



Universidad  
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis comparativo de la eficiencia de la triple  
iniciación electrónica en voladura versus la  
iniciación electrónica simple y doble en la  
explotación de un yacimiento cuprífero a  
cielo abierto**

**Huerta Valer Gustavo Sammy**

Huancayo, 2019

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

## **ASESOR**

Ing. Benjamín Ramos Aranda

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, hermana y a toda mi familia; por guiarme y acompañarme hasta el día de hoy. A los señores Héctor Fernández, Raul Ninalaya, Clodoaldo Torpoco, Luis Carrasco, Walter Tuppia y Javier Córdova, por sus enseñanzas y consejos durante mis primeros pasos en la industria minera, a quienes me acompañaron durante mis años formativos y a todos aquellos partícipes de esta investigación.

A mi asesor y amigo, Benjamín Ramos, por impartir en mi sus consejos y conocimientos hasta el día de hoy.

De manera especial a Andrés Miranda Lozano, quien forma parte de una etapa de mucho aprendizaje durante mi vida universitaria.

A la Universidad Continental, a su escuela profesional de Ingeniería de Minas y a la empresa Orica Mining Services Perú.

El autor

## **DEDICATORIA**

Dedico el siguiente trabajo, a Miluzka y Pedro, mis padres, por enseñarme a ser paciente y perseverante, a Marha, por su soporte y alegría y a todos aquellos que de alguna manera me apoyaron en la realización de esta tesis.

A mis abuelos, quienes aún están conmigo para ver este logro.

## ÍNDICE

ASESOR .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiii
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	14
1.1.    Planteamiento y formulación del problema.....	14
1.1.1.    Problema general .....	18
1.1.2.    Problemas específicos .....	18
1.2.    Objetivos de la investigación.....	18
1.2.1.    Objetivo general .....	18
1.2.2.    Objetivos específicos.....	18
1.3.    Justificación e importancia de la investigación .....	19
1.3.1.    Justificación social.....	19
1.3.2.    Justificación técnica.....	19
1.3.3.    Justificación económica.....	20
1.3.4.    Importancia.....	20
1.4.    Hipótesis y descripción de variables .....	21
1.4.1.    Hipótesis general.....	21
1.4.2.    Hipótesis específicas.....	21
1.4.3.    Variable independiente.....	21
1.4.4.    Variable dependiente.....	21
1.5.    Operacionalización de la variable.....	22
1.5.1.    Definición conceptual .....	22
1.5.2.    Dimensiones.....	22
1.5.3.    Indicadores.....	22
1.6.    Matriz de operacionalización de variables.....	23

2.	CAPITULO II MARCO TEÓRICO .....	25
2.1.	Antecedentes del problema.....	25
2.1.1.	Internacionales .....	25
2.1.2.	Nacionales.....	26
2.1.3.	Locales .....	28
2.2.	Bases teóricas.....	28
2.2.1.	Datos de la empresa .....	28
2.2.2.	Accesibilidad .....	30
2.2.3.	Historia .....	31
2.2.4.	Geología.....	34
2.2.5.	Litología.....	38
2.2.6.	Voladura de rocas. ....	42
2.2.7.	Mecánica de fracturamiento del macizo rocoso .....	44
2.2.8.	Implicancia de la Cara Libre .....	53
2.2.9.	Modelos Numéricos de Fragmentación de Rocas .....	56
2.2.10.	Iniciación electrónica. ....	63
2.3.	Definición de términos básicos.....	68
2.3.1.	Notaciones especiales.....	74
	CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	76
2.4.	Métodos y alcance de la investigación .....	76
2.5.	Diseño de la investigación.....	76
2.5.1.	Tipo de investigación.....	76
2.5.2.	Nivel de la investigación.....	76
2.6.	Población y muestra .....	77
2.6.1.	Población.....	77
2.6.2.	Muestra .....	77
2.7.	Técnicas e instrumentos de medición .....	77
2.7.1.	Técnicas de procesamiento.....	77
2.7.2.	Técnicas de análisis de datos .....	77
2.7.3.	Instrumentos.....	78
3.	CAPÍTULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	79
3.1.	Presentación de resultados.....	79
3.1.1.	Iniciación simple .....	79

3.1.2. Iniciación doble.....	90
3.1.3. Iniciación triple.....	100
3.1.4. Resultados en función a la geomecánica .....	111
3.2. Análisis comparativo.....	115
3.3. Discusión de los resultados.....	119
CONCLUSIONES.....	121
RECOMENDACIONES .....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125
ANEXOS .....	127
Anexo 1.- Matriz de consistencia .....	127
Anexo 2.- Proceso de carguío .....	129
Anexo 3.- Emulsiones gasificadas .....	132

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Iniciación simple .....	87
Tabla 2: Prueba de medias .....	87
Tabla 3: Iniciación doble.....	97
Tabla 4: Prueba de medias .....	97
Tabla 5: Iniciación triple.....	107
Tabla 6: Prueba de medias .....	107
Tabla 7: Prueba de medias .....	107
Tabla 8: Prueba comparativa: Simple, doble y triple .....	115
Tabla 9: Test de Duncan .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Frente de minado – Mineral .....	16
Figura 2: Mapa del Perú – Ubicación regional de Las Bambas.....	29
Figura 3: Croquis – Operación Las Bambas .....	31
Figura 4: Línea de tiempo –Las Bambas.....	33
Figura 5: Génesis – Deflexión de Abancay .....	35
Figura 6: Eventos geológicos – Las Bambas .....	39
Figura 7: Mapa geológico de Ferrobamba – Las Bambas.....	40
Figura 8: Esquema de fracturamiento del taladro.....	42
Figura 9: Esquema de rotura – Aplicación de esfuerzos .....	43
Figura 10: Diagrama de Lagrange.....	44
Figura 11: Fracturamiento inicial del macizo .....	45
Figura 12: Energía de los explosivos .....	47
Figura 13: Expansión de energía en taladro .....	49
Figura 14: Expansión de gases en macizo rocoso .....	50
Figura 15: Ondas de choque en macizo rocoso .....	51
Figura 16: Detonación por alta presión de Gases .....	52
Figura 17: Proceso de fragmentación .....	52
Figura 18: Cresta sobre minada .....	53
Figura 19: Esquema de banco con demasiado Burden.....	54
Figura 20: Esquema de banco con poco Burden .....	55
Figura 21: Esquema de banco con Burden adecuado .....	56
Figura 22: Fragmentación – Curva de distribución.....	57
Figura 23: Detonador electrónico “I-kon™” .....	65
Figura 24: Esquema interno de detonador electrónico.....	68
Figura 25: Diseño de malla y carguío – Iniciación simple.....	80
Figura 26: Plano de amarre y levantamiento de taladro.....	81
Figura 27: Líneas de isotiempo (100ms) .....	82
Figura 28: Desplazamiento de material.....	82
Figura 29: Burden Relief (100ms) .....	83
Figura 30: Área pre – voladura.....	83
Figura 31: Área post – voladura .....	84
Figura 32: Distribución de la fragmentación .....	85
Figura 33: Resultados Rosin-Rammler y Swebrec.....	86
Figura 34: Frente de minado del proyecto 3780 – 009 – 011 .....	86
Figura 35: Retardo entre taladros – N° de primas – Finos % -1” – Voladuras con Iniciación simple .....	88
Figura 36: Retardo entre taladros – N° de primas – P80” – Voladuras con Iniciación simple .....	89
Figura 37: Diseño de malla y carguío – Iniciación doble .....	90
Figura 38: Plano de amarre y levantamiento de taladro.....	92
Figura 39: Líneas de isotiempo (100ms) .....	92
Figura 40: Desplazamiento de material.....	93

Figura 41: Burden Relief (600ms) .....	93
Figura 42: Área de pre - voladura.....	94
Figura 43: Área post - voladura .....	94
Figura 44: Distribución de la fragmentación .....	95
Figura 45: Resultados Rosin-Rammler y Swabrec.....	96
Figura 46: Frente de minado del proyecto 3780 – 014 – 015.....	96
Figura 47: Resultados N° de primas – Finos % <1” – Iniciación doble.....	98
Figura 48: Retardo entre taladros – N° de primas – P80” – Voladuras con Iniciación doble.....	99
Figura 49: Diseño de malla y carguío – Iniciación triple .....	100
Figura 50: Plano de amarre y levantamiento de taladro.....	101
Figura 51: Líneas de isotiempo (60ms) .....	102
Figura 52: Desplazamiento de material.....	102
Figura 53: Burden Relief (50ms) .....	103
Figura 54: Área pre - voladura.....	103
Figura 55: Área post – voladura .....	104
Figura 56: Distribución de la fragmentación .....	105
Figura 57: Resultados Rosin-Rammler y Swabrec.....	106
Figura 58: Frente de minado del proyecto 3780 - 020.....	106
Figura 59: Resultados N° de primas – Finos % <1” – Iniciación triple.....	109
Figura 60: Retardo entre taladros – N° de primas – P80” – Voladuras con Iniciación triple.....	110
Figura 61: Principales unidades litológicas – Las Bambas.....	111
Figura 62: Comparativa entre RQD vs. T/Taladros & Finos % <1” (Pulg). .....	112
Figura 63: Comparativa entre RQD & Litología Vs. T/Taladros & Finos % <1” (Pulg).....	113
Figura 64: Comparativa entre RQD & Litología Vs. T/Taladros & P80” (Pulg). .....	114
Figura 65: Consolidado – Finos% - N° de primas – Retardo entre taladros ...	117
Figura 66: Consolidado – P80” – N° de primas – Retardo entre taladros.....	118

## RESUMEN

La presente tesis titulada: “Análisis comparativo de la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladura versus la iniciación electrónica simple y doble en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto”, trata sobre un proceso de iniciación electrónica triple implementado, del cual se tiene la expectativa que mejore las capacidades de fragmentación de las rocas y el incremento en la generación de finos durante el proceso unitario de voladura en la operación de Minera Las Bambas. Como parte de la comparación entre los procesos de iniciación simple, doble y triple, la presente investigación ha pretendido la mejora de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto, teniendo en consideración los registros documentarios de la operación en la cual se realizaron estas pruebas, primero a base de la correlación entre las variables y sobre la diferencia de los promedios de estas, las cuales son informaciones relevantes para esta investigación. Con una base de datos de los procesos productivos de la empresa que datan de enero del 2016 hasta junio del 2016, se hace uso de una metodología correlacional comparativa para contrastar la influencia de este cambio en base a los estadísticos t – Student. Con un nivel correlacional, los principales resultados de la investigación apuntan a una dominancia del proceso de iniciación triple sobre la iniciación doble y simple, teniendo una diferencia sustancial y estadísticamente significativa en el porcentaje de fragmentación de roca menor a 1”, siendo esta diferencia equivalente a 8.208% respecto de la iniciación doble y 19.77% respecto de la iniciación simple.

**Palabras Clave:** Iniciación electrónica, fragmentación de roca, finos menores a 1”, minería de cobre.

## ABSTRACT

The present thesis entitled: "Comparative analysis of the efficiency of the triple electronic initiation in blasting versus the single and double electronic initiation in the exploitation of an open-pit copper deposit", deals with a triple electronic initiation process implemented, which is expected to improve the rock fragmentation capacities and the increase in the generation of fines during the unitary blasting process in the operation of Minera Las Bambas. As part of the comparison between the single, double and triple initiation processes, the present investigation has tried to improve the blasting efficiency using the triple electronic initiation in the exploitation of an open-pit copper deposit, taking into consideration the documentary records of the operation in which these tests were carried out, first on the basis of the correlation between the variables and on the difference of the averages of these, which are relevant information for this investigation. With a database of the company's productive processes that date from January 2016 to June 2016, a comparative correlational methodology is used to contrast the influence of this change based on the t - Student statistics. With a correlational level, the main results of the investigation point to a dominance of the process of triple initiation over the double and simple initiation, having a substantial and statistically significant difference in the percentage of rock fragmentation less than 1", being this difference equivalent to 8.208% with respect to the double initiation and 19.77% with respect to the simple initiation.

**Keywords: Electronic initiation, rock fragmentation, fines less than 1", copper mining.**

## INTRODUCCIÓN

Es indudable que el Perú tiene un gran potencial minero, los numerosos proyectos mineros que se tienen en el país y los que vengan tienen un impacto significativo sobre la economía nacional. La evolución de la tecnología está siendo cada vez acelerada, y con ello la minería se ve beneficiada pues esto hace los procesos productivos cada vez más eficientes, por lo que, en específico, la empresa minera en estudio de la siguiente investigación trata de encontrar mejores procesos productivos y entre ellos, el proceso de voladura, el cual es vital para obtener un mineral cada vez más fino, y mientras más eficiente es este proceso, mayores beneficios se tendrán a menores costos.

Así, la presente investigación ha buscado determinar la mejora de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto. Dado que la literatura actual hace hincapié acerca de la productividad, se hace pertinente realizar la siguiente investigación, puesto que ello determina de una manera tangible que los procesos de triple iniciación electrónica son las que tienen mayor eficiencia y por ende esto manifiesta de una manera más clara la aplicación de este tipo de sistema, dejando de lado a otros sistemas.

La investigación se divide en seis partes: En el capítulo I, se presenta el problema, el objetivo y las razones que nos motivan a realizarla, además de las hipótesis. En el capítulo II, se expone los antecedentes de la investigación, las teorías que nos ayudan a explicar la investigación, el marco conceptual y la operacionalización de las variables. En el capítulo III, se explica la metodología que se usó en la investigación; de igual manera se muestra la exposición de los datos y el análisis estadístico asociado a la contrastación de las hipótesis. En el capítulo IV, se analiza los resultados de las pruebas realizadas y se muestran los parámetros de diseño empleados, así como también se discute lo revisado en la literatura.

El autor

## **CAPITULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

#### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

Dentro de la actividad minera, es trascendental el manejo de mineral de tal forma que sea lo más pequeño posible, a fin de hacer los demás procesos, desde transporte hasta la fundición, de una manera mucho más accesible y con bajo costo. Principalmente en la minería a cielo abierto, se hace uso de las técnicas de voladura, es decir, el uso de material explosivo para proceder a la fase de extracción del mineral, buscando un mineral lo más fragmentado posible en términos de granulometría. Es así como la iniciación de ello es un punto vital de todo el procedimiento a seguir.

La iniciación es un referente de la detonación en los procesos de voladura (1) y que en general se pueden dividir por el tipo de detonación: eléctrico, no eléctrico y electrónico; o por el número de iniciaciones: simple, doble y el muy poco usado triple. En esto se detalla la importancia de la dispersión de la explosión y de la capacidad de fragmentación de la roca, con la cual se llega a obtener un material mucho más pequeño y de fácil aprovechamiento en el proceso de producción.

Mientras que el tipo de iniciación detalla cuan preciso puede ser el proceso de voladura, pues a medida que el diseño de la explosión se cumpla de manera específica, se aprovecha mejor la energía del explosivo utilizado en la detonación, que generalmente se detalla en el uso de componentes pirotécnicos que se incineran, con el cual se calcula el tiempo de explosión y la secuencia de este proceso. Ello se aplica para los procesos eléctrico y

no eléctrico, donde se procede a usar un componente llamado inflamador, el cual termina por diferenciar a ambos por el tipo de excitación del inflamador, uno mediante una corriente eléctrica y el otro mediante una onda de choque la cual es transmitida a través del tubo de transmisión. Por otra parte, el proceso electrónico hace uso de un detonador mediante un chip que se programa para que excite al inflamador de manera práctica y a tiempo real, siendo el de menor retardo entre los sistemas de voladura de iniciación (2) (3) (4).

Según el tipo de posicionamiento y utilización de los explosivos, se detalla la aplicación iniciación ordinaria, doble o triple. La diferencia entre estos es la cantidad y el posicionamiento de los altos explosivos (Booster). Mientras que el caso de la iniciación simple es la de posicionar una carga en un nivel que sea capaz de modificar el grado de fragmentación del terreno y desplazamiento del terreno, a medida que se aumenten el número de cargas, se consiguen mejores resultados en la fragmentación de rocas y el desplazamiento del terreno. Es así que, con la aplicación de la triple iniciación, de ser utilizado de manera correcta, reduce las dimensiones a un punto tal que mejora la calidad del material fragmentado (1).

La literatura que se enfoca en este tipo de problema ha llegado a concluir que hay un importante aporte de este tipo de diseños, en los proyectos mineros, siendo de mucha más eficiencia y con mayor aprovechamiento en los procesos posteriores, sin embargo las referencias en las investigaciones hacen referencia a los sistemas de voladura de iniciación como diseños de iniciación ordinaria (3) (4) (5) (6) (7) (8) o doble iniciación (5), mientras que se enfocan más en el tipo de detonación que se utiliza. Investigaciones sobre el rendimiento de los procesos de voladura se enfocan más en este hecho (4) (5) (6) (7) (8) y respecto de los sistemas eléctricos se han tenido varios trabajos que evidencian la efectividad de estos sobre una mayor granulación en el proceso (9) (10) (11)

Pero, ¿Por qué hacer uso de un sistema con triple iniciación en vez de uno con doble iniciación o menor?, la razón es que a medida que las rocas estén bajo una presión de detonación a causa de una mayor colisión de ondas de choque a la que se detalla en un proceso simple de iniciación o doble, entonces se producirá una granulación más efectiva en el proceso de

los materiales, así reduciendo la dispersión, enfocando de manera homogénea el producto de la explosión y dando mayor nivel de insumo para los siguientes procesos (11).

Dentro de la empresa minera participe de pruebas para la aplicación de las múltiples configuraciones de iniciación electrónica, se utilizó iniciación simple, hasta la última semana de marzo del año 2016; sin embargo, desde abril del año 2016 se inician las voladuras aplicando la doble iniciación utilizando explosivo FE. Así mismo, desde la primera semana de mayo del 2016 se da inicio de la triple inicialización en zona de mineral de baja, mediana y alta ley. Para estos tres casos se utilizó detonadores electrónicos fabricados por la empresa Orica™. De forma que, para la primera quincena de mayo del mismo año, se emite el primer informe de los resultados de la triple iniciación; la misma que concluye indicando que la iniciación electrónica simple tiene una concentración de finos menor a 1 pulgada entre 17.5 a 27.4%, en la iniciación doble está entre 27.0% a 43.0% y la iniciación triple está entre 36.8% a 46.7%.



Figura 1: Frente de minado – Mineral  
Fuente: Propia

En términos de P80” la iniciación electrónica simple esta entre 4.9” a 6.6”, con un valor promedio de 5.6”. Para el caso de la iniciación doble se han registrado valores entre 4.3” a 5.8” con un promedio de 4.9”. Y finalmente la iniciación electrónica triple ha estado entre las 4.0” a 5.0” con un valor

promedio de 4.4". Estos resultados están alineados a las características geológicas del yacimiento, valores geo mecánicos del macizo rocoso y el diseño de secuencia de salida de cada proyecto.

Así, se asume una dominancia en porcentaje de finos, de la misma manera se ajusta que los retardos entre taladro fueron de 1, 2, y 4 ms con salida en diagonales largas, "Echelon" y salida en "V" según la geometría y requerimiento de cada disparo. Con Triple iniciación, el retardo que se ajustó mejor al tipo de roca, según los resultados analizados de fragmentación en base a la muestra seleccionada, el tiempo de retardo de 2ms entre taladros con retardo de 100 entre filas, obtuvo un % < -1" de finos entre 40.78% a 43.20% asociado a un valor P80 entre 4.01" a 4.68", con 4ms de retardo se obtuvo % < -1" de finos entre 40.5% a 45.2% asociado a un valor P80 entre 4.3" a 4.19" y finalmente con un retardo de 1ms se obtuvo % < -1" de finos entre 36.8% a 46.7% asociado a un valor P80 entre 4.53" a 5.03" respectivamente.

Por ello, la presente investigación se ha de enfocar en este punto inicial del proceso de voladura, explicando y detallando la importancia sustancial de la utilización de un proceso de voladura, en esta investigación buscamos probar que un sistema de iniciación electrónica con triple iniciación es superior a todos los demás sistemas de voladura de iniciación en cuestión de generación de porcentaje de finos como detalle de la fragmentación de rocas en una minera que se dedica a la explotación, extracción de cobre y elementos relacionados.

### **1.1.1. Problema general**

- ¿Es factible mejorar la eficiencia de la voladura empleando la triple iniciación electrónica en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?

### **1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?
- ¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?
- ¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?
- ¿Cuáles serían los resultados de comparar la eficiencia de la voladura de los tres sistemas electrónicos en estudio, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Determinar la mejora de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

- Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.
- Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto
- Determinar los resultados de acuerdo a la comparación de la eficiencia de la voladura de los tres sistemas electrónicos en estudio, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

### **1.3. Justificación e importancia de la investigación**

En el ámbito minero, la extracción no es un factor cambiante, es decir, siempre ha de retirar mineral de la tierra, mientras que la forma de hacerlo si es una cuestión modificable ante los últimos avances de la tecnología. Bajo este enfoque una mejor técnica asegura una ventaja de manera inmediata, lo cual hace más fácil el proceso de extracción y planificación de esta, con lo cual la empresa minera optimiza sus ganancias.

#### **1.3.1. Justificación social**

Una de las razones por la que la minería es importante es la de generar los recursos minerales necesarios para que las demás industrias puedan proporcionar los productos y servicios en los que se conduce la sociedad a nivel mundial, la contribución con la eficiencia del proceso de voladura hace ello mucho más sencillo y por ende soluciona de alguna manera la escasez de bienes minerales y los productos con los que se produce.

#### **1.3.2. Justificación técnica**

La eficiencia es uno de los objetivos más importantes de cualquier industria, más aún, en una tan millonaria en capital como lo es la minería. Dado ello, es de justicia buscar los sistemas con mayor eficiencia, además de tener la mayor rigurosidad posible para poder contrastar esta búsqueda.

En este sentido, la presente investigación colabora de manera sustancial con ello, puesto que no solo describe el proceso, sino que lo detalla en forma de análisis comparativo, de forma que se tenga la consistencia científica de lado para afirmar que sistema de iniciación electrónico tiene mejor desempeño y mejor eficiencia técnicamente.

### **1.3.3. Justificación económica**

La eficiencia es un objetivo, pero de nada sirve tener el mejor sistema si es que este además es el más caro o no termina reduciendo costos. Bajo el esquema actual, los sistemas tienen una diferencia en costos despreciable, por lo que se puede admitir el objetivo de mejora en la producción, en un análisis costo beneficio al tener un mínimo diferencial de costos, pero con niveles de ingresos más grandes termina siendo un diferencial de beneficios es grande, es por ello por lo que esta es la principal justificación económica de la presente investigación.

### **1.3.4. Importancia**

Esta investigación puede tener una trascendencia notable sobre los estudios acerca de voladuras y la importancia que tiene la aplicación de detonadores electrónicos en el proceso. En principio, porque desarrolla un análisis comparativo y con ello se detalla si hay algún sistema de iniciación electrónico predominante sobre los demás, con lo que se podrá establecer criterios para manejar similares sistemas en las condiciones geológicas en las que se aplica, lo cual abre una serie de aportes a la literatura y trabajos pendientes a ser propuestos y resueltos por investigadores posteriores. Por ejemplo, si existiese alguna diferencia entre los sistemas en niveles de geología diversos, o si el mismo patrón se puede replicar en otras operaciones mineras en diferentes puntos del mundo teniendo en cuenta la similitud que exista con el caso base.

## **1.4. Hipótesis y descripción de variables**

### **1.4.1. Hipótesis general**

- Existe una mejora sustancial de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- La eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto es factible y viable.
- La eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto es factible y viable.
- La eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto es factible y viable.
- La eficiencia de la voladura de los tres sistemas electrónicos en estudio genera resultados medibles en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

### **1.4.3. Variable independiente**

- Sistemas de iniciación electrónica en voladura.
  - Sistema de iniciación electrónica simple.
  - Sistema de iniciación electrónica doble.
  - Sistema de iniciación electrónica triple.

### **1.4.4. Variable dependiente**

- Eficiencia de la voladura; para este caso particular, en función al sistema de iniciación electrónica asociado a los resultados de P80" y finos % <-1".

## **1.5. Operacionalización de la variable**

### **1.5.1. Definición conceptual**

El sistema de voladuras de iniciación electrónica hace, referencia a una precisión de hasta 1000 veces mayor y una flexibilidad de sincronización significativamente mayor que la pirotecnia tradicional. Esto equivale a un mayor control de la energía y, en las manos adecuadas, ganancias de productividad significativas a través de; fragmentación óptima, muckpiles adaptados, vibración predecible, explosiones más grandes, paredes altas más estables y menor sobre rotura (2) (3).

### **1.5.2. Dimensiones**

- Sistema de simple iniciación electrónica en voladura.
- Sistema de doble iniciación electrónica en voladura.
- Sistema de triple iniciación electrónica en voladura.

### **1.5.3. Indicadores**

- Finos % <-1”
- P80
- Calidad de roca (RQD)

### 1.6. Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Sistema de voladura de iniciación electrónica	El sistema de voladuras de iniciación electrónica hace, referencia a una precisión de hasta 1000 veces mayor y una flexibilidad de sincronización significativamente mayor que la pirotecnia tradicional. Esto equivale a un mayor control de la energía y, en las manos adecuadas, ganancias de productividad significativas a través de; fragmentación óptima, muckpiles adaptados, vibración predecible,	• Sistema de voladura de simple iniciación electrónica	% de finos	% de Finos menor a 1"
			Calidad de roca (RMR)	
		• Sistema de voladura de doble iniciación electrónica	% de finos	Calidad de roca • Muy mala • Mala • Mediana • Buena • Muy buena
			Calidad de roca (RMR)	
		• Sistema de voladura de triple iniciación electrónica	% de finos	
			Calidad de roca (RMR)	

	explosiones más grandes, paredes altas más estables y menor sobre rotura.			
--	--	--	--	--

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del problema**

##### **2.1.1. Internacionales**

Balasubramanian (12), en un artículo científico sobre la explotación de roca para la minería, realizado por investigadores de la Universidad de Mysore, EE. UU. consideran que, “En las operaciones mineras, la voladura se ha convertido en un trabajo de rutina. Con la comprensión adecuada de las rocas y los métodos de voladura, el trabajo de minería se puede hacer de manera efectiva. El objetivo básico fue resaltar los principios y prácticas adoptados en las operaciones de voladura de rocas para los sectores mineros. Los aspectos concentrados en este informe son: El control de la fragmentación mediante un diseño de voladura efectivo y su efecto sobre la productividad son las principales tareas desafiantes en la minería. La forma más fácil de extraer los valiosos cuerpos minerales es mediante el uso de explosivos y diseños de voladuras bien planificados que pueden producir buenos perfiles de fragmentación. El diseño de los patrones de voladura es específico no solo de los explosivos que se utilizan, sino también del tipo de roca o mineral que se está fragmentando. Así mismo que, en el proceso de selección explosivo, las condiciones ambientales pueden eliminar ciertos tipos de explosivos de la consideración de un proyecto en particular. Después de considerar las condiciones ambientales, se deben considerar las características de rendimiento de los explosivos. Las características de

mayor preocupación son sensibilidad, velocidad, densidad, fuerza y cohesión.

Mishra (13) , realiza un artículo investigativo sobre la voladura controlada en una mina de piedra caliza utilizando detonadores electrónicos: un estudio de caso; de forma que trata sobre el diseño de voladura controlada y su implementación utilizando detonadores electrónicos con técnica de orificio de firma. Presenta un estudio de caso de la mina de piedra caliza donde se realizó una voladura controlada cerca de una estructura verde de vagón de remolque (a 2 m) para el trabajo de cimentación del transportador de cinta ya que la gerencia de la mina quiere duplicar la producción existente. Estudió sobre el diseño de voladura controlada y su implementación utilizando detonadores electrónicos con técnica de orificio de firma. Este artículo presentó un estudio de caso de la mina de piedra caliza donde se realizó una voladura controlada cerca de una estructura verde de vagón de remolque (a 2 m) para el trabajo de cimentación del transportador de cinta ya que la gerencia de la mina quiere duplicar la producción existente. Encontrándose que el sistema electrónico de iniciación es rentable respecto a otros tipos de iniciación; aunque se haya realizado de la forma más simple, este tiene menos repercusiones económicas y de infraestructura rocosa que las que no son eléctricas.

### **2.1.2. Nacionales**

Hinostroza (5), para obtener el grado de ingeniero de minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, realiza una investigación sobre la optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto; a fin de mejorar la fragmentación de la roca y demostrar de esta forma que si se utiliza un iniciador que tenga la adecuada ubicación dentro del taladro se puede lograr adecuados resultados esperados. Fue un estudio demostrativo sobre la importancia de colocación de un iniciador con detonador electrónico. En tal sentido, se hizo diferentes pruebas de voladura de doble iniciación, y, a su vez se modificó algunos parámetros como el de diseño de malla. Así mismo se realizó un análisis y la comparación respectiva; demostrándose en

los resultados que favorablemente se obtiene una buena fragmentación sin afectar la estabilidad del talud y sin contaminar el medio ambiente. Se obtuvo una reducción hasta un 36% en el P80 según los análisis realizados, también de conseguir una reducción en tiempo de carguío de la pala hasta un 31 %, del mismo modo obteniendo un incremento de costos debido al incremento en accesorios, de mezcla explosiva, de cantidad de taladros, pero a cambio se recibe una mejor fragmentación de las rocas en la zona de Mineral, cuyos beneficios se aprecian en todo su alcance en los procesos de chancado y molienda.

Pomaylle (8), investiga sobre la voladura con sistema de iniciación mixto electrónico y no eléctrico en la profundización del pique N° 2 de la mina Teresita; para lograr obtener el título de ingeniero de minas de la Universidad Nacional de Huancavelica; el objetivo que persiguió esta tesis fue mostrar el empleo del sistema mixto de iniciación eléctrico y no eléctrico en voladuras de sección completa para la profundización de puntos ciegos y su respectiva evaluación respecto a dicha aplicación. La metodología fue de carácter descriptivo- explicativo, y de recolección de datos mediante la técnica de la observación. Los resultados mostraron que, después de la aplicación del sistema de iniciación mixto se incrementó en 32% el disparo respecto al avance con el empleo del sistema convencional; siendo que los costos disminuyeron en 14,5% por metro lineal.

Huamán (14), para optar el grado académico de ingeniero de minas de la Universidad Nacional de Ingeniería, investiga sobre la implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en el Perú; a fin de demostrar la seguridad y versatilidad por medio de experiencias prácticas en campo. Fue un estudio de revisión bibliográfica y estudio de caso. Los resultados demostraron que, para este caso en particular las ventajas más notables es que los detonadores electrónicos Hotshot, muestra calidad de exactitud, precisión y flexibilidad de programación, a partir de esta base se deben construir las directrices para mejorar el proceso de extracción global de la minería; es decir brinda voladura optima, sin afectar las otras operaciones como el carguío. Transporte y chancado primario; por otra parte, respecto al diseño de la voladura existen múltiples formas de iniciación de voladura. Y; la calidad del disparo tiene influencia significativa sobre las etapas

posteriores de manejo de material dentro del sistema de extracción de una mina. El investigador concluye afirmando que, de esta forma, se reducen los problemas de fragmentación que se producen especialmente en zonas periféricas a las voladuras, tanto para minería de superficie como obras civiles.

### **2.1.3. Locales**

Romero (15), para obtener el grado de ingeniero de minas de la Universidad Nacional del centro del Perú, investiga en torno al tema de la voladura con detonadores electrónicos y su optimización en la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho. La finalidad de esta tesis fue, demostrar si este sistema tiende a optimizar la fragmentación y en qué medida. En tal sentido, se escogió para fines investigativos como población el total de bancos de producción de Tajo Toromocho, con la elección de muestra de los bancos ubicados del lado este, cuyas rocas son de dureza de 3 y 4; y también los bancos del lado oeste cuya dureza de las rocas son de 2. A estas muestras se disparó taladros con detonadores pirotécnicos y también electrónicos. Encontrándose que aquellos realizados con los detonadores electrónicos dieron mejores resultados. En el Lado Oeste el P80 mejoró en 5.4% y la pala mejoró en 2.1% en productividad, la chancadora primaria en 5.3% y la molienda en 4.2%. En el Lado Este el P80 mejoró en 16.7% y la pala mejoró 7.0% en productividad, tal como la chancadora primaria en 6.6% y la molienda en 5.4%. También se puede concluir el trabajo indicando que, los detonadores electrónicos permitieron tener el control de los tiros quedados lo cual mejora la seguridad significativamente; es decir con los detonadores electrónicos se optimiza significativamente la fragmentación y la seguridad en la empresa en cuestión.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Datos de la empresa**

El proyecto Las Bambas de la empresa MMG, está ubicado al sur este del Perú, una parte en la Provincia de Cotabambas, distritos de Challhuahuacho,

Coyllurqui y Tambobamba y la otra parte en la Provincia de Grau, distrito de Progreso, ambas en el departamento de Apurímac (16).

El distrito minero Las Bambas se encuentra a 565 Km. al SE de la ciudad de Lima y a 73 al SW de la ciudad de Cusco, con una altitud que va de los 3,600 a los 4,600 m.s.n.m. y ha sido dividida en tres zonas: Ferrobamba, Chalcobamba-Charcas y Sulfobamba.

Se encuentra en el sector norte del cuadrángulo de Santo Tomás (29-r) de la Carta Geológica Nacional escala 1:100000, con vértices: (S 14 00 00, W 72 00 00) y (S 14 30 00, W 72 30 00). El Proyecto Las Bambas se encuentra aproximadamente en la parte central de la franja del Batolito Yauri – Andahuaylas y dentro de la Deflexión de Abancay.

