cada y a diferentes tiempos de retardo, en este caso se simularon un taladro de producción. Por esta razón, en 0ms de retardo la amplificación es de 20x.

Luego de las iteraciones, 5000 veces para este caso, se muestra que la zona donde está el cuadro negro genera el menor nivel de vibración. La Figura N°58, muestra los tiempos de acoplamiento destructivo de la onda, dando como resultado el tiempo de 11 m/s, esto significa que con la aplicación de este tiempo en la zona de Quecher main sílice granular se estaría logrando el menor nivel de vibración.

Entonces, el tiempo idóneo de retardo por dominio geotécnico que contribuye a un acoplamiento de ondas y por tanto reduce la amplificación de vibraciones de taladros de producción es de 11m/s, esto significa que aplicando este tiempo se genera una adecuada transferencia energética al medio (menor vibración), no generar daño a las paredes y mantener un proceso óptimo de fragmentación evidenciado en la granulometría resultante.

Si programamos un tiempo mayor a lo obtenido en el estudio como resultado se obtendría fragmentos mayores, pero si se programa un tiempo menor a los 11 ms obtendríamos mayor porcentaje de finos en el nivel 4021 del tajo Quecher main.

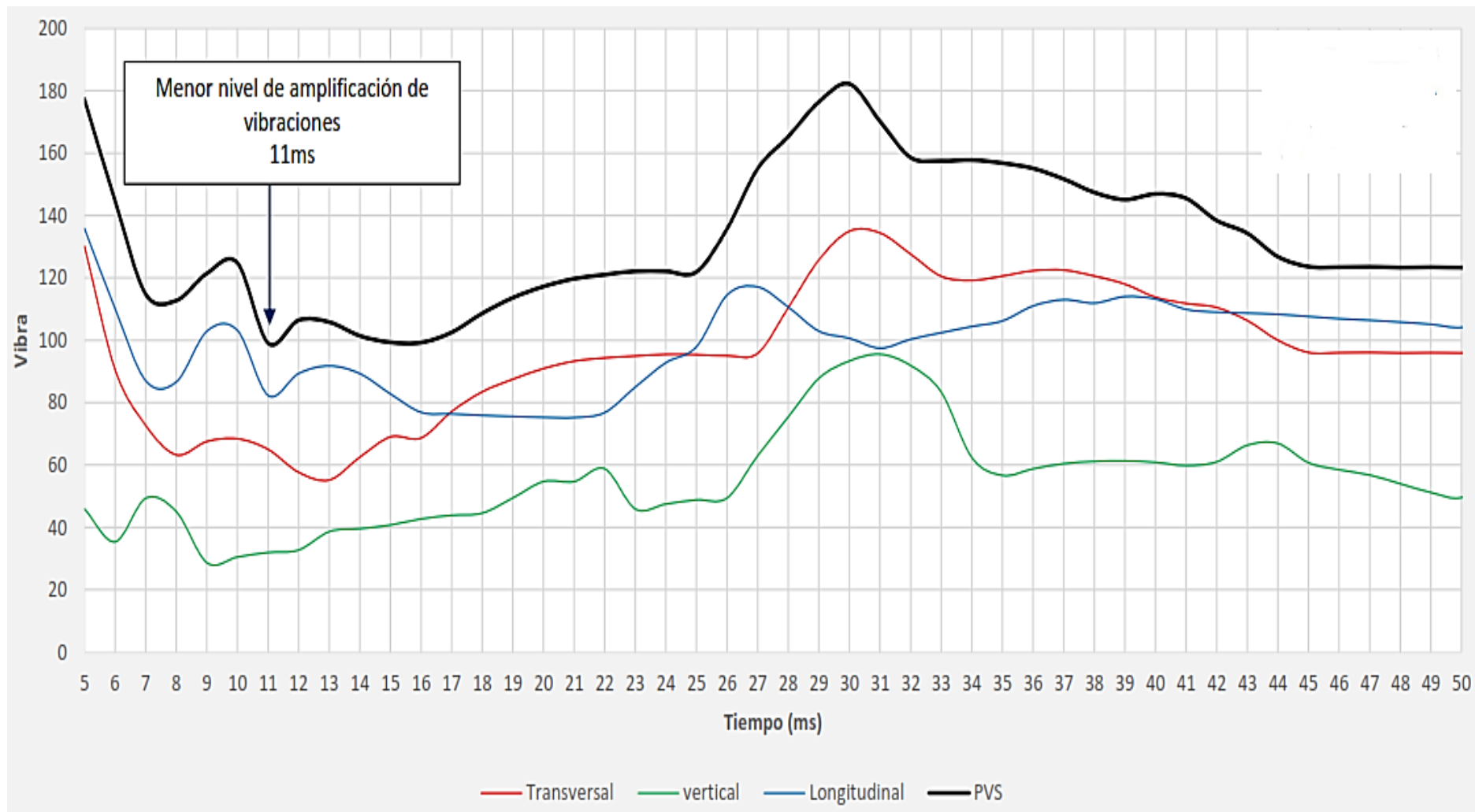


Figura 58. Tiempo entre taladro (ms) vs Amplificación de vibraciones (mm/s) – método de onda elemental

## 4.8 PROPUESTA DE DISEÑO DE TALADROS EN EL TAJO QUECHER MAIN:

### 4.8.1 DISEÑO PROPUESTO PARA TALADROS DE 9 7/8 PULGADAS DE DIÁMETRO

Se propone la eliminación de una fila de los taladros buffer (fila 500) ampliando el burden hasta 7.5 metros, convirtiéndolo de esta manera en taladros de producción. La fila de taladros 700, se amplía el burden a 4.5 metros mientras que los taladros de la fila 600 se amplía el burden a 5.5 metros. La figura 59 muestra la propuesta de diseño.

