

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERA**



**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE VOLADURA USANDO DETONADORES  
ELECTRÓNICOS PARA MINERÍA SUBTERRÁNEA APLICADO A VETAS  
ANGOSTAS - U.M. HUARÓN**

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

**AUTORES:**

Diego Javier Sánchez Claudio

Luis Enrique González Ayala

**ASESOR:**

Ing. Mg. Luis Mendieta Britto

Lima, mayo del 2022

## RESUMEN DE TESIS:

La presente tesis cuenta en desarrollar las bondades de los detonadores electrónicos para minería subterránea de vetas angostas, el caso de estudio se realizó en la U.M. Pan American Silver Huarón S.A.

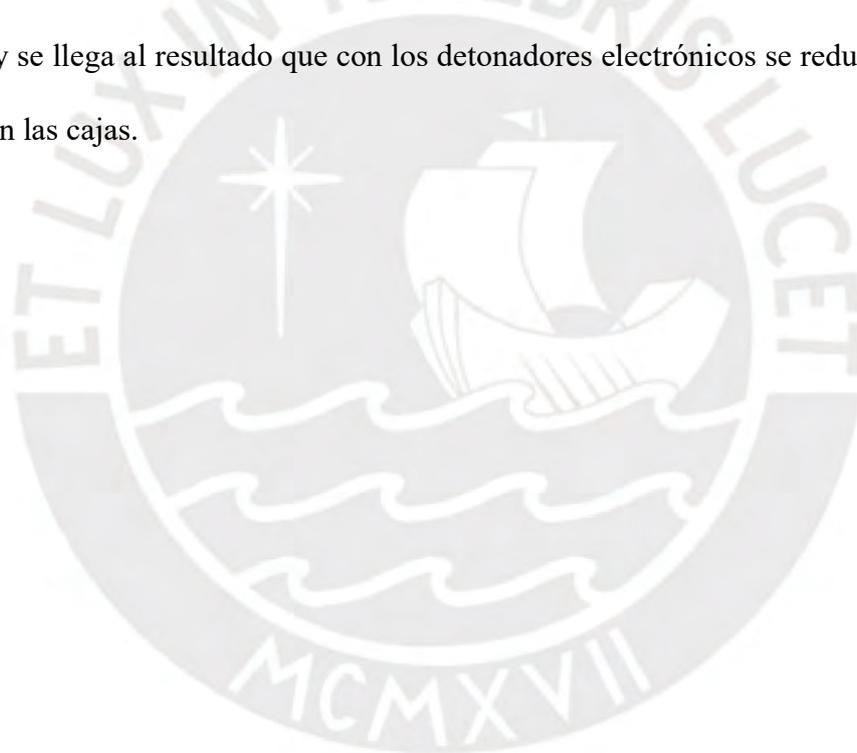
Los detonadores electrónicos tienen como objetivo principal segregar el mineral y el desmonte con una sola voladura, lo que anteriormente se conocía como método de circado. Esta segregación mineral/desmonte genera una ley de plata menos diluída de gran valor (gr/Tn) a comparación de los detonadores pirotécnicos. Asimismo, según los aspectos técnicos las pruebas indican que los detonadores electrónicos tienen mayor eficiencia de avance 93% y una menor sobre rotura 7%.

Los detonadores electrónicos al ser totalmente programables, se configuran los retardos de cada detonador con la finalidad de generar la segregación, se debe realizar una nueva malla de perforación con la característica principal de realizar el arranque en la estructura del desmonte ya que deseamos que la mayor cantidad de explosivo y energía salga en un primer tiempo a una longitud de 20 metros mientras que la estructura de mineral salga en un segundo tiempo a la longitud de 5 metros.

Los beneficios económicos son considerables, los detonadores electrónicos se configuran en una malla de perforación de 28 taladros generando un costo de explosivo de US\$ 181.33 mientras que los detonadores pirotécnicos se configuran en una malla de perforación de 30 taladros generando un costo de explosivo de US\$ 191.78. Asimismo, el costo unitario de cada detonador electrónico es de US\$ 11.50, a contraste del pirotécnico que cuesta US\$ 1.40. Si bien encarece el costo del producto el beneficio de la segregación genera una mejor ley de plata, tal como se muestra el siguiente cuadro:

	<b>Electrónico</b>	<b>Pirotécnico</b>	<b>Variación</b>
<b>Ley Ag (gr/Ton)</b>	190.06	112.75	77.31
<b>VPT (US\$/Ton)</b>	137.19	81.39	55.80
<b>Utilidad por disparo (US\$)</b>	20,469	9,628	10,841
<b>Utilidad mensual (US\$)</b>	3,634,030	1,882,141	1,751,889

Se comprueba la ventaja económica y operacional del uso de los detonadores electrónicos; además, aporta a las mejores prácticas de seguridad de las operaciones mineras subterráneas ya que se ha realizado un análisis de sismicidad y afectación de las cajas para ambos tipos de detonadores y se llega al resultado que con los detonadores electrónicos se reduce en 30% las vibraciones en las cajas.



**Abstract:**

This thesis consists of developing the benefits of electronic detonators for underground mining of narrow veins, case study was conducted at the U.M. Pan American Silver Huarón S.A.

Electronic detonators have as their main objective to segregate ore and dismantling with a single blast, what was previously known as the circado method. This mineral segregation/dismantling generates a less dilute silver grade of great value (gr/Tn) compared to pyrotechnic detonators. Also, according to the technical aspects, the tests indicate that electronic detonators have a higher feed efficiency of 93% and a lower breakage of 7%.

The electronic detonators, being fully programmable, the delays of each detonator are configured in order to generate segregation, a new drilling mesh must be made with the main feature of performing the start in the dismantling structure since we want the greatest amount of explosive and energy to come out in a first time at a length of 20 meters while the ore structure comes out in a second time to the length of 5 meters.

The economic benefits are considerable, the electronic detonators are configured in a drilling mesh of 28 holes generating an explosive cost of US\$ 181.33 while the pyrotechnic detonators are configured in a drilling mesh of 30 drills generating an explosive cost of US\$ 191.78. Also, the unit cost of each electronic detonator is US\$ 11.50, in contrast to the pyrotechnic that costs US\$ 1.40. Although the cost of the product increases, the benefit of segregation generates a better silver grade, as shown in the following table:

	<b>Electronic</b>	<b>Pyrotechnics</b>	<b>Variation</b>
<b>Ore Grade Ag (gr/Ton)</b>	190.06	112.75	77.31
<b>NSR (US\$/Ton)</b>	137.19	81.39	55.80
<b>Profit per Shot (US\$)</b>	20,469	9,628	10,841
<b>Monthly Profit (US\$)</b>	3,634,030	1,882,141	1,751,889

The economic and operational advantage of the use of electronic detonators is verified; in addition, it contributes to the best safety practices of underground mining operations since an analysis of seismicity and affectation of the boxes has been carried out for both types of detonators and the result is reached that with the electronic detonators the vibrations in the boxes are reduced by 30%.



A mi mamá por creer en mí, mi hermano, a mis mentores el Ing. Manuel Deza e Ing. Alex Zapata por darme las facilidades de innovación y desarrollo de nuevas tecnologías. Para Adriana por su motivación y por siempre impulsarme a seguir avanzando.

A mi madre Luisa, mis hermanos Juan y Ana por su apoyo, motivación y consejos para seguir adelante en la vida; a mi padre Luis por mostrarme esta hermosa carrera de Ingeniería de Minas.

En memoria de mi querido abuelo, Teófilo Ayala Quispe, quien nunca ha dejado de viajar por el mundo, y ahora más arriba que nunca lo sigue haciendo.

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1. Justificación .....	8
1.2. Alcances .....	8
1.3. Objetivos .....	9
1.3.1. Objetivo general .....	9
1.3.2. Objetivos específicos.....	9
1.4. Antecedentes del estudio .....	10
1.5. Hipótesis.....	12
1.5.1. Hipótesis general .....	12
1.5.2. Hipótesis específicas .....	12
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1. Bases teóricas.....	13
2.1.1. Definición de explosivo.....	13
2.1.2. Propiedades de los explosivos .....	13
2.1.3. ANFO .....	16
2.1.4. Dinamita .....	17
2.1.5. Emulsiones.....	21
2.1.6. Tipos de Emulsión .....	24
2.2. Clasificación general de los explosivos .....	28
2.2.1. Clasificación de los explosivos químicos .....	29
2.3. Parámetros de voladura.....	29
2.3.1. Burden .....	29
2.3.2. Espaciamiento .....	30
2.3.3. Taco.....	31
2.4. Sistemas de iniciación.....	32
2.4.1. Sistemas de iniciación no eléctricos .....	33
2.4.2. Partes de un detonador no eléctrico .....	35
2.5. Sistema Exel .....	36

2.5.1. Detonador Exel MS.....	36
2.5.2. Detonador Exel LP.....	38
2.6. Cordón Detonante Cordtex N .....	40
2.7. Mecha lenta o Carmex .....	42
2.8. Mecha rápida .....	42
2.9. Sistema de iniciación electrónicos .....	44
2.9.1. Ventajas de usar detonadores electrónicos.....	46
2.10. Diferencias entre detonadores electrónicos y pirotécnicos.....	46
2.11. Aplicación de los detonadores electrónicos.....	47
2.12. Sistema de iniciación electrónica .....	47
2.12.1. Sistema de Iniciación Electrónica eDev II .....	47
2.12.1.1 Detonadores electrónicos eDev II .....	48
2.12.1.2 Blast Box 610 .....	49
2.12.1.3 Scanner 260 .....	49
2.12.2. Sistema de Iniciación Electrónica I-Kon .....	49
2.13. Norma española de control de vibraciones producidas por voladuras .....	50
2.14. Clasificación de estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños ...	50
<b>3. DESARROLLO.....</b>	<b>53</b>
3.1. Resultados .....	53
3.1.1. Análisis de mallas usando detonadores electrónicos y pirotécnicos: .....	53
3.1.2. Vibraciones: .....	72
3.2. Análisis de resultados .....	76
3.2.1. Análisis de mallas usando detonadores electrónicos y pirotécnicos: .....	76
3.2.2. Indicadores de productividad .....	76
3.2.3. Costo total de explosivo de una malla de perforación:.....	78
3.2.4. Beneficio económico de voladura de una malla de perforación: .....	78
3.2.5. Análisis económico mensual usando detonadores electrónicos y pirotécnicos .....	79
3.2.6. Vibraciones: .....	80
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>

**5. RECOMENDACIONES.....83**

**6. BIBLIOGRAFÍA.....84**

**7. ANEXO .....86**



## Índice de figuras:

<i>Figura 1.</i> ANFO a granel.....	17
<i>Figura 2.</i> Exadit de Exsa .....	18
<i>Figura 3.</i> Dinamita Pulverulenta de Famesa .....	18
<i>Figura 4.</i> Gelatina especial de Exsa .....	20
<i>Figura 5.</i> Gelatina 75 de Famesa.....	20
<i>Figura 6.</i> Características de la Dinamita .....	21
<i>Figura 7.</i> Composición de la emulsión explosiva .....	22
<i>Figura 8.</i> Emulsión encartuchada EMULNOR .....	23
<i>Figura 9.</i> Camión bombeando la emulsión a granel SLURREX TC de Exsa.....	24
<i>Figura 10.</i> Senatel Pulsar – Orica.....	25
<i>Figura 11.</i> Senatel Ultrex – Orica.....	26
<i>Figura 12.</i> Senatel Magnafrac – Orica .....	27
<i>Figura 13.</i> Sistema de iniciación no eléctrico .....	33
<i>Figura 14.</i> Partes de detonador pirotécnico.....	34
<i>Figura 15.</i> Tubo de transmisión – tricapa.....	35
<i>Figura 16.</i> Partes del detonador pirotécnico.....	36
<i>Figura 17.</i> Detonador Exel MS- Orica .....	37
<i>Figura 18.</i> Detonador Exel LP – Orica.....	39
<i>Figura 19.</i> Cordón detonante Cordtex N – Orica .....	40

<i>Figura 20.</i> Carmex de Famesa.....	42
<i>Figura 21.</i> Mecha rápida de Famesa.....	43
<i>Figura 22.</i> Partes del detonador electrónico .....	44
<i>Figura 23.</i> Diferencias entre detonador no eléctrico y electrónico .....	45
<i>Figura 24.</i> Criterio de prevención de daños .....	51
<i>Figura 25.</i> Determinación de los parámetros característicos de la vibración.....	52
<i>Figura 26.</i> Orientación de los sensores.....	52
<i>Figura 27.</i> Segregación mineral/ desmonte .....	53
<i>Figura 28.</i> Malla N°1.....	55
<i>Figura 29.</i> Malla N°2.....	57
<i>Figura 30.</i> Malla N°3.....	59
<i>Figura 31.</i> Malla de perforación.....	62
<i>Figura 32.</i> Malla de perforación.....	63
<i>Figura 33.</i> Análisis de vibraciones con detonadores pirotécnicos y electrónicos .....	75
<i>Figura 34.</i> Factor de carga lineal (kg/m).....	76
<i>Figura 35.</i> Factor de potencia (kg/Tn).....	77

**Índice de tablas:**

<i>Tabla 1.</i> Ficha técnica ANFO .....	17
<i>Tabla 2.</i> Propiedades técnicas Senatel Pulsar .....	25
<i>Tabla 3.</i> Propiedades técnicas Senatel Ultrex.....	26
<i>Tabla 4.</i> Propiedades técnicas Senatel Magnafrac.....	28
<i>Tabla 5.</i> Propiedades técnicas Detonador Exel MS.....	37
<i>Tabla 6.</i> Rangos de tiempos de retardo del Detonador Exel MS.....	38
<i>Tabla 7.</i> Propiedades técnicas Detonador Exel LP.....	39
<i>Tabla 8.</i> Rangos de tiempos de retardo del Detonador Exel LP.....	40
<i>Tabla 9.</i> Propiedades técnicas Cordtex N.....	41
<i>Tabla 10.</i> Características Cordtex N.....	41
<i>Tabla 11.</i> Propiedades técnicas Carmex .....	42
<i>Tabla 12.</i> Propiedades técnicas Mecha rápida.....	43
<i>Tabla 13.</i> Propiedades técnicas Detonador electrónico eDev II.....	48
<i>Tabla 14.</i> Tiempos de retardo en función a la distribución de los taladros. ....	54
<i>Tabla 15.</i> Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N1 .....	56
<i>Tabla 16.</i> Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N2.....	58
<i>Tabla 17.</i> Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N3 .....	60
<i>Tabla 18.</i> Distribución de los taladros - detonadores electrónicos .....	63
<i>Tabla 19.</i> Distribución de los taladros - detonadores pirotécnicos.....	64

<i>Tabla 20.</i> Datos de entrada del diseño de malla de perforación .....	66
<i>Tabla 21.</i> Leyes in situ, pirotécnica y electrónica de las muestras .....	66
<i>Tabla 22.</i> Cálculo de VPT para los detonadores pirotécnico y electrónico.....	66
<i>Tabla 23.</i> Datos de salida y costo total de voladura .....	67
<i>Tabla 24.</i> Precios unitarios de detonadores y costo operativo sin carguío .....	69
<i>Tabla 25.</i> Costo del explosivo, costo del detonador, costo operativo sin carguío y costo total .....	69
<i>Tabla 26.</i> Número de disparos en función a parámetros de la malla.....	69
<i>Tabla 27.</i> Metraje mensual según el programa de vetas angostas .....	70
<i>Tabla 28.</i> Análisis económico por disparo .....	71
<i>Tabla 29.</i> Análisis económico mensual .....	71
<i>Tabla 30.</i> Parámetros geomecánicos del macizo rocoso y mineral en las labores de estudio .....	73
<i>Tabla 31.</i> Distancia escalar y velocidad pico partícula con detonadores pirotécnicos...	74
<i>Tabla 32.</i> Distancia escalar y velocidad pico partícula con detonadores electrónicos ...	75

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Justificación**

El presente proyecto de tesis se justifica por optar la elección de los detonadores electrónicos frente a los explosivos tradicionales por una serie de ventajas y beneficios que conlleva su uso aplicado a minería.

La introducción de los detonadores explosivos en las operaciones mineras permite incorporar trabajar en base a las tecnologías que garantiza la optimización del proceso de voladura mediante herramientas técnicas para reducir las anomalías y factores que afectan el macizo rocoso y el mineral.

El objetivo del proyecto es demostrar la viabilidad del uso de los detonadores electrónicos expresado en una reducción considerable de costos, mayor productividad de las operaciones, mayor control de la seguridad y salud en el trabajo; es decir buscar la optimización del proceso de voladura.

Es importante mencionar que varias de las unidades mineras peruanas, no cuentan con un sistema de gestión para implementar los detonadores electrónicos en sus labores, con lo que aumentan los costos operativos en el proceso de voladura y limpieza. Es por eso que se debe dar solución a este problema, controlar los riesgos y como consecuencia obtener un crecimiento económico para la Unidad Minera.

### **1.2. Alcances**

Como alcances en este proyecto se establecen comparaciones entre el proceso de voladura usando los detonadores electrónicos y detonadores pirotécnicos en distintas labores de la Unidad Minera Pan American Silver Huarón, desde el punto de vista de reducción de costos

operativos, incremento de la productividad en la voladura, mayor seguridad por el control de vibraciones que afectan al macizo rocoso.

La unidad minera Pan American Silver Huarón S.A. es una mina subterránea con reservas de plata, está ubicada en el distrito de Huayllay, provincia de Pasco, departamento de Pasco. El presente trabajo se elaboró con la información obtenida de las mediciones realizadas por los autores del mismo con alcance de los equipos de Orica Mining Services Perú S.A.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la efectividad de los detonadores electrónicos aplicados a Minería Subterránea de vetas angostas al segregar el mineral del desmonte reemplazando el método tradicional del circado.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a). Demostrar los beneficios económicos operacionales de los detonadores electrónicos en minería subterránea para vetas angostas.
- b). Analizar las mejoras en seguridad de los detonadores electrónicos a diferencia de los métodos tradicionales.
- c). Reducir las vibraciones y el control de excavaciones usando los detonadores electrónicos.
- d). Implementar nuevas tecnologías en voladura para la optimización de procesos operacionales.

#### 1.4. Antecedentes del estudio

**Romero Paucar, Royer (2016)**, en su trabajo de tesis “**Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el Tajo Toromocho – Mina Chinalco Perú S.A.**”, explica cómo la voladura usando detonadores electrónicos optimizar la fragmentación y seguridad en el Tajo Toromocho de la Mina Chinalco S.A. Para alcanzar dicho objetivo se eligió como población al total de los bancos de producción del Tajo Toromocho, con muestras de los bancos en el Lado Este con rocas de dureza 3 y 4, y los bancos del Lado Oeste con rocas de dureza 2 respectivamente. Para ambos sectores se disparó tanto con detonadores pirotécnicos y la misma cantidad con detonadores electrónicos. Por consiguiente, la voladura usando detonadores electrónicos dio mejores resultados que con los detonadores pirotécnicos.

Para el Lado Este el P80 mejoró en 5.4% y en términos de productividad la pala mejoró en 2.1%, la chancadora primaria en 5.3% y molienda en 4.2% correspondientemente. Por otro lado, en el Lado Oeste el P80 mejoró en 16.7% y en productividad la pala mejoró 7.0%, la chancadora primaria en 6.6% y la molienda en 5.4% respectivamente. Por último, el uso de detonadores electrónicos permitió manejar el control de los TQ (tiros cortados) mejorando la seguridad.

**Huamán Ubillús, Augusto (2010)**, en el trabajo de tesis “**Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú, seguridad y versatilidad**”, muestra las ventajas del sistema de detonación electrónica, resaltando la mejora en seguridad y versatilidad en base a las experiencias realizadas en campo. Se presentan las siguientes ventajas de los detonadores electrónicos:

- Reducción de los problemas de fragmentación que se producen especialmente en las zonas periféricas a las voladuras, tanto para minería superficial como obras civiles.

- La granulometría de las pilas de material volado es más homogénea y con la geometría necesaria para mejorar la productividad del equipo de carguío. A raíz de la mejor excavabilidad de la pila de material volado, los tiempos de espera que realizan los equipos de transporte se reducen, aumentando el rendimiento de los mismos en dicho proceso.
- Asimismo, al alimentar al chancador primario con material más homogéneo, se reducen también los tiempos de espera en dichos puntos, al no interrumpir el proceso de chancado debido a presencia de bolones que puedan quedar atascados en estos equipos.
- Además, la mayor exactitud de los detonadores electrónicos se traduce en minimizar las dispersiones al instante de detonar las cargas explosivas y de esta forma producir los efectos programados, evitando acoplamientos los cuales aumentan las vibraciones con todas las consecuencias que esto conlleva. De manera simultánea, garantiza y seguridad a la hora del disparo ya que se cuenta con una amplia gama de posibilidades de ubicación debido a su modo de "disparo remoto".

**Peña Paredes, Jaime Wilmer (2019)**, en el trabajo de tesis **"Reducir el porcentaje de dilución mediante el reemplazo de detonadores pirotécnicos por detonadores electrónicos en la Fase 5 del Tajo Isabelita – El Toro"**, permite implementar el uso de los detonadores electrónicos frente a los detonadores pirotécnicos, debido al dimensionamiento del minado permite la búsqueda de nuevas alternativas. El presente proyecto considera optimizar el porcentaje de dilución, utilizando iniciación electrónica, ya que brinda mejores alternativas en diseños de carga y secuencia de salida, garantiza pilas de material libres de contaminantes.

Por consiguiente, con la ejecución del proyecto empleando detonadores electrónicos se garantiza la reducción de costos en perforación, voladura y minado y a su vez maximiza la recuperación de mineral extraído del tajo.

**Mamani Valdez, Yony David (2018)** en el trabajo de tesis “**Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la Mina Toquepala**” tiene como objetivo principal estudiar y ofrecer oportunidades de mejora en la fragmentación del macizo rocoso, el cual se encuentra en las operaciones unitarias de perforación y voladura, empleando detonadores electrónicos, los que permiten brindar variados diseños de voladura en cuanto a configuración de tiempos de salidas de los taladros, que interactúan directamente con las propiedades y velocidad de onda del macizo rocoso. Este efecto brindará una calidad de granulometría que tendrá directa implicancia en las operaciones de carguío, acarreo y chancado. Finalmente, los resultados obtenidos se reflejan valores como fragmentación que mejoró en un 13.6%, permitiendo que la bolonería generada disminuyó en un 43.0%. Asimismo, el ciclo de minado de la Pala P&H4100 mejoró en un 12%, lo cual se plasmó en la velocidad de minado, porque ésta mejoró en un 10.0%.

## **1.5. Hipótesis**

### **1.5.1. Hipótesis general**

El uso de los detonadores electrónicos optimiza el proceso de voladura a diferencia de los detonadores pirotécnicos en las labores de la Mina Huarón.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

- a). La voladura con detonadores electrónicos incrementa la productividad de las operaciones mineras, y garantiza la reducción considerable de costos en la Unidad Minera de estudio.
- b). La voladura con detonadores electrónicos presenta mejoras en la seguridad y salud en el trabajo reflejado en el control de vibraciones en la Unidad Minera de estudio.
- c). Los detonadores electrónicos representan una innovación en el desarrollo de tecnologías para el campo de la minería subterránea.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases teóricas

#### 2.1.1. Definición de explosivo

“Los explosivos son una mezcla de sustancias combustibles y oxidantes, que al ser iniciadas producen una reacción exotérmica altamente rápida generando grandes presiones y liberan productos gaseosos, que al expandirse por altas temperaturas pueden efectuar un trabajo” (Curso de Voladura de Orica, 2013, p.16).

#### 2.1.2. Propiedades de los explosivos

##### 2.1.2.1. Densidad del explosivo

Según el curso de Voladura de Orica (2013), es el peso del explosivo por unidad de volumen del mismo, y se expresa en unidades de gr/mc<sup>3</sup>. Controla la concentración de energía en el taladro, y a su vez es un factor importante para hallar la cantidad de carga necesaria para llevar a cabo la voladura. Para los explosivos cuya densidad es menor a 1 gr/mc<sup>3</sup>, estos flotarán en agua. (p.20).

##### 2.1.2.2. Densidad de carga lineal

“Es la cantidad de carga explosiva que sube por un metro para un diámetro determinado”. (Curso de Voladura de Orica, 2013, p.22). Se expresa numéricamente mediante la siguiente fórmula y en unidades de Kg/m.

$$DCL = 0.507 * D^2 * \rho$$

Donde:

D es el diámetro de carga (in)

$\rho$  es la densidad del explosivo (gr/cm<sup>3</sup>)

### **2.1.2.3. Resistencia al agua**

Según el curso de Voladura de Orica (2013), es la capacidad que tienen los explosivos de resistir prolongadas exposiciones al agua, sin perder sus características. El efecto que produce el agua reduce la sensibilidad, generando gases nitrosos producto de la voladura. Esta influencia es significativa hasta el grado de que el explosivo no llega a detonar. La resistencia al agua varía de acuerdo con la composición y el empaquetamiento del explosivo. Para el caso de los explosivos comunes que no son a prueba de agua, presentan una “calidad de resistencia” a la misma: nula, regular, buena, excelente.

Por ejemplo, el ANFO tiene una resistencia al agua nula, puesto que el nitrato de amonio es soluble en agua. Sin embargo, las emulsiones son muy resistentes al agua, según la proporción en la mezcla el explosivo tendrá una calidad de resistencia al agua.

