

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**OPTIMIZACIÓN DE PERFORACIÓN Y VOLADURA PARA EL  
CONTROL DE LA ESTABILIDAD DE TALUD EN LA ZONA DE  
CERRO MARÍA EN EL TAJO CERRO CORONA – CAJAMARCA**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas**

**AUTOR:**

Jhonatan Edwing Torres Vela

**ASESOR:**

Luis Mendieta Britto

Lima, Mayo, 2025

## Informe de Similitud

Yo, Luis Alberto Mendieta Britto, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

### **OPTIMIZACIÓN DE PERFORACIÓN Y VOLADURA PARA EL CONTROL DE LA ESTABILIDAD DE TALUD EN LA ZONA DE CERRO MARÍA EN EL TAJO CERRO CORONA-CAJAMARCA**


Del autor:

Jhonatan Edwing Torres Vela,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 22/04/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 22 de abril del 2025

Apellidos y nombres del asesor: <u>Mendieta Britto, Luis Alberto</u>	
DNI:44887003	Firma 
ORCID: 0000-0003-1749-3190	

## Resumen

En minería a tajo abierto la perforación y voladura son las primeras operaciones unitarias, los cuales tienen como objetivo principal la fragmentación de material de manera óptima; ya que los costos de carguío y acarreo, así como los de procesamiento de mineral (chancado y molienda) se pueden ver afectados si en la perforación y voladura no se obtiene la fragmentación requerida. Existen varios parámetros que nos permiten optimizar el proceso de perforación y voladura tales como: evaluación del área a volar, este parámetro nos permite recopilar la data de geología y geotecnia necesaria para poder diseñar una perforación y voladura óptimas.

La presente investigación tiene como principal objetivo determinar los parámetros óptimos de perforación y voladura con la finalidad de tener una fragmentación adecuada y a la vez una estabilidad de talud dentro de los estándares de seguridad que permitan el desarrollo de la mina sin riesgo de deslizamientos, para realizar esta tesis se iniciará recopilando datos de geología y geotecnia con la finalidad de conocer las características físicas y químicas de la zona a minar, posterior a ello se realizará diferentes pruebas de campo con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos (burde, espaciamiento, factor de carga, tipo de explosivo, secuencia de salida, tiempos de salida) que nos garanticen los objetivos requeridos

En minería superficial es importante tener un cuidado con el control del talud; ya que, si no se realiza cálculos exactos del control del talud se podría generar un deslizamiento que podría generar pérdidas humanas y daños materiales, además de poner en riesgo la continuidad de la operación minera.

## INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.2.1. <i>Antecedentes Nacionales</i> .....	2
1.2.2. <i>Antecedentes Internacionales</i> .....	4
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.3.1. <i>Objetivo General</i> .....	5
1.3.2. <i>Objetivo Específico</i> .....	5
1.4. HIPOTESIS .....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. VOLADURA DE ROCAS.....	7
2.2. FUNDAMENTOS DE EXPLOSIVOS Y TEORÍA DE LA DETONACIÓN.....	7
2.3. MECÁNICA DE ROTURA EN VOLADURA.....	13
2.4. EXPLOSIVOS EN VOLADURA.....	16
2.5. ACCESORIOS DE VOLADURA .....	20
2.6. DISEÑO DE VOLADURA .....	23
2.7. CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EXPLOSIVA .....	25
2.8. ONDAS SÍSMICAS .....	32
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO.....	54
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL .....	56
3.2. GEOLOGÍA LOCAL.....	57
3.3. ESTRATIGRAFÍA.....	58
3.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	62
3.5. MINERALIZACIÓN.....	64

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	66
4.1. RECOPIACIÓN DE DATOS.....	68
4.2. PRUEBAS DE CAMPO.....	72
4.3. ANÁLISIS DE PRUEBAS.....	81
4.4. DISEÑO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA.....	89
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADO.....	92
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	97
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS.....	98



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normativa peruana de vibraciones. ....	51
Tabla 2. Norma Alemana DIN4150.....	52
Tabla 3. Valores representativos de la directriz, alemana. ....	53
Tabla 4. Esquema de rango de filtro de precorte .....	80
Tabla 5. Cálculo de la velocidad de propagación del macizo rocoso VP. ....	84
Tabla 6. Cuadro de cálculo de vibración máxima.....	84
Tabla 7. Criterios de Potásico Competente, Para el sector en estudio tenemos los siguientes datos considerando la resistencia a la tracción. ....	84
Tabla 8. Cálculo de VP de la roca intacta. ....	85
Tabla 9. Criterios de Potásico Competente, cálculo de la vibración y la velocidad pico partícula crítica del macizo rocoso PPV cmr.....	85
Tabla 10. Representación de escala de eficiencia de filtro de Precorte. ....	87
Tabla 11. Malla de Perforación para Precorte. ....	89
Tabla 12. Malla de Perforación para desmonte – Taladros Buffer. ....	89
Tabla 13. Malla de Perforación para desmonte - Taladros de producción. ....	89
Tabla 14. Proyectos seleccionados para la aplicación de la optimización.....	92
Tabla 15. Cuadro resumen de los proyectos de voladura con los resultados geotécnicos.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de reacción de un explosivo.....	7
Figura 2. Tipo de reacción en función de la cinética química. ....	9
Figura 3. Zonas del proceso de Detonación.....	11
Figura 4. Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja (Pe) de dos tipos de explosivo .....	12
Figura 5. Propagación de la onda de compresión y tensión.....	14
Figura 6. Expansión de gases.....	15
Figura 7. Movimiento del material .....	16
Figura 8. Distribución de la energía potencia de un explosivo en voladura. ....	19
Figura 9. Nomenclatura del Diseño de Voladura.....	24

Figura 10. Esquema de carga continua y segmentada. ....	26
Figura 11. Simulación de iniciación en Cuña y movimiento del material.....	31
Figura 12. Simulación de iniciación en Echelon y movimiento del material. ....	31
Figura 13. Simulación de iniciación en Diamante y movimiento del material.....	32
Figura 14. Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.....	33
Figura 15. Nivel de Frecuencia. ....	34
Figura 16. Amplitudes de onda.....	35
Figura 17. Onda completa de vibración.....	36
Figura 18. Longitud de Onda.....	36
Figura 19. Velocidad de Propagación en el Instante.....	37
Figura 20. Ondas vibratorias (Ondas Internas y Superficiales).....	38
Figura 21. Calculando la Velocidad Peak de la Partícula.....	39
Figura 22. Modelo de campo cercano de Holmberg and Persson.....	40
Figura 23. Monitoreo de Evento.....	42
Figura 24. Monitoreo de las vibraciones en las tres dimensiones.....	43
Figura 25. Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones.....	44
Figura 26. Micrófono, equipo de monitoreo Instantel.....	45
Figura 27. Sistema de Cables, equipo de monitoreo Instantel.....	45
Figura 28. Equipo de Adquisición Instantel.....	46
Figura 29. Instrumentación para monitorear.....	47
Figura 30. Monitoreo de Voladura en tiempo real.....	47
Figura 31. Interpretación de Vibraciones.....	49
Figura 32. Interpretación de la velocidad pico de partícula en la onda sísmica.....	49
Figura 33. Interpretación de la onda sísmica en las tres componentes.....	50
Figura 34. Norma Alemana DIN4150 .....	53
Figura 35. Plano de ubicación de Cerro Corona.....	54
Figura 36. Geología regional de Cerro Corona.....	56
Figura 37. Plano Geológico Local.....	58
Figura 38. Columna estratigráfica regional del distrito de Hualgayoc.....	60
Figura 39. Plano Geológico – Estructural.....	63
Figura 40. Detailed geological mapa .....	69

Figura 41. Secciones de colina de María, donde se muestra la interacción de las zonas competentes con las no competentes. ....	70
Figura 42. Failure map – Maria hill .....	71
Figura 43. Quality map of the RMR rock massif.....	72
Figura 44. Corte maría cerro sin voladuras.....	73
Figura 45. Perfil de taludes en el cerro María después del corte libre.....	74
Figura 46. Grafica de representación de la prueba de cráter.....	75
Figura 47. Vista de la configuración y ejecución de la prueba en campo. ....	77
Figura 48. Esquema del modelo de Holmberg y Persson. ....	78
Figura 49. Representación de acoples de ondas.....	81
Figura 50. Pruebas en campo – Cerro Corona .....	82
Figura 51. Posterior a la voladura en la prueba de crater – Cerro Corona.....	82
Figura 52. Representacion de prueba de crater .....	83
Figura 53. Representación halo de energía de la prueba de cráter.....	83
Figura 54. Generación del modelo de vibraciones en campo cercano.....	86
Figura 55. Evaluación del filtro de Pre-Corte.....	86
Figura 56. Onda elemental 1 .....	88
Figura 57. Onda elemental 1.2.....	88
Figura 58. Diseño de cargas – Dureza 4. ....	90
Figura 59. Diseño de mallas – Dureza 4. ....	90
Figura 60. Diseño de cargas – Dureza 5. ....	91
Figura 61. Diseño de mallas – Dureza 5. ....	91
Figura 62. Secuencia de amarre para la levadura. ....	92
Figura 63. Resultado de fragmentación post-voladura. ....	93
Figura 64. Resultado geotécnico de factor de condición. ....	96
Figura 65. Resultado geotécnico de factor de diseño. ....	96

## Capítulo 1: Introducción

En las operaciones mineras a tajo abierto es importante mantener un control estricto en todos los procesos que se realizan, y las primeras operaciones unitarias que se realiza es la perforación y voladura, que involucra una paradoja importante la cual es fragmentar o triturara el material a tamaños mínimos requeridos sin dañar los taludes o las paredes cercas.

Los objetivos principales de una buena perforación y voladura son en el corto plazo obtener una fragmentación adecuada que optimice tiempos y recursos en las actividades posteriores a esta, y a largo plazo es mantener la estabilidad de taludes con los factores de seguridad necesarios para un buen desarrollo de la mina. La voladura es un proceso de fragmentación de la roca, que busca la precisión y eficiencia para obtener la mejor producción. Para realizar una buena voladura y lograr con los objetivos requeridos se consideran diferentes parámetros.

Para el caso de la presente tesis, la operación minera se proyecta en empezar el minado de la pared este de su tajo (Cerro María), en la cual se trata del avance final, el diseño de esta perforación y voladura será aplicado a la pared final del tajo, la cual debe ser diseñada y ejecutada de manera eficiente mediante cálculos de ingeniería. Es de gran importancia realizar el minado de esta zona con altos controles de calidad, debido a que, esta pared del tajo se encuentra en una zona con roca no competente, con presencia de caliza fresca, caliza alterada, mármol, arcilla y algunas zonas de potasio; lo que hace que esta zona tenga estructuras gran cantidad geotécnicas. Además, con los avances anteriores en zona se evidencio que se dan constantemente deslizamientos de rocas; por todo ello, se debe priorizar en esta zona un avance seguro. Al finalizar esta investigación se tendrán todos los parámetros de la malla de perforación y voladura de esta zona.

## **1.1. Justificación**

La pared Este del tajo presenta movimientos anormales y ello se debe a que se presenta una roca de baja competencia, y gran cantidad de estructuras geotécnicas por lo cual hace inviable utilizar voladuras que se encuentran estandarizadas actualmente en el proyecto minero. Por ello, realizaremos este estudio con la finalidad de encontrar los parámetros adecuados para realizar voladuras controladas que permitan mantener una estabilidad de taludes dentro de los estándares de seguridad y asegure una fragmentación óptima que no afecte el desarrollo de la mina.

El presente trabajo de investigación justifica la necesidad de la aplicación de diferentes modelos matemáticos para encontrar los parámetros de voladura adecuados tales como el diseño de malla, diseño de carga, fragmentación, vibraciones y seguridad debido a que la zona de estudio se encuentra en una zona de sensibilidad geológica y geotécnica, esto agregado a la cercanía de las comunidades. De esta manera se busca contribuir con bibliografía para estudios posteriores en la búsqueda de innovaciones de voladuras amortiguadas y/o controladas.

## **1.2. Antecedentes**

### **1.2.1. Antecedentes Nacionales**

Estudio realizado por Cornejo y Huamán (2020), titulado estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras de una mina superficial en proceso de cierre. Esta investigación se enfocó en estimar un modelo que permita predecir las vibraciones inducidas generadas por la voladura con la finalidad de mantener un control y con ello evitar un riesgo de derrumbe de las edificaciones cercanas, campo lejano, y el talud de las paredes del tajo, campo medio. La predicción de las vibraciones se realizó analizando los datos recopilados de voladuras realizadas durante la

operación de extracción de la unidad minera, la cual se ubica en la sierra peruana. Para obtener las predicciones en campo medio y campo lejano se utilizó la teoría de Devine con lo cual se obtuvo la VPP (velocidad de partícula máxima). Para la clasificación de campo medio y campo lejano se aplicó la Ley de Hooke, esta teoría permitió realizar la clasificación tomando como input la clasificación geomecánica de la zona en la que se encuentra la unidad minera, para lo cual se determinó que campo medio corresponde al rango de 30m – 150m y que el campo lejano 150m – 1000m; además se utilizó la norma alema DIN 4150 para cumplir con los estándares internacionales. Esta investigación también tomo como parámetro que para zonas con alta sensibilidad se tenga un valor de frecuencias bajas de 3mm/s. Finalmente al concluir la tesis se obtuvo ábacos que permitieron crear ábacos en los cuales se podía predecir el VPP mediante la cantidad de carga lineal que se incluiría en cada taladro.

Asimismo, estudio geotécnico y diseño del talud final de una mina a cielo abierto aplicando modelos numéricos. El estudio realizado por López (2016) tuvo como objetivo analizar el comportamiento de la pared final de un tajo, a una pendiente de 45° a más. La investigación se realizó estudiando las paredes del tajo, su composición geomecánica con lo cual se determinó que discontinuidades se presentaban en zona estudiada, se realizó diversos estudios en laboratorio con la finalidad de obtener todos los parámetros geomecánicas de la zona, los ensayos realizados fueron los siguientes: ángulo de fricción, compresión, tracción, compresión triaxial, módulo de Young, entre otros; todos estos ensayos fueron aplicados a muestras de rocas intactas de la zona. Posterior a los ensayos realizados se procedió a obtener las propiedades de resistencia de la masa rocosa mediante el software Roclab, además se aplicó la teoría de Hoek & Brown para el criterio de rotura. Así mismo, se utilizó el software Slide para analizar la estabilidad cinemática de la zona y el equilibrio máximo de la pared del tajo. La geología de la pared del yacimiento está constituida

por cuarcita y esquisto. Con el análisis geotécnico de la zona se analizó el cambio de ángulo, además si era viable, económicamente, este cambio en el ángulo de banco.

Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapacay. La investigación realizada por Mendoza (2016), se basó en analizar la estabilidad de taludes de suelos que se encuentra en la parte superficial del tajo y que superan los 100 de profundidad. Esta tesis tuvo como objetivo calcular y determinar parámetros óptimos de diseño de talud en las condiciones dadas. Para elaborar los cálculos se analizó el comportamiento del macizo rocoso de la zona mediante pruebas de estabilidad en condiciones estáticas y en condiciones pseudoestáticas, además se consideró una variedad amplia de valores de poro presión debido a que se no se conoce con exactitud la ubicación de la línea piezométrica. Todos los cálculos fueron realizados durante la ejecución de la fase tres del plan de minado de la operación minera. Para modelar el estudio se aplicó diversos softwares tal como Minesight, AutoCAD y el Slide. Por otro lado, se realizaron diversos estudios en el laboratorio de mecánica de rocas con la finalidad de obtener todos los parámetros geomecánico, los ensayos realizados fueron; corte directo y densidad. Posterior a los ensayos realizados y a la interpretación de los resultados obtenidos tanto en el software como en los ensayos se realizó a calcular los parámetros óptimos con los cuales debía realizarse el diseño de los taludes con el fin de mitigar todo posible riesgo de derrumbe.

### **1.2.2. Antecedentes Internacionales**

Estudio de vibraciones inducidas por tronaduras en minera Spence. Esta tesis realizada en el 2018 por Bravo (2018). se basó en realizar el cálculo del daño generado por las vibraciones en el macizo rocoso de la minera Spence mediante el método de daño de PPV y con ello evaluar las potenciales zonas donde se podría generar un daño por las vibraciones. Se aplico la teoría de

Holmberg and Persson en voladuras de contorno en zonas que se presentan roca dura y fracturada en grado medio calculando el daño que se genera en el campo cercano. Con ello, se generó una nueva malla estandarizada de perforación y voladura en la unidad minera, la cual fue implementada en la operación minera. Se tuvo como input de la investigación datos proporcionados por el área de geotecnia, que al momento de su ejecución se obtenga la fragmentación ideal y un daño al tajo, generado por las vibraciones, dentro del rango permisible. De manera simultánea se realizó una comparación con los parámetros con los que se desarrollaba la operación y ello generó que se pueda elaborar cuadros comparativos en donde se analizaba costos, beneficios, factor de seguridad de los cambios propuestos; que finalmente indicaba que la investigación realizada genera un beneficio económico de 1.21 MUS\$ dado que se reducía el deslizamiento de bancos en el campo cercano de 35%. Entre los cambios en la malla de perforación y voladura se tuvo cambios en las distancias de buffer y la carga lineal de explosivo que se daba a cada taladro de producción. Además, se analizó el uso de precorte en ciertas zonas del tajo. Todo ello ayudo a optimizar el proceso de perforación y voladura debido a que se redujo el nivel de vibraciones con ello se evitó el daño al talud y además se generó la fragmentación esperada.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Determinar los parámetros de perforación y voladura óptimos que garanticen una fragmentación adecuada sin afectar la estabilidad de talud de la pared Este del tajo.

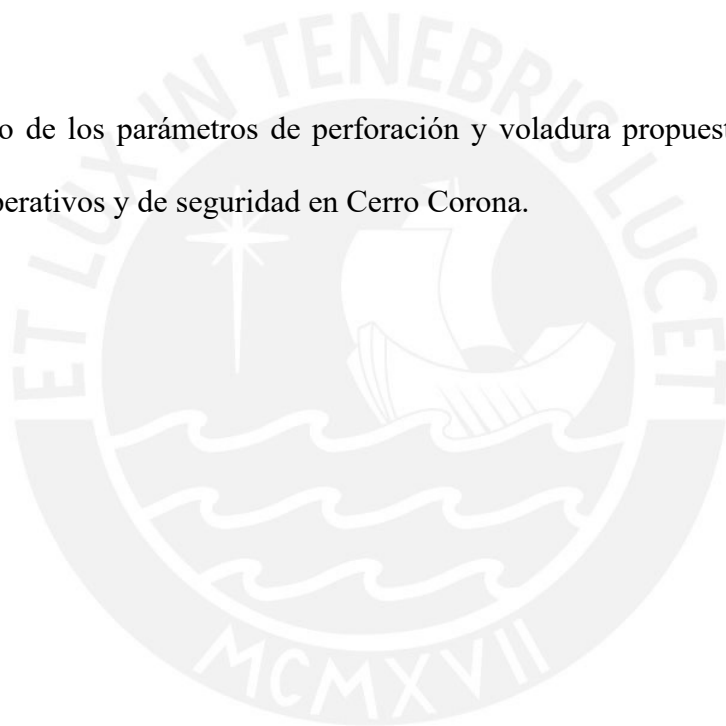
#### **1.3.2. Objetivo Específico**

- Determinar el burden y espaciamientos óptimos para los taladros de precorte, Buffer, y taladros de producción.

- Fijar los diseños de carga para las diferentes filas de control (precorte, Buffer y primera fila de producción).
- Determinar los intervalos de tiempos de detonación apropiados para el sector a través del principio de onda elemental.
- Cuantificar el efecto de filtro de precorte.
- Comprobar que los análisis de fragmentación estén dentro de los indicadores establecidos

#### 1.4. Hipótesis

- El diseño de los parámetros de perforación y voladura propuestos cumplirá con los KPI's operativos y de seguridad en Cerro Corona.



## Capítulo 2. Marco Teórico.

### 2. Bases teóricas

#### 2.1. Voladura de Rocas

Según Konya (1998), considera que, “Cuando los explosivos reaccionan químicamente, se liberan dos tipos principales de energía. El primero se llama energía de choque y la segunda energía de gas. Ambos tipos de energía se liberan durante el proceso de detonación.



Figura 1. Esquema de reacción de un explosivo  
Tomado de Exsa (2013): Manual práctico de voladura

#### 2.2. Fundamentos de Explosivos y Teoría de la Detonación

##### 2.2.1. Generalidades

Los explosivos son sustancias químicas que poseen un nivel de inestabilidad que según las circunstancias dadas se propicia una reacción de disociación de gran velocidad generando que la energía se libere mediante una reacción de oxidación-reducción, en esta reacción lleva de nombre detonación, la cual propicia altas presiones y temperaturas las cuales afectan de manera directa al entorno detonado.

La energía liberada al momento de la detonación se transforma de energía química a energía mecánica, la cual empuja y fragmenta el macizo rocoso. (Bernaola, Castilla & Herrera, 2013).

### 2.2.2. Tipos de Reacción en Función de la Cinética Química

La composición de los explosivos está diseñada para que se genere una reacción química de oxidación, en la cual el principal objetivo es la rápida detonación. La mezcla de los explosivos está constituida por comburentes o combustibles.

El impulso energético aplicado a las moléculas de un explosivo genera fuerzas que, superando las de atracción entre los átomos, hace que las moléculas se disocien y a continuación se reagrupen en formas más estables. La energía liberada en esta reacción exotérmica, en forma de onda de presión y alta temperatura, provoca la sucesiva disociación de las moléculas adyacentes, de forma que la reacción se propaga a todas las partículas. Por otro lado, la velocidad con que se efectúa esta propagación puede estabilizarse hasta alcanzar un cierto valor. De esta forma, la reacción de oxidación se puede dividir en tres tipos de reacción en función de la velocidad a la que se produce. (Bernaola, Castilla & Herrera, 2013).

- Combustión.
- Deflagración.
- Detonación.

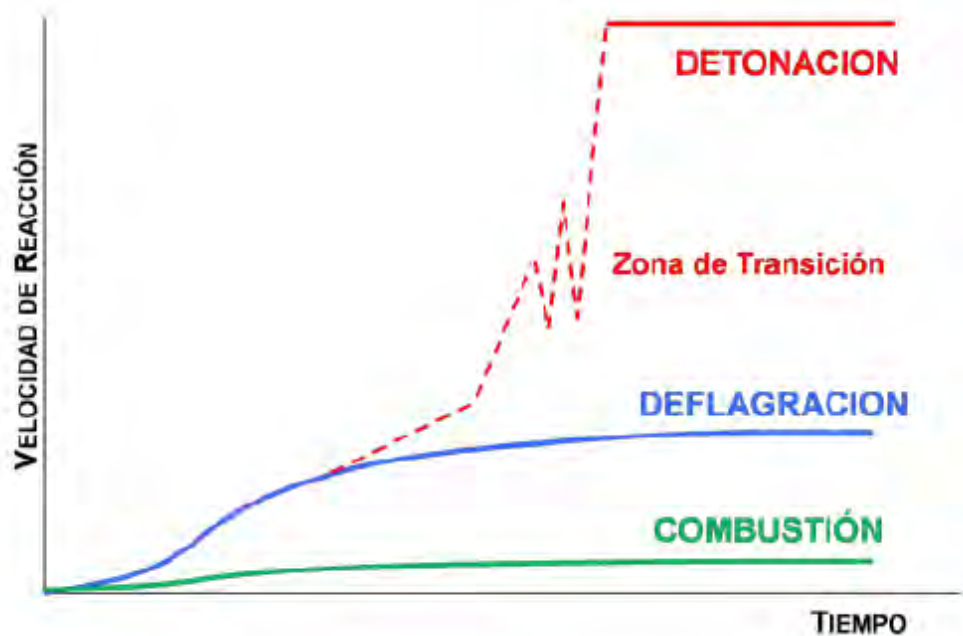


Figura 2. Tipo de reacción en función de la cinética química.  
Tomado de Bernaola, Castilla & Herrera (2013): Perforación y voladura de rocas en minería

#### 2.2.2.1. Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación en la que generalmente se desprende una gran cantidad de energía. La velocidad de reacción es menor de 1 m/s y se puede observar a simple vista la reacción en forma de llama. (Bernaola, Castilla & Herrera, 2013).

#### 2.2.2.2. Deflagración

Una deflagración es una combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación, sin explosión. Se suele asociar erróneamente con las explosiones, usándose a menudo como sinónimo. La reacción que produce una deflagración es idéntica a la de la combustión, pero la cinética de la reacción se desarrolla a una

velocidad mayor que la combustión, pero inferior a la velocidad con que se propagaría el sonido en el propio explosivo. Es, por tanto, una reacción subsónica. La onda de presión generada en una deflagración es del orden de 10<sup>3</sup> atmósferas. Este es el caso, por ejemplo, de la pólvora, que reacciona en forma de una combustión rápida de una sustancia que contiene su propio oxígeno. (Bernaola, Castilla & Herrera, 2013).

### 2.2.2.3. Detonación

Es un proceso físico - químico que se desarrolla a altas velocidades de reacción, se genera una gran cantidad de gases a altas temperaturas, lo cual genera una gran fuerza expansiva. En una detonación se conduce el calor por choque en una explosión adiabática con generación de nuevos gases. Este proceso se desarrolla en un ciclo ondulatorio que influye a toda la masa explosiva el cual tiene por nombre “onda de choque” con una velocidad de 1,500 a 7,000 m/s según el explosivo y las condiciones iniciadas. (Exsa, 2013)

### 2.2.3. Mecanismos de la Detonación

El sistema de mecanismo de la detonación está representado por una carga cilíndrica que inicia la detonación por uno de sus extremos, la cual esta ilustrada en la siguiente imagen, en la imagen se aprecia el funcionamiento de detonación.