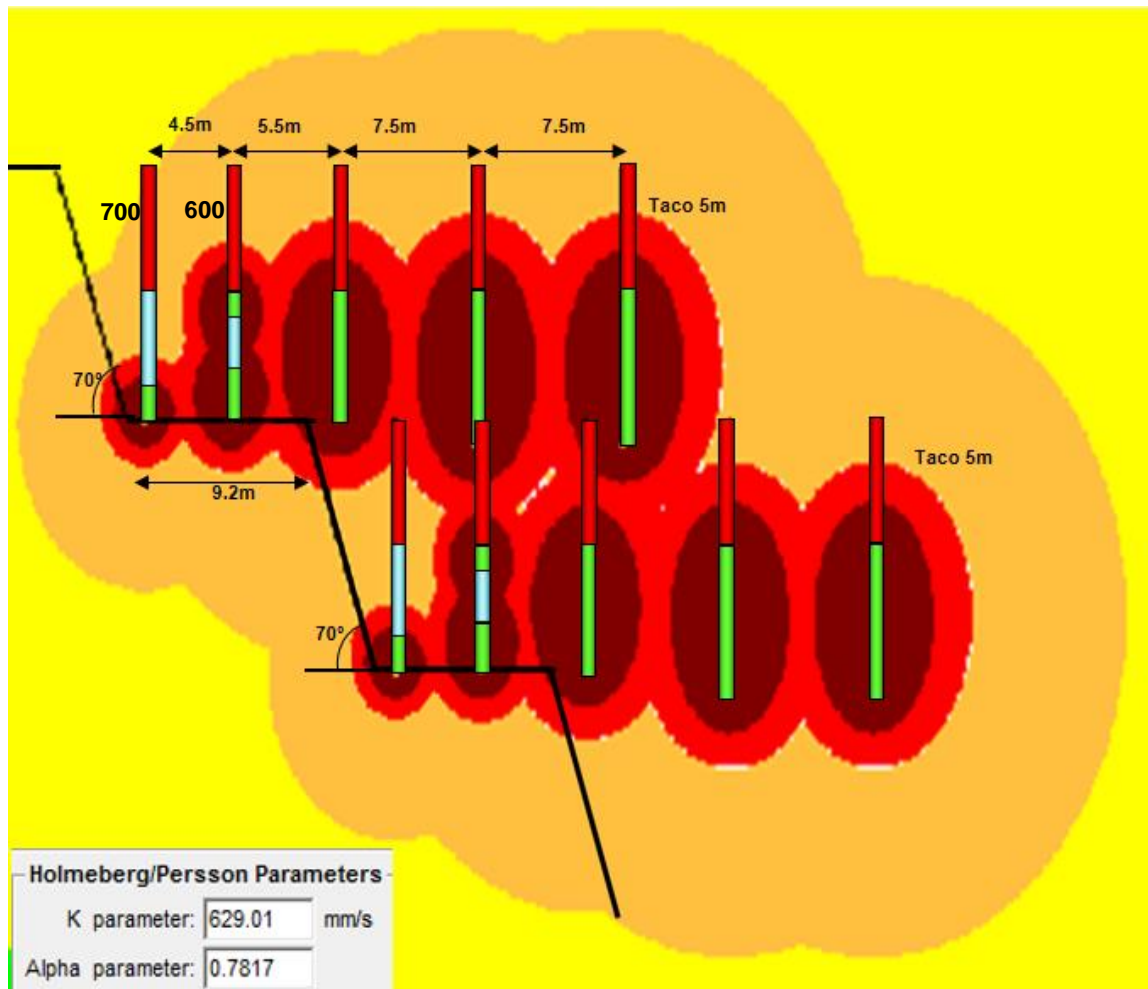


Figura 59. Contornos de vibración de taladros de 9/8 de pulgada del diseño propuesto

Esta propuesta se corroboró a través de simulaciones de energía respetando los umbrales de daño calculados anteriormente, para esta simulación se utiliza los valores k y alpha del modelo de campo cercano- Holmberg & Persson delante del pre corte y/o light drilling. A continuación se explica la propuesta:

En la primera fila buffer (700) se propone la eliminación de la sobre perforación (Sub drilling) por qué no se está cumpliendo con lo requerido sino más bien está generando daño a la pared y mayor fracturamiento al piso, por ende, generando mayor gasto de aceros y explosivo. Es por ello que se propone el diseño de la figura 76.

En la primera fila buffer (700) se propone el uso de cámara de aire para disipar la energía hacia arriba y no generar sobre fracturación al piso y paredes.

En la segunda fila de buffer se propone la utilización de doble carga con cámara de aire al centro, esto con motivo de tener un mejor desacoplamiento de ondas y no tener un back break “sobre fracturamiento” desde la primera línea de buffer hacia la pared final del banco.

Considerando los factores de decaimiento y factor de velocidad del modelo de campo cercano delante del pre corte ,se propone los parámetros de voladura para la carga de columna explosiva en las nuevas voladuras. Esto se detalla en la Tabla 46.

Tabla 46. Parámetros propuestos para taladros de 9 7/8 de pulgadas de diámetro-Quecher main nivel 4021

Parámetros de talados de voladura	Fila 700	Fila 600	Producción línea 1	Producción línea 2
Taco (m)	5	5.0	5	6.0
Aire (m)	3	2.0	0	0.0
Carga Superior (m)	0	1.0	0	0.0
Carga inferior	2	2.0	5	5.0
Sobre perforación	0.0	0.0	0.0	1
Explosivo (kg)	108.76	163.14	271.9	271.9

Reduciendo esta fila de taladros podemos generar un ahorro en perforación; según lo estimado se reduciría en un 42% el costo de dólar por tonelada por la reducción de taladros de la fila 700, con un nuevo costo de 0.154 dólar por tonelada; mientras que en los taladros de la fila 600 se reducirá en un 5% contandando 0.183 dólar por tonelada y finalmente en los taladros de producción el ahorro será de 31% esto por que el nuevo costo de dólar por tonelada sería 0.126. Este analisis se muestra en la Figura 60.