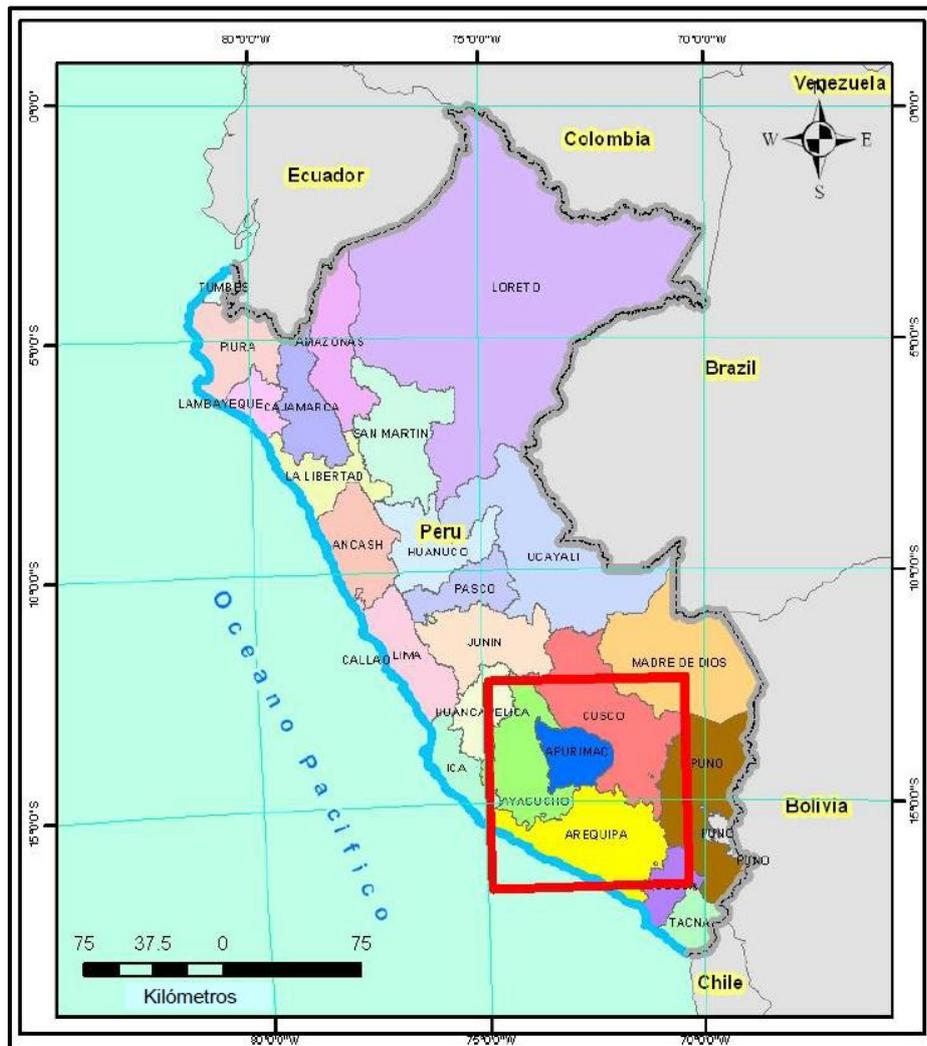


Figura 2: Mapa del Perú – Ubicación regional de Las Bambas  
Fuente: Palomino, 2010

### 2.2.2. Accesibilidad

Para acceder al yacimiento Las Bambas se tienen las siguientes opciones:

Ruta	Km	Tiempo	Tipo de acceso
Cusco – Las Bambas	75	45 min	Aérea, con Helicóptero.
Cusco – Cotabambas – Tambobamba – Challhuahuacho – Las Bambas	280	08 h	Carretera afirmada.
Cusco – Cotabambas – Ñahuinlla – Pamputa – Las Bambas	260	7 h 30 min	Carretera afirmada.
Cusco – Yaurisque – Ccoyabamba – Ccapacmarca – Mara – Challhuahuacho – Las Bambas	220	5 h 30 min	Carretera afirmada.
Arequipa – Imata – Espinar – Vellille – Santo Tomás – Haqira – Challhuahuacho – Las Bambas.	527	11 h	De Arequipa a Imata vía asfaltada, el resto del trayecto es por carretera afirmada.



Figura 3: Croquis – Operación Las Bambas  
Fuente: ProInversión, 2005

### 2.2.3. Historia

Las concesiones mineras de Las Bambas son conocidas desde inicios del siglo XX. La Cerro de Pasco Corporation adquirió las concesiones en 1942, luego de que la empresa Ferrobamba Limited las abandonara en 1934. La Cerro de Pasco Corporation, realizó estudios geológicos y 6 perforaciones diamantinas en Chalcobamba entre 1942 a 1966. Aunque se sabe de otros tipos de perforaciones (churn drill) se han efectuado en Ferrobamba y Chalcobamba, no se tienen los registros de estas informaciones.

Entre los años 1972 a 1977, se asignan a Minero Perú S.A. los derechos mineros Especiales, Ferrobamba - Chalcobamba, con un área total de 31,798 Ha, los cuales fueron convertidos en el año 1991 al régimen de concesiones mineras. Posteriormente se aprueba la renuncia de 29,998 has., reteniendo Minero Perú S.A. 1800 has en 4 concesiones: Chalcobamba, (600 has), Ferrobamba (400 has), Sulfobamba (400 has) y Charcas (400 has).

En 1996 y 1997, Minero Perú S.A. mediante invitación pública autorizó a varias empresas mineras a efectuar perforaciones diamantinas en Las Bambas, a través de un convenio por el cual las empresas se comprometían a entregar la información obtenida, así como muestras de los testigos de perforación, 15 días después de la Subasta de las referidas concesiones.

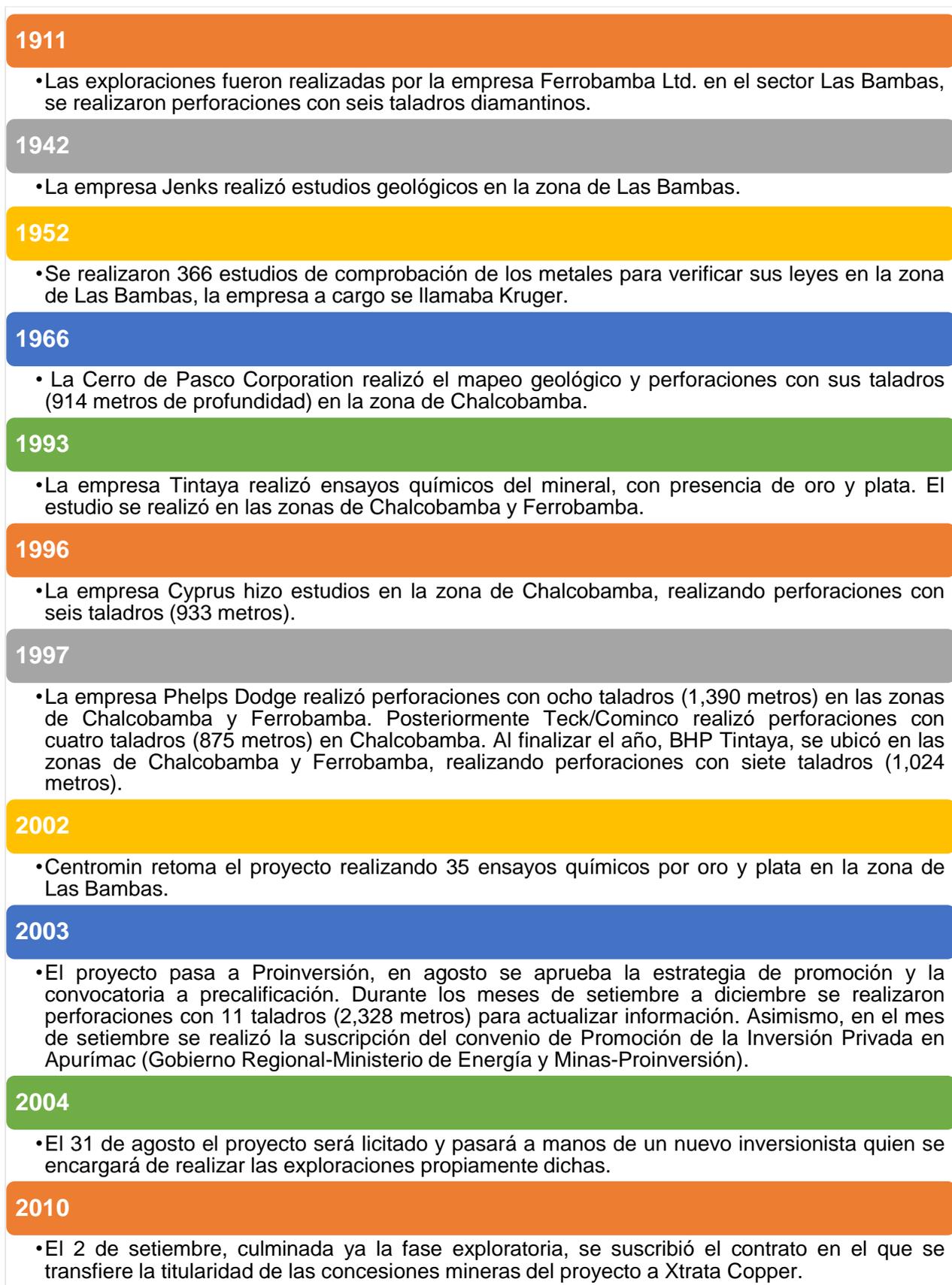


Figura 4: Línea de tiempo –Las Bambas

Fuente: SNMPE, 2010

## **2.2.4. Geología**

### **Geomorfología del área**

De acuerdo a Lipa (17), se encuentra comprendida por las siguientes provincias geomorfológicas generalizadas: Relieve montañoso y Altiplanicies. El yacimiento está insertado en la provincia geomorfológica de la cordillera de los Andes occidentales que es caracterizada por un relieve elevado y relieves bajos (altiplanos). En toda su extensión, las altitudes varían desde 3770 m en los lechos del río Fuerabamba, hasta cerca de 4680 m, en la zona de Chalcobamba. Su morfología actual se debe a los tipos de rocas intrusivas y sedimentarias, que permiten una erosión diferencial y la formación de relieves escarpados y prominentes.

### **Geología regional**

Regionalmente el Proyecto Minero “Las Bambas” está comprendida por una variedad de rocas intrusivas y sedimentarias (depósitos calcáreos y silicoclásticos) correspondientes al Grupos Copacabana, Mítu, Pucará, Yura, Formaciones Ferrobamba, Capas Rojas. La evolución de estos depósitos sedimentarios pos-paleozoicos (Grupos Pucará, Yura y Formaciones Ferrobamba) están relacionadas a un período de estabilización tectónica pos-Hercínica, iniciada en el Jurásico “Ciclo andino” que permitieron su formación según lo mencionado por Lipa (17).

Estructuralmente el proyecto minero forma parte de una importante megaestructura regional conocida como Deflexión de Abancay, que se caracteriza por un cambio en la dirección de los Andes peruanos pasando de NO-SE a E-W como consecuencia de la orogenia Andina.

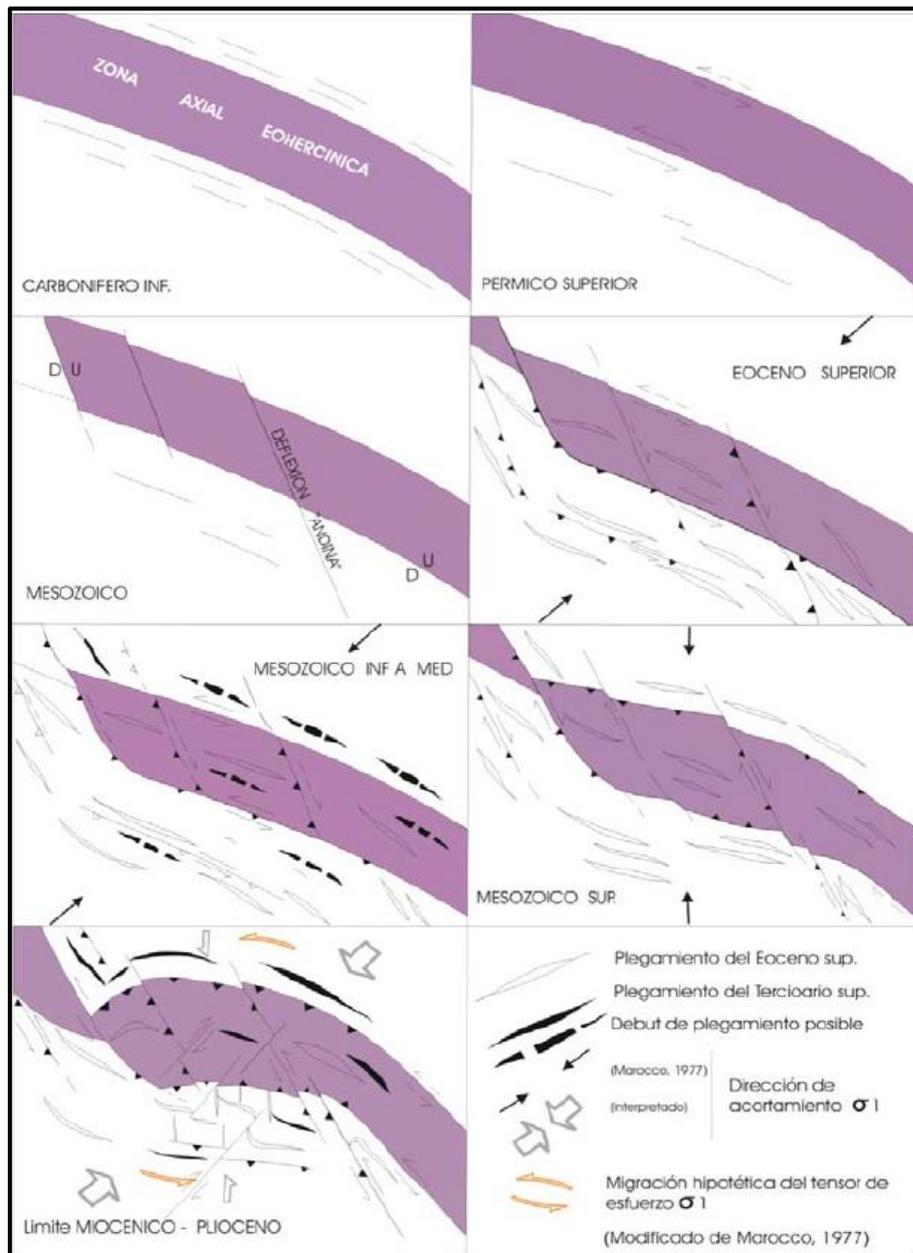


Figura 5: Génesis – Deflexión de Abancay  
Fuente: Lipa, 2008

De acuerdo a lo mencionado por Lipa (17), en el área de estudio se tienen manifestaciones plutónicas posttectónicas de edad Paleógeno de naturaleza ácidas a intermedia correspondientes al batolito Andahuaylas-Yauri que intruyen a las rocas sedimentarias y entre ellas el más importante es la Formación Ferrobamba (calizas) del Cretáceo superior; el emplazamiento de este batolito está asociado a regímenes de transtensión regional.

El proyecto Las Bambas dentro de este contexto geológico regional está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn belt *Anahuaylas-Yauri* situado al SE del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis Inca del Eoceno al Oligoceno temprano (*Brookes, 2006*); este cinturón metalogénico esta hospedado principalmente en el Batolito de Andahuaylas-Yauri; el cual, presenta intrusiones múltiples de tendencia calcoalcalina. Las principales deformaciones en la región, causantes del fallamiento y plegamiento son asociadas a la fase Inca (*Perelló et al., 2003*).

En las proximidades del área de Ferrobamba se tienen registros sedimentarios de la cuenca Yura localizado en su mayor parte en los alrededores de la localidad de Chalhahuacho, donde es posible reconocer las unidades sedimentarias de Formaciones Soraya, Mara y así mismo a la Ferrobamba, Volcánico Vilcarani (Grupo Barroso) cuyas extensiones regionales alcanzan hacia el sur de Perú con otras denominaciones. En la zona de Chalcobamba predominan los intrusivos de composición diorítica-monzonítica que intruyen a los depósitos de la Formación Ferrobamba.

### **Geología local**

Menciona Xstrata Perú SA (18), que la mineralización de cobre en Las Bambas está principalmente emplazada en los contactos de calizas de la formación Ferrobamba y las rocas intrusivas de la Era Terciaria (granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo diorita). El rasgo estructural más resaltante lo constituye el fuerte plegamiento inarmónico de las calizas Ferrobamba, que suprayace a las formaciones hualhuani y Mara, acompañado de sobre escurrimientos y fallas inversas. También se observan fallas menores de diferentes rumbos y poco desplazamiento cruzando a las diferentes unidades litológicas.

### **Rocas Sedimentarias**

Entre las unidades litológicas sedimentarias afloran únicamente las calizas Ferrobamba hacia la esquina noreste del yacimiento. Estas calizas de color gris, bastante distorsionadas y cruzadas por algunas fallas inversas de rumbo aproximado E-O, muestran hacia el sur, en contacto con los

intrusivos, una gradación a mármol, hornfels y skarn según lo informado por Xstrata Perú SA.

### **Rocas Intrusivas**

De composición intermedia a ácida, afloran a manera de apófisis y diques dentro del cuerpo principal de hornfels y skarn y, como una masa continua, limitando el yacimiento, hacia los extremos Este, Oeste y Sur del área estudiada. Rocas ígneas del Batolito de Abancay, están aflorando tanto en el área de Chalcobamba como Ferrobamba; es evidente que hubo múltiples eventos intrusivos, sobre todo porfídicos, que hacen muy difícil poder diferenciarlos; sin embargo, se les ha generalizado en los siguientes tipos de acuerdo al informe interno realizado por (18):

- a. **Diorita Regional.** Pequeños afloramientos de la diorita que constituye el Batolito de Abancay han sido localizados como remanentes al SW del yacimiento de Chalcobamba y al Sur de Ferrobamba; son de color gris claro de grano fino, compuesta principalmente por augita, hornablenda, biotita y plagioclasas; en algunas partes se le observa como microdiorita. Las relaciones de campo muestran que ha sido intrusionada por granodioritas y monzonitas y son evidentemente pre-evento cuprífero.
- b. **Granodioritas.** Se observan al este del yacimiento al Este de Chalcobamba principalmente, y se caracterizan por ser equigranulares, de grano medio a grueso, de color gris claro, presentan ocasionalmente xenolitos de diorita; cerca de los contactos con la monzonita presenta venillas de KF, por lo demás se le observa frescas y presentando el intemperismo típico de “cáscaras de cebolla”.
- c. **Monzonita Porfídica.** Se agrupa dentro de esta nomenclatura a una variedad de rocas en stocks y diques de color blanco a gris oscuro, de grano medio a grueso, con desarrollo de texturas porfídicas, con abundantes ferromagnesianos principalmente hornablenda; de composición monzodiorítica, dioritas cuarcíferas y granodioritas, que en muchos casos son variaciones texturales de borde con contactos gradacionales que las hacen muy difíciles de

diferenciar, quizás su principal característica sean sus fenocristales de plagioclasas y en menor proporción de cuarzo y hornablenda, presenta introducción de KF, acompañada por vetillas tipo A y B; con mineralización de Cu-Mo y se le observa intruyendo a la diorita regional y a la granodiorita y se les está considerando como el pórfido generador del evento cuprífero de la zona.

- d. **Cuarzo Monzonita Porfídica.** Roca de color blanco a gris claro, de grano medio a grueso, con textura porfídica, presentando fenocristales de cuarzo de hasta 4mm y de ortosa de hasta 5mm; se le observa bastante fresco, salvo cerca de sus contactos con el skarn, donde presenta diseminaciones de epidota y clorita con escasa calcopirita; esta intruyendo a todas las rocas anteriores y a los cuerpos de skarn, en forma de diques anchos y como apófisis de un cuerpo mayor en profundidad

#### 2.2.5. Litología

**Rocas sedimentarias:** Según Xstrata (18) en un informe interno:

- a. **Depósitos de Morrenas.** Acumulaciones de fragmentos de intrusivos, skarns y calizas, que han sido erosionados trasportados y acumulados por acción del hielo en el fondo de un circo glacial, al Norte del Cerro Pichacane (18).
- b. **Calizas Ferrobamba.** Es la roca más ampliamente distribuida, está caracterizada por su color gris a gris oscuro, de grano fino a medio con textura sacaroidea y sin mayores impurezas ni fósiles; están consideradas como del Cretácico Inferior, suprayaciendo a la Formación Mara, constituida principalmente por lutita y a la Formación Soraya, compuesta mayormente por cuarcitas. Estas dos últimas formaciones no afloran en las cercanías de Chalcobamba y Ferrobamba (18).
- c. **Lutitas de la Formación Mara.** Aun cuando no se observan en superficie, con la perforación en Chalcobamba, (sondaje PI-1CH) se ha interceptado un paquete de hornfels derivados de lutitas, que por

su posición estratigráfica, (debajo de las calizas Ferrobamba) y potencia, se les está asignado a la Formación Mara (18).

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS			MAGMATISMO	MINERALIZACION	OROGENIA	
CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente			30 - 50 m		Morrena, aluvial		
		Pleistoceno	Gpo. Barroso	Volc. Vilcarani	100 m		Tufos dacíticos	Quechua 4 1.5 Ma	
	TERCIARIO	Plioceno						Quechua 3 5 - 4 Ma	
		Mioceno						Quechua 1, 2 17 - 4 Ma	
		Oligoceno						Inca 3, 4 30 - 22 Ma	
		Eoceno						Skarn	Inca 2 43 - 42 Ma
		Paleoceno						Inca 1 59 - 55 Me	
MESOZOICO	CRETACEO	Superior		Fm. Ferrobamba	300 - 500 m		Calizas masivas biocásticas nodulos chert	Peruana 84 - 79 Ma	
		Inferior		Fm. Mara	50 - 200 m		Clásticos calcáreos limolulitas areniscas		
			Gpo. Yura	Fm. Soraya	200 - 300 m		Areniscas		

Figura 6: Eventos geológicos – Las Bambas  
Fuente: Palomino, 2010

### Rocas intrusivas

Xstrata (18) menciona que el esquema intrusivo del batolito de Andahuaylas - Yauri fue controlado por eventos tectonomagmáticos durante los últimos 48 millones de años (m.a) siendo dos las fases principales.

Un primer emplazamiento regional temprano (48-43 m.a.) de gabro y dioritas, seguido del emplazamiento de stocks de monzonitas/dacitas asociados con la mineralización (40-32 m.a.). En Chalcobamba se han distinguido cinco eventos secuenciales de intrusiones monzoníticas:

- Evento regional de Diorita/Granodiorita/ Quartz K-Feldspar Porphyry
- Monzonita Máfica
- Monzonita Hornblendica
- Monzonita Biotítica
- Diques de MZQ (pórfidos de cuarzo) y Latitas andesíticas

## Fases de Intrusión Mineralización

Pulsos de monzonitas mineralizadas ocurren en una relación temporal a su emplazamiento las mismas que han generado alteración en diferente grado tanto en el exoskarn y el endoskarn. Chalcobamba evidencia dos frentes de diferenciación magmática a partir de una granodiorita batolítica. Una proveniente del Sur de 39 m.a. que diferencio a granodiorita hornblendica y biotítica denominado Monzonita Hornbléndica produciendo Skarn mineralizado. Un evento previo de monzonita con alteración potásica conforma el pórfido MZM en el sector Norte, otra secuencia de diferenciación magmática proveniente de NW rico en ortosa y exento de volátiles QFP habiendo producido Skarn débilmente mineralizado y con xenólitos de diorita mineralizada.

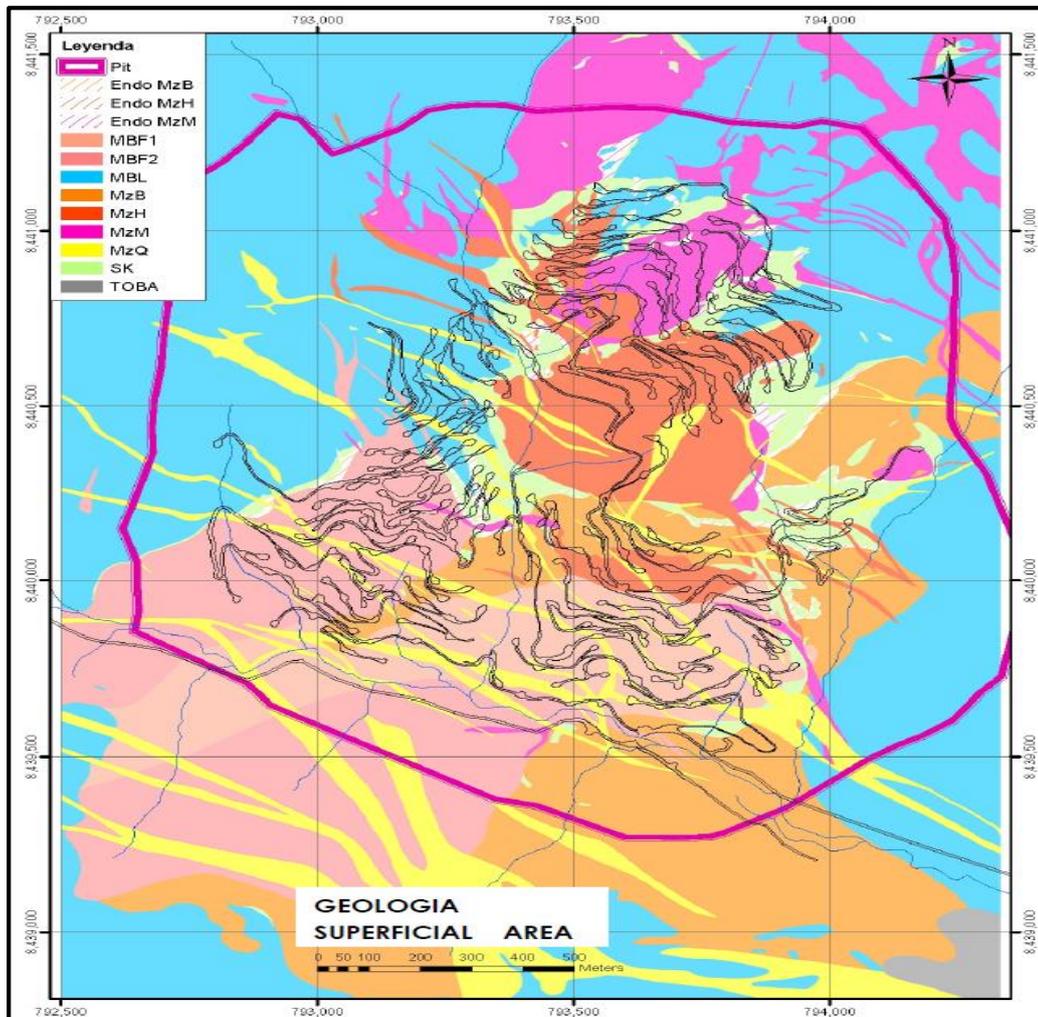


Figura 7: Mapa geológico de Ferrobamba – Las Bambas  
Fuente: Lipa, 2008

- a. **Diorita (Di).** Textura porfirítica de grano medio, con un 20 % de máficos hornblendicos alterados a cloritas. Presenta vlls de Qz-cloritas con Cp discontinuas con halos de anortita y Pxs y con 1 a 3 % de magnetita magmática. ocurre como “roof pendand”.
- b. **Pórfido cuarzo y feldespato (QFP).** Textura porfirítica gruesa, con alteración potásica selectiva en la matriz. Presenta débil mineralización asociado a venillas con Cp - Mo. El cuerpo batolítico ocurre al NW por diferenciación magmática a partir de la Granodiorita.
- c. **Monzonita Máfico (MZM).** Textura porfirítica de grano medio a fino y con plagioclasas seriadas; 30 a 40 % de máficos; relación Hb/Bt de 3/2. Fuerte alteración de anortita mayor a albita. Este porfido es el segundo blanco en Chalcobamba mineralizado con Cp + Mo – Bn secundaria.
- d. **Monzonita Hornblendica (MZH).** Textura porfirítica de grano medio a grueso. Presenta de 20 a 30 % de máficos. Alteración tardía de epidota -anortita-silice. Mineralización en venillas tipo stockwork con Cp + Mo.
- e. **Monzonita Biotítica (MZB).** Textura porfirítica parcialmente seriada a equigranular media con hornblendas alterándose a cloritas. 15 a 20% de máficos. Ocurren como diques anchos con alteración de pxs, post débil alteración a cloritas y silicificación pervasiva. Mineralización fina de Cp + Bn.
- f. **Monzonita Cuarzosa (MZQ).** Textura porfirítica equigranular media. Presenta hasta 10 % de ojos de Qz, los que en ocasiones presenta un reemplazamiento selectivo de Qz -ortoza por biotita a epidota y clorita. Débil mineralización de Cp + Py. Las plagioclasas con moderada alteración a sericita y máficos con alteración a cloritas +/- hematitas.

### 2.2.6. Voladura de rocas.

Todo el proceso de fragmentación en la voladura se basa en la detonación rápida de explosivos. Una vez iniciado, el explosivo libera una enorme cantidad de energía a través de reacciones químicas, lo que resulta en gases a alta presión en el barreno. La reacción avanza a través de la columna explosiva a una velocidad de aproximadamente 2000 m / s a 6000 m / s, dependiendo de la velocidad de detonación (VoD) del explosivo. La rapidez de tal reacción causa un aumento de presión casi instantáneo en el agujero, que produce una onda de choque en la roca. (11)

De los diversos tipos de ondas que se pueden propagar, las ondas del cuerpo y de la superficie son de la mayor importancia en la rotura de rocas. Las ondas primarias o longitudinales (ondas P) y secundarias o cortantes (ondas S) desempeñan el papel principal en la voladura. Estas ondas se propagan en la roca a velocidades muy altas (3000-5000 m / s) y causan tensiones y tensiones que forman grietas o abren grietas existentes en la roca, lo que produce roturas (10).

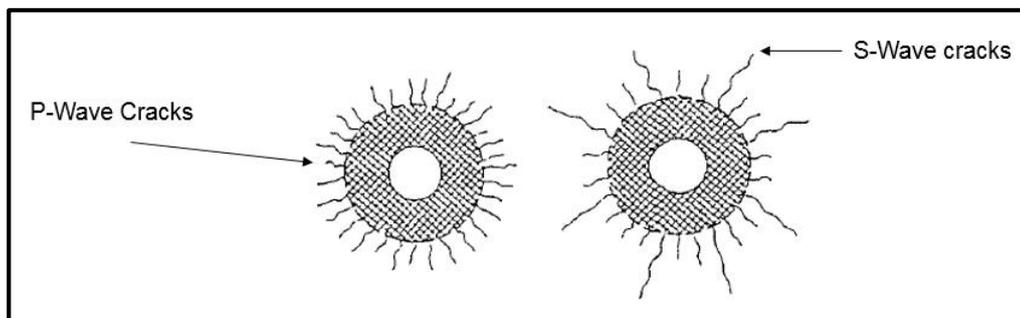


Figura 8: Esquema de fracturamiento del taladro  
Fuente: Rossmannith, 1996

De acuerdo con el concepto de propagación de ondas (11), la presión positiva de la onda de choque cae rápidamente a valores negativos, lo que implica un cambio repentino de la compresión a la tensión. En una descripción más detallada de este concepto, Rossmannith (19) establece que una onda de estrés del tipo de pulso con longitud y duración finita consiste en una parte principal y una parte en cola. Las partes delanteras se caracterizan por el índice "+" y las partes de cola por el índice "-". El signo

+/- no necesariamente indica compresión o tensión, sino las partes delantera y trasera.

El enfoque de la técnica de voladura tradicional se basa principalmente en el pulso de compresión de la onda de choque, es decir, la parte delantera. Pero dado que la resistencia a la tracción de la roca es mucho menor que su resistencia a la compresión, la disponibilidad de una cara libre en el entorno del barreno es crítica para permitir que los pulsos de compresión se reflejen y regresen como pulsos de tracción para abrir grietas y / o romper el roca en tensión. Las caras libres generalmente se generan a través del inicio secuenciado de los taladros, de forma tal que el tiempo de retardo proporciona suficiente tiempo para que los taladros previos rompan la roca y la muevan hacia adelante (20)

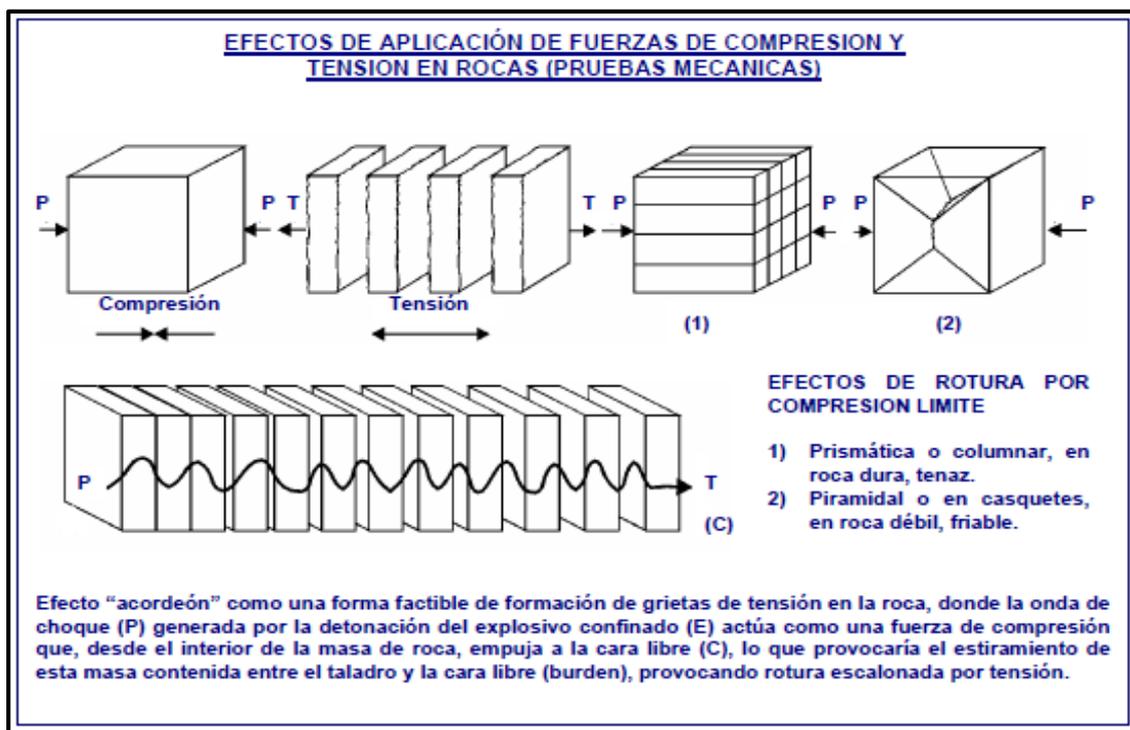


Figura 9: Esquema de rotura – Aplicación de esfuerzos  
Fuente: Exsa, 2008

Mediante el uso de detonadores electrónicos, ahora es posible hacer que las ondas interactúen de tal forma que los pulsos de tracción y de corte se superpongan para aumentar el efecto de las ondas de estrés. Los estados tensionales obtenidos de esta manera pueden ser mayores que los

obtenidos por la reflexión de los pulsos de compresión. Además de eso, los taladros en otras filas detonan en un ambiente confinado (20)

Para una presentación más clara del concepto antes mencionado, (19) sugirió el uso de diagramas de Lagrange. En aras de la simplicidad, las ondas de estrés se suponen planas, es decir, unidimensionales; los efectos tridimensionales de los taladros y las cargas también se ignoran.

