

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**IMPLEMENTACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS
EN LA VOLADURA PARA OPTIMIZAR LOS COSTOS
UNITARIOS EN LAS OPERACIONES
DE MINA TOQUEPALA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Eduardo Ninaja Luque

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas


IMPLEMENTACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS EN LA VOLADURA PARA OPTIMIZAR LOS COSTOS UNITARIOS EN LAS OPERACIONES DE MINA TOQUEPALA

Tesis sustentada y aprobada el 10 de marzo del 2022, estando el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
Dr. Julio Vargas Panfagua

2do. MIEMBRO
(VOCAL)


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

ASESOR


.....
Dr. Carlos Huisa Ccori

DEDICATORIA

A mi familia, mi padre Florencio Ninaja y mi madre Isabel Luque por el apoyo incondicional durante mis años de estudio, a mi hermana Sheila Ninaja que siempre confió en mí.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en especial a mi querida alma mater “Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann” y a los docentes por aportar con sus enseñanzas a mi desarrollo profesional. Expreso mi total agradecimiento al Ing. Manfredo Herrera, por su constante apoyo, por haberme brindado la oportunidad de aprender a su lado, y compartir su experiencia, y a todas las personas que fueron intermediarias para hacer posible el presente trabajo

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de investigación	7
1.2. Formulación del problema	8
1.2.1. Problema principal	8
1.2.2. Problema específico	9
1.3. Justificación e importancia de la investigación	9
1.3.1. Justificación	9

1.3.2.	Importancia	10
1.4.	Alcances y limitaciones	11
1.4.1.	Alcances	11
1.4.2.	Limitaciones	11
1.5.	Objetivos	12
1.5.1.	Objetivo general	12
1.5.2.	Objetivos específicos	12
1.6.	Hipótesis	13
1.6.1.	Hipótesis general	13
1.6.2.	Hipótesis específicas	13

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio	14
2.2.	Bases teóricas	17
2.2.1.	Unidad Minera Toquepala	17
2.2.2.	Caracterización del macizo rocoso	24
2.2.3.	Variables geomecánicas que influyen en la voladura	31
2.2.4.	Detonadores pirotécnicos	34
2.2.5.	Detonadores electrónicos	35
2.2.6.	Diseño de voladuras con detonadores electrónicos	38
2.2.6.1.	Variables controlables en una voladura	38
2.2.6.2.	Variables no controlables en una voladura	39
2.2.7.	Ventajas del uso de detonadores electrónicos	40
2.2.8.	Desviaciones de tiempos	41

2.2.9. Control de vibraciones	45
2.2.10. Fragmentación	46
2.3. Definición de términos	49
2.3.1. RMR	49
2.3.2. RQD	50
2.3.3. Resistencia dinámica a la compresión y tracción	51
2.3.4. Macizo rocoso	52
2.3.5. Ángulo de fricción interna.	52
2.3.6. Cohesión	53
2.3.7. Nitrato de Amonio (NA)	53
2.3.8. ANFO	54
2.3.9. ALANFO	54
2.3.10. Acoplamiento	55
2.3.11. Factor de carga	55
2.3.12. Desplazamiento	56
2.3.13. Cara libre	56
2.3.14. Impedancia	57
2.3.15. Parámetros de perforación y voladura	57

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación	60
3.2. Población y muestra	61
3.3. Operacionalización de variables	62
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	64

3.5.	Procesamiento y análisis de datos	80
3.5.1.	Análisis de fragmentación	80
3.5.2.	Análisis de vibraciones	88
3.5.3.	Cálculo y análisis de costos unitarios	100
3.5.4.	Análisis de optimización y sensibilidad	119
3.5.5.	Análisis de datos con estadística descriptiva	134

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Resultados de la investigación	141
4.2.	Análisis y pruebas del contraste de hipótesis	142
4.2.1.	Influencia en la fragmentación	142
4.2.2.	Influencia en la vibración	145
4.2.3.	Factibilidad económica	146
4.2.4.	Optimización de costos unitarios	150
4.3.	Discusión de resultados	152
4.3.1.	Resultado de la influencia en la fragmentación	152
4.3.2.	Resultado de la influencia en la vibración	153
4.3.3.	Resultado de la factibilidad económica	154
4.3.4.	Resultado de optimización de costos unitarios	156

CONCLUSIONES	157
---------------------	-----

RECOMENDACIONES	158
------------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
-----------------------------------	-----