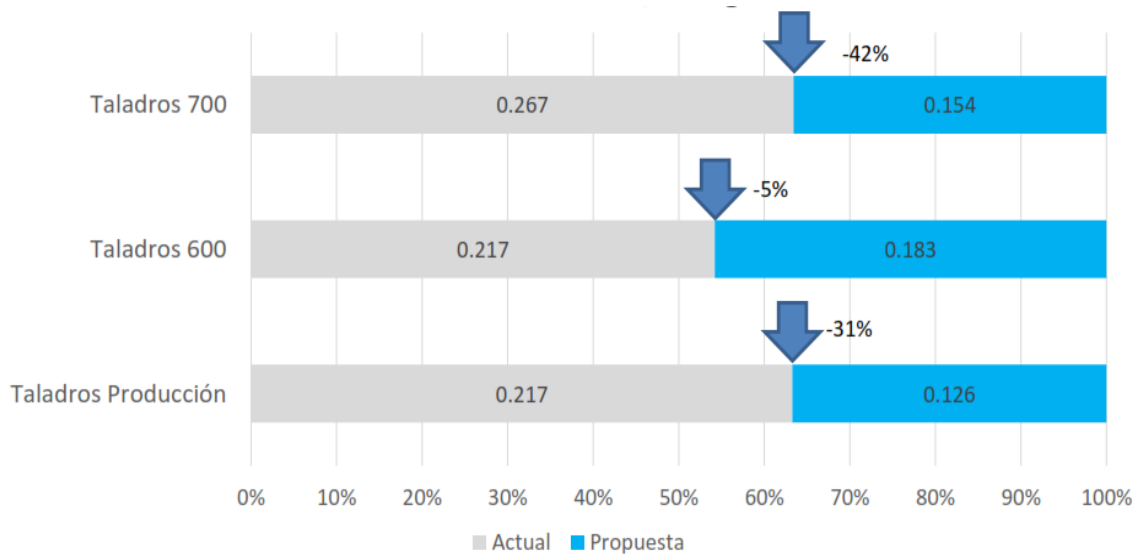


Figura 60. Comparación (\$/Ton) por tipo de taladro de control con diámetro de 9 7/8 pulg.

#### 4.8.2 DISEÑO PROPUESTO PARA TALADROS DE 10 5/8 PULGADAS DE DIÁMETRO

En el diseño actual de los taladros de 10 5/8 pulgadas de diámetro se propone la eliminación de una fila de los taladros buffer (fila 500) ya que estos al igual que en los taladros de 9 7/8 también están afectando a la cresta del banco, se plantea ampliar el burden hasta 7.5 metros para controlar el daño a la cresta convirtiéndolo de esta manera en taladros de producción. En los taladros de la fila 700 se propone mantener el burden en 4.8 metros y respecto de los taladros de la fila 600 se ampliaría el burden a 6.5 metros. La figura 61,62 muestra la propuesta de diseño y criterio de daño.

Esta propuesta se corroboró a través de simulaciones de energía respetando los umbrales de daño calculados anteriormente, para esta simulación se utiliza los valores k y alpha del modelo de campo cercano- Holmberg & Persson delante del pre corte y/o light drilling. A continuación se explica la propuesta:

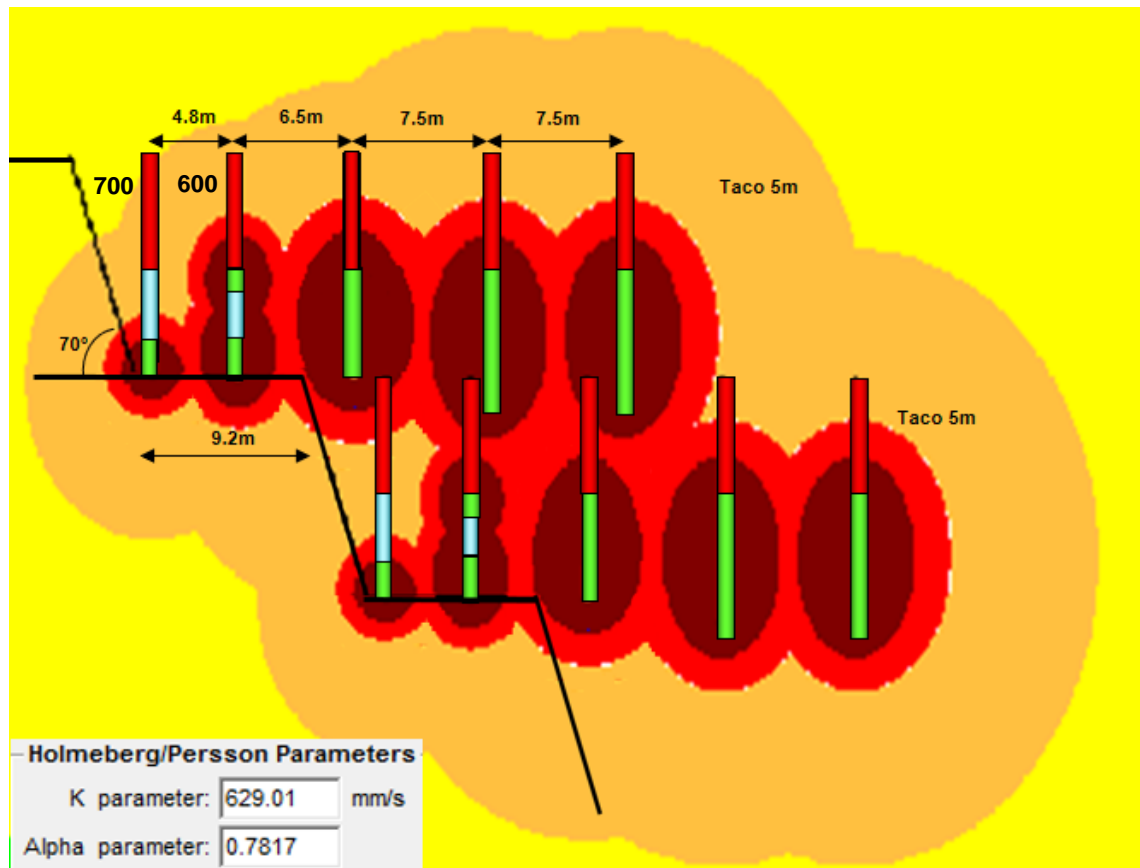


Figura 61. Contornos de vibración de taladros de 10 5/8 de pulgada del diseño propuesto

CRITERIO DE DAÑO PPV <sub>cmr</sub> (mm/s)		
CRITERIO DE DAÑO PPV <sub>cmr</sub> (mm/s)	mr	Efecto / condición de macizo
< 1/4 x PPV <sub>c</sub>	0 257	<< No genera daño
(1/4 x 1) x PPV <sub>c</sub>	257 1029	Extensión de fracturas
(1-4) x PPV <sub>c</sub>	1029 4118	Creación de nuevas fracturas
(4-8) x PPV <sub>c</sub>	4118 8235	Intenso fracturamiento
> 8 x PPV <sub>c</sub>	8235 ∞+	>> fracturamiento mayor

Figura 62. Criterio de daño propuesto de VPP por criterio de macizo rocoso para el nivel 4021 del tajo Quecher Main.