Usualmente, la resistencia al agua se aplica para agua estática. No obstante, cuando se trata de agua dinámica como el agua que fluye por los taladros de voladura, se añade resistencia empaquetando el producto explosivo. (p.23).

### **2.1.2.4. Sensibilidad**

Según el curso de Voladura de Orica (2013), es la facilidad con la que se puede detonar un explosivo, y determinar el diámetro mínimo que se puede usar en la voladura. La sensibilidad de un explosivo usualmente se mide en función al tamaño del iniciador requerido para efectuar la detonación óptima, y este varía desde la sensibilidad a un detonador hasta a un iniciador.

Los sensibilizantes son aditivos de los explosivos que se utilizan para que la formulación detone con mayor facilidad. Por ejemplo, entre los más comunes se encuentran la nitroglicerina, TNT, aluminio, burbujas de nitrógeno, microesferas de vidrio. (p.26).

### **2.1.2.5. Estabilidad química**

Según el curso de Voladura de Orica (2013), los explosivos deben estar químicamente estables sin descomponerse en condiciones ambientales normales. Este concepto se relaciona con el tiempo máximo de almacenamiento de los explosivos con la finalidad de evitar pérdidas significativas de energía en la voladura. Asimismo, también está referida al tiempo que el explosivo permanece en el taladro sin que ocurra un cambio en la composición química o física, sobre todo en las emulsiones. (p.27).

### **2.1.2.6. Diámetro crítico**

Según el curso de Voladura de Orica (2013), es el diámetro mínimo el cual la carga explosiva todavía puede detonar, y valores por debajo a ella puede generar problemas en la detonación. Dentro del proceso de voladura, la inclusión de gases finamente dispersos puede reducir considerablemente el diámetro crítico de un explosivo. Para explosivos hechos a base de emulsión, el diámetro crítico puede ser bastante grande (aproximadamente hasta 5 in). (p.28).

### **2.1.2.7. Velocidad de detonación (VOD)**

Según el curso de Voladura de Orica (2013), es la velocidad de la onda del explosivo producto de la reacción que se propaga a través de la columna explosiva, siendo estos cartuchos o en taladro. Este indicador está influenciado por la calidad de las materias primas, densidad del explosivo, diámetro de carga y el grado de confinamiento dentro del taladro. Se mide en unidades de Km/s o m/s. (p.29).

### **2.1.2.8. Presión de detonación**

Es la presión de la reacción el cual, al entrar en contacto con la roca, produce una onda de choque que provoca la fragmentación del macizo rocoso. Se expresa mediante la siguiente fórmula y en unidades de presión (MPa, KBar).

$$Pd = 250 * \rho * (VOD)^2$$

Donde:

VOD es la velocidad de detonación (Km/s)

$\rho$  es la densidad del explosivo (gr/cm<sup>3</sup>)

Pd es la presión de detonación (MPa)

### 2.1.2.9. Presión relativa

Es la comparación de la presión de un explosivo con la presión de otro como referencia. Para los dos tipos de explosivos se encuentran en las mismas condiciones, mismas unidades de volumen de gas producido y calor de reacción. Su valor se determina por medio del criterio de Langefors:

$$PR = \frac{1}{6} * \frac{V}{V_0} + \frac{5}{6} * \frac{Q}{Q_0}$$

Donde:

V es el volumen de gas de la reacción (lt, m<sup>3</sup>)

Q es el calor de la reacción (kCal, J)

### 2.1.2.10. Potencia del explosivo

“Es la velocidad con que se libera energía en la detonación y su valor depende los siguientes parámetros: velocidad de detonación (VOD), diámetro de carga (d) y calor de reacción (Qo)”.  
(Curso de Voladura de Orica, 2013, p.39)

### 2.1.3. ANFO

De acuerdo con el Instituto Profesional Centro de Formación Técnica INACAP (2011), afirma que el ANFO es un agente explosivo seco compuesto por la mezcla de nitrato de amonio granulado y combustible (petróleo), con concentraciones estándar del 94.5% y 5.5% para cada uno respectivamente. Presenta baja densidad, pero alta absorción del petróleo por su porosidad, lo cual permite que el taladro de diámetro pequeño sea llenado con cantidades mínimas de este

agente, logrando una adecuada iniciación y generar la detonación con la máxima energía. (p.33). Por lo tanto, se obtiene una buena fragmentación del macizo rocoso debido a la alta velocidad de detonación. Asimismo, es usado en minería como en obras civiles para perforaciones de grandes diámetros.



Figura 1. ANFO a granel.

Tomado de la página web de Famesa explosivos: Explosivos ANFO (s.f.).

Tabla 1

Ficha técnica ANFO

	NITRATO DE AMONIO GRADO ANFO
PUREZA	98,5% MIN
HUMEDAD	0,3% MAX
PH (SOLUCIÓN DEL 10%)	4,5 MIN
INSOLUBLES EN AGUA	0,8 % MAX
DENSIDAD APARENTE	0,72 - 0,80 g/cm <sup>3</sup>
ABSORCIÓN DE PETRÓLEO	8% MIN
GRANULOMETRÍA (1 mm - 3 mm) Ø	90% MIN

Nota. Tomado de la página web de Famesa explosivos: Explosivos ANFO (s.f.).

#### 2.1.4. Dinamita

De acuerdo con el Instituto Profesional Centro de Formación Técnica INACAP (2011), afirma que las dinamitas son mezclas que contienen principalmente nitroglicerina y nitroglicol coagulado. Contiene también nitrato de amonio y pasta de madera (dependiendo del tipo de

dinamita). La cantidad de nitroglicerina y nitroglicol determina la fuerza de las dinamitas (por ejemplo, un 35% de dinamita contiene 35% de mezcla de nitroglicerina y nitroglicol). (p.37).

Es un detonante que se constituye principalmente de nitroglicerina, y se forma de la mezcla de esta y dióxido de silicio o diatomita. Presenta alta potencia explosiva a causa de la sensibilidad de la nitroglicerina frente al choque, fricción y calor, permite una mezcla con elementos inertes para su manipulación. Las dinamitas se dividen en dos grupos: dinamitas granuladas y dinamitas gelatinas.

#### 2.1.4.1. Dinamita granulada

“Es el tipo de agente que tiene mayor base explosiva en la nitroglicerina”. (Manual de Voladura de Konya, 1990, p.49). Se utiliza tanto en los trabajos de minería superficial, subterránea como en obras civiles. Debido a su baja velocidad de detonación y buena simpatía, es factible su uso en voladuras controladas donde se emplean espaciadores para reducir la concentración de carga explosiva. De acuerdo con el contenido de nitrato de amonio, nitroglicerina y factores como la resistencia al agua, velocidad y presión de detonación, densidad y potencia, se clasifican en dinamita pura, dinamita amoniaca de alta densidad y de baja densidad.



*Figuras 2 y 3. Exadit de Exsa y Dinamita Pulverulenta de Famesa.*

Tomado de la página web de Exsa explosivos: Exsa explosivos Exadit (s.f.).

Tomado de la página web de Famesa explosivos: Dinamita Pulverulenta (s.f.).

#### **2.1.4.1.1. Dinamita pura**

Según Konya (1990), se forman por la mezcla de nitroglicerina, nitrato de sodio, combustibles, azufre y antiácidos. Se denomina pura debido a que carece de nitrato de amonio. Presenta menor resistencia al agua, velocidad y presión de detonación, densidad y potencia explosiva. A raíz de su alta sensibilidad al choque, no se utilizan en obras civiles. Sin embargo, es adecuado para abrir zanjas en la tierra producto de la detonación simpática de los barrenos adyacentes. (p.49).

#### **2.1.4.1.2. Dinamita extra de alta densidad**

Según Konya (1990), es el producto de dinamita más utilizado, y en su composición se reemplazan parte de la nitroglicerina y nitrato de sodio por nitrato de amonio. Este último es menos sensible al choque y fricción a diferencia de la dinamita pura. Se utiliza en minería superficial, subterránea y en canteras. (p.50).

#### **2.1.4.1.3. Dinamita extra de baja densidad**

Según Konya (1990), presentan similitudes en su composición con las dinamitas de alta densidad, con la excepción que la mayor cantidad de nitroglicerina y nitrato de sodio son sustituidas por nitrato de amonio, por lo que su potencia es relativamente baja. Este producto es utilizado para roca suave o en interior del barreno con cantidades limitadas de energía explosiva. (p.50).

#### **2.1.4.2. Dinamita gelatina**

“Se componen de una mezcla de nitroglicerina y nitrocelulosa que produce un compuesto resistente al agua de aspecto ahulado” (Manual de Voladura de Konya, 1990, p.49). Esto les permite un alto poder explosivo, y mayor resistencia al agua. De acuerdo con el contenido de nitrato de amonio, nitroglicerina y factores como la resistencia al agua, velocidad y presión de

detonación, densidad y potencia, se clasifican en gelatina pura, gelatina amoniacal, y semigelatina.



*Figuras 4 y 5: Gelatina especial de Exsa y Gelatina 75 de Famesa.*

Tomado de la página web de Exsa explosivos: Exsa Gelatina especial (s.f.).

Tomado de la página web de Famesa explosivos: Famesa Gelatina 75 (s.f.).

#### **2.1.4.2.1. Dinamita gelatina pura**

Según Konya (1990), es el explosivo con base de nitroglicerina más poderoso. Se constituyen de geles explosivos con contenido de nitrato de sodio, combustibles y azufres adicionales, y su equivalente en potencia es la dinamita pura. Debido a su composición representan la dinamita más resistente al agua. (p.51).

#### **2.1.4.2.2. Dinamita gelatina de amonio**

Según Konya (1990), denominado en ocasiones gelatina extra o especial. Está formado por la mezcla de gelatina pura con adición de nitrato de amonio que reemplaza parte de la nitroglicerina y nitrato de sodio. A pesar de que no tiene más resistencia al agua similar a las gelatinas puras, son utilizadas en condiciones de humedad con buen desempeño como cargas de fondo en barrenos de diámetro pequeño y sirven como iniciadores de agentes explosivos. (p.51).

### 2.1.4.2.3. Dinamita semigelatina

Según Konya (1990), presentan similitudes en su composición con las gelatinas de amonio, con la excepción que la mayor cantidad de nitroglicerina, nitrocelulosa y nitrato de sodio son sustituidas por nitrato de amonio. Son menos resistentes al agua y de menor precio a diferencia de las gelatinas de amonio. No obstante, debido a la presencia de nitrocelulosa, poseen mayor resistencia al agua frente a las dinamitas granuladas. Frecuentemente, son utilizadas en condiciones húmedas con buen desempeño y sirven como iniciadores de agentes explosivos. (p.51).

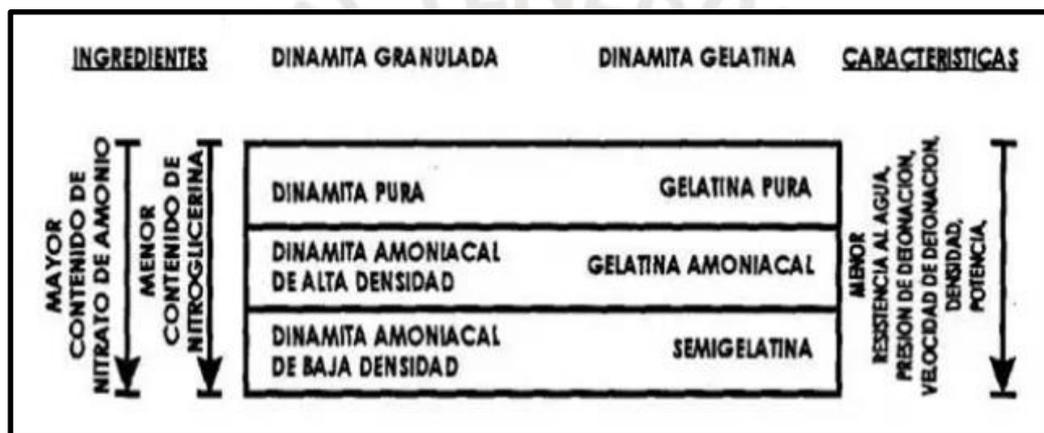


Figura 6. Características de la Dinamita.

Tomado del “Manual de Voladura”, de Calvin J. Konya (Estados Unidos), 1990.

### 2.1.5. Emulsiones

ENAEX Perú (2016) indica que las emulsiones son explosivos que se componen de la mezcla de al menos dos fases líquidas inmiscibles entre sí, donde una se encuentra dispersa de la otra en forma de gotas o celdas. Estos líquidos son combustible o petróleo (fase continua) y líquido oxidante (fase discontinua) como nitrato de sodio o amonio. Este sistema dispone de otras sustancias denominadas emulsificantes para mejorar su estabilidad, y ceras para aumentar la consistencia y tiempo de almacenamiento. (p.2).

Presenta alta velocidad de detonación, que se da entre 4500 a 5500 m/s, alta resistencia al agua y son estables debido a que el tamaño de celda es controlable con la viscosidad. Además, existe un contacto íntimo entre el elemento comburente y combustible, haciendo que la reacción química sea muy rápida. En teoría, las emulsiones no son explosivas, por lo que hay mínimo riesgo en su fabricación y manipulación. Es por ello, que las emulsiones son sensibilizadas para cumplir la función de explosivos.

Entre sus propiedades físicas y químicas, se tiene la viscosidad como resistencia al flujo de una emulsión, densidad gravimétrica, distribución de tamaño de partículas que representa el tamaño de gotas de la fase discontinua y potencial de hidrógeno - pH. Las emulsiones se clasifican en emulsiones encartuchadas y a granel.



Figura 7. Composición de la emulsión explosiva.

Tomado del artículo Extracción Mina I: Apuntes explosivos, por la Universidad Tecnológica de Chile INACAP.

### 2.1.5.1. Emulsiones encartuchadas

De acuerdo con el Instituto Profesional Centro de Formación Técnica INACAP (2011), se caracteriza porque el líquido que está en forma de gotas es la fase discontinua, mientras el líquido que lo rodea es la fase continua. (p.36). En este tipo de emulsión se requiere de un

agente que otorga estabilidad suficiente a modo de mantener las propiedades del mismo en el tiempo. Dicho agente se denomina emulsificante, el cual cumple con la función de reducir la tensión superficial entre las fases de emulsión y, a su vez, forma una capa protectora entre ellas. Las emulsiones encartuchadas tienen celdas más finas a diferencia de las emulsiones a granel y por ende viscosidades y estabilidad mucho más altas.



*Figura 8.* Emulsión encartuchada EMULNOR.

Tomado de la página web de Famesa explosivos: Famesa Emulnor (s.f).

#### **2.1.5.2. Emulsiones a granel**

De acuerdo con el Instituto Profesional Centro de Formación Técnica INACAP (2011), este tipo de emulsiones son bombeadas directamente desde camiones cargadores o camiones fábrica, hacia al interior de los tiros. (p.36). Se caracteriza por su alta versatilidad, ya que puede ser utilizada en diferentes tipos de calidad de roca, presenta excelente resistencia al agua, y en el instante de ser sensibilizada dentro del rango de su detonabilidad, entrega suficiente energía para vencer la resistencia del macizo rocoso.

Entre sus aplicaciones, destaca en las operaciones de minería subterráneas, como labores de desarrollo, realce por subniveles, taladros horizontales y taladros largos verticales en negativo, llevándose a cabo de forma segura, mostrando mejoras en productividad y rendimiento.



*Figura 9.* Camión bombeando la emulsión a granel SLURREX TC de Exsa.

Tomado de la página web de Exsa explosivos: Exsa Slurrex TC (s.f.).

## **2.1.6. Tipos de Emulsión**

### **2.1.6.1. Senatel Pulsar**

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2019), es un explosivo robusto con máxima potencia y sensible al detonador, de consistencia pastosa. Se caracteriza por su resistencia al agua para emplearse como carga fondo o columna en rocas muy duras, presenta alta velocidad de detonación lo cual sirve como iniciador de columnas de ANFO.

Su formulación permite la fragmentación de macizos rocosos exigentes, obteniéndose resultados favorables. Asimismo, reduce humos tóxicos de voladura lo cual reduce los tiempos de espera en el interior de la Mina. Su resistencia al agua reduce al mínimo su lixiviado e impacto medioambiental.

En relación a la seguridad y salud ocupacional, se eliminan los problemas de manipulación y almacenamiento de explosivos a base de nitroglicerina. Por lo que es ampliamente utilizado en la industria de minería subterránea, minería superficial, trabajos en canteras y construcción civil. (p.1).



Figura 10. Senatel Pulsar – Orica.

Tomado de la página web de Orica: Senatel Pulsar (2019).

Tabla 2

*Propiedades técnicas Senatel Pulsar*

Producto	Senatel™ Pulsar™
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	1.20
Diámetro mínimo de cartucho (mm)	28
Tipo de Barreno	Seco y con agua
VOD característica (m/s) <sup>(2)</sup>	6050
<b>Energía Efectiva Relativa (REE) <sup>(3)</sup></b>	
Energía relativa en peso - RWS (%)	134
Energía relativa en volumen -RBS (%)	201
Emisión de CO <sub>2</sub> (kg/t) <sup>(4)</sup>	158

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Senatel Pulsar (2019).

### 2.1.6.2. Senatel Ultrex

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2019), es un explosivo robusto con máxima potencia y sensible al detonador, de consistencia de masilla fluida. Se caracteriza por su resistencia al agua para emplearse como carga de fondo en rocas suaves, y carga de columna en rocas muy duras, presenta alta velocidad de detonación lo cual sirve como iniciador de columnas de ANFO.

Su formulación permite la fragmentación de macizos rocosos y mejora la carga, reduce los humos tóxicos de voladura lo cual reduce los tiempos de espera en el interior de la Mina.

Además, reduce las explosiones por la presencia de polvo de sulfuros. Su resistencia al agua reduce al mínimo su lixiviado e impacto medioambiental.

En relación a la seguridad y salud ocupacional, se eliminan los problemas de manipulación y almacenamiento de explosivos a base de nitroglicerina. Por lo que es ampliamente utilizado en la industria de mina subterránea, mina superficial, canteras y construcción civil (p.1).



Figura 11. Senatel Ultrex – Orica.

Tomado de la página web de Orica: Senatel Ultrex (2019).

Tabla 3

*Propiedades técnicas Senatel Ultrex*

Producto	Senatel™ Ultrex™
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	1.20
Diámetro mínimo de cartuchos (mm)	40
Tipo de barreno	Húmedo y seco
VOD característica (m/s) <sup>(2)</sup>	6220
<b>Energía Efectiva Relativa (REE) <sup>(3)</sup></b>	
Energía relativa en peso - RWS (%)	128
Energía relativa en volumen - RBS (%)	192
<b>Emisión de CO<sub>2</sub> (kg/t) <sup>(4)</sup></b>	163

Nota. Tomado de la página web de Orica: Senatel Ultrex (2019).

### 2.1.6.2. Senatel Magnafrac

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2019), es un explosivo robusto con máxima potencia y sensible al detonador, de consistencia pastosa. Se caracteriza por su resistencia al agua para emplearse como carga de fondo en rocas suaves, y carga de columna en rocas muy duras, presenta alta velocidad de detonación lo cual sirve como iniciador de columnas de ANFO.

Su formulación permite la fragmentación de macizos rocosos, produce menos gases producto de la detonación lo cual reduce los tiempos de retorno en el frente de voladura. Además, reduce las explosiones por la presencia de polvo de pirita. Su resistencia al agua reduce al mínimo su lixiviado e impacto medioambiental.

En relación a la seguridad y salud ocupacional, se eliminan los problemas de manipulación y almacenamiento de explosivos a base de nitroglicerina. Por lo que es ampliamente utilizado en la industria de mina subterránea, mina superficial, canteras y construcción civil. (p.1).

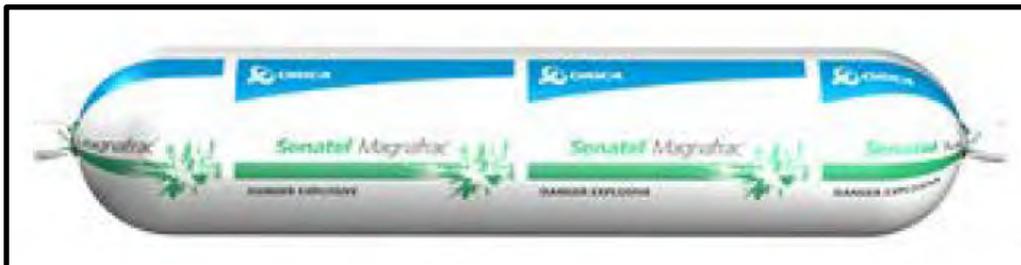


Figura 12. Senatel Magnafrac – Orica.

Tomado de la página web de Orica: Senatel Magnafrac (2019).

Tabla 4

*Propiedades técnicas Senatel Magnafrac*

Producto	Senatel™ Magnafrac™
Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	1.20
Diámetro mínimo de cartuchos (mm)	22
Tipo de barreno	Húmedo y seco
VOD típica (m/s) <sup>(2)</sup>	6490
<b>Energía Efectiva Relativa (REE) <sup>(3)</sup></b>	
Energía relativa en peso - RWS (%)	117
Energía relativa en volumen - RBS (%)	175
<b>Emisión de CO<sub>2</sub> (kg/t) <sup>(4)</sup></b>	170

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Senatel Magnafrac (2019).

## 2.2. Clasificación general de los explosivos

Según el Curso de Voladura de Orica (2013), de acuerdo con la forma de producir energía:

Explosivos mecánicos: son aquellos que utilizan principalmente la energía mecánica para fragmentar la roca, se dejaron de usar en minería y sus funciones se limitan a labores puntuales y obras civiles con requerimientos del uso de explosivos menores.

Explosivos químicos: son los más utilizados en minería, producto de la mezcla entre elementos combustibles y oxidantes, donde, por lo general el oxígeno es el elemento oxidante. Se clasifican en explosivos rápidos o detonadores y explosivos lentos o deflagrantes.

Explosivos nucleares: son aquellos que emplean la energía nuclear para fragmentar la roca. A partir de que los elementos nucleares se usan como fuente de energía y los riesgos relacionados a la implementación de dicho tipo de energía, y las consecuencias que conlleva su uso para las personas y medio ambiente, no son usados en minería (p.18).

### **2.2.1. Clasificación de los explosivos químicos**

De acuerdo con el Curso de Voladura de Orica (2013), los explosivos químicos por su amplio uso en minería se clasifican en rápidos o detonantes (altos explosivos) y lentos o deflagrantes (bajos explosivos). Los altos explosivos detonan cuando son iniciados y pueden liberar presiones de hasta 7000 MPa. Por otro lado, deflagran cuando son iniciados y pueden liberar presiones de hasta 1050 MPa.

Los detonadores o altos explosivos se subdividen en detonadores primarios y secundarios. Por un lado, los detonadores primarios o iniciadores son sensibles y violentos, utilizan pequeñas cantidades de carga en los detonadores o fulminantes. Por ejemplo: pentolita (mezcla de PETN y TNT), pentrita (PETN), azida de plomo. Por otro lado, los detonadores secundarios o rompedores son menos sensibles, pero con fuerte efecto de impacto y generación de gases. Se aplican para uso civil y explosivos de uso militar. Se inician con los detonadores primarios y se emplean con mayor volumen de carga para fragmentar la roca. Estos se dividen según el avance en su desarrollo de la capacidad de rompimiento de roca y la frecuencia de uso. Los explosivos secundarios se dividen en agentes explosivos como el ANFO y emulsiones; y los convencionales como la dinamita, pulverulentas y permisibles (p.19).

## **2.3. Parámetros de voladura**

### **2.3.1. Burden**

De acuerdo con el Curso de Voladura de Orica (2013), es la distancia mínima del taladro hacia el tiro de alivio en el instante que el detona el taladro. Para este parámetro se toman dos casos donde el burden es excesivo o reducido. Para el primer caso, los gases de la detonación encuentran resistencia para fragmentar la roca, con lo que parte de la energía se convierte en energía sísmica, con predominancia de las vibraciones.

Por otro lado, si el Burden es reducido los gases de detonación se escapan y se expanden con alta velocidad hacia la cara libre, impulsando los fragmentos de roca, los proyecta de forma incontrolada y genera un aumento de sobrepresión y ruido. (p.15-16).

El cálculo del Burden para minería subterránea es esencial para el diseño de voladuras y se expresa con la siguiente fórmula:

$$B_n = \emptyset * ((P_oD * F_c * A_e) / (F_s * \sigma_r * RQD) + 1)$$

- Extraído del Estudio *Diseño de Mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia* de Rene Wilfredo Ojeda Mestas (2007):

Donde:

$\emptyset$  es el diámetro de taladro (en mm)

PoD es la presión de detonación del explosivo (en KBar o kg/cm<sup>2</sup>)

Fc es el factor de carga (en Kg/Ton)

Ae es el acoplamiento del explosivo

Fs es el factor de seguridad

$\sigma_r$  es la resistencia a la compresión de la roca (en kg/cm<sup>2</sup>)

RQD es la designación de calidad de roca

### 2.3.2. Espaciamiento

De acuerdo con el Curso de Voladura de Orica (2013), es la distancia entre taladros de una misma fila de perforación. De la misma forma que el burden, se toman dos casos donde el espaciamiento es excesivo o reducido. En el primer caso, se producen fracturaciones

inadecuadas entre las cargas. Mientras cuando el espaciamiento es muy pequeño se produce un excedente de trituración y roturas superficiales entre las cargas (p.21.).