ANEXOS	164
---------------	-----

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia	165
Anexo 2. Ubicación de la mina Toquepala	166
Anexo 3. Mapa geológico Toquepala Cuajone Quellaveco	167
Anexo 4. Guía de sistema de iniciación electrónica	168
Anexo 5. Procedimiento carguío y conexión e iniciación detonadores	177
Anexo 6. Procedimiento de voladura	181

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Minado de pala en talud final	5
Figura 2. Fragmentación gruesa en cara libre	6
Figura 3. Incremento de P&V secundaria	7
Figura 4. Tajo abierto de la mina Toquepala	17
Figura 5. Diseño de tajo de la mina Toquepala	18
Figura 6. Sección geológica de cuerpo mineralizado	19
Figura 7. Diagrama de flujo de la operación en Toquepala	21
Figura 8. Patrones de voladura	22
Figura 9. Análisis crítico de daño	32
Figura 10. Criterio de daño en un taladro	33
Figura 11. Partes de detonadores pirotécnicos	35
Figura 12. Detonador electrónico	36
Figura 13. Número de serie del detonador electrónico	37
Figura 14. Conexión del detonador electrónico	37
Figura 15. Estructura interna de un detonador electrónico	38
Figura 16. Detonación electrónica controlada	39
Figura 17. Dispersión del retardo de taladro de 600 ms	41
Figura 18. Diseño de secuencia de voladura	42
Figura 19. Interacción de ondas	43

Figura 20. Método de medición de velocidad de detonación	44
Figura 21. Mecánica de fragmentación	46
Figura 22. Configuración de burden de detonación	47
Figura 23. Fases de rotura de un taladro	48
Figura 24. Proceso para evaluar el valor del RQD	50
Figura 25. Secuencia de disparo con cara libre	56
Figura 26. Parámetros de perforación y voladura	59
Figura 27. Diseño de malla de perforación	65
Figura 28. Diseño de carga explosiva	66
Figura 29. Control de mezcla explosiva	67
Figura 30. Secuencia de detonación	68
Figura 31. Apilamiento del material	68
Figura 32. Configuración de tiempos	69
Figura 33. Simulación de voladura	70
Figura 34. Esponjamiento de la pila de mineral	71
Figura 35. Control de dilución del mineral	72
Figura 36. Pisos nivelados después del minado	72
Figura 37. Talud pre corte	73
Figura 38. Fragmentación gruesa en corte de pala	74
Figura 39. Daño de paredes del tajo por vibraciones	74
Figura 40. Análisis de fragmentación	75

Figura 41. Calibración de curvas de fragmentación	76
Figura 42. Modelamiento del tiempo resultante	77
Figura 43. Resultados de fragmentación en tolva	78
Figura 44. Matriz de sensibilidad	79
Figura 45. Análisis granulométrico del material volado	81
Figura 46. Análisis del D90 con detonador pirotécnico	83
Figura 47. Análisis del D90 con detonador electrónico	85
Figura 48. Análisis del D90 con detonador electrónico	86
Figura 49. Porcentaje bolonería versus fragmentación D90	87
Figura 50. Reporte de vibraciones del programa BlastWare IV	89
Figura 51. Modelo logarítmico de vibración	95
Figura 52. Modelo logarítmico de vibración ajustado	98
Figura 53. Modelo de vibración ajustado	98
Figura 54. Vibración VPP versus factor carga	99
Figura 55. Velocidad minado efectivo versus fragmentación D90	110
Figura 56. Modelo del costo unitario de voladura	121
Figura 57. Modelo de la velocidad de minado efectivo	123
Figura 58. Modelo de costo de voladura ajustado	133
Figura 59. Modelo de costo total ajustado	133
Figura 60. Caja de bigotes de la variable fragmentación y vibración	137
Figura 61. Caja de bigotes de la variable costos unitarios	138

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ley promedio de Cu y Mo por tipo de roca	20
Tabla 2. Clasificación del macizo rocoso mina Toquepala	25
Tabla 3. Propiedades del macizo rocoso	26
Tabla 4. Caracterización geomecánica de la mina Toquepala	27
Tabla 5. Propiedades mecánicas del macizo rocoso	28
Tabla 6. Velocidad de propagación por macizo rocoso	29
Tabla 7. Número de muestras de proyectos según detonador	61
Tabla 8. Número de muestras de resultados según detonador	61
Tabla 9. Operacionalización de variables independientes	62
Tabla 10. Operacionalización de variables dependientes	63
Tabla 11. Operacionalización de variables asociadas	64
Tabla 12. Propiedades del macizo rocoso	66
Tabla 13. Parámetros de voladura	69
Tabla 14. Fragmentación con detonador pirotécnico	82
Tabla 15. Fragmentación con detonador electrónico	84
Tabla 16. Registro de monitoreo de vibraciones	90
Tabla 17. Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso	91
Tabla 18. Cálculo del logaritmo de la De y VPP	94
Tabla 19. Datos de proyectos de voladura según detonadores	100