El detalle de la propuesta se explica a continuación:

En la primera fila buffer (700) se propone la eliminación de la sobre perforación (Sub drilling) por qué no se está cumpliendo con lo requerido sino más bien está generando daño a la pared y mayor fracturamiento al piso, por ende, generando mayor gasto de aceros y explosivo. Es por ello que se propone el diseño de la figura 62.

En la primera fila buffer (700) se propone el uso de cámara de aire para disipar la energía hacia arriba y no generar sobre fracturación al piso y paredes.

En la segunda fila de buffer se propone la utilización de doble carga con cámara de aire al centro, esto con motivo de tener un mejor desacoplamiento de ondas y no tener un back break “sobre fracturamiento” desde la primera línea de buffer hacia la pared final del banco.

Los nuevos parámetros de taladros de voladura propuestos para la carga de columna explosiva considerando los factores de decaimiento y factor de velocidad del modelo de campo cercano delante del pre corte se detalla en la Tabla 47.

Tabla 47. Parámetros propuestos de taladros de 10 5/8 de pulgadas de la malla de pre corte, buffer y producción -Quecher main 4021.

Parámetros de talados de voladura	Fila 700	Fila 600	Producción línea 1	Producción línea 2
Taco (m)	5	5.0	5	6.0
Aire (m)	3	2.0	0	0.0
Carga Superior (m)	0	1.0	0	0.0
Carga inferior	2	2.0	5	5.0
Sobre perforación	0.0	0.0	0.0	1
Explosivo (kg)	82.7	163.14	271.9	271.9



Reduciendo esta fila de taladros podemos generar un ahorro en perforación; según lo estimado se reduciría en un 23% el costo de dólar por tonelada por la reducción de taladros de la fila 700, con un nuevo costo de 0.142 dólar por tonelada; mientras que en los taladros de la fila 600 se reduciría en un 10% contando 0.163 dólar por tonelada y finalmente en los taladros de producción el ahorro sería de 21% esto por que el nuevo costo de dólar por tonelada sería 0.143. Este analisis se muestra en la Figura 63.

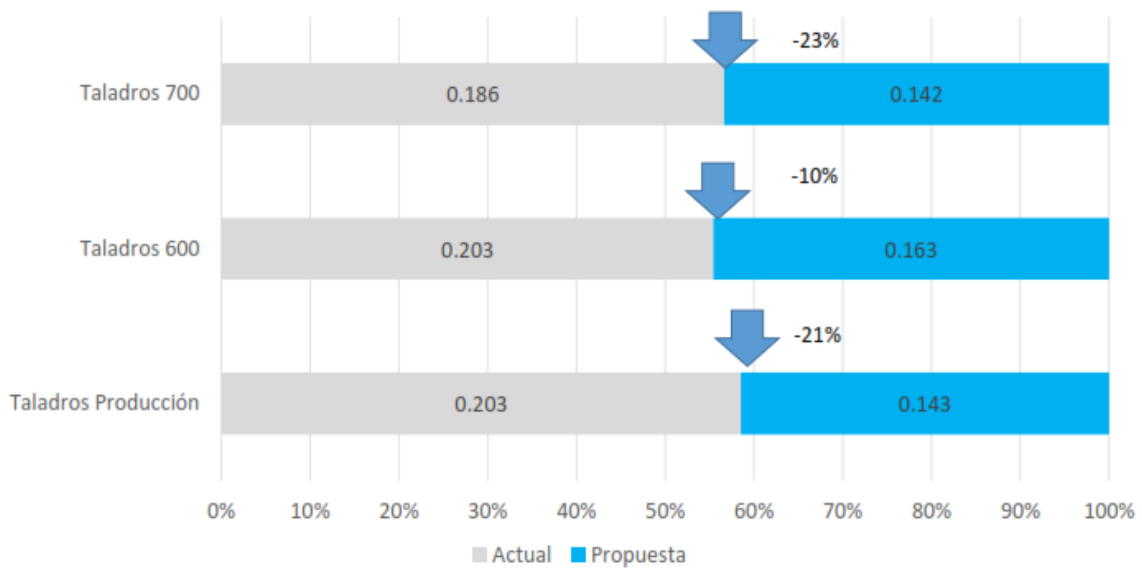


Figura 63. Comparación (\$/Ton) por tipo de taladro de control con diámetro de 10 5/8 pulg.

#### 4.9 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

En la investigación, de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en nivel 4021 del tajo Quecher Main de Minera Yanacocha, se demostró que el porcentaje de filtro de los taladros de pre corte obtenido es de 0%, equivalente a una calificación muy mala según el rango de filtros, considerando la eliminación del pre corte ya que estos taladros no están cumpliendo la función de filtrar vibraciones y evacuar lo gases de la voladura.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

La velocidad de la onda P ( $V_p$ ) del macizo rocoso calculada a través de la técnica sísmica (Cross-Hole) es 609 m/s; mientras que la velocidad pico partícula crítico (VPPc) es 1029 mm/s y el límite máximo de vibración para no generar daño es 257 mm/s con un tiempo por retardo que reduce la amplificación de vibraciones en taladros de producción de 11 ms.