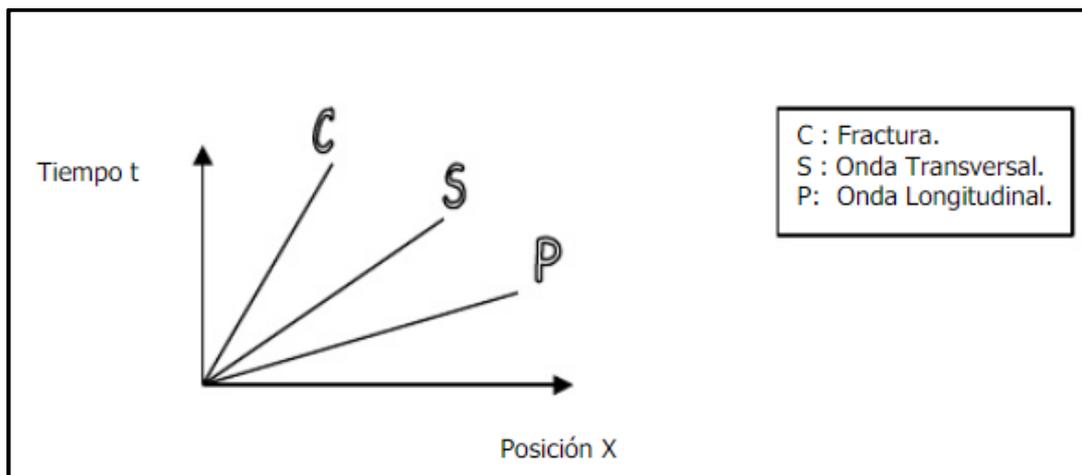


Figura 10: Diagrama de Lagrange  
Fuente: Jacinto, 2013

La figura N°10 ilustra los frentes y los extremos de una onda P y una onda S de un pulso corto en un diagrama de Lagrange, que consiste en un eje de tiempo frente a un eje de posición. Las tangentes de las líneas asociadas son las inversas de las velocidades de las olas. Dado que la velocidad de propagación de las ondas P es mayor que la de Swaves, su línea asociada es de menor pendiente.  $t_s$  y  $t_p$  representan la duración de las ondas de compresión y cizalladura, de las cuales una parte es la dirección positiva seguida de una cola negativa.

### 2.2.7. Mecánica de fracturamiento del macizo rocoso

Esta etapa está comprendida por el funcionamiento y capacidad de interacción del explosivo con el macizo rocoso, todo esto durante el proceso de detonación, el cual influye directamente en la mecánica de fracturamiento del macizo rocoso. Años de experiencia y literatura existente referente a

voladura de rocas no representan aun, como los explosivos actúan en rocas o en el terreno donde se aplican. De este modo, múltiples pruebas tales como: Test de VOD en taladros; análisis de fragmentación y determinación del esponjamiento producto de las voladuras; junto con otras se han desarrollado y ejecutado con el propósito de entender adecuadamente cómo los explosivos van a reaccionar cuando son aplicados en diversas condiciones de macizo rocoso. Dichas técnicas de medición se aplican para ayudar a verificar cálculos teóricos que se pueden utilizar a fin de predecir la producción de energía de los explosivos en técnicas convencionales de voladuras (21).

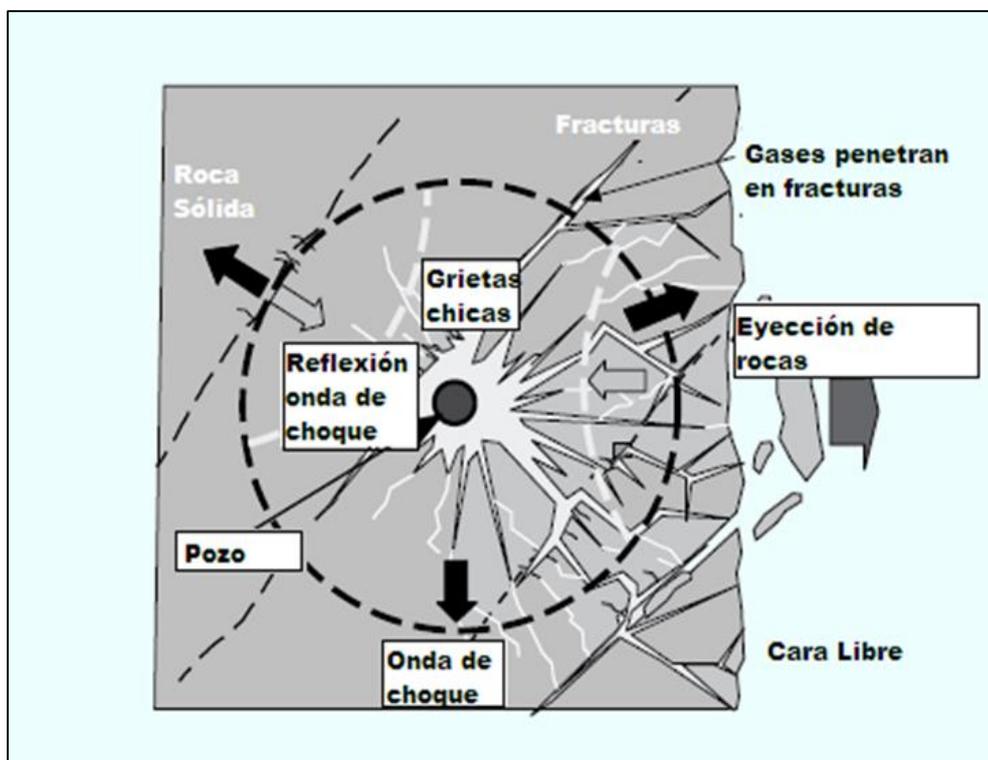


Figura 11: Fracturamiento inicial del macizo  
Fuente: Orica, 2008

### 2.2.7.1. Tópicos sobre la energía de los explosivos

Una forma de expresar la capacidad que tiene un explosivo para fragmentar el macizo rocoso puede darse a través de las teorías de “Energía de un explosivo”. Se entiende que un explosivo con mayor concentración energética es capaz de trabajar sobre un área de roca más amplia. La energía que se produce por la detonación de un explosivo

puede calcularse usando códigos termodinámicos y es posible hacer la medición de estos, haciendo uso de múltiples técnicas.

El rendimiento del explosivo tradicionalmente ha sido determinado a partir de un cálculo de una detonación ideal simplemente en términos de la energía total liberada por la composición del explosivo, sin referencias al índice al que esa energía es liberada y sin considerar los efectos de un confinamiento. En la realidad, los explosivos no se comportan en forma ideal (detonación no ideal) y el rendimiento del explosivo está en función de la composición química del explosivo, la forma física y la naturaleza del confinamiento, el método de iniciación y el tipo y extensión del particionamiento de la energía disponible para hacer trabajo útil sobre la roca. En otras palabras, el efecto del explosivo sobre la roca circundante se puede predecir en forma más realista en términos de energías de fragmentación y de empuje. En este proyecto, se analizan los términos de detonación ideal y detonación no ideal.

#### **a. Detonación Ideal**

Sobre este concepto, se menciona que parte de la energía de una explosión se pierde (descargada a la atmósfera, perdida como calor, etc.) durante una voladura y algo de energía queda bloqueada en las sustancias químicas que se forman después de una detonación. Cuando toda la energía no es liberada instantáneamente es más realista expresar la potencia del explosivo en términos de la cantidad de energía que un usuario espera tener disponible para hacer trabajo efectivo, esto se denomina la Energía Efectiva.

#### **Clasificación de la Energía Efectiva**

El término de Energía efectiva es el más conocido para realizar una comparación de tipos de explosivos. La Energía Efectiva se calcula como la energía total liberada por los gases de un explosivo cuando se expanden y hacen trabajo útil, desde la presión de detonación inicial hasta una presión de corte de 100 MPa (1000 atmósferas).

Se usa una presión de corte debido a que se sabe que la capacidad de los gases para hacer trabajo disminuye a medida que cae la presión confinante. Por consiguiente, la “Energía Efectiva” es una medición más apropiada de la producción de energía útil de los explosivos en aplicaciones convencionales en voladuras.

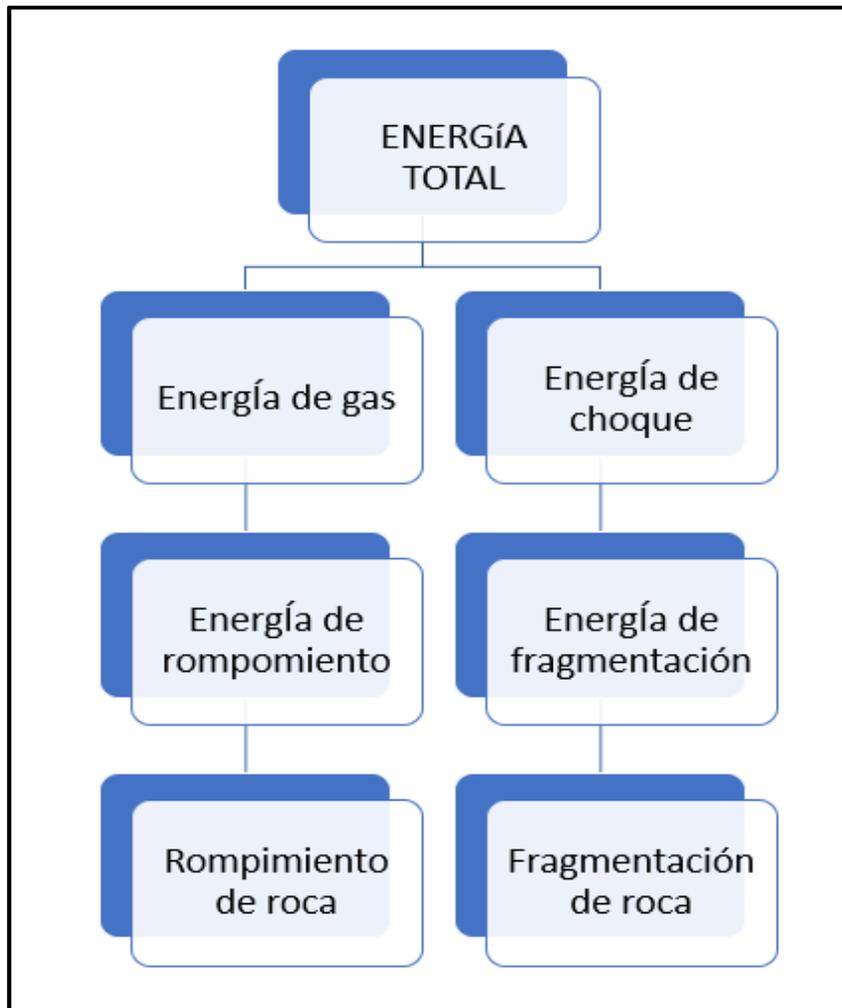


Figura 12: Energía de los explosivos  
Fuente: Orica, 2008

Para comparar el rendimiento de distintos explosivos, hay dos valores de energía efectiva que son importantes, a saber, que son la Energía Relativa Efectiva en Peso (RWEE) y la Energía Relativa Efectiva en Volumen (RBEE):

- “Energía Relativa en Peso” se define como la energía efectiva de un explosivo comparada con la energía efectiva de un peso igual de

ANFO estándar (es decir, 94% de NA, 6% de Combustible, densidad = 0,8 g/cm<sup>3</sup>). Estos valores son representados como un porcentaje con ANFO igualando a 100. Por lo tanto, un valor de 110% podría indicar 10% más de energía que el ANFO en base a un mismo peso.

- “Energía Efectiva Relativa en Volumen” se define como la energía efectiva de un explosivo comparada con la energía efectiva de un mismo volumen de ANFO estándar. La relación entre RWEE y RBEE puede ser expresada en la forma de: RBEE tiende a ser más útil para un ingeniero de voladuras para comparar explosivos. Cuando un tiro es perforado en roca, se crea un volumen y usualmente es ventajoso maximizar la energía cargada dentro de ese volumen. En muchas aplicaciones, el uso de un explosivo más caro con una RBEE más alta puede llevar a una reducción global en costos operativos, debido a un menor costo por perforación por tonelada de roca tronada lo que resulta de la expansión de una malla asociada. RWEE y RBEE están basados en un código de detonación ideal.

## **b. Detonación No Ideal**

En los conceptos previos a esta parte conceptual se ha visto la detonación ideal de los explosivos. El efecto de un explosivo dado en un tamaño dado de taladro y para un tipo de roca es distinto al modelo del rendimiento ideal dado que el diámetro del explosivo y el confinamiento ya no son infinitos.

La efectividad que tiene un explosivo al ser detonado será variable en función al tipo de roca en el cual se aplique. En ambientes rocosos sedimentarios, por ejemplo, material arcilloso o una arenisca, un explosivo de baja densidad será suficiente para crear una tensión a fin de generar una fragmentación óptima; el ANFO podría ser un explosivo adecuado para estas condiciones de terreno; siempre y cuando se trate de un terreno libre de agua. Para un material rocoso de mayor competencia, tales como el granito o la andesita, se requerirá un explosivo con mayor energía explosiva. Los explosivos que utilizan

aluminio para su sensibilización son una nueva alternativa para fragmentación de terrenos altamente competentes.

El manual técnico operativo de un fabricante de explosivos reconocido mundialmente hace referencia de que existen 02 fases que se llevan a cabo durante el proceso de detonación del explosivo y fragmentación del macizo rocoso:

**Fase de Expansión del taladro.** - Esta fase está comprendida durante la expansión del taladro donde se entrega energía de choque hasta el punto de equilibrio del taladro. Aquí se crean fracturas por la onda de fuerza de alta compresión generada por la detonación.

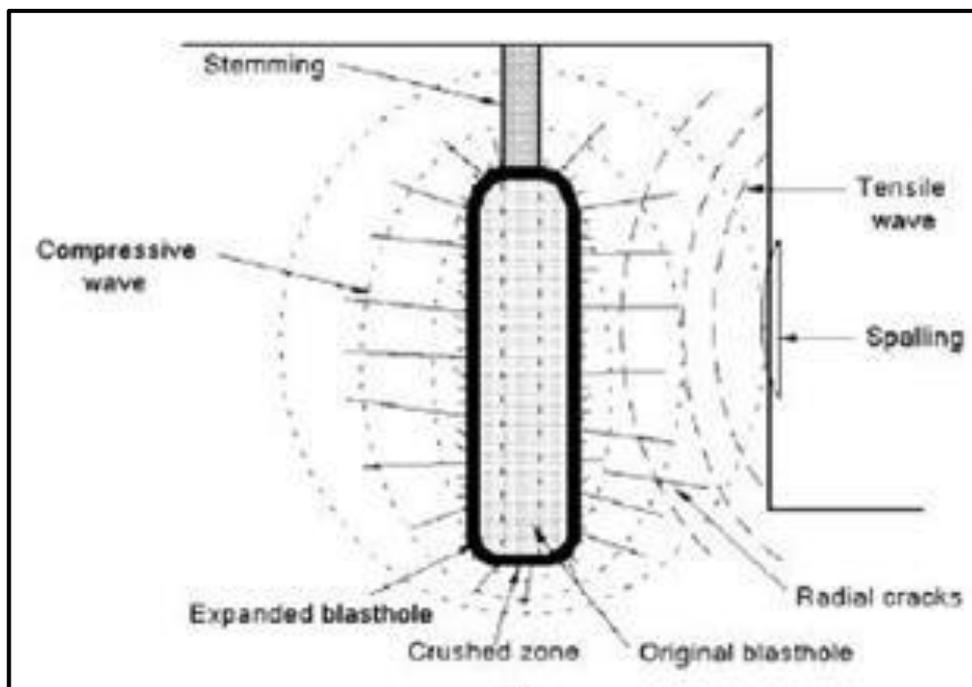


Figura 13: Expansión de energía en taladro  
Fuente: Sharma, 2012

**Fase de Expansión de Gas.** - Esta etapa se da cuando la energía, producto del gas, es entregada durante la fase de expansión del mismo. Se entiende que esta energía aporta de manera significativa al proceso de fragmentación, ya que se genera una extensión de las fracturas, y por consecuencia, un desplazamiento de la roca fracturada.

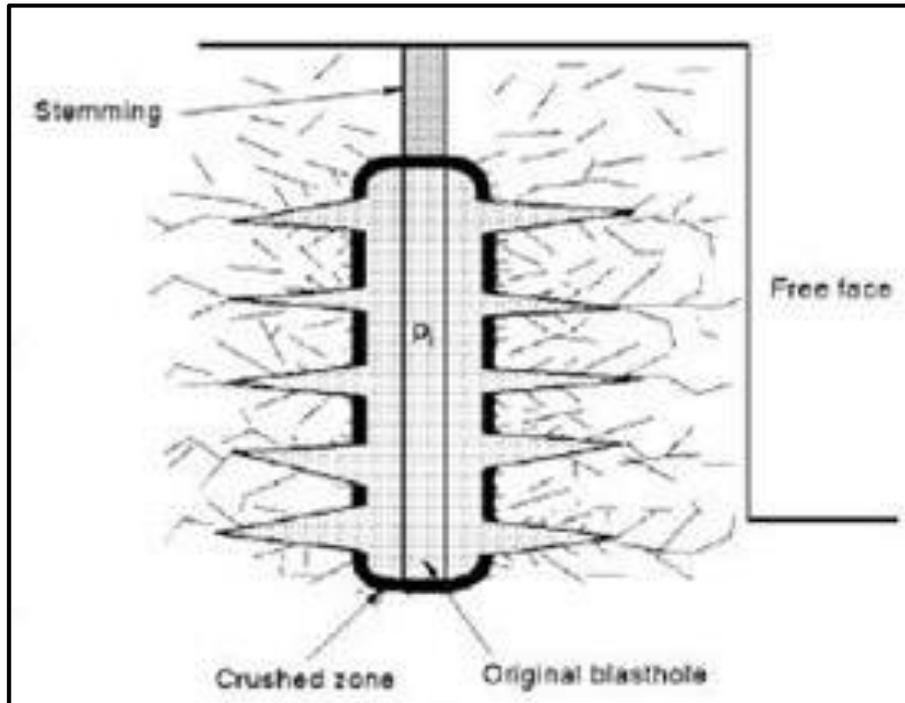


Figura 14: Expansión de gases en macizo rocoso  
Fuente: Sharma, 2012

De acuerdo con este párrafo, tomaremos como referencia el rendimiento del explosivo en función al método de iniciación que utilizemos, como base para la presente investigación.

#### 2.2.7.2. Mecanismo de Fracturamiento de rocas.

**Energía de choque:** Durante la explosión y/o detonación de una carga de explosivos en un taladro, una inminente onda de fuerza compresiva es transmitida a través del macizo rocoso. A medida que la onda de fuerza compresiva generada por el explosivo pasa por el macizo rocoso, la fuerza compresiva radial hace que se genere un esfuerzo de tensión complementario a este. Este efecto producirá la generación de grietas densas alrededor del taladro producto del esfuerzo de tensión y esto dará paso a la generación de nuevas fracturas siempre que el esfuerzo de tensión sea mayor a la resistencia tensional de la roca.

Del mismo modo, podría generarse fracturamiento del macizo rocoso cuando la onda de fuerza compresiva encuentre una cara libre o una discontinuidad abierta en el macizo y una onda de esfuerzo de tensión

se refleja de vuelta hacia el taladro. La figura N° 15 representa la acción de las ondas de choque en el macizo rocoso.

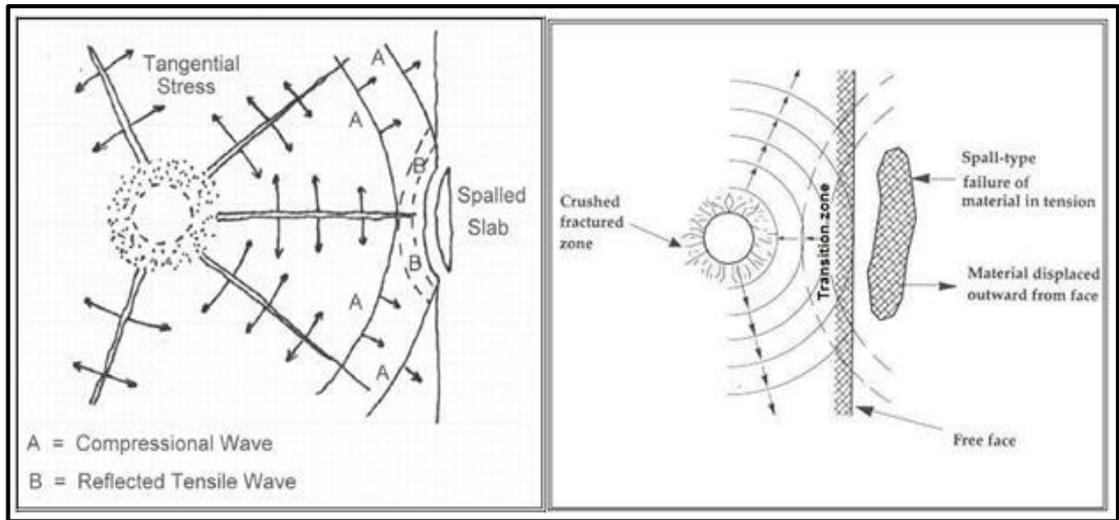


Figura 15: Ondas de choque en macizo rocoso  
Fuente: Sharma, 2012

La energía utilizada para fragmentar no tiene por qué ser comparada y/o confundida con la energía de choque puesto que también se puede producir fragmentación del macizo rocoso en etapas posteriores de rotura del macizo y no es únicamente como resultado de falla tensional de la estructura del macizo rocoso.

**Energía por Gas:** El fracturamiento interno y/o grietas generadas por el esfuerzo tensional en el macizo rocoso se prolongan por la alta presión de los gases producto de la explosión, los cuales penetran y atraviesan las grietas y en las fracturas. Las grietas optan por una mayor abertura y eventualmente dan inicio al desplazamiento del macizo rocoso hacia adelante. La energía generada por los gases, la cual es utilizada durante esta fase de quiebre del macizo rocoso es llamada también “Energía de Empuje” o también “Presión de Explosión”.

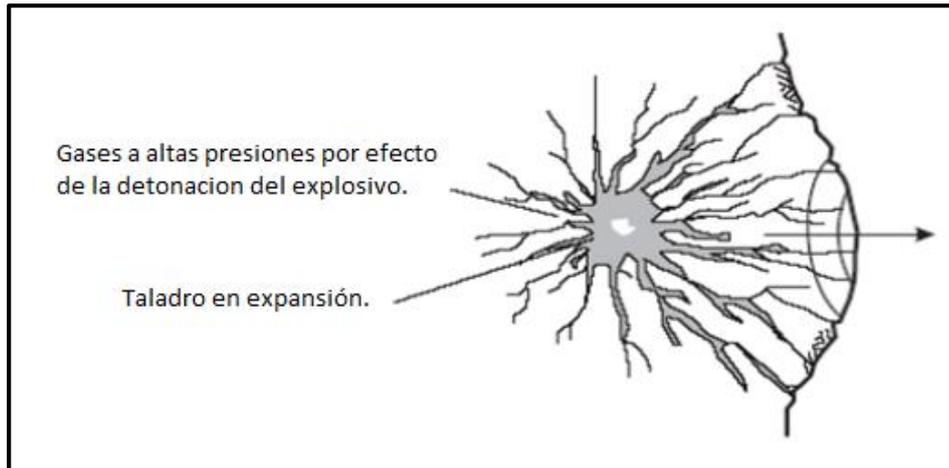


Figura 16: Detonación por alta presión de Gases  
Fuente: NPTEL, 2004

Los gases de alta presión de la explosión eventualmente se escapan hacia la atmósfera a una presión de alrededor de 100 MPa (1000 atmósferas) y en este punto se detiene el trabajo efectivo del macizo rocoso. El total de la energía que se libera producto de la detonación del explosivo, hasta este punto, se llama “Energía de Fragmentación” y es igual a la “Energía Efectiva Relativa”.

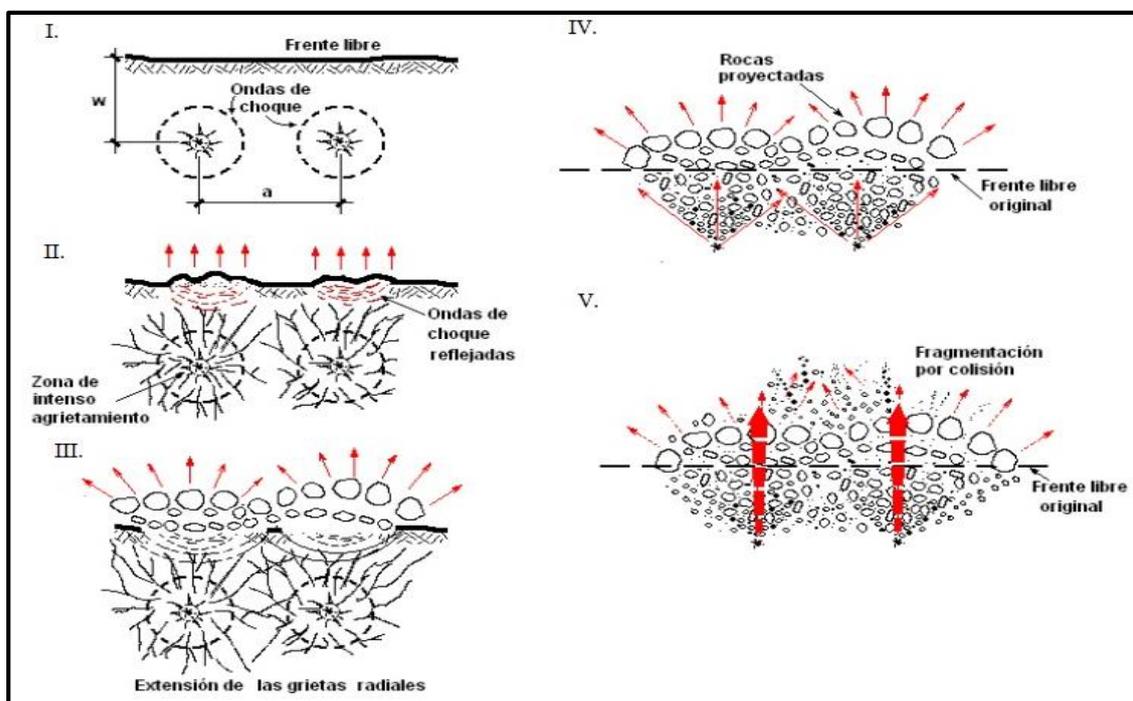


Figura 17: Proceso de fragmentación  
Fuente: Puig & Melián, 2003

### 2.2.8. Implicancia de la Cara Libre

De acuerdo con la literatura de Orica (21) durante el proceso de fracturamiento del macizo rocoso, la presencia de una cara libre y existencia de fracturas abiertas, juegan un papel importante en el proceso de rotura del macizo. La bolonería (con mucha cara libre) que está siendo detonado con voladura secundaria, aplicando una carga en una perforación de tipo “cachorro”, y utilizando un cartucho de dinamita y/o emulsión encartuchada, incluso con material de plasta (masa explosiva colocada a nivel superficial), podría ser roto adecuadamente con un factor de carga de 0,05 kg/m<sup>3</sup>. En comparación, una excavación bastante angosta o una rampa en el mismo tipo de roca podrían requerir de un factor de carga por encima de 0,7 kg/m<sup>3</sup> a fin de lograr el resultado esperado.



Figura 18: Cresta sobre minada  
Fuente: Propia, 2016

Se entiende que la disponibilidad de una cara libre ubicada a una distancia óptima del taladro nos conlleva a que la energía liberada de los explosivos lleve a cabo una gran cantidad de trabajo en el macizo rocoso circundante. Nótese que la voladura será más eficiente y se lograrán mejores

resultados si tiene 02 caras libres en vez de una, como es el caso de la minería subterránea, en su mayoría.

A continuación, vamos a analizar la influencia de distintos escenarios de Burden como base para el resultado de una voladura:

#### a. Demasiado Burden

Si la distancia a la cara libre razonable es demasiado grande (burden's excesivos), mucha de la energía de la explosión se va a disipar en chancado excesivo de la roca que está inmediatamente cercana al taladro y se va a liberar mucha más energía en la forma de vibraciones. Debido a la falta de libertad de movimiento no puede ocurrir una extensión de las grietas por los gases de la explosión, y por lo tanto, la fragmentación y la pila se ven afectadas (21).

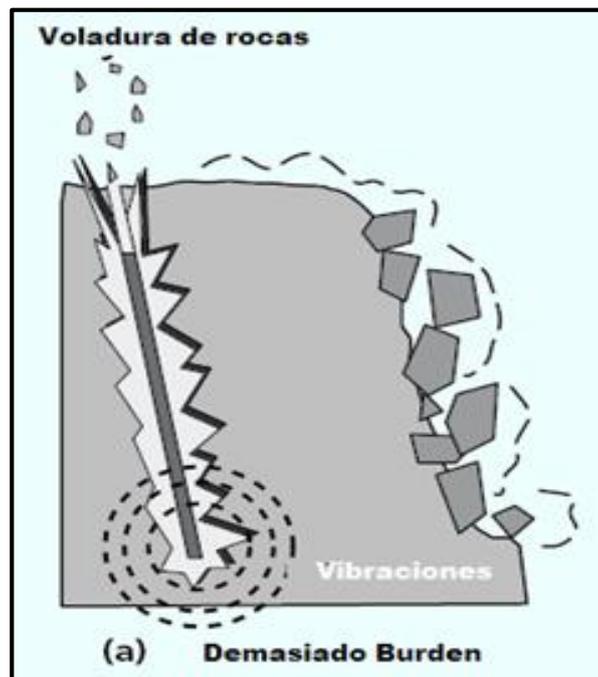


Figura 19: Esquema de banco con demasiado Burden  
Fuente: Orica, 2008

**b. Poco Burden:**

Un burden insuficiente hace que los gases a alta presión de la explosión se descarguen prematuramente, resultando en airblast y en fragmentos de roca (21).

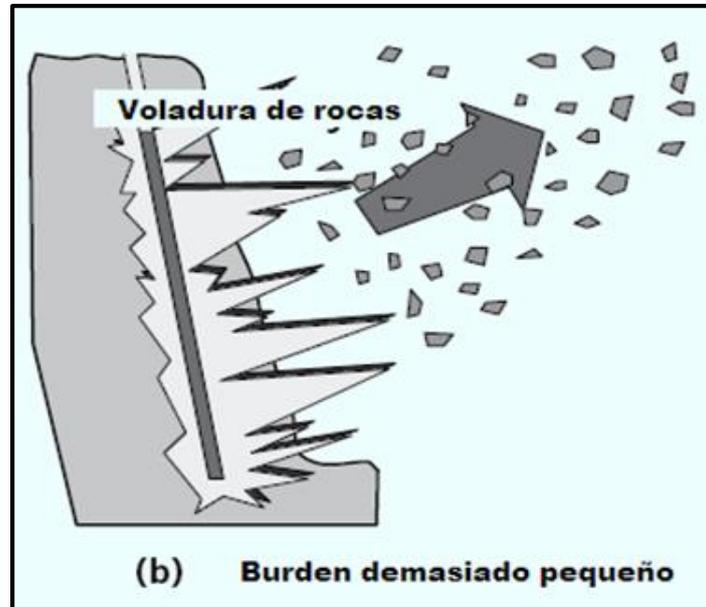


Figura 20: Esquema de banco con poco Burden  
Fuente: Orica, 2008

**c. Burden Correcto:**

Un burden insuficiente hace que los gases a alta presión de la explosión se descarguen prematuramente, resultando en airblast y en fragmentos de roca (21).