Tabla 20. Registro de explosivos en proyectos de voladura	101
Tabla 21. Registro de accesorios en proyectos de voladura	102
Tabla 22. Precios unitarios de los insumos de voladura	103
Tabla 23. Cálculo de costos de explosivos	106
Tabla 24. Cálculo de costos de accesorios	107
Tabla 25. Costos por proyecto de voladura	108
Tabla 26. Ahorro en costo de voladura	109
Tabla 27. Cálculo de costos unitarios en carguío	112
Tabla 28. Costos unitarios en operaciones de carguío	113
Tabla 29. Cálculo de costos unitarios en acarreo	114
Tabla 30. Costos unitarios en operaciones de acarreo	115
Tabla 31. Cálculo de costos unitarios en chancado	115
Tabla 32. Costos unitarios en operaciones de chancado	116
Tabla 33. Cálculo de costos unitarios de voladura del 2017	117
Tabla 34. Costos unitarios de operaciones de voladura	118
Tabla 35. Costo beneficio de la operación	119
Tabla 36. Correlación de variables de estudio según Pearson	120
Tabla 37. Resumen de costos unitarios	124
Tabla 38. Datos ajustados según modelo de costo	132
Tabla 39. Datos de estudio	134
Tabla 40. Prueba de normalidad variables con detonador electrónico	135

Tabla 41. Prueba de normalidad variables con detonador pirotécnico	136
Tabla 42. Análisis estadístico variables con detonadores electrónicos	139
Tabla 43. Análisis estadístico variables con detonadores pirotécnicos	139
Tabla 44. Análisis de homogeneidad de varianzas	140
Tabla 45. Resumen de resultados por detonador	141
Tabla 46. Prueba hipótesis para el indicador fragmentación	143
Tabla 47. Prueba hipótesis para el indicador porcentaje bolonería	144
Tabla 48. Prueba hipótesis para el indicador vibración	146
Tabla 49. Prueba hipótesis para el indicador factor carga	147
Tabla 50. Prueba hipótesis para el indicador velocidad minado	148
Tabla 51. Prueba hipótesis para el indicador costo unitario voladura	150
Tabla 52. Prueba hipótesis para optimización de costos unitarios	151

RESUMEN

La calidad del mineral extraído está fundamentada en el contenido metálico, grados de humedad, dilución y granulometría proyectada; este último parámetro de evaluación, es producto de la voladura, que constituye una de las operaciones primarias más importantes de todo el ciclo integral de minado. Con el desarrollo de los diferentes sistemas de iniciación electrónica, hoy en día es mucho más fácil predecir y obtener resultados idóneos en cuanto a fragmentación, con un adecuado control de vibraciones en taludes, dado que el ingeniero de diseño tiene la versatilidad y facilidad de establecer los tiempos de detonación en función de las estructuras geológicas, evitando trabajar con tiempos nominales de fábrica, por lo tanto, el análisis se enfoca en determinar la influencia de la detonación electrónica en la optimización de los costos unitarios de la mina Toquepala, donde la puesta en marcha del sistema electrónico es más costoso, sin embargo, los resultados sustentan su aplicación, al mejorar las variables de fragmentación, vibración, velocidad de minado y costos unitarios voladura, viéndose reflejados en la reducción de los costos post voladura en 5,59 %, logrando una utilidad de 3,5 MUSD en el año 2017.

Palabras clave: voladura, costos unitarios, detonadores electrónicos.

ABSTRACT

The quality of the extracted ore is based on the metal content, degrees of humidity, dilution and projected granulometry; This last evaluation parameter is the product of blasting, which is one of the most important primary operations of the entire mining cycle. With the development of the different electronic initiation systems, today it is much easier to predict and obtain ideal results in terms of fragmentation, with adequate control of vibrations on slopes, since the design engineer has the versatility and ease of establishing detonation times based on geological structures, avoiding working with factory nominal times, therefore, the analysis focuses on determining the influence of electronic detonation in optimizing the unit costs of the Toquepala mine, where the implementation of the electronic system is more expensive, however, the results support its application, by improving the variables of fragmentation, vibration, mining speed and blasting unit costs, being reflected in the reduction of post-blasting costs by 5,59 % , achieving a profit of 3,5 MUSD in 2017.