Los factores de velocidad de Holmberg-Persson obtenidos a través de los modelos generados delante de pre corte (K1) y detrás del pre corte (K2) respectivamente son,  $K_1=629.0$ ,  $K_2=633.2$

El porcentaje de filtro de pre corte obtenido a través de los factores de velocidad es de 0%. Por lo tanto, de acuerdo a la evaluación estos taladros no están cumpliendo la función de filtrar las vibraciones y evacuar los gases producto de la voladura.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Sugiero al área de Voladura de Minera Yanacocha hacer 04 disparos en este sector sin usar taladros de pre corte y comparar los resultados en base a los indicadores de rendimiento actuales.

Recomiendo al área de Voladura de Minera Yanacocha usar un tiempo de retardo de 11ms en taladros de producción ya que permitirán un acoplamiento de ondas y por lo tanto reducirán la amplificación de vibraciones.

El área de voladura de Minera Yanacocha solo debe aplicar los diseños propuestos al sector de estudio realizado, estos deben ser al detalle operativamente y validados para su aplicación permanente, previa evaluación de Indicadores de rendimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

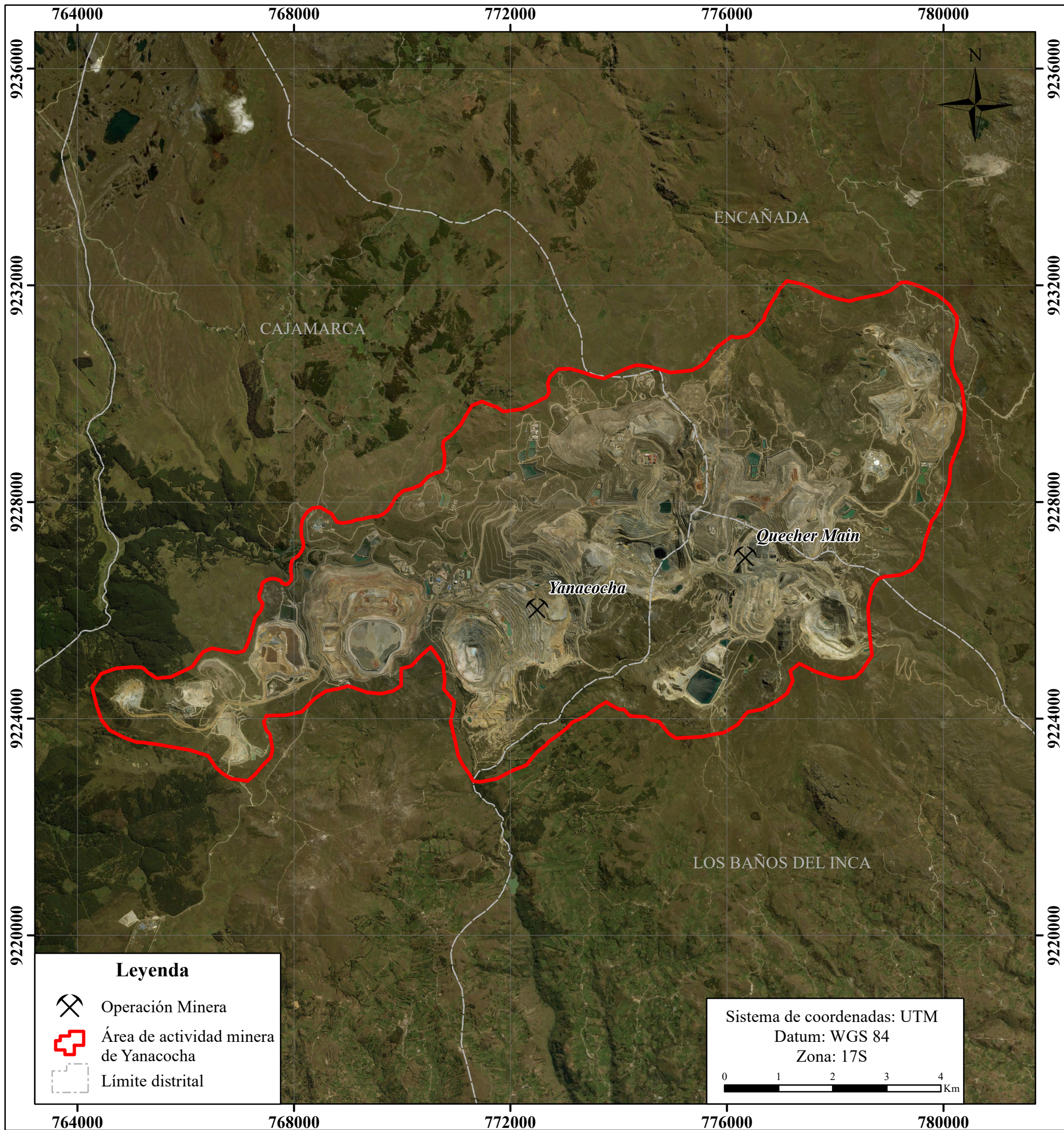
- Áviles, J.; Barzallo, B. 2016. Caracterización de los suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos. Cuenca, Ecuador.
- Bravo Sánchez, IL. 2018. Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence. Santiago de Chile, Chile.
- Cánovas, V. 2016. Onda sísmica en voladuras, estudio en la mina Sotiel. Cartagena, Colombia.
- Cereceda, E. 2015. Análisis de vibración y cálculo del modelo de atenuación para la optimización de perforación y voladura en la unidad minera de Uchuchacua. Arequipa, Perú.
- Chiappetta, F. 2014. New Innovative blasting techniques to improve fragmentation, final highwalls and plant throughput. Blasting Analysis International. Allentown, Pennsylvania, USA.
- CINTEX (Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex). 2006. Manual de monitoreo de vibraciones generadas por tronaduras, análisis y modelamiento. Lima, Perú.
- Contreras, W. 2009. Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima, Perú.
- Cordova, D. 2010. Control de vibraciones por efecto de voladura. Lima, Perú.
- Cospedal, J. 2019. Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental. Cartajena, Colombia.
- DAVEY BICFORD. 2013. Control de vibraciones inducidas por voladura en campo lejano. Lima, Perú.