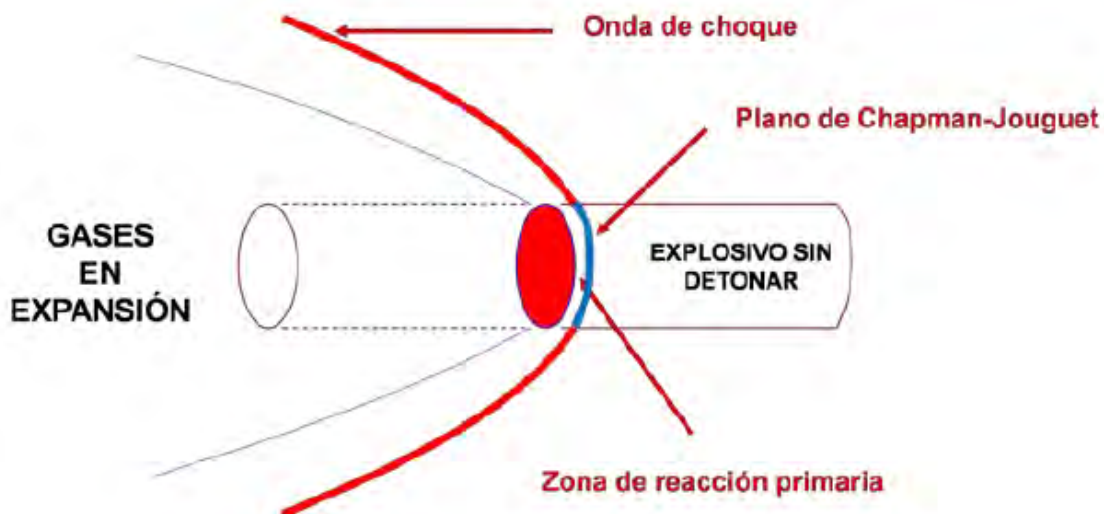


Figura 3. Zonas del proceso de Detonación

Tomado de Bernaola, Castilla & Herrera (2013): perforación y voladura de rocas en minería

- Una zona de explosivo que todavía no ha detonado.
- Una zona de reacción primaria, que se propaga a una velocidad de varios miles de metros por segundo (velocidad de detonación), en la cual tienen lugar las reacciones más rápidas y violentas, que producen un movimiento energético de las partículas próximas. Este movimiento se propaga en forma de onda de choque de muy alta presión a todo el medio circundante. Dicha presión se denomina presión de detonación.
- Una zona de reacción secundaria, donde se acumulan los productos de explosión, más lentos en su desplazamiento que la onda de choque, y se producen una serie de reacciones complementarias que se piensa dan lugar a gran parte de los gases producidos en la reacción. Se caracteriza por una presión inferior a la anterior, que se denomina presión de explosión o presión de burbuja, originada por la expansión de todos estos productos gaseosos.

- La superficie de separación entre las zonas primaria y secundaria, aunque no es exactamente plana, se conoce con el nombre de “Plano de Chapman-Jouget”.



Figura 4. Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja (Pe) de dos tipos de explosivo Tomado de Bernaola, Castilla & Herrera (2013): Perforación y voladura de rocas en minería

La presión de la onda de detonación viene dada por la fórmula:

$$P_d = d \cdot v \cdot u$$

Siendo:

- Pd: Presión de la onda (presión de detonación)
- d: densidad del medio (explosivo)
- v: velocidad de propagación (velocidad de detonación)
- u: velocidad de partícula

La determinación, mediante fotografías de Rayos X de la relación entre “v” y “u”, realizada por Cook, y otros investigadores, concluyó que “u” era aproximadamente igual a un 25% de “v”.

Así pues, teniendo en cuenta las unidades empeladas habitualmente, la fórmula anterior puede expresarse en la forma:

$$P_d = 258.10^5 \cdot v^2 \cdot d$$

Donde “Pd” estaría expresado en bares, “d” en g/cm<sup>3</sup> y “v” en m/s.

Otra fórmula similar supone la relación v/u función de la densidad “d”, resultando, para las mismas unidades expresadas anteriormente:

$$P_d = \frac{464.10^5 \cdot v^2 \cdot d}{1 + (0,8 \cdot d)}$$

En todo caso, la presión de detonación, originada por la energía cinética de las partículas, resulta ser proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad de detonación:

$$P_d \propto (v^2, d)$$

En cambio, la presión de burbuja depende solo de la densidad, de la composición química del explosivo y de que la reacción sea más o menos completa. La presión de burbuja es directamente proporcional a la densidad del explosivo y al calor liberado en la reacción. Así, una manera de incrementar las propiedades de un explosivo es incrementar el calor de explosión. Una opción es incorporar aluminio en su composición porque la oxidación de este elemento durante la explosión incrementa dicho calor de explosión, como sucede en los explosivos aluminosos.

### 2.3. Mecánica de Rotura en Voladura

### 2.3.1. Proceso de Fracturamiento

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción. (GeoBlast, 2022)

### 2.3.2. Propagación de ondas de choque y/o esfuerzo

Esta perturbación o onda de presión que se propaga a través del macizo rocoso se debe, en parte, a la rápida expansión de los gases y las elevadas presiones, generando un impacto en las paredes del pozo. La forma de la dispersión está determinada por la ubicación del punto de inicio, el VOD y la velocidad de propagación de la onda de choque en la roca. (ENAEX, 2014)

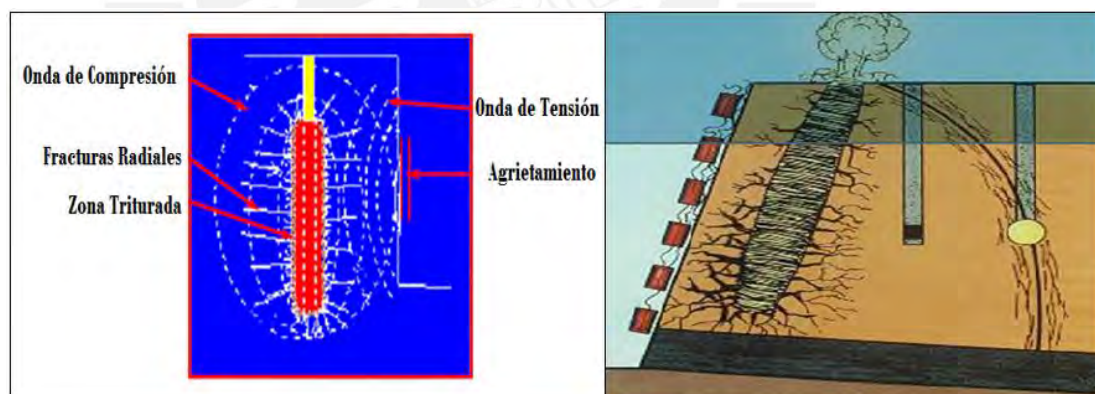


Figura 5. Propagación de la onda de compresión y tensión.  
Tomado de "Manual de Tronadura Enaex S.A", por ENAEX, 2014.

### 2.3.3. Expansión del gas a presión

Durante o después de la propagación de la onda de esfuerzo, los gases a altas temperaturas y presiones generan un campo de tensiones alrededor del pozo, lo que

puede provocar la expansión del pozo original, la apertura de grietas radiales y la infiltración en cualquier discontinuidad. (ENAEX, 2014, pág. 14)

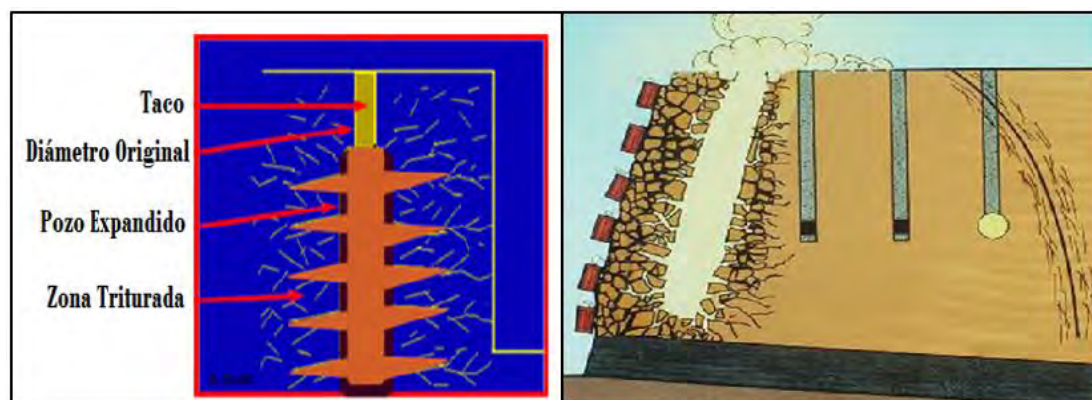


Figura 6. Expansión de gases

Tomado de *“Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”*, por CINTEX, 2006.

#### 2.3.4. Movimiento de Material

La fragmentación principal se lleva a cabo mediante ondas de compresión y tensión, por la presurización del gas o una combinación de ambos. No obstante, parte de la fragmentación adicional ocurre debido a colisiones en el aire y al impacto del material contra el suelo. En general, cuanto mayor sea la altura del banco, mayor será la fragmentación, ya que la velocidad de impacto de los fragmentos individuales. (ENAEX, 2014)

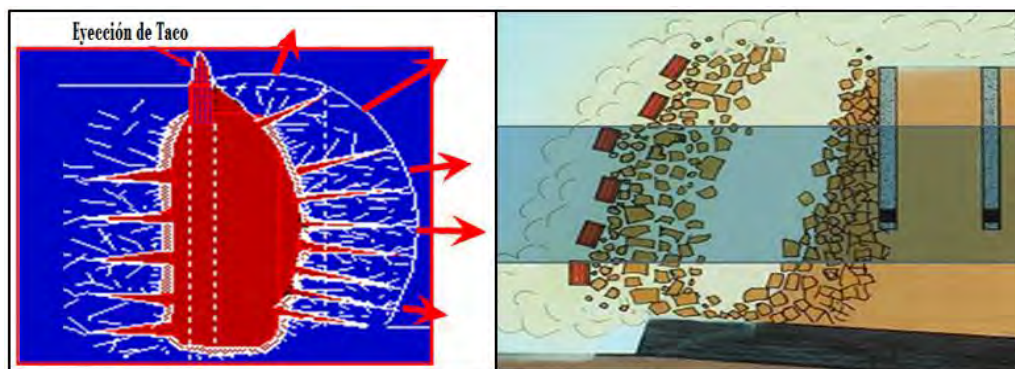


Figura 7. Movimiento del material  
Tomado de “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, por CINTEX, 2006.

## 2.4. Explosivos en Voladura

Los explosivos consisten en una mezcla de sustancias, una de naturaleza combustible y otro oxidante, que al ser activadas desencadenan una reacción exotérmica extremadamente rápida, produciendo gases a alta temperatura que ocupan un volumen significativamente mayor. (EXSA, 2013)

El volumen del explosivo durante de la detonación aumenta en 1000 a 10000 veces el volumen inicial. Los explosivos utilizados en la actividad minera son los siguientes:

Combustibles	Oxidantes
Aceites (Diésel)	Nitrato de Amonio
Carbón	Nitrato de Sodio
Aluminio	Nitrato de calcio
T.N.T.	

### 2.4.1. Propiedades de los Explosivos

Las características que tienen los explosivos son importantes para entender la

utilidad potencias de un explosivo específico para una utilidad es especial.

- A.** Velocidad de Detonación. Es una medida cuando la reacción de la detonación procede por la columna del explosivo. Típicamente, el VOD variará entre 3000 m/ s para ANFO en pozos de tronadura de diámetros pequeños y 6000 m/ s para emulsión en pozos de tronadura de diámetros más grandes.
- B.** Densidad. Es una unidad importante en el diseño de barrenos, mide los kilogramos de explosivo por unidad de volumen en g/cc.
- C.** Fuerza o Potencia. Se considera como la capacidad de trabajo útil de un explosivo.
- D.** Inflamabilidad. Se define como la facilidad con la que un explosivo puede iniciarse por medio de calor.
- E.** Resistencia al agua. La capacidad o resistencia del explosivo que puede soportar en horas, cuando se encuentra cargado en agua y aun sin ser detonado.
- F.** Presión de detonación. Es considerada como la presión en la zona de choque delante de la zona de reacción.
- G.** Diámetro Crítico. Es el diámetro mínimo al cual un explosivo puede ser detonado.
- H.** Sensibilidad. Es la propiedad de un explosivo para ser detonado por iniciadores convencionales, ya sea cordón detonante, fulminantes, iniciadores no eléctricos.
- I.** Sensibilidad. Es la facilidad de iniciación de los explosivos por la mínima energía o potencia que se necesita.

- J.** Emanaciones. Se denomina emanaciones a los gases tóxicos, que se origina de la detonación de explosivos, tales como, bióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua.

#### 2.4.2. Los Procesos de Reacción en los Explosivos

- A.** Combustión. Puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento.
- B.** Deflagración. Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas, a una velocidad baja, que generalmente no supera los 1 000 m/s.
- C.** Detonación. Es un proceso fisicoquímico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva.

Durante la detonación, las primeras moléculas gaseificadas se mueven a tal velocidad que no transfieren su calor por conductividad a la parte inalterada de la carga, sino que lo transmiten mediante impactos, lo que deforma la carga y provoca la explosión, generando nuevos gases. (EXSA, 2013)

El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y que se denomina “onda de choque”, la que se desplaza a velocidades entre 1 500 a 7 000 m/s según la composición del explosivo y sus condiciones de iniciación.

La energía contenida en un explosivo se encuentra almacenada como energía potencial, latente o estática. Al liberarse mediante el proceso de detonación, esta

energía se convierte en energía cinética o mecánica. (EXSA, 2013).

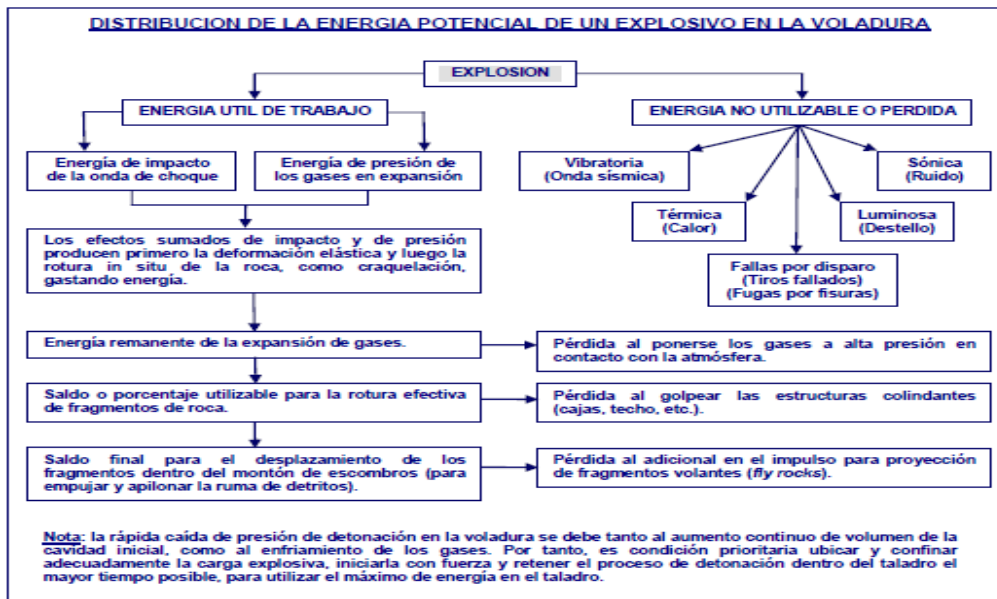


Figura 8. Distribución de la energía potencia de un explosivo en voladura.  
Tomado de “Manual Práctico de Voladura”, por EXSA Soluciones S.A., 2013.

La Tronadura induce Fracturamiento

Vibración = Esfuerzo

Esfuerzo induce → Fracturamiento

Dentro del disparo → Fragmentación

Fuera del disparo → Daño (Vibración)

### 2.4.3. Tipo de explosivos

En la actualidad los explosivos son clasificados en tres tipos: Químicos, Mecánicos y Nucleares, donde en la Actividad Minera los explosivos que se utilizan son químicos.

Los explosivos químicos son sustancias, ya sean compuestos o mezclas, que pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso y que, a través de reacciones químicas de óxido-reducción, se transforman en un lapso extremadamente corto, en el orden de

microsegundos, en productos gaseosos y condensados. Este proceso hace que su volumen inicial se convierta en una masa gaseosa que alcance temperaturas y presiones extremadamente altas. (EXSA, 2013).

Además, se clasifican en:

**Explosivos Primarios:** Se consideran sensibles a la detonación, son los siguientes:

- Detonadores
- Pentolitas
- TNT
- Cordón Detonante
- HMX, Azida de Plomo
- Pentrita

**Explosivos Secundarios:** Requieren de un reforzador o iniciador para detonar.

- Anfos
- Anfos Pesados
- Emulsiones
- Hidrogeles
- Emulsiones gasificadas

## **2.5. Accesorios de Voladura**

Para el desarrollo de una voladura controlada es necesario utilizar el medio correcto de iniciación, los cuales pueden ser: no eléctrico y electrónico. Según el tipo de voladura efectuar se tomará la decisión de cual iniciador utilizar. La etapa de

detonación es el procedimiento final de la voladura; en el cual se realiza el primado, amarre, diseño de salida y por último la detonación. La voladura será medida por 3 factores: seguridad, fragmentación y estabilidad de taludes.

#### 2.5.1.1. Clasificación de los sistemas de iniciación.

- A. Sistemas convencionales. Se activan por una chispa de ignición a través de la guía. El sistema se basa en:
- a.** Fulminante común N° 8. Es una cápsula de aluminio, que contiene un explosivo primario (Azida de plomo) muy sensible a la chispa de la mecha de seguridad. Es usado para iniciar a las dinamitas, emulsiones y cordón detonante.
  - b.** Mecha de seguridad. Sirve para transmitir el fuego al fulminante a una velocidad continua y uniforme, la cual tiene varias coberturas que envuelven al núcleo de pólvora, asegurando una excelente impermeabilidad.
  - c.** Conector para mecha rápida. Está compuesto de un casquillo de aluminio, en su interior lleva una masa pirotécnica, este recibe el fuego de la mecha rápida para encender a la mecha de seguridad.
  - d.** Mecha rápida. Está formado por masa pirotécnica y dos alambres, cubiertos por un material plástico.

- B. Sistemas eléctricos. Se activan por un estímulo eléctrico (explosor). Este sistema es capaz de convertir un impulso eléctrico en una detonación en un lapso de tiempo determinado.
- C. Sistemas no eléctricos. Son estimulados por calor o una onda de choque activada a través de un tubo de transmisión. Se divide en:
- a. No silenciosos. Este sistema se basa en:
    - Cordón detonante. Tiene un núcleo de pentrita, recubierto con fibras sintéticas y forrado con material plástico, sirve para conectar las líneas descendentes de cada taladro.
    - Fulminante no eléctrico de retardo. Es un accesorio eficaz para usos en voladuras, consta de un fulminante N° 12 y un elemento de retardo en fondo, y un conector J-Hook que conecta al cordón detonante.
    - Retardos Bidireccionales. Se usan en superficie, con dos retardos (# 8) capaces de iniciar al cordón detonante.
    - Booster. Están formulados con pentrita y nitroglicerina para asegurar su desempeño cuando son usados con detonadores comerciales.
  - b. Silenciosos. La diferencia con el no silencioso es cuando el cordón detonante es reemplazado por conectores unidireccionales. Se basa en:
    - Retardo no eléctrico silencioso unidireccional. Está formado por un fulminante con retardo en el fondo, conectado por tubo de

choque a la superficie, donde lleva un fulminante simple de baja potencia #4 en el que también se instala el conector y el elemento de retardo requerido para la secuencia de salida.

D. Sistemas electrónicos. Tienen un chip interno, que es programado y activado por equipos especiales. Está integrado por los siguientes componentes:

- a. Software de Diseño. Simulación de la voladura, además descarga la programación al Logger.
- b. Detonador programable con Chip.
- c. Logger. Identifica los ID de cada detonador y registra los periodos de retardo de los detonadores.
- d. Blaster. Determina la iniciación de los detonadores con alta seguridad.

## 2.6. Diseño de Voladura

### 2.6.1. Variables Físicas Controlables

El diseño de una voladura debe de comprender todos los conceptos fundamentales de una voladura ideal. Las variables que intervienen en una voladura y sobre las cuales podemos tener control son:

- Diámetro del barreno
- Profundidad del barreno
- Sub- barrenación
- Tamaño del taco
- Material del taco
- Espaciamiento entre barrenos

- Numero de barrenos por voladura
- Dirección del movimiento de la roca

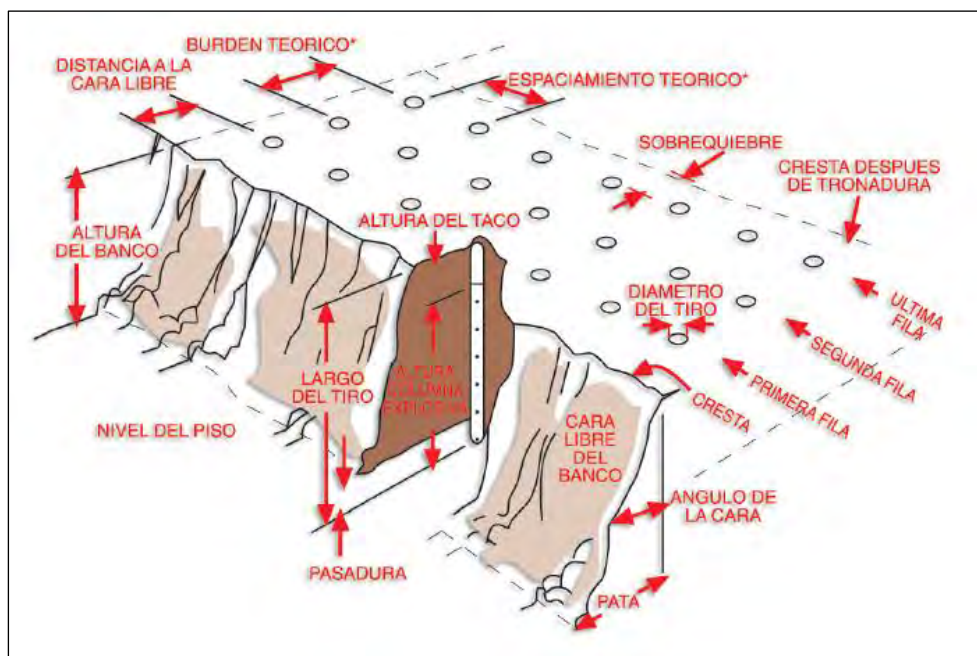


Figura 9. Nomenclatura del Diseño de Voladura.  
Tomado de “Manual de Tronadura”, por ENAEX, 2014.

Además de estas dimensiones físicas, también podemos controlar el tiempo de voladura; para esto el encargado de la voladura puede:

- Seleccionar retardos para lograr una voladura geométrica
- Seleccionar el sistema de iniciación para lograr secuencia apropiada de la salida de barrenos
- Diseñar un patrón que controle las voladuras
- Diseñar los tiempos adecuados para lograr la máxima fragmentación, mínimo golpe de aire, reducir el fly rock y tener un control sobre la pared trasera.

Por último, para tener mejores resultados debe considerar que el proveedor de explosivos ofrezca, un sistema de iniciación seguro, confiable y un explosivo que se

adecue a las condiciones ambientales que soluciones problemas de agua, libere energía, además, de decidir si se compra envasado o en granel.

## 2.6.2. Variables no Controlables

Las variables sobre las cuales podemos tener poco o ningún control son:

- Geología local
- Características de la roca
- Disposiciones legales y sus reglamentos
- Cercanías de las estructuras a proteger

## 2.7. Cálculo y Distribución de la Carga Explosiva

### 2.7.1. Columna Explosiva o Longitud de Carga (LC)

Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes largo del taladro, según las circunstancias o condiciones de la roca. Usualmente comprende de 1/2 a 2/3 de la longitud total y puede ser continua o segmentada. En minera Cerro Negro se determina la longitud de carga basada en la resistencia a la compresión de la roca, la experiencia indica que a mayor resistencia se necesita mayor energía, esto indica mayor longitud de Carga.

$$LC = HB + SP - T$$

Donde:

- LC: Longitud de Carga (m)
- HB: Altura de Banco (m)
- SP: Sobre perforación (m)

➤ T: Taco (m)

En general, para rocas frágiles o poco competentes se utiliza una columna continua compuesta por el mismo tipo de explosivo. En cambio, para rocas duras, tenaces y competentes, la columna se divide en dos secciones: la carga de fondo (CF) y la carga de columna (CC) (EXSA, 2013). En Cerro Negro se considera Carga Continua para taladros de producción y para taladros buffer carga con cámara de aire.

Para Carga Continua

$$LC = CC$$

Para Carga Segmentada

$$LC = CC + CF$$

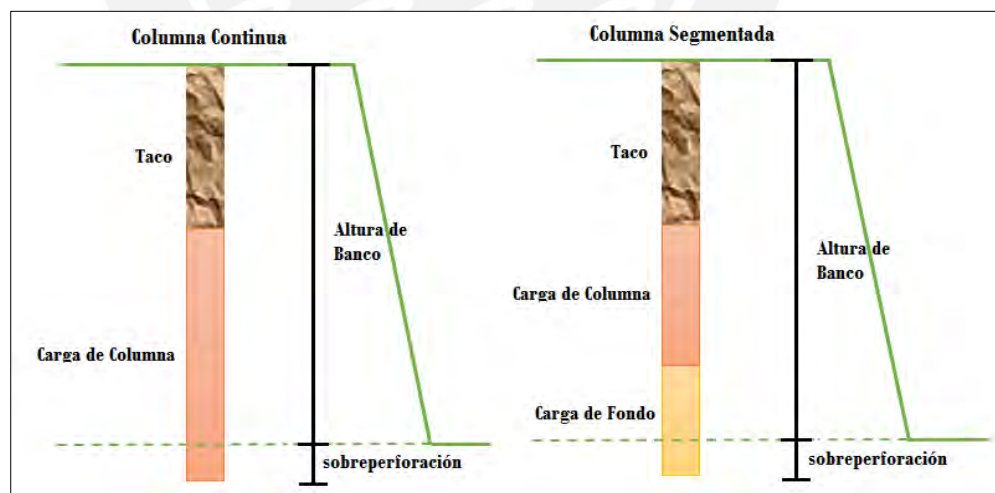


Figura 10. Esquema de carga continua y segmentada.  
Tomado de "Inicio de Operaciones en Mina Cerro Corona", por Gonzales, 2011.