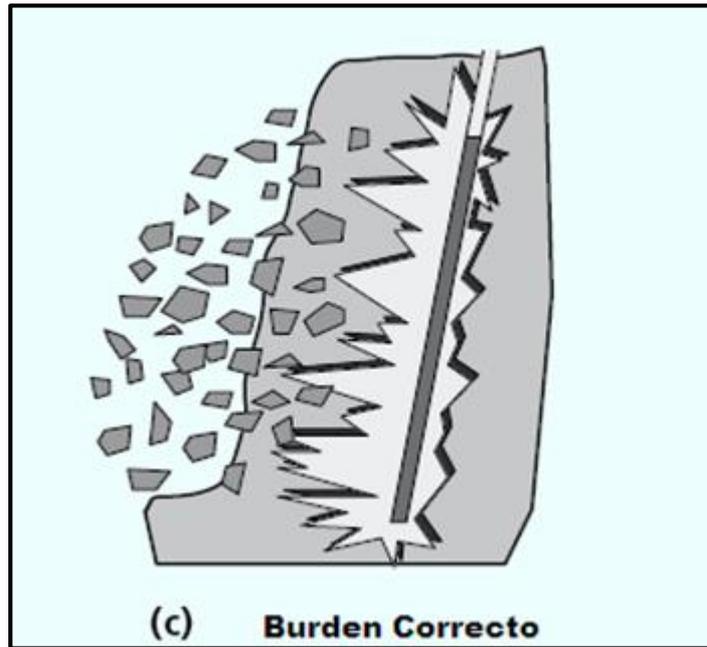


Figura 21: Esquema de banco con Burden adecuado  
Fuente: Orica, 2008

### 2.2.9. Modelos Numéricos de Fragmentación de Rocas

Como parte del siguiente estudio, hemos considerado a la fragmentación como un indicador importante en el análisis de los resultados finales productos de la voladura. Este indicador es importante pues permite cuantificar y calificar los esfuerzos que se hacen durante el proceso de voladura, los cuales afectan directamente a los procesos metalúrgicos (chancado, molienda y recuperación). A continuación, vamos a analizar el modelo de fragmentación establecido por KUZ- RAM.

#### Teoría de fragmentación por KUZ-RAM

Existen diferentes procesos los cuales consisten básicamente en desmenuzar o en la destrucción total de la materia sólida; estos pertenecen al procedimiento para llevar a cabo la fragmentación (voladura, chancado o molienda), es así que en cada etapa se genera multi dispersión del material, dentro del cual se presenta diferentes tamaños de partícula, ya sea grueso, medio y contenido del material fino. Esto se podría definir a través de una curva en la que se muestra la

distribución de las partículas de acuerdo con el tamaño. Además de acuerdo a la siguiente ecuación, se muestra como hallar el porcentaje del material de menor tamaño, en relación del tamaño del material y el tamaño característico.

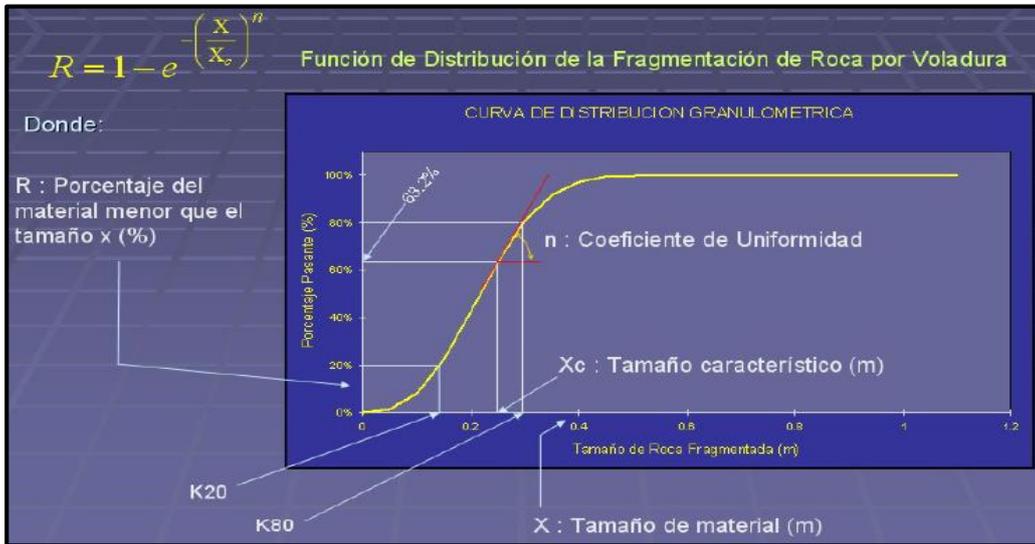


Figura 22: Fragmentación – Curva de distribución  
Fuente: Leiva, 2007

Ecuación 1: Función de distribución de roca por voladura

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n}$$

Donde:

*R* : Porcentaje del material menor que el tamaño *x* (%)

*X* : Tamaño del material (m)

*X<sub>c</sub>* : Tamaño característico (m)

*n* : Coeficiente de uniformidad

La curva de distribución de la fragmentación se encuentra delimitado por dos factores como el tamaño característico que refiere el tamaño específico y el coeficiente de uniformidad que define el perfil de la curva. El modelo de procedimiento para llevar a cabo la fragmentación y la rotura normal de la masa rocosa influye en la curva de distribución de tamaño.

Existen varios modelos de fragmentación como “Kuz Ram”, en el cual se vincula la técnica de voladura y la roca, éste se fundamenta en ecuaciones que calculan el tamaño de fragmento aproximado. A partir del tamaño singular del fragmento y el índice de uniformidad se puede esquematizar la curva de fragmentación.

En 1998 Lu y Latham dieron a conocer otro modelo que es EBT-Energía-Bloque-Transmisión, en este se vincula la energía entrante propia del explosivo mientras se realice la voladura con la finalidad de reducir significativamente el tamaño promedio del bloque y el material fragmentado después de haberse realizado la voladura.

### **A. Modelo de fragmentación Kuz Ram**

Básicamente consiste en dar a conocer la aproximación de la distribución del tamaño de la roca fragmentada por voladura, es así que se proponen cinco ecuaciones en la cual se relacionan las propiedades de los macizos rocosos y de los explosivos como también la geometría con la cual se da la voladura.

#### ○ **Teoría de rotura**

A través de la ecuación propuesta por Kuznetsov se puede estimar la medida de la rotura que sucede con una cantidad de energía conocida. Pero Cunningham realizó una modificación basado en explosivos ANFO. Existe una correlación entre la dimensión promedio del fragmento y la energía destinada a la voladura por la unidad de volumen de la roca a cargo del tipo de roca. Kuznetsov (1973)

$$X_{av} = A \left( \frac{V_0}{Q_T} \right)^{0.8} Q_T^{1/6}$$

Donde:

$X_{av}$  : *Tamaño medio de los fragmentos (cm)*

$A$  : *Factor de roca*

$V_0$  : *Volumen de roca (m<sup>3</sup>) a romper por el taladro*

$$\text{Volumen/taladro (m}^3\text{)} = \mathbf{B \times E \times A}$$

$Q_T$  : *Masa (Kilogramo) de TNT que ocupa la energía o carga explosiva que se encuentra en cada taladro*

La ecuación basada en ANFO:

$$X_{av} = A \left( \frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{S_{ANFO}}{115} \right)^{-19/30}$$

Donde:

$Q_e$  : *Masa del explosivo utilizado por taladro (kilogramo/taladro)*

$S_{ANFO}$  : *Fuerza relativa por peso del explosivo ANFO (ANFO=100)*

Ya que:

$$\left( \frac{V_0}{Q_e} \right) = \left( \frac{1}{K} \right)$$

Donde:

$K$  : *Factor de potencia, triturante o carga específica (Kg/m<sup>3</sup>).*

La ecuación basada en ANFO (2): Para hallar la fragmentación media

$$X_{av} = A(K)^{-0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19/30}$$

Donde:

- $X_{av}$  : *Tamaño medio de los fragmentos (cm)*
- $A$  : *Factor de roca*
- $K$  : *Factor de potencia (Kg. Explosivo/ m<sup>3</sup> roca)*
- $Q_e$  : *Peso de carga (Kg. Explosivo/taladro)*
- $S_{ANFO}$  : *Fuerza del explosivo (%ANFO)*

Para hallar el factor de potencia o también llamado carga específica tenemos:

$$A = \left[ \frac{A}{\overline{X_{av}}} Q_e^{1/6} \left( \frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19/30} \right]^{1.25}$$

o **Teoría de distribución de tamaño**

A partir del tamaño promedio se puede hallar la distribución de los tamaños de las partículas de la roca fragmentada, solo si se conoce el modelo de rotura. (Rosin y Rammler, 1993). A continuación, se presenta la ecuación propuesta por Rosin y Rammler para hallar la distribución.

$$R = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \quad \text{o} \quad R = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Donde:

- $R$  : *Porcentaje de material mayor que el tamaño x (%)*
- $X$  : *Tamaño de material (m)*
- $X_C$  : *Tamaño característico (m)*
- $n$  : *Coficiente de uniformidad*

También se puede despejar la ecuación para hallar tamaño característico:

$$X_c = \frac{X}{r^{1/n}}$$

La fórmula de Kuznetsov posibilita calcular el tamaño  $X_{av}$  del material en el cual 50% del material pasa, entonces:

- $X$  :  $X_{av}$

$R : 0.5$

Reemplazamos:

$$X_c = \frac{X_{av}}{[0.693]^{1/n}}$$

Donde:

$X_c$  : *Tamaño característico (m)*

$X_{av}$  : *Tamaño promedio del material - Kuznetsov (m)*

El tamaño característico es hallado a través del tamaño promedio del material de la ecuación de Kuznetsov para el uso de la ecuación propuesta por Rosin-Rammler.

### **Correlación del diseño de voladura**

Según Cunningham, se encuentra una relación en las distintas estructuras de voladura y así mismo en el modo en el que se da la rotura. En la ecuación a presentarse se da a conocer como calcular el exponente de uniformidad de acuerdo a la explicación de Cunningham.

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left[\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right]^{0.5} \left(1 - \frac{Z}{B}\right) \left[\frac{\text{abs}(Lb - Lt)}{L} + 0.1\right]^{0.1} \left(\frac{L}{H}\right) (P)$$

Donde:

$n$  : *Exponente de uniformidad*

$B$  : *Burden (m).*

$D$  : *Diámetro del taladro (mm).*

$S$  : *Espaciamiento (m).*

$Z$  : *Desviación estándar del error de perforación (m).*

$Lb$  : *Longitud de carga de fondo (m).*

$Lt$  : *Longitud de carga de encima (m).*

$L$  : *Longitud de carga (m).*

$H$  : *Altura de banco (m).*

$P$  : *Factor de diseño de malla, 1.0 malla cuadrada, 1.1 malla triangular.*

Se tiene “n” el cual es interpretado por sus valores altos como indicador de tamaños promedios, los valores bajos representan existencia de diversidad entre fragmentos finos y grandes. De acuerdo con esto es preferible contar con valores altos menciona Rosin-Rammler.

De acuerdo con Cunningham, el rango adecuado para la fragmentación de la voladura debe encontrarse desde 0.75 a 1.75, así el promedio aproximadamente es 1.0. En terrenos que presenten sobre carga podría ocurrir que si el valor de “n” es menor a 0.75 que representan tamaños tanto finos como grandes, no tener el control de la fragmentación. En cuanto a valores menores a 1.0 representan mayormente fragmentos grandes y finos, para valores mayores o iguales a 1.5 la textura es muy parecida.

Cabe resaltar que el tipo de explosivo, posición de los taladros, y otros no intervienen en el exponente de uniformidad; ya que, este se encuentra definido solo por la geometría de la voladura. Además, Cunningham menciona que es importante aumentar 10% a n solo si la perforación es triangular.

○ **Teoría de detonación del explosivo**

De acuerdo con Tidman en la detonación se libera energía por parte del explosivo, este puede ser calculado mediante la siguiente ecuación.

$$S_{ANFO} = \left( \frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 (RWS)$$

Donde:

$S_{ANFO}$  : *Efectivo fuerza de peso relativo (%)*

$VodE$  : *Efectivo (campo) velocidad de detonación (m/s)*

$VodN$  : *Nominal (máximo) velocidad de detonación (m/s)*

*RWS* : Fuerza de peso relativo del ANFO (%)

o **Teoría de correlación por el tipo de roca**

De acuerdo con Lilly, la voladura está influenciada por las propiedades de las rocas; ya que, son estas características las que alteran la cantidad de rotura. El Índice de Volabilidad o también llamado el Factor de Roca puede ser evaluado por una ecuación, este es empleado para direccionar la voladura y cambiar el promedio fragmentado que se fundamenta en el tipo de roca. Lilly desarrollo un método con la finalidad de caracterizar los macizos rocosos teniendo en cuenta el Índice de Volabilidad y los explosivos.

El Índice de Volabilidad consiste en la suma de cinco criterios geomecánicos, el cual contribuye para las evaluaciones del Burden, predicción de la fragmentación, y espacio para el diseño de la malla. Se recomienda conocer minuciosamente los cinco factores que caracterizan al macizo rocoso a explotar. Según Cunningham el limite más bajo que el obtuvo en sus distintas pruebas fue  $A=8$  en rocas muy débiles y el más alto de  $A=12$ .

$$A = 0.06 \times (RMD + JFs + JFo + RDI + HF)$$

Donde:

*RMD* : Descripción del Macizo Rocosó

*JFs* : Espaciamiento entre planos de juntas.

*JFo* : Orientación de los planos de Juntas

*RDI* : Índice de densidad de la roca, influencia del peso específico.

*HF* : Factor de dureza, ratio de influencia de la Resistencia

### **2.2.10. Iniciación electrónica.**

La Introducción de la iniciación eléctrica dio un mayor grado de seguridad para las personas involucradas en las operaciones de voladura.

Las discusiones de varios sistemas de iniciación que siguen se concentran principalmente en la práctica común y la seguridad.

Se pueden lograr buenos resultados en cualquier operación de voladura solo cuando los dispositivos iniciadores usados para detonar cargas explosivas son de la más alta calidad posible, cuidadosamente elegida y utilizada de manera adecuada para cumplir con la tarea en cuestión. Desafortunadamente, los dispositivos iniciadores no pueden diferenciar entre la energía suministrada deliberadamente y la energía suministrada accidentalmente.

Por esta razón, los usuarios de dichos dispositivos tienen la responsabilidad de mantener un control estricto sobre ellos en el transcurso de su almacenamiento, transporte y uso. Los dispositivos de iniciación se han convertido en una variedad de sistemas que ofrecen más flexibilidad y mayor seguridad que sus contrapartes anteriores. Las modernas máquinas de voladura de alta energía están diseñadas para proporcionar un excedente de energía de combustión y reducir la posibilidad de fallas de encendido.

Para elegir el sistema de iniciación correcto para una operación de voladura, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones que garanticen explosiones seguras y efectivas. La discusión de los sistemas de iniciación que siguen se centra en la práctica común y los diversos "trucos del oficio" que están asociados con cada sistema individual.

La idea de usar detonadores electrónicos se planteó en 1973 en la Conferencia Kentucky Blasters (22) ; sin embargo, la nueva tecnología se utilizó por primera vez en Australia a mediados de la década de 1980 (22). Paul Worsey presentó un documento sobre el uso comercial de la iniciación electrónica en la reunión ISEE1 en 1983 (22). Posteriormente, en 1987, el Grupo ICI introdujo un sistema de detonador electrónico preprogramado con 64 retrasos disponibles. El sistema se usó para determinar el potencial del momento preciso, así como la capacidad de identificar cambios en los resultados del estallido en condiciones de tiempo controlado. En 1990, Expert Explosives (ExEx) y Altech Technologies de forma independiente comenzaron a desarrollar detonadores electrónicos programables para la industria minera. Finalmente, a medida que la demanda de esta tecnología creció en muchos países, incluidos Sudáfrica y Australia, Orica™ Mining

Services comenzó a fabricar los detonadores electrónicos en producciones a gran escala en 1999.

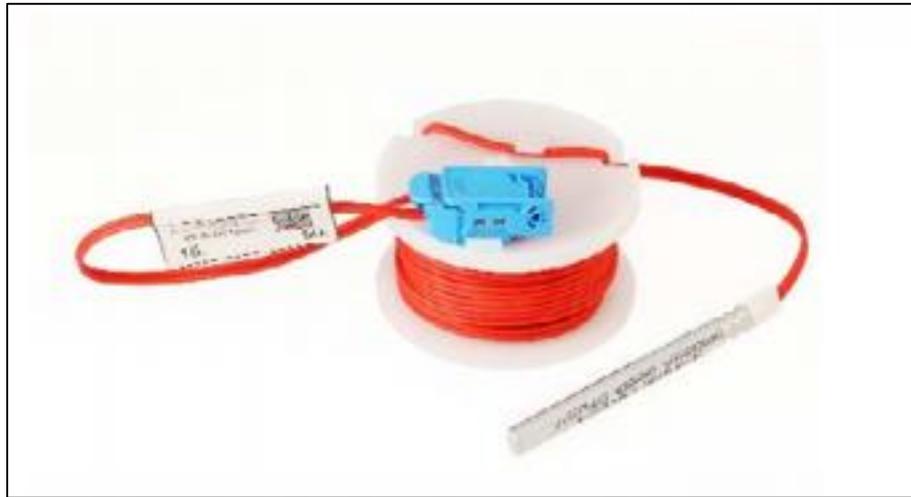


Figura 23: Detonador electrónico "I-kon™"  
Fuente: Orica, 2017

El sistema de iniciación traslada la señal de detonación de taladro a taladro en un tiempo determinado que generalmente es preciso. En tal sentido, seleccionar el sistema de iniciación es crucial para el éxito de la voladura. En este sentido, el sistema de iniciación no solamente realiza la función de controlar el disparo de los taladros; sino que esta afecta de forma directa a la cantidad de vibración ocasionada por la voladura, el tamaño de fragmentación producida, sobre rotura y la violencia que puede ocurrir.

Los sistemas de iniciación, o también conocidos como detonadores se emplean en voladuras a cielo abierto. De forma que, los detonadores electrónicos son considerados la última evolución de los sistemas de iniciación. La diferencia fundamental entre el detonador electrónico y cualquier otro, bien sea eléctrico o no eléctrico, es que la pasta pirotécnica que determina el tiempo de retardo ha sido sustituida por un circuito electrónico, en el cual, un microchip es el encargado de realizar la descarga de un condensador en el instante deseado. En los demás tipos de detonadores, el retardo viene fijado por el tiempo que tarda en consumirse una pasta pirotécnica. Cada detonador electrónico está identificado inequívocamente con un código alfanumérico que sirve para su posterior programación y disparo. En cuanto a la carga explosiva, es igual a la que

poseen los demás sistemas de detonación. De este modo, las características explosivas del detonador electrónico son las mismas que las de otros sistemas de iniciación. La precisión en los tiempos de retardo en los detonadores electrónicos es del 0,02 %, mucho mayor que para detonadores de retardo pirotécnico.

El sistema de detonador electrónico se tiene que usar juntamente con la unidad de programación y la unidad de disparo (explosor electrónico).

La unidad de programación es el dispositivo que asigna un tiempo a cada detonador. Estas unidades no cargan el detonador, solamente identifican un tiempo de detonación con cada código inequívoco del detonador. Esta unidad funciona como una base de datos en la que se identifica el número de serie de cada detonador electrónico con el tiempo establecido en la secuencia de disparo. Esta programación se realiza en la voladura, por lo que los detonadores que llegan desde el polvorín son todos exactamente iguales. Además, la unidad de programación tiene las opciones de gestionar esa base de datos, pudiendo añadir, borrar o modificar los tiempos de detonación asignados.

El explosor electrónico es el equipo que tiene la misión de programar, cargar, realizar la comprobación del circuito y enviar la orden de disparo a los detonadores. La señal que envía este explosor está codificada, lo que hace que no sea posible la emisión de la orden de disparo por agentes externos (corrientes erráticas, campos inducidos, etc.).

Los detonadores electrónicos pueden programarse con un tiempo de retardo desde 0 ms hasta 30 000 ms, en intervalos de 1 ms. El máximo número de detonadores que pueden dispararse por cada explosor es de 1 500 unidades. Estos valores indicados varían en función del modelo y del fabricante y, en caso de necesitar mayor número de detonadores, se pueden emplear varios explosores conectados en serie entre sí.

La comprobación del circuito de voladura se realiza por medio de la unidad de programación. Se establece una comunicación bidireccional con cada uno de los detonadores, es decir, la unidad de programación chequea los detonadores que tiene almacenados y cada uno confirma su correcto funcionamiento. Esta comprobación se realiza del mismo modo desde la unidad de disparo.

El sistema se completa con cable eléctrico que hace de línea de tiro y otros conectores para asegurar la conexión entre ésta y cada uno de los detonadores. Esto significa que el sistema de iniciación electrónica reúne las ventajas de los detonadores eléctricos y los detonadores no eléctricos. Esto hace posible la verificación eléctrica de la línea con un sistema de conexiones eléctricas mejorado y, por otro lado, la señal codificada hace imposible que sean disparados accidentalmente.

Ventajas de la iniciación electrónica:

- Reducción drástica de vibraciones. Las vibraciones terrestres producidas por las voladuras pueden ser previstas y modificadas porque no hay superposición de ondas y se puede diseñar la mejor secuenciación para obtener el mejor resultado.
- Mejora en la fragmentación. La precisión del sistema implica mejor cooperación entre taladros.
- Como todos los detonadores, en origen, no tienen retardo, todos los detonadores tienen las mismas características, e implica una logística más fácil y los inventarios pueden ser reducidos.
- La secuenciación puede ser adaptada a cualquier necesidad, con 1 ms de precisión.
- Se pueden ingresar mejoras importantes en voladuras especiales como las de precorte.

El núcleo de pentrita, en cantidad variable según el tipo de cordón, va rodeado de varias capas de recubrimiento de hilados y fibras textiles, y de un recubrimiento exterior de cloruro de polivinilo, que es el que le proporciona las propiedades de elevadas resistencias a la tracción, abrasión y humedad, etc. El cordón detonante también se caracteriza por su potencia, que está en relación directa con el contenido de pentrita por metro lineal de cordón y ésta potencia es la que determina el tipo de aplicación concreta. Actualmente, los cordones detonantes de aplicación más extendida tienen contenidos de explosivo por metro desde 3 a 100 gramos.

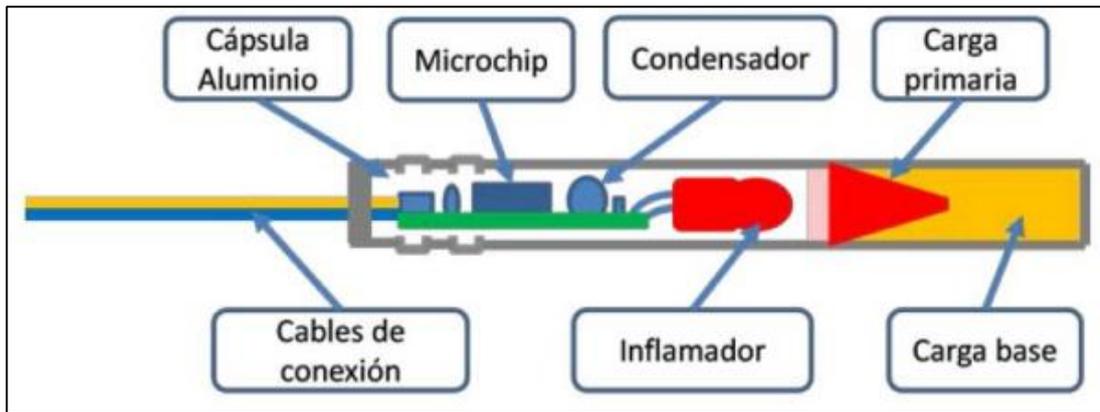


Figura 24: Esquema interno de detonador electrónico  
Fuente: Propia

### 2.3. Definición de términos básicos

De acuerdo a la literatura revisada y publicada por Enaex (23) y Orica (21) se han resaltado los términos más utilizados en la presente investigación. A continuación se presentan:

**Acoplamiento.** - Describe el nivel de intimidad del explosivo en un taladro y la roca que se encuentra alrededor. De este modo, si el diámetro del explosivo es menor a la del taladro, se puede deducir que la carga explosiva esta desacoplada (23).

**Agente explosivo.** - Mezcla de sustancias combustible y oxidante, componentes que no son intrínsecamente explosivos por separado, y que con presencia de calor dan lugar a la reacción de detonación (21).

**Altura de banco.** - Esta definida como la distancia vertical partiendo de la superficie horizontal superior hasta la inferior (de cresta a piso) (21).

**Amarre.** - Una vez cargados los taladros y chequeados, se realiza el amarre a la troncal, según lo especificado por el diseño (garantizando que se cumplirá con la secuencia estipulada). Con los retardos se debe hacer cumplir la condición de que todos los tiros hayan sido iniciados antes de que detone el primer tiro. En el caso de detonadores electrónicos el amarre se da durante el proceso de programación de detonadores, en este proceso de ingresa los tiempos de salida a cada detonador a través de un Logger (21).

**Back-up.** - Es el detonador no eléctrico, que sirve como respaldo en caso de falla del detonador electrónico durante la programación de la secuencia del disparo (21).

**Balance de oxígeno.** - Ésta es la cantidad de oxígeno, expresada en porcentaje del peso, liberada como un resultado de la conversión completa del material explosivo a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, AlO<sub>2</sub>, etc. (balance de oxígeno "positivo"). Si hay oxígeno insuficiente para la reacción completa de la oxidación se dice que el compuesto tiene un balance de oxígeno negativo. Los explosivos comerciales deben tener un balance de oxígeno cerca de cero para minimizar la cantidad de gases tóxicos, particularmente monóxido de carbono y gases nitrosos que están presentes en los humos (23).

**Booster.** - Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva (sustentar la velocidad de detonación). Por lo general se utilizan explosivos de alta velocidad de detonación, como el Booster de pentolita (21).

**Burden.** - El burden de un taladro se refiere a la dimensión lineal entre el taladro y la cara libre y se mide perpendicular a la dirección de la línea de taladros que constituyen una fila (23).

**Burden efectivo.** - El término burden efectivo se refiere a la dimensión lineal entre el taladro y la posición de la cara libre más cercana al tiempo de la detonación del taladro, y toma en consideración la dirección de la iniciación (23).

**Cara libre.** - Superficie de contacto con el medio ambiente tomando como referencia un cubo, es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión relajadas que provocan la fragmentación (21).

**Cebo.** - También llamado Prima, es la carga de explosivo de alta potencia y sensibilidad, en la que se sitúa el iniciador (booster) y que sirve para aumentar el rendimiento de otros explosivos. Combinación de Booster y detonador (21).

**Deflagración.** - Reacción explosiva rápida acompañada por la formación de gases y presión de barreno y sin choque, con una velocidad de detonación menor a los 2000 m/s (23).

**Densidad del explosivo.** - La densidad de un explosivo corresponde a su peso por unidad de volumen y se expresa en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ). Si la densidad de un explosivo es mayor que  $1,00 \text{ g/cm}^3$ , se hunde en el agua (asumiendo que el agua en él no tiene cantidades apreciables de sólidos en suspensión o sales disueltas). Si la densidad del explosivo es menor que  $1,00 \text{ g/cm}^3$ , el explosivo flota (21).

**Detonación.** - Reacción explosiva que consiste en la propagación de una onda de choque a través del explosivo, acompañado por una reacción química, en la que se libera una gran cantidad de energía, gases a alta presión y temperatura (21).

**Desacoplamiento.** - Se refiere a la práctica de usar una carga de diámetro más pequeño que la del taladro de voladura a cargar (23).

**Desplazamiento.** - Es la distancia recorrida por un bloque rocoso a través de un plano de movimiento (21).

**Detritus:** Material que es evacuado desde los taladros de perforación, producto de la penetración del tricono en la roca. Es utilizado comúnmente como material de taco en las tronaduras para confinar la carga explosiva (21).

**Diámetro Crítico.** - El diámetro crítico de un explosivo es el diámetro bajo el cual ocurre una detonación estable. Los diámetros críticos generalmente son dados para cargas explosivas que detonen en forma no confinada (es decir, al aire libre). Los explosivos con alta sensibilidad generalmente tienen diámetros críticos chicos (23).

**Diámetro del taladro.** - También llamado diámetro de la broca, es el diámetro del taladro de perforación, sujeto al equipo o maquinaria de perforación disponible y al diseño propuesto (21).

**Doble primado.** - Técnica de voladura usada para aumentar la fragmentación de la roca. Consiste en la ubicación de 2 primas en una misma columna de carga. Pueden disponerse ambas en el fondo o sólo una en el fondo y la otra a cierta altura dentro de la columna (21).

**Energía del explosivo.** - La energía de un explosivo expresa la capacidad del explosivo para fragmentar. Un explosivo con mayor energía podrá trabajar sobre una mayor cantidad de roca. La energía producida por un explosivo se puede calcular usando códigos termodinámicos y se puede medir usando varias técnicas (21).

**Espaciamiento.** - El espaciamiento para un taladro se refiere a la dimensión lineal entre taladros adyacentes que forman una fila, y se mide usualmente paralelo a la cara libre. El término usualmente se refiere al espaciamiento de la perforación (23).

**Espaciamiento efectivo.** - El término espaciamiento efectivo se refiere a la dimensión lineal entre taladros que detonan sucesivamente, y toma en consideración la dirección de la cara libre (23).

**Esponjamiento.** - Aumento del volumen del polígono de macizo rocoso después de ser tronado. Esto debido a que se fragmenta en partículas, generando huecos entre ellas (21).

**Factor de carga.** - Es la cantidad de explosivo en peso que se emplea para fragmentar una tonelada métrica de material de banco. El factor de carga se indica mediante unidades de kg/m<sup>3</sup> o kg/ton (23).

**Factor de energía.** - Este término es similar al Factor de carga, pero la energía del explosivo se expresa con relación al peso o volumen de roca quebrada (MJ/m<sup>3</sup> o MJ/ton o Kcal/ton) (23).

**Falla.** - Es una fractura frágil a lo largo de la cual acontecen desplazamientos visibles, generalmente semejante a la superficie de esta (21).

**Fly rock.** - Proyección aérea de roca no controlada, producto de exceso de carga explosiva, mal confinamiento del taladro falla en diseño de la secuencia de salida del disparo, mala calidad geológica o estructural del macizo rocoso (21).

**Fragmentación.** - Las características de una curva de distribución de tamaño de fragmentación dependen del tipo de proceso de fragmentación y la característica de rotura natural de la masa rocosa (NBC, Natural Breakage

Characteristic). Debido a la complejidad del mecanismo envuelto en la fragmentación de roca por voladura, muchos de los modelos de fragmentación que relaciona la roca y la técnica de voladura para la fragmentación tienen fuertes raíces empíricas (21).

**Frente de carguío.** - Zona de material volado, en la cual se realiza extracción de la roca quebrada mediante palas para el carguío a los camiones de extracción (21).

**Granulometría.** - Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica (21).

**Iniciación.** - Acto de detonar el explosivo por medio de un detonador o cualquier otro accesorio (21).

**Iniciadores.** - Constan generalmente de un iniciador de pentolita o un cartucho de emulsión o dinamita. El término iniciador se usa para designar la carga que inicia a la columna explosiva (21).

**Malla de voladura.** - También denominada malla de carguío de explosivos, es el conjunto de taladros que forman parte de un mismo diseño para remover y fragmentar un polígono de material. Cada malla se caracteriza por tener burden (distancia entre filas) y espaciamiento (distancia entre taladros de una misma fila). Además, dentro de una malla, puede haber filas buffer, de voladura amortiguada, de producción y fila de precorte. Cada malla se identifica según: Tajo, Fase, Banco, número de malla (21).

**Material volado.** - Roca fragmentada resultante de la voladura (21).

**Precorte.** - Técnica de tronadura controlada, que tiene como objetivo generar una discontinuidad o fractura a lo largo de una línea con explosivo. Su objetivo es disminuir zonas que se desean proteger (21).

**Presión de detonación.** - Presión medida en el plano por detrás del frente de detonación cuando este se propaga por una columna de explosivo (21).

**Razón de rigidez.** - Es un término que describe la influencia de la geometría del disparo en el estado de confinamiento de una columna de explosivo, y se toma como la razón entre la altura del banco y el burden (23).

**Sensibilidad.** - La sensibilidad es una medición de la facilidad con la que un explosivo puede ser iniciado por calor, roce, impacto o choque. La tendencia en los explosivos comerciales es hacia una sensibilidad más baja a iniciación sin desmejorar la eficiencia de la detonación (23).

**Sobreperforación.** - Longitud del taladro perforado por bajo nivel del arranque proyectado (21).

**Taco.** - Material inerte que se introduce en los ya cargados con explosivo, a objeto de mejorar el confinamiento durante la detonación, por lo general se utiliza el detritus como producto de la perforaron como material de taco o gravilla (21).

**Técnicas de voladura.** - Procedimiento que combinan la diversidad de etapas a desarrollarse en la rotura de macizos a fin de predisponer geotécnicamente el yacimiento y facilitar la explotación del mineral (21).

**TQ (Tiro quedado).** - Se denomina al taladro cargado con explosivo que, al momento de realizarse la voladura, no detona. Se considera también un tiro quedado o TQ a los taladros que contienen restos de explosivo, aun cuando parte de la carga de ese taladro haya detonado. Es una consecuencia no deseada de alto riesgo que involucra medida inmediata al objeto de detonarlo en forma segura (21).

**Velocidad de Detonación (VOD).** - La VOD corresponde a la velocidad con la que se propaga la detonación a través de una columna de explosivos. Dos explosivos tienen la misma potencia, pero si tienen VODs distintas podrían desempeñarse en una voladura en forma bastante diferente. Como regla general, mientras más alta la VOD, mayor la energía de choque y más baja la energía de empuje. Sin embargo, es importante no confundir la Energía de Choque con la Energía de Fragmentación. La VOD de los explosivos usados en minas de superficie varía en alrededor de 3000 m/s y 7500 m/s. La VOD

de muchos explosivos se incrementa con el diámetro de la carga y con el confinamiento (23).