Por lo general, el espaciamiento se calcula en función al burden, pero, en el caso de minería subterránea estos parámetros son iguales. Dada la siguiente fórmula:

$$E = (K_e) * B$$

Donde:

$K_e$  es 1.0 para taladros secuenciados con retardos largos.

### 2.3.3. Taco

De acuerdo con el Curso de Voladura de Orica (2013), es la longitud de la parte superior de la columna del taladro, llenado con material estéril y cumple la función de confinar y retener la energía en el macizo rocoso, para llevar a cabo una adecuada detonación. Asimismo, se presentan situaciones en las cuales el taco es insuficiente y excesivo.

Cuando el taco es insuficiente se producen eyecciones excesivas, reducción del volumen del cráter y zona fracturada, y por ende se reduce la fragmentación de la zona del explosivo. Por otro lado, cuando el taco es largo se produce un desplazamiento vertical inadecuado, el volumen del cráter y zona fracturada son mínimas, dando lugar a una mala fragmentación en la zona del taco.

En la situación óptima, se controlan las eyecciones, la zona fracturada es máxima y genera un buen desplazamiento de la pila. (p.25-27). Por lo general, el taco se calcula en función al Burden y diámetro dados por las siguientes fórmulas:

- Extraído del *Manual de Voladura*, de Calvin J. Konya (1972):

$$T = 0.7 * B$$

- Extraído del *Manual de Perforación y voladura de rocas*, de Carlos López Jimeno (1980):

$$T = (18-20) * D$$

- Extraído del libro *Estado del arte de la tronadura*, de Cameron Mc Kenzie (1994):

$$T = (25-30) * D$$

Donde:

T es el Taco (m)

B es el Burden (m)

D es el diámetro del taladro (m)

#### **2.4. Sistemas de iniciación**

Los sistemas de iniciación o denominados detonadores cumplen la función de iniciar el cartucho cebo y desencadenar la detonación en el interior del taladro. Por lo que la selección del sistema de iniciación requerida es muy importante para el éxito del proceso de voladura. En principio el sistema de iniciación no solamente controla la secuencia del disparo de los taladros. A esto se suma, el control de dilución e impacto que origina la vibración producto de la voladura, el tamaño de roca fragmentada, y la longitud de avance, tanto lineal como volumétrico, reflejado en tonelaje por cada disparo realizado en el ciclo de minado.

A medida que el desarrollo de tecnologías en los explosivos permite optimizar el proceso de voladura, los beneficios de estos sistemas de iniciación es un factor importante que se refleja en menor exposición del personal a la línea de fuego; es decir, mejora la seguridad durante la voladura, control de vibraciones de la voladura, mayor eficiencia en el avance para aumentar la productividad en las operaciones y el control de los retardos en base a nuestro requerimiento.

### 2.4.1. Sistemas de iniciación no eléctricos

Es un sistema que trabaja en base a una onda de choque generada por la deflagración de una capa explosiva adherida en el interior de un tubo plástico, que permite transmitir calor o energía y posteriormente iniciar los elementos de retardo que forman parte del detonador.

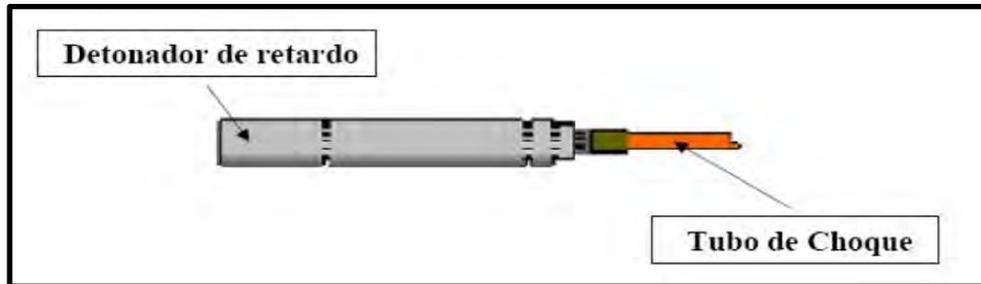


Figura 13. Sistema de iniciación no eléctrico.

Tomado del Manual de Voladura de Orica Mining Services.

Se componen de una cápsula de aluminio, que contiene en su interior una carga base de pentrita, una carga primaria de azida de plomo, un elemento cilíndrico portador de la pasta de retardo llamado porta retardo, un sistema amortiguador de onda de detonación y un tapón de goma semiconductor que sirve como elemento de engarce al tubo de transmisión.

El interior del tubo de choque presenta una cantidad de carga explosiva mínima la cual no genera ningún riesgo de detonación de toda la columna explosiva, dejando toda la estructura del tubo intacta; lo cual va a permitir la iniciación en el fondo del tubo. El tubo de choque no puede ser iniciado por fuentes de energía natural o eléctrica; es decir, ondas de radiofrecuencia, electricidad estática, corrientes erráticas o llama, o las fricciones o impactos comunes en la actividad normal de carga de voladuras

El portaretardo es un elemento fabricado de aluminio que lleva en su interior una mezcla pirotécnica y da el tiempo de retardo al detonador. Esta mezcla pirotécnica detona con tiempos de combustión precisos y uniformes. La energía de iniciación proveniente del tubo de

transmisión circula a través de una composición iniciadora situada en la parte superior del portaretardo, lo cual garantiza una adecuada iniciación.

Finalmente, la energía de iniciación llega a la carga primaria y se transfiere hacia la carga base, que tiene la función de iniciar el Booster con la energía requerida.

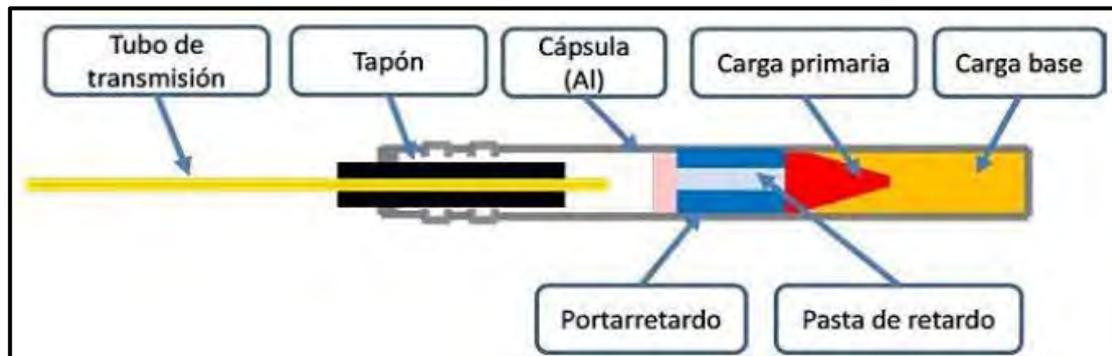


Figura 14. Partes de detonador pirotécnico.

Tomado de “Perforación y Voladura de rocas en Minería”, por Bernaola, Castilla y Herrera (Madrid), 2013.

El tubo de transmisión o tubo de choque consiste en un tubo de plástico laminado que se compone de tres capas. La Capa Interna o surlyn, una capa muy fina de material reactivo que sostiene de forma confiable la mezcla reactiva en su lugar, presenta propiedades iónicas. La capa intermedia de media densidad, brinda fuerza de tensión, elongación y resistencia a agentes químicos. La capa externa baja densidad, es resistente a la abrasión y protege al tubo de los rayos ultravioleta.

El tubo tricapa se compone de una mezcla explosiva de azida de plomo y pentrita (HMX + Al) adherida a la pared interna del tubo, esta mezcla tiene una carga nominal de 18 mg/m con una precisión de +/- 5 mg/m. Además, la transmisión de onda de choque al interior del tubo a 2000 ms y cuenta con un diámetro externo de 3 mm +/- 0.1 mm.

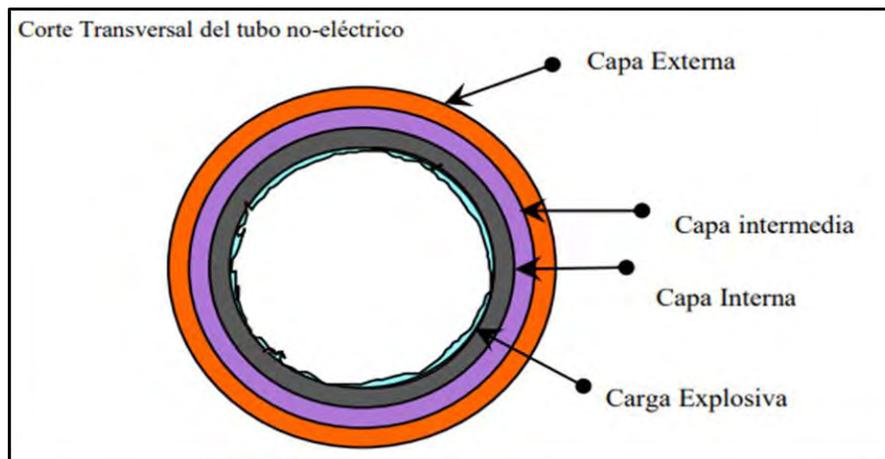


Figura 15. Tubo de transmisión – tricapa.

Tomado del Manual de Voladura de Orica Mining Services.

#### 2.4.2. Partes de un detonador no eléctrico

**Carga explosiva:** el extremo inferior del detonador contiene una carga base de pentrita (PETN) y una carga primaria de Azida de Plomo. La suma de las dos cargas define la fuerza del detonador.

**Cushion Disk:** está diseñado para otorgar una gran resistencia al impacto por simpatía.

**Tren de retardo:** formado por uno, dos o tres elementos pirotécnicos.

**Sealer Crimper:** asegura un buen sello interno y un buen alojamiento de los elementos en el interior del detonador.

**Delay Ignition Buffer:** acelerador de energía, permite una mayor precisión y evita el problema de reversión de la onda de choque.

**Sello antiestático:** elemento fundamental para eliminar el riesgo de iniciación por descargas estáticas accidentales.

**Crimper y Sello de goma:** en conjunto ayudan a que no ingrese ningún elemento extraño dentro del detonador.

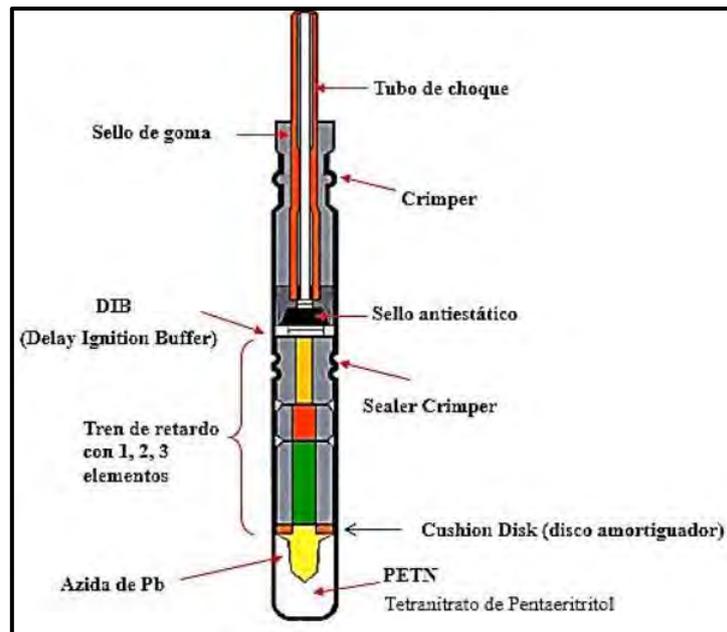


Figura 16. Partes del detonador pirotécnico.

Tomado del Manual de Voladura de Orica Mining Services.

## 2.5. Sistema Exel

### 2.5.1. Detonador Exel MS

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2021), son una serie de detonadores no eléctricos de alta potencia que presentan intervalos de retardos de milisegundos entre los tiempos de milisegundos. Se constituyen por un detonador no eléctrico que está ensamblado a un tubo que transmite una onda de choque de una longitud determinada, asimismo este tubo de transmisión presenta alta resistencia a la tensión y abrasión; el cual transmite la señal de iniciación al detonador. Un extremo del tubo está enganchado dentro de la cápsula del detonador mientras el otro extremo permanece cerrado debido a un sello impermeabilizante. (p.1).

El Detonador Exel MS dispone de una serie de tiempo de retardo aplicables a minería superficial y subterránea, lo cual está conformado por 04 elementos principales:

1. Cápsula de alta potencia compuesta por una carga primaria, una carga secundaria y un tren de retardo.
2. Tubo de choque que transmite en su interior una señal de baja energía a una velocidad de 2000 ms para iniciar la carga explosiva en el interior de la cápsula.
3. Etiqueta, indica el número de serie MS, el tiempo nominal y la longitud del tubo de choque.
4. Conector “J”, dispositivo que une el tubo de choque a la línea troncal de cordón detonante.



Figura 17. Detonador Exel MS- Orica.

Tomado de la página web de Orica: Exel MS (2021).

Tabla 5

*Propiedades técnicas Detonador Exel MS*

Producto	Exel™ MS
Tubo de transmisión	Exel™ 3L naranja
• Diámetro exterior (mm)	3.0±0.2
• Resistencia nominal a la Tensión (min)	300 N a +20 °C
• Longitudes (m)	3.6 – 45.0
• Propagación de la onda de choque (m/s)	2000 ±100
Detonador	
• Potencia de Salida	REF.DET.#3
• Cápsula	AI
• Resistencia a la presión hidrostática	3 bares durante 7 días
NEQ/NEM (mg/unidad)	940

Nota. Tomado de la página web de Orica: Exel MS (2021).

Tabla 6

*Rangos de tiempos de retardo del Detonador Exel MS*

Retardo #	Tiempo de retardo nominal* (ms)	Max. desviación estándar (ms)	Delay #	Tiempo de retardo nominal* (ms)	Max. desviación estándar (ms)	
1	25	8.3	12	300	8.3	
2	50		13	325		
3	75		14	350		
4	100		15	375		
5	125		16	400		
6	150		17	425		
7	175		18	450	6.7**	
8	200		19	475		
9	225		20	500		
10	250					
11	275			40	1000	10.0**

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Exel MS (2021).

### 2.5.2. Detonador Exel LP

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2019), son una serie de detonadores no eléctricos de alta potencia con periodos largos de intervalo de retardo entre disparos, este detonador consiste en un detonador no eléctrico el cual tiene una capsula de aluminio y un tubo de transmisión de color amarillo. Dicho tubo transmite la iniciación al detonador y presenta alta resistencia a la tracción y abrasión. Un extremo del tubo se engasta en el casquillo del detonador mientras el otro extremo se encuentra cerrado por un sello impermeable; asimismo, inician directamente los cartuchos de explosivos o multiplicadores los cuales son sensibles al detonador. Estos detonadores brindan una serie de tiempos de retardo para trabajos de voladura en minería subterránea y construcción tunelera. (p.1).



Figura 18. Detonador Exel LP – Orica.

Tomado de la página web de Orica: Exel LP (2021).

Tabla 7

*Propiedades técnicas Detonador Exel LP*

Producto	Exel™ LP
<b>Tubo de transmisión</b>	Amarillo Exel™ 3L o 3L XU
- Diámetro exterior (mm)	3.0±0.2
- Resistencia nominal a la Tensión	300 N a +20 °C
- Longitudes (m)	4.8 – 7.8
- Propogación de la onda de choque (m/s)	2000 ±100
<b>Detonador</b>	
- Potencia de Salida	REF. DET. #3
- Cápsula	Aluminio
<b>NEM/NEQ (mg/unidad)</b>	940

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Exel LP (2021).

Tabla 8

*Rangos de tiempos de retardo del Detonador Exel LP*

Retardo #	Tiempo de retardo nominal* (ms)	Retardo #	Tiempo de retardo nominal* (ms)	Retardo #	Tiempo de retardo nominal* (ms)
0	25	6	600	24	2400
1	100	7	700	28	2800
1.5	150	8	800	32	3200
2	200	9	900	36	3600
2.5	250	10	1000	40	4000
3	300	11	1100	44	4400
3.5	350	12	1200	48	4800
4	400	14	1400	52	5200
4.5	450	16	1600	56	5600
5	500	18	1800	60	6000
5.5	550	20	2000		

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Exel LP (2021).

## 2.6. Cordón Detonante Cordtex N

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Orica (2018), es un accesorio de voladura resistente y flexible compuesto de un núcleo de penritra fino y compacto, recubierto por un tejido de fibra y este está cubierto por una capa de plástico o PVC, Su principal uso es como una línea maestra para conectar los detonadores Exel y llevar a cabo su iniciación además tiene excelente resistencia a la tensión, abrasión y humedad, es usado en la mayoría de obras mineras a cielo abierto y subterráneas, canteras y obras civiles. (p.1).



*Figura 19.* Cordón detonante Cordtex N – Orica.

Tomado de la página web de Orica: Cordtex N (2018).

Tabla 9

*Propiedades técnicas Cordtex N*

Producto	Cordtex™			
	20N	40N	80N	100N
Carga nominal de Explosivo (g/m)	20 ±1.5	40 ±3.0	80 ±4.0	100 ±5.0
Velocidad de Detonación (m/s)	>6500			
Resistencia a la tracción(N)	981			
Energía Especifica (kJ/m)	26.76	53.52	107.04	133.8
Volumen de Gases (l/m)	15.6	31.2	62.4	78
Sensibilidad al Impacto (cm)	above 10 J - 2 kg drop hammer with drop height of 50 cm – no detonation			
Diámetro exterior (mm)	7.0 ±0.3	8.5 ±0.4	11.5 ±0.5	12.0 ±0.6
Color	Rojo	Azul	Amarillo	Rojo
Cubierta Exterior	PVC			

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Cordtex N (2018).

Tabla 10

*Características Cordtex N*

Producto	Longitud/ rollo (m)	Diámetro exterior del carrete (mm)	Longitud el carrete (mm)	Rollos por caja (items)
Cordtex™ 20N	150 ±1.5	220	240	2
Cordtex™ 40N	100 ±1.0	220	240	2
Cordtex™ 80N	50 ±0.5	220	240	2
Cordtex™ 100N	50 ±0.5	220	240	2

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Cordtex N (2018).

## 2.7. Mecha lenta o Carmex

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Famesa (2020), también llamado mecha de seguridad, es un accesorio de voladura que se caracteriza por su flexibilidad y cuenta con un núcleo central de pólvora, el cual transmite el fuego hasta el detonante con una velocidad constante. Se compone por capas de distintos materiales que protegen al núcleo de la pólvora como el plástico que asegura impermeabilidad y resistencia a la abrasión. (p.1).



Figura 20. Carmex de Famesa.

Tomado de la página web de Famesa Explosivos: Carmex (s.f.).

Tabla 11

*Propiedades técnicas Carmex*

DE LA MECHA DE SEGURIDAD	CARMEX®
Color de recubrimiento plástico	Verde
Núcleo de pólvora (g/m)	6,1 ± 0,7
Tiempo de combustión a.n.m. (s/m)	160 ± 10
Diámetro externo (mm)	5,2 ± 0,2

*Nota.* Tomado de la página web de Famesa Explosivos: Carmex.

## 2.8. Mecha rápida

De acuerdo con la ficha técnica de la empresa Famesa (2020), es un accesorio de voladura compuesto por una masa pirotécnica, dos alambres cubiertos por un material de plástico en su

exterior. Asimismo, este accesorio complementa a la mecha de seguridad en cuyos extremos se encuentran fijados el detonante y el conector de ignición.

Se produce una llama incandescente producto de la combustión de la mecha con la temperatura suficiente para activar la masa pirotécnica del conector y como consecuencia garantiza el eficiente encendido de la mecha de seguridad.

Finalmente, el objetivo principal de este accesorio es eliminar el chispeo manual de la mecha de seguridad evitando así, la exposición de los operadores a los humos producto de la combustión. (p.1).



Figura 21. Mecha rápida de Famesa.

Tomado de la página web de Famesa Explosivos: Mecha rápida (s.f.).

Tabla 12

*Propiedades técnicas Mecha rápida*

	MECHA RÁPIDA Z - 18	MECHA RÁPIDA Z - 19
COLOR DE LA MECHA RÁPIDA	Rojo	Verde
MATERIAL DE LA COBERTURA EXTERIOR	Plástico	Plástico
PESO DEL MATERIAL PIROTÉCNICO (g/m)	3,4	3,4
TIEMPO DE COMBUSTIÓN a.n.m (s/m)	35	26
DIÁMETRO EXTERNO (mm)	1,8	1,8
PESO TOTAL (g/m)	6,5	6,5

*Nota.* Tomado de la página web de Famesa Explosivos: Mecha rápida (s.f.).

## 2.9. Sistema de iniciación electrónicos

Los detonadores electrónicos presentan una estructura externa similar a los detonadores pirotécnicos, ya que consta con un cable de conexión y una cápsula de aluminio cerrada por un extremo. La estructura interna consta de un condensador, un chip de retardo, inflamador o fuse head, un explosivo primario y un explosivo base.

Los detonadores electrónicos no se activan con una fuente de calor, solo se activan con una fuente externa de energía eléctrica, esta corriente eléctrica recorre el cable de conexión del detonador electrónico hasta llegar a la cápsula de aluminio, en su interior activa al condensador el cual está almacenando la energía del detonador, posteriormente llega al chip de retardo, el cual ya está previamente programado con un tiempo en ms, una vez activado el chip de retardo este empieza a cronometrar los milisegundos generados, cuando llegue a 0 ms el inflamador se encenderá y con la ayuda de la carga explosiva base y primaria se iniciará la detonación.

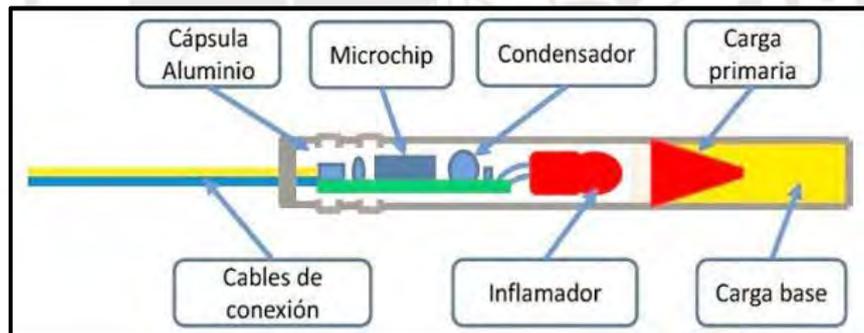


Figura 22. Partes del detonador electrónico.

Tomado de “Perforación y Voladura de rocas en Minería”, por Bernaola, Castilla y Herrera (Madrid), 2013.

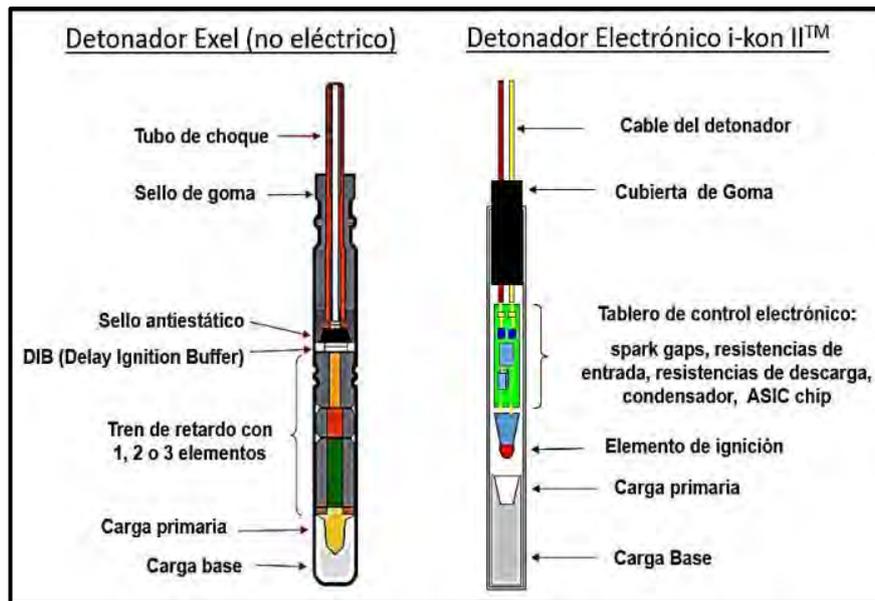


Figura 23. Diferencias entre detonador no eléctrico y electrónico.

Tomado del Manual de Voladura de Orica Mining Services.

El sistema electrónico viene junto a un paquete de software. Usando el software de diseño de voladura un ingeniero puede fabricar el diseño de voladura en oficina, y puede simular la voladura, para luego optimizar el proceso. En el área de reducción de costos en minería implica introducir tecnologías en dicho proceso. En efecto, resulta más costoso a diferencia de los métodos tradicionales, resalta la mejora e incrementa la productividad de la mina y los procesos medioambientales. El uso de los detonadores electrónicos se verá reflejado en los siguientes ítems:

- Seguridad.
- Mejor fragmentación.
- Mejor apilamiento del material volado.
- Mejora la productividad de los equipos de minado.
- Mejor control de proyección de rocas (fly rock).
- Mejor control de la estabilidad de taludes.