### 2.7.2. Carga Lineal (CL)

Se define como la cantidad de explosivo a utilizar por cada metro de columna de carga. Se expresa en kg/m o lb/yd.

Aunque es una unidad referencial útil para estimar la carga total de un disparo, no es el parámetro más adecuado por sí solo, ya que la forma en que se distribuye el explosivo en la masa rocosa a través de los taladros tiene un impacto significativo en los efectos de fragmentación y desplazamiento, y, por ende, en los resultados de la voladura. (EXSA, 2013)

$$CL = 0.5067 * (\varnothing)^2 * \rho_e$$

Donde:

- **CL**: Carga Lineal (Kg / m)
- $\varnothing$ : Diámetro del bit (pulg)
- $\rho_e$ : Densidad del explosivo (gr / cc)

### 2.7.3. Cantidad de Explosivos ( $W_e$ )

Se define como la Carga lineal o específica por longitud de columna explosiva; donde se considera, columna continua o la suma de las cargas segmentadas en Kilogramos.

$$W_e = CL * LC$$

Donde:

- $W_e$ : Cantidad de explosivo por Taladro (Kg)
- CL: Carga Lineal (Kg/m)

- LC: Longitud de Carga (m)

Además, se considera la cantidad de explosivo por Proyecto.

$$We\ Total = We * \#\ Taladros$$

Donde:

- We Total: Cantidad de explosivo por Proyecto (kg)
- We: Cantidad de explosivo por Taladro (kg)

#### 2.7.4. Carga Operante (COp)

Se define como la cantidad de explosivo de un taladro por el número de talados detonados en un solo tiempo en Kg.

$$COp = We * NT$$

Donde:

- COp: Carga Operante (kg)
- We: Cantidad explosivo por Taladro (kg)

#### 2.7.5. Volumen de Roca (Vr)

Es la cantidad de roca que se obtendrá con la voladura. Es calculada utilizando el Burden, Espaciamiento, altura de banco y el número de taladros en el proyecto.

$$Vr = B * E * HB$$

Donde:

- Vr: Volumen de roca por Taladro ( $m^3$ )
- B: Burden (m)
- E: Espaciamiento (m)
- HB: Altura de Banco (m)

Además, se considera el volumen de rocas por Proyecto.

$$V_r \text{ Total} = V_r * \text{Taladros}$$

Donde:

- Vr Total: Volumen de roca por Proyecto ( $m^3$ )
- Vr: Volumen de roca por Taladro ( $m^3$ )

#### 2.7.6. Tonelaje Roto (Tn)

El tonelaje roto es igual al volumen del material roto multiplicado por la densidad de dicho material.

$$T_n = V_r * \rho_r$$

Donde:

- Tn: Toneladas rotas (Toneladas)
- Vr: Volumen de roca ( $m^3$ )
- $\rho_r$  : Densidad de la roca ( $Tn/m^3$ )

#### 2.7.7. Factor de Carga (FC)

Indica la cantidad total de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca. El factor de Carga (FC) se expresa en Kg/m<sup>3</sup>.

$$FC = \frac{We}{V} \text{ Kg/m}^3$$

Donde:

- FC: Factor de Carga ( $\text{Kg/m}^3$ )
- We: Cantidad de explosivo por taladro (Kg)
- Vr: Volumen de roca por taladro ( $\text{m}^3$ )

#### 2.7.8. Secuencia de Detonación

“Los tiempos de iniciación para la detonación entre taladros o filas en una malla con taladros cargados, influye directamente en la fragmentación, patas, disposición del material y las vibraciones”. (ENAEEX, 2014, pág. 94)

La iniciación debe ser completa antes que detone el primer tiro, además la secuencia de detonación debe ser tal que siempre el tiro que detone encuentre una cara libre, independientemente de la corrida a la cual pertenezca. Además, se consideran tres aspectos:

- Tiempos cortos causan apilamiento alto cerca de la siguiente cara de banco.
- Tiempos cortos causan pateo, pueden crear más violencia en el disparo
- Tiempos Largos decremento la vibración, disminuye el pateo y esparce el material.

#### Tipos de Secuencia de iniciación

Para determinar la secuencia de iniciación en un proyecto de voladura, se maneja con mucho criterio. Como puntos importantes esta la dirección del desplazamiento del

material, y las estructuras a proteger. A continuación, se consideran algunas secuencias:

a. Configuración en “V” o Cuña

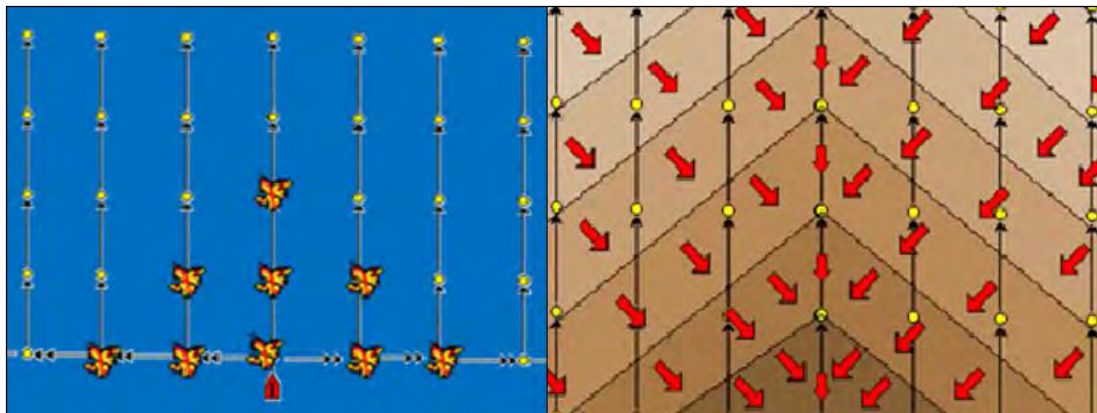


Figura 11. Simulación de iniciación en Cuña y movimiento del material.  
*“Se elaboró la siguiente figura”*

b. Configuración en Echelon o Diagonal

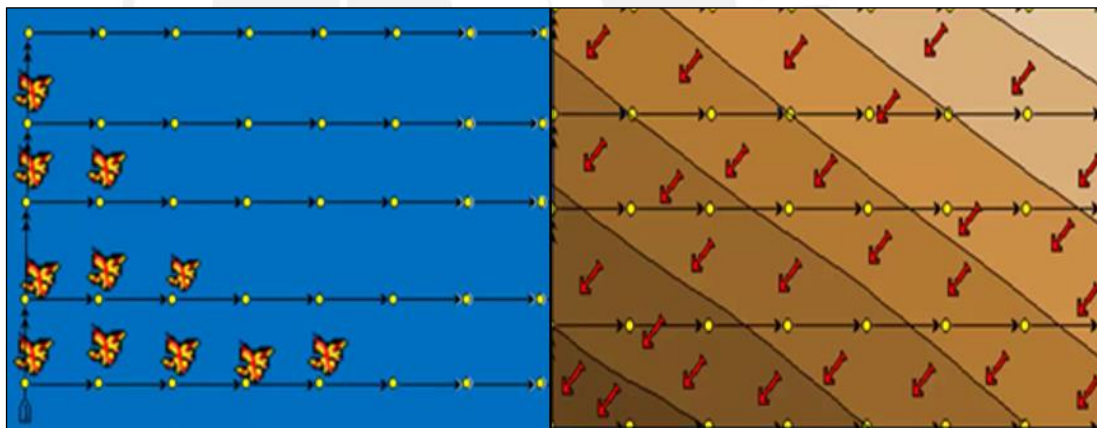


Figura 12. Simulación de iniciación en Echelon y movimiento del material.  
*“Se elaboró la siguiente figura”*

c. Configuración en Diamante o Central

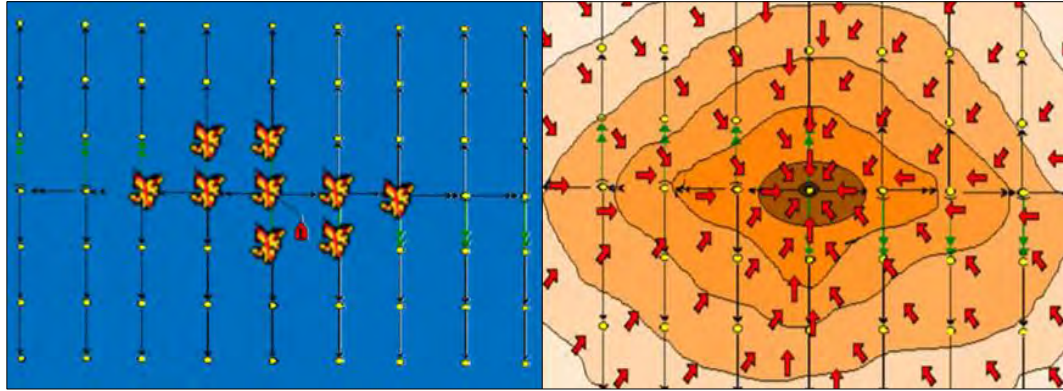


Figura 13. Simulación de iniciación en Diamante y movimiento del material.  
*“Se elaboró la siguiente figura”*

## 2.8. Ondas Sísmicas

Es un movimiento ondulatorio tridimensional, puede considerarse también como un transporte de energía y de cantidad de movimiento de un punto del espacio a otro sin transporte de materia, este depende de las propiedades elásticas del terreno que propaga la onda. Estas ondas sísmicas provocan movimientos de partículas en la roca en diversas direcciones, con intensidades que dependerán de la energía del explosivo y de la geometría involucrada. (GeoBlast, 2022)

### 2.8.1. Vibración

Se entiende por vibraciones un fenómeno de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. También se define que “Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión”. (CINTEX, 2006, pág. 8)

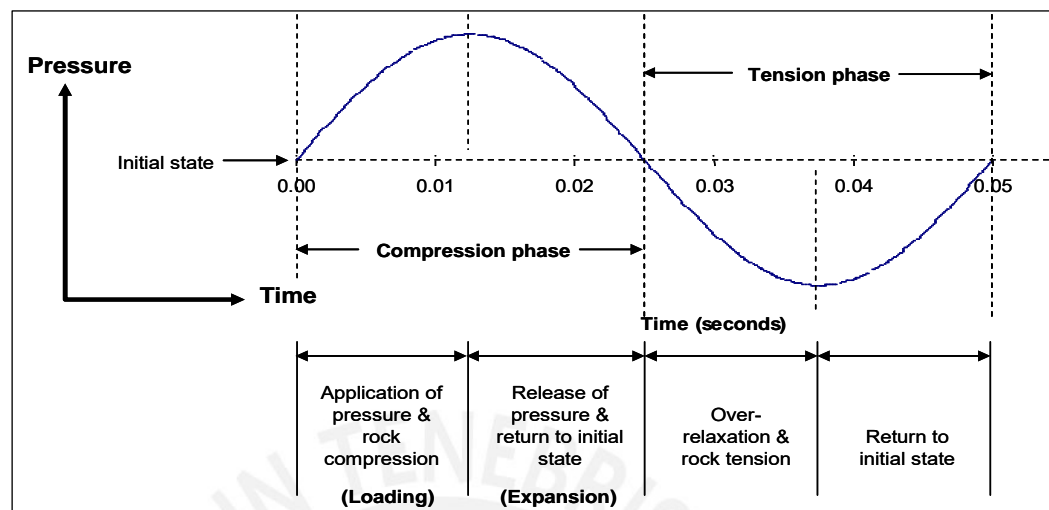


Figura 14. Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión  
Tomado del “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, por CINTEX, 2006.

Según Quispe y Reyes (2023), en el caso de las vibraciones generadas en voladuras, se trata de unas ondas que se generan en el interior del taladro, como consecuencia de la detonación del explosivo, y que se propagarán por el terreno circundante o puede también propagarse por el aire (en el caso de voladuras a cielo abierto). Las vibraciones durante la voladura se generan en el frente de detonación del explosivo, en el área donde el explosivo sólido se transforma en gas, y donde la densidad del gas sigue siendo igual a la del explosivo sólido. (CINTEX, 2006)

La vibración inducida en el macizo rocoso por la voladura de rocas se puede clasificar en dos categorías: vibraciones en campo lejano y vibraciones en campo cercano. El daño en el campo lejano se define como aquel capaz de causar la apertura de fracturas preexistentes, fuera de la zona donde el fracturamiento puede ser inducido, a distancias que van desde decenas hasta cientos de metros de la tronadura.

## 2.8.2. Propiedades Básicas de las Ondas

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

- A. Frecuencia – La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión.

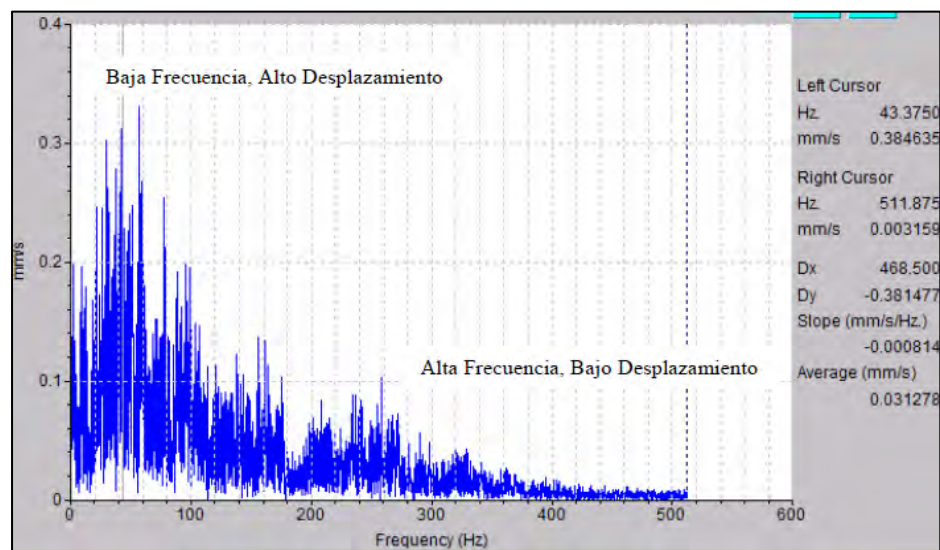


Figura 15. Nivel de Frecuencia.

Tomado de “Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones”, por Contreras, 2009.

- B. Amplitud – Máximo desplazamiento desde la posición de reposo de un punto del material de terreno. La amplitud de la vibración, medida como la velocidad máxima de las partículas, es ampliamente reconocida como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso. Por lo tanto, se considera el mejor parámetro para evaluar el potencial de daño y el posible efecto de fragmentación en la roca. (CINTEX, 2006)

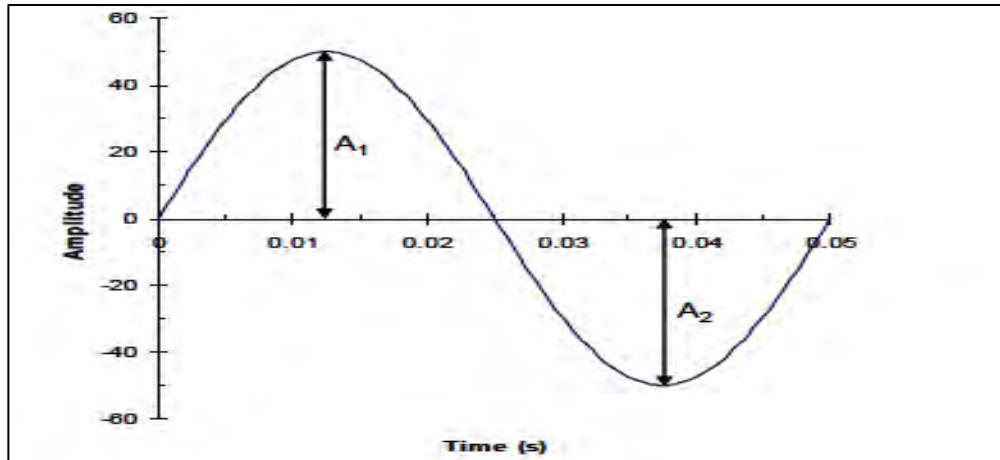


Figura 16. Amplitudes de onda.

Tomado de *"Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento"*, por CINTEX, 2006.

- C. Duración – El tiempo total que el medio está expuesto a la vibración. La duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la voladura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último pozo). Por lo general, la duración de la vibración es de 200 a 300 ms más larga que la duración de la voladura, debido al tiempo necesario para que la vibración se propague desde el último pozo detonado. (CINTEX, 2006)

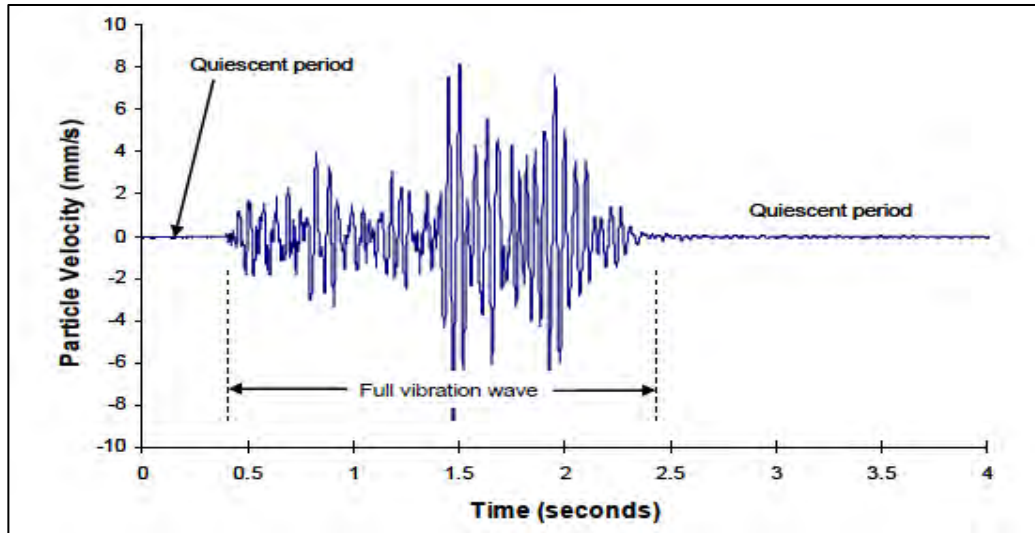


Figura 17. Onda completa de vibración.

Tomado de “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, por CINTEX, 2006.

- D. Longitud de Onda – Distancia que viaja la onda en un ciclo completo de compresión y tensión. La longitud de onda es un factor importante para considerar durante el modelamiento, y durante discusiones del potencial daño que pueden causar las ondas de vibraciones sobre las estructuras de la roca.

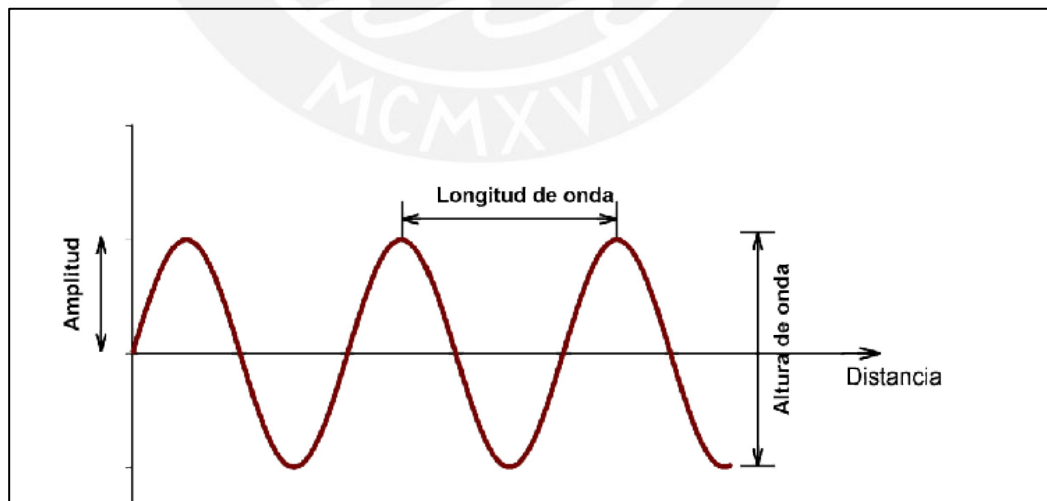


Figura 18. Longitud de Onda.

Tomado de “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, por CINTEX, 2006.

- E. Velocidad de propagación – La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. “Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal”. (CINTEX, 2006, pág. 16).

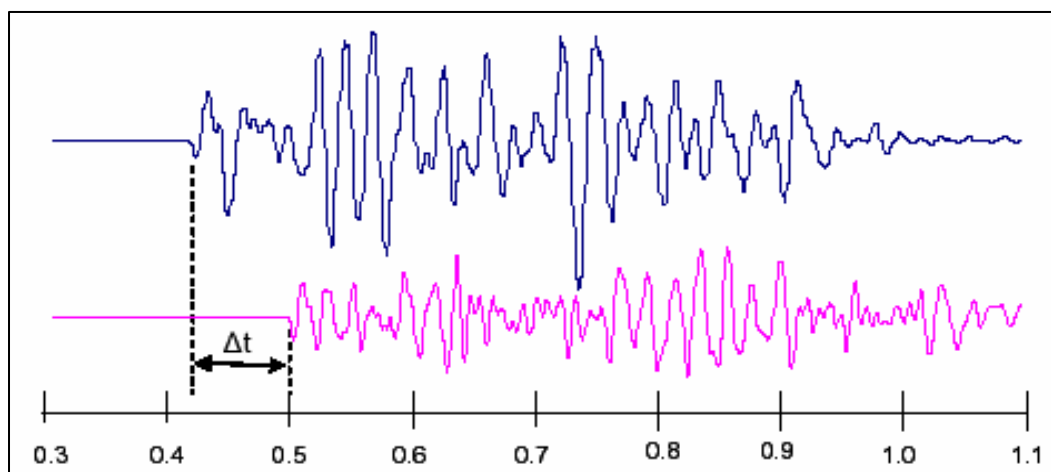


Figura 19. Velocidad de Propagación en el Instante.  
Tomado de “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, por CINTEX, 2006.

### 2.8.3. Tipos de Ondas

#### A. Ondas Internas

##### a. Ondas de compresión (P)

Es la onda más rápida que viaja a una velocidad de entre 1800 a 6500 metros por segundo, tienen alta frecuencia, una longitud de onda corta y son longitudinales. La Onda “P” generalmente viaja a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.

b. Onda Transversales (S)

Son ondas en las cuales presentan un desplazamiento transversal, alcanzan aproximadamente  $3/5$  de la velocidad de la onda P y presenta menores frecuencias y mayores desplazamientos.

B. Ondas Superficiales

a. Onda Rayleigh (R o superficial)

Las ondas más lentas y las ultimas en llegar, son las ondas de “superficie” (generalmente conocidas como “Rayleigh” u ondas “R” que generalmente tienen la menor frecuencia y el mayor desplazamiento.

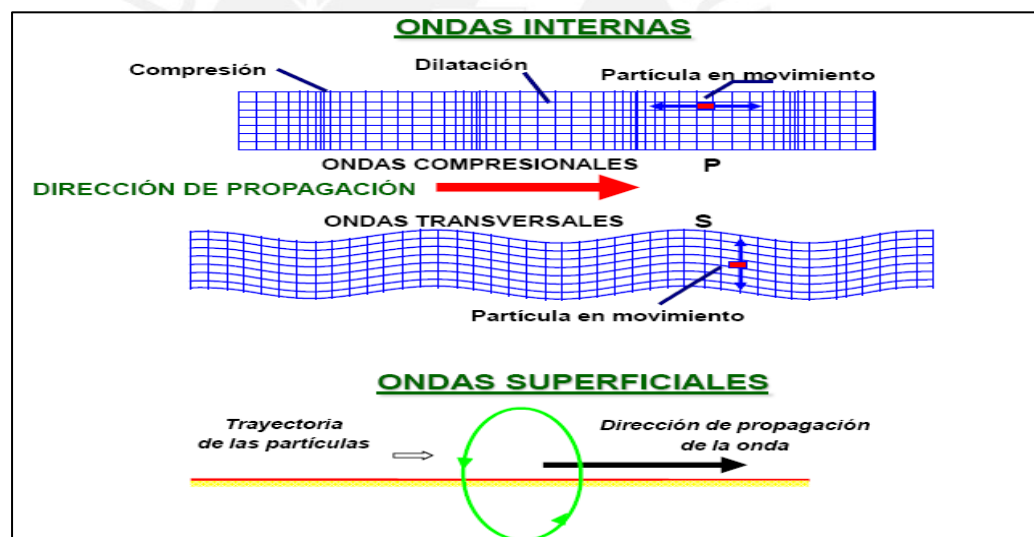


Figura 20. Ondas vibratorias (Ondas Internas y Superficiales).

Tomado de “1° seminario geoblast abril 2022, modelamiento, monitoreo y control de vibraciones para minimizar los daños inducidos por voladuras”, por GeobBlast, 2022.