**Voladura de rocas.** - Es un proceso tridimensional, en la cual las presiones generadas por explosivos dentro de taladros originan una zona de alta concentración de energía que producen dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento (21).

### **2.3.1. Notaciones especiales**

Durante la aplicación de las distintas técnicas de voladura se han empleado abreviaciones técnicas que describen procesos, productos y elementos técnico/operativos los cuales serán mostrados y explicados a continuación:

**Iniciación simple:** Cuando en voladura se utiliza el término iniciación simple o “prima simple” hace referencia al uso de un (01) solo sistema de iniciación el cual debe estar compuesto por un booster y un detonador como mínimo. Actualmente existen investigaciones locales las cuales determinan que por otra parte, la principal desventaja que rodea el empleo de los detonadores electrónicos en general es el económico, pues hasta que no se llegue a una fabricación masiva los costos unitarios serán altos. Pero si se logra demostrar todos sus potenciales apuntando a los mejoramientos que se puedan realizar sobre los procesos que si realmente aumentan los costos de extracción de los recursos mineros, su utilización se incrementará con la consiguiente estabilización y mejora de sus costos (14).

**Iniciación doble:** Este término es empleado cuando en la columna explosiva se dispone el uso de dos (02) sistemas de iniciación. En términos de tiempos de detonación, estos deben ser iguales a fin de evitar un posible tiro quedado. De igual modo, si por diseño, uno de los iniciadores debe situarse dentro de una segunda carga (taladros con deck), el tiempo deberá ser igual al iniciador de la primera carga (carga de fondo). Aplicando la doble iniciación electrónica se optimizará la fragmentación de la roca en la zona de mineral sobre todo en la parte del taco del taladro, reduciendo el P80 y

garantizando que el ciclo de minado sea eficiente y lograr una mayor producción de mineral en planta (5).

**Iniciación triple.** El término refiere al uso de tres (03) sistemas de iniciación en conjunto dentro de un mismo taladro. Esta configuración, según diseño, puede variarse utilizando los tres iniciadores dentro de una misma carga explosiva, usar dos iniciadores en la primera carga (carga de fondo) y un tercer iniciador en la segunda carga y/o a nivel del taco y finalmente en distintas cargas (taladros con triple deck). Estas múltiples configuraciones se dan de acuerdo a las necesidades operativas, tipo de roca y resultados esperados (granulometría, desplazamiento de material, etc.).

**HA 55 – G:** Hace referencia a un Heavy ANFO 50/50, la cual es una mezcla de emulsión y ANFO según la formulación del fabricante, en este caso 50% de emulsión y 50% de ANFO. Adicional a esto la letra G refiere a que es una mezcla gasificada.

**HA 70 – G:** Hace referencia a un HEAVY ANFO 70/30, la cual es una mezcla de emulsión y ANFO según la formulación del fabricante, en este caso 70% de emulsión y 30% de ANFO. Adicional a esto la letra G refiere a que es una mezcla gasificada. Esta mezcla en particular se utiliza cuando se tienen taladros con presencia de agua ya que su resistencia al agua es mejor gracias a su mayor porcentaje de emulsión.

**FE:** Hace referencia al producto explosivo de la empresa Orica™ que significa Fortis™ serie Extra (FE), el cual está dentro de la gama de soluciones de la empresa y está catalogado como uno de los productos más energéticos del mercado con aplicación ideal para taladros con agua.

**FC:** Se refiere al factor de carga el cual se explica en la sección de definición de términos básicos.

**SD:** Se refiere al termino ingles *sub-drill* que significa sobre perforación. Esta sobre perforación se da sobre el nivel del piso del próximo banco inferior.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.4. Métodos y alcance de la investigación**

La presente investigación será trabajada a través del método científico, comparativo y de medición estadística, ya por medio de procedimientos se buscará corroborar la teoría, con apoyo de la estadística descriptiva e inferencial (24).

#### **2.5. Diseño de la investigación**

Diseño no experimental, puesto que se realizará el análisis en función a la data registrada de la minera, con el fin de determinar la más eficiente.

##### **2.5.1. Tipo de investigación**

Será de tipo aplicado descriptivo, donde a partir de conocimientos físicos se busca la mejor iniciación electrónica, sostenido en condiciones de ingeniería de minas.

##### **2.5.2. Nivel de la investigación**

El nivel de investigación que presenta este trabajo es “Descriptivo - Explicativo”; ya que, fundamentalmente busca describir los detalles y características demostrables de la aplicación de una iniciación simple, doble o triple y además la relación que existe entre el uso de estas configuraciones

con los resultados de fragmentación medibles en términos de P80” y porcentaje de finos <1”. Además que a nivel explicativo busca determinar en que grado favorece a los resultados de fragmentación P80”- % de finos <1” cuando se utilizan cada uno de estos múltiples diseños de iniciación.

## **2.6. Población y muestra**

### **2.6.1. Población**

La población de estudio donde se aplicó la investigación es la totalidad de data que es registrada en MMG, así mismo la muestra estará dirigida a la data que responda a las variables de estudio. En este caso hablamos de la información desde el año 2016 hasta la actualidad.

### **2.6.2. Muestra**

La muestra de estudio donde se aplicó la investigación es la data registrada y analizada como parte de los trabajos realizados durante el desarrollo de las múltiples pruebas, en este sentido, hablamos de la información mensual desde enero del año 2016 hasta julio del año 2016.

## **2.7. Técnicas e instrumentos de medición**

### **2.7.1. Técnicas de procesamiento**

Para el tema de la presentación de datos, se hizo uso del paquete informático MS Office Excel 2013, en el cual se desarrolló la tabulación de los datos a usar y realizar el análisis descriptivo, luego se pasó la información al programa SPSS v. 23 para realizar el análisis comparativo mediante los test de medias y el test de Duncan.

### **2.7.2. Técnicas de análisis de datos**

El procedimiento de contrastación de hipótesis se realizó de la siguiente manera: Dado que la hipótesis dicta: “Existe una mejora sustancial de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto”. La prueba de hipótesis

se establecerá comenzando con la hipótesis nula que establece: “No existe una mejora sustancial de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto”. Esto con el fin de negar la hipótesis nula de manera estadística.

Las pruebas estadísticas a utilizar serán las pruebas con el estadístico t, con los cuales se espera determinar el nivel de significancia parcial de las dimensiones de las variables dependientes e independientes.

Así, la hipótesis será contrastada si la probabilidad de que el estadístico t (para cada variable) tienen poca probabilidad de no tener relación con la variable dependiente, asegurando estadísticamente la relación entre estas.

Luego, el test de Duncan establece la prioridad en jerarquía entre estas, de forma tal que podemos asegurar con significancia estadística cual es el mejor sistema, o por el contrario, establecer si todas tienen el mismo desempeño.

### **2.7.3. Instrumentos**

El instrumento a usarse son los registros de la empresa, con los cuales se especifica el P80” obtenido, el porcentaje de finos menores a 1” y los sistemas que se han usado para tal fin.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **3.1. Presentación de resultados**

Para especificar la mejora de la eficiencia de la voladura asumiremos el porcentaje de finos menor a 1", en el caso de los explosivos utilizados se trabajó con Fortis™, el cual tiene un porcentaje base de 20% de fragmentación de roca menor a 1" para la iniciación simple, mientras que en el caso del explosivo para la doble y triple iniciación es el Fortis™, que asume un porcentaje base de 30% de fragmentación de roca menor a 1". Dada estas especificaciones, podemos establecer una serie de detalles acerca de la eficiencia de las voladuras electrónicas simple, doble y triple. Se tienen gracias a los datos de la empresa minera 10 datos acerca de la aplicación de la iniciación simple, 10 datos acerca de la iniciación doble y 10 datos de la iniciación triple; ante ello se procede a explicar estos datos de manera precisa.

##### **3.1.1. Iniciación simple**

Para el análisis de los resultados con el uso de la iniciación simple vamos a detallar, a modo de ejemplo, el diseño de carguío del día 18/04/2016 aplicado en el proyecto de voladura del nivel 3780 – 009 – 011. Cabe mencionar que en esta voladura se utilizó iniciación electrónica simple.

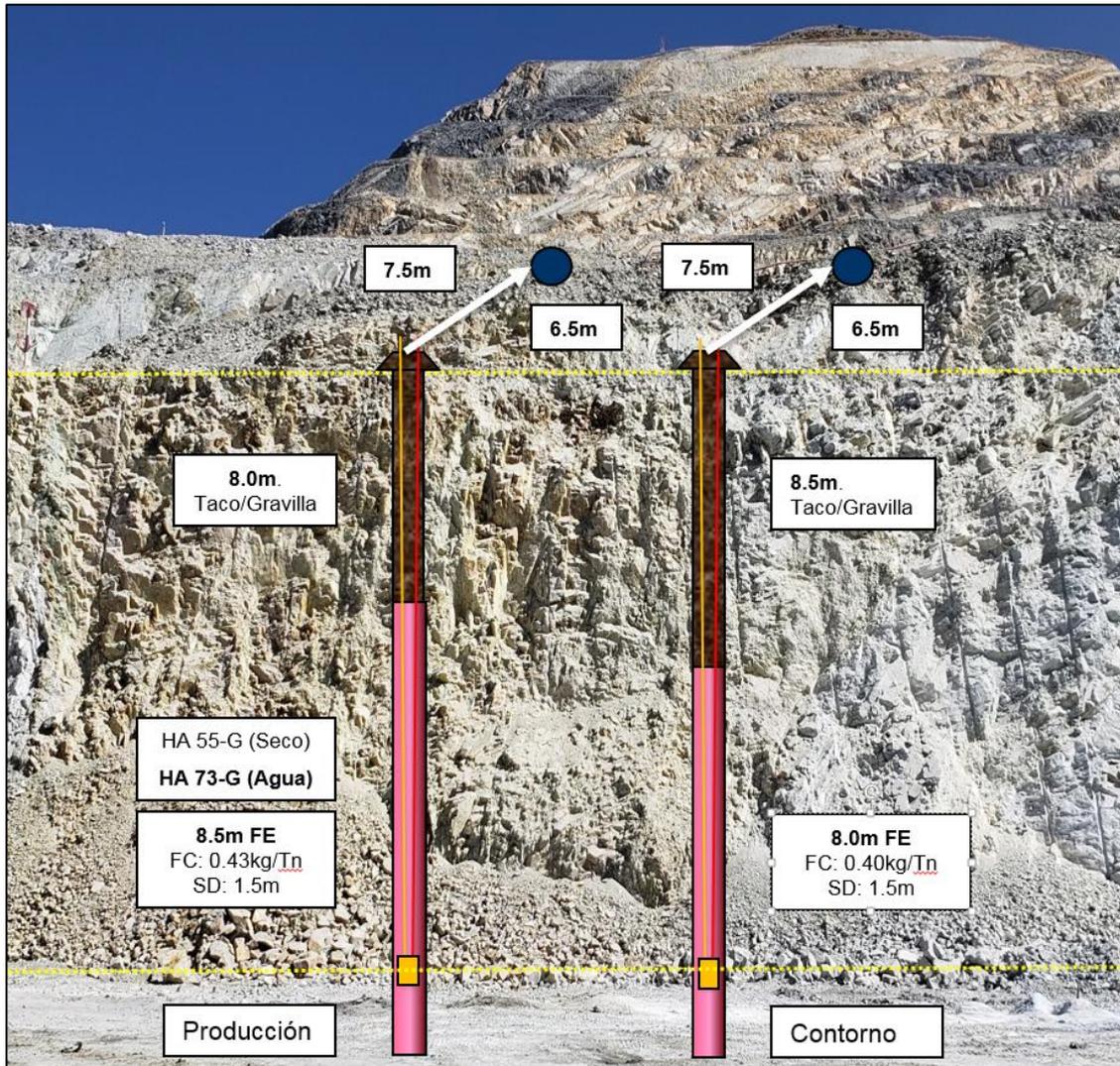


Figura 25: Diseño de malla y carguío – Iniciación simple  
Fuente: Propia

Este diseño, para taladros de producción (izquierda) tiene una relación de B x E (Burden por espaciamiento) de 6.5m x 7.5m, para un diámetro de perforación de 12 ¼. Se propone utilizar el explosivo de la serie “Fortis Extra™” dejando un taco de 8.0m y una longitud de carga de 8.5m. Todos los taladros de producción tienen una longitud de 15 metros y una sobre perforación de 1.5m.

Sobre la ubicación de las primas, se recomienda utilizar el iniciador de fondo a un metro del fondo del taladro; según sea la longitud de este. Por seguridad se utilizó un detonador electrónico “I-kon™” y un detonador no eléctrico “Exel™”; de este modo si existiera una pérdida de conectividad

entre el detonador electrónico con el sistema de loggeo, se podría aplicar la técnica de back up al detonador no eléctrico.

### Datos de la voladura:

El día 18/04/16 se realizó la voladura en el nivel 3780 – 009 – 011 disparando un total de 96 taladros utilizando detonadores electrónicos “I-kon™” II. Se utilizaron tiempos de retardo entre taladros de 2ms y tiempos entre filas de 200ms.

Con el uso del software “SHOTPlus™” desarrollado por la empresa ORICA™ se logró realizar el diseño computacional de la voladura. A continuación, se muestra el plano de amarre y levantamiento de taladros.

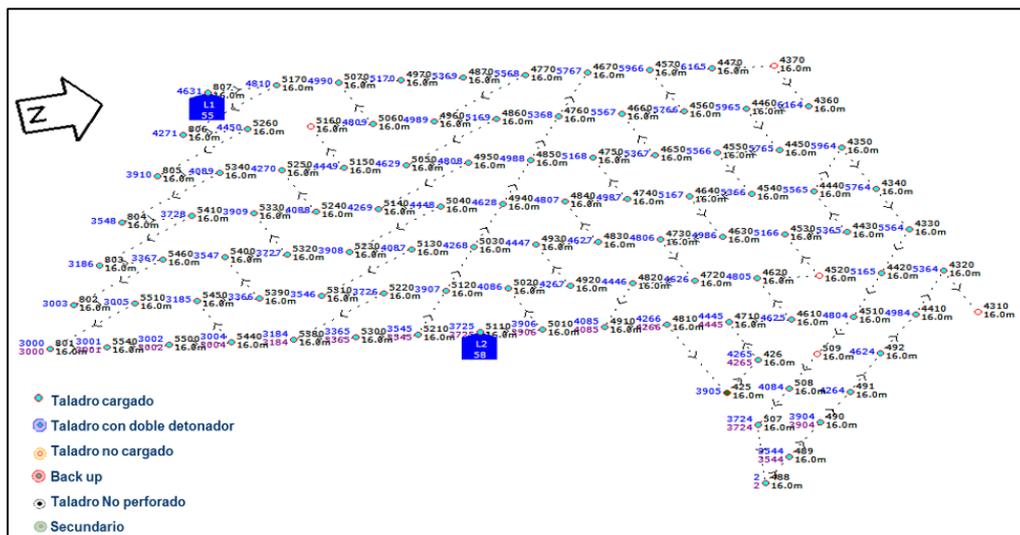


Figura 26: Plano de amarre y levantamiento de taladro  
Fuente: Orica, 2016

A continuación, se muestra el plano de voladura con las líneas de isotiempo (100ms).

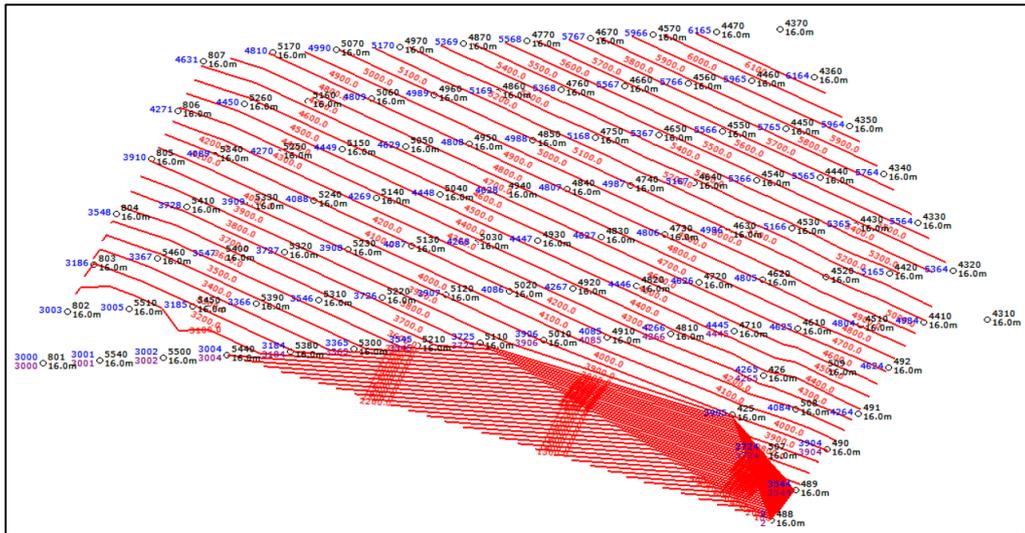


Figura 27: Líneas de isotiempo (100ms)  
Fuente: Orica, 2016

Con la ayuda del software computacional “SHOTPlus™” se puede predecir el movimiento que tendrá el material según la secuencia de salida de cada taladro, a continuación, se muestra la imagen referencial del desplazamiento del material.

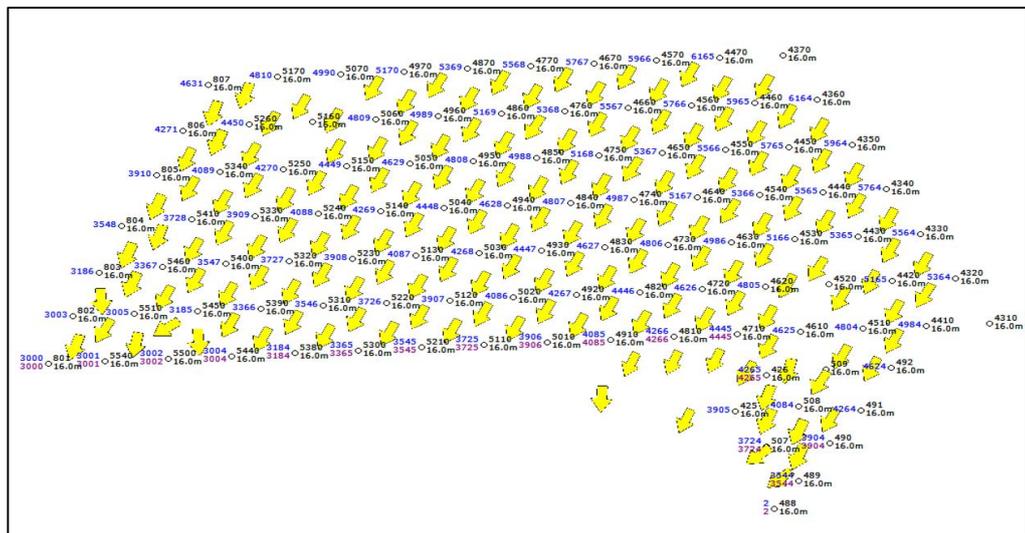


Figura 28: Desplazamiento de material  
Fuente: Orica, 2016

En la figura N° 28 se detalla el “Burden Relief” asociado al disparo.

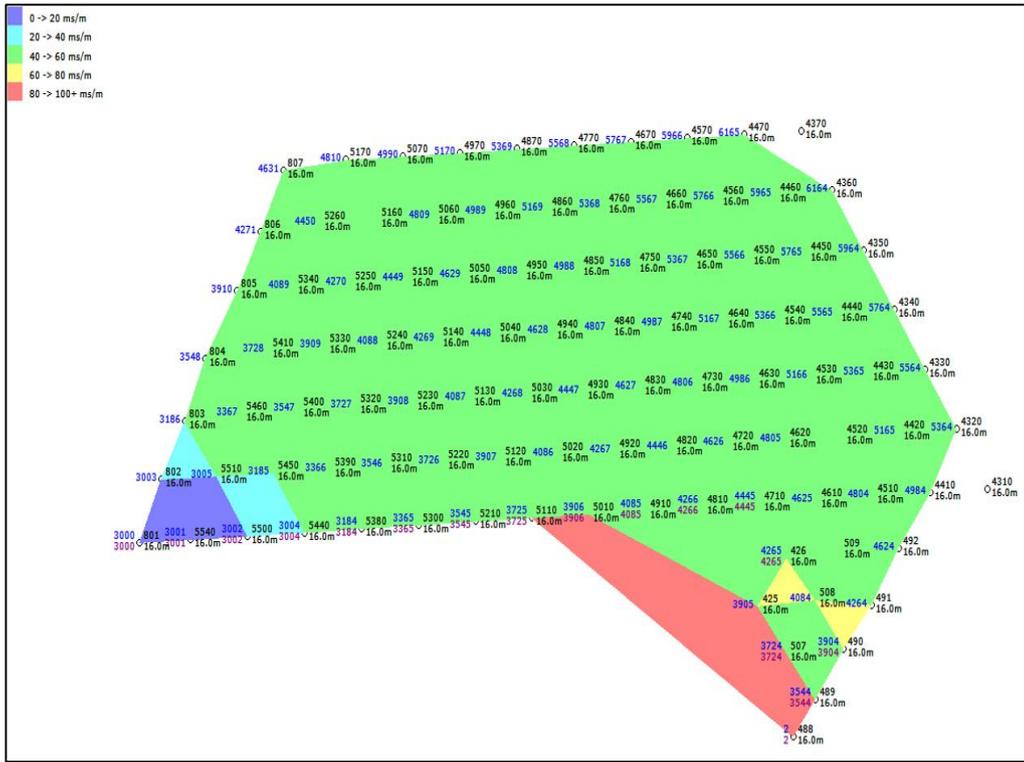


Figura 29: Burden Relief (100ms)  
 Fuente: Orica, 2016

En la siguiente figura muestra el proyecto 3780 – 009 – 011 previo al disparo.



Figura 30: Área pre – voladura  
 Fuente: Orica, 2016

Como resultado de la voladura en el proyecto 3780 – 009 – 011 se obtuvo visualmente una buena fragmentación a nivel superficial.



Figura 31: Área post – voladura  
Fuente: Orica, 2016

## Análisis de los resultados de fragmentación y % de finos

El día 20/04/2016 se realizó el análisis de fragmentación manual del proyecto de voladura 3780 – 009 – 011 durante el minado de la zona de taladros que fueron primados aplicando la técnica de la iniciación simple (mineral), este análisis fue realizado con el uso de la herramienta computacional Powersieve™ desarrollada por Orica™.

Los primeros resultados de P80 y % de finos arrojan un resultado de 5.13” y 19.5% <1” respectivamente en una roca con RQD (designación de calidad de la roca) entre 50 – 75 (calidad de la masa de roca mediana o regular).

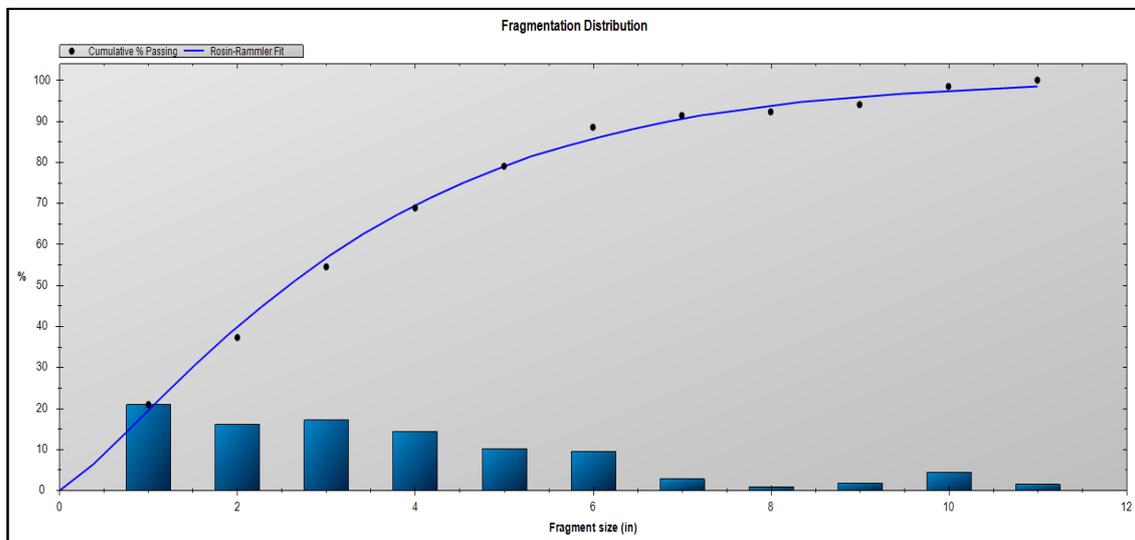


Figura 32: Distribución de la fragmentación  
Fuente: Orica, 2016

Se detallan también los resultados de modelos Rosin-Rammler y Swebrec analizados por el software PowerSieve™. Para este caso se utilizará para el registro de datos y trazabilidad con el modelo de Rosin-Rammler el cual valida de información del P80 – 5.13” y % de finos – 19.5%.

Rosin-Rammler Fit		Swebrec Fit	
Xc:	3.48 in	Xmax:	12.4 in
n:	1.23	X50:	2.76 in
80% Passing:	5.13 in	b:	2.58
% Fines:	19.5%	80% Passing:	5.16 in
		% Fines:	21.0%

Figura 33: Resultados Rosin-Rammler y Swebrec  
Fuente: Orica, 2016

El análisis manual para obtener los resultados de fragmentación se obtiene a través de fotografías tomadas del frente de minado, a continuación, se muestran algunas fotografías que fueron tomadas durante el minado del frente del proyecto 3780 – 009 – 011, las cuales sirvieron para la obtención de los resultados ya mencionados.



Figura 34: Frente de minado del proyecto 3780 – 009 – 011  
Fuente: Orica, 2016

Tabla 1: Iniciación simple

<b>Estadísticas de muestra única</b>				
	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Media de error estándar</b>
<b>Iniciación simple</b>	10	22,6210	3,32028	1,04996

Fuente: Propia

Tabla 2: Prueba de medias

<b>Prueba de muestra única</b>						
	Valor de prueba = 20					
	<b>t</b>	<b>gl</b>	<b>Sig. (bilateral)</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>95% de intervalo de confianza de la diferencia</b>	
					<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Iniciación simple</b>	2.496	9	0.34	2.62100	0.2458	4.9962

Fuente: Propia

Respecto de la iniciación simple se tiene un valor promedio de 22.62%, con un nivel de dispersión de 1.04% de fragmentación de roca inferior a 1", acerca de la eficiencia de este, respecto de la base (20%), se puede establecer mediante la prueba de medias que la iniciación simple es superior a 20% con un valor del estadístico t Student calculado igual a 2.496, una significancia de 3% y una confianza estadística de 95%. Por tanto, se establece que la iniciación simple ha sido eficiente.

En la figura N° 35 se detallan los resultados de los 10 disparos evaluados utilizando la iniciación simple.

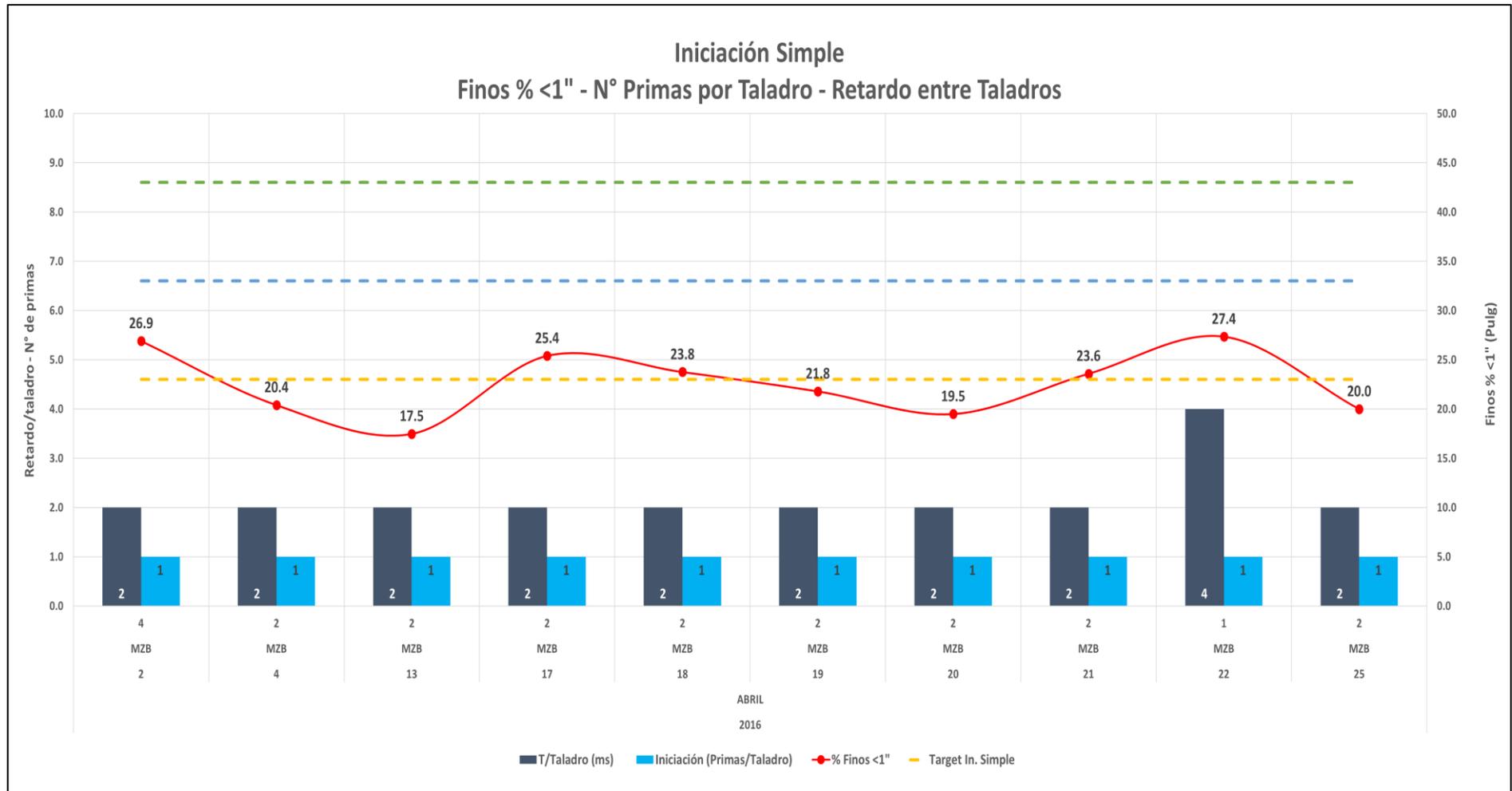


Figura 35: Retardo entre taladros – N° de primas – Finos % -1" – Voladuras con Iniciación simple  
Fuente: Propia

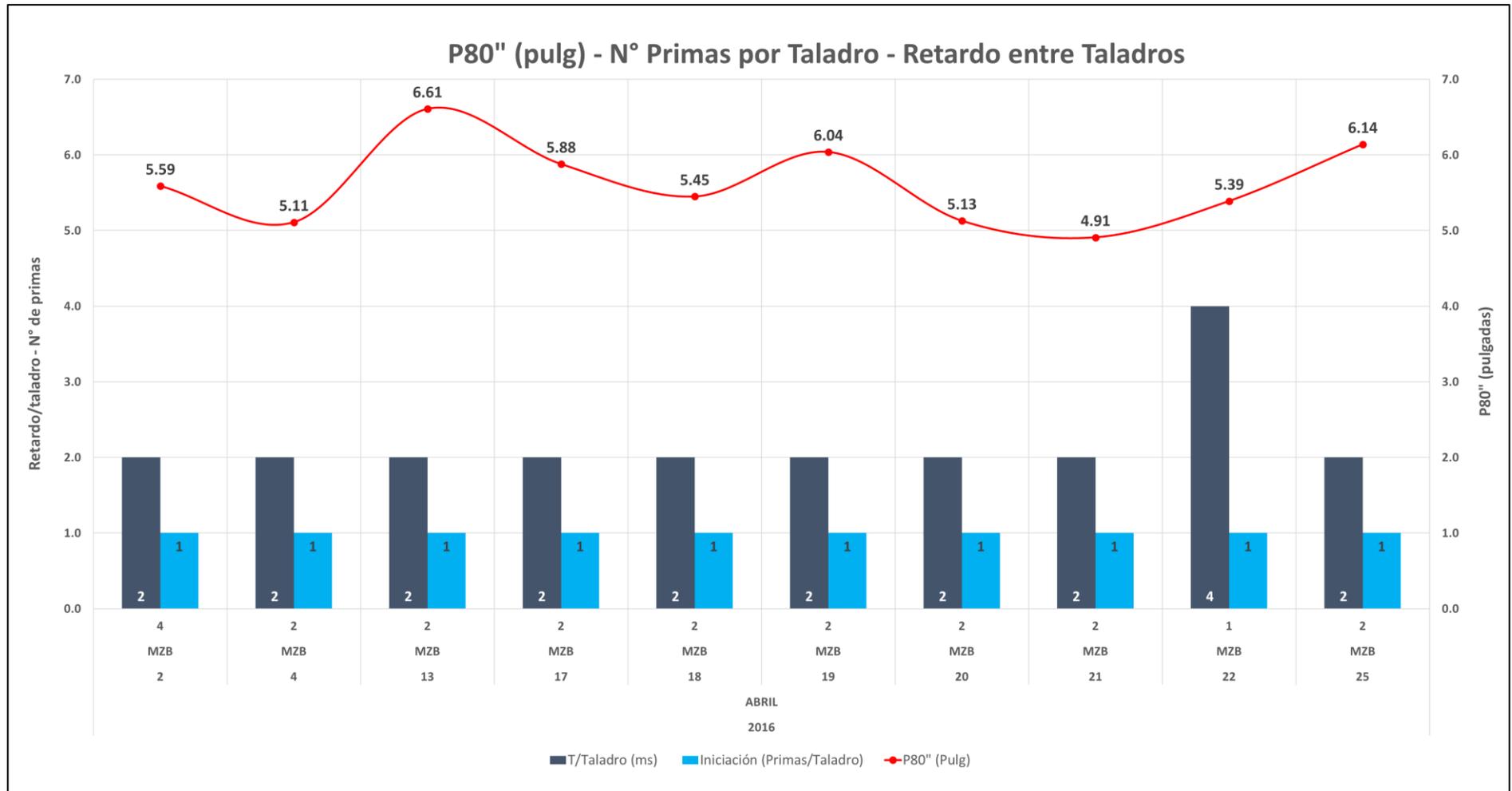


Figura 36: Retardo entre taladros – N° de primas – P80" – Voladuras con Iniciación simple  
 Fuente: Propia

### 3.1.2. Iniciación doble

Para el análisis de los resultados con el uso de la doble iniciación vamos a detallar, a modo de ejemplo, el diseño de carguío del día 26/04/2016 aplicado en el proyecto de voladura del nivel 3780 – 014 – 015. Cabe mencionar que en esta voladura se utilizó doble iniciación electrónica a modo de prueba.