- Mejor control de las vibraciones.
- Mejor control de la carga operante.

### **2.9.1. Ventajas de usar detonadores electrónicos**

- Voladura fiable, efectiva y segura debido a la sólida y comprobada construcción de los detonadores electrónicos, además de la funcionalidad de un testeo o prueba en el mismo frente de la labor.
- Mejores resultados de reducción de vibraciones, sobreexcavación, una mayor eficiencia de disparo debido a la programación de retardos exactos.
- Iniciación segura de los boosters y explosivos, menos exposición del personal a la línea de fuego de la voladura.
- Reducción de inventario que libera capital de trabajo, ya que los detonadores electrónicos son totalmente programables.

### **2.10. Diferencias entre detonadores electrónicos y pirotécnicos**

Los detonadores electrónicos tienen un cable de conexión con fibras de cobre, el cual transporta eficientemente la energía eléctrica. Y su manera de activación es mediante una fuente externa de energía que emite un voltaje hacia el condensador. Mientras que un detonador pirotécnico se activa mediante una chispa de altas temperaturas.

Los detonadores electrónicos son totalmente programables, los cuales permiten retardos de 0 a 30,000 ms, mientras que los detonadores pirotécnicos ya tienen retardos establecidos por fábrica los cuales no se pueden alterar.

Los detonadores electrónicos tienen una precisión de detonación de +/- 0.01% mientras que los detonadores pirotécnicos tienen una precisión de detonación de +/- 4%.

Los costos de los detonadores son variables para cada mina ya que se valoriza en función a su consumo, los precios de los detonadores eléctricos varían entre 9.5-11.5 \$/ unidad, mientras que los detonadores pirotécnicos varían entre 1.5-2.5 \$/unidad.

### **2.11. Aplicación de los detonadores electrónicos**

La aplicación de detonadores electrónicos es para un fácil uso de perforación de túneles. Llevan un código de barras impreso en la etiqueta, el que indica la identidad única del detonador. El operador escanea esta etiqueta y programa un retardo vinculado a su necesidad. Una vez que todos los detonadores están conectados al arnés de cables están listo para testear y generar la detonación.

### **2.12. Sistema de iniciación electrónica**

Hay varios sistemas de iniciación, que dependen del proveedor y del objetivo de la mina. En esta tesis se estudiará con los sistemas de iniciación electrónica de la empresa ORICA, sistema de iniciación electrónica eDev II y i-Kon II.

#### **2.12.1. Sistema de Iniciación Electrónica eDev II**

Es un sistema construido específicamente para minas subterráneas y para voladuras de tunelería civil. El sistema eDev II provee de la precisión y flexibilidad del timing electrónico con operaciones rápidas y prácticas en el frente de la labor

Una importante característica de este sistema es la capacidad de hacer pruebas en el mismo frente de la labor, con ello se reduce los tiempos de retrasos antes del chispeo, permitiendo el uso más efectivo de los recursos y equipos. Tiene mayor seguridad, eficiencia y rendimiento gracias a la total programabilidad de los detonadores. Este sistema está compuesto por:

- Detonadores electrónicos eDev II
- Blast Box 610
- Scanner 260

### 2.12.1.1 Detonadores electrónicos eDev II

El detonador electrónico eDev II es uno de los productos de la nueva generación de sistemas de iniciación electrónica de Orica. Estos detonadores se usan con:

- Software para diseñar voladuras para túneles SHOTPlus Tunnel.
- Blast Box 610
- El nuevo Scanner 260 con prueba inherentemente segura de todos los detonadores en el frente.
- Cable de conexión dúplex

Los detonadores eDev II sólo pueden ser probados, programados y quemados con equipos especializados. No se deben usar con ningún otro equipo de programación o de voladuras. El rango de temperatura de operación recomendado de detonadores eDev II va desde -20°C (-4°F) hasta 70°C (158°F).

Tabla 13

#### *Propiedades técnicas Detonador electrónico eDev II*

Color del cable	Amarillo
Color del conector	Amarillo
Resistencia a la Tensión (kg/ lbs)	20/ 55
Peso de carga explosiva	900mg
Material de cápsula	Aleación de cobre
Longitud x diámetro de la cápsula	89 x 7,6mm
Máx. tiempo de retardo	20.000ms
Precisión (desviación estándar/ media)	+/- 0,01%

*Nota.* Tomado de la página web de Orica: Detonadores electrónicos eDev II (2022).

### **2.12.1.2 Blast Box 610**

Blast Box entrega el voltaje y comando para quemar los detonadores en secuencia programada.

Blast Box 610 actual es una caja independiente para quemar voladuras con eDev II mediante conexión por cable a detonadores. Puede actualizarse a eDev II por un cambio de firmware. El nuevo Blast Box 610 no funciona como una caja independiente.

### **2.12.1.3 Scanner 260**

El scanner 260 escanea números de ID únicos en los detonadores y permite probar la funcionalidad de cada detonador en el frente de una operación.

### **2.12.2. Sistema de Iniciación Electrónica I-Kon**

Es un sistema de iniciación moderno y preciso, el cual controla la energía desprendida de la voladura optimizando la fragmentación, disminuyendo el daño por vibraciones y controla la dilución. Este sistema engloba los conceptos de precisión, exactitud, flexibilidad y seguridad. La precisión es la dispersión o sesgo del conjunto de valores medidos respecto al valor real, su valor será mayor mientras la dispersión sea menor. La exactitud es cuán cerca se encuentra el valor medido del valor real.

El sistema I-Kon se compone de detonador I-Kon, cuya programación del detonador va desde los 0 hasta 1500 ms con incrementos de 1 ms, una presión de 14'700 psi de tolerancia del casquillo y su uso es seguro en ambientes de alto voltaje, estática y posibles pérdidas de corriente. Además, dispone de un Logger que cuenta con una capacidad para 200 detonadores, autotest automático y 3 modos de captura de detonadores. El Blaster es la caja que da iniciación a la voladura con capacidad de programar 400, 1600 y 2400 detonadores; trabaja con una potencia eléctrica de 24 voltios y autotest automático.

Este sistema cuenta con un software denominado ShotPlus-i, el cual permite trabajar con los planos de diseño y programación de los tiempos, realiza simulación de voladuras y análisis de tiempos de los detonadores. Asimismo, diseña voladuras y descargarlas directamente al logger.

### **2.13. Norma española de control de vibraciones producidas por voladuras**

En el Perú no se tiene una norma legal que controle las vibraciones producidas por voladuras por eso se trabaja con la Norma española de control de vibraciones producidas por voladuras UNE 22-381-93. El objetivo de la norma es establecer un procedimiento de estudio y control de vibraciones producidas por voladuras con explosivos.

La aplicación de esta norma es para los siguientes trabajos:

- Trabajo de minería y canteras, tanto en labores de extracción de materiales como de labores complementarias
- Trabajos de construcción de obras públicas
- Trabajos de demolición y especiales, en los cuales se emplean pequeñas cargas.

### **2.14. Clasificación de estructuras a efectos de la aplicación del criterio de prevención de daños**

Las estructuras colindantes se consideran a toda obra de origen antrópico con una finalidad útil y que sea susceptible de experimentar vibraciones. Las cuales se clasifican en los siguientes grupos:

- Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.
- Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y recreos. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.

- Grupo III: Estructuras de valor arquitectónico, arqueológico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

Las vibraciones son oscilaciones transitorias y no periódicas que se propagan por el terreno a una velocidad característica de propagación

Se definen como parámetros característicos de vibración en esta norma los siguientes:

- Valor de la velocidad pico partícula en su mayor componente.
- Frecuencia principal de la vibración

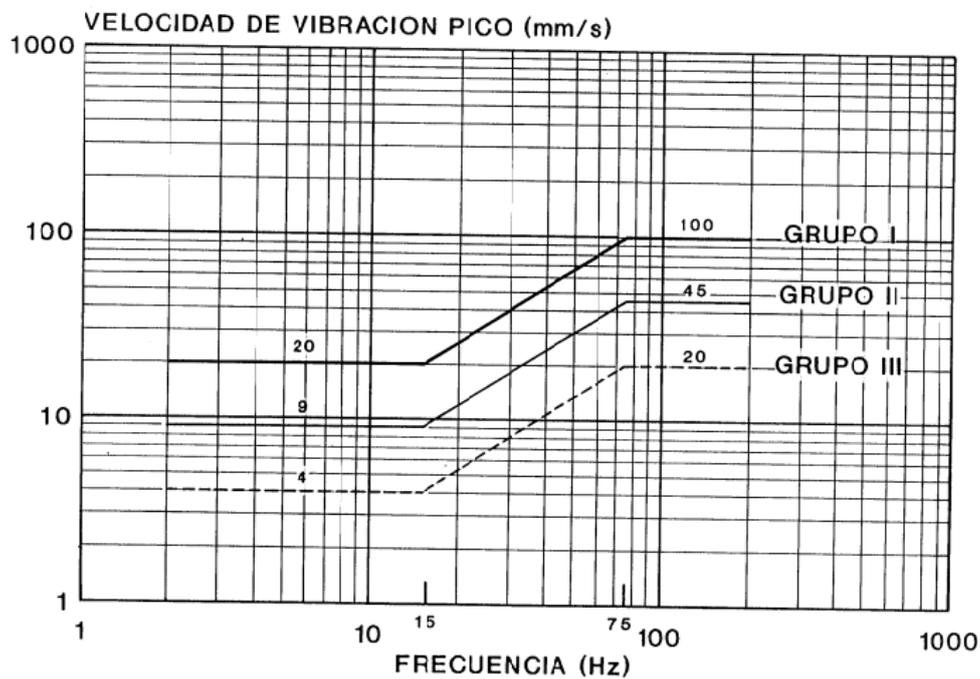


Figura 24. Criterio de prevención de daños.

Tomado de la "Norma española del control de Vibraciones", Norma UNE 22-381-93 (Madrid), 1993.

El valor de velocidad pico partícula corresponde a la máxima desviación del registro sobre el origen. Si el registro de la vibración fuera en aceleración o desplazamiento tendría que ser integrado o derivado para obtener el registro de velocidad.

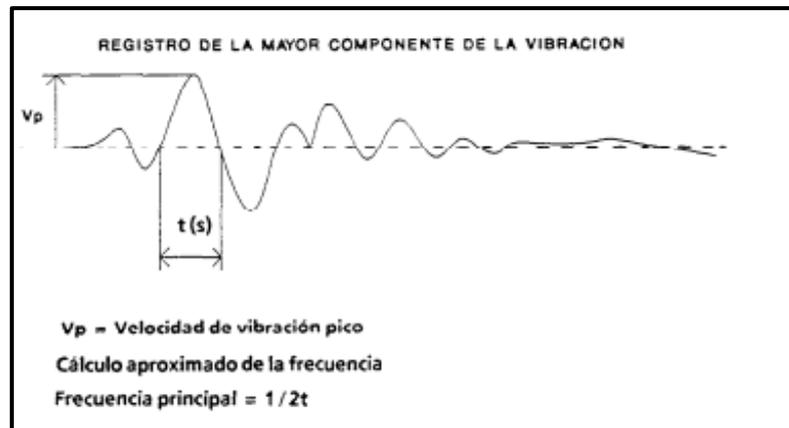


Figura 25. Determinación de los parámetros característicos de la vibración.

Tomado de la “Norma española del control de Vibraciones”, Norma UNE 22-381-93 (Madrid), 1993.

Dado que la vibración es un movimiento en tres componentes en tres direcciones perpendiculares entre sí, que normalmente suelen ser dirección vertical; dirección longitudinal o componente horizontal en dirección a la voladura; dirección transversal o componente horizontal perpendicular a la longitudinal.

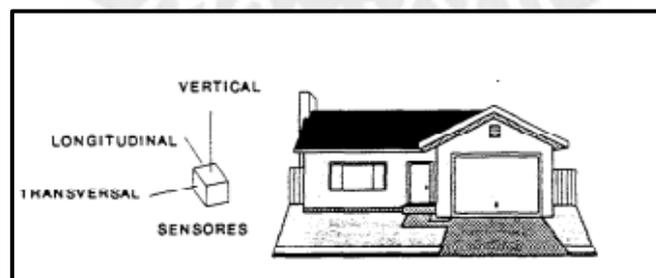


Figura 26. Orientación de los sensores.

Tomado de la “Norma española del control de Vibraciones”, Norma UNE 22-381-93 (Madrid), 1993.

### 3. DESARROLLO

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Análisis de mallas usando detonadores electrónicos y pirotécnicos:

La mina Huarón es una mina polimetálica el cual cuenta con estructuras geológicas de vetas angostas con buena ley donde el ancho de veta varía entre 0.6 m a 1.2 m donde se usaba método de voladura circado para mantener la alta ley de sus estructuras, este método consiste en hacer dos voladuras, la primera una sección reducida de 2.6 m x 3.8 m y una segunda voladura se hace un desquinche con la que se llega a una sección de 3.5 m x 3.8 m. Es ahí donde se implementa el uso de detonadores electrónicos para reemplazar estas dos voladuras en una sola voladura selectiva el cual pueda segregar el mineral/desmonte reemplazando el circado.

La segregación mineral/desmonte se visualiza como la figura, todo el desmonte se propaga en un cuerpo delgado a una distancia de hasta 22 metros mientras que el mineral se acumula como montículo cerca al frente por una longitud de 5 metros.

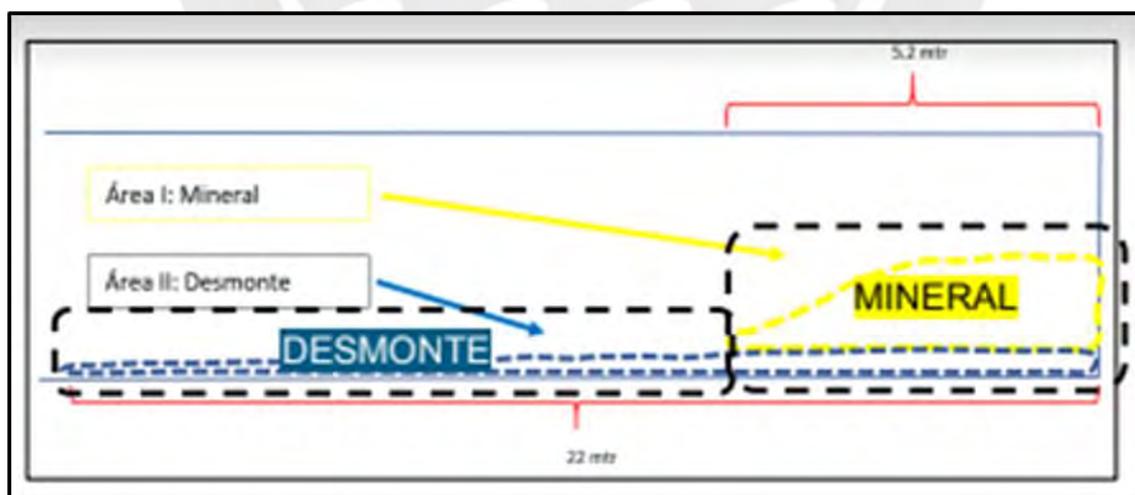


Figura 27. Segregación mineral/ desmonte.

Nota. Elaboración propia.

Las mallas que se utilizan para los dos tipos de detonadores varían significativamente por la ubicación del arranque. Para el caso de los detonadores pirotécnicos, las mallas son tradicionales con el arranque situado en el centro de la misma, con el objetivo de llevar la estructura mineralizada en el centro. Sin embargo, en una voladura con detonadores electrónicos la estructura mineralizada se lleva hacia uno de los hastiales a la caja techo. La característica diferencial es que el arranque se ubica donde haya mayor concentración de estructura de desmonte porque el objetivo de dicha voladura con detonadores electrónicos es lograr la segregación mineral/desmonte. Es por ello que se necesita la mayor cantidad de energía en el desmonte para que este salga dispersado a una longitud aproximada de 20m. Es el arranque el que tiene la mayor cantidad de masa de explosivo por m<sup>2</sup> y esto genera una mayor energía. Por lo tanto, se ubica el arranque en la estructura del desmonte en una malla de perforación.

Para generar esta segregación de mineral/desmonte se tiene que programar cada taladro con retardos específicos, para ello se genera una tabla de retardos estándar.

Tabla 14

*Tiempos de retardo en función a la distribución de los taladros*

UBICACIÓN	INCREMENTO	OFFSET
D1 - Arranque	100	100
D2 - Primera ayuda	20	20
D3 - Cuadradores	30	30
D4 - Corona	10	0
D5 - Arrastre	10	0
M1 - Mineral	2000	150

*Nota.* Elaboración propia.

Se presentan mallas de perforación pilotos con sus respectivos retardos.

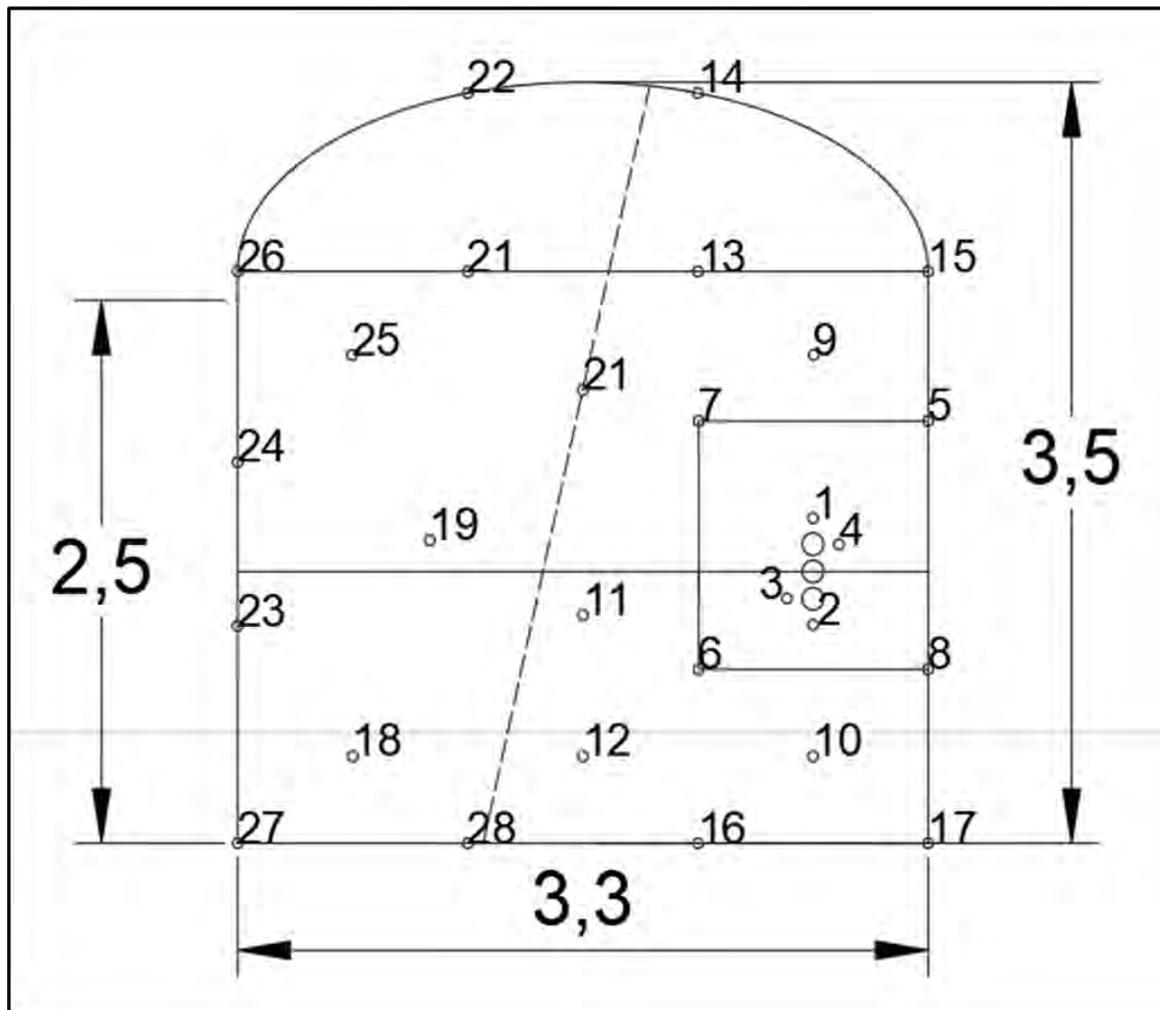


Figura 28. Malla N°1.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 15

*Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N°1*

N° TALADRO	RETARDO (MS)	TIPO
1	100	Desmante
2	200	Desmante
3	300	Desmante
4	400	Desmante
5	420	Desmante
6	440	Desmante
7	460	Desmante
8	480	Desmante
9	510	Desmante
10	540	Desmante
11	570	Desmante
12	600	Desmante
13	630	Desmante
14	640	Desmante
15	640	Desmante
16	650	Desmante
17	650	Desmante
18	2650	Mineral
19	2800	Mineral
20	2950	Mineral
21	3100	Mineral
22	3250	Mineral
23	3400	Mineral
24	3550	Mineral
25	3700	Mineral
26	3850	Mineral
27	4000	Mineral
28	4150	Mineral

*Nota.* Elaboración propia.



Figura 29. Malla N°2.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16

*Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N°2*

N° TALADRO	RETARDO (MS)	TIPO
1	100	Desmante
2	200	Desmante
3	300	Desmante
4	400	Desmante
5	420	Desmante
6	440	Desmante
7	460	Desmante
8	480	Desmante
9	510	Desmante
10	540	Desmante
11	570	Desmante
12	600	Desmante
13	610	Desmante
14	610	Desmante
15	620	Desmante
16	620	Desmante
17	2620	Mineral
18	2770	Mineral
19	2920	Mineral
20	3070	Mineral
21	3220	Mineral
22	3370	Mineral
23	3520	Mineral
24	3670	Mineral
25	3820	Mineral
26	3970	Mineral

*Nota.* Elaboración propia.

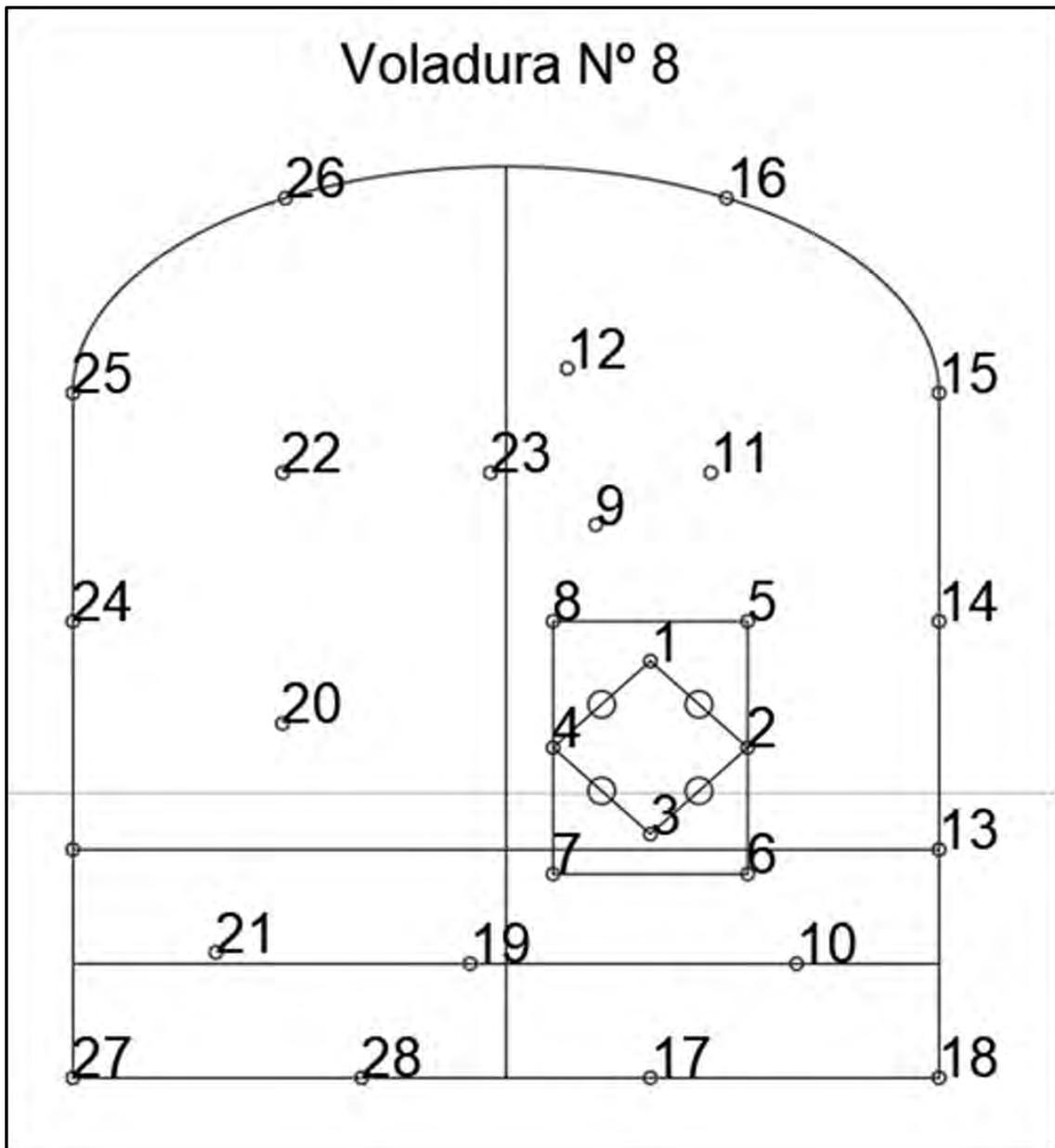


Figura 30. Malla N°3.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17

*Tiempos de retardo para cada taladro de la Malla N°3*

N° TALADRO	RETARDO (MS)	TIPO
1	100	Desmante
2	200	Desmante
3	300	Desmante
4	400	Desmante
5	420	Desmante
6	440	Desmante
7	460	Desmante
8	480	Desmante
9	510	Desmante
10	540	Desmante
11	570	Desmante
12	600	Desmante
13	630	Desmante
14	660	Desmante
15	670	Desmante
16	670	Desmante
17	680	Desmante
18	680	Desmante
19	2680	Mineral
20	2830	Mineral
21	2980	Mineral
22	3130	Mineral
23	3280	Mineral
24	3430	Mineral
25	3580	Mineral
26	3730	Mineral
27	3880	Mineral
28	4030	Mineral

*Nota.* Elaboración propia.