Keywords: blasting, unit costs, electronic detonators.

INTRODUCCIÓN

La mina Toquepala, concesión de *Southern* Perú, es un yacimiento de pórfidos de cobre, donde se vienen desarrollando oportunidades de mejora en la fragmentación del macizo rocoso, el cual está directamente relacionado a las operaciones unitarias de perforación y voladura. La aplicación de tecnologías como los detonadores electrónicos nos permitirá brindar variados diseños de voladura, en cuanto a la configuración de tiempos de salidas, los cuales interactúan directamente con las propiedades del macizo rocoso y velocidades de onda de la voladura, permitiendo de esta forma mejorar la calidad de la fragmentación y por consecuencia las operaciones de carguío, acarreo y chancado, reduciendo así el costo global de minado. Bajo este principio se ha desarrollado la presente investigación titulada “Implementación de Detonadores Electrónicos en la Voladura para Optimizar los Costos Unitarios en las Operaciones de Mina Toquepala” que consta de cuatro capítulos.

En el Capítulo I, se estudia el Planteamiento del Problema, haciendo referencia a la problemática de la investigación; antecedentes del problema en la mina Toquepala; formulación del problema enfocado a la mejora de

la fragmentación, vibraciones y costos; justificación e importancia del estudio en minas de cobre; alcances y limitaciones de la investigación; objetivos e hipótesis de la investigación.

En el Capítulo II, estudiaremos el Marco Teórico, con la finalidad de establecer los lineamientos y conceptos trascendentes de la investigación; desarrollaremos los antecedentes de estudio de la mina Toquepala; bases teóricas para entender y analizar los resultados obtenidos; y la respectiva definición de términos usadas para el presente estudio.

En el Capítulo III, correspondiente al Marco Metodológico, se hace referencia al tipo y diseño de investigación; población y muestras tomadas; operacionalización de las variables de estudio; técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos; procesamiento y análisis de datos, realizados con la finalidad de obtener resultados del presente estudio.

En el Capítulo IV, correspondiente a los Resultados y Discusión, se analizará los resultados de las voladuras con detonadores electrónicos respecto a los detonadores pirotécnicos; y el contraste de hipótesis de investigación. Finalmente, se complementa esta investigación con sus respectivas conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

La voladura es una de las operaciones unitarias de mayor trascendencia en todo el proceso de extracción minera, cuyo objetivo final es lograr un adecuado grado de fragmentación, de tal modo se obtenga un mínimo en el costo conjunto de las operaciones de perforación, voladura, transporte y chancado primario; produciendo a la vez el menor daño posible en las cercanías de ésta. El alto grado de influencia de los resultados obtenidos en la etapa de voladura, afectará directamente a los procesos del ciclo operacional, lo que hace evidente la necesidad de contar con la experiencia y tecnología adecuada, que permitan evaluarla, y posteriormente optimizarla. El obtener materiales con tamaños por encima de los rangos de celdas de fragmentación o que la voladura no haya

desplazado el material adecuadamente, genera frentes resistentes para el minado; en muchas oportunidades nos obligan a ejecutar minados selectivos o realizar voladuras secundarias, cuyas actividades interfieren en el desarrollo de los planes establecidos, que a la vez también tiene su implicancia económica en los costos operativos.

Por otra parte, la voladura es la interacción del explosivo sobre la roca, por lo que, las condiciones energéticas de los explosivos deben superar todo tipo de resistencia, con la plena capacidad de poder deformarlos, aprovechando las condiciones elásticas; por lo que se requiere evaluar el performance de nuevas tecnologías de explosivos y de iniciación como el caso de los detonadores electrónicos, que nos permiten interactuar con infinitudes de secuencias relacionado directamente con las propiedades geotécnicas y geomecánicas del macizo rocoso, anteriormente estas secuencias se definían en función a los tiempos nominales o de fábrica de los detonadores pirotécnicos, y que esta hace poco tiempo se venían empleando en las operaciones de voladura de la mina Toquepala. La mina Toquepala, propiedad de *Southern* Perú, es un yacimiento de Cu, y en la actualidad, viene desarrollando fases de minado de expansión y profundidad, en cuyas paredes finales deben reflejarse la competencia de sus taludes, con el objetivo de soportar la carga portante

de la masa rocosa. En el proceso de fragmentación, existen varios sectores predispuestos donde se genera una fragmentación subestándar, fuera de los índices pronosticados en cuanto a granulometría, en función a los controles de carga explosiva y a la configuración de periodos en la secuencia; los cuales pueden ser mejorados en virtud de que vamos optimizando las medidas de control para contrarrestar esta problemática.