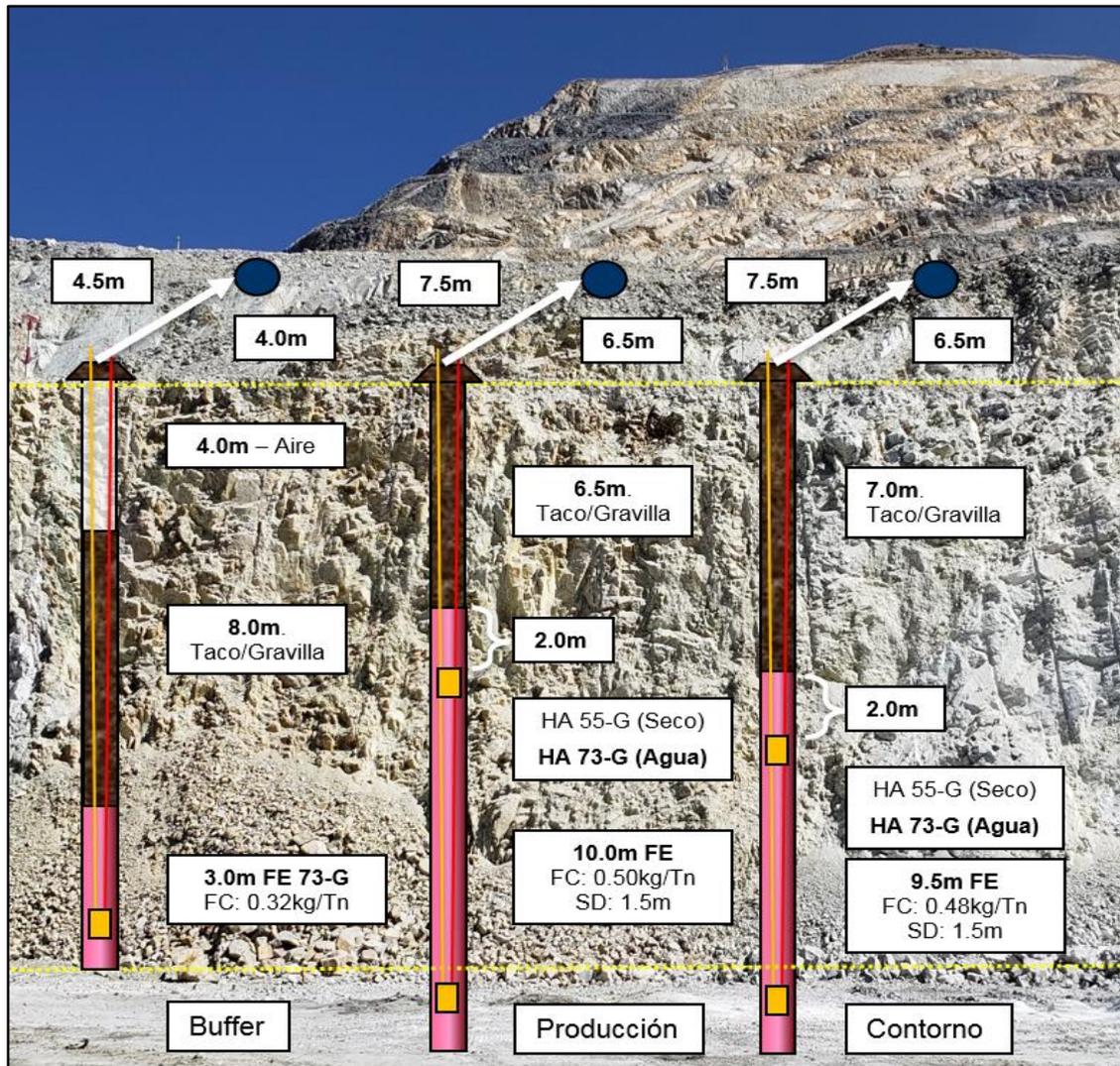


Figura 37: Diseño de malla y carguío – Iniciación doble  
Fuente: Propia

Este diseño, para taladros de producción (izquierda) tiene una relación de B x E (Burden por espaciamiento) de 6.5m x 7.5m, para un diámetro de perforación de 12 ¼. Se propone utilizar el explosivo de la serie “Fortis Extra™” dejando un taco de 6.5m y una longitud de carga de 10.0m. Para la

línea de taladros buffer se aplicará un diseño de B x E de 4.0m x 4.5m respectivamente. Todos los taladros de producción tienen una longitud de 15 metros y una sobre perforación de 1.5m.

Sobre la ubicación de las primas, se recomienda utilizar el iniciador de fondo a un metro del fondo del taladro y el segundo iniciador a 2 metros antes del taco; según sea la longitud de este. Por seguridad se utilizó un detonador electrónico "I-kon™" y un detonador no eléctrico Exel™; de este modo si existiera una pérdida de conectividad entre el detonador electrónico con el sistema de loggeo, se podría aplicar la técnica de back up al detonador no eléctrico.

#### **Datos de la voladura:**

El día 26/04/16 se realizó la voladura en el nivel 3780 – 014 – 015 disparando un total de 170 taladros en total, de los cuales 28 talados fueron primados y detonados aplicando la técnica de la doble iniciación; todos los taladros fueron disparados utilizando detonadores electrónicos "I-kon™" II. Se utilizaron tiempos de retardo entre taladros de 2ms y tiempos entre filas de 120ms.

Con el uso del software "SHOTPlus™" desarrollado por la empresa ORICA™ se logró realizar el diseño computacional de la voladura. A continuación, se muestra el plano de amarre y levantamiento de taladros.

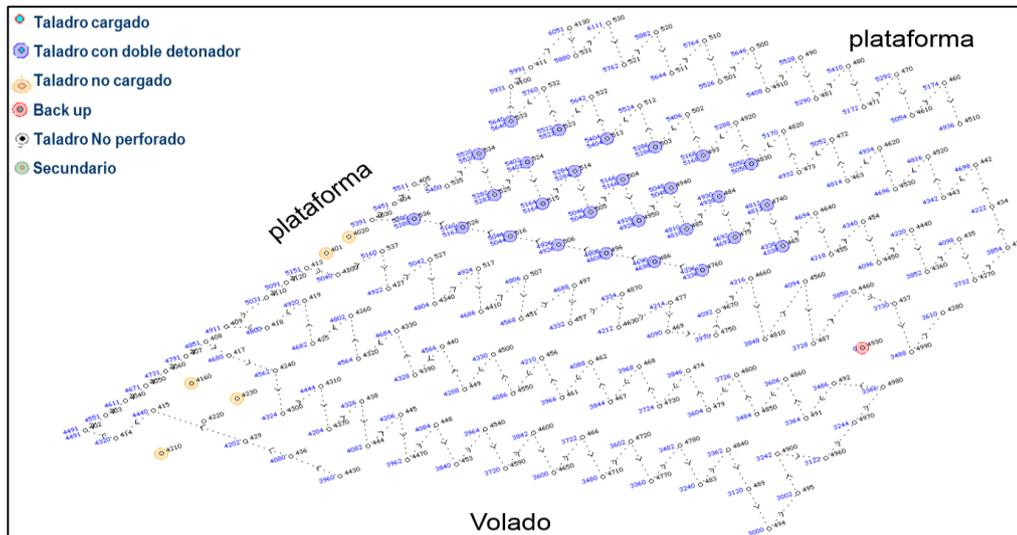


Figura 38: Plano de amarre y levantamiento de taladro  
Fuente: Orica, 2016

A continuación, se muestra el plano de voladura con las líneas de isotiempo (100ms).

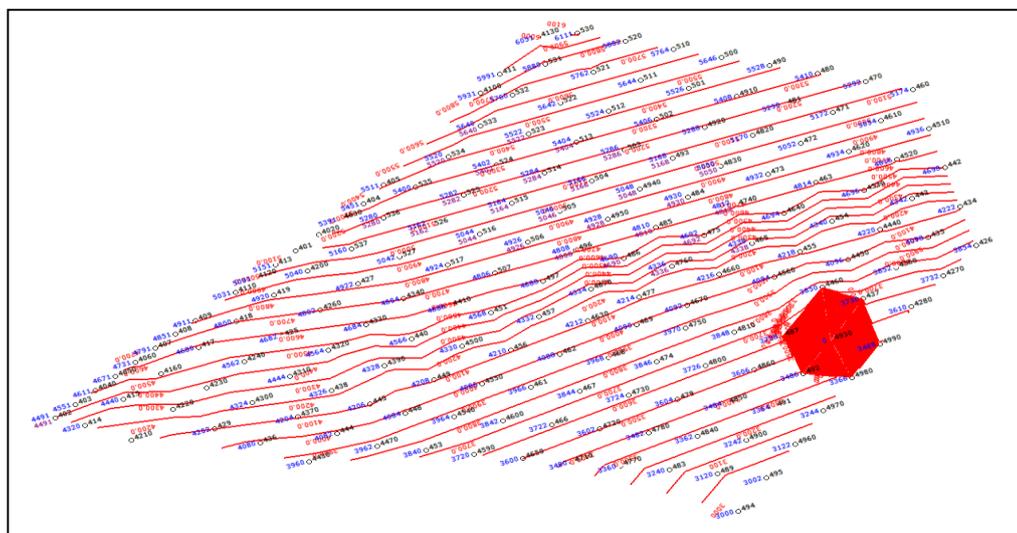


Figura 39: Líneas de isotiempo (100ms)  
Fuente: Orica, 2016

Con la ayuda del software computacional “SHOTPlus™” se puede predecir el movimiento que tendrá el material según la secuencia de salida de cada taladro, a continuación, se muestra la imagen referencial del desplazamiento del material.

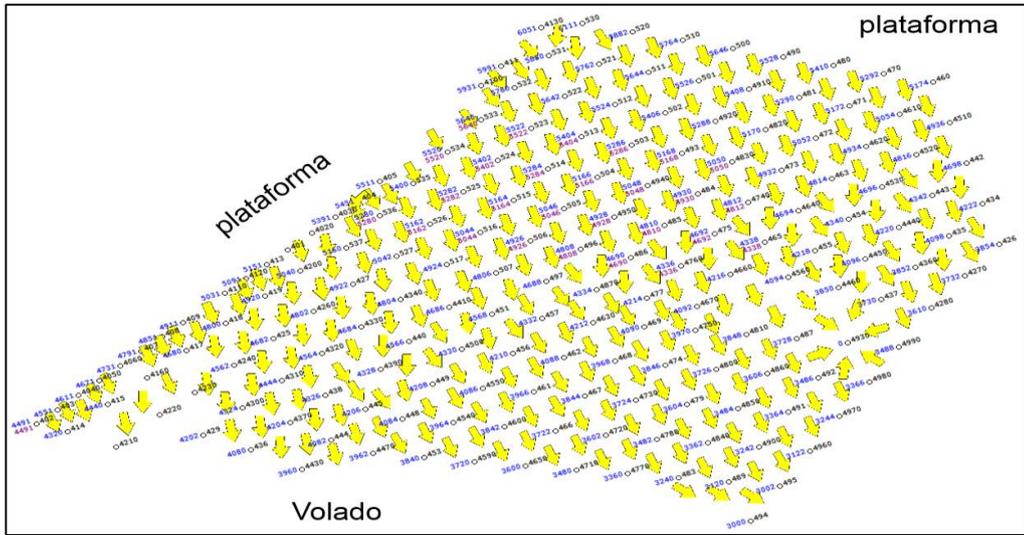


Figura 40: Desplazamiento de material

Fuente: Orica, 2016

En la figura N° 41 se detalla el “Burden Relief” asociado al disparo.

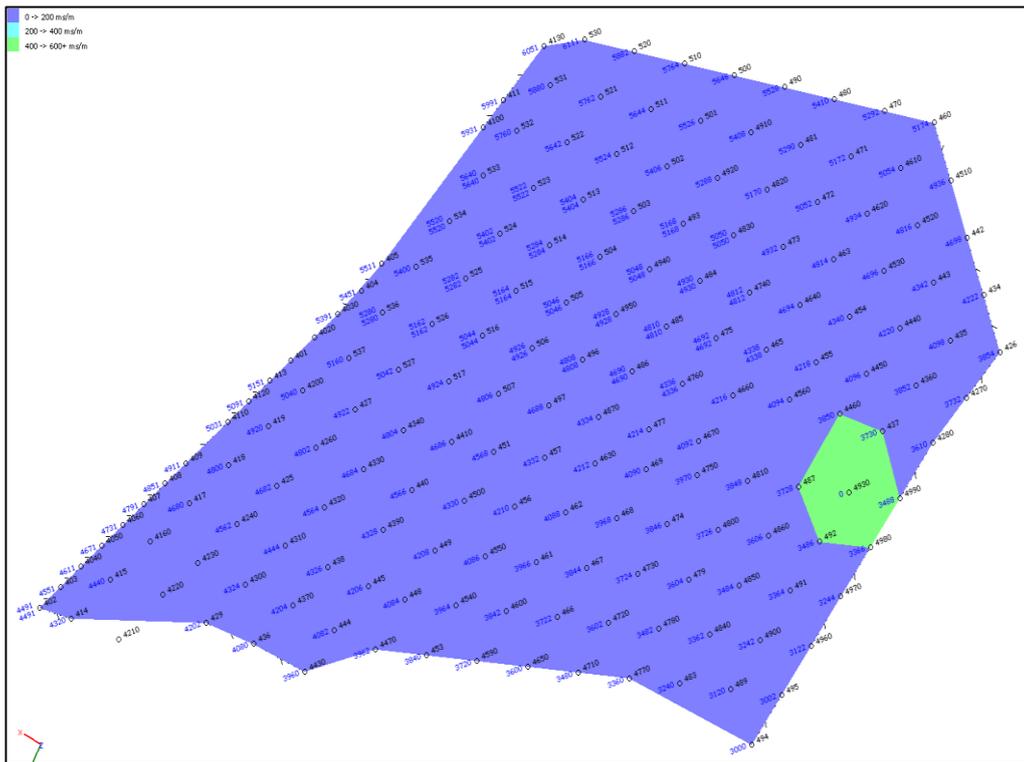


Figura 41: Burden Relief (600ms)

Fuente: Orica, 2016

En la siguiente figura muestra el proyecto 3780 – 014 – 015 previo al disparo.

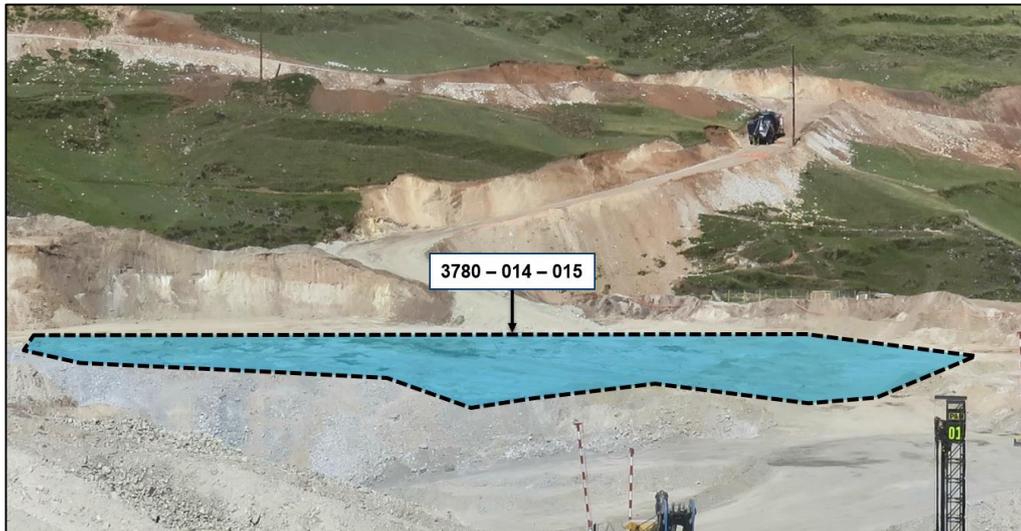


Figura 42: Área de pre - voladura  
Fuente: Propia

Como resultado de la voladura en el proyecto 3780 – 014 – 015 se obtuvo visualmente una buena fragmentación a nivel superficial.



Figura 43: Área post - voladura  
Fuente: Propia

## Análisis de los resultados de fragmentación y % de finos

El día 01/05/2016 se realizó el análisis de fragmentación manual del proyecto de voladura 3780 – 014 – 015 durante el minado de la zona de taladros que fueron primados aplicando la técnica de la doble iniciación (mineral), este análisis fue realizado con el uso de la herramienta computacional Powersieve™ desarrollada por Orica™.

Los primeros resultados de P80 y % de finos arrojan un resultado de 5.06” y 31.4% <1” respectivamente en una roca con RQD (designación de calidad de la roca) entre 75 – 90 (calidad de la masa de roca entre buena y/o muy buena).

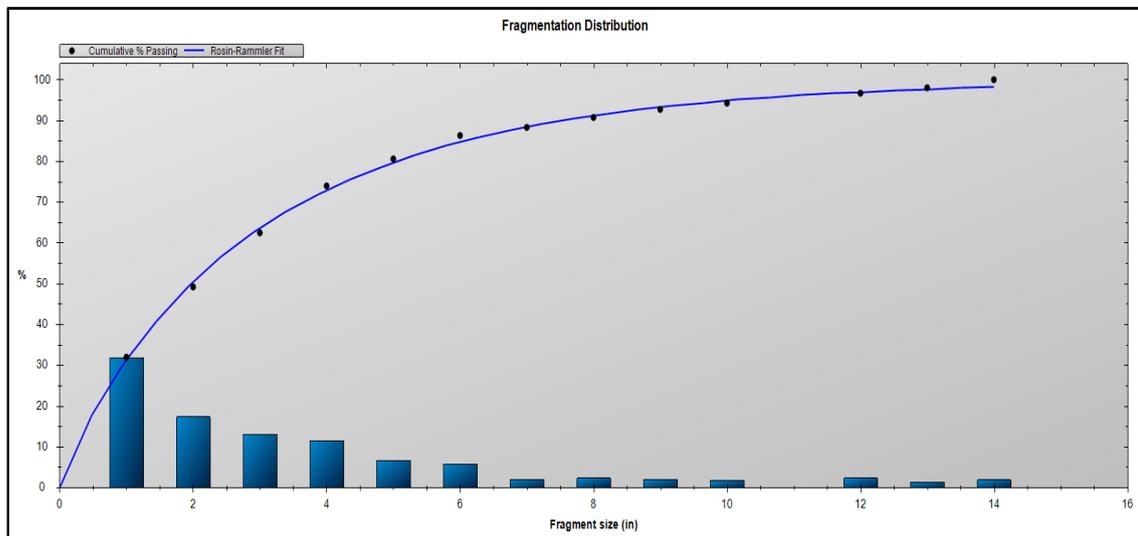


Figura 44: Distribución de la fragmentación  
Fuente: Orica, 2016

Se detallan también los resultados de modelos Rosin-Rammler y Swebrec analizados por el software PowerSieve™. Para este caso se utilizará para el registro de datos y trazabilidad con el modelo de Rosin-Rammler el cual valida de información del P80 – 5.06” y % de finos – 31.4%.

Rosin-Rammler Fit		Swebrec Fit	
Xc:	2.97 in	Xmax:	26.7 in
n:	0.895	X50:	2.02 in
80% Passing:	5.06 in	b:	3.16
% Fines:	31.4%	80% Passing:	5.06 in
		% Fines:	31.8%

Figura 45: Resultados Rosin-Rammler y Swebrec  
Fuente: Orica, 2016

El análisis manual para obtener los resultados de fragmentación se obtiene a través de fotografías tomadas del frente de minado, a continuación, se muestran algunas fotografías que fueron tomadas durante el minado del frente del proyecto 3780 – 014 – 015, las cuales sirvieron para la obtención de los resultados ya mencionados.



Figura 46: Frente de minado del proyecto 3780 – 014 – 015  
Fuente: Propia

Tabla 3: Iniciación doble

<b>Estadísticas de muestra única</b>				
	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Media de error estándar</b>
<b>Iniciación doble</b>	10	34,1900	4,66707	1,47586

Fuente: Propia

Tabla 4: Prueba de medias

<b>Prueba de muestra única</b>						
	<b>Valor de prueba = 30</b>					
	<b>t</b>	<b>gl</b>	<b>Sig. (bilateral)</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>95% de intervalo de confianza de la diferencia</b>	
					<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Iniciación doble</b>	2,839	9	,019	4,19000	,8514	7,5286

Fuente: Propia

En el caso de iniciación doble se tiene un valor promedio de 34.19%, con un nivel de dispersión de 1.47% de fragmentación de roca menor a 1". Acerca de la eficiencia de este, respecto de la base (30%), se puede establecer mediante la prueba de medias que la iniciación doble es superior a 30% con un valor del estadístico t Student calculado igual a 2.839, una significancia de 2% y una confianza estadística de 95%. Por tanto, se establece que la iniciación doble no ha sido eficiente.

En la figura N° 47 se detallan los resultados de los 10 disparos evaluados utilizando la iniciación doble durante el mes de mayo y junio del 2016.

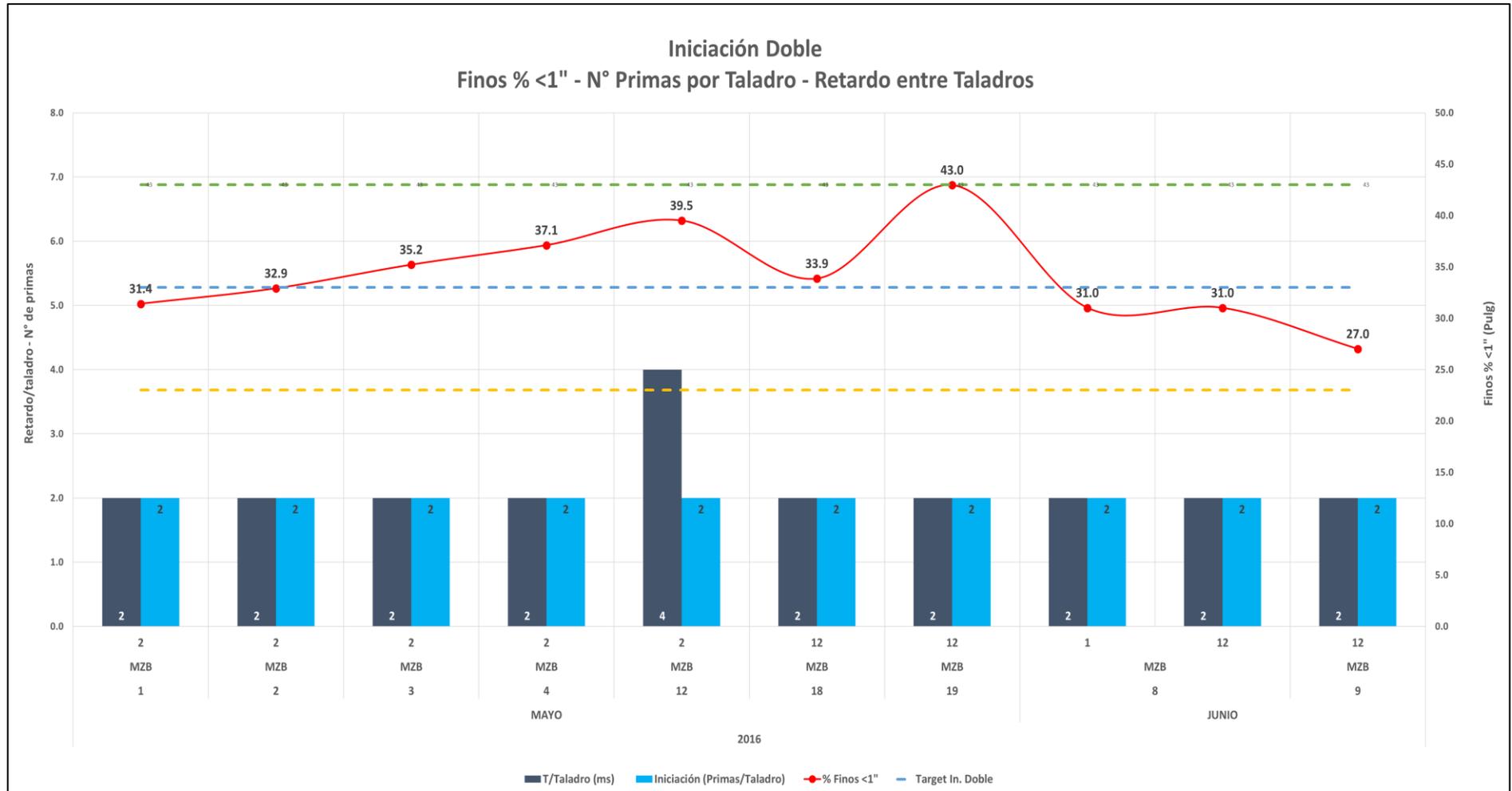


Figura 47: Resultados N° de primas – Finos % -1" – Iniciación doble  
Fuente: Propia

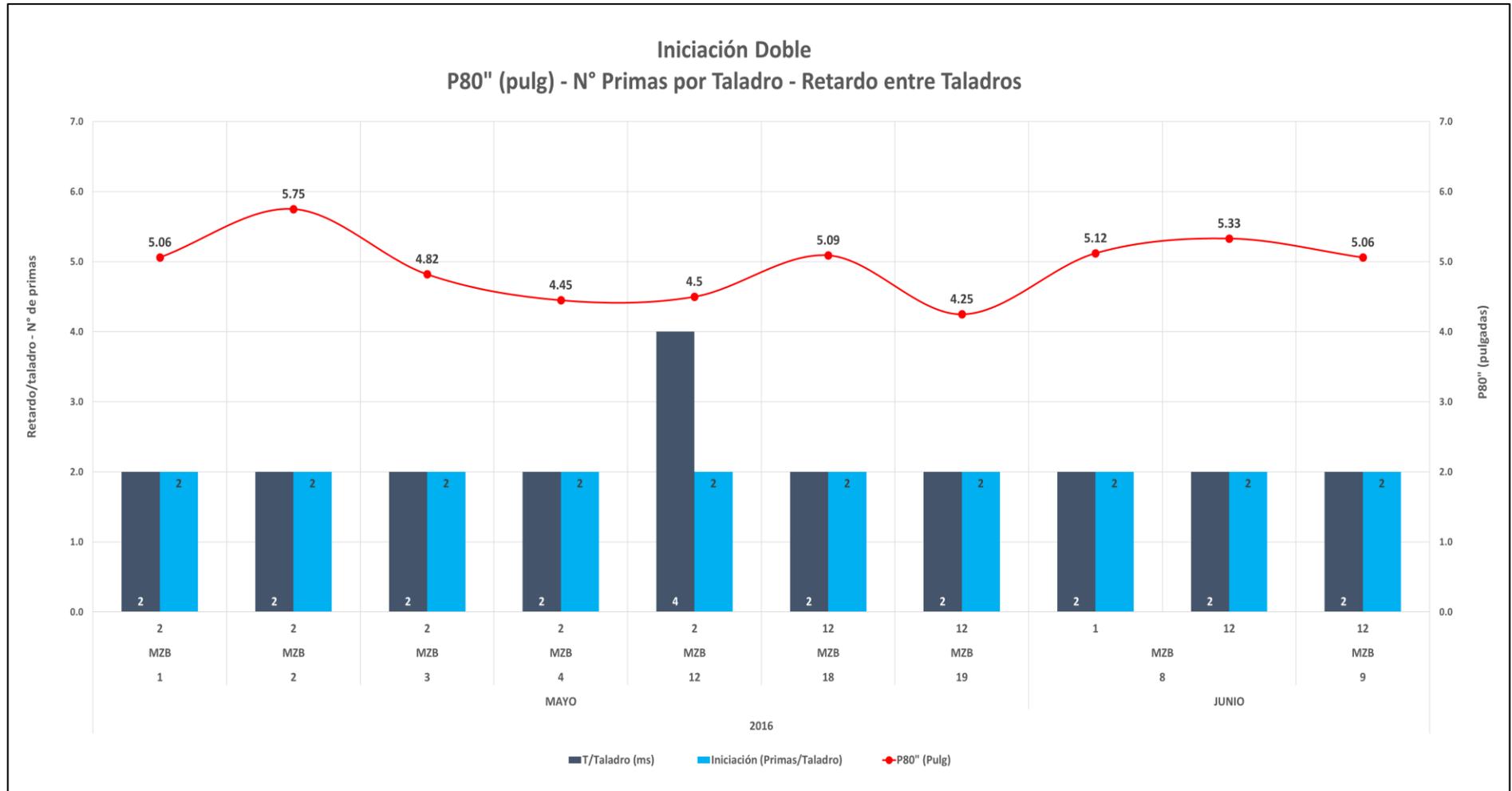


Figura 48: Retardo entre taladros – N° de primas – P80" – Voladuras con Iniciación doble  
Fuente: Propia

### 3.1.3. Iniciación triple

Para el análisis de los resultados con el uso de la triple iniciación iniciaremos mostrando, a modo de ejemplo, el diseño de carguío del día 09/05/2016 aplicado en el proyecto de voladura del nivel 3780 – 020. Cabe mencionar que en esta voladura se utilizó triple iniciación electrónica y se detonaron 69 taladros.

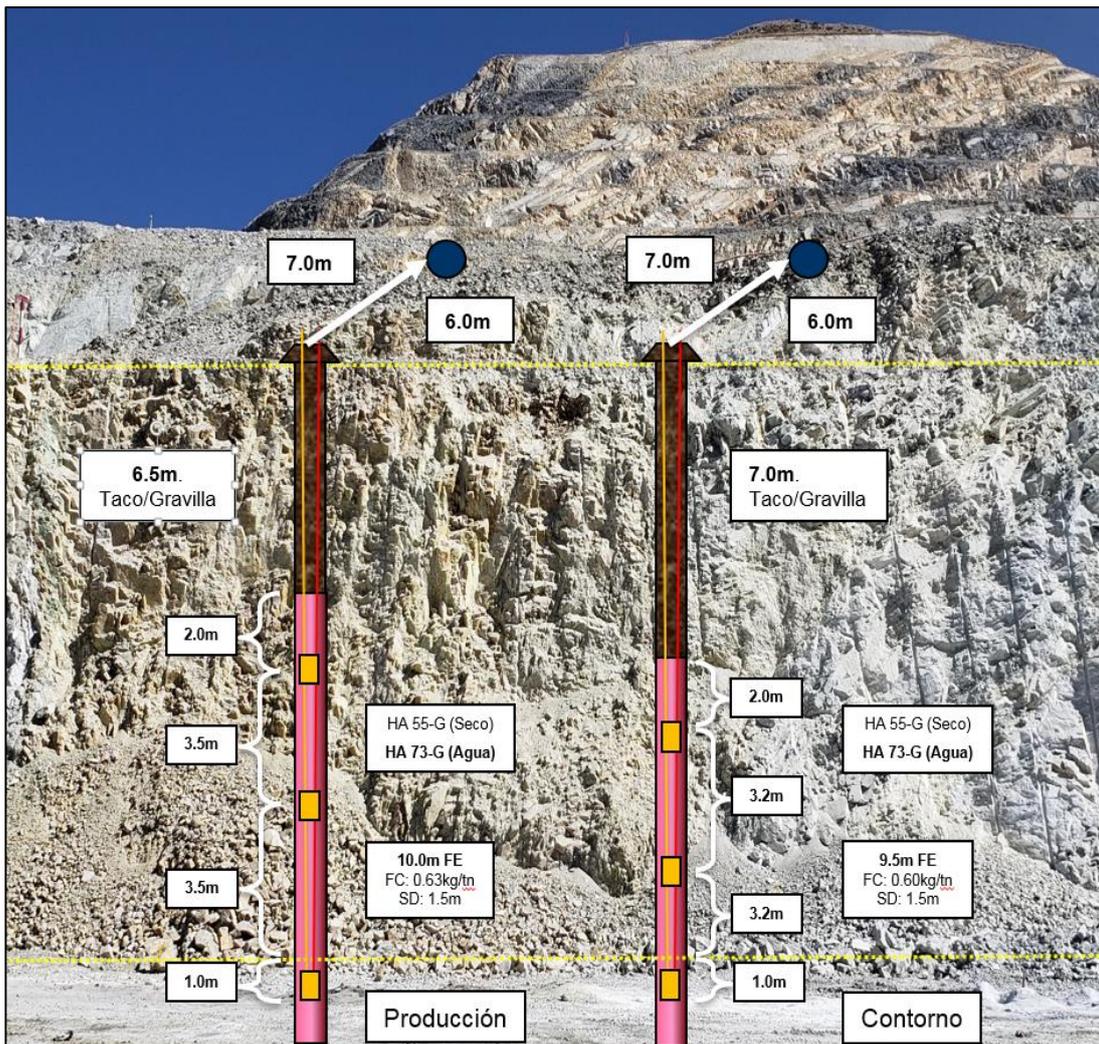


Figura 49: Diseño de malla y carguío – Iniciación triple

Fuente: Propia

Este diseño, para taladros de producción (izquierda) tiene una relación de B x E (Burden por espaciamiento) de 6.0m x 7.0m, para un diámetro de perforación de 12 ¼. Se propone utilizar el explosivo de la serie “Fortis Extra™” dejando un taco de 6.5m y una longitud de carga de 10.0m para taladros de producción y 7.0m de taco con una longitud de carga 9.5m.