### 3.1.1.1. Costo total de explosivo de una malla de perforación:

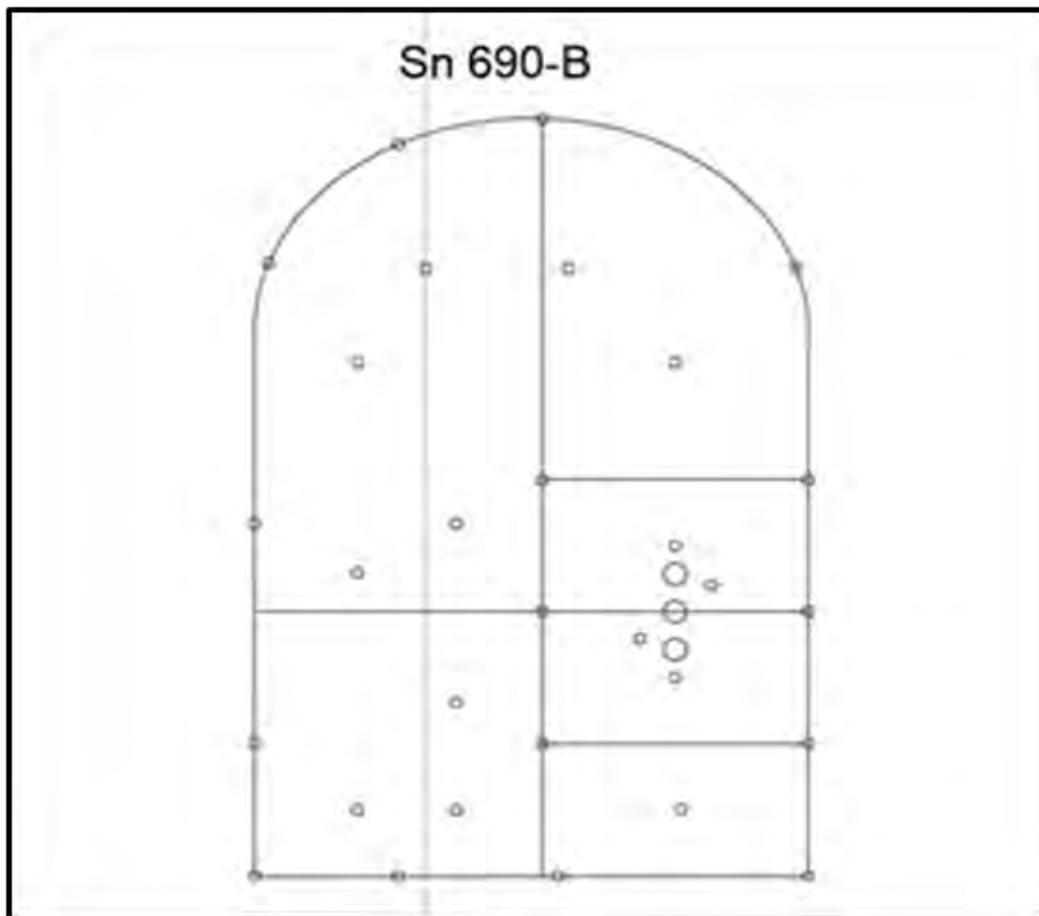
Se presentan las siguientes mallas de perforación donde están distribuidos los taladros, los cuales según su ubicación son cargados con emulsión Senatel Pulsar 1 ½ \* 12” desde los taladros de arranque hasta los taladros de 3ra ayuda, y Senatel Ultrex 1 ½ \* 12” para los taladros ubicados en la corona, ayuda de la corona, cuadradores o hastiales y arrastre.

En primer lugar, se debe categorizar los taladros según su tipo (Arranque, 1ra. ayuda, 2da. ayuda, 3ra ayuda, ayuda de corona, cuadradores, corona, arrastre), contar cuantos taladros hay en cada tipo y con la cantidad de cartuchos que se van a cargar en cada taladro.

Cada producto de emulsión tiene un peso específico (kg/unid). El peso unitario de las emulsiones Pulsar y Ultrex son 0.416 kg/unid y 0.403 kg/unid respectivamente. Además, se calcula el costo total del explosivo en base al producto del peso total del explosivo y el costo por peso de la emulsión, tanto para Senatel Pulsar y Senatel Ultrex siendo este valor de 1.62 US\$/kg.

Finalmente, la suma de los costos del explosivo para las diferentes ubicaciones de los taladros distribuidos en la malla permite hallar el costo total de explosivo empleado en el proceso de voladura.

En el caso de los detonadores electrónicos:



*Figura 31.* Malla de perforación.

Nota. Elaboración propia.

Fórmulas:

Peso Explosivo S. Pulsar = Peso Unitario S. Pulsar (Kg/unid) \* taladros cargados (unid)

Peso Explosivo S. Ultrex = Peso Unitario S. Ultrex (Kg/unid) \* taladros cargados (unid)

Costo Explosivo Pulsar = Costo Peso S. Pulsar (US\$/Kg) \* Peso Explosivo S. Pulsar (Kg)

Costo Explosivo Ultrex = Costo Peso S. Ultrex (US\$/Kg) \* Peso Explosivo S. Ultrex (Kg)

Costo Explosivo Total =  $\sum$  (Costo Explosivo Pulsar) +  $\sum$  (Costo Explosivo Ultrex)

Tabla 18

*Distribución de los taladros - detonadores electrónicos*

SECUENCIA DE SALIDA	DISTRIBUCIÓN DE TALADROS			ANÁLISIS DE COSTOS - EXPLOSIVO			
				CARTUCHOS POR TALADRO		TOTAL EXPLOSIVO	COSTO
	Denominación	Cargados	Vacíos	SENATEL PULSAR	SENATEL ULTREX		
				1 1/2" * 12"	1 1/2" * 12"		
1	Arranque	4	3	11		18.33	29.70
2	1ra. Ayuda	4	0	11		18.33	29.70
3	2da. Ayuda	3	0	10		12.50	20.25
4	3ra. Ayuda	5	0	10		20.83	33.75
5	Ayuda de Corona	2	0		8	6.45	10.45
6	Cuadradores (hastiales)	2	0		8	6.45	10.45
7	Corona	4	0		8	12.90	20.90
8	Arrastre	4	0		10	16.13	26.13
	TOTAL	28	3	168	104	111.91	181.33

Para el caso de los detonadores electrónicos aplicados en una malla compuesta por 28 taladros cargados, se obtiene un costo total de 181.33 US\$.

En el caso de los detonadores pirotécnicos:

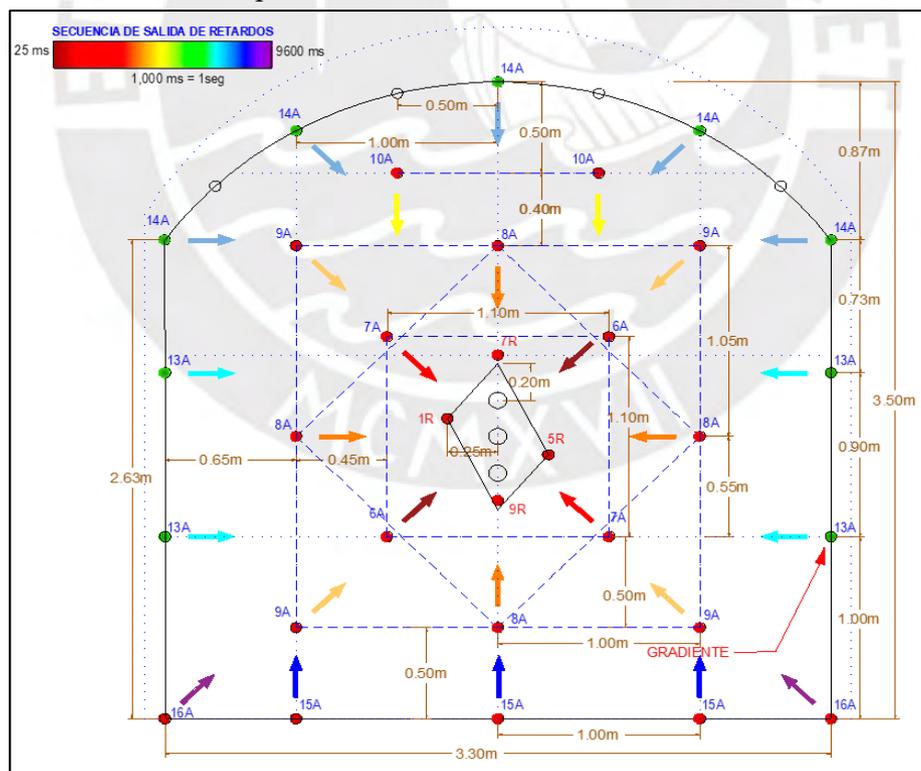


Figura 32. Malla de perforación.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19

*Distribución de los taladros - detonadores pirotécnicos*

SECUENCIA DE SALIDA	DISTRIBUCIÓN DE TALADROS			ANÁLISIS DE COSTOS - EXPLOSIVO			
				CARTUCHOS POR TALADRO		TOTAL EXPLOSIVO	COSTO
				SENATEL PULSAR	SENATEL ULTREX		
				1 1/2" * 12"	1 1/2" * 12"	unid	unid
1	Arranque	4	3	11		18.33	29.70
2	1ra. Ayuda	4	0	11		18.33	29.70
3	2da. Ayuda	4	0	10		16.66	27.00
4	3ra. Ayuda	4	0	10		16.66	27.00
5	Ayuda de Corona	2	0		8	6.45	10.45
6	Cuadradores (hastiales)	4	0		8	12.90	20.90
7	Corona	4	0		8	12.90	20.90
8	Arrastre	4	0		10	16.13	26.13
	<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>3</b>	<b>168</b>	<b>120</b>	<b>118.36</b>	<b>191.78</b>

*Nota.* Elaboración propia.

Para el caso de los detonadores pirotécnicos aplicados en una malla compuesta por 30 taladros cargados, se obtiene un costo total de 191.78 US\$.

### 3.1.1.2. Beneficio económico de voladura de una malla de perforación:

A continuación, se establece la comparación del valor económico de voladura por tonelaje para una malla de perforación con el uso de detonadores pirotécnicos y electrónicos. Esta malla tiene una sección de 3.5m x 3.8m y una longitud de perforación de 14 pies (4.27 m), ya que se trabaja con equipos frontoneros boomer de 14 pies.

Se han hecho pruebas y se reduce nuestra sobrerotura (over break) con el uso de detonadores electrónicos a comparación de los detonadores pirotécnicos ya que se puede controlar la energía de los taladros de contorno (hastiales y corona). La sobre excavación se ve reducida de 10% a 7%. La sobrerotura debilita la roca en toda su periferia, y genera riesgo de colapso del techo o los hastiales. Asimismo, se toma en cuenta la eficiencia del disparo que es una relación entre longitud de perforación y longitud volada.

De esta manera, se obtiene la longitud efectiva resultado del producto de la longitud perforada y la eficiencia del disparo; y el área de voladura como el producto del ancho y largo de diseño de la malla y el porcentaje de sobrerotura. Con los valores de la superficie y la longitud lineal de perforación se determina el volumen de material que será extraído de la voladura. Para expresar dicho valor en tonelaje, se realiza un producto con el peso específico del material.

Posteriormente, con el valor del VPT permite calcular el valor total que implica la voladura para cierto tonelaje de material. Nuestro cálculo de VPT se basa en los valores de leyes muestreados en cancha de acumulación antes de ingresar a planta multiplicado por su Valor Punto o eficiencias de recuperación y maquilas. Gracias a la segregación mineral/desmante usando detonadores electrónicos las leyes muestreadas en cancha son mayores a las generadas por voladuras pirotécnicas.

Existe una variación de valor empleando detonadores electrónicos y pirotécnicos, debido a que la eficiencia de disparo en el primero es mayor lo cual favorece de forma considerable la efectividad de la voladura. Asimismo, la sobrerotura es mayor usando el explosivo pirotécnico, lo cual afecta significativamente la concentración de dilución, incrementando la cantidad de material estéril.

Fórmulas:

$$\text{Longitud Efectiva (m)} = \text{Longitud perforación (m)} * \text{Eficiencia de disparo (\%)}$$

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \text{Ancho Diseño (m)} * \text{Largo Diseño (m)} * (1 + \% \text{ Sobrerotura})$$

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{Área(m}^2\text{)} * \text{Longitud efectiva (m)}$$

$$\text{Tonelaje (ton)} = \text{Volumen (m}^3\text{)} * \text{Peso específico (Ton/m}^3\text{)}$$

$$\text{VPT (US\$/Ton)} = \text{ley (gr/Tn)} * \text{precio (\$/Tn)} * \text{recuperaciones (\%)} * \text{factor (oz/gr)}.$$

Tabla 20

*Datos de entrada del diseño de malla de perforación*

EXPLOSIVO	ANCHO DISEÑO (m)	LARGO DISEÑO (m)	SOBREROTURA (%)	LONGITUD PERFORACIÓN (m)	EFICIENCIA DISPARO (%)
PIROTÉNICO	3.5	3.8	10%	4.27	88%
ELECTRÓNICO	3.5	3.8	7%	4.27	97%

*Nota.* Elaboración propia.

Para el cálculo de VPT se tomó como muestra 9 disparos el cuales fueron muestreados obteniendo las siguientes leyes:

Tabla 21

*Leyes in situ, pirotécnica y electrónica de las muestras*

	Ley insitu de veta (Gr. Ag/Tn)	Ley pirotécnico (Gr. Ag/Tn)	Ley electrónico (Gr. Ag/Tn)
1	267.62	59.47	150
2	89.4	37.93	63.665
3	435.89	145.3	264
4	441.01	170.71	192.43
5	121.66	29.37	81.2575
6	485.85	114.32	300.085
7	250.88	70.25	160.565
8	424.95	161.19	184
9	555.67	226.22	314.5
Promedio	341.44	112.75	190.06

*Nota.* Elaboración propia.

Tabla 22

*Cálculo de VPT para los detonadores pirotécnico y electrónico*

EXPLOSIVO	LEY (gr/Tn)	PRECIO Ag (US\$/Oz)	RECUPERACIONES (%)	FACTOR (Oz/gr)	VPT (US\$/Tn)
PIROTÉNICO	112.75	25.58	80%	0.035	81.39
ELECTRÓNICO	190.06	25.58	80%	0.035	137.19

*Nota.* Elaboración propia.

Tabla 23

*Datos de salida y costo total de voladura*

EXPLOSIVO	LONGITUD EFECTIVA (m)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO (Ton/n <sup>3</sup> )	TONELAJE (Ton)	VPT (US\$/Ton)	BENEFICIO TOTAL (US\$)
PIROTÉNICO	3.76	14.63	54.97	3.2	175.92	81.39	14,317.37
ELECTRÓNICO	4.14	14.23	58.94	3.2	188.62	137.19	25,876.39

*Nota.* Elaboración propia.

### 3.1.1.3. Análisis económico mensual usando detonadores electrónicos y pirotécnicos

En esta parte del desarrollo se realiza un análisis económico en base al plan mensual del programa de voladura aplicado en vetas angostas, que consiste en la comparación entre el uso de detonadores electrónicos y pirotécnicos, con el objetivo de verificar la efectividad de un tipo de detonador a diferencia del otro en términos económicos.

Previo al proceso de voladura se tiene la fase de preparación ubicado en el Nivel 100 de la Zona Baja, consiste en una serie de vetas a la que le corresponden distintas labores los cuales tienen una sección de 3.5m x 3.8m. La longitud de avance, es variable en función del programa de voladura, condiciones geomecánicas y geología del cuerpo mineralizado, es muy importante para el cálculo del número de disparos en el frente y los costos operativos posteriores que se mostrarán más adelante.

Para obtener el costo total por disparo de un frente se toman en cuenta la longitud efectiva de perforación y el número de taladros a lo largo de la malla. Asimismo, para una labor se rige de un metraje mensual el cual representa a la medida lineal que procederá a ser volada dentro del plan de minado.

El costo del explosivo se determinó como resultado de la suma de los costos de los taladros ubicados según la distribución en la malla de perforación en función al peso total del explosivo

y el costo por peso del mismo (en US\$/kg). El costo de detonador se obtiene del producto del número de taladros y el precio unitario del detonador dado por el proveedor. Además, el costo operativo sin carguío equivale al producto de la longitud efectiva de perforación y el precio unitario del costo operativo sin carguío (en US\$/m). Finalmente, el Costo Total representa a la suma del Costo del Explosivo, Costo del Detonador y el Costo Operativo sin Carguío.

Para nuestros costos, según la información de la Mina Huarón, el Costo operativo el cual implica todas las operaciones unitarias como la perforación, voladura, ventilación, acarreo, transporte, sostenimiento, servicios y materiales correspondientes es de aproximadamente 1200 US\$/m de avance. La única variable a cambiar es el carguío, porque el resto de actividades unitarias son necesarias y obligatorias durante el ciclo de minado. Sustrayendo la actividad de carguío, el costo operativo alcanza un valor de 1184.50 US\$/m.

Fórmulas:

$N^{\circ} \text{ Disparos} = \text{Metraje mensual} / \text{Longitud efectiva}$

$\text{Costo Det. Pirotécnico (US\$)} = N^{\circ} \text{ Taladros} * \text{Precio Unitario Det. Pirotécnico}$

$\text{Costo Det. Electrónico (US\$)} = N^{\circ} \text{ Taladros} * \text{Precio Unitario Det. Electrónico}$

$\text{Costo Operativo sin carguío (US\$)} = \text{Longitud efectiva} * \text{Precio Unitario Costo Operativo sin carguío (US\$/m)}$

$\text{Costo Total} = \text{Costo Explosivos} + \text{Costo Detonadores} + \text{Costo Operativo sin carguío}$

$\text{Utilidad (US\$)} = \text{Beneficio Total} - \text{Costo Total}$

Tabla 24

*Precios unitarios de detonadores y costo operativo sin carguío*

P.U. detonador pirotécnico (\$/unid)	P.U. detonador electrónico (\$/unid)	P.U. costo operativo sin carguío (\$/m)
1.45	11.5	1,184.50

*Nota.* Elaboración propia.

Tabla 25

*Costo del explosivo, costo del detonador, costo operativo sin carguío y costo total*

Detonador	Longitud efectiva (m)	Nº taladros	Costo de explosivos (\$)	Costo de detonadores (\$)	Costo operativo sin carguío (\$)	Costo Total (\$)
Electrónico	4.14	28	181.33	322.00	4,903.83	5,407.16
Pirotécnico	3.76	30	191.78	43.50	4,453.72	4,689.00

*Nota.* Elaboración propia.

El número de disparos es la relación del metraje mensual y la longitud efectiva. Con este indicador será posible obtener tanto el beneficio como costo total, de forma mensual. Por lo tanto, la utilidad se obtiene de la diferencia del beneficio con el costo total.

Tabla 26

*Número de disparos en función a parámetros de la malla*

Detonador	Longitud efectiva (m)	Metraje mensual (m)	Nº Disparos
Electrónico	4.14	735	178
Pirotécnico	3.76	735	195

*Nota.* Elaboración propia.



La finalidad de este análisis es determinar dichos valores usando detonadores electrónicos y pirotécnicos, para establecer una comparación entre los beneficios totales, costos totales y utilidades. Posteriormente, se saca una diferencia entre las utilidades de los detonadores electrónicos y pirotécnicos, verificando la efectividad del uso de uno de los detonadores frente al otro desde el punto de vista económico.

Por último, el análisis económico se muestra en la presente tabla donde se comparan los valores para los beneficios como los costos totales y utilidades realizados para un disparo en un frente, tanto para los detonadores electrónicos y pirotécnicos.

Tabla 28

*Análisis económico por disparo*

Análisis económico por disparo			
Detonador	Beneficio Total (\$)	Costo Total (\$)	Utilidad (\$)
Electrónico	25,876	5,407	20,469
Pirotécnico	14,317	4,689	9,628
Diferencia			10,841

*Nota.* Elaboración propia.

El mismo criterio se aplica en el análisis económico por mes, donde se muestran los valores de los beneficios como los costos totales y utilidades equivalente a la totalidad de disparos realizados durante el mes, tanto para los detonadores electrónicos y pirotécnicos.

Tabla 29

*Análisis económico mensual*

Análisis económico al mes			
Detonador	Beneficio Total (\$)	Costo Total (\$)	Utilidad (\$)
Electrónico	4,593,997	959,967	3,634,030
Pirotécnico	2,798,741	916,600	1,882,141
Diferencia			1,751,888

*Nota.* Elaboración propia.

### **3.1.2. Vibraciones:**

#### **3.1.2.1. Análisis de vibraciones para frentes de avances:**

En esta parte del proyecto, se realiza un monitoreo de vibraciones con sismógrafos de la marca Instantel y varios geófonos, se hizo un estudio de velocidad pico partícula (VPP) de las voladuras usando nuestros detonadores en mención: pirotécnicos y electrónicos. Las vibraciones generadas en un campo cercano a la labor es de importancia controlar y estudiar ya que hay una relación directamente proporcional entre la afectación de las cajas, la sobre excavación y las vibraciones.

Como metodología, se hicieron mediciones a diferentes distancias del frente (m), los geófonos deben ubicarse en un lugar seguro y de fácil recuperación, con la ayuda de un taladro Hilti se posicionan en los hastiales, se debe de conocer cuál es la distancia exacta de los geófonos al frente. Esta metodología se aplica para los dos tipos de detonadores: electrónicos y pirotécnicos.

La bondad del detonador electrónico es que al ser programable al 100%, se controla los retardos y por ende el criterio de daño. Esto conlleva a que se dosifique mejor la energía en el contorno de la labor y se reduzcan las vibraciones, a diferencia de los detonadores pirotécnicos, los cuales no son programables. La reducción y control de las vibraciones apoyan al auto sostenimiento de las labores, la generación de nuevas microfracturas y es más seguro para el personal y los equipos. Para hacer una comparación en igualdad de condiciones para ambos detonadores se presenta una regresión lineal de velocidad pico partícula (VPP) y metraje.

Durante el proceso de pruebas, se presentaron dificultades como el levantamiento de la desviación de los taladros perforados en el frente. Se cuenta con un medidor digital Pee Wee que se utiliza para medir desviación de los taladros cada metro; sin embargo, no siempre se

puede realizar la medición de desviaciones por problemas operacionales. Se debe considerar que los diseños de las mallas de perforación son muy variables, ya que depende de la posición de la veta en el frente. Todas estas son variables que deben de considerarse en el análisis de vibraciones, este estudio trata de ser lo más representativo posible.

Como premisa se hace un mapeo geomecánico para analizar la calidad del macizo rocoso. Mediante el uso de tablas empíricas, se presentan los indicadores de geomecánica del macizo rocoso y estructura mineralizada para cada labor. Estos son la calidad de roca RMR, el Q` de Barton, número de estabilidad (N'). Se debe tomar en cuenta que las condiciones estructurales y de calidad de roca. A continuación, se presentan los indicadores obtenidos por cálculos geomecánicos.

Tabla 30

*Parámetros geomecánicos del macizo rocoso y mineral en las labores de estudio*

LABOR	TIPO DE PERFORACION	VETA	CALIDAD DE ROCA (RMR)			CALIDAD DE ROCA (Q)			NUMERO DE ESTABILIDAD (N')			
			C. TECHO	ESTRUCTURA	C. PISO	C. TECHO	ESTRUCTURA	C. PISO	A	B	C	N'
TJ 568	POSITIVO	HALLEY	45	40	47	1.12	0.64	1.4	1	0.70	5.46	2.45
TJ 929	POSITIVO	PROVIDENCIA RAMAL	37	35	38	0.46	0.37	0.51	1	0.80	6.45	1.90
TJ 250	POSITIVO	LLACSACOCHA	39	29	38	0.57	0.19	0.51	1	0.70	5.46	0.72

*Nota.* Elaboración propia.