- Dueñas, J. 2018. Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el bypass179". Puno, Perú.
- EXSA. 2019. Instrumentación y medición de control de vibraciones inducidas por voladura. Lima, Perú.
- EXSA. 2020. Metodología para el control de vibraciones en campo cercano. Lima, Perú.
- Floyd, J. 2006. Técnicas eficientes de voladura y técnicas de control de daño de taludes. blast dynamics. Madrid, España.
- Giraldo, F. 2010. Control de vibraciones para casas de tierra en Perú. Lima, Perú.
- Gomez Tique, E. 2019. Aplicación de modelo predictivo de daño (Cross Hole) para determinar la vibración pico partícula máxima (vppc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud, mina constancia. Moquegua, Perú.
- Holmberg, R.; Persson, A. 1977. Rock Blasting and Explosives Engineering. London, New York, Washington, D.C. EE.UU.
- Instantel 2017. Especificaciones de Minimate Pro. Canadá.
- ISEE (International Society of Explosives Engineers).2011. Blasters Handbook. (18th.). EE.UU.
- Jimeno, C. 1994. Manual de perforación y voladura de rocas. Madrid, España.
- Konya, C. 1983. Surface Blast Design. Pennsylvania, USA.
- McKenzie, C. 1994. Estado del arte de la tronadutra. Santiago, Chile
- Minera Yanacocha. 2015. Modelo litógico de Minera Yanacocha. Cajamarca, Perú.

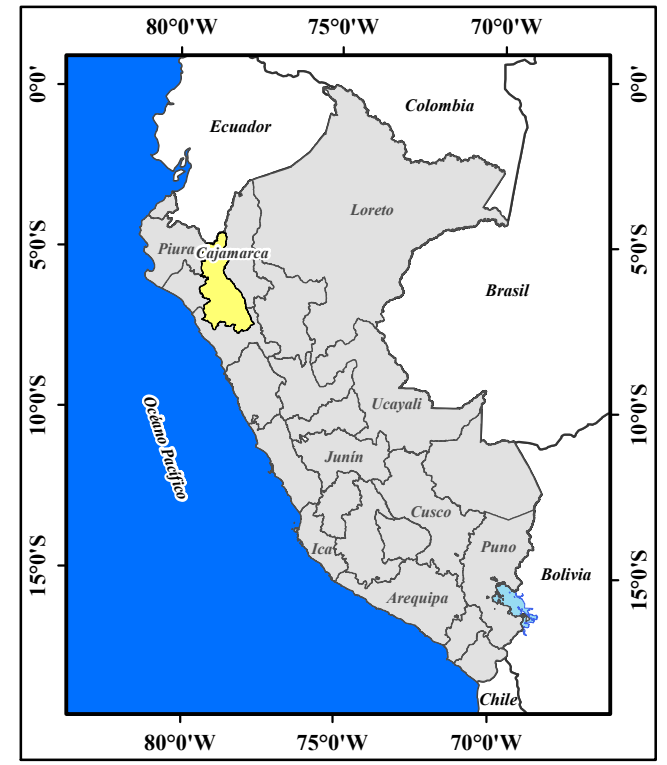
- Moraga, G. 2018. Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto. Concepción, Perú.
- Olofsson, S. 1990. Applied explosives technology for construction and mining. Applex. Sweden.
- Orica 2019. Reporte Pruebas Cross-Hole y onda Elemental en zonas de Monzonita, Caliza y Brecha. Cusco, Perú.
- Romero, J. (2016). Pruebas de integridad en pilas mediante sísmica de reflexión. Puebla. México.
- Scherpenisse, C. (2006). Instrumentación, monitoreo e interpretación de vibraciones. Lima, Perú.
- Ticlia, L. (2019). Análisis y modelamiento de vibraciones para la selección óptima de explosivo y carga máxima para reducir los costos por voladura en la zona valeria v nv 2220-marza 2018. Trujillo, Perú.
- Tovar, F. (2015). Aplicación del principio de la velocidad pico partícula (vpp), para minimizar el daño al macizo rocoso-utilizando retardos. Huancayo, Perú.
- Troncoso, C. (2019). Criterio de daño por vibraciones en campo cercano y campo lejano. Lima, Perú.
- Trujillo, M. (2018). Correlación empírica entre la velocidad de propagación de las ondas S y el resultado del ensayo de resistencia a la penetración estándar. Huancavelica-Perú.
- Valdivia, A. (2017). Diseño de modelo predictivo de vibración ppv en la voladura del tajo Isabelita-Mina el Toro para evitar riesgos en la población cercana. Trujillo, Perú.

## ANEXOS

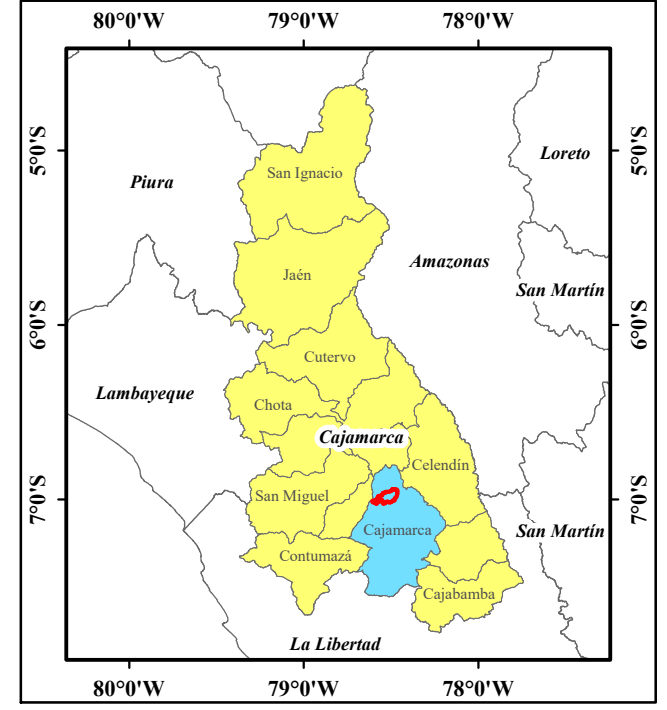
- Anexo N° 1 P01: Plano de ubicación geográfica de Minera Yanacocha.
- Anexo N° 2 P02: Plano de alteraciones litológicas de Minera Yanacocha.
- Anexo N°3 P03: Plano de arreglo de prueba en campo-Tajo Quecher Main-Minera Yanacocha
- Anexo N°4 Autorización para el uso de información de minera Yanacocha.
- Anexo N°5 Certificado de Originalidad – Software antiplagio Urkund.