Todos los taladros de producción tienen una longitud de 15 metros y una sobre perforación de 1.5m.

Sobre la ubicación de las primas, se recomienda utilizar el iniciador de fondo a un metro del fondo del taladro, el segundo iniciador a 3.5 metros desde la ubicación de la primera prima y la tercera prima a 0.5m del nivel del piso; según sea la longitud total de este. Por seguridad se utilizó un detonador electrónico “I-kon™” y un detonador no eléctrico Exel™; de este modo si existiera una pérdida de conectividad entre el detonador electrónico con el sistema de loggeo, se podría aplicar la técnica de back up al detonador no eléctrico.

### Datos de la voladura:

El día 09/05/16 se realizó la voladura en el nivel 3780 – 020-022 disparando un total de 69 taladros utilizando detonadores electrónicos “I-kon™” II. Se utilizaron tiempos de retardo entre taladros de 2ms y tiempos entre filas de 120ms.

Con el uso del software “SHOTPlus™” desarrollado por la empresa ORICA™ se logró realizar el diseño computacional de la voladura. A continuación, se muestra el plano de amarre y levantamiento de taladros.

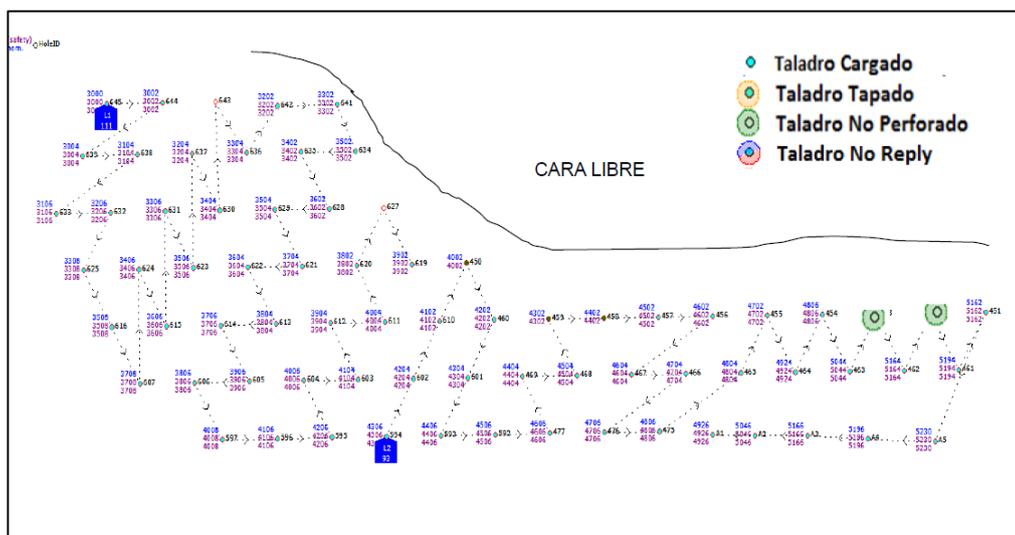


Figura 50: Plano de amarre y levantamiento de taladro  
Fuente: Orica, 2016

A continuación, se muestra el plano de voladura con las líneas de isotiempo (60ms).

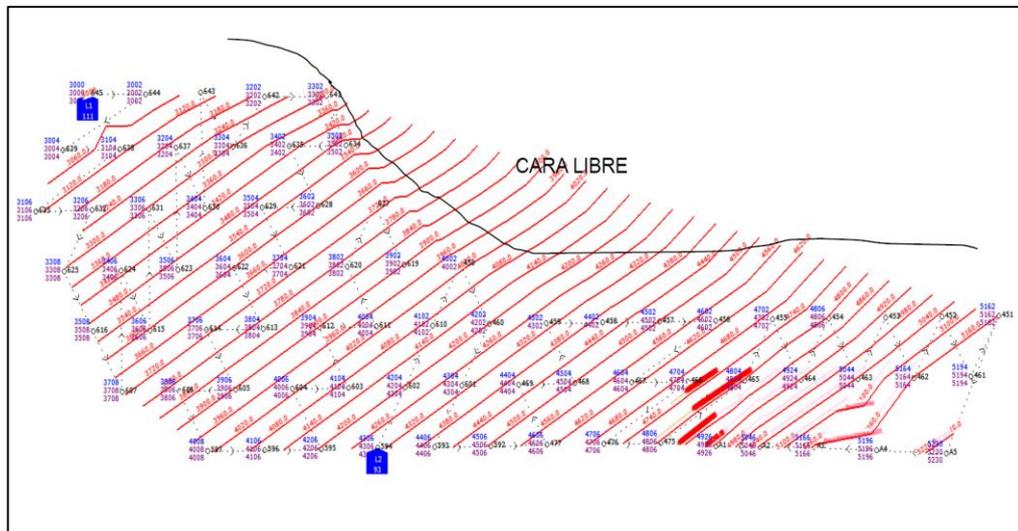


Figura 51: Líneas de isotiempo (60ms)  
Fuente: Orica, 2016

Con la ayuda del software computacional “SHOTPlus™” se puede predecir el movimiento que tendrá el material según la secuencia de salida de cada taladro, a continuación, se muestra la imagen referencial del desplazamiento del material.

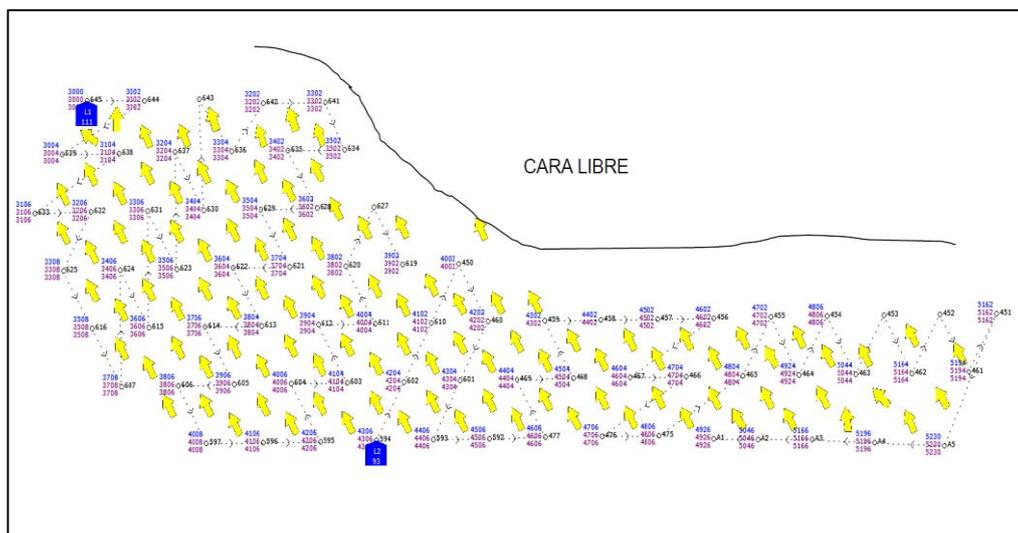


Figura 52: Desplazamiento de material  
Fuente: Orica, 2016

En la figura N° 53 se detalla el “Burden Relief” asociado al disparo.

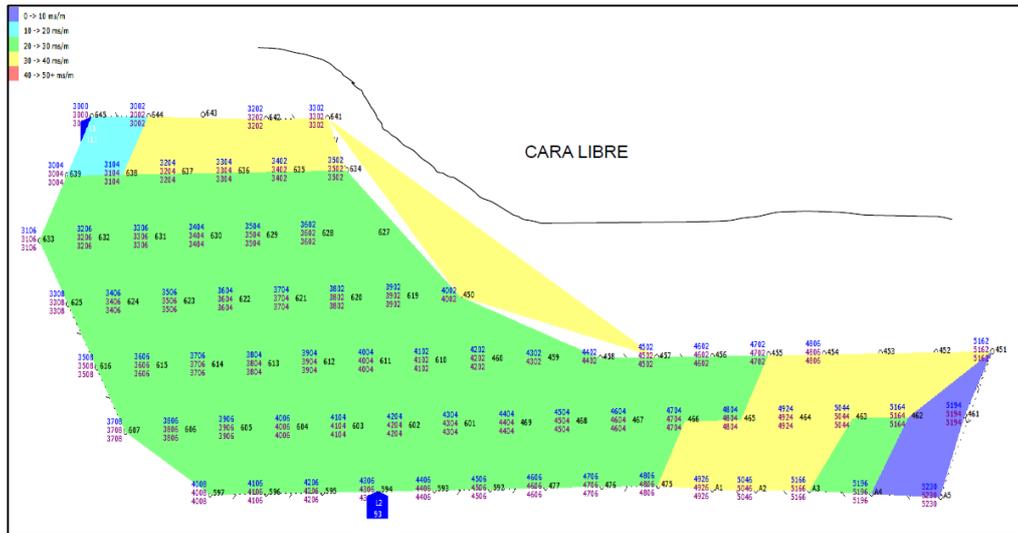


Figura 53: Burden Relief (50ms)  
Fuente: Orica, 2016

En la siguiente figura muestra el proyecto 3780 – 020 previo al disparo.



Figura 54: Área pre - voladura  
Fuente: Propia

Como resultado de la voladura en el proyecto 3780 – 020 se obtuvo visualmente una buena fragmentación a nivel superficial.



Figura 55: Área post – voladura  
Fuente: Propia

## Análisis de los resultados de fragmentación y % de finos

El día 10/05/2016 se realizó el análisis de fragmentación manual del proyecto de voladura 3780 – 020 durante el minado de la zona de taladros que fueron primados aplicando la técnica de la triple iniciación (mineral), este análisis fue realizado con el uso de la herramienta computacional PowerSieve™ desarrollada por Orica™.

Los primeros resultados de P80 y % de finos arrojan un resultado de 4.68” y 41.9% <1” respectivamente en una roca con RQD (designación de calidad de la roca) entre 50 – 75 (calidad de la masa de roca mediana o regular).

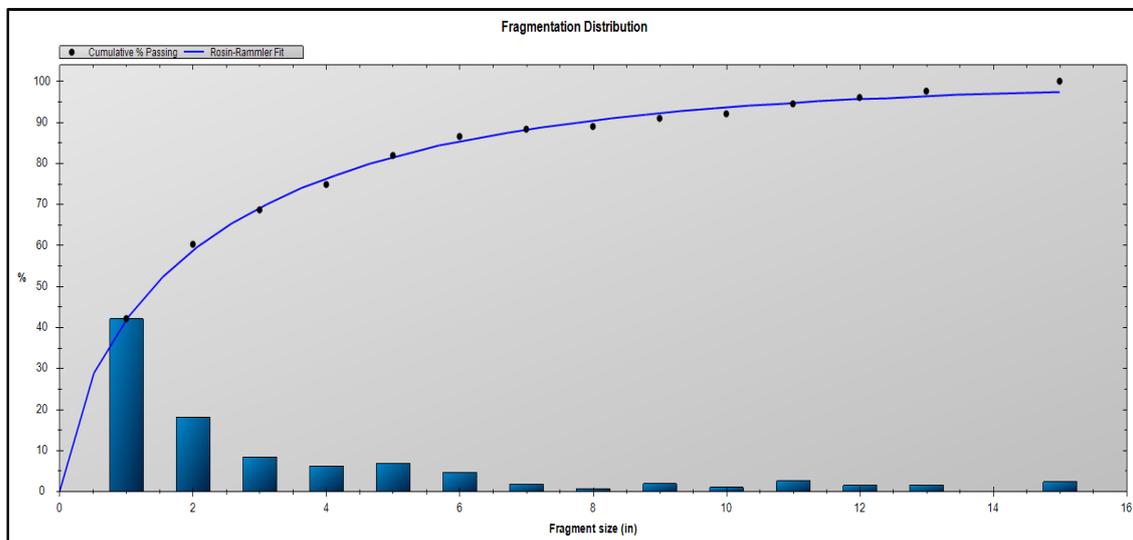


Figura 56: Distribución de la fragmentación  
Fuente: Orica, 2016

Se detallan también los resultados de modelos Rosin-Rammler y Swebrec analizados por el software PowerSieve™. Para este caso se utilizará para el registro de datos y trazabilidad con el modelo de Rosin-Rammler el cual valida de información del P80 – 4.68” y % de finos – 41.9%. En modelo Swebrec arroja P80 – 4.65” y % de finos 42.3%.

Rosin-Rammler Fit		Swebrec Fit	
Xc:	2.38 in	Xmax:	74.0 in
n:	0.704	X50:	1.40 in
80% Passing:	4.68 in	b:	3.84
% Fines:	41.9%	80% Passing:	4.65 in
		% Fines:	42.3%

Figura 57: Resultados Rosin-Rammler y Swebrec  
Fuente: Orica, 2016

El análisis manual para obtener los resultados de fragmentación se obtiene a través de fotografías tomadas del frente de minado, a continuación, se muestran algunas fotografías que fueron tomadas durante el minado del frente del proyecto 3780 – 020 las cuales sirvieron para la obtención de los resultados ya mencionados.

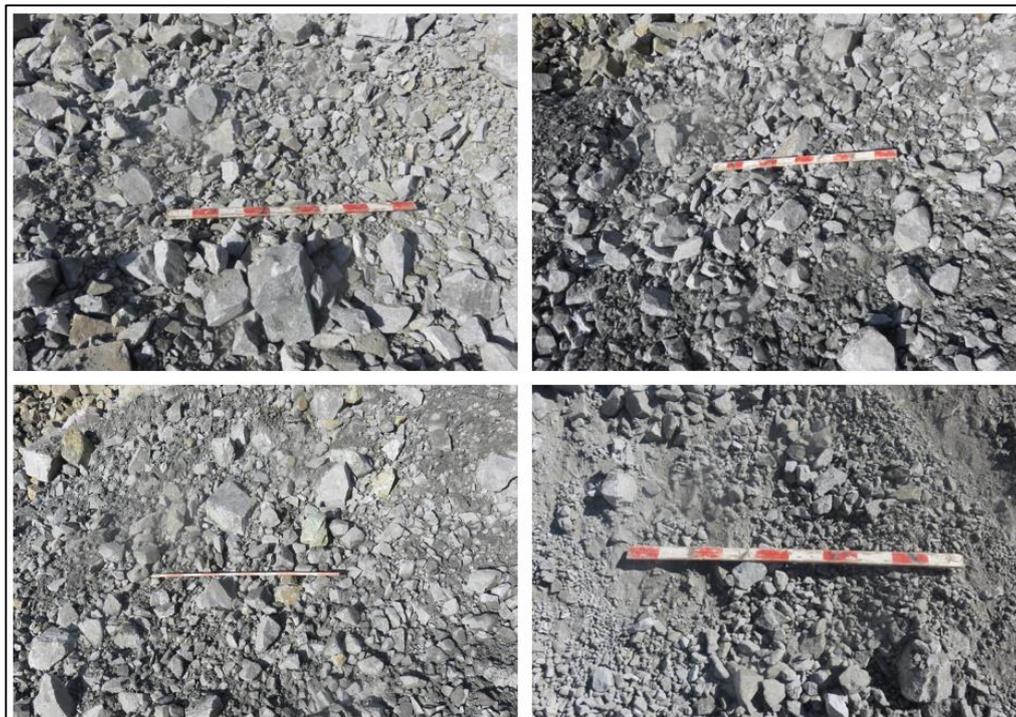


Figura 58: Frente de minado del proyecto 3780 - 020  
Fuente: Propia.

Tabla 5: Iniciación triple

<b>Estadísticas de muestra única</b>				
	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Media de error estándar</b>
<b>Iniciación triple</b>	10	42,3980	2,90487	,91860

Fuente: Propia

Tabla 6: Prueba de medias

<b>Prueba de muestra única</b>						
	<b>Valor de prueba = 30</b>					
	<b>t</b>	<b>gl</b>	<b>Sig. (bilateral)</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>95% de intervalo de confianza de la diferencia</b>	
					<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Iniciación triple</b>	13,497	9	,000	12,39800	10,3200	14,4760

Fuente: Propia

Tabla 7: Prueba de medias

<b>Prueba de muestra única</b>						
	<b>Valor de prueba = 40</b>					
	<b>t</b>	<b>gl</b>	<b>Sig. (bilateral)</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>95% de intervalo de confianza de la diferencia</b>	
					<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Iniciación triple</b>	2,610	9	,028	2,39800	,3200	4,4760

Fuente: Propia

Para la iniciación triple se tiene un valor promedio de 42.39%, con un nivel de dispersión de 0.91% de fragmentación de roca por debajo a 1", acerca de la eficiencia de este, respecto de la base (30%), se puede establecer mediante la prueba de medias que la iniciación triple es superior a 30% con un valor del estadístico t Student calculado igual a 13,497, una significancia de 0% y una confianza estadística de 95%. De la misma manera, respecto de la base (40%), se puede establecer mediante la prueba de medias que la iniciación triple es superior a 40% con un valor del estadístico t Student calculado igual a 2.610, una significancia de 2.8% y una confianza

estadística de 95%. Por tanto, se establece que la iniciación triple ha sido eficiente.

En la figura N° 59 se detallan los resultados de los 10 disparos evaluados utilizando la iniciación triple.

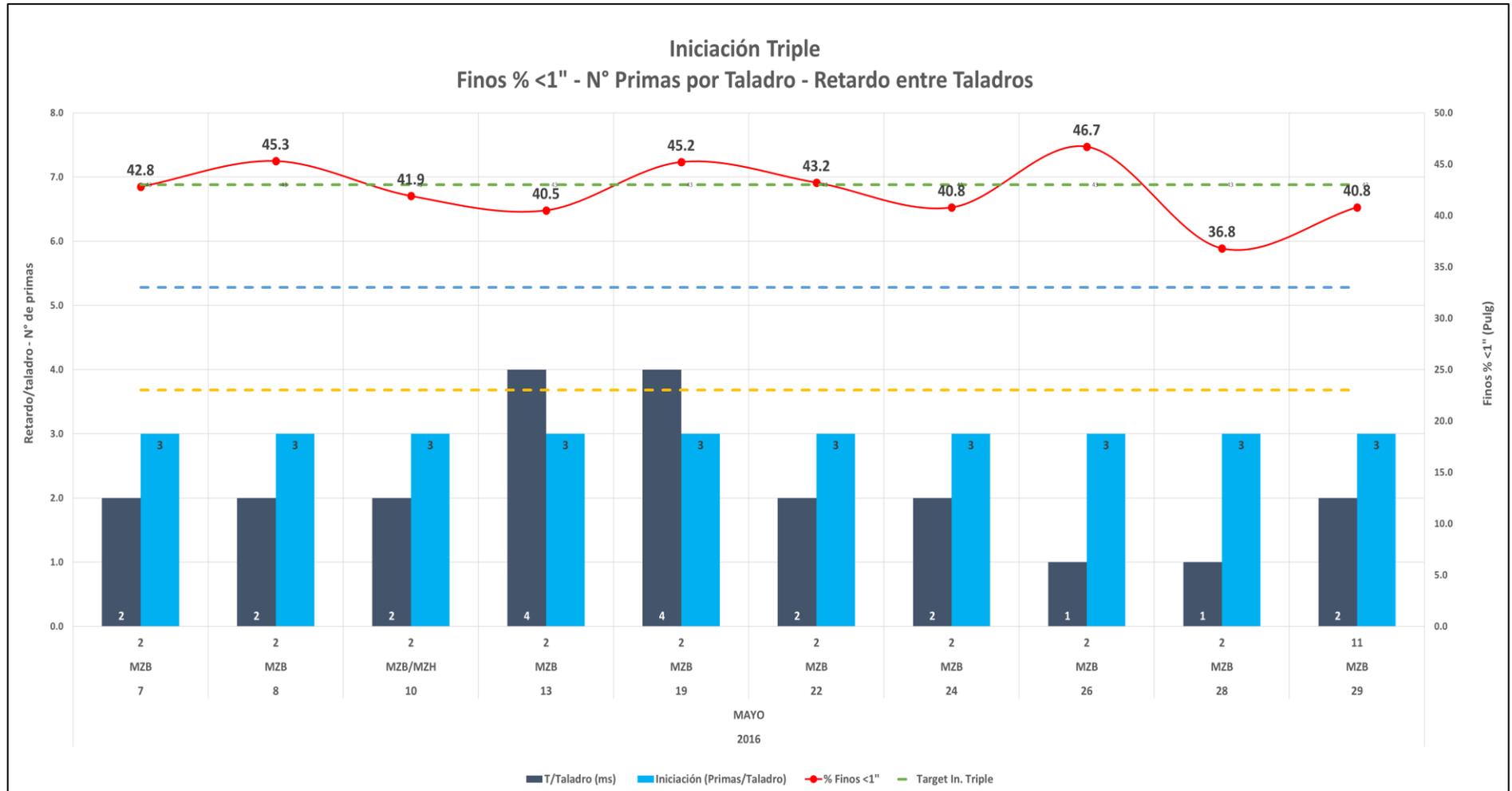


Figura 59: Resultados N° de primas – Finos % -1" – Iniciación triple  
 Fuente: Propia

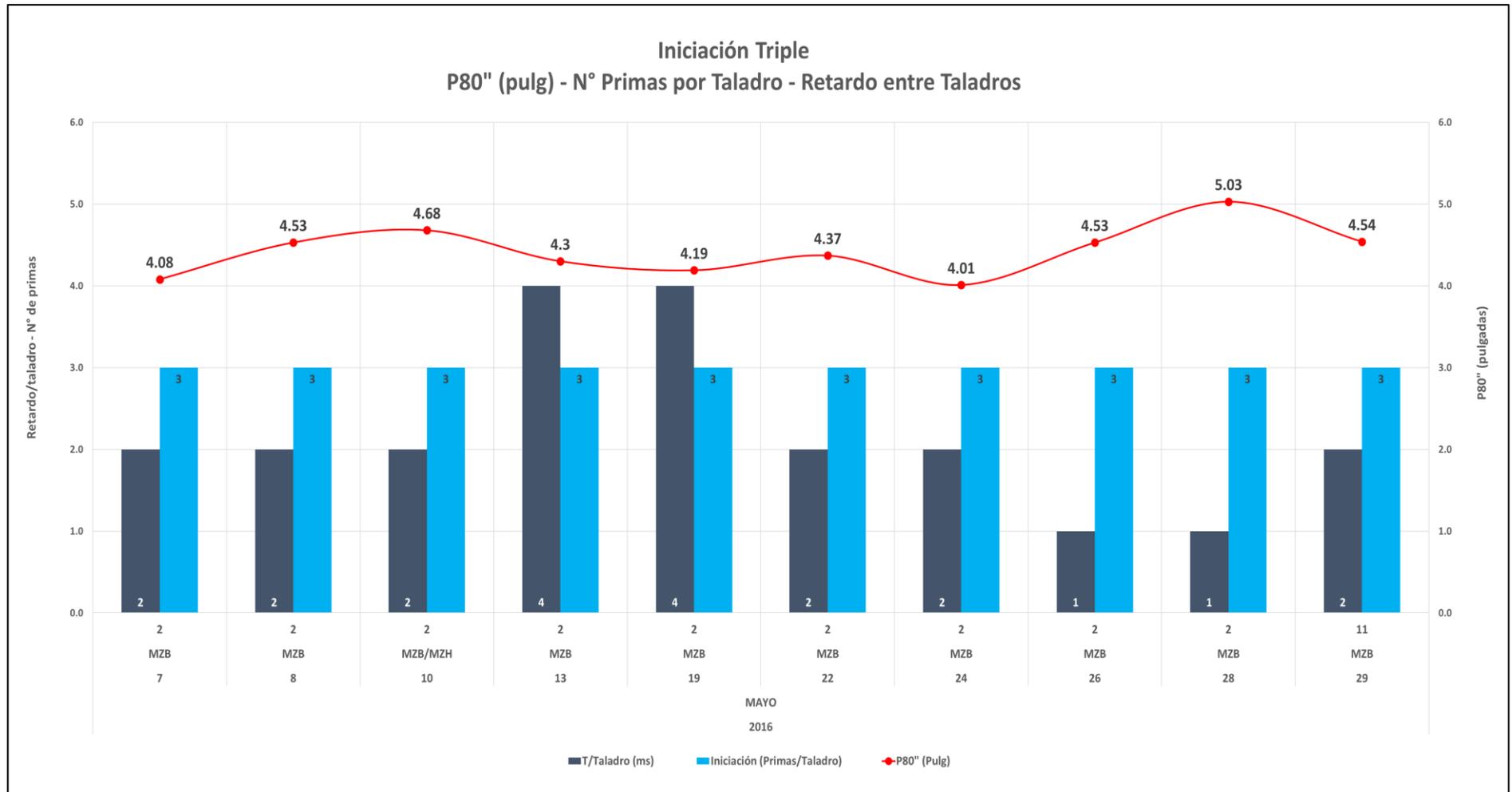


Figura 60: Retardo entre taladros – N° de primas – P80" – Voladuras con Iniciación triple  
Fuente: Propia

### 3.1.4. Resultados en función a la geomecánica

Durante el desarrollo de las pruebas se tuvieron distintos escenarios en función al tipo de macizo rocoso a volar. A continuación un breve resumen de las unidades litológicas más comunes en el yacimiento de estudio.

Código	Nomenclatura	Litología	Descripción Litología
1	MZB	Monzonita biotítica	Intrusivo que forma sk
	MBF	Monzonita biotítica fina	Intrusivo que forma sk
	MZH	Monzonita horblendica	Intrusivo que no mineraliza
2	SK	Exoskarn	Exoskarn (granate + magnetita + epidota + piroxeno)
3	MBL	Marmol	Sedimentario (caliza + marmol + horfles)
	MBC	Marmol	Sedimentario (marmol con calcosilicatos)
	BX	Brecha de contacto	Brecha (Magmatica + freatomagmatica + tectonica)
4	MZM	Monzonita máfica	Intrusivo que forma sk
	MZQ	Monzonita quarcifera	Diques Estériles
5	ENDO	Endo skarn	Endoskarn (Granate+epidota+plagioclasa)

Figura 61: Principales unidades litológicas – Las Bambas

Fuente: Propia

Es importante mencionar uno de los criterios utilizados por la minera para clasificar su macizo rocoso, el **RQD** o en inglés “Rock Quality Designation”, comprende el caculo en base a la cantidad o número de fisuras en un metro lineal, las cuales se determinan realizando un levantamiento litológico/estructural en el área de influencia u operativa dentro de una operación minera. (25)

%	RQD
0 – 25	MUY MALA
25 – 50	MALA
50 – 75	REGULAR
75 – 90	BUENA
90 – 100	MUY BUENA

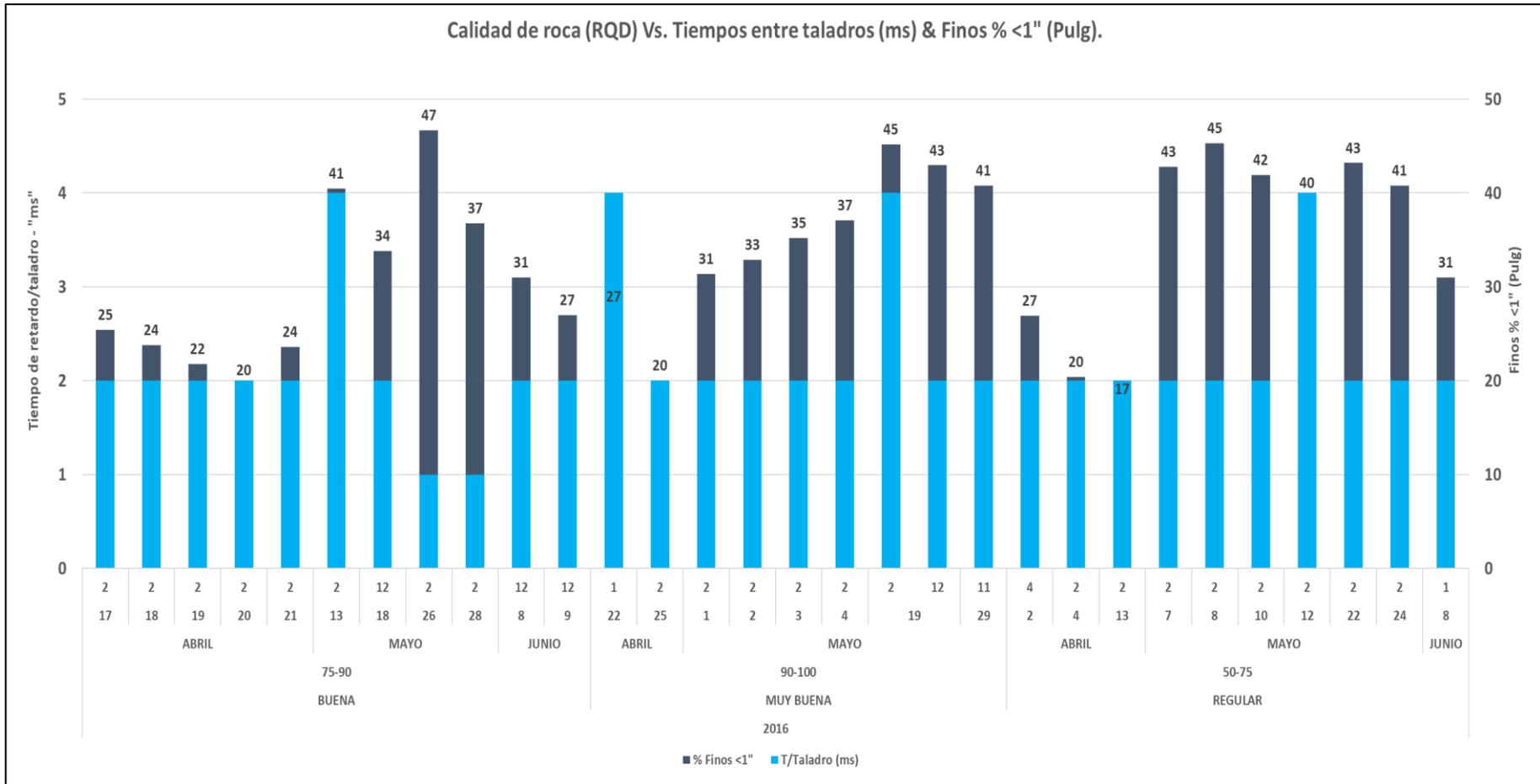


Figura 62: Comparativa entre RQD vs. T/Taladros & Finos %<1" (Pulg).  
Fuente: Propia

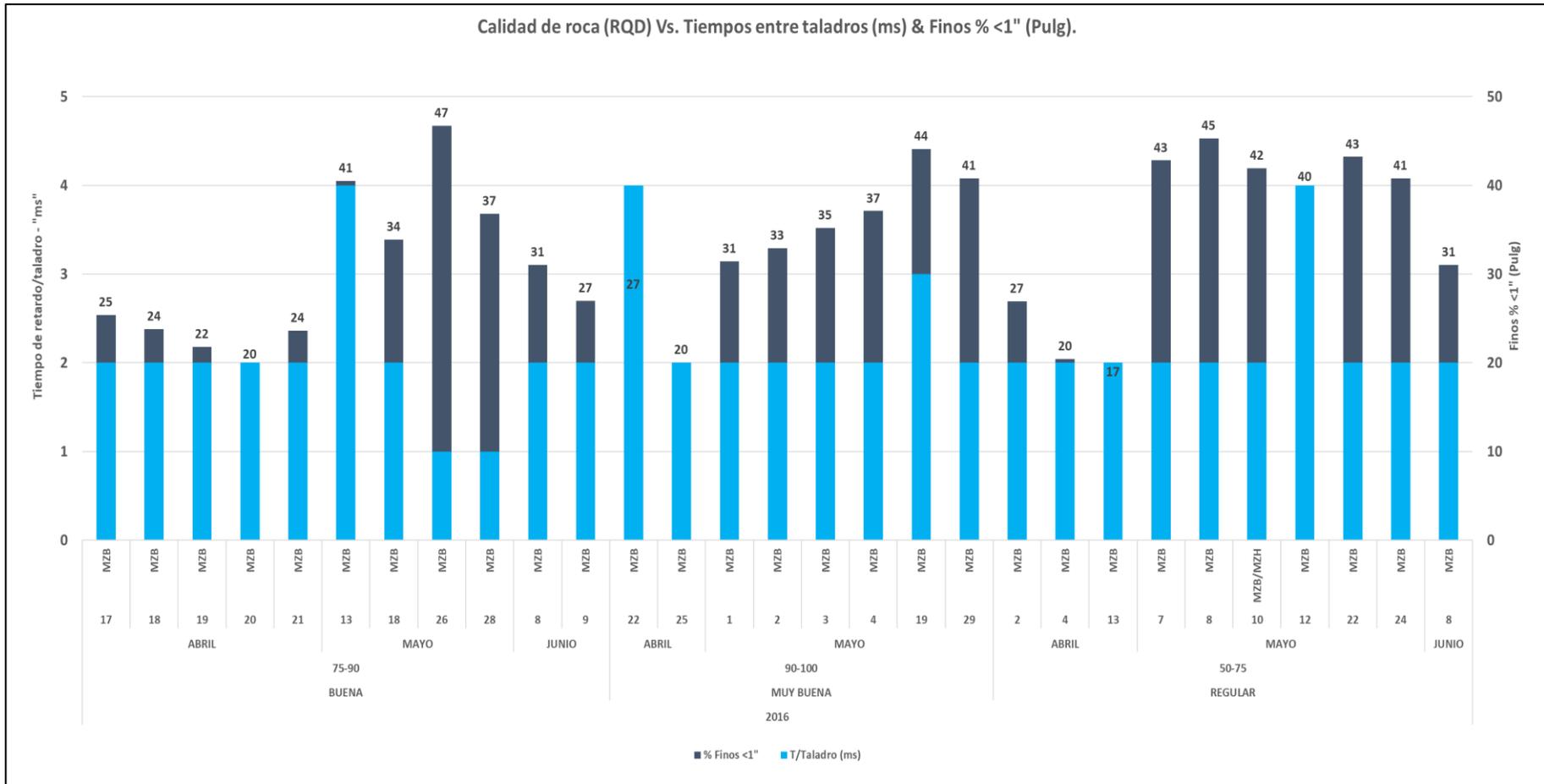


Figura 63: Comparativa entre RQD & Litología Vs. T/Taladros & Finos %<1" (Pulg).  
Fuente: Propia