2.8.4. Unidad de medida de la Vibración

A. Velocidad Pico de la Partícula (PPV)

Sostiene que: Un aspecto clave en el proceso de evaluación y optimización de las operaciones de voladura es la capacidad de predecir, mediante un modelo, las consecuencias y beneficios de introducir diferentes cambios en los parámetros más

relevantes, sin necesidad de realizarlo a escala real. Existen diversos enfoques asociados al modelado de vibraciones, cuyo objetivo principal es predecir los niveles de vibración en un punto específico, según el diseño de la voladura. (Giraldo, 2010)

Modelo general

$$PPV = K * De^{\alpha}$$

Donde:

- PPV: Velocidad Pico Partícula (mm/s)
- De: Distancia Escalar
- K: Factor de Velocidad
- $\alpha$ : Factor de Atenuación

La Velocidad Pico de la Partícula indica la velocidad máxima a la cual viajan las partículas resultantes desde las vibraciones del suelo de un evento. El MiniMate Plus calcula la PPV para cada geófono.

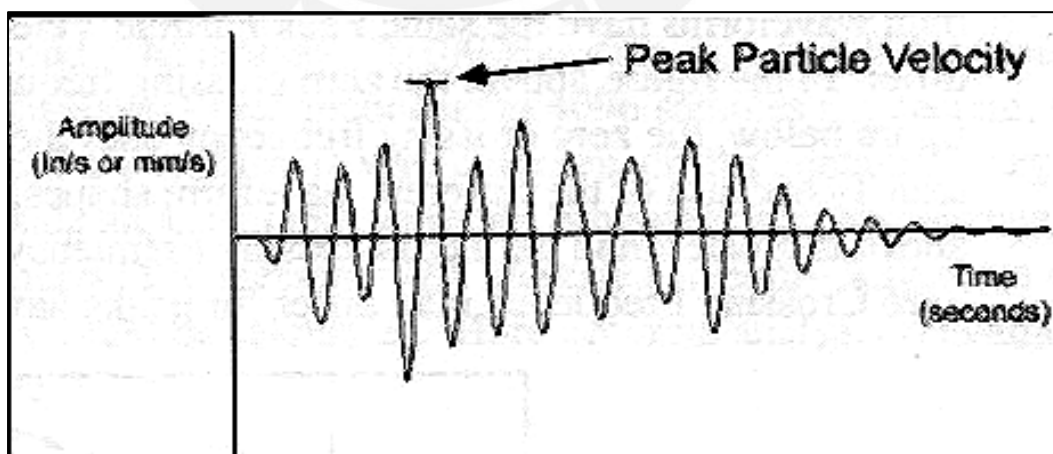


Figura 21. Calculando la Velocidad Peak de la Partícula.  
Tomado de "Manual del operador Minemate Plus", por Minemate, 2011.

### 2.8.5. Modelos de Vibraciones

#### A. Modelo de Campo Cercano

El modelo de campo cercano, se considera a las vibraciones que afecta directamente a las estructuras alrededor del taladro, principalmente para medir el nivel de vibraciones que afecta la estabilidad del tajo.

El análisis de los registros de vibraciones permite determinar la velocidad de las partículas generadas por cada carga o grupo de cargas en la voladura. A partir de esto, se obtuvieron datos sobre la velocidad de las partículas, la distancia y la carga del taladro, a los cuales posteriormente se ajustó la ecuación del modelo de Holmberg y Persson. (Diaz y Marín, 2019)

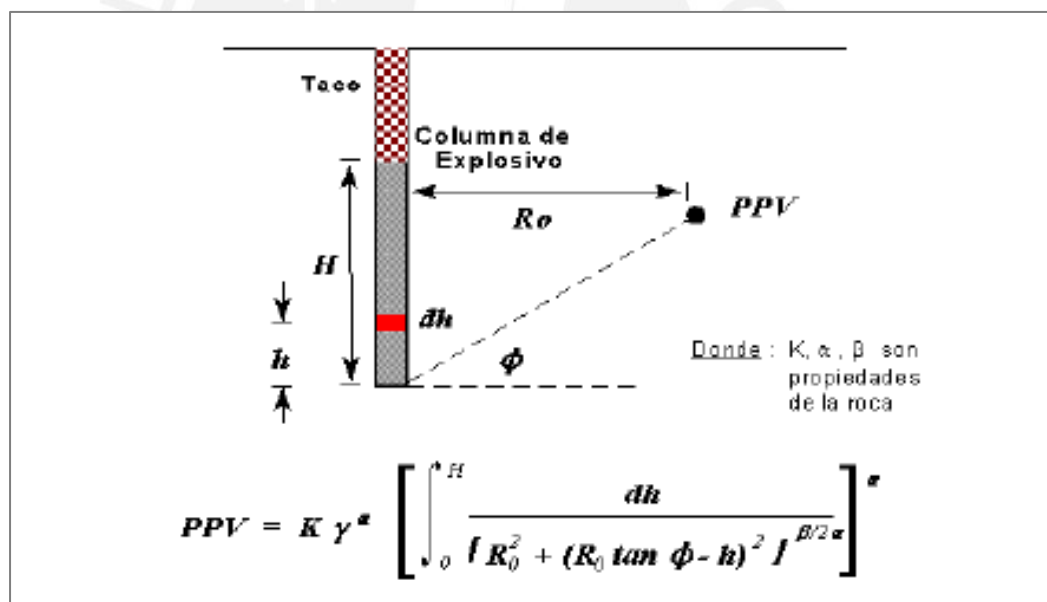


Figura 22. Modelo de campo cercano de Holmberg and Persson.

Tomado de "Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento", por CINTEX, 2006.

#### B. Modelo de Campo Lejano

El modelo de campo lejano, se considera a las vibraciones que afecta

directamente a las estructuras fuera del tajo, como viviendas cercanas al proyecto, principalmente para medir el nivel de vibraciones para que no afecten la estabilidad de las estructuras.

Este modelo de vibraciones nos permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones en campo. En forma práctica se aplicará para distancias mayores de cinco veces la longitud de carga.

De estas mediciones se deben obtener principalmente tres antecedentes, a saber:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo.
- La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones.
- La distancia de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

“Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto es el de DEVINE puesto que al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga”. (CINTEX, 2006, pág. 71)

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^\alpha$$

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
- $K$ : Factor controlado principalmente por el Explosivo, (Densidad del explosivo, VOD, cantidad de carga y el número de taladros, etc.)
- $\alpha$ : Factor de atenuación de la roca, (Características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda.)

Para determinar los valores de  $\alpha$  y  $K$ , se obtiene a partir de una ecuación lineal o potencial, representada en un gráfico de dispersión. Donde el eje de las X estará representado por el logaritmo de la distancia escalada y el eje de las Y por el logaritmo de los valores de PPV medidos en campo.

#### 2.8.6. Monitoreo de Eventos

El monitoreo de eventos mide las vibraciones del suelo y la presión del aire. En el monitoreo de vibraciones obtenemos como resultado el nivel del PPV en tres direcciones: transversales, verticales, y longitudinales.

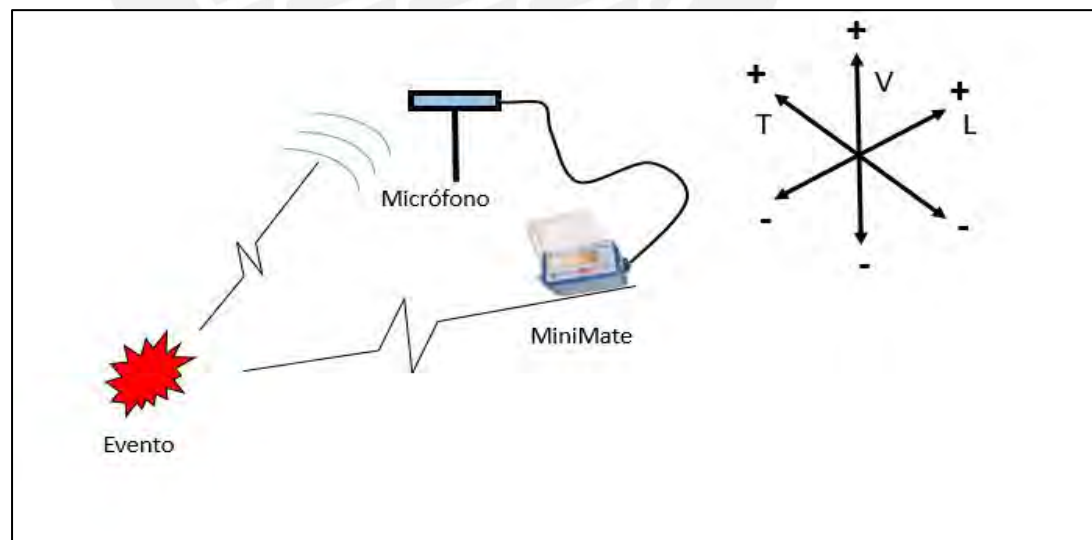


Figura 23. Monitoreo de Evento.  
Elaboración propia.

- V: Onda Vertical
- T: Onda Transversal
- L: Onda Longitudinal

Las flechas indican el sentido de la ubicación del transductor al evento, el signo positivo indica que apunta en dirección del evento y negativo en dirección opuesta al evento. A continuación, se representa de forma gráfica la onda en las tres dimensiones.

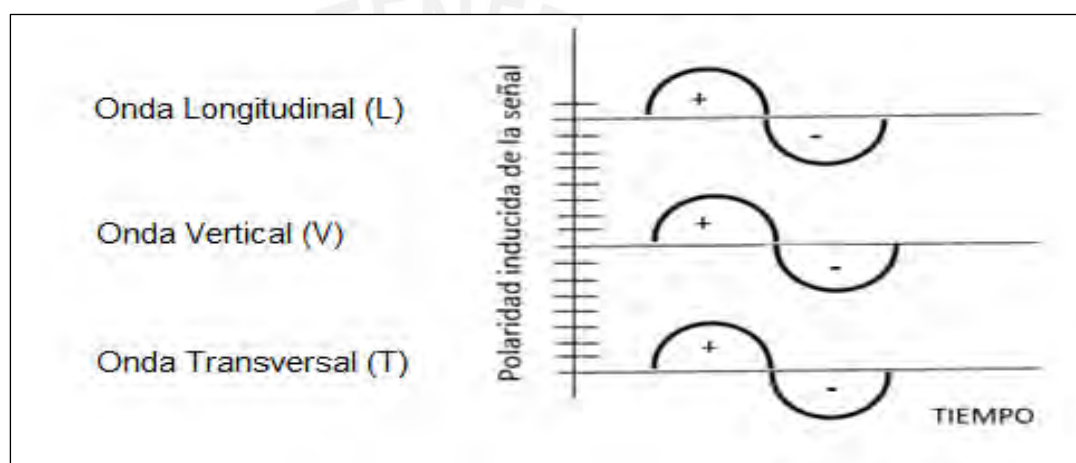


Figura 24. Monitoreo de las vibraciones en las tres dimensiones.  
Tomado de "Manual del operador Minemate Plus", por Minemate, 2011.

### 2.8.7. Equipo Para el Monitoreo de Vibraciones

Para realizar el monitoreo en campo y realizar la toma de datos, que se utilizan en el cálculo del modelo predictivo, se realizó con equipos especializados los cuales constan de los siguientes componentes.

#### A. Transductores (Geófonos)

Gran parte de las capacidades y beneficios de la técnica de monitoreo de vibraciones dependen de la capacidad para recopilar datos de vibración de alta calidad. La calidad de estos datos está directamente relacionada con el tipo de

transductor utilizado, así como con la técnica empleada para su instalación y orientación. (GeoBlast, 2022).

Existe una gran variedad de estos equipos disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas. Su función es convertir el movimiento físico generado durante el paso de la vibración, en una señal de voltaje equivalente, según sea su sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas consideraciones prácticas, como son:

- Precisión: gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibración, es importante entonces que ellos sean confiables en el largo plazo.



Figura 25. Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones.  
Elaboración propia.

## B. Micrófono

Su función principal es captar la onda sonora u onda aérea, que se produce producto de la voladura, se mide en decibeles.



Figura 26. Micrófono, equipo de monitoreo Instantel.  
Elaboración propia.

### C. Sistema de cables

Son aquellos que llevan la señal captada desde el geófono al equipo de adquisición.



Figura 27. Sistema de Cables, equipo de monitoreo Instantel.  
Elaboración propia.

#### D. Equipo de adquisición

Los transductores son comúnmente instalados en un arreglo triaxial, y la señal de cada uno es recolectada separadamente. En algunos casos, se requieren múltiples canales, cada uno de los cuales puede ser amplificado o atenuado. Después de esta amplificación (o atenuación), las señales de salidas de los transductores son grabadas como una señal análoga o convertidas en señal digital y grabadas.



Figura 28. Equipo de Adquisición Instantel.  
Elaboración propia.

#### E. Computador

La información de vibraciones es comúnmente realizada en un computador.

El análisis de los datos requiere de un conjunto Computador y Software con capacidades para un manejo integral de la forma de onda, y donde las principales tareas que 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

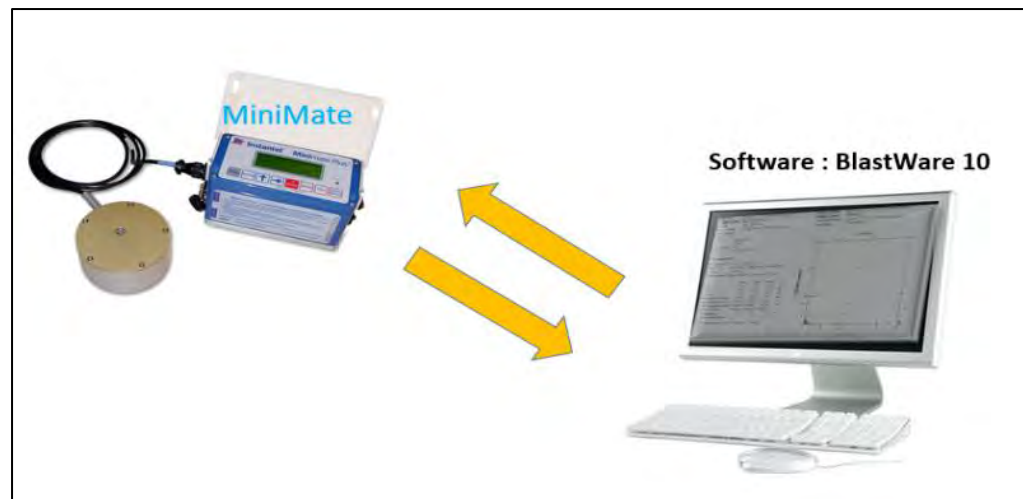


Figura 29. Instrumentación para monitorear.  
Elaboración propia.

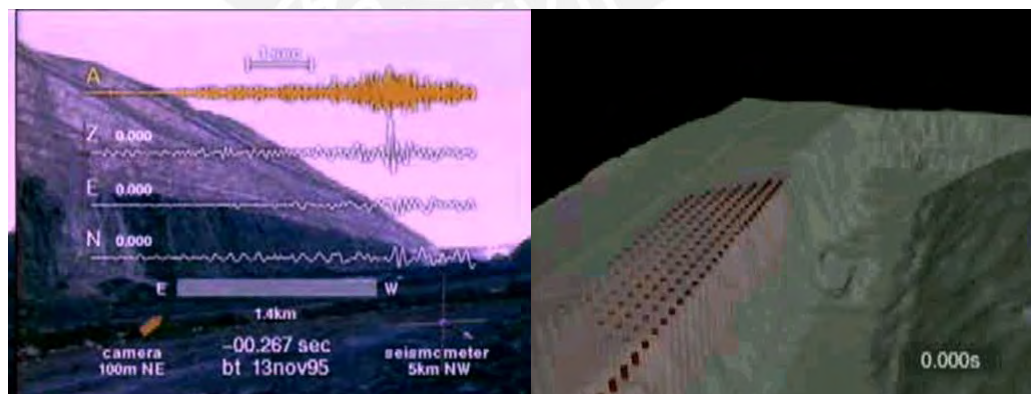


Figura 30. Monitoreo de Voladura en tiempo real.  
Elaboración propia.

### 2.8.8. Interpretación de Vibraciones

La señal de vibraciones producida por una Voladura consiste en un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo.

Es posible determinar y calcular los siguientes:

- Tiempo real de detonación de una carga o cargas (dispersión de tiempos de retardos)
- Desarrollo de la secuencia de iniciación del disparo.
- El acoplamiento de las vibraciones como consecuencia de la separación insuficiente en tiempo entre cargas con un mismo retardo.
- Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.
- Diferencia entre cargas explosiva de producción y contorno.
- Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.

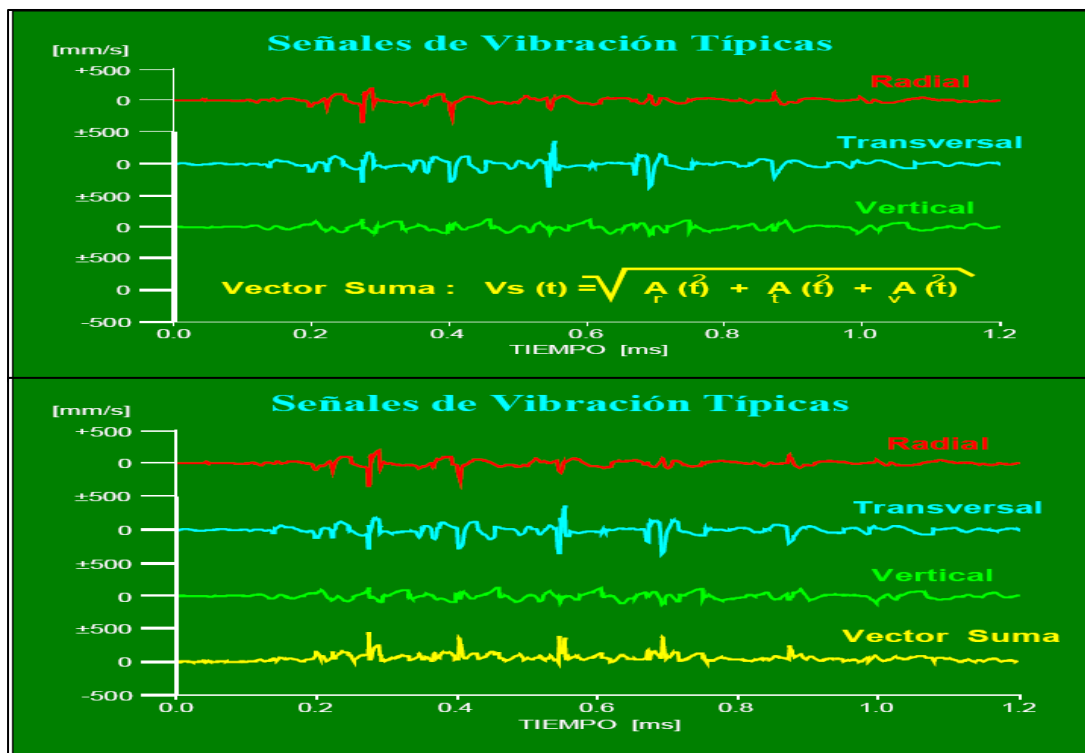


Figura 31. Interpretación de Vibraciones.

Tomado de “1º seminario geoblast abril 2022, modelamiento, monitoreo y control de vibraciones para minimizar los daños inducidos por voladuras”, por GeobBlast, 2015.

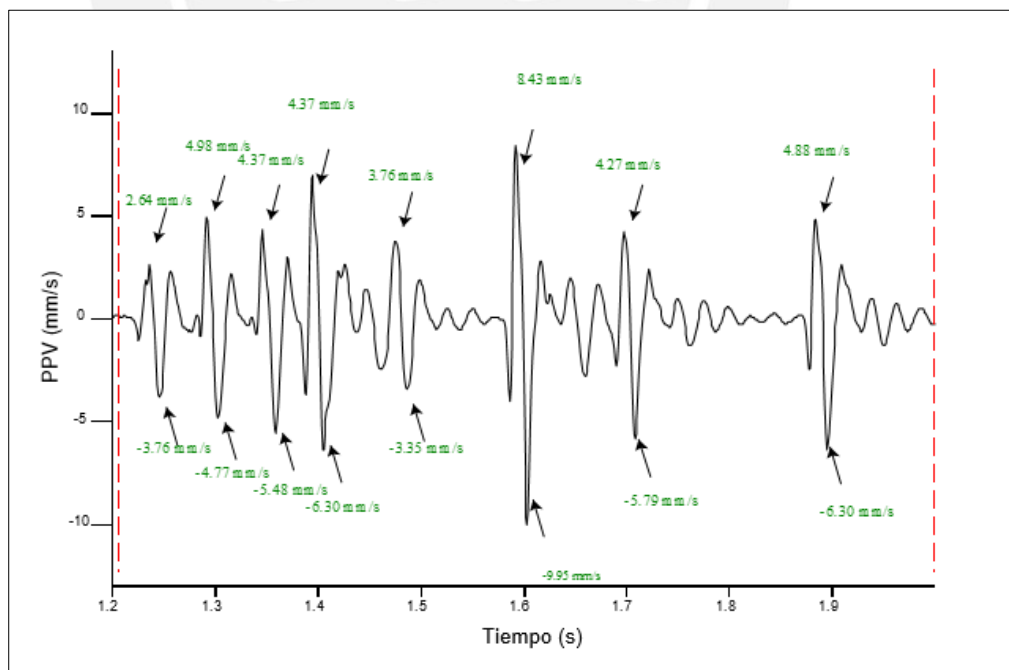


Figura 32. Interpretación de la velocidad pico de partícula en la onda sísmica.

Tomado de “Guía de criterios geomecánicas para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneos”, por Osinergmin, 2017.

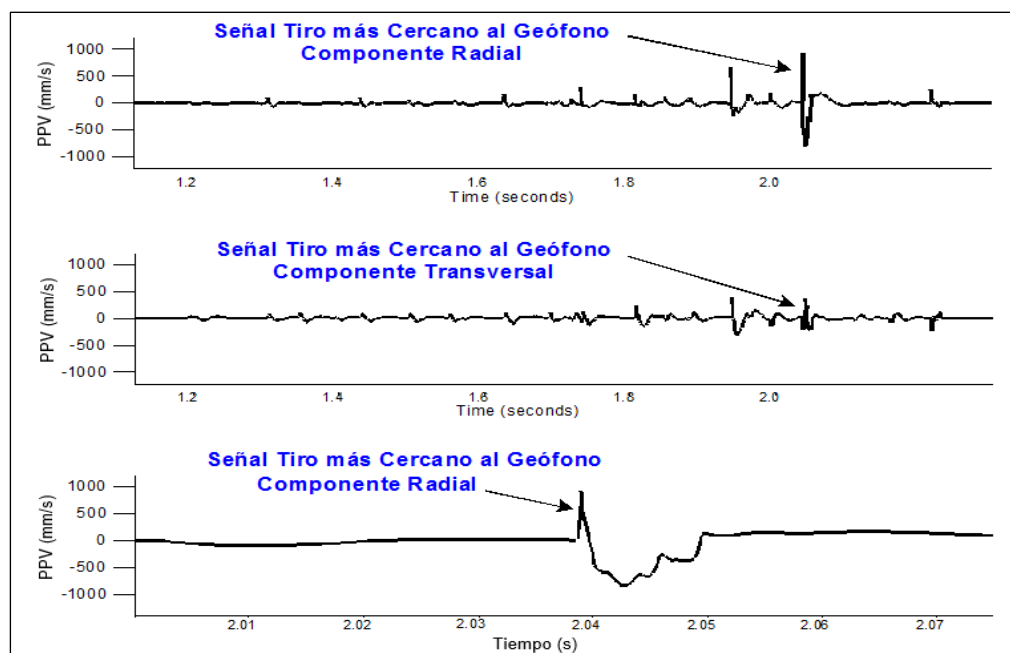


Figura 33. Interpretación de la onda sísmica en las tres componentes.  
Tomado de “*Guía de criterios geomecánicas para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneos*”, por Osinergmin, 2017.

## 2.8.9. Normativas Para el Control de Vibraciones

En los países desarrollados aplican las normas según el tipo de estructuras, lo cual esto facilita a que las empresas mineras ubicadas en esos países puedan saber si sus voladuras en esa área generan daño a las estructuras. Los valores propuestos han oscilado principalmente entre dos extremos: los valores más conservadores, como los establecidos por la normativa DIN 4150 alemana, que fijan un límite de hasta 3 mm/s para zonas con edificaciones antiguas, y las normas americanas, que permiten valores de hasta 50 mm/s para sus estructuras. (Giraldo, 2010)

### A. Normativas Peruanas de Vibraciones

#### a. Normativas Peruanas de Vibraciones

La Dirección general de asuntos ambientales. (1995), está basada en la Guía Ambiental para perforación y voladura en operaciones mineras. Dándonos la tabla

inferior como nuestro límite máximos de vibración en función de la distancia.

Tabla 1. Normativa peruana de vibraciones.

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibraciones de tierra en pulgadas / segundo.	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico
0 a 300	1.25	50
301 a 5000	1.00	55
5001 a mas	0.75	65

*Nota.* Tomado de “*Inspección geológica en la presa de relaves de la unidad minera cerro corona*”, por Ingemmet, 2019.

## B. Normativas Internacionales

Los países desarrollados siempre han tratado de tener el mejor control de vibraciones en sus operaciones para evitar problemáticas ambientales. Se han creado instituciones que mediante estudios han establecidos normas y leyes de protección en su entorno.

Las normas internacionales de los países del entorno europeo más destacadas son las siguientes:

- Alemania: DIN 4150
- Francia: GFEE
- Gran Bretaña: BS 7385
- Suecia: SS460 48 66
- Portugal NP-2074
- Internacional: ISO 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507

Debemos así tomar en cuenta que la mayoría de estos análisis no predicen el comportamiento de una onda si solo nos brinda una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo.

a. Normas de la Comunidad Europea

➤ Normativa Alemana DIN4150

La normativa alemana DIN 4150 en su tercera parte trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas.

El objetivo de esta normativa es establecer los límites de vibración que no comprometan el uso habitual del edificio. La reducción del uso del edificio debido a las vibraciones abarca la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes. (Giraldo, 2010)

Para las estructuras incluidas en los tipos “Tipo 2” y Tipo 3” su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas en las superficies de las paredes, empeoran fisuras o grietas existentes.