Para esto se aplica la ecuación de Devine para modelar el comportamiento de las vibraciones en las labores de estudio usando detonadores electrónicos y pirotécnicos. Esta relaciona la velocidad pico partícula (VPP) en mm/s, el peso de la carga explosiva detonada de forma instantánea (W) en Kg y la distancia al punto de observación (d) en m. Mediante un ajuste matemático, permite obtener los valores de k y  $\alpha$ , que representan las características del

comportamiento vibracional manifestada en la siguiente ecuación denominada “Ley de Atenuación de Vibraciones”:

$$VPP = k * \left[ \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right) \right]^{-\alpha}$$

Donde:

- VPP es la velocidad de partícula (mm/s)
- D es la distancia escalar al punto de medición (m)
- K es el factor de amplitud
- $\alpha$  es el factor de atenuación
- W es el peso máximo del explosivo por retardo (Kg)

Para el caso de los detonadores pirotécnicos se obtienen los siguientes resultados de la distancia escalar en función a la distancia de monitoreo y el peso máximo del explosivo por retardo, así como la velocidad pico partícula en los taladros.

Tabla 31

*Distancia escalar y velocidad pico partícula con detonadores pirotécnicos*

D (m)	W (Kg)	De = $D/w^{1/2}$	VPP (mm/s)
Distancia de Monitoreo	Carga Máxima sobre petardo	Distancia escalar	Velocidad Pico Particula
30.00	16.00	7.50	18.78
35.00	16.00	8.75	10.07
25.00	16.00	6.25	21.85
26.80	8.60	9.14	14.92
33.34	8.60	11.37	9.37
30.11	8.60	10.27	12.87

*Nota.* Elaboración propia.

Por otro lado, en el caso de los detonadores electrónicos se obtienen los siguientes resultados de la distancia escalar en función a la distancia de monitoreo y el peso máximo del explosivo por retardo, así como la velocidad pico partícula en los taladros.

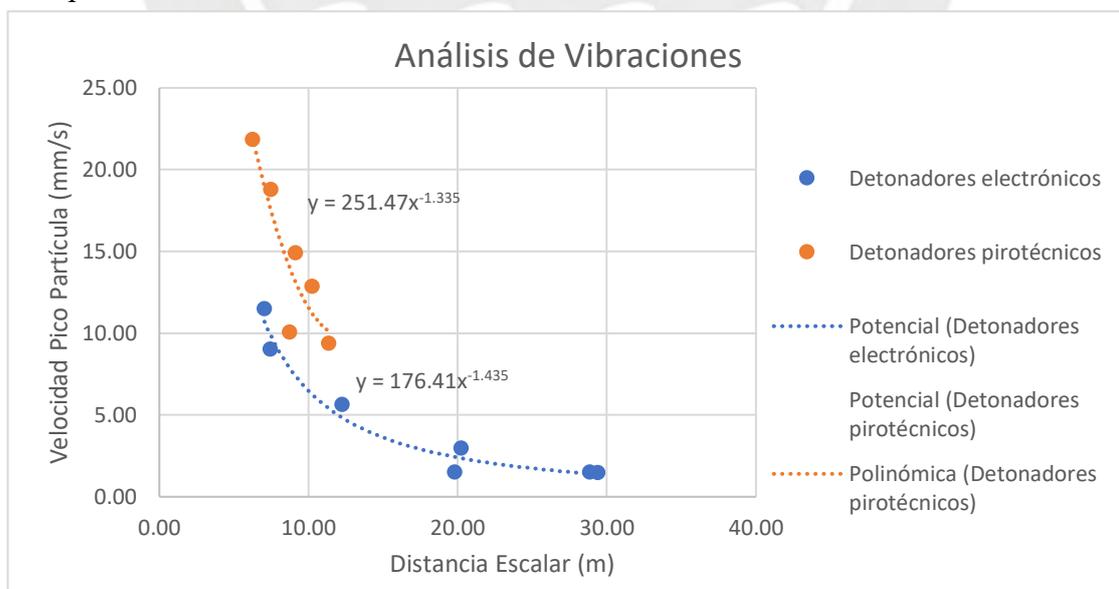
Tabla 32

*Distancia escalar y velocidad pico partícula con detonadores electrónicos*

D (m)	W (Kg)	$De = D/w^{1/2}$	VPP (mm/s)
Distancia de Monitoreo	Carga Máxima sobre petardo	Distancia escalar	Velocidad Pico Partícula
20.4	7.50	7.45	9.01
19.3	7.50	7.05	11.50
25.0	4.16	12.26	5.62
55.4	7.50	20.23	2.95
54.3	7.50	19.83	1.50
60.0	4.16	29.42	1.48
58.9	4.16	28.88	1.50

*Nota.* Elaboración propia.

Posteriormente, se juntan ambos gráficos tomando como base las distancias escalares y velocidad pico partícula, y aplicando la fórmula de la Ley de vibraciones se determinan los factores de amplitud y atenuación ( $k$  y  $\alpha$ ), siendo estos las constantes del explosivo y el macizo rocoso respectivamente.



*Figura 33.* Análisis de vibraciones con detonadores pirotécnicos y electrónicos.

*Nota:* Elaboración propia.

Con los resultados, se obtiene una constante de explosivo de 251.47 para el caso de detonadores pirotécnicos, y 176.41 para los detonadores electrónicos respectivamente. Por otro lado, la constante de macizo rocoso es 1.335 para el caso de los detonadores pirotécnicos, y 1.435 en los electrónicos respectivamente.

Los resultados de las vibraciones se analizan en la data según la figura correspondiente, como se aprecia todos los datos están acorde bajo la normativa española de vibraciones del grupo 3, arquitecturas de valor arquitectónico, en alta frecuencia.

### **3.2. Análisis de resultados**

#### **3.2.1. Análisis de mallas usando detonadores electrónicos y pirotécnicos:**

En base a la malla de perforación, se debe ubicar el arranque donde haya mayor concentración de material de desmonte para lograr la segregación mineral/ desmonte, el cual dicha relación se mantiene en 60%/40%. Por un lado, los detonadores pirotécnicos usan mallas tradicionales donde el arranque se ubica en el centro de la misma, para llevar la estructura mineralizada en el centro.

Por otro lado, con el uso de detonadores electrónicos la estructura mineralizada se lleva hacia uno de los hastiales a la caja techo. Es por eso que en una voladura con detonadores electrónicos se programan los taladros con retardos específicos de acuerdo a su distribución en la malla, con rangos de incremento establecidos.

Se presentaron tres ejemplos de mallas de perforación distribuidos por distintas labores donde se aprecian el tiempo de retardo para cada taladro según su tipo de material, y ubicación en la malla.

#### **3.2.2. Indicadores de productividad**

La innovación en el uso de detonadores electrónicos mejora el proceso de voladura haciéndolo más productivo y seguro frente a los detonadores pirotécnicos. Se presentan los kpis de voladura en las siguientes figuras.

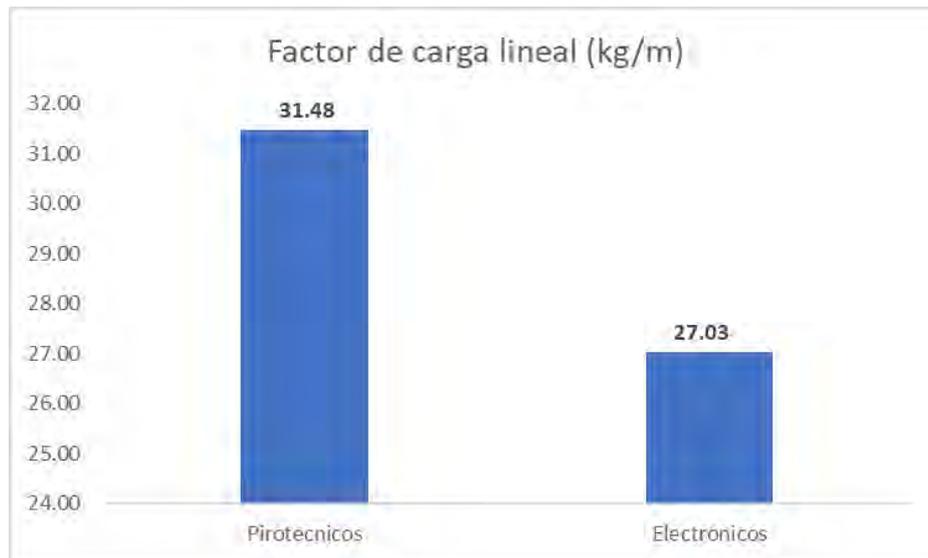


Figura 34. Factor de carga lineal (kg/m).

Nota. Elaboración propia.

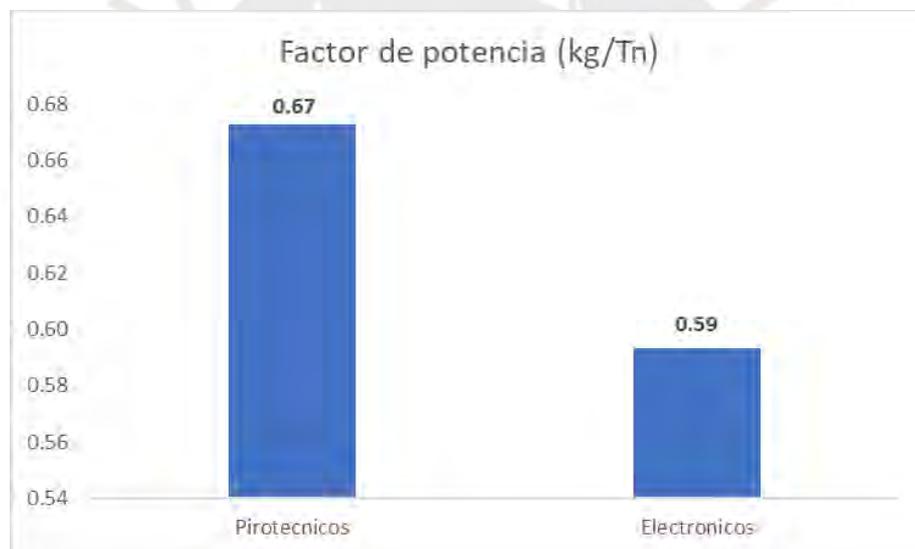


Figura 35. Factor de potencia (kg/Tn).

Nota. Elaboración propia.

Se expone la mejor productividad que se tiene al usar detonadores electrónicos en la mina Huarón, los kpis son menores lo cual mejora la operación, la seguridad y la rentabilidad.

### **3.2.3. Costo total de explosivo de una malla de perforación:**

El costo total de explosivo de una malla de perforación, está en función del peso del explosivo. Dicho valor se determina del producto del peso unitario del explosivo y el número de taladros cargados por cada tipo de emulsión.

Después, el peso del explosivo se multiplica con el costo por peso del explosivo equivalente a 1.62 US\$/kg, dando a conocer el valor del Costo del Explosivo, de acuerdo a la ubicación del taladro en la malla de perforación. Para el caso de una malla de detonadores electrónicos se obtiene un costo total de 181.33 US\$, y para los detonadores pirotécnicos, 191.78 US\$ respectivamente.

### **3.2.4. Beneficio económico de voladura de una malla de perforación:**

Para una malla de perforación de 3.5m x 3.8m, y en función a los valores de sobrerotura y eficiencia del disparo para cada tipo de explosivo, se obtienen una longitud de perforación efectiva de 3.76m y 4.14m, para los detonadores pirotécnicos y electrónicos respectivamente.

Por consiguiente, el área de malla es 14.63m<sup>2</sup> y 14.23m<sup>2</sup>, con los detonadores pirotécnicos y electrónicos respectivamente. Con la longitud efectiva y la superficie a volar, resulta un volumen de 54.97m<sup>3</sup> y 58.94m<sup>3</sup> usando detonadores pirotécnicos y electrónicos. Dichos valores expresados en tonelaje, en base al peso específico del material igual a 3.2 Ton/m<sup>3</sup>, se representan con los valores de 175.92 Ton y 188.62 Ton, en el ese mismo orden.

El cálculo del valor por tonelada extraída se determina partiendo de un promedio ponderado de las leyes pirotécnico y electrónico, siendo estos 112.75 gr/Ton y 190.06 gr/Ton respectivamente. Por consiguiente, en base al precio del mineral (25.58 US\$/Oz) y las recuperaciones (80%) y factor de conversión (0.0035 Oz/gr) se obtiene el valor del VPT. Para

los detonadores pirotécnicos es de 81.39 US\$/Ton y los detonadores electrónicos es de 137.19 US\$/Ton.

### **3.2.5. Análisis económico mensual usando detonadores electrónicos y pirotécnicos**

El costo de detonadores es el producto de la totalidad de taladros por el precio unitario del detonador, sea este pirotécnico o electrónico. Para el frente que cuenta con 28 taladros y el precio del detonador electrónico es 11.5 US\$, genera un costo de 322.00 US\$. Mientras, para una frente que dispone de 30 taladros y el precio del detonador pirotécnico es de 1.45 US\$, resulta un costo de 43.50 US\$.

El costo operativo sin carguío equivale al producto entre el precio unitario del mismo por metro y la longitud efectiva, que depende del tipo de detonador. Para el detonador electrónico tiene una longitud efectiva de 4.14m y un precio unitario de costo operativo de 1,184.50 US\$, con un valor de costo operativo del mismo de 4,903.83 US\$. En el caso de un detonador pirotécnico tiene una longitud efectiva de 3.76m y el mismo precio unitario de costo operativo, se obtiene un valor de costo operativo del mismo de 4,453.72 US\$.

En efecto, el uso de detonadores electrónicos considerando estos factores presenta un mayor costo frente a los detonadores pirotécnicos. En el análisis económico por disparo para el detonador electrónico se obtienen los valores de beneficio y costo total de 25,876 US\$ y 5,407 US\$, respectivamente. Como diferencia de ambos se obtiene una utilidad de 20,469 US\$. Para el caso del uso de detonadores pirotécnicos se obtienen los valores de beneficio y costo total de 14,317 US\$ y 4,689 US\$, respectivamente. Como diferencia de ambos se obtiene una utilidad de 9,628 US\$. Si comparamos ambos productos se genera una utilidad de 10,841 US\$ por cada disparo generado.

Para este mismo criterio aplicado de forma mensual dada la totalidad de disparos, en el caso del detonador electrónico se obtienen los valores de beneficio y costo total de 4,593,997 US\$ y 959,967 US\$, respectivamente. Como diferencia de ambos se obtiene una utilidad de 3,634,030 US\$. Por otro lado, en el caso de los detonadores pirotécnicos se obtienen los valores de beneficio y costo total de 2,798,741 US\$ y 916,600 US\$, respectivamente. Como diferencia de ambos se obtiene una utilidad de 1,882,141 US\$.

Con las cifras finales de ambas utilidades se obtiene una variación de 1,751,888 US\$, donde se refleja en el eficiente uso de los detonadores electrónicos frente a los detonadores pirotécnicos. Todo gracias a la segregación mineral/desmante lo cual genera una mejor ley después del disparo.

### **3.2.6. Vibraciones:**

El foco principal de la minería es mantener la sostenibilidad con seguridad. El 60% de los incidentes y accidentes en la industria minera se debe a la caída de rocas. Por ello, mediante el uso de los detonadores electrónicos también queremos aportar a una mejora en la seguridad. El aporte de los detonadores electrónicos en la seguridad, se realiza mediante el control de vibraciones y menor exposición del personal al proceso de chispeo o detonación de los electrónicos.

Son estas vibraciones la que afectan el campo cercano de la labor, a mayor vibración genera golpe de las cajas, y mayor es la redistribución de esfuerzos litostáticos en la labor, generando también mayor sobreexcavación por ello según las pruebas se reduce en un 50% la velocidad pico partícula (mm/s), eso lleva consigo a que las cajas se afecten a la mitad y se reduzca la sobre excavación de 10% a 7%. La normativa sobre vibraciones en el Perú toma como referencia la norma española, la cual indica que toda velocidad pico partícula en alta frecuencia debe estar por debajo del Grupo III correspondiente a edificaciones arqueológicas en las cuales

están clasificadas las minas, el 100% de voladuras usando detonadores electrónicos si cumplen con este requisito.

La menor exposición del personal al momento del carguío es uno de los atributos que tienen los detonadores electrónicos, ya que no se requiere que el personal esté bajo la línea de fuego para el chispeo de la mecha rápida, porque al ser un sistema electrónico es el voltaje el que lleva la comunicación a todo el amarre de explosivo y es lo que genera la detonación, el operador en todo momento se encuentra en un refugio seguro. Por otro lado, el personal al estar en un refugio seguro y alejado se reduce la posibilidad de inhalar algún gas dañino producido por la voladura.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Dados los resultados en el desarrollo del proyecto, se verifica que el uso de detonadores electrónicos permite optimizar el proceso de voladura y la seguridad en la Unidad Minera de estudio.
2. Para el cálculo del beneficio total, se deduce que a partir de la ley promedio, el detonador electrónico es mayor en un 69% que el detonador pirotécnico. Por lo que, el VPT se incrementa en un 69% a favor del detonador electrónico, lo que comprueba su eficiencia en el instante de la obtención del material volado producto de la voladura.
3. Respecto al Costo de explosivos, debido al número de taladros en la malla de perforación resulta ser mayor en el caso de los explosivos pirotécnicos. Sin embargo, el costo de los detonadores es mucho mayor en los detonadores electrónicos debido al precio unitario del mismo (11.5US\$/unidad), siendo diez veces más el precio del detonador pirotécnico. Por último, el costo operativo sin carguío es mayor en los detonadores electrónicos ya que la longitud efectiva de perforación es mayor debido a que presenta mejor eficiencia de disparo.

Finalmente, se obtiene un mayor costo total usando el detonador electrónico, con un valor de 5,407.16 US\$ frente a 4,689.00 US\$ de detonador pirotécnico. Por ende, se refleja un aumento del 15% del costo cuando se emplean detonadores electrónicos a diferencia de los pirotécnicos.

4. En el análisis económico por disparo, la utilidad es mayor en los detonadores electrónicos con una cifra de 20,469 US\$ frente a los detonadores pirotécnicos cuyo valor es 9,628 US\$. Dicha diferencia de 10,841 US\$ se evidencia en el beneficio total que ofrecen los detonadores electrónicos que superan en consideración a los pirotécnicos, a pesar de tener un costo total mayor.

5. Para el análisis económico mensual, la utilidad es mayor en los detonadores electrónicos con una cifra de 3,634,030 US\$ frente a los detonadores pirotécnicos cuyo valor es 1,882,141 US\$. Dicha diferencia de 1,751,888 US\$ se evidencia en el beneficio total que ofrecen los detonadores electrónicos que superan en consideración a los pirotécnicos, a pesar de tener un costo total mayor. De este último, se deduce que el uso de detonadores electrónicos es muy factible para el proceso de voladura debido a un retorno económico fuerte.

6. Respecto a los indicadores de productividad, los detonadores pirotécnicos tienen un factor de carga lineal de 31.48 kg/m, mientras los detonadores electrónicos equivalen a 27.03 Kg/m. Además, los detonadores pirotécnicos tienen un factor de potencia de 0.67 kg/Ton, mientras los detonadores electrónicos presentan un valor de 0.59 kg/Ton. Por lo tanto, cuanto menor son estos indicadores, resulta más efectiva la efectividad en la productividad y seguridad en el proceso de voladura con el uso de los detonadores electrónicos.

7. Para las vibraciones, mediante la fórmula de la Ecuación de Devine, en los detonadores pirotécnicos se obtiene la constante de explosivo de 251.47 y constante de macizo rocoso de 1.335, respectivamente. Por otro lado, para los detonadores electrónicos se obtiene la constante de explosivo de 176.41 y constante de macizo rocoso de 1.435, respectivamente. Con el soporte

de la gráfica se pone de evidencia la mayor velocidad de pico partícula efectuada por la voladura con detonadores pirotécnicos el cual alcanza un máximo de 21.85 mm/s, y un mínimo de 1.50 mm/s con los detonadores electrónicos. Este último es importante porque la tendencia al cual pertenece refleja curva de reducción de vibraciones en el proceso de voladura.

## 5. RECOMENDACIONES

1. El mayor rendimiento de los detonadores electrónicos se da para cierta característica de terreno, se recomienda la aplicación en terrenos de calidad de roca IIIA y IIIB, GSI: F/R, F/P. Se hicieron pruebas con rocas muy fracturadas y la energía de los detonadores electrónicos se disipan en las fracturas y no genera un halo de energía en superposición.
2. La relación entre mineral/desmante debe ser 60%/40%. Por otro lado, si en la labor hay una mayor estructura de mineral es mejor que se realicen disparos usando detonadores pirotécnicos ya que el valor agregado de segregación no será lo más importante.
3. Las vetas deben de ubicarse hacia la caja techo, ya que tiene una mayor longitud de veta a comparación de la caja piso. Si se lleva la veta en el centro de la labor no se tendrá espacio para ubicar el arranque en la estructura de desmante.
4. Aplicar una herramienta de gestión para carguíos con detonaciones electrónicos donde los colaboradores puedan registrar la cantidad de taladros cargados, la distribución de la malla de perforación, los tiempos de retardos empleados, la operatividad y buen estado de los detonadores electrónicos, y la cantidad que se retornó a polvorín; este formato ayudará a la supervisión e ingenieros saber la información detallada de la voladura.
5. Utilizar detonadores electrónicos en labores prioritarias en desmante como rampas, cruceros o by pass. Como se ha demostrado una mayor longitud efectiva de avance con detonadores eléctricos a comparación de los pirotécnicos, se necesita menor cantidad de disparos para llegar

al objetivo; es decir, se necesita menos días y menos disposición de recursos. Si bien es cierto no habrá una segregación mineral/desmante, el objetivo de usarlo en frentes de desmante es el mayor avance de disparo, para ello, se necesita una nueva distribución de mallas de perforación y nuevos retardos.

6. Hay una aplicación adicional de los detonadores electrónicos en mina subterránea, se puede aplicar para taladros largos con el objetivo de programar los retardos para reducir vibraciones en las cajas y con ello que se descaje menos el tajo, se mejorar la ley del tajo y por ende en VPT (valor por tonelada).

7. Capacitar al personal con el uso de nuevas tecnologías en perforación y voladura, esto genera una autonomía en el desarrollo de las operaciones.

8. Estas pruebas se realizaron en la U.M. Huarón, toda mina tiene condiciones litológicas, geológicas y geomecánicas distintas, por ello se recomienda realizar un estudio detallado antes de realizar voladuras con detonadores electrónicos ya que los rendimientos pueden ser distintos.

9. Al ser voladuras de alta complejidad e innovación se recomienda el uso de instrumentación como sismógrafos y geófonos, microtrap para medir velocidad de detonación, cámara de alta velocidad con el objetivo de tener un buen control de cada parámetro de voladura.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

**1. Romero Paucar, Royer. “Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el Tajo Toromocho – Mina Chinalco Perú S.A.”.** Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Centro del Perú (2016).

**2. Huamán Ubillús, Augusto. “Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú, seguridad y versatilidad”** Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional de Ingeniería (2010).