### Ubicación Nacional



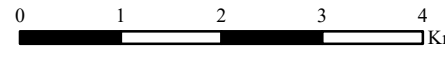
### Ubicación Provincial



#### Leyenda

-  Operación Minera
-  Área de actividad minera de Yanacocha
-  Límite distrital

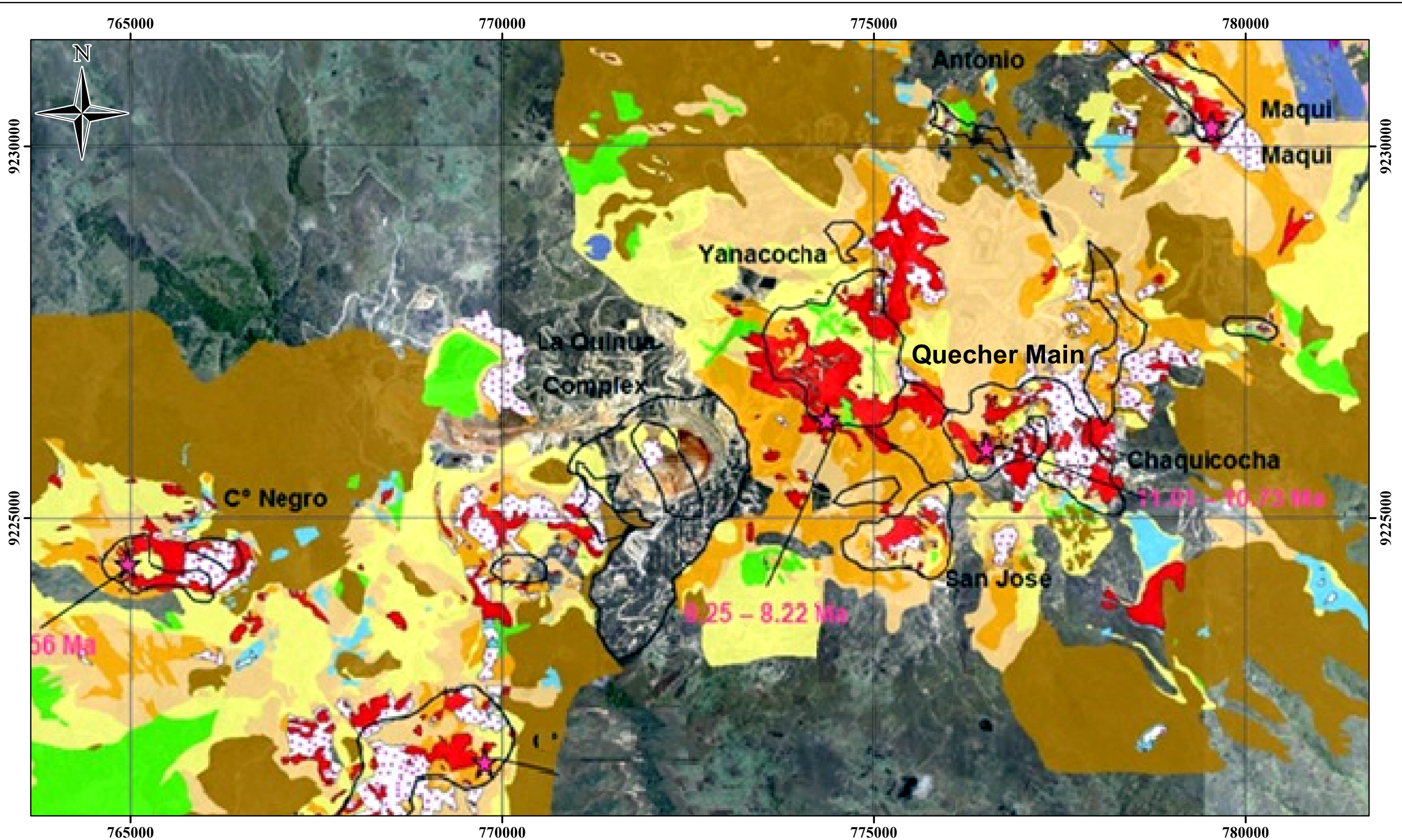
Sistema de coordenadas: UTM  
 Datum: WGS 84  
 Zona: 17S




<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
FACULTAD DE INGENIERÍA		
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
TESIS: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE EN LA REDUCCIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINERA YANACOCHA		
PLANO: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE MINERA YANACOCHA		
TESISTA: MICKY DENILSON ARAUJO GUTIÉRREZ		
ASESOR: M. CS. ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA		
ESCALA: 1:75 000	DATUM: WGS84 - UTM ZONA 17 S	FECHA: AGOSTO, 2021