Tabla 2. Norma Alemana DIN4150

Tipo de edificación	Frecuencia (hz)		
	<10 (hz)	10 - 50 (hz)	50 - 100 (hz)
	Velocidad (mm/s)	Velocidad (mm/s)	Velocidad (mm/s)
Tipo i: edificios públicos o industriales	20	20 ... 40	40 ... 50
Tipo ii: edificios de viviendas o asimilables a viviendas	5	5 ... 15	15 ... 20

Tipo iii: edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración

3 ... 8

8 ... 10

*Nota.* Tomado de “Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú”, por Giraldo, 2010.

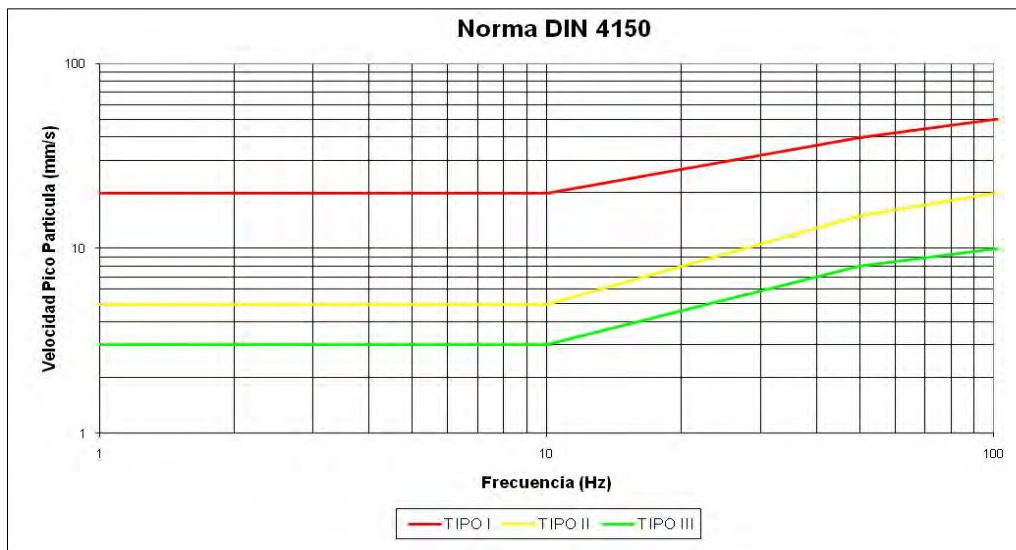


Figura 34. Norma Alemana DIN4150

Tomado de “Inspección geológica en la presa de relaves de la unidad minera cerro corona”, por Ingemmet, 2019.

#### ➤ Directriz Alemana

La directriz alemana aplicada a las casas de tierra ubicaría las casas de tierra entre el Grupo I y el Grupo II por lo que los valores de vibraciones máximo-permisibles estaría entre los 2 mm/s y los 5 mm/s de rango de vibración.

Tabla 3. Valores representativos de la directriz, alemana.

Construcción Categoría	Vz,amd (mm/s)
I - Los monumentos históricos	2
II - La mitad - casas de madera	5
III - Construcción de la pared (por ejemplo, edificios de paredes de losa, bloques, mampostería)	10
IV - Construcción Enmarcado (por ejemplo, edificios de hormigón armado, temporizador)	30

*Nota.* Tomado de “Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú”, por Giraldo, 2010.

### Capítulo 3. Descripción del lugar de estudio

La mina Cerro Corona se encuentra ubicada en el distrito de Hualgayoc, provincia de Hualgayoc departamento de Cajamarca, aproximadamente 90 km, por carretera, al noroeste de la capital del departamento de Cajamarca; y 10 km por carretera, desde Hualgayoc, o también, a 30 km de Bambamarca (capital de la provincia).

Cerro Corona comprende las partes altas de las cuencas de los ríos Tingo/La Quebrada (conocidos también como Tingo/Maygasbamba) y Hualgayoc/Arascorgue, que drenan al Océano Atlántico a través de los ríos Llaucano, Marañón y Amazonas. El acceso, desde la ciudad de Cajamarca, es mediante carretera afirmada. (Knight Piesold Consulting, 2005)

Geográficamente, se localiza entre las coordenadas:

- Latitud: 06° 45' 45" N.
- Longitud: 78° 37' 22" E.
- Altitud: 3300 a 3900 msnm.



Figura 35. Plano de ubicación de Cerro Corona.  
Tomado de "Inicio de Operaciones en Mina Cerro Corona", por Gonzales, 2011.

La mina Cerro Corona se ubica en una zona históricamente influenciada por la actividad minera. Desde fines del siglo XVIII, cuando el cerro Hualgayoc fue descubierto en el periodo colonial, hasta la actualidad, la minería ha caracterizado el desarrollo de todas las actividades de la región. En este periodo, este sector ha sido minado a pequeña escala, teniendo como resultado la presencia de socavones y pequeñas pilas de desmonte. (Gonzales, 2011)

Actualmente, Cerro Corona pertenece a GoldFields La Cima SA ("GoldFields"), anteriormente conocida como Sociedad Minera La Cima SA, una empresa que se formó como resultado de la reorganización de Sociedad Minera Corona SA, mediante escritura pública fechada. (Gonzales, 2011)

Sociedad Minera Corona S.A. antiguamente operó la mina Carolina, ubicada en la misma zona de la actual unidad minera Cerro Corona. Carolina era una mina subterránea pequeña, con un sistema de disposición de relaves y molienda compleja que fue operada intermitentemente, desde 1984 hasta que el 2003, donde sus operaciones fueron suspendidas. En enero de 2006, GoldFields Corona (BVI) Limited adquirió una participación mayoritaria en Sociedad Minera La Cima, a través de una oferta pública de adquisición, con el propósito de desarrollar el Proyecto Cerro Corona. Este proyecto era de una dimensión sustancialmente distinta, en cuanto a costo de capital y volumen de operaciones, respecto a las operaciones de la Sociedad en el pasado. GoldFields adquirió los derechos superficiales sobre el área del proyecto, obtuvo la aprobación del EIA de la mina Cerro Corona por la autoridad competente y posteriormente obtuvo los permisos de construcción necesarios. Las concesiones que constituyen la propiedad minera están registradas a nombre de GoldFields, una compañía comercial peruana, subsidiaria y propiedad de GoldFields Limited. (Gonzales, 2011)

### 3.1. Geología Regional

En el área de Hualgayoc, existen grandes pliegues abiertos en los sedimentos cretáceos, con planos axiales al NO y que buzanan fuertemente hacia el SO. Existen, además, alineamientos con tendencia EO que cortan transversalmente la estructura regional. Se ha identificado tres familias de fracturas:  $315^\circ$  con buzamiento vertical a subvertical NE;  $080^\circ$  con buzamiento de  $65^\circ$  NO; y  $45^\circ$  con buzamiento de  $65^\circ$  NO. Estas estructuras contienen mineralización de venas (filón) y corta sedimentos y las intrusiones subsiguientes.

La forma de la superficie del cuerpo mineral de Cerro Corona es una colina cónica, de aproximadamente 800 m – 1000 m de diámetro, que se eleva aproximadamente de 100 m a 150 m sobre el área circundante. (Gonzales, 2011)

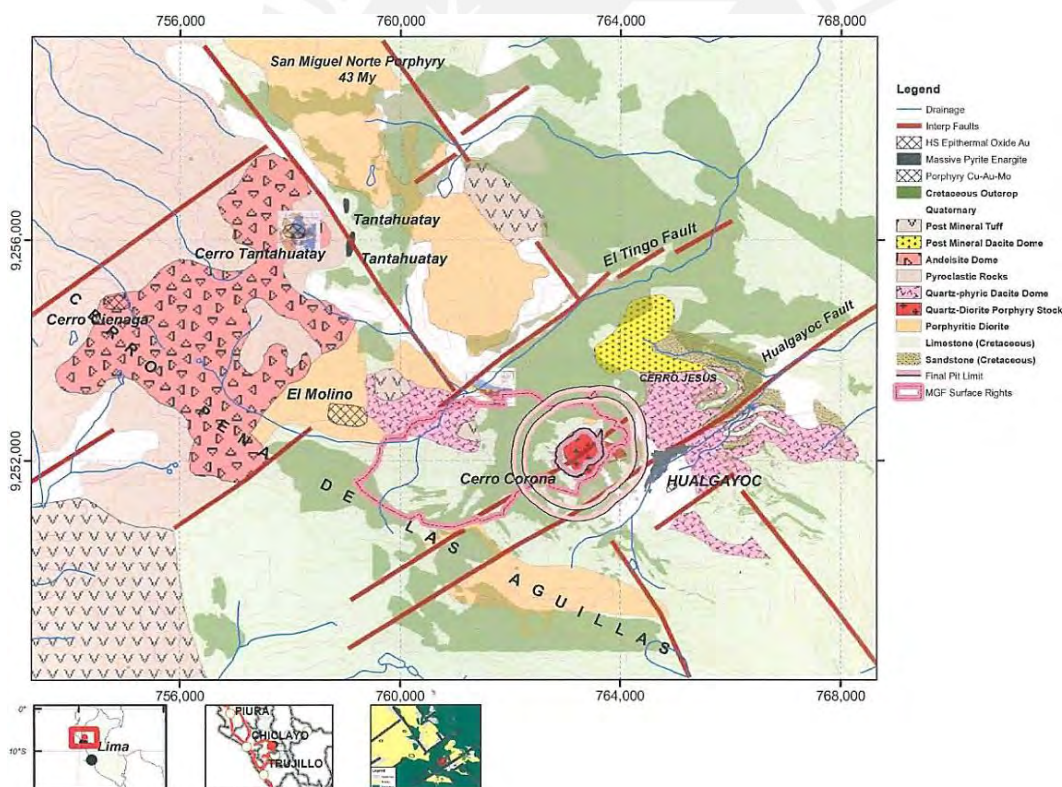


Figura 36. Geología regional de Cerro Corona.

Tomado de "Inicio de Operaciones en Mina Cerro Corona", por Gonzales, 2011.

### 3.2. Geología local

El pórfido diorítico de Cerro Corona se ubica a 90 Km al N-NO de la ciudad de Cajamarca, en el distrito y provincia de Hualgayoc. El depósito de Cu-Au, se ubica en la intersección de los lineamientos NE-SO del corredor estructural Chicama – Yanacocha, que junto con los lineamientos de orientación andina NO-SE, es posible que conformen un corredor donde se emplazan depósitos porfiríticos de Cobre, alineados a la cordillera occidental.

Localmente se tiene rocas sedimentarias cetáceas, constituidas por margas y calizas nodulares de la Formación Chulec, que infrayacen en forma concordante a las calizas grises intercaladas con lutitas negras de estratificación delgada de la Formación Pariatambo, la cual subyace en concordancia paralela y ondulante a las calizas gris claras, margas y lutitas, intercalado con areniscas de color marrón de estratos gruesos de la Formación Yumagual.

Rocas intrusivas de composición riodacítica y granodiorítica, presentes en el Cerro Las Gorgas y el Cerro Hualgayoc, junto con rocas de composición andesítica del Cerro Coimolache, rodean el área de Cerro Corona, que está compuesta por rocas dioríticas.

Gonzales (2011), el cuerpo mineral se compone de un pórfido mineralizado que contiene oro y cobre alterado. En la parte superior del cuerpo mineral, predominan los óxidos, los cuales tienen una baja ley de cobre. Justo debajo de la zona de mineralización oxidada, se observa la mineralización secundaria de cobre en una zona superior. Más abajo, en la parte inferior de la zona superior, se encuentra la mineralización primaria de cobre y oro, presente como mineral hipogénico.

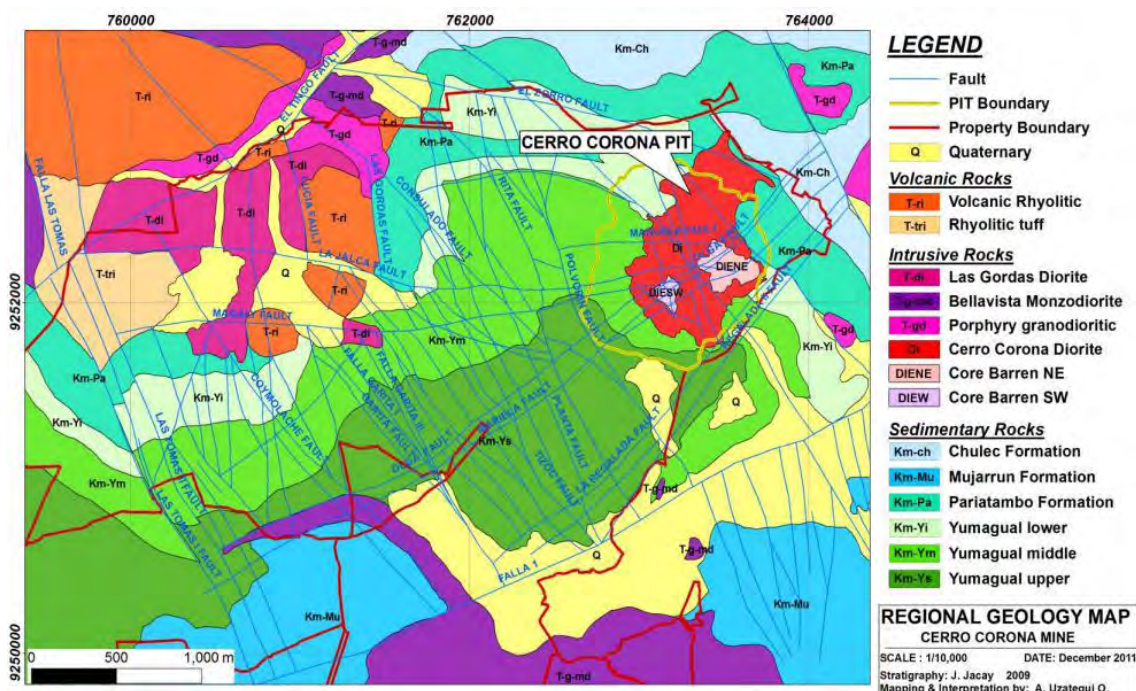


Figura 37. Plano Geológico Local.

Tomado de "Evaluación Hidrogeológica a partir del drenaje del Tajo Cerro Corona.", por Manrique, 2013.

### 3.3. Estratigrafía

La secuencia lito estratigráfica donde se emplaza la mina Cerro Corona, está conformada por:

➤ **Formación Chulec (Albiano medio a inferior)**

El cuerpo consiste en margas decoloradas que se transforman en calizas en la base. A lo largo de una secuencia de 130 metros, se alternan ritmitas calcáreo-margosas, dispuestas en paquetes de 8 a 10 metros. En la parte superior de la secuencia, se encuentran niveles calcáreos con algo de materia orgánica, seguidos de margas que contienen fósiles de Knemiceras. La secuencia culmina con una argilita, la cual está enriquecida con materia orgánica. (Romero, 1991)

➤ **Formación Pariatambo (Albiano medio a superior)**

Esta unidad fue estudiada inicialmente por McLaughlin en 1925. Presenta 170 metros de potencia y esta compuesta por rocas margosas calcáreas, bituminosas con presencia del fósil *oxitropidóceras carbonarium*. La base es una roca calcárea bituminosa con el fósil *mortoceratites* con foraminíferos *Hedbergella*, luego siguen rocas calcáreas bituminosas en bancos pequeños. (Romero, 1991)

➤ **Grupo Puillucana (Albiano superior – Cenomaniano)**

Consta de calizas claras, margas y lutitas de color marrón; presentan estratificación en bancos potentes con una fauna de bivalvos y gasterópodos. También presenta escarpas poco pronunciadas a ondulatorias. (Gonzales, 2011)

➤ **Formación Yumagual (Albiano Superior – Cenomaniano Inferior)**

Esta unidad presenta alrededor de 350 m de potencia, y está compuesta por fósiles de *ostrea scyphax* y *exogiras* *Suprayace* con leve discordancia a la formación Pariatambo e infrayace con aparente concordancia a la formación Mujarrún. Consiste en una secuencia de margas y calizas gris parduzcas en bancos más o menos uniformes, destacando un miembro lutáceo margoso, amarillento, dentro de un conjunto homogéneo que presenta escarpas elongadas debido a su dureza uniforme. (Romero, 1991)

COLUMNA ESTRATIGRAFICA - DISTRITO HUALGAYOC

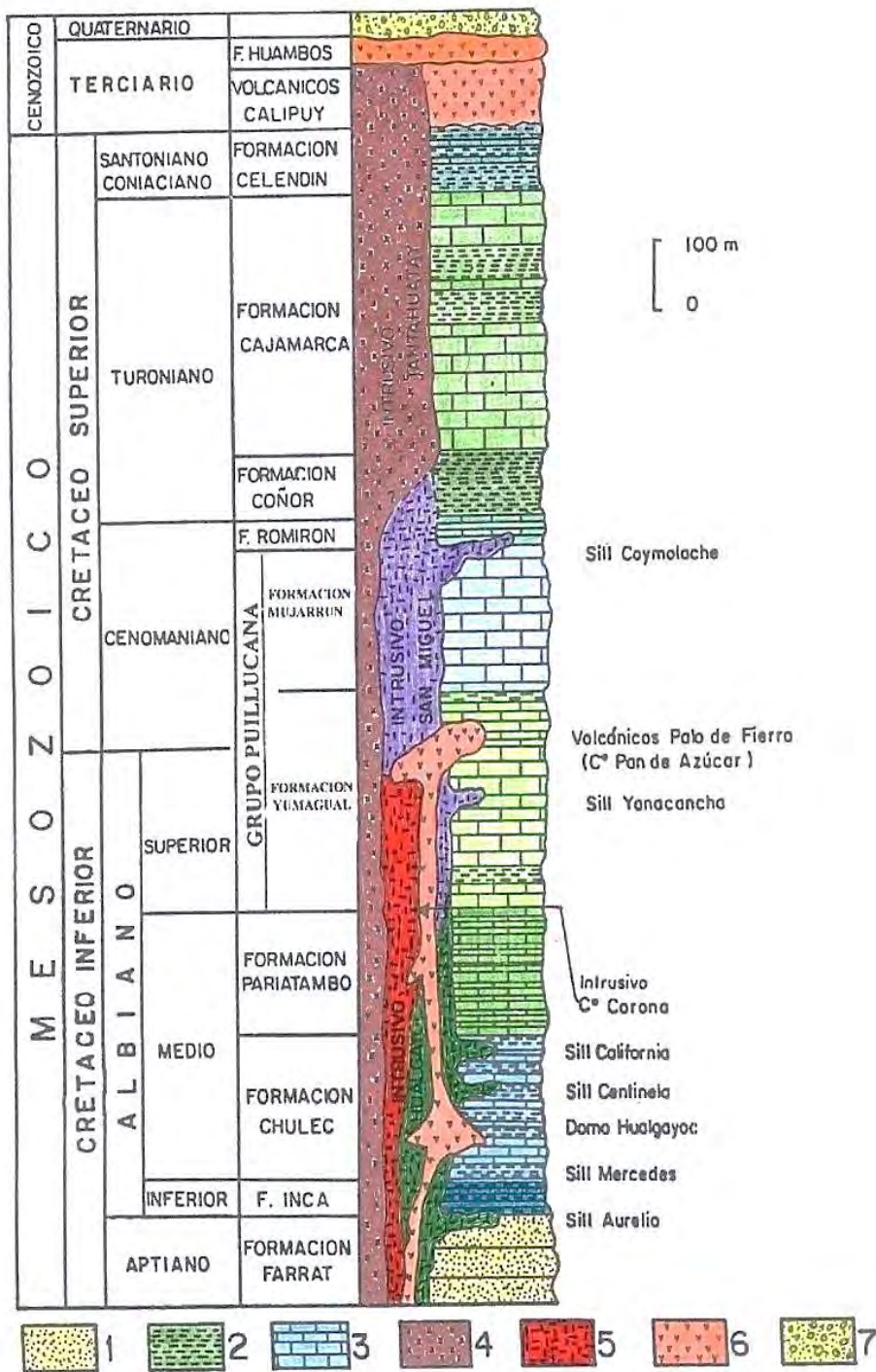


Figura 38. Columna estratigráfica regional del distrito de Hualgayoc. Tomado de “Zonamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona”, Vereau, 2019. Leyenda: 1. Sedimentos Clásticos. 2. Lutitas. 3. Calizas. 4. Intrusiones granodioríticas. 5. Intrusiones Volcánicas. 6. Rocas Volcánicas. 7. Cuaternario.

## **Rocas Intrusivas**

Intrusivo Hualgayoc. Aflora al norte y este de Hualgayoc, se encuentra emplazado en las calizas del Cretáceo medio a superior y en las areniscas Goyllarisquizga. Hacia el lado oeste de los contactos se encuentran cubiertos por dos grandes depósitos cuaternarios: Quebrada Mesa de Plata y Quebrada Pastora. Hacia el este se extienden los sills del cañón del río Hualgayoc, entre calizas y areniscas. (Romero,1991)

Stock del Cerro Corona. Se ubica en el flanco norte del Cerro Corona y al NO del pueblo de Hualgayoc. Es una roca ígnea de textura porfirítica con grandes fenocristales maclados y zonados de plagioclasas moderadamente argilitizados y albitizados, la matriz está compuesta de plagioclasas, máficos, cuarzo y menor cantidad de feldespatos potásicos. Presenta también pequeños cuerpos oxidados, silicificados y limonitizados (Romero,1991). Ha sido datado K-Ar en 13.5 a 14.4 m.a. (Manrique, 2013)

## **Rocas Volcánicas**

La parte oeste de la zona se encuentra cubierta por volcánicos de edad neo-terciaria, que cubre parte a los sedimentos plegados del cretáceo. Su composición es muy variada: andesitas, dacitas y riolitas. Se pueden correlacionar con los volcánicos del Grupo Calipuy.

En el cerro Palo de Fierro, cerca al cerro de Tingo, hay un afloramiento de gran extensión y composición riolítica, textura porfirítica con matriz afanítica, y apariencia ignimbrítica. Probablemente pertenezcan a la formación Huambos del Terciario Superior. (Romero,1991)

En el cerro Hualgayoc, al norte del intrusivo Hualgayoc, se ha emplazado una estructura de domo con forma redondeada, que se prolonga hacia el Este. Es de composición riolítica, textura porfirítica y matriz afanítica. Ha sido datado en 7.2 +/- 0.35 m.a. (Saldaña y Mujica, 2018)

### **3.4. Geología Estructural**

El depósito de Cerro Corona ha sido afectado por dos sistemas principales de fallamiento. 2 fallas de carácter regional han dado origen a sistemas secundarios que afectaron a Cerro Corona. Estas son: La falla El Tingo y la falla Hualgayoc, con desplazamientos dextrales y sinextrales, respectivamente.

#### **Sistema de Fallas NE - SO**

Determinado principalmente por las fallas Olga con dirección N 266° E, buzamiento de 80° SO y potencia promedio de 0.90 m, falla Mariela con dirección N 255° E, buzamiento de 80° SO y potencia promedio de 2.0 m, y la falla Carmen con dirección N 245° E, buzamiento de 75° SO y potencia promedio de 0.60 m.

#### **Sistema de Fallas NO-SE**

Es parte de este sistema la falla Diana con dirección N 140° E, buzamiento 85° y potencia promedio de 0.60 m y la falla Pamela con dirección N 330° E, buzamiento de 75° SO y potencia promedio de 0.10 m.

Cabe mencionar que, además, existen numerosas fallas de menos envergadura, producto de los esfuerzos de las principales antes mencionadas.

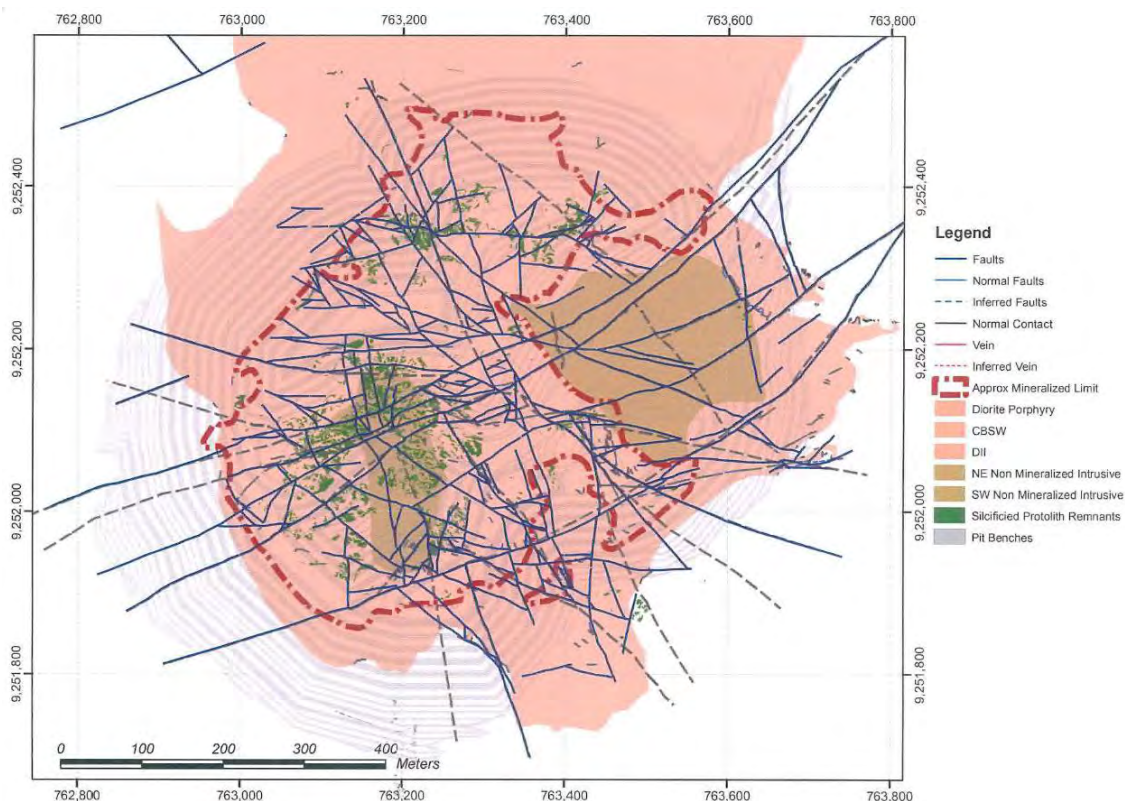


Figura 39. Plano Geológico – Estructural.