3. **Peña Paredes, Jaime Wilmer. “Reducir el porcentaje de dilución mediante el reemplazo de detonadores pirotécnicos por detonadores electrónicos, en la Fase 5 del Tajo Isabelita - El Toro”** Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional de Trujillo (2019).
4. **Mamani Valdez, Yony David. “Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la Mina Toquepala”** Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (2018).
5. Orica Mining Services. Curso Básico de Voladura (2013).
6. Orica Mining Services. Manual del Sistema Exel (2013).
7. Orica Mining Services. Manual del Sistema I-Kon (2013).
8. Vela Portocarrero, Neyver. *Explosivos comerciales* (2019). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa - UNSA. Facultad de Ingeniería Geológica, Geofísica y Minas - FGGM. Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.  
[https://www.academia.edu/36709774/EXPLOSIVOS\\_COMERCIALES](https://www.academia.edu/36709774/EXPLOSIVOS_COMERCIALES)
9. Universidad Tecnológica de Chile - Instituto Profesional Centro de Formación Técnica INACAP (2011). Área Minería y Metalurgia. Extracción Mina I: Apuntes explosivos.  
[http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI\\_OPEX01\\_Material\\_Extraccion\\_Mina\\_I\\_Explosivos.pdf](http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPEX01_Material_Extraccion_Mina_I_Explosivos.pdf)
10. Chura Lope, Wilberth. *Fundamentos sobre explosivos y la teoría de la detonación* (2018). Dirección Regional de Energía y Minas. Universidad Nacional de Moquegua.  
<http://energiayminasmoquegua.gob.pe/web/phocadownload/capacitaciones/2-Fundamentos-sobre-Explosivos.pdf>

11. Andrade Haro, Byron. *Seguridad en el empleo de explosivos* (2013). Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador. Taller de capacitación AIME. <https://www.aimecuador.org/documentos/capacitacion/presentaciones-varios/12-manejo-explosivos-subterranea/file.html>
12. Cao Rodríguez, Mauricio. *Emulsiones explosivas en Colombia* (2016). ENAEX. <https://www.indumil.gov.co>
13. Orica Mining Services. Buenas prácticas Sistema eDev.
14. López Jimeno, Carlos., López Jimeno, Emilio., García Bermúdez, Pilar. (2003) *Manual de Perforación y Voladura de rocas*. Madrid, España: Carlos López Jimeno.
15. Mc Kenzie, Cameron. (1994) *Estado del Arte de la Tronadura*. Santiago, Chile.
16. Konya, Calvin J. *Manual de Voladura* (1990). Estados Unidos
17. Ojeda Mestas, Rene Wilfredo. (2007) *Diseño de Mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia* Estudio realizado utilizando el software y expuesto en la Mina Ananea, Mina Bateas - Perú.
18. AENOR. (1993) *Norma española del control de vibraciones*. Madrid, España: AENOR.
19. EXSA S. A. Manual Práctico de Voladura. Lima, Perú.
20. SQ Mining Society. Manual de Perforación y Voladura - Famesa - 2019. (2021) <https://www.sqminingsociety.com/2021/04/manual-de-perforacion-y-voladura-famesa.html>

## 7. ANEXO



**ANEXO**

Mallas de perforación:

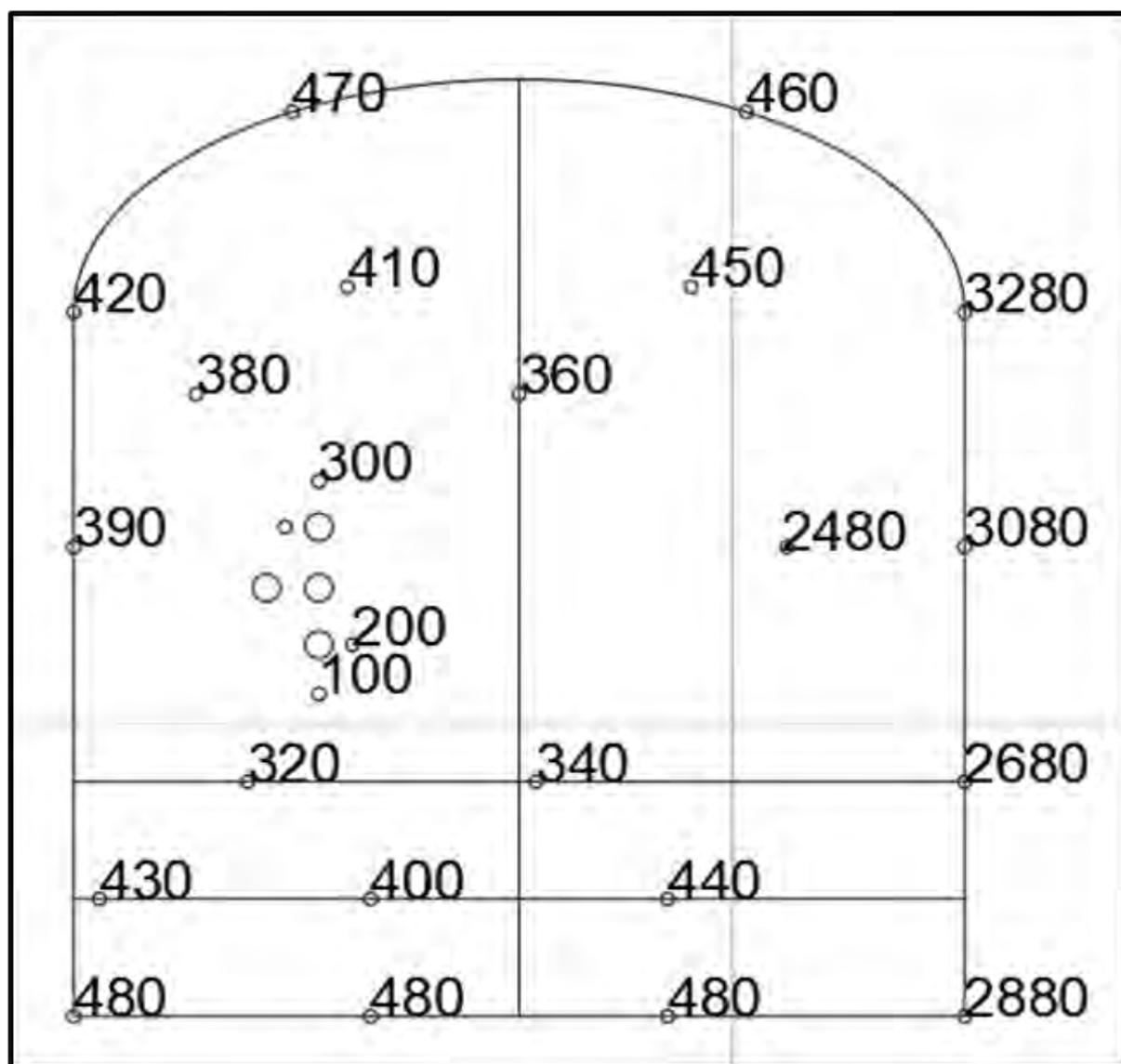


Figura A1: Malla N°4

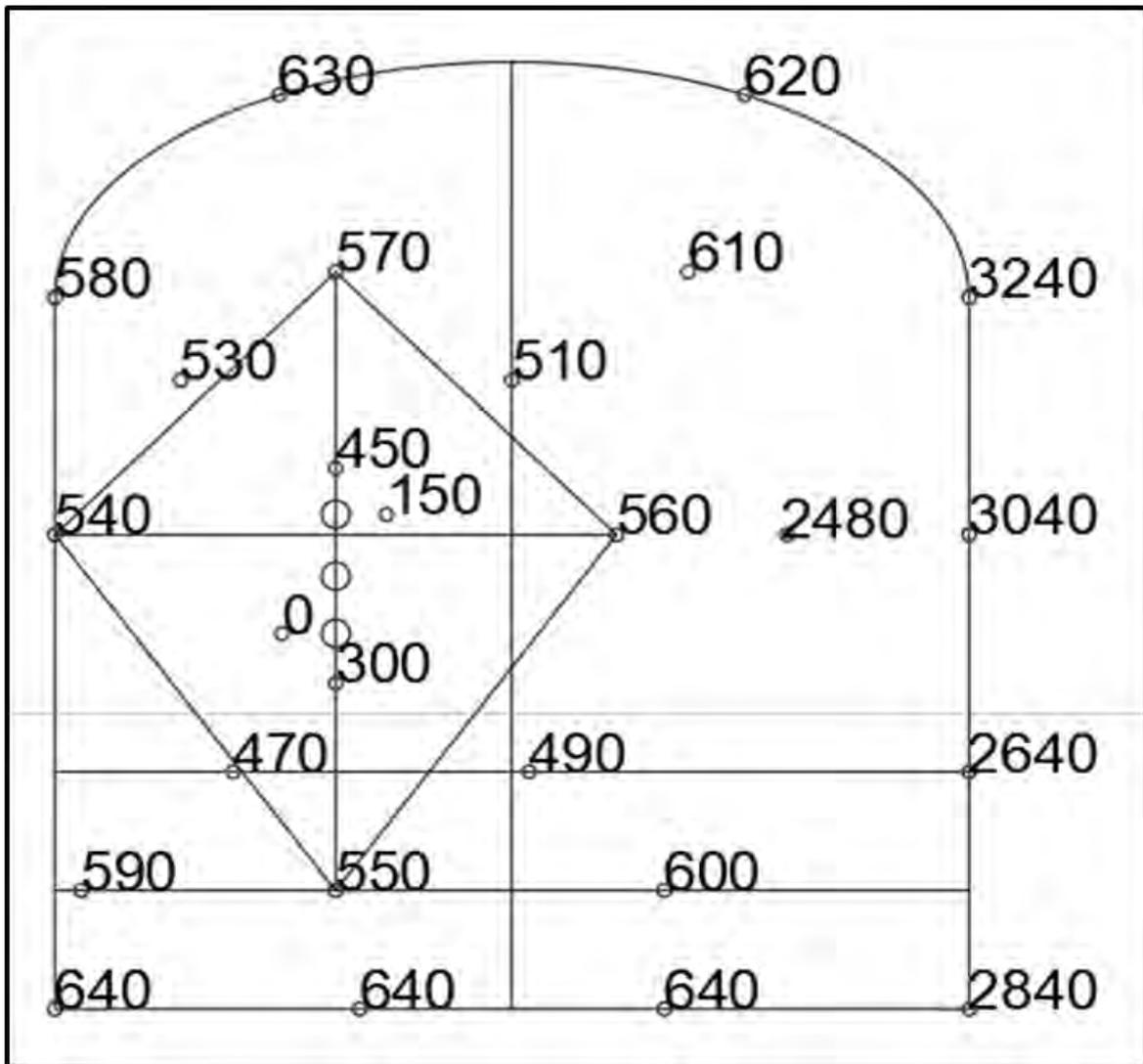


Figura A2: Malla N°5

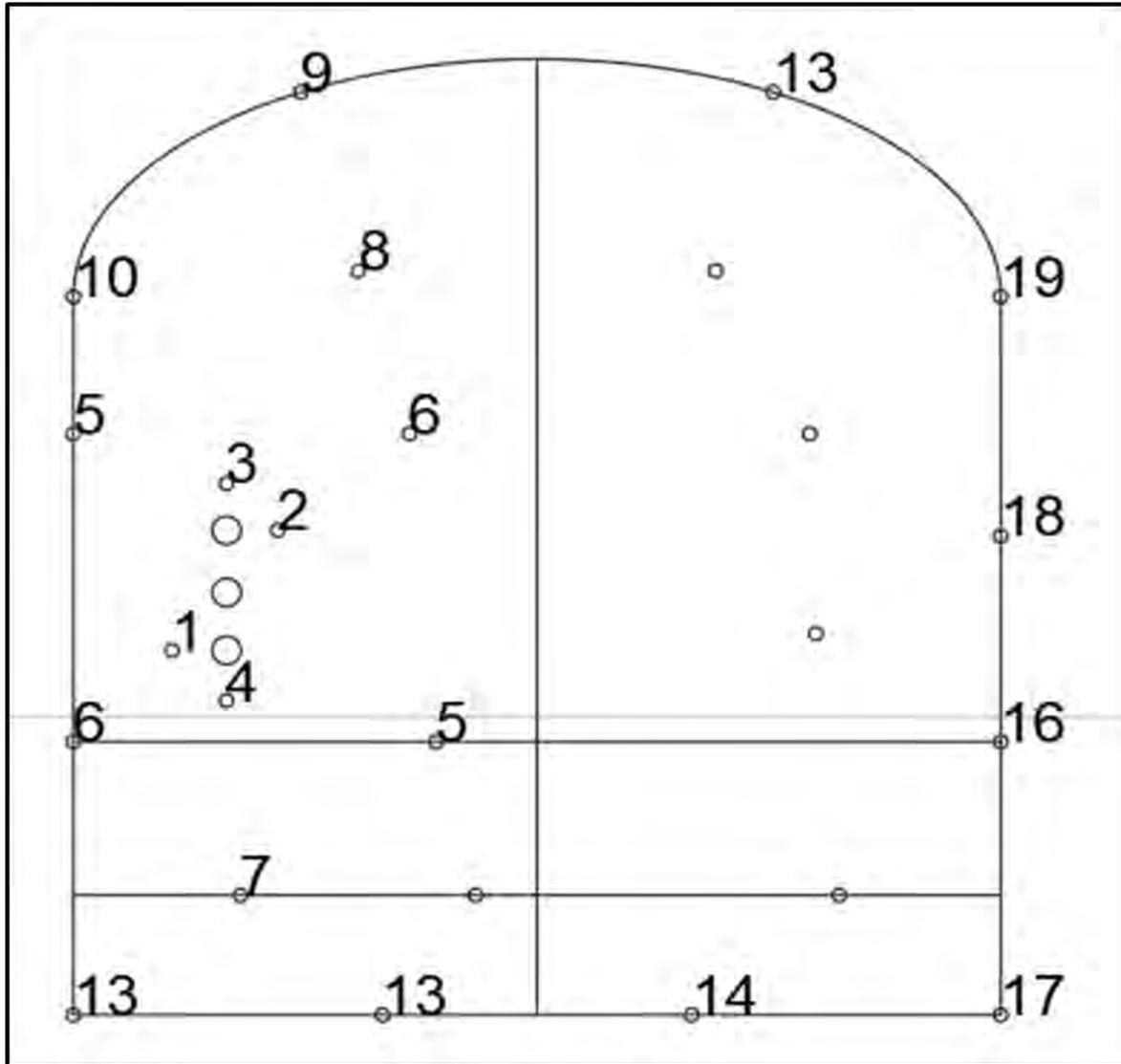


Figura A3: Malla N°6

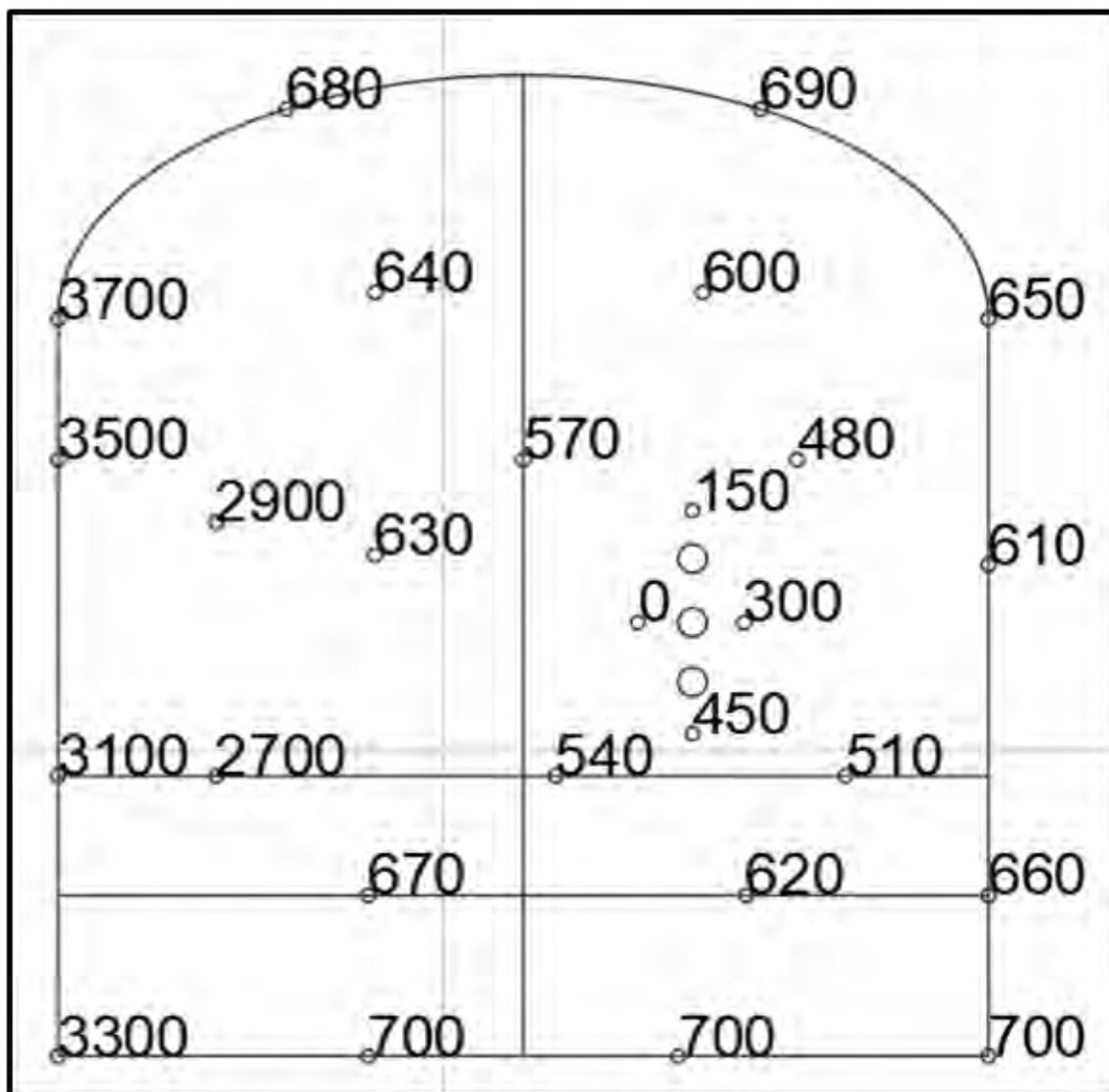


Figura A4: Malla N°7

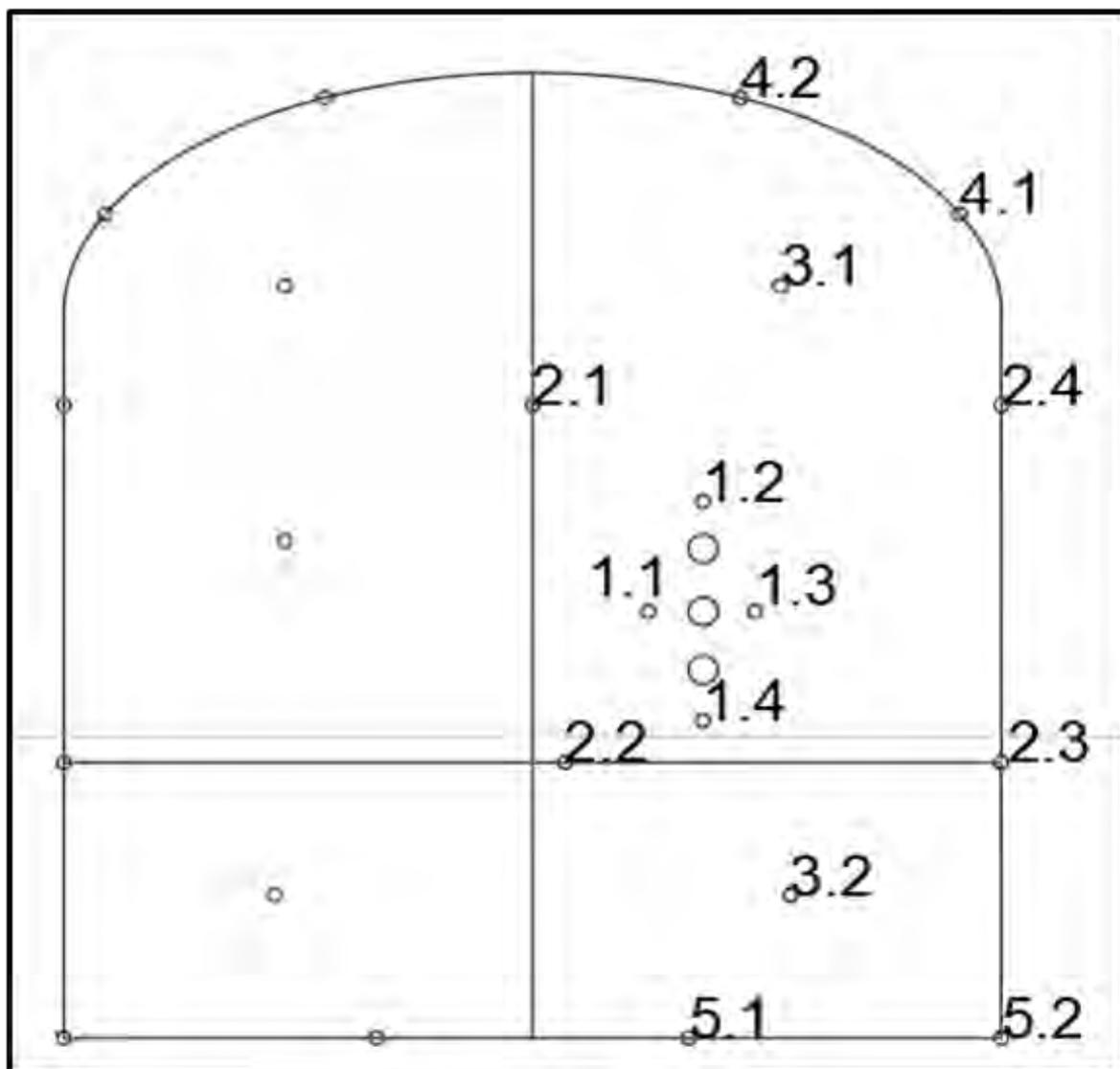


Figura A5: Malla N°8

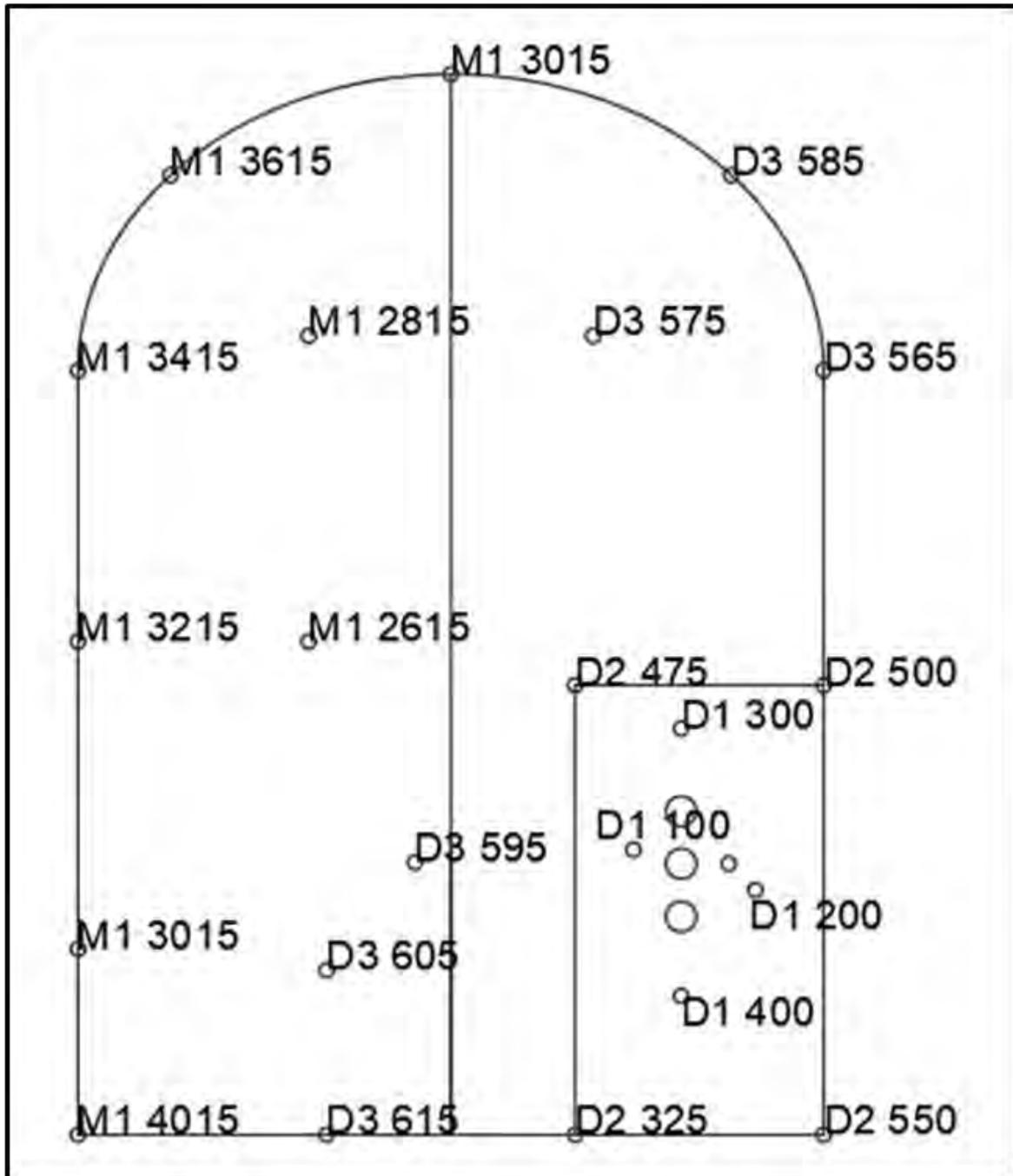


Figura A6: Malla N°9

Sismogramas:

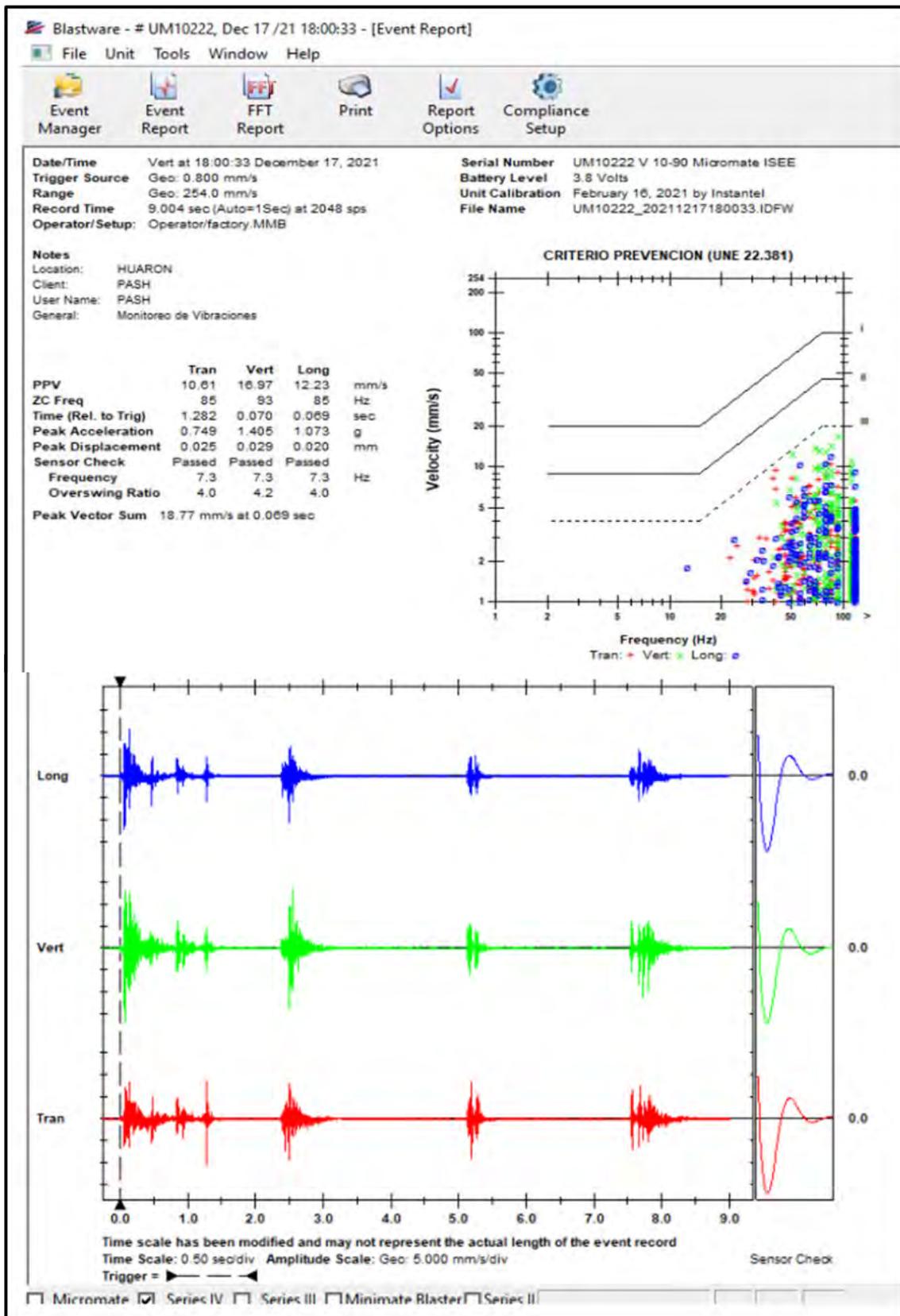


Figura A7: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 17-12-2021 (18:00 horas)