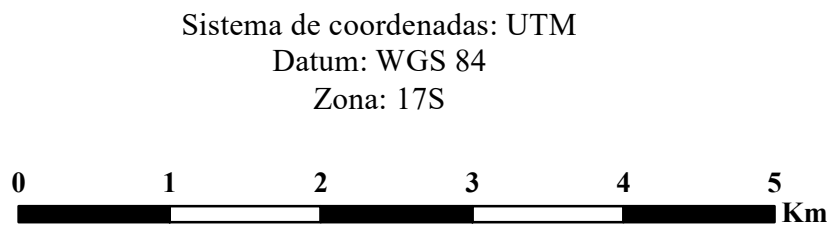
# P 01



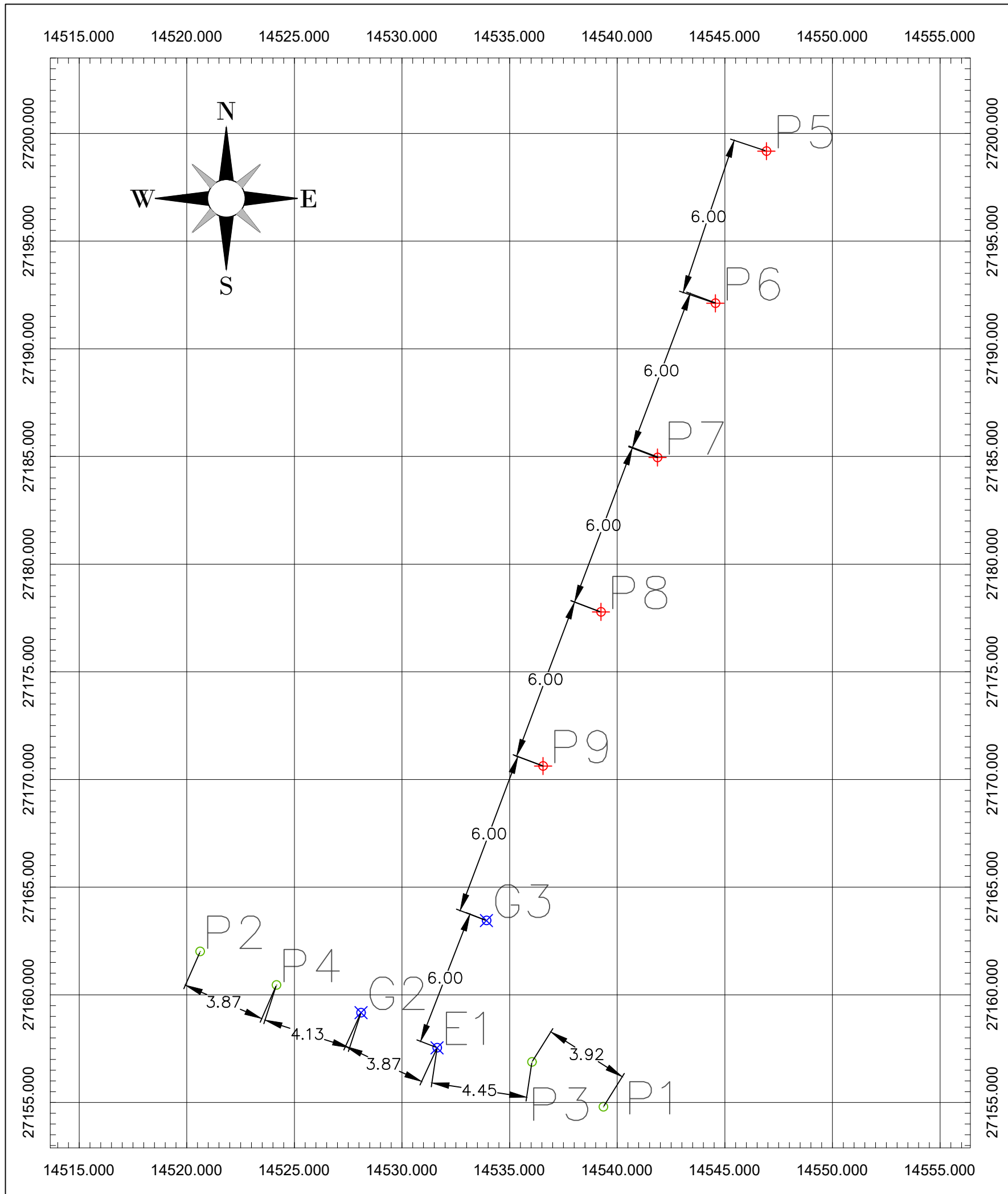


**Leyenda**

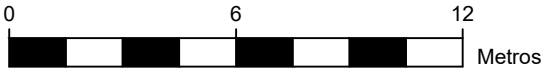
	Ópalo		Sílice arcilloso
	Sílice granular		Arcillas
	Sílice vuggy		Propilítica
	Sílice masiva		Roca sin alteración
	Cuarzo alunita		



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA</b>		
	FACULTAD DE INGENIERÍA		
	ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS		
	TESIS: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE EN LA REDUCCIÓN DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINERA YANACOCHA		
	PLANO: MODELO DE ALTERACIONES DE MINERA YANACOCHA		
TESISTA: MICKY DENILSON ARAUJO GUTIÉRREZ			
ASESOR: M. CS. ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA			
ESCALA: 1:50 000	DATUM: WGS84 - UTM ZONA 17 S	FECHA: AGOSTO, 2021	<b>P 02</b>



LEYENDA	
	FUENTE SÍSMICA
	GEÓFONO
	FUENTE SÍSMICA



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

FACULTAD DE INGENIERIA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTRO DE PRE CORTE  
 EN LA REDUCCION DE VIBRACIONES POR VOLADURA  
 EN MINERA YANACOCHA

PLANO: ARREGLO DE PRUEBA EN CAMPO TAJO  
 QUECHER MAIN- MINERA YANACOCHA

TESISTA: MICKY DENILSON ARAUJO GUTIÉRREZ

ASESOR: M.CS. ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA

ESCALA:  
1:200

DATUM:  
WGS84 - UTM ZONA 17 S

FECHA:  
AGOSTO, 2021

**P 03**

**Carta N° 32 – 2021 RI&G- AAEE**

**Cajamarca, 22 de julio 2021**

**Doctor:  
Gaspar Mendez Cruz  
Decano de la Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de Cajamarca  
Presente.-**

**Referencia: OFICIO N° 009- 2021 D/FI/UNC**

De mi especial consideración:

Es grato dirigirme a usted para expresarle mi cordial saludo y agradecimiento a nombre de Minera Yanacocha por habernos considerado como una opción para el desarrollo y crecimiento profesional de sus estudiantes.

Asimismo, confirmamos que nuestra representada, ha decidido aceptar el desarrollo del tema de tesis “***Evaluación de la Eficiencia de Filtro de Pre Corte en la Reducción de Vibraciones por Voladura en Minera Yanacocha***”, que investigará el Bachiller de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Cajamarca.

- Micky Denilson Araujo Gutierrez DNI 70465019

La información brindada para la elaboración de la tesis debe ser considerada estrictamente para fines académicos y debe mantenerse de manera confidencial.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para expresarle mis sentimientos de especial consideración y estima.

Atentamente,

**Nahil Hirsh Carrillo  
Directora de Asuntos Externos  
Yanacocha**