Tomado de “Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona”, Vereau, 2019.

## Alteración

La alteración del pórfido ha conllevado a la formación de arcillas que afectan la minería y el procesamiento de mineral y el minado de los materiales de cubierta. Los aparentes “esponjamientos de arcilla” ubicados tienen potencialmente el mayor impacto. (Gonzales, 2011)

### a. Alteración Propilítica

- Caracterizada por el desarrollo de clorita y epidota de los ferromagnesianos y el desarrollo de calcita de los feldespatos.
- Py pálida diseminada y cpy en orden de Tz a 1%.
- Py-cpy-hm ocurren a lo largo de fracturas, pero en menor grado.

- Menor mineralización en relación con otras alteraciones.

#### b. Alteración Potásica

- Caracterizada por presencia de biotita >ortosa, de coloración marrón claro, pequeñas y destruidas en la matriz de grano fino, y ubicada en el centro del stock o a los márgenes.
- Venilleos de qz y mag (stockwork).
- La cpy ocurre en 1% en ambas rocas alteradas indicando la presencia cobre en el magma.

#### c. Alteración Fílica

- Caracterizada por qz-ser-py sobre impresa a anteriores.
- Texturalmente alteración muy destructiva.
- Restringida a fallamiento fracturamiento.
- Py grano fino y gris oscura en diseminaciones y venillas. Puede llegar a 6%, pero cpy muy baja.

#### d. Alteración Argílica

- Más común de las alteraciones sobre impresa a la propílica y potásica.
- Argilización selectiva de los feldspatos (montmorillonita).
- Fuerte alteración puede destruir minerales constituyentes de roca, dejando matriz preservada.
- Biotita primaria puede sufrir débil destrucción en los bordes.

### 3.5. Mineralización

La mineralización está dividida en 4 zonas desde la superficie hacia profundidad:

- Zona de Óxido, caracterizada por óxidos de fierro en la variedad de Jarosita, goethita y hematita, con presencia de oro libre.

- Zona Mixta de Óxidos-Sulfuros, caracterizada por óxidos de fierro, sulfatos y sulfuros (jarosita, goetita y jarosita, sulfuros secundarios de cobre de cobre, calcosina, covelita, calcopirita, bornita y pirita). Con leyes erráticas de Cu (niveles altos a bajos).
- Zona de Enriquecimiento Supérgeno, Esta desarrollada débil a moderadamente de 10 m a 50 m con un parcial a completo reemplazamiento de cpy, bn y localmente py por digenita (determinada al microscopio), calcosita y covelita. Límite inferior marcado por deposición de sulfuros secundarios de cobre.
- Zona de Mineralización Hipógena, desde base de enriquecimiento supérgeno hacia abajo. Sulfuros primarios como calcopirita, pirita, pirrotita, marcasita y bornita, cantidades mínimas de molibdenita, esfalerita y galena. Remanentes de anhidrita en cantidades mínimas, removidas por aguas subterráneas durante la lixiviación supérgena y eventos de enriquecimiento.

Dentro del pórfido Cu-Au la mineralización principalmente está emplazada por zonas extensivas de vetillas paralelas y stockwork de cuarzo-pirita-marcasita-calcopirita+ bornita+magnetita, hay 3 tipos de venillas:

- Tipo A: venillas tempranas milimétricas a centimétricas rellenas de cuarzo-magnetita-especularita-calcopirita-bornita-pirita, cortas y semionduladas
- Tipo B: venillas intermedias milimétricas a centimétricas rellenas de cuarzo-magnetita-especularita-calcopirita-bornita-pirita y molibdenita, rectas y con simetría en el centro.
- Tipo D: venillas tardías centimétricas a decimétricas rellenas de cuarzo-pirita-calcopirita con un halo de alteración argílico y algunas veces clorítico.

#### **Capítulo 4. Metodología.**

Para garantizar el desarrollo del plan de minado para el año 2025, se tiene un reto importante para el Área de Perforación y Voladura en| la Pared Este de Cerro María, reto que ha sido asumido para el desarrollo de la presente tesis. Este desafío comprende, desarrollar diseños de perforación y voladura que no generen efectos negativos en los taludes y aseguren el desarrollo de minado de la fase.

Cerro María tiene una geología particular; ya que, podemos encontrar en un mismo banco, caliza fresca, caliza alterada, mármol, argílico y en algunas zonas potásico. Adicional a las complicaciones geológicas, el mapeo geotécnico muestra que cada alteración se comporta de manera distinta y encontramos macizos rocos competentes de dureza crítica y macizos rocos no competentes de dureza 3 a menos.

La performance de la perforación y voladura en macizos rocos competentes es buena y normalmente no presentan complicaciones mayores que pongan en riesgo el diseño del talud; sin embargo, en los macizos rocosos no competentes se tiene que tener especial cuidado, de haber alguna desviación en el proceso, se pone en riesgo la estabilidad del banco.

En tal sentido, se han realizado pruebas de campo en zonas de alteración no competentes para obtener más información y optimizar los diseños de perforación y voladura, dichos estudios se detallan en el siguiente diagrama.

**RECOPILO  
N DE DATOS**

- Caracterización geológica de Cerro Maria.
- Mapeo geotécnico de Cerro Maria.

**PRUEBAS DE  
CAMPO**

- Prueba de cráter.
- Prueba de Campo Cercano.
- Prueba de Filtro de Precorte.
- Pruebas de Onda elemental.

**DISEÑOS DE  
PERFORACIÓN Y  
VOLADURA**

- Proponer diseño de Burden y espaciamiento para taladros de producción.
- Proponer diseño de Espaciamiento para taladros de precorte.
- Diseño de carga para taladros buffer y de producción.
- Diseño de secuencia de salida.

**TRABAJOS DE  
GABINETE.**

- Reportes de pruebas de campo.
- Reportes de Voladura utilizando los diseños propuestos.

**ANÁLISIS DE  
RESULTADOS**

- Fragmentación. (P80 y %Finos).
- Evaluación de taludes (SOP).

#### 4.1. Recopilación de datos

##### A. Caracterización Geológica de Cerro María

Para caracterizar geológicamente el cerro María y definir el mejor diseño para el proyecto de perforación y voladura, se ha realizado un mapeo geológico estructural de los frentes de los bancos y posteriormente secciones geológicas que muestran el modelo de los sondeos y el mapeo de los bancos. Esta información ha permitido definir la geología de los bancos 3860 y 3850.

El cerro María, incluye calizas fracturadas con localización de diques dioríticos intrusivos con alteración argílica. Se observan mármoles en los halos debido al metamorfismo de contacto y se evidencian fallas con rumbos NE-SW con buzamientos que oscilan entre  $75^{\circ}$  y  $85^{\circ}$  SW. Estas estructuras permiten la filtración de agua meteórica, por lo que se produce una alteración de los sulfuros a óxidos de hierro y sulfatos de cobre. Además, el desarrollo de skarn de hierro es evidente en los halos de fallas.

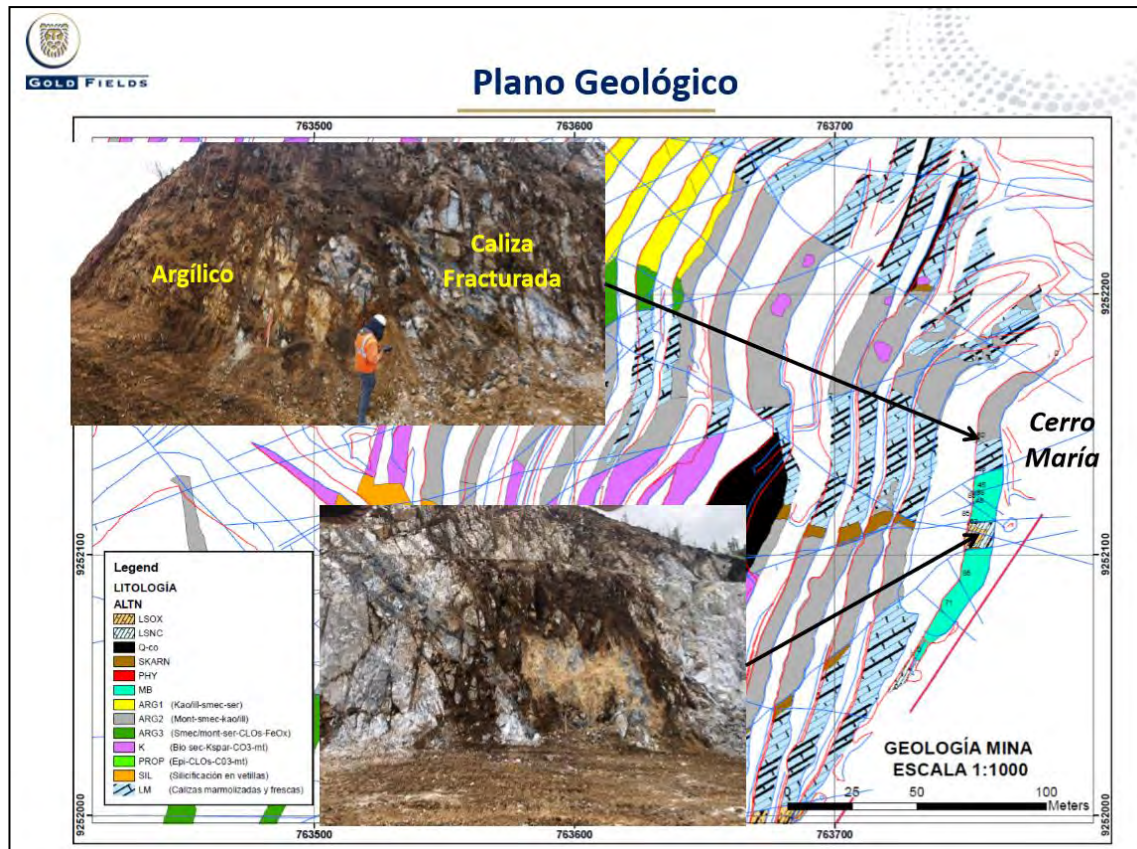


Figura 40. Detailed geological mapa  
Tomado de “Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona”, Vereau, 2019.

Es evidente que la zona tiene un alto nivel de complejidad a efectos de perforación y voladura. Por lo tanto, se requiere un mayor nivel de detalle que nos permita obtener los insumos necesarios para desarrollar un mejor diseño. En este sentido, se prepararon tres secciones que muestran la interacción entre las áreas competentes y no competentes, además de su influencia en cada banco.

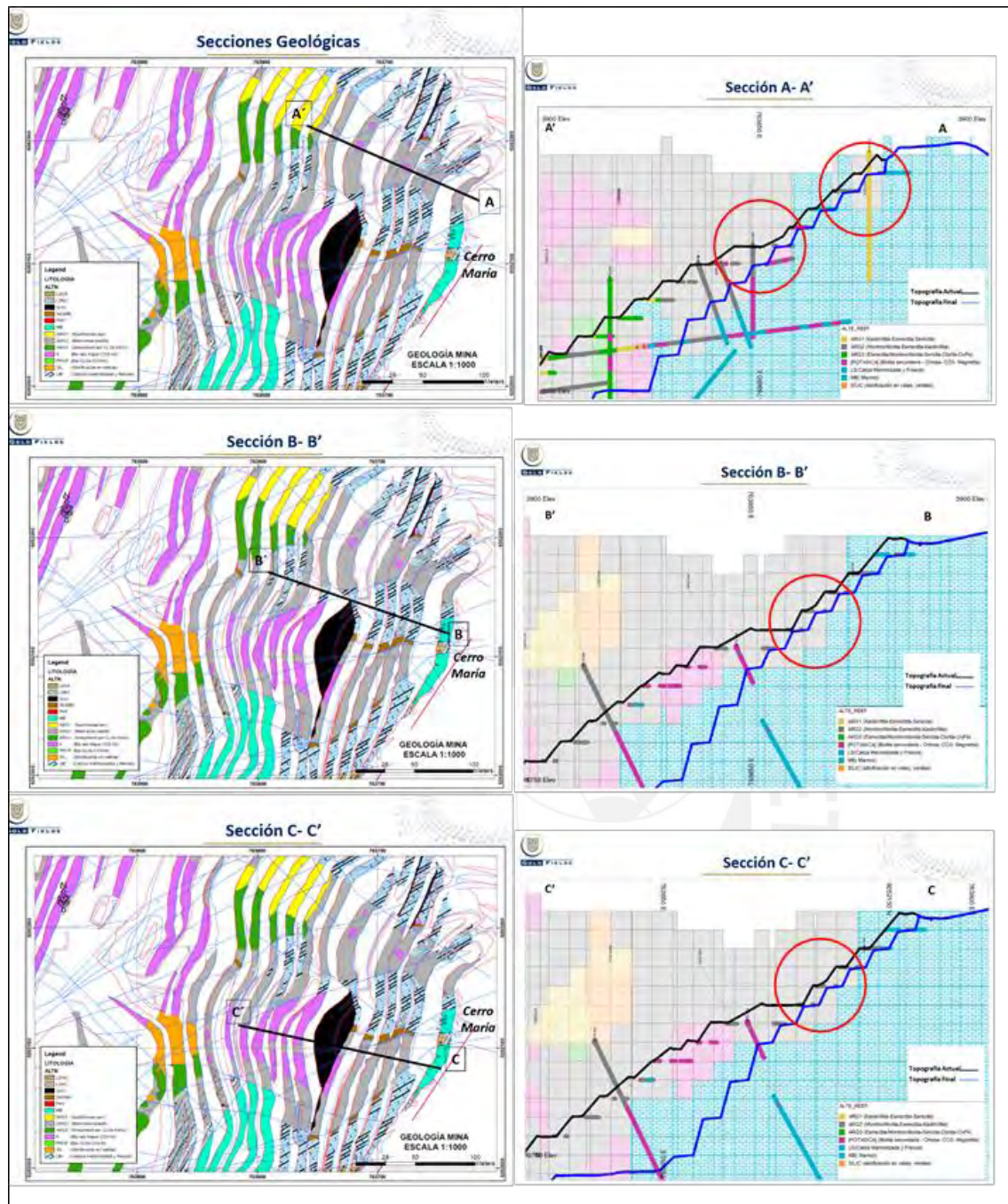


Figura 41. Secciones de colina de María, donde se muestra la interacción de las zonas competentes con las no competentes.

Tomado de “Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona”, Vereau, 2019.

Dada la interacción entre varias alteraciones en un mismo banco, el factor diferenciador para el proceso de perforación y voladura será mantener la geología actualizada en cada nivel.

## B. Mapeo Geotécnico de Cerro María

Como muestra el mapa de fallas, hay tres fallas principales que atraviesan todo el desarrollo del cerro María: Falla Mariela, Falla Mariela S2 y Falla Carmen S1. Estas fallas deben ser tenidas en cuenta en cada voladura y monitoreadas constantemente por el Área de Geotecnia.

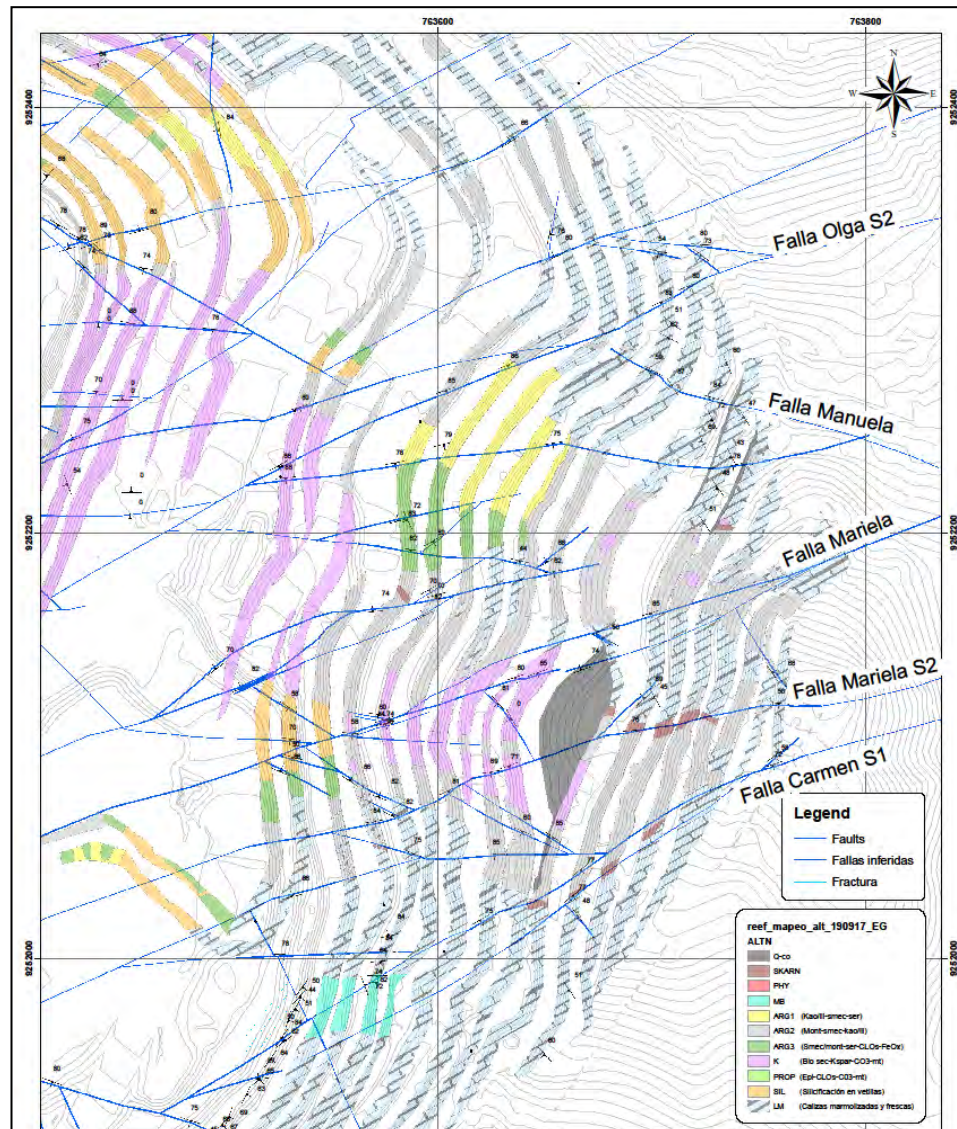


Figura 42. Failure map – Maria hill

Tomado de “Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona”, Vereau, 2019.

Además de los fallos, es necesario conocer la calidad del macizo rocoso e identificar las zonas más vulnerables. Para ello se cuenta con el plan de calidad del macizo rocoso, donde se puede comprobar la interacción entre macizo

rocoso muy competente y macizo rocoso no competente.

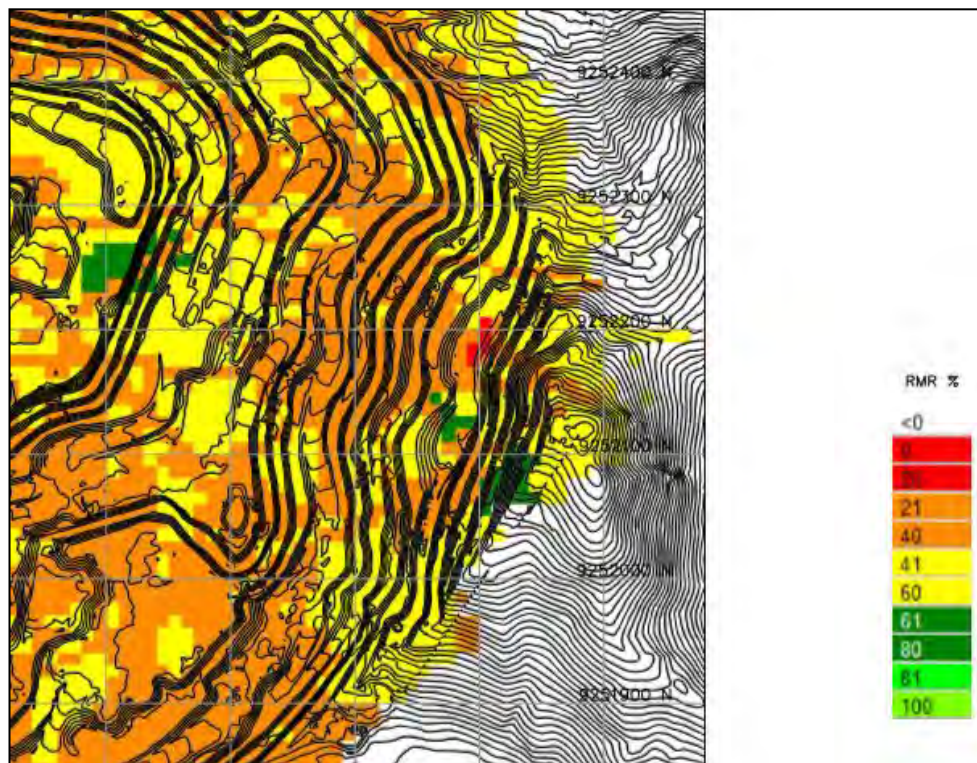


Figura 43. Quality map of the RMR rock massif  
Tomado de “*Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona*”, Vereau, 2019.

Además del cuidado de cada estructura principal, el monitoreo constante del efecto de cada voladura en el macizo rocoso será un factor a considerar para optimizar los diseños de perforación y voladura.

## 4.2. Pruebas de campo

### A. Pruebas insitu

Inicialmente era imprescindible realizar una prueba en el propio cerro María. Junto con el equipo de Operaciones de la Mina nos reunimos en la zona y tomamos la decisión de no realizar una voladura, sino de hacer un corte y que sólo las excavadoras y los tractores empujaran y vieran el comportamiento del

terreno.

Efectivamente, las zonas arcillosas no conformes salieron sin dificultad, las zonas calcáreas alteradas con alguna dificultad y las zonas de mármol y caliza fresca con dificultad, pero las encontramos en una proporción mínima.



Figura 44. Corte maría cerro sin voladuras

Tomado de *“Mineral resources and mineral reserves supplement to the integrated annual report”*, por GoldFields, 2020.

Los resultados finales son muy favorables en términos de estabilidad. Se obtuvieron taludes con perfiles acordes al diseño sin daños aparentes que puedan causar futuras inestabilidades como se observa en la Figura 9.



Figura 45. Perfil de taludes en el cerro María después del corte libre  
*Tomado de “Mineral resources and mineral reserves supplement to the integrated annual report”, por GoldFields, 2020.*

Esta prueba nos ha proporcionado información relevante para tener en cuenta en los diseños de perforación y voladura, cuando se encuentre este tipo de alteración. Sin embargo, se optará por realizar voladura con carga mínima buscando obtener el desarme de la zona.

## B. Prueba de cráter

El objetivo principal de esta prueba es determinar los parámetros de diseño posibles para una malla (BxE) y factor de potencia (F.P) para determinados dominios geológicos.

Los parámetros de dureza en Cerro Corona, como en todas las operaciones mineras, tienen gran relevancia durante el desarrollo de Perforación y voladura, es por eso que es importante realizar el diseño de voladura en cráter el cual trata de un método práctico, por consiguiente no se necesita realizar varias pruebas de campo para determinar la distancia optima de la carga esférica, sino más bien aplicando la nueva teoría, esta distancia optima se calcula mediante una ecuación matemática; que se plantea a través de pruebas de voladura en cráter como se muestra en las figuras:

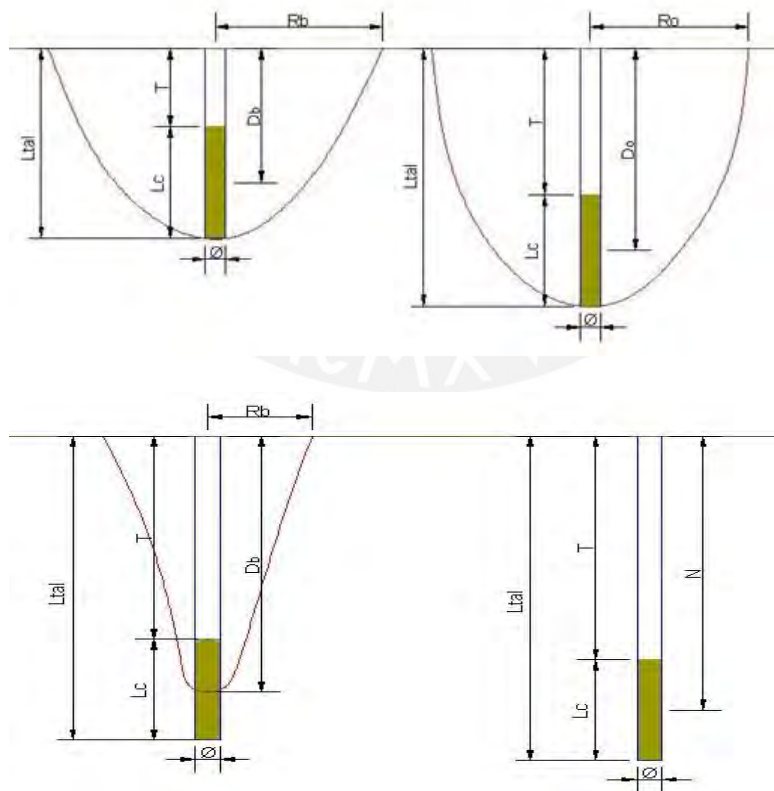


Figura 46. Grafica de representación de la prueba de cráter.  
Elaboración propia.