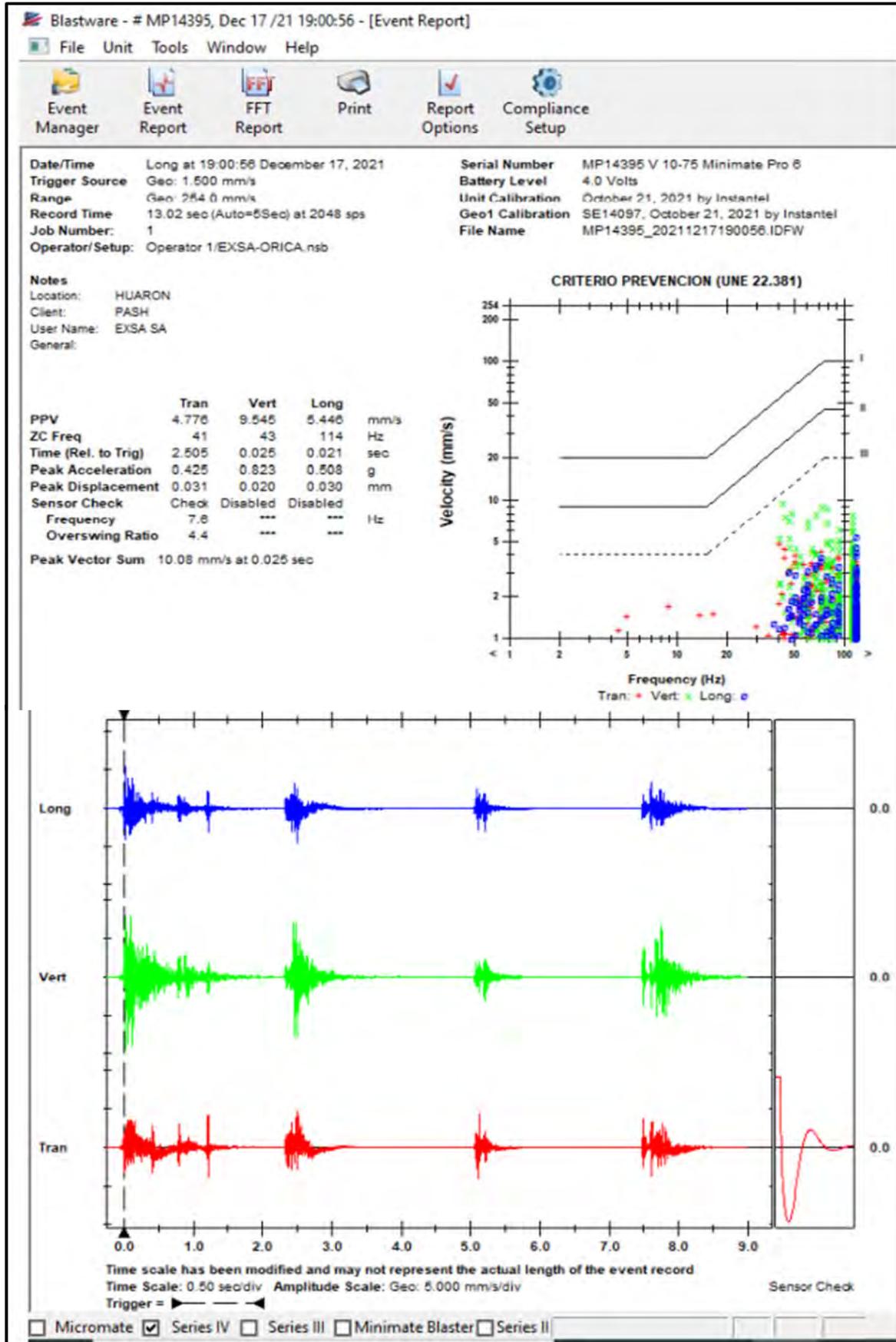


Figura A8: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 17-12-2021 (19:00 horas)

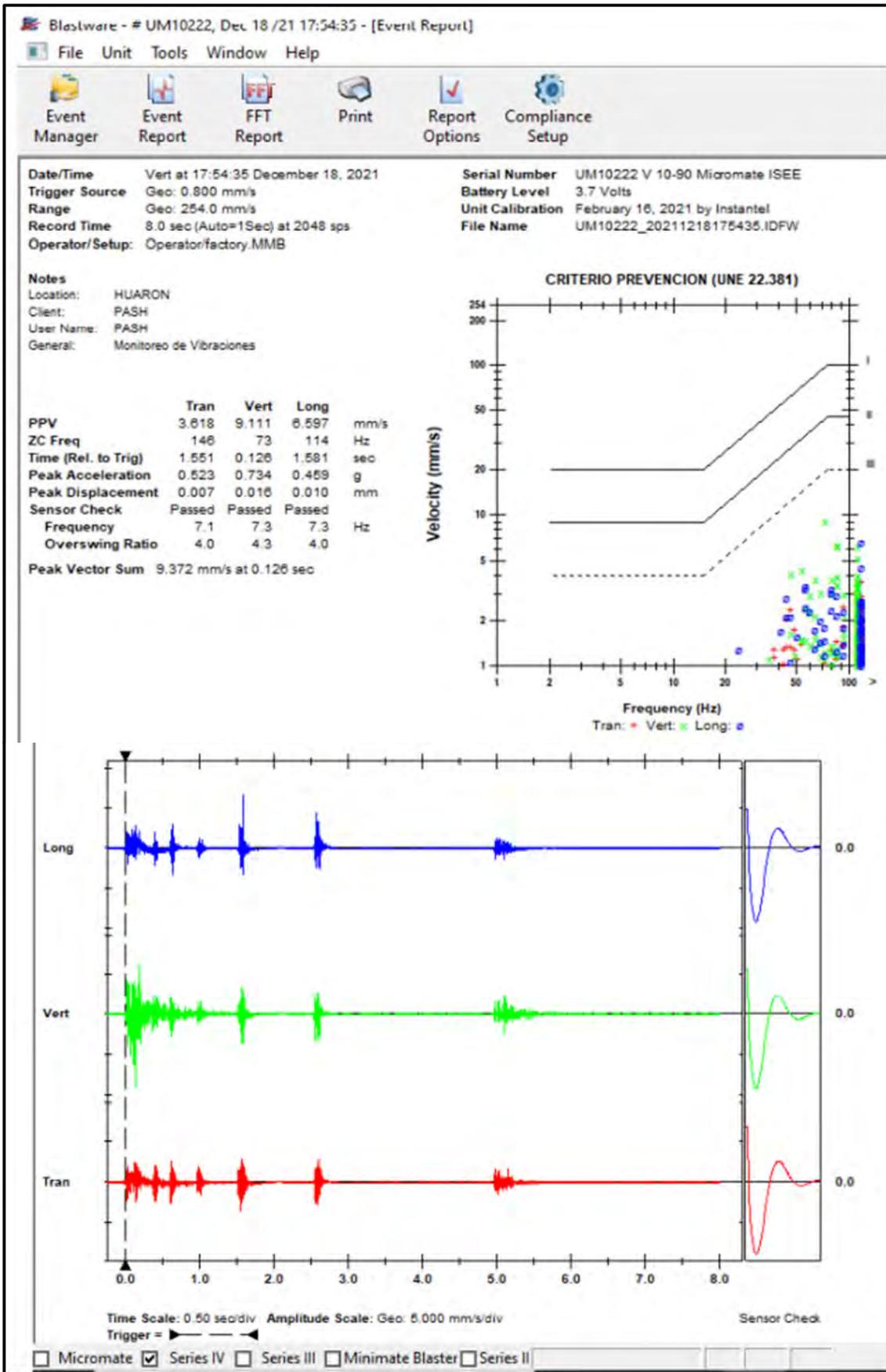


Figura A9: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 18-12-2021 (17:55 horas)

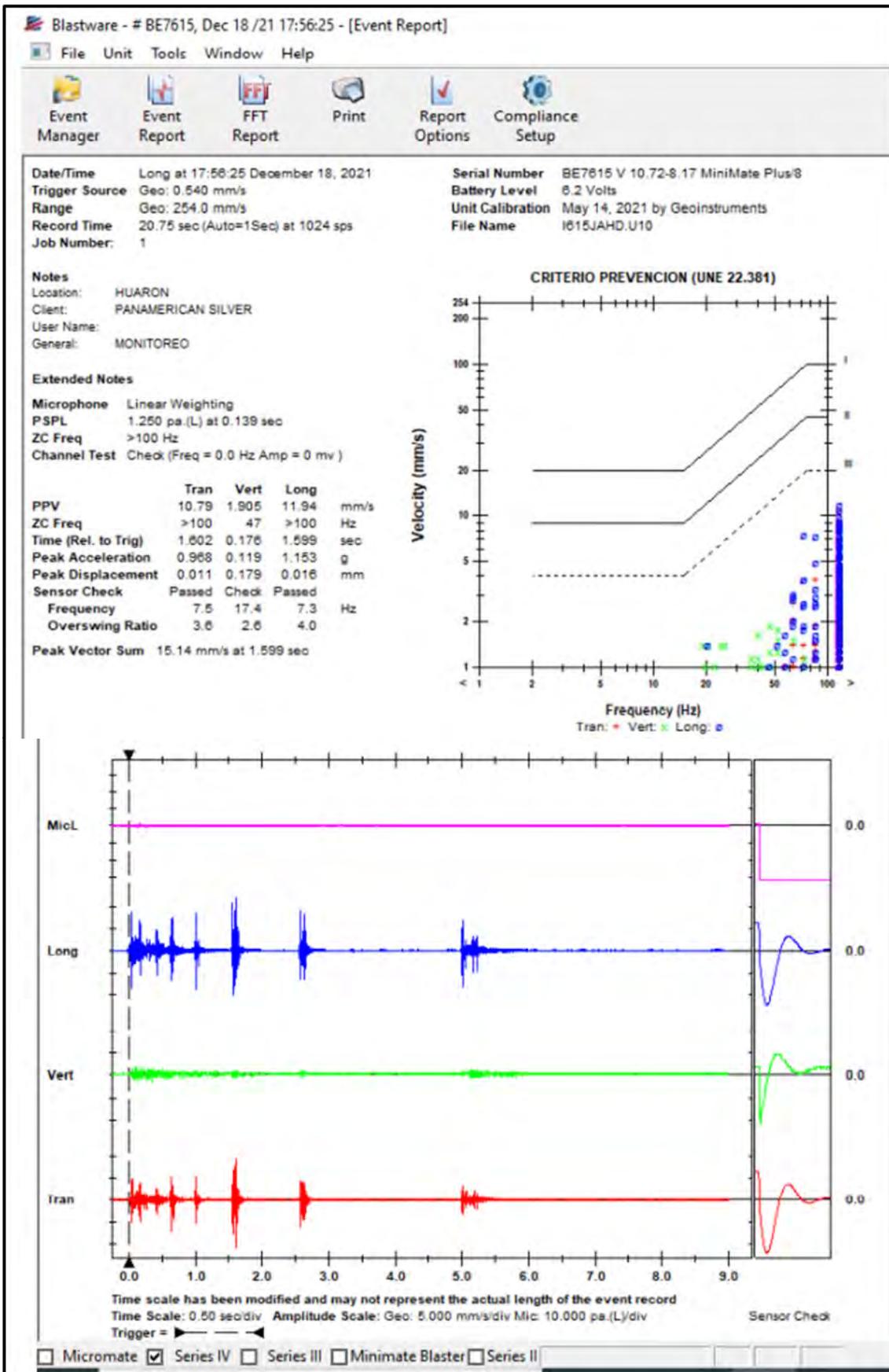


Figura A10: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 18-12-2021 (17:56 horas)

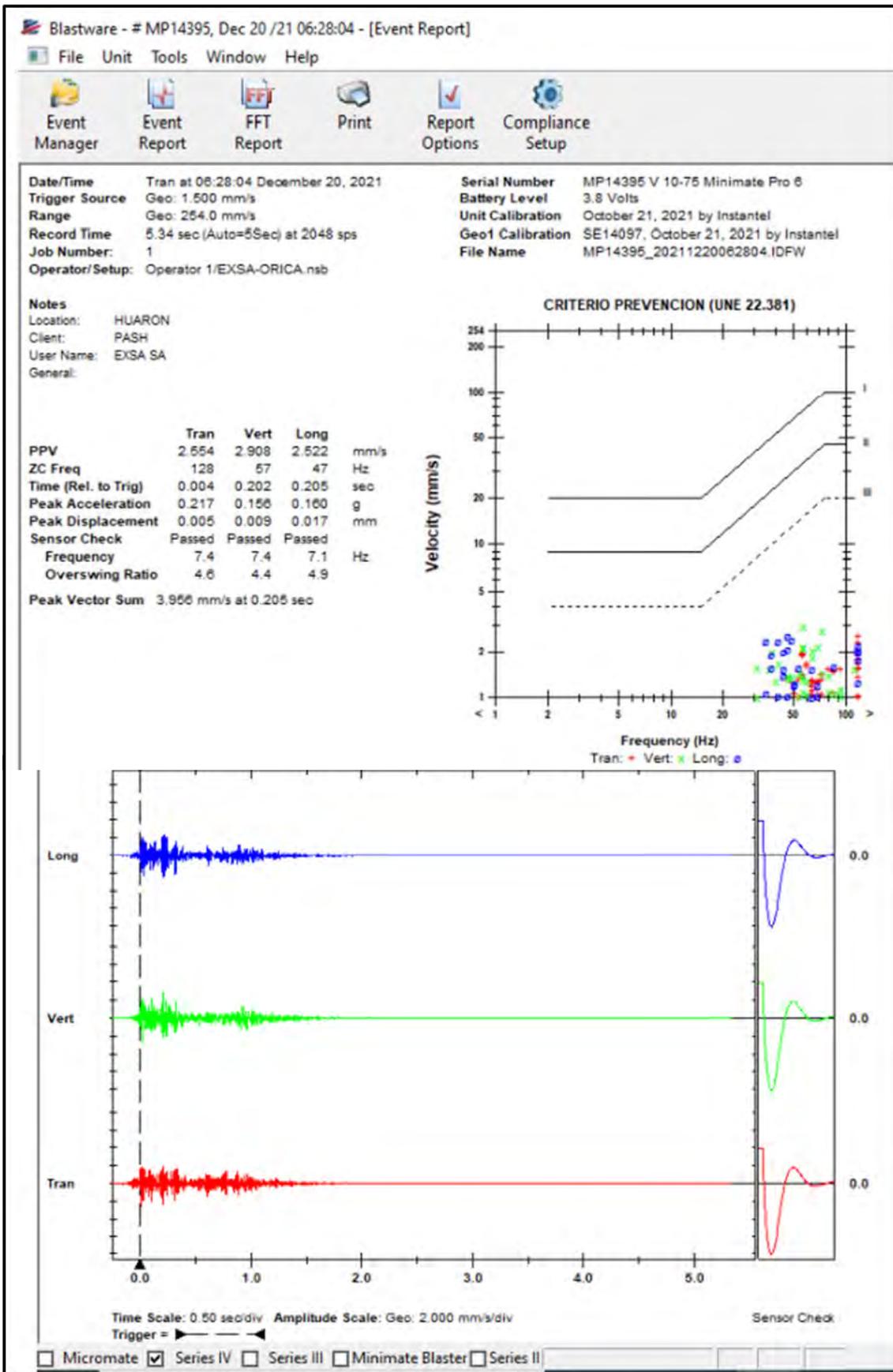


Figura A11: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 20-12-2021 (18:28 horas)

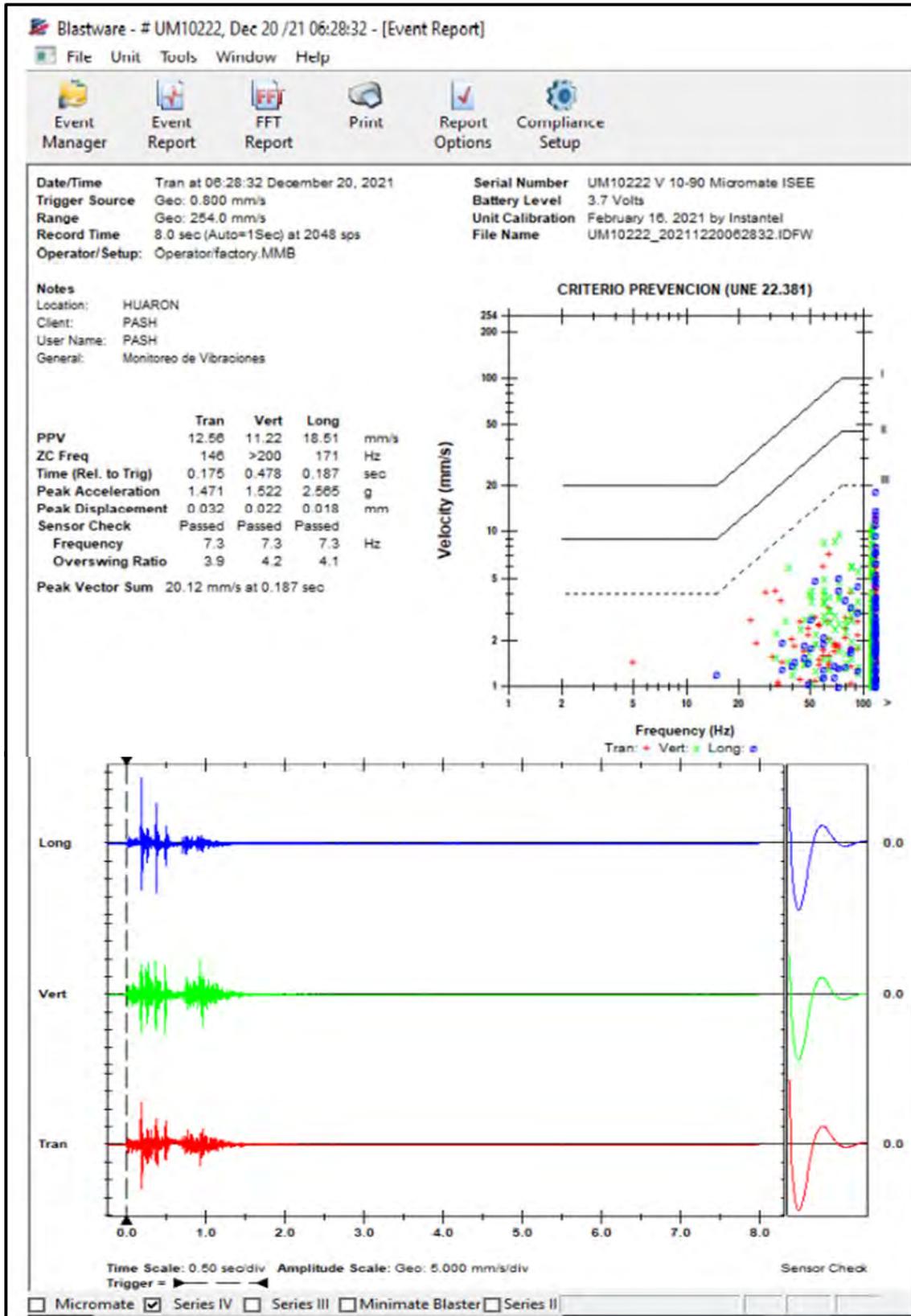


Figura A12: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 20-12-2021 (18:28 horas)

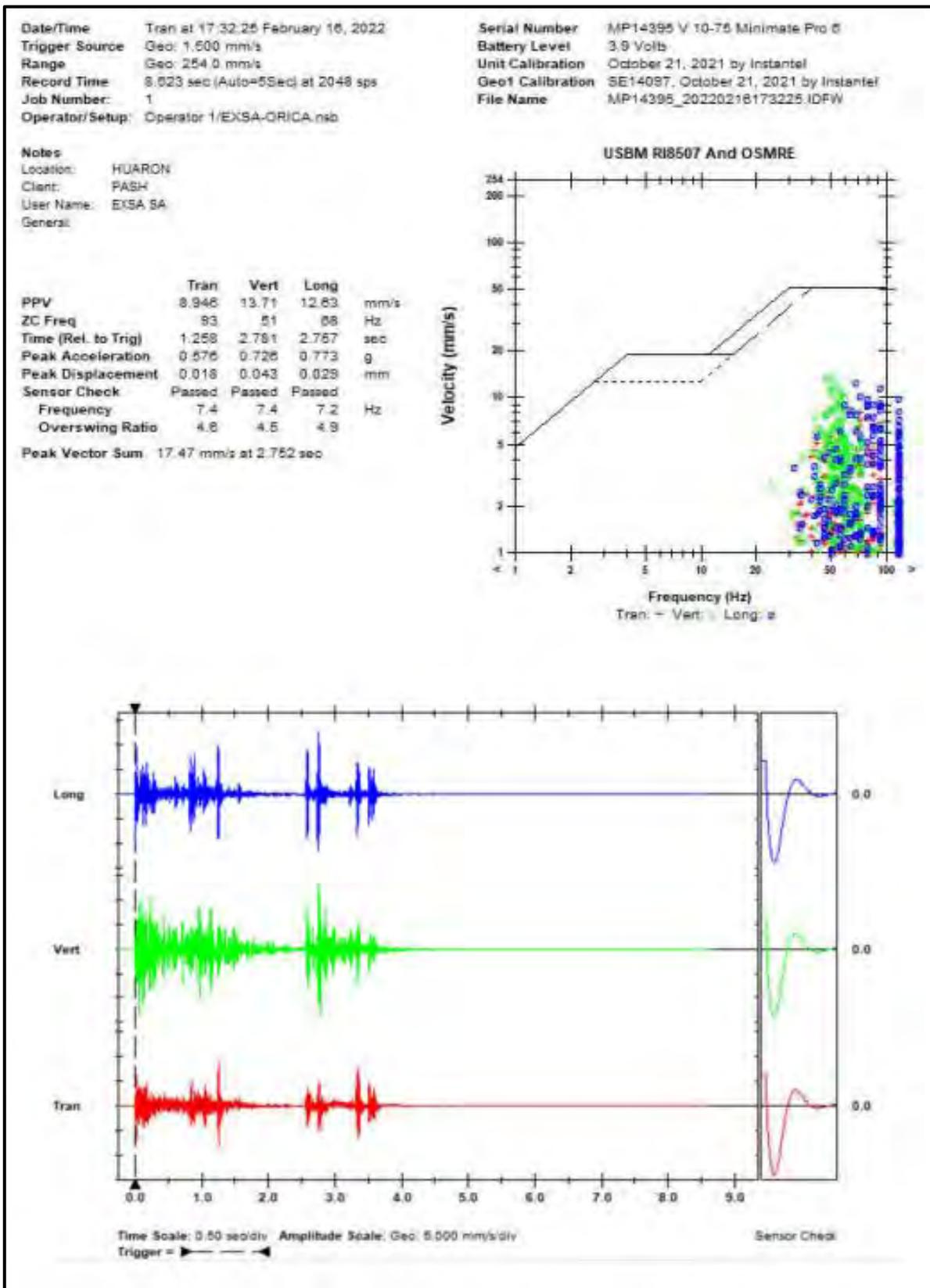


Figura A13: Data de vibraciones obtenidas por el Instatel – Día 16-02-2022 (17:32 horas)

Imágenes tomadas en campo:



Figura A14: Malla de perforación



Figura A15: Segregación mineral/ desmonte



Figura A16: Segregación mineral/desmorte



Figura A17: Equipo de voladura electrónica



Figura A18: Inducción del manejo del equipo de voladura electrónica