Figura 1. Minado de pala en talud final
Fuente: SPCC,2018.

Al situarse en el diseño de la línea del límite final de minado, se debe controlar los factores de carga adecuados, para no generar inestabilidades, lo que conlleva a tener una fragmentación relativamente gruesa en los

sectores del talud final (figura 1); por ello los taludes de contorno llevan carga restringida a fin de controlar el daño al talud. Por lo general, la cara libre está pre fragmentada por la voladura anterior, lo que genera la fuga de gases por abertura, producto de la detonación; de esta forma afecta a los resultados interrumpiendo el proceso de rotura y amortiguando el viaje de las ondas de detonación a lo largo del macizo rocoso (figura 2). La presencia de bolonería, obliga a ejecutar un minado selectivo del material, generando de esta forma un incremento en los ciclos de minado y el consumo acelerado de los componentes del equipo, retraso del plan de minado, incremento de voladuras secundarias y, por consiguiente, incremento en los costos globales de la mina (figura 3).



Figura 2. Fragmentación gruesa en cara libre
Fuente: SPCC,2018.



Figura 3. Incremento de P&V secundaria
Fuente: SPCC, 2018.

1.1.2. Problemática de investigación

Un macizo rocoso es por naturaleza un medio discontinuo, heterogéneo, anisotrópico y sus propiedades físico-mecánicas son variantes, lo que influye considerablemente en el resultado de la voladura. Ante esta circunstancia, es necesario realizar diseños que deben tomar en consideración un modelo de variación de los cambios litológicos, para llegar a obtener la uniformidad de al menos en un 80 % de la fragmentación deseada. En el proceso de la fragmentación, existen varios sectores predispuestos donde se genera una fragmentación subestándar, fuera de

los índices pronosticados en cuanto a su granulometría, en función a los controles de carga explosiva y la configuración de periodos en la secuencia; los cuales pueden ser mejorados a virtud, mientras se va optimizando las medidas de control para contrarrestar la problemática estudiada. Con la aparición de los retardos electrónicos, es posible disminuir en gran porcentaje de la incertidumbre generados por la acción de los tiempos sobre el diseño, pero aun el efecto de los tiempos sobre la fragmentación es materia de estudio; por lo que se intenta dar una visión amplia de los esfuerzos realizados en esta línea a través de una revisión bibliográfica y experiencias obtenidas en la mina Toquepala, como también entregar lineamientos para lograr construir un modelo simplismo de predicción de la fragmentación, que incluya las características de cada voladura y respaldados por los costos unitarios de la misma.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema principal

¿En qué medida la aplicación de la detonación electrónica optimiza los costos unitarios de las operaciones de la voladura en la mina Toquepala?

1.2.2. Problema específico

- a) ¿Influye la implementación de los detonadores electrónicos en el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala?
- b) ¿Cómo influye los detonadores electrónicos en la vibración de las voladuras de la mina Toquepala?
- c) ¿Es económicamente factible la implementación de los detonadores electrónicos para el proceso de producción de la mina Toquepala?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

1.3.1. Justificación

La voladura en la minería juega un papel muy importante, porque es la forma en que se apertura las labores de acceso hacia un yacimiento económico, para poderlas explotar. La fragmentación es el resultado de toda una ciencia ingenieril aplicada en la voladura y, como se señala anteriormente, se puede predecir el comportamiento ante los cambios de sus parámetros. El proceso de fragmentación está influenciado por muchas

variables, algunas son controlables y otras intrínsecas; por lo tanto, la compleja interrelación entre estas variables hace que los resultados sean difíciles de predecir mediante algoritmos analíticos. La predicción de la fragmentación en la ingeniería es controlada a partir de modelos matemáticos, que se analizan e interpretan a través de ecuaciones. Estos modelos pueden ser estadísticos, donde se correlacionan parámetros medidos en ciertos eventos, deducidos de relaciones matemáticas que interpretan condiciones y aplicaciones físicas.

1.3.2. Importancia

En la mayoría de los casos definimos a la voladura, como una técnica basada en las acciones ejercidas por los explosivos sobre un macizo rocoso. Hoy en día, presenta diferentes variables de estudio y una de ellas es el objetivo del presente trabajo, que es la exactitud en el diseño de tiempos, formulado a través de la interacción de las velocidades de onda y agrietamiento del macizo rocoso, asociado a los conceptos de mecánica de rotura e interpretación de las propiedades geotécnicas y geomecánicas, relacionadas a los costos unitarios de las operaciones de voladura que puedan generar.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

La investigación realizada tiene un alcance de estudio que abarca las voladuras ejecutadas en los diferentes sectores o dominios estructurales de la mina Toquepala; la implementación de la detonación electrónica tiene un direccionamiento de objetivo integral a la mejora de los resultados en la fragmentación con tendencia al cuidado de las paredes finales y temporales del tajo, dichos resultados están enmarcados en optimizar los costos globales de minado.