- $\emptyset$  = Diámetro del taladro
- $L_c$  = Longitud de carga
- $T$  = Taco
- $L_{tal}$  = Longitud de taladro
- $R_b$  = Radio variable
- $D_b$  = Distancia variable
- $D_o$  = Distancia optima
- $N$  = Distancia critica

Así mismo, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Parámetros de roca; como tipo de roca y su densidad.
- Parámetros de explosivo; la presión de detonación de los explosivos ( $P_oD$ ), longitud de carga  $L_c=(\emptyset)$ .
- Parámetros de perforación; el diámetro del taladro ( $\emptyset$ ).

### C. Prueba de campo cercano y filtro de pre-corte

El objetivo principal de esta prueba es modelar las vibraciones en el campo cercano, con el fin de controlar el daño por vibraciones en el talud Cerro María.

A través de esta prueba se llegará a determinar:

- Velocidad de la onda P ( $V_p$ ), a través de la técnica sísmica de Cross Hole.
- Velocidad pico partícula crítica  $V_{PPc}$  y/o umbral de daño para el sector de Cerro María.
- Registrar los niveles de vibraciones en la prueba para campo cercano.
- Generar el modelo de vibraciones de campo cercano aplicando el criterio de Holmberg & Pearson.
- Recomendar filas de control (pre-corte y Buffer).

- Cuantificar el efecto del filtro de pre-corte.

### Instrumentación

El diseño de la prueba se realizará según el siguiente esquema, dicho esquema permitirá la recolección de la información para el desarrollo de los modelos de vibraciones para cada tipo de explosivo a utilizar y la onda P del dominio geotécnico.

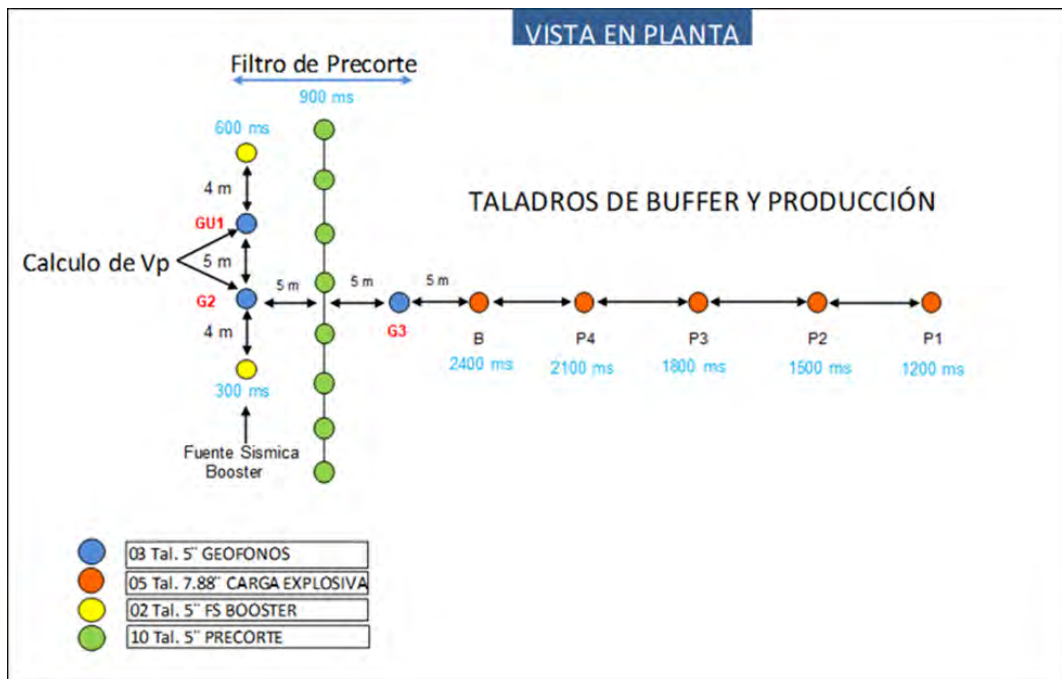


Figura 47. Vista de la configuración y ejecución de la prueba en campo.  
Elaboración propia.

### Construcción del modelo de vibraciones Holmberg y Persson.

Consiste en obtener e identificar los registros o pulsos de vibración generados por el geófono empotrado en las distintas detonaciones en campo cercano para generar una curva iso- valórica de velocidades pico partícula en función a la ecuación de Holmberg y Persson (1979) que es el modelo empírico con mayor aceptación a nivel mundial debido a la calidad de predicción entregada; este considera a nivel de detalle, todos los aspectos geométricos asociados a la carga explosiva y su relación espacial respecto al punto de interés

monitoreado (Lozada y Prado, 2023). Con este modelo, es posible estimar la velocidad de partícula en función de las características del explosivo, diámetro, carga, taco y longitud del taladro, según:

$$PPV = K \times \left(\frac{L}{ro}\right) \times \left[ \arctan\left(\frac{H + Xs + Xo}{ro}\right) + \arctan\left(\frac{Xo - Xs}{ro}\right) \right]^\alpha$$

Donde:

- PPV : velocidad de la partícula [mm/s]
- K : factor de amplitud [adimensional]
- L : densidad de carga lineal [kg/m]
- ro : distancia horizontal [m]
- H : longitud de carga [m]
- Xs : longitud del taco [m]
- Xo : profundidad del sensor [m]
- A : factor de atenuación [adimensional]

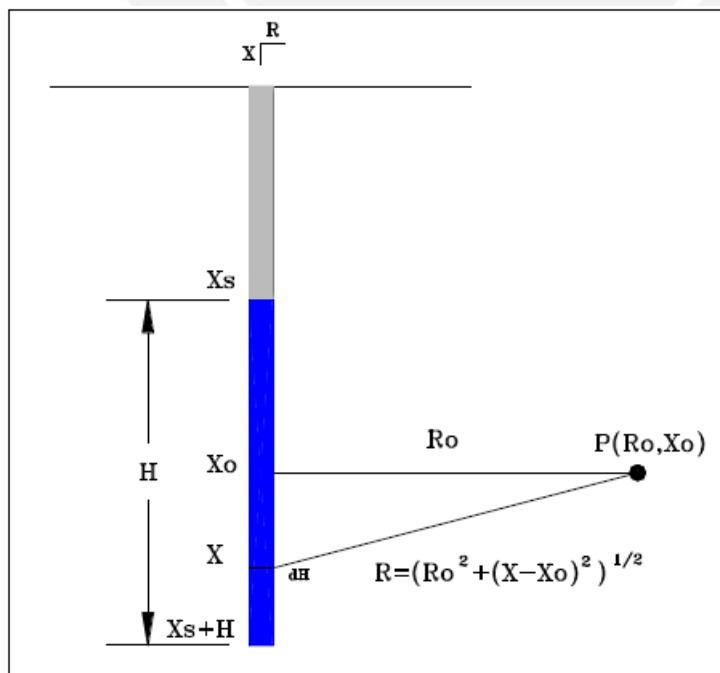


Figura 48. Esquema del modelo de Holmberg y Persson.

Tomado de "Método experimental para determinar el comportamiento vibracional de explosivos de baja energía y su impacto en el control de daño a Taludes", por Lozada y Prado, 2023.

### Cálculo de la velocidad de propagación del Macizo Rocoso $V_p$

$$V_p = \frac{\text{Distancia entre geofonos}}{\text{Tiempo de arribo de ondas}}$$

Ecuación 2: Calculo de Velocidad de Onda P

### Cálculo de la vibración máxima de control de velocidad Pico Partícula Crítica

#### PPV<sub>c</sub>

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

En donde:

- $\sigma_t$  : Resistencia a la tracción.
- $V_p$  : Velocidad de propagación de onda.
- $E$  : Módulo de Young.
- $\epsilon$  : Deformación.

### Cálculo de VP de la roca intacta

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

Donde:

- $\nu$ : Módulo de Poisson.
- $\rho$ : Densidad de la roca.

### Cálculo de la velocidad Pico Partícula Crítica del Macizo Rocoso PPV<sub>cmr</sub>.

$$PPV_{cmr} = \frac{\left(\sigma_t * e^{\left(\frac{RMR-100}{27}\right)}\right) * V_p \text{ cross hole}}{E_i * e^{\left(\frac{RMR-100}{36}\right)}} r$$

Donde:

- $\sigma_t$  = Resistencia Tracción de roca intacta.

- $E_i$  = Modulo de deformación de roca intacta.
- RMR = Clasificación del macizo rocoso Bieniawski 1989.

### Cálculo de filtro de pre-corte

$$Efecto\ de\ filtro = \left( \frac{k_1 - k_2}{k_1} \right) * 100$$

Donde:

- $K_1$  = K antes del filtro de pre-corte Geófono 3.
- $K_2$  = K después de filtro de pre-corte Geófono 2.

Se determinará la eficacia de filtro de precorte a través de la siguiente tabla de escala de eficiencia de filtro que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Esquema de rango de filtro de precorte

Rango de Filtro	Calificación
<20%	Muy Malo
21% - 30%	Malo
31% - 40%	Regular
41% - 54%	Bueno
55% - 65%	Muy Bueno
>65%	Excelente

Elaboración propia.

### D. Prueba de onda elemental

En la prueba de onda elemental se busca obtener los tiempos óptimos para generar la mayor fragmentación a la roca y el menor daño al talud. El objetivo mediante esta prueba es identificar los tiempos entre taladros y entre filas, que generen ondas destructivas, las cuales se anulen entre sí, y no ondas constructivas en la cual la amplitud resulte el doble de una onda generada por la detonación de un taladro.

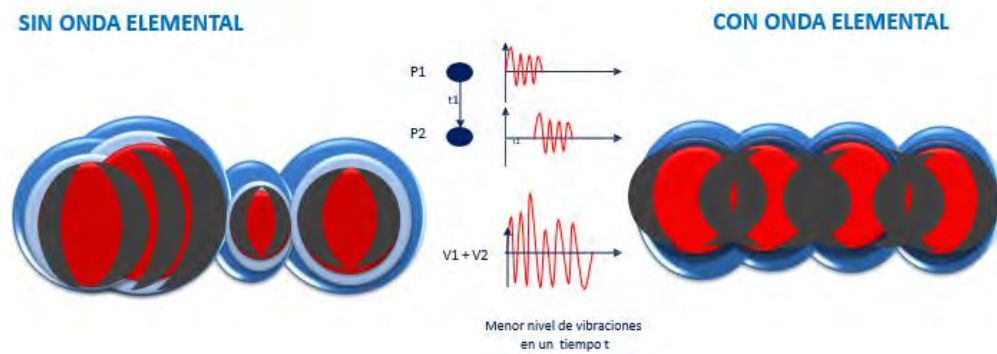


Figura 49. Representación de acoples de ondas  
Elaboración propia.

El análisis de la prueba de onda elemental consiste en la detonación de un taladro independiente, el cual se detona de manera aislada de la malla de voladura, la detonación es registrada por un geófono instalado en dirección de las estructuras que se busca cuidar en las posteriores voladuras. El análisis se hace mediante un trabajo de gabinete en cual después de realizar la interpretación de todos los datos obtenidos por el geófono se tiene como resultado los tiempos entre taladros y entre filas.

### 4.3. Análisis de pruebas

#### A. Prueba de cráter

La zona en donde se llevó a cabo la prueba de cráter se ubica en el nivel 3780, como se logra apreciar en el plano.

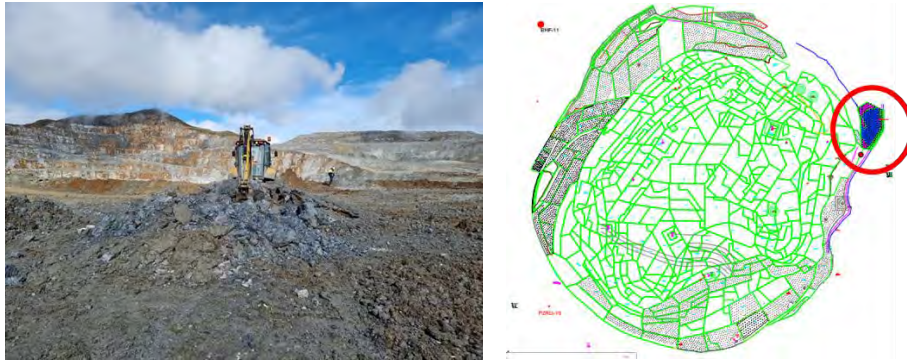


Figura 50. Pruebas en campo – Cerro Corona  
Elaboración propia.

Una vez que se tuvo la ubicación del taladro de la prueba, este fue perforado, cargado y detonado en un dominio de alteración argílica y potásica. Pasada la voladura se realizó la excavación del taladro y su respectivo levantamiento topográfico.



Figura 51. Posterior a la voladura en la prueba de crater – Cerro Corona  
Elaboración propia.

#### RESULTADOS DE LA PRUEBA:

Una vez realizada la prueba se hizo el levantamiento de las pruebas, obteniendo los resultados siguientes.



Figura 52. Representación de prueba de crater  
Elaboración propia.

Con los resultados del levantamiento topográfico se tiene el diámetro del cráter es de 7 m.

Esta información es ingresada y representa el espaciamiento máximo el cual podría aplicarse en el sector de prueba realizado. Usando el software de simulación JKSIMBLAST y ajustando a los resultados obtenidos con los datos reales del explosivo, se puede determinar el requerimiento energético o kilos de explosivo a recomendar.

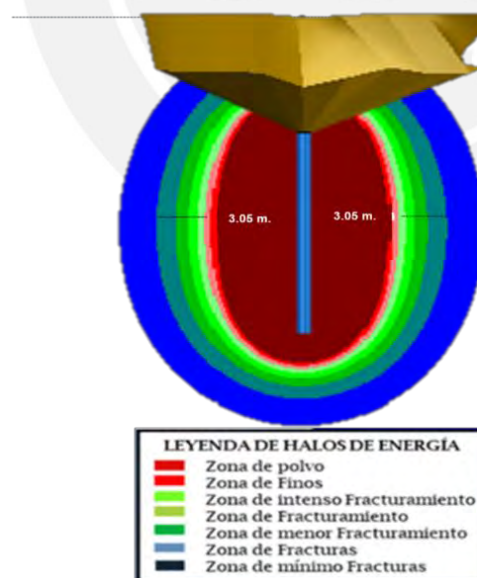


Figura 53. Representación halo de energía de la prueba de cráter.  
Elaboración propia.

### PROPUESTA:

Acorde a los resultados obtenidos los parámetros que estamos utilizando

tanto burden como espaciamiento en desmante para alteración argílica y potásico, se propone utilizar la malla de 6.1 x 7.0 m. desmante.

## B. Prueba de campo cercano y filtro de pre-corte.

Tabla 5. Cálculo de la velocidad de propagación del macizo rocoso VP.

CÁLCULO DE $V_p$ – MEDIANTE CROSS HOLE		
Distancia G1-G2 (m)	Diferencial de tiempo	$V_p$ (m/s)
4.085	0.002075	1983.8
		6

Elaboración propia.

Cálculo de la vibración máxima de control velocidad pico partícula crítica

PPVc

Tabla 6. Cuadro de cálculo de vibración máxima.

Litología	$\sigma_t$ (Mpa)	E (Gpa)	$V_p$ (m/s)	PPVc (mm/s)
Potásito competente	5.5	8.9	1983.86	1170

Elaboración propia

Definición del criterio de daño según el criterio de Holmberg&Pearsson.

Tabla 7. Criterios de Potásico Competente, Para el sector en estudio tenemos los siguientes datos considerando la resistencia a la tracción.

Potásico Competente			
Criterio	Límite PPV (mm/s)	Nivel de Daño	Nivel de Daño
>8 x PPVc	9360	$\infty$	>>fracturamiento
(4-8) x PPVc	4680	9360	Intenso fracturamiento
(1-4) x PPVc	1170	4680	Creación de nuevas Fracturas
(1/4 x 1) x PPVc	293	1170	Extensión de Fracturas existentes
<1-4 x PPVc	0	293	<<No genera daño

Elaboración propia

Para el sector en estudio tenemos los siguientes datos considerando la resistencia a la tracción.

Tabla 8. Cálculo de VP de la roca intacta.

Datos de laboratorio	Potásico
Módulo de Young E (GPa)	8.9
Módulo de Poisson $\nu$	0.28
Densidad Roca $\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )	2.55
$V_p$ (m/s) roca intacta	2112.3
	2

Elaboración propia.

Cálculo de la vibración máxima de control velocidad pico partícula crítica PPV<sub>c</sub> y la velocidad pico partícula crítica del macizo rocoso PPV<sub>CMR</sub>.

El criterio de daño según el criterio de Holmberg&Pearsson resulta 1,170 para unidad conformada litológicamente por potásico no competente, potásico competente y argílico 2.

Con lo cual se obtiene como PPV<sub>cmr</sub> 647 mm/s. De estos datos se genera la siguiente tabla la cual nos sirve como guía para el cuidado de macizo rocoso.

Tabla 9. Criterios de Potásico Competente, cálculo de la vibración y la velocidad pico partícula crítica del macizo rocoso PPV<sub>cmr</sub>.

		<b>Criterio</b>	<b>Descripción del daño inducido</b>
<b>Zona 1</b>	1170	Zona 1 > PPV <sub>c</sub>	Se supera la resistencia a la tracción de la roca intacta, por lo que se produce ruptura de la matriz y se generan nuevas estructuras
<b>Zona 2</b>	647	PPV <sub>c</sub> > Zona 2 > PPV <sub>cmr</sub>	Se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso, por lo que se produce ruptura
<b>Zona 3</b>	647	Zona 3 > PPV <sub>cmr</sub>	No se produce daño inducido al macizo rocoso producto de la voladura

Elaboración propia

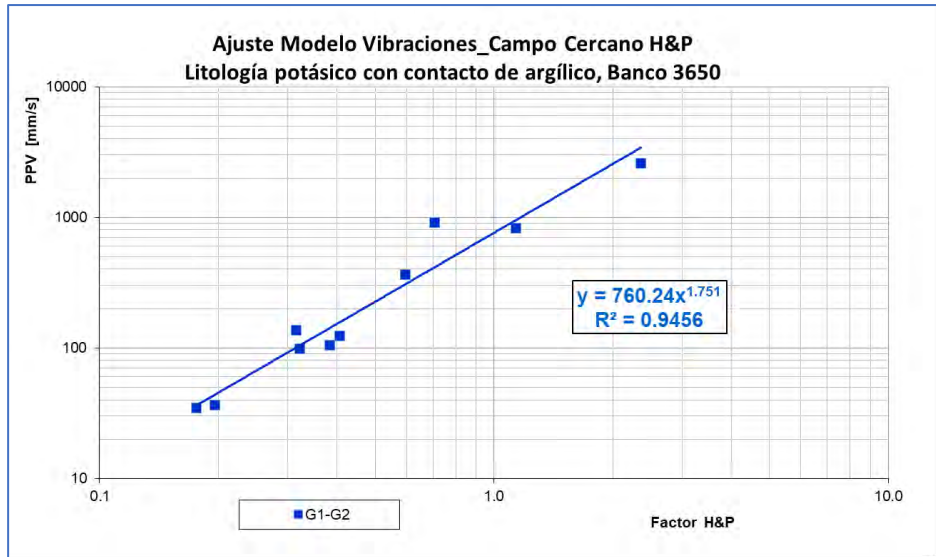


Figura 54. Generación del modelo de vibraciones en campo cercano.  
Elaboración propia.

La ecuación siguiente, muestra el modelo ajustado.

$$PPV = 760.24X^{1.751} \text{----->}$$

Donde:  $K = 760.24$  y  $\alpha = 1.751$

Los valores  $K$  y  $\alpha$  son los valores propios para el sector de evaluación.

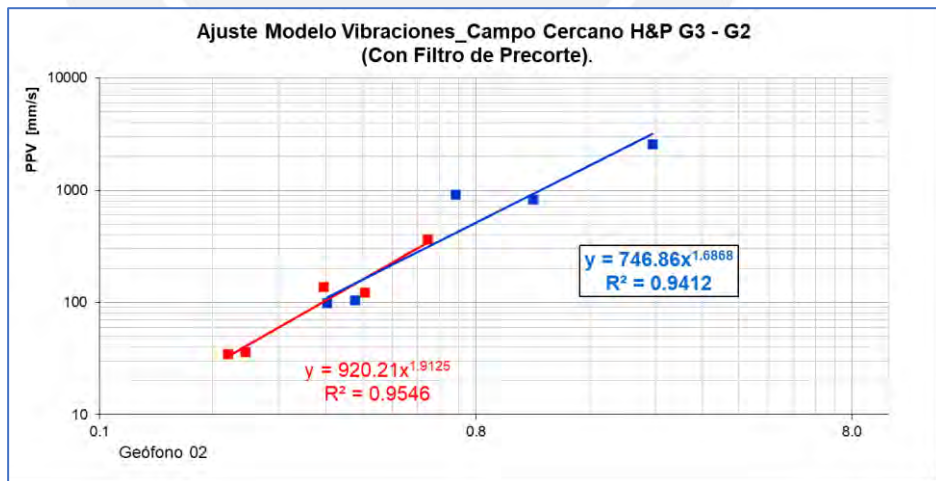


Figura 55. Evaluación del filtro de Pre-Corte  
Elaboración propia.

Filtro de Pre-corte con Geófono 2:

$$\text{Efecto de filtro} = \left( \frac{920.21 - 746.86}{746.86} \right) * 100 = 23\%$$

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de filtro de precorte, siendo 23% los porcentajes de filtro del pre-corte actual y considerando la escala de eficiencia de filtro que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10. Representación de escala de eficiencia de filtro de Precorte.

Rango de Filtro	Calificación
<20%	Muy malo
21% - 30%	Malo
31% - 40%	Regular
41% - 54%	Bueno
55% - 65%	Muy Bueno
>65%	Excelente

Elaboración propia.

Se puede concluir que el pre-corte usado actualmente, es Malo o poco eficiente. Por lo tanto, la aplicación de pre-corte en esta zona de la mina no asegura cumple su función de filtración de vibraciones.

### C. Prueba de onda elemental

Se realiza la prueba de onda elemental en la cual se obtiene los tiempos óptimos de secuencia de salida entre taladros y entre filas, mediante la aplicación del software.

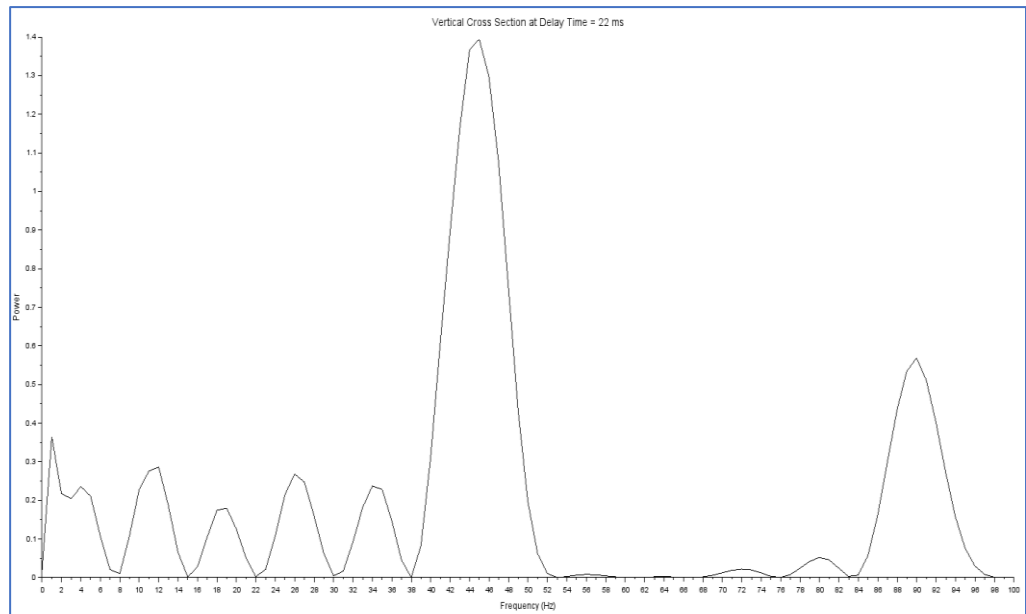


Figura 56. Onda elemental 1  
Elaboración propia.

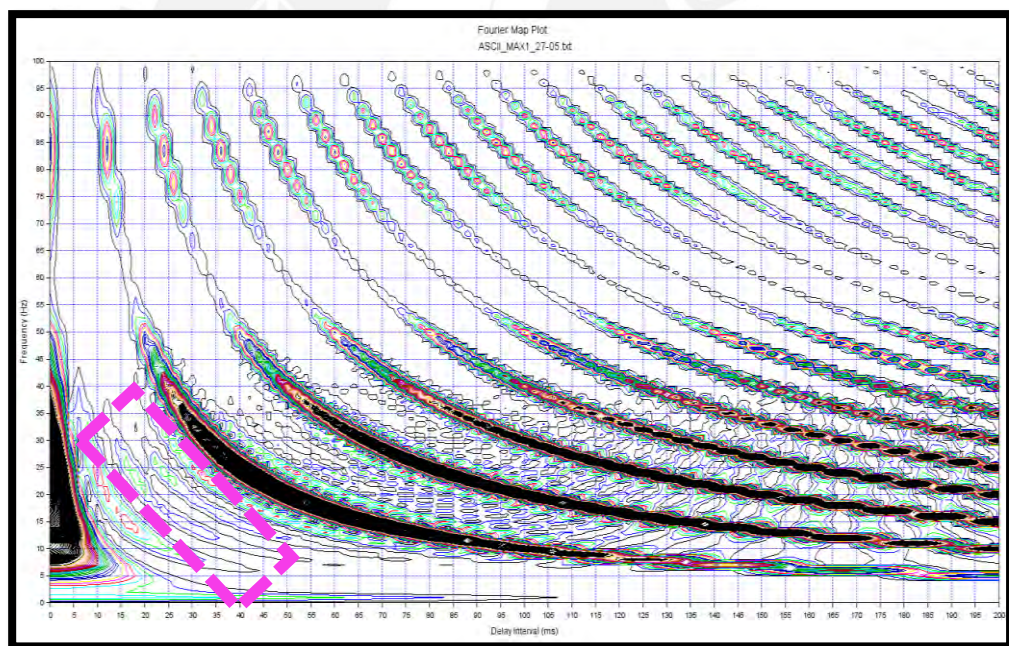


Figura 57. Onda elemental 1.2  
Elaboración propia.