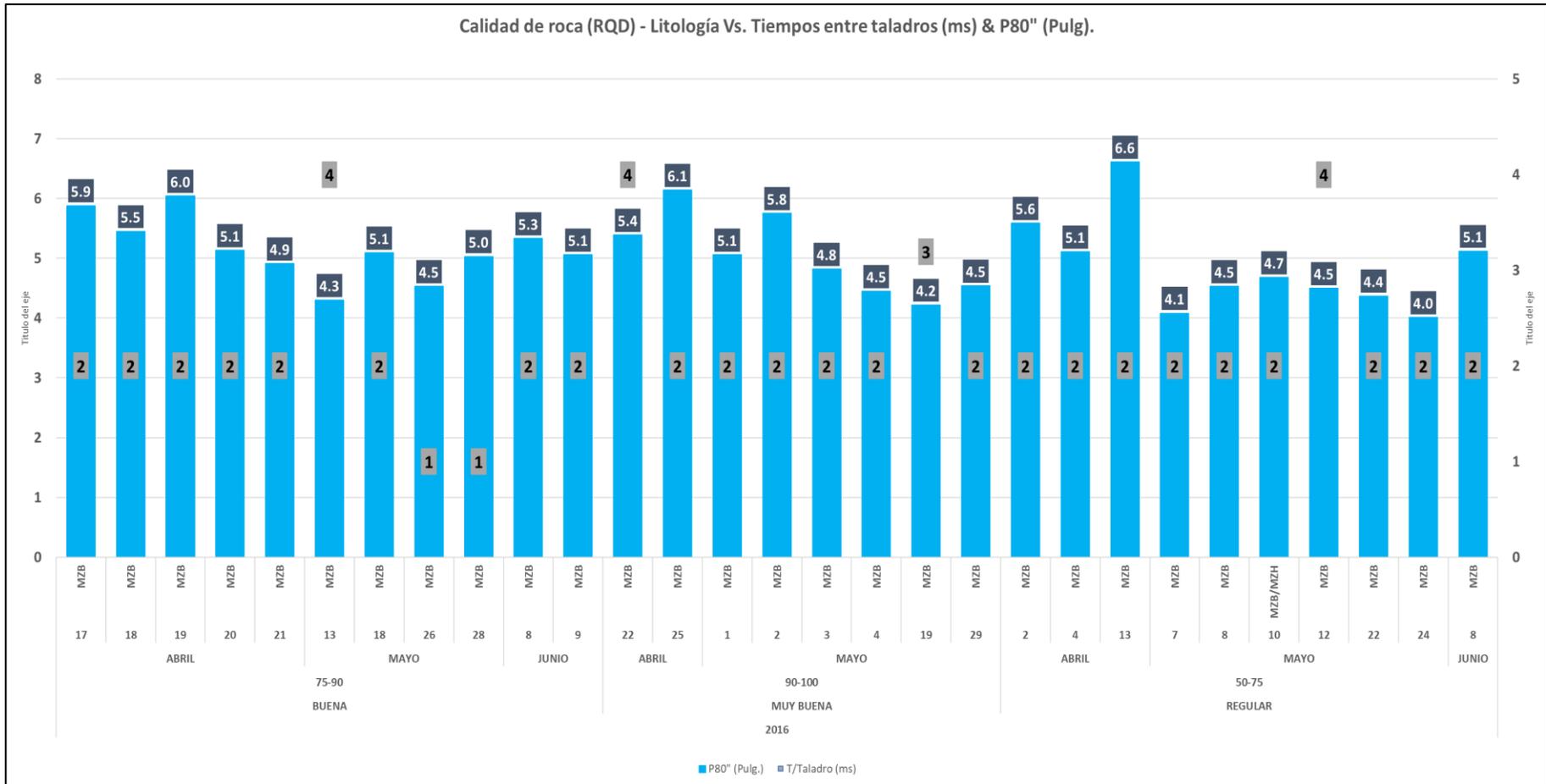


Figura 64: Comparativa entre RQD & Litología Vs. T/Taladros & P80" (Pulg.).  
Fuente: Propia

### 3.2. Análisis comparativo

Tabla 8: Prueba comparativa: Simple, doble y triple

Prueba de muestras emparejadas								
	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Simple -Doble	-11,56	6,22147	1,96740	-16,019	-7,11843	-5,880	9	,000
Simple - Triple	-19,77	4,84254	1,53135	-23,241	-16,3128	-12,91	9	,000
Doble - Triple	-8,208	5,39185	1,70505	-12,065	-4,35090	-4,814	9	,001

Fuente: Propia

La prueba t – Student realizada sobre los 3 pares de combinaciones en los sistemas arroja una diferencia sustancial con respecto a los otros dos sistemas de voladura, por otro lado, el sistema doble prevalece sobre el sistema simple. Esto se puede establecer dado que los niveles de t – Student de los pares Simple vs Doble, Doble vs Triple y Simple vs Triple son respectivamente -5.88, -4.814 y -12.91, todos superiores a 1.96 (en valor absoluto) y contrastando la idea de significancia estadística, mientras que por el lado del signo, todas establecen un signo negativo, por lo cual se puede determinar que en todos los casos el primer caso es inferior al segundo, dejando claro ello en la diferencia de medias establecida entre estas (Simple vs Doble, Doble vs Triple y Simple vs Triple tienen una diferencia de medias de -11.56, -8.208 y -19.77 respectivamente. Con ello queda afirmado la relación de jerarquía entre el sistema triple, doble y simple.

Tabla 9: Test de Duncan

Porcentaje de finos <1”				
Iniciación	N	Sub conjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
<b>Simple</b>	10	22.62		
<b>Doble</b>	10		34.19	
<b>Triple</b>	10			42.3980
<b>Sig.</b>		1.000	1.000	1.000

Fuente: Propia

Por el lado del test de Duncan, se puede reafirmar lo dicho líneas arriba, puesto que con una significancia de 5%, los indicadores posicionan en primera instancia a los tres sistemas en 3 niveles distintos, mientras que el nivel más alto (3) lo ocupa el sistema triple, el segundo (2) el doble y el tercero (1) el simple, corroborando la información de la tabla anterior.

Con ello, todas las hipótesis se han cumplido de manera afirmativa y con un alto nivel de significancia estadística.

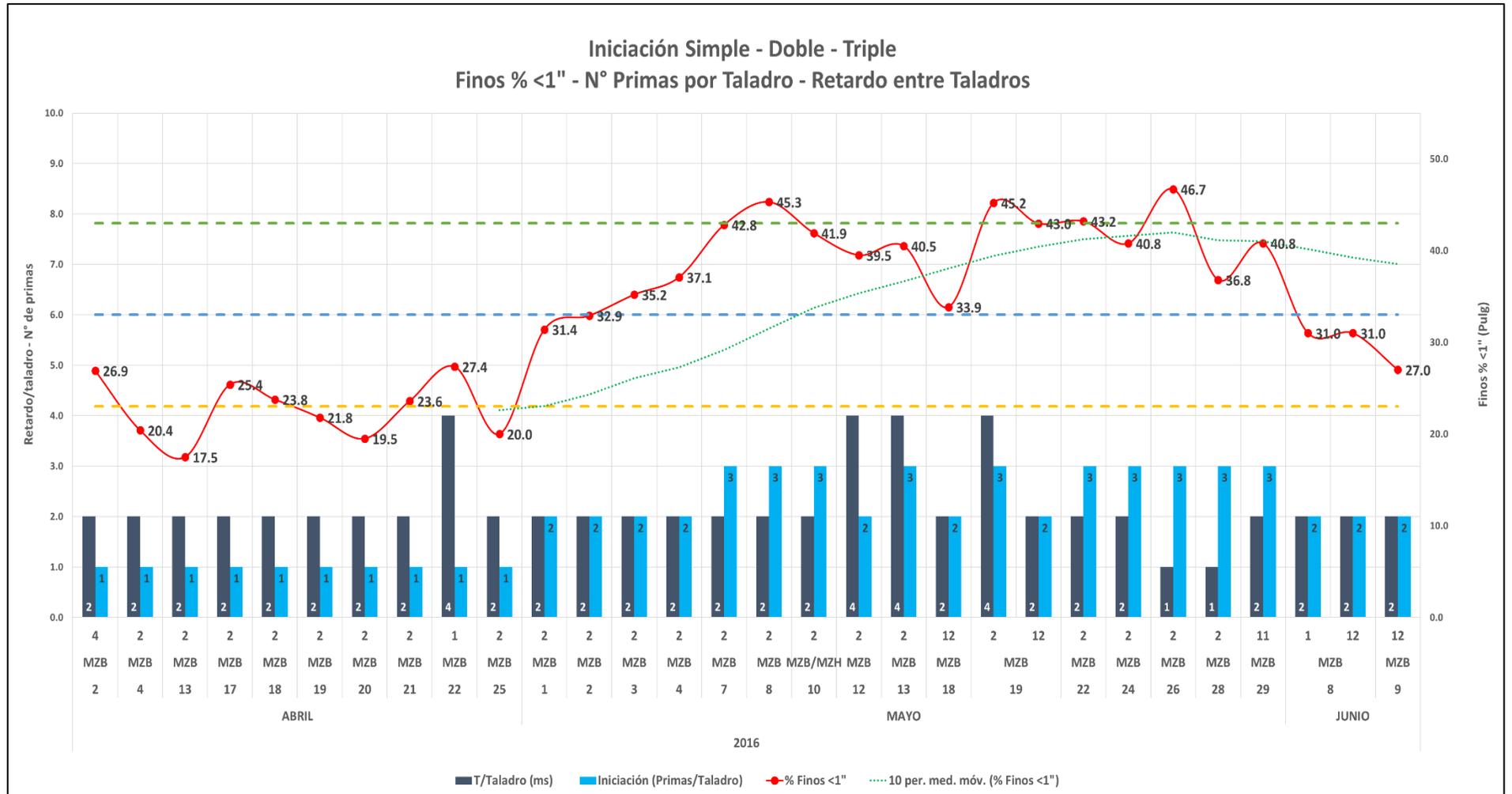


Figura 65: Consolidado – Finos% - N° de primas – Retardo entre taladros  
Fuente: Propia

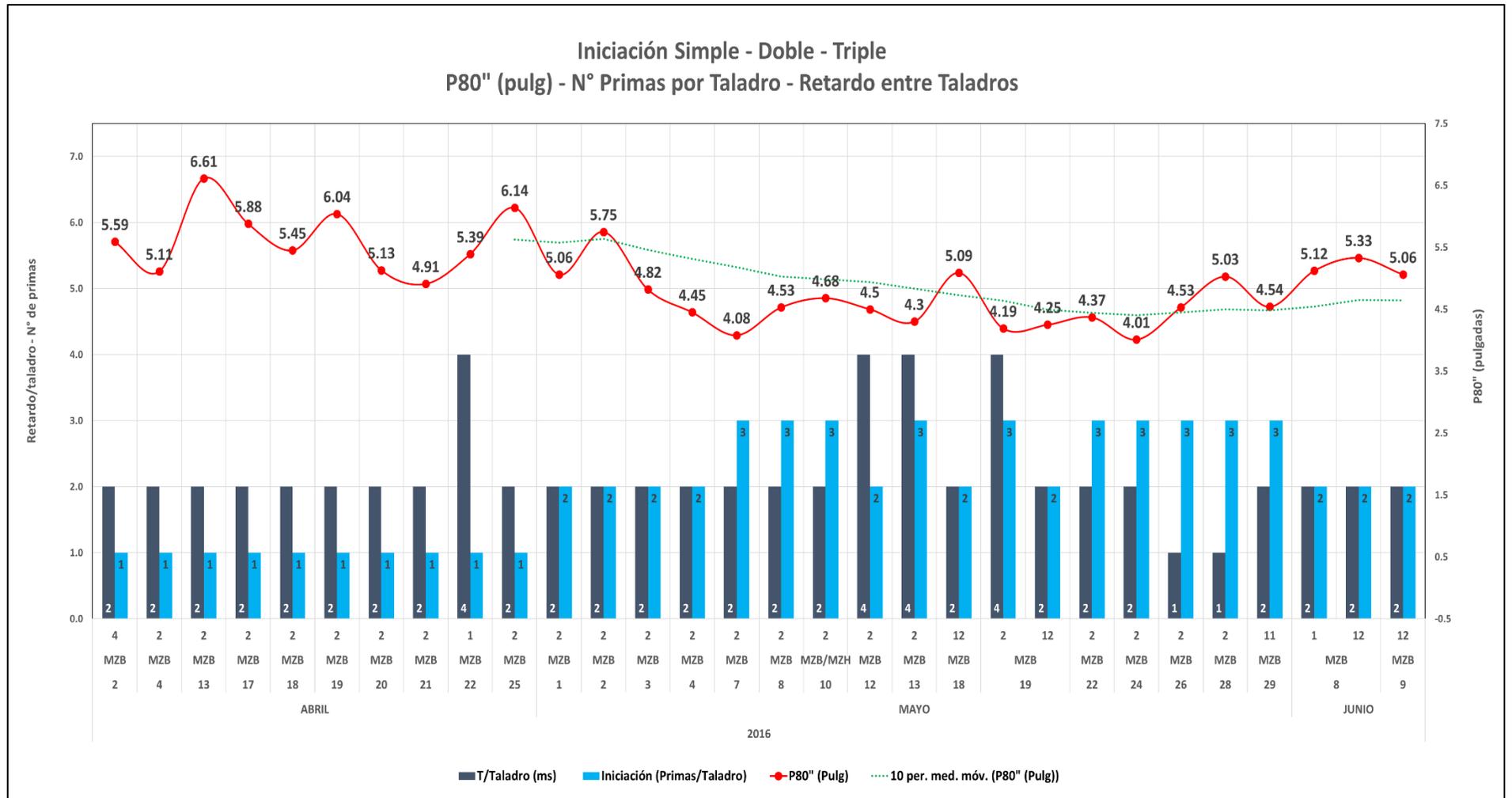


Figura 66: Consolidado – P80" – N° de primas – Retardo entre taladros  
Fuente: Propia

### 3.3. Discusión de los resultados

Los resultados de la presente investigación muestran que el sistema de triple iniciación es el mejor sistema respecto de los otros, tal como menciona Balasubramanian (12), la forma más fácil de extraer los valiosos cuerpos minerales es mediante el uso de explosivos y diseños de voladuras bien planificados que pueden producir buenos perfiles de fragmentación, lo mismo que Huamán (14), estudia sobre la implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en el Perú; concluyendo que la calidad del disparo tiene influencia significativa sobre las etapas posteriores de manejo de material dentro del sistema de extracción de una mina.

Estos resultados son similares a los encontrados en otras investigaciones sobre el tema, como por ejemplo Mishra (13), que realiza un artículo investigativo sobre la Voladura controlada en una mina de piedra caliza utilizando detonadores electrónicos: un estudio de caso; de forma que trata sobre el diseño de voladura controlada y su implementación utilizando detonadores electrónicos con técnica de orificio de firma donde el sistema electrónico de iniciación es rentable respecto a otros tipos de iniciación. De la misma manera que en Mackay , quien realizó un examen teórico sobre el rendimiento previsto de los detonadores electrónicos en voladura de colada para determinar su rendimiento en la voladura de colada en minas a cielo abierto de hulla con resultados experimentales a los rendimientos previstos en las minas a cielo abierto de trozos de carbón. Mientras que el más cercano de los estudios es el de Hinostroza (5), quien estudia la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto; donde se obtuvo una reducción hasta un 36% en el P80 según los análisis realizados, también de conseguir una reducción en tiempo de carguío de la pala hasta un 31 %, del mismo modo obteniendo un incremento de costos debido al incremento en accesorios, de mezcla explosiva, de cantidad de taladros pero a cambio se recibe una mejor fragmentación de las rocas en la zona de Mineral, cuyos beneficios se aprecian en todo su alcance en el proceso de chancado y molienda. Pomaylle (8), investiga sobre la voladura con sistema de iniciación mixto electrónico y no eléctrico; y sus resultados mostraron que,

después de la aplicación del sistema de iniciación mixto se incrementó en 32% el disparo respecto al avance con el empleo del sistema convencional; siendo que los costos disminuyeron en 14,5% por metro lineal. Romero (15), para obtener el grado de ingeniero de minas de la Universidad Nacional del centro del Perú, investiga en torno al tema de la voladura con detonadores electrónicos y su optimización en la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho donde se pudo concluir que, los detonadores electrónicos permitieron tener el control de los tiros quedados lo cual mejora la seguridad significativamente; es decir con los detonadores electrónicos se optimiza significativamente la fragmentación y la seguridad en la empresa en cuestión.

Así, la investigación da un aporte significativo a la literatura actual sobre el tema, poniendo en la mesa una contrastación sobre la triple iniciación, la cual puede ser más ampliamente revisada y contrastada.

## CONCLUSIONES

En base a lo encontrado a lo largo de la investigación, se puede concluir lo siguiente:

Se concluye, de acuerdo a las pruebas realizadas, que es factible mejorar la eficiencia de la voladura, en términos de fragmentación de roca – P80” y generación de % de finos <1” aplicando un diseño de carguío que contemple el uso de tres iniciadores electrónicos durante en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

Durante el uso de la iniciación simple se logró determinar su eficiencia en la voladura basados en los resultados de fragmentación P80” y % de finos <1” durante la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

De los resultados de las pruebas con doble iniciación se concluye que es factible determinar la eficiencia de la voladura, medible en grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

Mediante las pruebas realizadas se logró concluir que determinar la eficiencia de la voladura en función a la fragmentación de la roca en términos de P80” y % de finos <1” utilizando una configuración de iniciación electrónica triple resulta factible.

La eficiencia de la voladura del sistema de triple iniciación electrónica es superior a la de la iniciación doble y simple, en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.

Existe una mejora sustancial de la eficiencia de la voladura empleando la iniciación electrónica triple en la explotación del yacimiento, dado que se ha podido encontrar evidencia acerca de la diferencia sustancial entre el nivel base (40%), por lo que el nivel esperado del porcentaje de finos menores a 1” es significativamente superior.

De la misma manera se ha podido describir que el sistema de iniciación simple es eficiente, dado que tiene un valor promedio de 22.13%, con un nivel de dispersión de 0.617% de fragmentación de roca inferior a 1”, acerca de la eficiencia de este, respecto de la base (20%), con un valor del estadístico t Student calculado igual a 3.454, por tanto, se establece que la iniciación simple ha sido eficiente.

En el caso de iniciación doble se tiene un valor promedio de 28.28%, con un nivel de dispersión de 1.341% de fragmentación de roca menor a 1", respecto de la base (30%), con un valor del estadístico t Student calculado igual a -1.278, una significancia de 21.3%. Por tanto, se establece que la iniciación doble no ha sido eficiente.

Para la iniciación triple se tiene un valor promedio de 43.87%, con un nivel de dispersión de 1.413% de fragmentación de roca por debajo a 1", acerca de la eficiencia de este, respecto de la base (30%), con un valor del estadístico t Student calculado igual a 9.817. Por tanto, se establece que la iniciación triple ha sido eficiente.

Respecto de la comparativa entre los tres sistemas de iniciación, se ha podido demostrar que la eficiencia de la voladura del sistema de triple iniciación electrónica es superior a la de la iniciación doble y simple, esto en función a los test de medias y al test de Duncan que terminan por dar resultados que indican la superioridad del sistema de triple iniciación con significancia estadística al 95%.

## RECOMENDACIONES

A los responsables de operaciones mineras de cobre a tajo abierto con condiciones de diseño similares a las de este caso en particular:

Se ha demostrado la efectividad del sistema de triple iniciación, por lo que se recomienda realizar una serie de pruebas adicionales acerca de la calidad de rocas y de inmediato empezar a implementar el referido sistema a todas las operaciones mineras donde se requiera el proceso de voladura, por poseer importantes mejoras a la fragmentación de minerales.

Con el propósito de mejorar aún más la fragmentación y principalmente el % de finos menor a una pulgada, se sugiere la aplicación de un explosivo gasificado como por ejemplo el Fortis™ Extra-65/35, como columna de carga, por ser una mezcla explosiva con mayor energía. Para esto es importante tener una configuración de camiones fabrica que permita la aplicación de un explosivo gasificado.

En algunas operaciones mineras se han encontrado zonas con un macizo rocoso altamente competente (RQD 75 – 100), aplicando la triple iniciación acompañado de un explosivo de alta energía (aplicación de aluminio) como por ejemplo el Vistis™ 250 se lograrían tener mejores resultados de fragmentación y % de finos <1”.

A fin de obtener óptimos resultados de fragmentación y evitar bolonería (bloques sobredimensionados de roca) se recomienda que la malla no tenga taladros tapados o cortos, de ser el caso, la importancia de la re - perforación minimizara el impacto negativo que se podría generar post voladura.

Si se busca determinar los tiempos óptimos para el diseño de la voladura electrónica (tiempos entre taladros) es recomendable realizar un estudio de “Onda Elemental”. Esto sumado a la aplicación de un diseño con triple iniciación ayudara de manera significativa a mejorar los resultados globales de fragmentación y finos.

La instalación de sistemas de medición de fragmentación en las palas y en el área de descarga de las chancadoras ayudarían a cuantificar el grado de fragmentación que llega a la primera etapa del proceso de conminución.

Se recomienda evaluar el diseño de carga que contempla una carga satelital en el taco. Esto contribuye a generar un grado de fragmentación a nivel del taco, sin embargo, para aplicar este tipo de diseño se debe tener en cuenta el taco final, la cantidad en kilos de la carga satelital, el material de tapado y el radio de influencia de equipos a fin de evitar eventos no deseados por posible proyección de rocas.

El uso de la triple iniciación atribuye a un mayor consumo de accesorios (detonadores electrónicos e iniciadores) lo cual significa una variación en los costos de voladura, sin embargo, la aplicación de este diseño podría lograr una optimización en el diseño de malla (ampliación de malla, reducción de sobre perforación, reducción de explosivo). Este análisis debe ser evaluado en función a las características del macizo rocoso, operatividad de la aplicación del sistema y la diferencia de costos global de todo el proceso de perforación y voladura.

Según lo mencionado anteriormente, la aplicación de este sistema de iniciación tiene un potencial alto de mejorar los procesos agua abajo. (chancado, molienda, etc.)

A fin de mejorar el análisis diario de fragmentación se recomienda la implementación de una cámara digital aplicada al análisis granulométrico el cual permite abarcar un mayor rango de fotografías analizadas y tener una muestra con mejor índice de confiabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **BERNAOLA ALONSO, Jose, CASTILLA GÓMEZ, Jorge y HERRERA HERBERT, Juan.** *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid : s.n., 2013.
2. **ROMERO NARANJO, Francisco Ruben y MANTILLA, Francisco.** *Manual técnico para el uso de explosivos utilizados en voladuras a cielo abierto en vías terrestres*. Ecuador : s.n., 2009.
3. **DICK, Richard A., FLETCHER, Larry R. y D'ANDREA, Dennis V.** *Explosives and blasting procedures manual*. US Department of the Interior, Bureau of Mines. Estados Unidos de America : s.n., 1982.
4. **HUSTRULID, William.** *Blasting principles for open pit mining: general design concepts*. Balkema. Colorado, Estados Unidos de América : s.n., 1999.
5. **HINOSTROZA SIERRA, Jaime Roosevelt.** *Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto*. Lima : s.n., 2014.
6. **CAGUANA GUTIERREZ, Andres Fernando y TENORIO TUPACYUPANQUI, Manuel Patricio.** *Optimización de los parámetros de perforación y voladura en la cantera "Las Victorias"*. Cuenca, Ecuador : s.n., 2013.
7. **CONTRERAS PÉREZ, Willy José.** *Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones: Aplicación en minas Ares. Tesis de grado para obtener el título de Ingeniería de minas*. Lima, Perú : s.n., 2009.
8. **POMAYLLE QUILCA, Joel y VASQUEZ PAQUIYAURI, Melanio.** *Voladura con sistema de iniciación mixto eléctrico y no eléctrico en la profundización del pique N° 2, Mina Teresita, unidad de producción recuperada de la cia. de minas Buenaventura SAA*. Huancavelica, Perú : s.n., 2013.
9. **POMA FERNANDEZ, Jose Luis.** *Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill (Caso minera Yanacocha). Tesis para optar el título profesional de ingeniero de minas*. Lima, Perú : s.n., 2013.
10. **VANBRABANT, F y ESPINOSA, A.** *Impact of short delays sequence on fragmentation by means of electronic detonators: theoretical concepts and field validation. En Fragblast 8, Proceedings of the 8th international symposium on rock fragmentation by blastin*. Santiago : Editec S.A., 2006.
11. **LOPEZ JIMENO, Carlos, LOPEZ JIMENO, Emilio y GARCIA BERMUDEZ, Pilar.** *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid : s.n., 2003. 9788496140035.

12. **BALASUBRAMANIAN, A.** *Rock blasting for mining*, Centre for Advanced Studies in Earth Science. Mysore : s.n., 2017.
13. **MISHRA KUMAR, Arvind.** *Controlled blasting in a limestone mine using electronic detonators: A case study*. India : s.n., 2017.
14. **HUAMÁN UBILLÚS, Benjamín Augusto.** *Implementación de un nuevo sistema de iniciación electrónica en Perú - Seguridad y Versatilidad*. Lima, Perú : s.n., 2010.
15. **ROMERO PAUCAR, Royer.** *Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A.* Huancayo, Perú : s.n., 2016.
16. **PALOMINO TORRES, Luis Francisco.** *Geometalurgia de los yacimientos Ferrobamba y Chalcobamba - Proyecto Minero Las Bambas*. Lima, Perú : s.n., 2010.
17. **LIPA SALAS, Victor.** *Contexto estructural del proyecto minero Las Bambas*. Apurimac, Perú : s.n., 2008.
18. **Xstrata Perú SA.** *Informe interno proyecto minero Las Bambas*. Apurimac, Perú : s.n., 2011.
19. **AGUILERA, G. y CAMPOS, B.** *Fragmentación: Distribución de tamaños o distribución de distribuciones*. Pucón, Chile : VII ASIEEX, 2008.
20. **CHAVEZ LEÓN, Luis Alfredo.** *Optimización de la fragmentación en los proyectos de voladura primaria en la zona norte del tajo Sam Pedro Sur, Minera La Zanja*. Cajamarca : s.n., 2014.
21. **Servicios técnicos, ORICA.** *Voladura segura y eficiente en minas a rajo abierto*. Chile : s.n., 2008.
22. **BLANC, J. y THIARD, R. R.** *L'énergie des explosifs. Explosifs*. Francia : vol. 37, no 1, p. 97-110, 1984.
23. **ENAEX.** *Manual de tronadura ENAEX S.A.* Chile : s.n., 2010.
24. **HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNANDEZ COLLADO, Carlos y BAUTISTA LUCIO, Pilar.** *Metodología de la investigación*. Distrito Federa, México : s.n., 2010.
25. **Sociedad Nacional de Minería, Petroleo y Energia.** *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea*. Lima : s.n., 2004.

## ANEXOS

### Anexo 1.- Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Metodología
¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?	• Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto.	• Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica simple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto es factible y viable.	Sistema de voladura de iniciación electrónica	Método Científico, comparativo y de medición estadística
				Diseño no experimental
¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento	• Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento	• Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica doble, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo	Indicadores	Tipo aplicado
			% de finos menor a 1"	

cuprífero a cielo abierto?	cuprífero a cielo abierto.	abierto es factible y viable.		
¿Es factible determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en el grado de fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto</li> </ul>	Determinar la eficiencia de la voladura de iniciación electrónica triple, medible en función de la fragmentación de la roca en la explotación de un yacimiento cuprífero a cielo abierto es factible y viable.	Calidad de roca Unidad de medida Muy mala Mala Mediana Buena Muy Buena	Nivel exploratorio

## Anexo 2.- Proceso de carguío

El proceso de carguío de taladros en la operación minera donde se aplicaron los diversos sistemas de iniciación está a cargo de la empresa especializada Orica™. A continuación, se detallan brevemente las actividades de este proceso.

**Preparación de malla de perforación:** Reparto de accesorios y altos explosivos.



Figura anexo 1: Malla de carguío  
Fuente: Propia, 2016

**Primado de taladros:** Primado de taladros según diseño



Figura anexo 2: Primado de taladros con detonadores electrónicos  
Fuente: Propia, 2016

### Carguío de taladros: Uso de camiones fabrica - MMU.



Figura anexo 3: Camión fabrica Orica™ - MMU  
Fuente: Propia, 2018

### Tapado de taladros



Figura anexo 4: Tapado mecanizado de taladros  
Fuente: Propia, 2016

## Programación de detonadores – Voladura



Figura anexo 5: Programación de detonadores I-kon™ III  
Fuente: Propia, 2018



Figura anexo 6: Disparo  
Fuente: Las Bambas, 2018

### Anexo 3.- Emulsiones gasificadas

Hoy en día en el mercado peruano de la fabricación y comercialización de explosivos y servicios de voladura se encuentran diversas gamas alineadas a las distintas necesidades de las empresas mineras. Cada vez las tecnologías soportan la necesidad de disminuir costos y lograr mejores resultados en todos los procesos unitarios de la minería. Para este caso la empresa “FAMESA” tiene al producto denominado “San-G®”. La empresa “EXSA” cuenta con su producto denominado “Slurrex G” y finalmente la empresa “ORICA” tiene en su gama de soluciones al “FORTIS™” en sus distintas proporciones.



Figura anexo 7: Toma de muestra – Explosivo gasificado Fortis™  
Fuente: Propia, 2018

En teoría el proceso de gasificación de una emulsión consta en sensibilizar el agente de voladura, que en este caso vendría a ser la emulsión matriz, mediante el uso de una solución de N-20 la cual genera gas nitrógeno dentro de la emulsión en forma de burbujas de nitrógeno las cuales quedan dentro de esta creando espacios los cuales trabajan como puntos calientes.

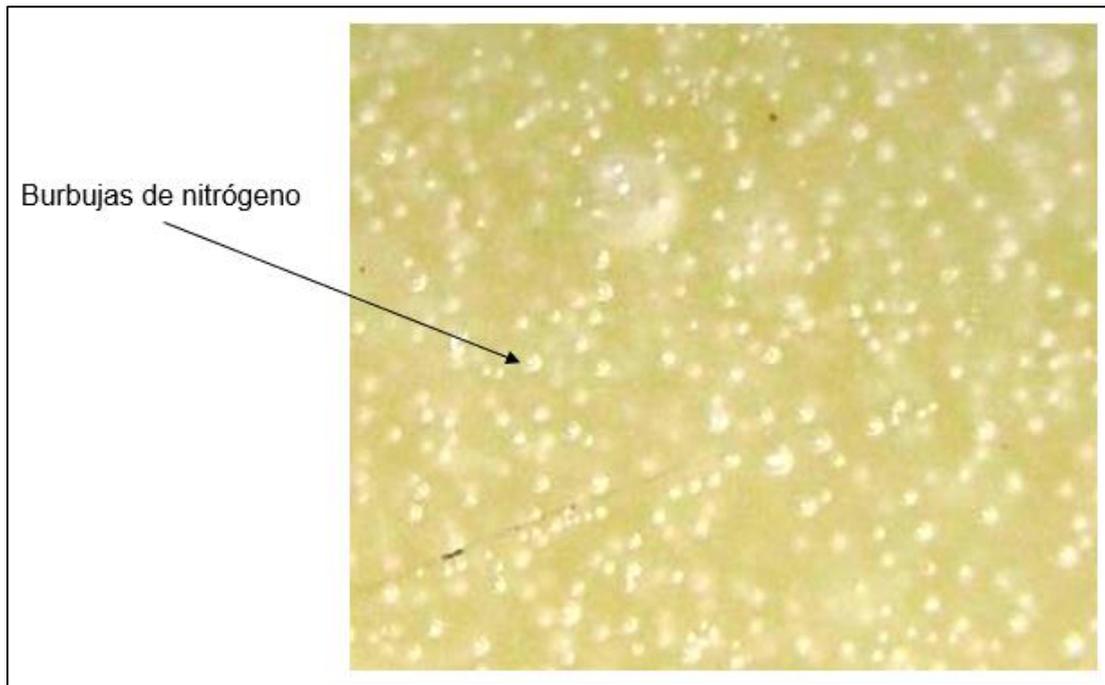


Figura anexo 8: Emulsion gasificada – Burbujas de nitrógeno  
Fuente: Dyno Nobel



Figura anexo 9: Control de calidad – Gasificación  
Fuente: Orica, 2010