1.4.2. Limitaciones

La posible limitación es que no se brinde las condiciones adecuadas para que los diseños de voladura cumplan con los objetivos planificados, recordemos que, en la ejecución de las aplicaciones de voladuras, existen variables que son controlables, como parámetros del explosivo y variables de diseño; y no controlables, como las propiedades del macizo rocoso, debido a que son intrínsecas; donde se puede mencionar a las propiedades

físicas y elásticas o a la resistencia dinámica de las rocas, condiciones geológicas, litológicas y estructurales, y presencia de aguas dinámicas subterráneas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la detonación electrónica en la optimización de los costos unitarios de las operaciones de voladura de la mina Toquepala.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la influencia de los detonadores electrónicos en el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.
- b) Analizar la influencia de los detonadores electrónicos en la vibración de las voladuras de la mina Toquepala.
- c) Determinar la factibilidad económica de la implementación de los detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La aplicación de la detonación electrónica optimiza significativamente los costos unitarios de las operaciones de voladura en la mina Toquepala.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) La implementación de detonadores electrónicos mejora el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.
- b) El uso de detonadores electrónicos reduce la vibración de las voladuras de la mina Toquepala.
- c) La implementación estratégica de los detonadores electrónicos es factible en la mina Toquepala.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

La implementación de detonadores electrónicos en la voladura para optimizar los costos unitarios en las operaciones mineras se sustenta en teorías previamente aplicadas en la industria minera, donde se establecen parámetros y referencias de estudio enfocadas en el diseño de mallas de perforación, simulación de voladuras, análisis del comportamiento de la mecánica de fragmentación respecto al diseño, tiempos de detonación y secuencia de voladura. También se enfocaron en el análisis de la carga explosiva, buscando evaluar los nuevos productos disponibles para la industria, que permitan mejorar y optimizar los procesos de perforación y voladura, en marco del desarrollo tecnológico e innovaciones como las mezclas explosivas, y tecnologías implementadas para mejorar el control operacional de los de equipos semiautomatizados.

Según Quispe (2018) realizó un estudio de optimización de la fragmentación en la mina Toquepala, mediante la aplicación de explosivo gasificado, donde se logra obtener buenos resultados en la aplicación de mezclas explosivas, lo que ha permitido efectuar voladuras masivas, y producto de la mejora de fragmentación, se generó ganancias de productividad en las operaciones posteriores a la voladura, incluidas el proceso de chancado y molienda. Como afirma Mamani (2018) realizó un estudio de optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala, donde se logró mejorar la fragmentación en 13,26 % y reducir el costo global de minado del año 2013 en 1,5 MUSD con un incremento en las dimensiones de la malla y reducción del factor de carga, mitigando de esa forma los efectos de las vibraciones.

Romero (2016) realizó un estudio de voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco, donde logró optimizar la fragmentación en 16,7 %, indicando que la mayor ventaja es la precisión y exactitud al obtener una dispersión de tiempos de 0,24 ms. Con respecto a costos, el uso de un detonador eléctrico asciende a 1 740 USD/tal, pero su costo se ve compensado y recuperado en los procesos posteriores, donde la productividad de la pala, el chancado y molienda mejora significativamente.

Además, indica que su uso permite tener el control de los tiros cortados, mitigando de esta forma el mayor riesgo de una voladura. Y como plantea Gutiérrez (2014) realiza un estudio de diseño de voladura y predicción de la fragmentación en zonas de mineral para optimizar las operaciones unitarias en la mina Toquepala; donde concluye que la aplicación de detonadores electrónicos ha permitido efectuar voladuras masivas, gracias al excelente control de daños, dada la precisión, exactitud y versatilidad, permitiendo bajar el factor de carga y obtener un control adecuado de los tiempos, lo cual reduce los niveles de vibración.