De las pruebas se determina el tiempo entre 7 - 17 ms entre taladros y entre 110 - 160 ms entre filas.

#### 4.4. Diseño de Perforación y Voladura

Para el diseño de la malla de voladura se pondrá en práctica los resultados de las pruebas descritas en el capítulo anterior; por lo cual, se realizará una voladura controlada a través de los diseños que se proponen a continuación:

- Taladros de precorte

Tabla 11. Malla de Perforación para Precorte.

Dureza	Malla E (m)
Dureza 4	1.6
Dureza 5	1.5

Elaboración propia

- Taladros de buffer

Tabla 12. Malla de Perforación – Taladros Buffer.

Mallas estándar				Mallas propuestas			
Dureza	Malla E x B (m)			Dureza	Malla E x B (m)		
Dureza - 4	5.0	x	4.3	Dureza - 4	5.0	x	4.8
Dureza - 5	4.3	x	4.3	Dureza - 5	5.0	x	4.3

Elaboración propia

- Taladros de producción

Tabla 13. Malla de Perforación - Taladros de producción.

Mallas estándar				Mallas propuestas			
Dureza	Malla E x B (m)			Dureza	Malla E x B (m)		
Dureza - 4	6.5	x	5.7	Dureza - 4	7.0	x	6.1
Dureza - 5	6.0	x	5.2	Dureza - 5	7.0	x	6.1

Elaboración propia.

En los cuadros descritos se describe las mallas estandarizadas y las nuevas mallas propuestas para las voladuras.

#### Diseño de carga

Se procede a realizar el diseño de carga que se aplicada a cada columna de la malla, tanto para buffer y producción. Las cargas varían según la dureza de la roca las cuales son detalladas en los siguientes cuadros:

Dureza 4

Diseño de malla - Jhonatan Torres  
Precorte, Buffer y Producción - Dureza 4

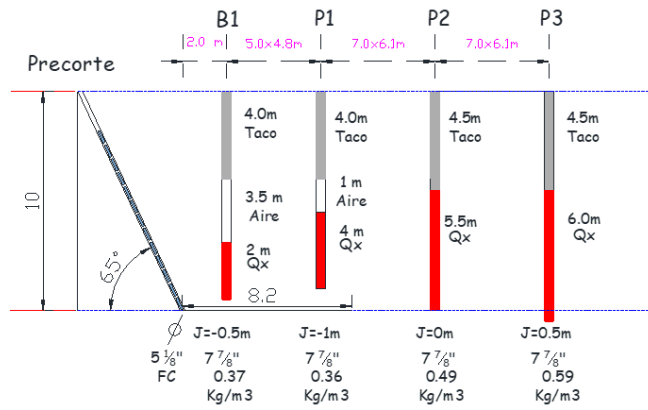


Figura 58. Diseño de cargas – Dureza 4.  
Elaboración propia.

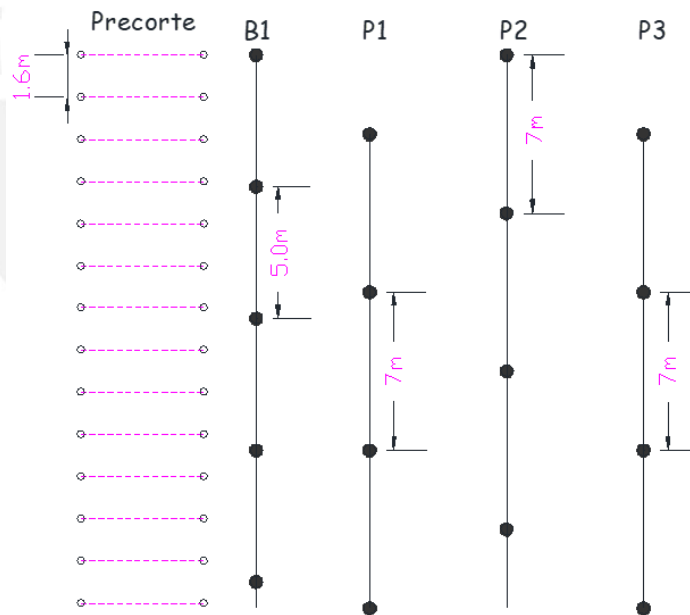


Figura 59. Diseño de mallas – Dureza 4.  
Elaboración propia.

Dureza 5

Diseño de malla - Jhonatan Torres  
Precorte, Buffer y Producción - Dureza 5

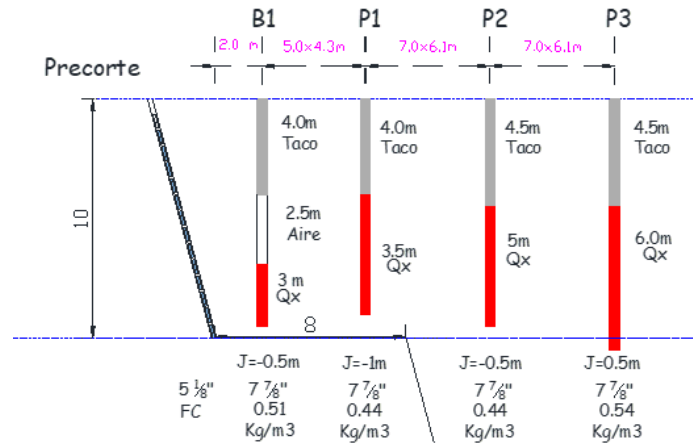


Figura 60. Diseño de cargas – Dureza 5.  
Elaboración propia.

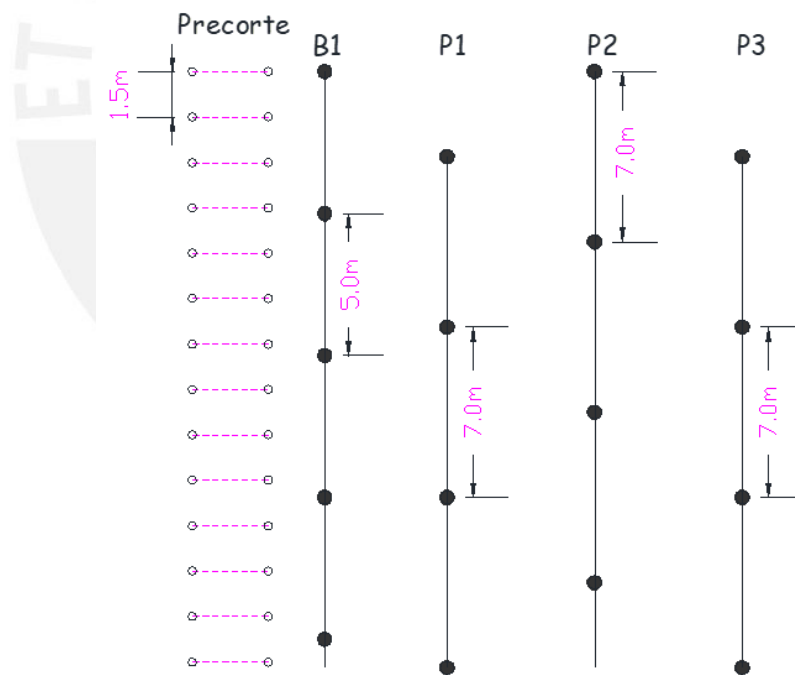


Figura 61. Diseño de mallas – Dureza 5.  
Elaboración propia.

Se ha seleccionado una amplia cantidad de proyectos de perforación y voladura para aplicar los cálculos descritos, los proyectos son los siguientes:

Tabla 14. Proyectos seleccionados para la aplicación de la optimización.

Proyecto	Precorte
3770 311	Si
3770 312	No
3780 289	Si
3780 290	No
3780 291	Si
3780 292	No
3790 258	No
3790 259	No
3790 260	No
3790 288	No
3800 247	No
3800 249	Si
3800 250	No
3810 236	Si
3810 237	No

Elaboración propia

Se realizó la secuencia de salida de cada uno de los proyectos. A continuación, se muestra la secuencia de amarre para la levadura.

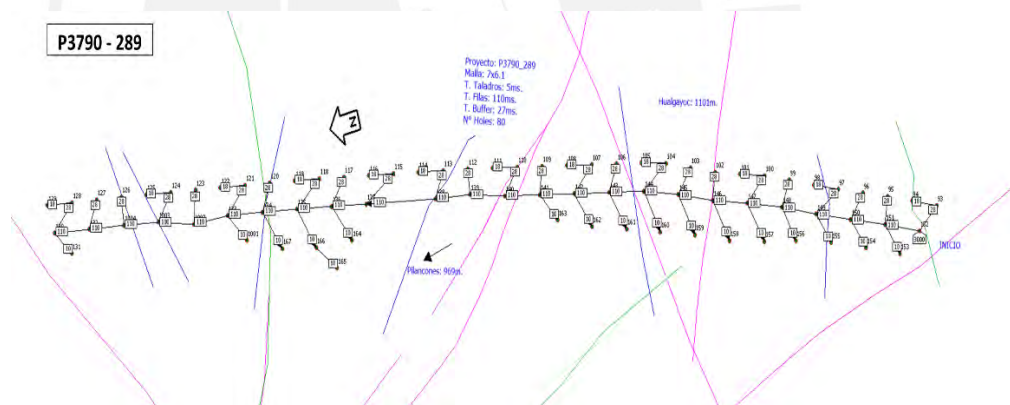


Figura 62. Secuencia de amarre para la levadura.  
Elaboración propia.

#### 4.5. Análisis de Resultado

El resultado será medido de 2 maneras: por fragmentación y por análisis geotécnico.

En la fragmentación se obtuvo los siguientes resultados:

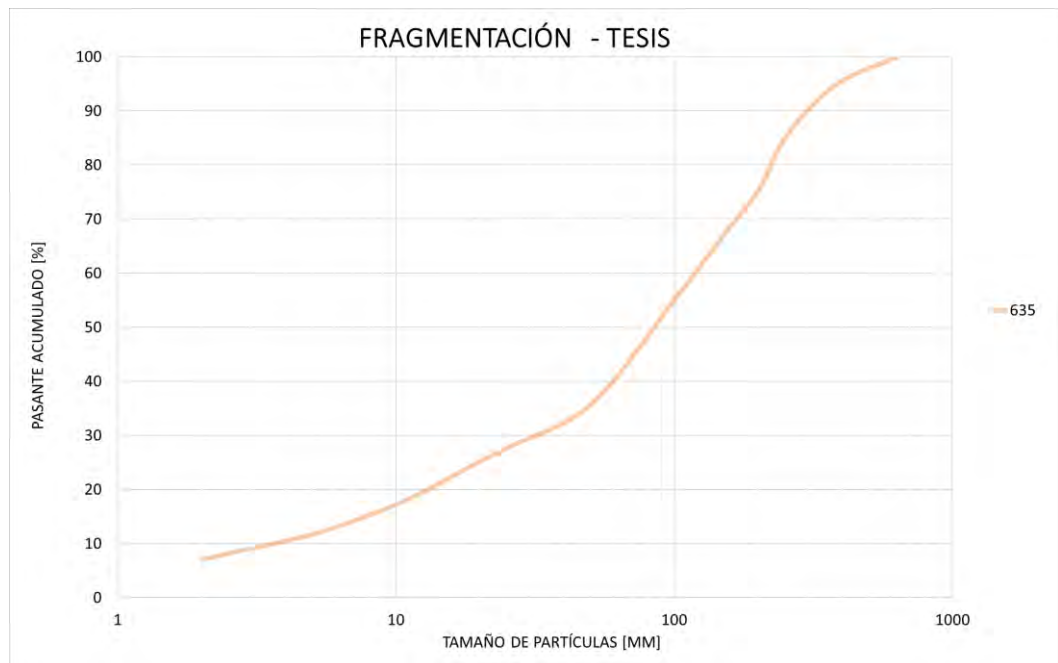


Figura 63. Resultado de fragmentación post-voladura. Elaboración propia.

Se obtiene la fragmentación adecuada dentro de los estándares establecidos en la unidad minera, con lo cual el diseño de la malla cumple con el objetivo inicial.

Los Kpis estandarizados en la unidad minera son para el P80 de 304.5 mm, en el cual post voladura se obtuvo un resultado de 231 mm; el % Passing <1" es de 15 mm, y en los resultados se obtuvo 12 mm en promedio.

#### Análisis geotécnico:

Para el análisis geotécnico se aplicó la metodología SOP, el cual esta constituido de los siguientes parámetros: factor de condición y diseño. Ambos parámetros tienen una puntuación individual igual a 100 puntos, los cuales luego son analizadas en un cuadro SOP, lo cual nos indicara el nivel de seguridad obtenido.

### Factor de condición

Este parámetro se evalúa según mapeo visual en campo mediante los siguientes paradigmas:

- Cañas visibles: 20 puntos
- Grietas inducidas: 10 puntos
- Condición de discontinuidades menores: 10 puntos
- Bloques inestables: 30 puntos
- Geometría de perfil: 20 puntos
- Presencia de agua: 10 puntos

### Diseño

Esta evaluación se desarrolla mediante la aplicación de software geotécnicos los cuales evalúan los siguientes aspectos:

- Posicion de toe: 15 puntos.
- Posicion de cresta: 15 puntos.
- Cara de banco: 25 puntos.
- Ancho de berma: 45 puntos.

El resultado final obtenido se muestra en el cuadro resumen del análisis SOP, el detalle de cada voladura realizado se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla 15. Cuadro resumen de los proyectos de voladura con los resultados geotécnicos.

Proyecto	Precorte	Número de Taladros	Factor de Carga (kg/bcm)	Burden (m)	Espaciamiento (m)	Tiempo entre taladros (ms)	Tiempo entre filas (ms)	Tipo de Explosivo	Factor de diseño (%)	Factor de condición (%)
3770 311	SI	58	0	-	1.6	-	-	POWERSPLIT	79	75
3770 312	NO	117	0.54	6.1	7	10	141	MEQ82	79	75
3780 289	SI	127	0	-	1.5	-	-	POWERSPLIT	70.1	65.3
3780 290	NO	47	0.58	6.1	7	10	110	MEQ73/MEQ82	70.1	65.3
3780 291	SI	94	0	-	1.4	-	-	POWERSPLIT	68.1	70
3780 292	NO	72	0.26	6.1	7	10	142	MEQ82	68.1	70
3790 258	NO	89	0.25	4.8	5.5	10	160	MEQ91	69	75
3790 259	NO	121	0.49	4.8	5.5	10	110	MEQ91	69	75
3790 260	NO	25	0.06	4.8	5.5	10	110	MEQ91	69	75
3790 288	NO	77	0.69	6.1	7	10	160	MEQ91/EMULSIÓN	71	72
3800 247	NO	149	0.47	6.1	7	10	110	MEQ82	68.5	73
3800 249	SI	46	0	-	1.5	-	-	POWERSPLIT	68.5	73
3800 250	NO	58	0.4	6.1	7	10	130	MEQ82/EMULSIÓN	83	76
3810 236	SI	70	0	-	1.6	-	-	POWERSPLIT	60	74
3810 237	NO	133	0.59	6.1	7	10	142	MEQ82	60	74

Elaboración propia

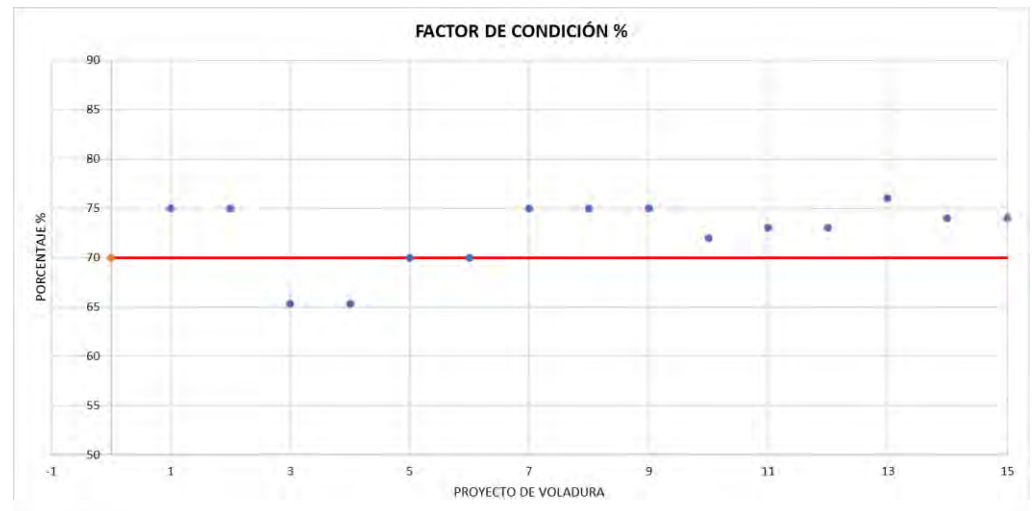


Figura 64. Resultado geotécnico de factor de condición.  
Elaboración propia.

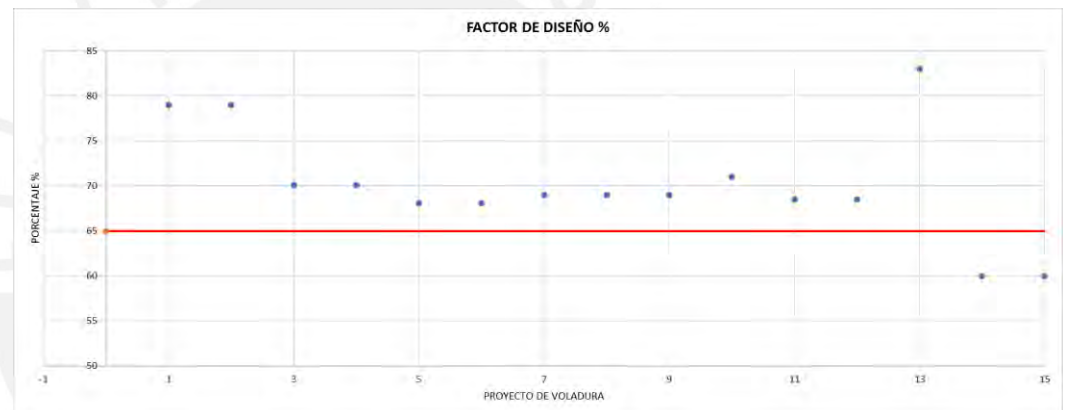


Figura 65. Resultado geotécnico de factor de diseño.  
Elaboración propia.

## Capítulo 5. Conclusiones

Con las pruebas realizadas se desarrolló la optimización de las mallas de perforación y voladura, con lo cual, se obtiene lo siguiente:

- Las pruebas se llevaron a cabo con todos los cumplimientos requeridos en aspectos de seguridad y medio ambiente, en las cuales se logró obtener parámetros de perforación y voladura óptimos para el desarrollo de la fase 11 de Cerro María.
- Los parámetros de perforación (B x E) propuestos, en conjunto con los diseños de carga y elección de tiempos óptimos en la secuencia de salida dieron como resultado una fragmentación que se encontraba dentro de los KPI's requeridos por la mina y no se afectó las ratios de excavación.
- En la Evaluación de Taludes mediante el análisis SOP, se determinó que solo un proyecto estuvo por debajo del porcentaje de evaluación requerida (70%), debido a esto se determinó que los parámetros obtenidos permiten que el minado se realice dentro de los estándares de seguridad requeridos.

## Capítulo 6. Recomendaciones

Culminado la investigación daremos las siguientes recomendaciones para los interesados en temas de explosivos en voladuras a tajo abierto.

- Se recomienda realizar pruebas por cada litología del sitio, y así tener una población más amplia de estudios y poder ajustar algunos parámetros obtenidos.
- Durante las pruebas se pudo encontrar que los operarios de voladura generaban un mal carguío de taladros de precorte, doblando hasta 6 salchichas por taladros, lo cual en roca suave genera un mayor daño al talud por el confinamiento de la carga explosiva.

## Referencias

- Bernaola-Alonso, J., Castilla-Gómez, J., Herrera-Herbert, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería.  
[https://oa.upm.es/21848/8/20131007\\_PERFORACION\\_Y\\_VOLADURA.pdf](https://oa.upm.es/21848/8/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf)
- Bravo-Sánchez, I.L. (2018). Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile].  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168704/Estudio-de-vibraciones-inducidas-por-tronadura-en-Minera-Spence.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- CINTEX, C. d. (2006). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Chile : Blastechnology A.B.N.
- Cornejo-Chacón, P. A., & Huamán-Rivas, P. A. (2020). *Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RPUC\\_264b07083a29b4f18188f1d3371198aa](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RPUC_264b07083a29b4f18188f1d3371198aa)
- Díaz-collantes, W.E., Marín-Silva, I.L.. (2019). *Efecto de las vibraciones generadas por voladura de una empresa minera, en las viviendas del caserío de Pílancones, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte].  
<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26093/Diaz%20Collantes%20Walter%20Eduardo%20-%20Mar%C3%ADn%20Silva%20Issamar%20Lizzeth.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dirección general de asuntos ambientales. (1995). *Guía ambiental para la perforación y voladuras en operaciones mineras*.

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5217278/Gu%C3%ADa%20Ambiental%20para%20la%20Perforaci%C3%B3n%20y%20Voladura%20en%20Operaciones%20Mineras.pdf?v=1696276281>

ENAEEX. (2014). *Manual de Tronadura ENAEEX*. CHILE: Gerencia Técnica ENAEEX S.A.

EXSA Soluciones S.A. (2013). *Manual práctico de voladura*.

<https://online.fliphtml5.com/hqjn/rypz/#p=1>

GeoBlast. (2022). 1º seminario geoblast abril 2022, modelamiento, monitoreo y control de vibraciones para minimizar los daños inducidos por voladuras. <https://geoblast.pe/1-seminario-geoblast-abril-2022/>

Giraldo, F. (2010). *Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería].

[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_924bc9acd91a40c947bd790edf672339](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_924bc9acd91a40c947bd790edf672339)

Giraldo-Iriarte, F.A. (2010). *Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_924bc9acd91a40c947bd790edf672339/Details](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_924bc9acd91a40c947bd790edf672339/Details)

Giraldo-Iriarte, F.A. (2010). *Control de vibraciones para casas de tierra en Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_924bc9acd91a40c947bd790edf672339](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_924bc9acd91a40c947bd790edf672339)

- GoldFields. (2020). Mineral resources and mineral reserves supplement to the integrated annual report. <https://www.goldfields.com/pdf/investors/integrated-annual-reports/2020/mmr-2020.pdf>
- Gonzales, L. (2011). *"Inicio de Operaciones en Mina Cerro Corona"* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_6dee4f398352267d1ee147c89c9088fe/Details](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_6dee4f398352267d1ee147c89c9088fe/Details)
- Ingemmet. (2019). Inspección geológica en la presa de relaves de la unidad minera cerro corona. [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2112/1/A6890-Inspecci%C3%B3n\\_geol%C3%B3gica\\_presa\\_relaves\\_Cerro\\_Corona-Cajamarca.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2112/1/A6890-Inspecci%C3%B3n_geol%C3%B3gica_presa_relaves_Cerro_Corona-Cajamarca.pdf)
- Knight Piesold Consulting. (2005). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Cerro Corona*. [https://www.goldfields.com.pe/upload/gold\\_fields\\_la\\_cima/Resumen-Ejecutivo-EIA.pdf](https://www.goldfields.com.pe/upload/gold_fields_la_cima/Resumen-Ejecutivo-EIA.pdf)
- Konya, C. J. (1998). *Diseño de voladuras*. <https://biblioteca.unasam.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=19198>
- López-Pomareda, E. S. (2016). *Estudio geotécnico y diseño del talud final de una mina a cielo abierto aplicando modelos numéricos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMS\\_8ca5a13d64868a64dd9fcaed763e5b88/Details](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMS_8ca5a13d64868a64dd9fcaed763e5b88/Details)
- Lozada, P.L., Prado, J.M. (2023). Método experimental para determinar el comportamiento vibracional de explosivos de baja energía y su impacto en el control de daño a Taludes. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PERM35-222.pdf>

- Manrique, W. (2013). *Evaluación Hidrogeológica a partir del drenaje del Tajo Cerro Corona*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].  
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4717>
- Mendoza-Loayza, J. A. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay*. [Tesis de pregrado, PUCP. ]  
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/7614>.
- MineMate Plus. (2011). *Manual del operador Minemate Plus* (Vol. 4). (C. G. A, Trad.)  
Chile: Instantel World Leader.
- Osinergmin. (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneos.  
[https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf)
- Quispe-Mamani, R., Reyes-Flores, A.J. (2023). Diseño de malla de perforación y voladura, para mejorar la estabilidad de taludes, en la Unidad Minera Utuns. [Tesis de pregrado, Universidad continental].  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13427/1/IV\\_FIN\\_110\\_TE\\_Quispe\\_Reyes\\_2023.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13427/1/IV_FIN_110_TE_Quispe_Reyes_2023.pdf)
- Romero, D. (1991). *"Geología Económica y Génesis de la Mina Cañon, Hualgayoc – Cajamarca"* (Tesis de grado). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Saldaña-Villacorta, L., Mujica-Yépez, A.E. (2018). Diseño y construcción de un domo geodésico de frecuencia 3, una experiencia de enseñanza y construcción con participación de la comunidad, 3(4), 89-100.  
[https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4751/9/B086-Compendio\\_mineria\\_yacimientos\\_Peru-.pdf.txt](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4751/9/B086-Compendio_mineria_yacimientos_Peru-.pdf.txt)

Vereau-Jave, J.E. (2019). Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del yacimiento Corona. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0335.pdf>