Según Ortiz (2009) realizó un estudio de optimización de voladura con el uso de detonadores electrónicos en la mina Cerro de Pasco, donde se logró obtener resultados favorables en la implementación de los detonadores electrónicos, debido a su forma de instalación rápida y segura. Permitiendo incrementar el espaciamiento en 10 %, al mantener una mejora en la fragmentación del 11,4 % y reducción de costos de voladura en 14,28 %. respecto a los detonadores pirotécnicos. Además, concluyó que el sistema presenta una flexibilidad ilimitada de tiempos de retardo, lo que permite diseñar voladuras complejas, utilizando tiempos, costos, entre taladro y tiempos largos entre filas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Unidad Minera Toquepala

El yacimiento de la mina Toquepala es explotado mediante la metodología de tajo abierto de forma mecanizada. La selección del método de explotación está definida en función al cuerpo mineralizado en superficie, además es característico de un pórfido de cobre con distribuciones diseminadas. (SPCC, 2018). En la figura 4 y 5, se observan las consideraciones de diseño como la delimitación geomecánica y parámetros de diseño operacional de la mina Toquepala.



Figura 4. Tajo abierto de la mina Toquepala
Fuente: SPCC, 2018.

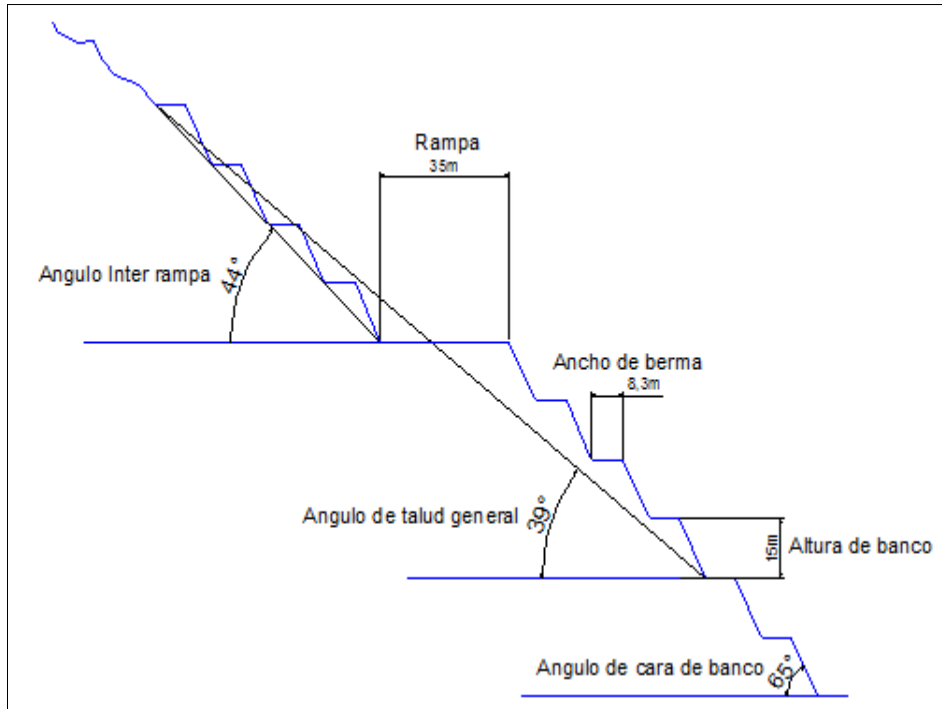


Figura 5. Diseño de talud de la mina Toquepala
Fuente: SPCC, 2018.

La mina Toquepala, es una mina antigua y de mayor dimensión en el Perú, actualmente el nivel superior e inferior de explotación se encuentra en la cota 3 550 y 2 770 msnm respectivamente. El acceso a la mina Toquepala es por la carretera Panamericana Sur, desde Camiara, en el km 1 204, donde inicia la carretera afirmada de 76 km hacia la mina; otro acceso desde la ciudad de Moquegua hacia la mina es por una carretera de 73 km. Las vías de acceso secundarias están representadas por un ferrocarril industrial de 167 km, que une a la mina con el puerto de Ilo, y otro que comunica a la mina Cuajone con Toquepala (Herrera, 2009).

Toquepala es un depósito mineral de tipo pórfido de cobre, donde la mineralización está principalmente constituida por una fina diseminación de sulfuros y relleno de vetillas angostas, con poca persistencia de fracturas, emplazadas en una secuencia de rocas ígneas de composición ácidas a intermedias. Estructuralmente, el depósito está ubicado en una chimenea volcánica del tipo diatrema, donde la mineralización del depósito ha sido posible por la existencia de una zona de debilitamiento que permitió el paso de soluciones mineralizadas (Romero, 2016).

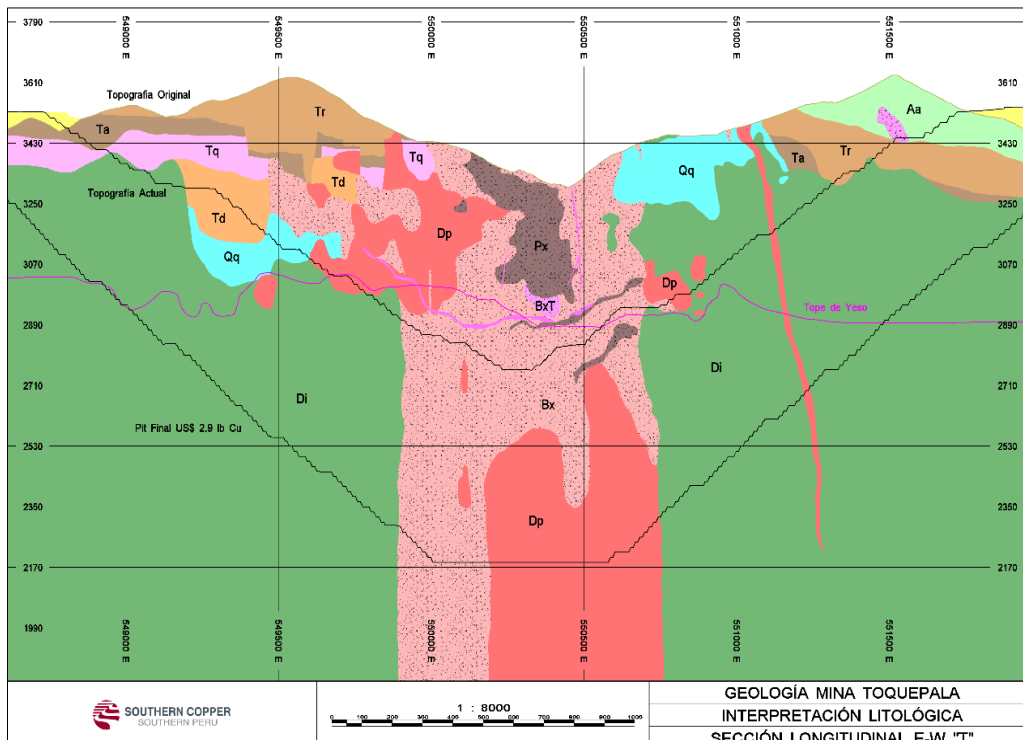


Figura 6. Sección geológica de cuerpo mineralizado
Fuente: SPCC, 2018.

El yacimiento de la mina Toquepala es explotado mediante la metodología de tajo abierto, se ejecuta de forma mecanizada. La selección del método de explotación está plasmada en función al cuerpo mineralizado en superficie; además es característico de un pórfido de cobre con distribuciones diseminadas en cuanto a los contenidos metálicos y leyes. (SPCC, 2018) La mina cuenta con reservas probadas que alcanzan los 2 354 Mt de mineral, con una ley promedio de 0,541 % de Cu y 0,031 % de Mo; y 9 446 Mt de desmonte que otorgan una vida útil a las operaciones de 54 años; donde el 80 % corresponde a sulfuros primarios y 20 % a sulfuros secundarios, y opera con una ley de corte de cobre de 0,39 %.

Tabla 1
Ley promedio de Cu y Mo por tipo de roca

Tipo de Roca	Ley Cu (%)	Ley Mo (%)
Diorita argilizada	0,44	0,01
Dacita porfirítica argilizada	0,56	0,02
Dacita porfirítica silicificada	0,78	0,03
Dacita porfirítica con yeso anhidrita	0,61	0,03
Brecha argilizada	0,90	0,04
Brecha silicificada	1,54	0,04
Brecha silicificada con turmalina	0,69	0,03
Brecha silicificada con turmalina y yeso	1,07	0,08
Pebble brecha argilizada	0,91	0,02
Pebble brecha silicificada	0,62	0,03
Otros	0,66	0,00
Promedios ponderados	0,72	0,03

Fuente: SPCC, 2018.

Los programas de producción en la mina Toquepala a corto, mediano y largo plazo, están basados en los aspectos de capacidad de la mina, leyes de corte según el tipo de roca, relación de desbroce, dimensión de los equipos de producción, precios internacionales de los metales y otros. A partir de estos datos, se elabora el programa de producción de 600 Kt/día. Las operaciones unitarias de la mina Toquepala corresponden al proceso de perforación y voladura, carguío, acarreo, transporte y chancado (SPCC, 2018).

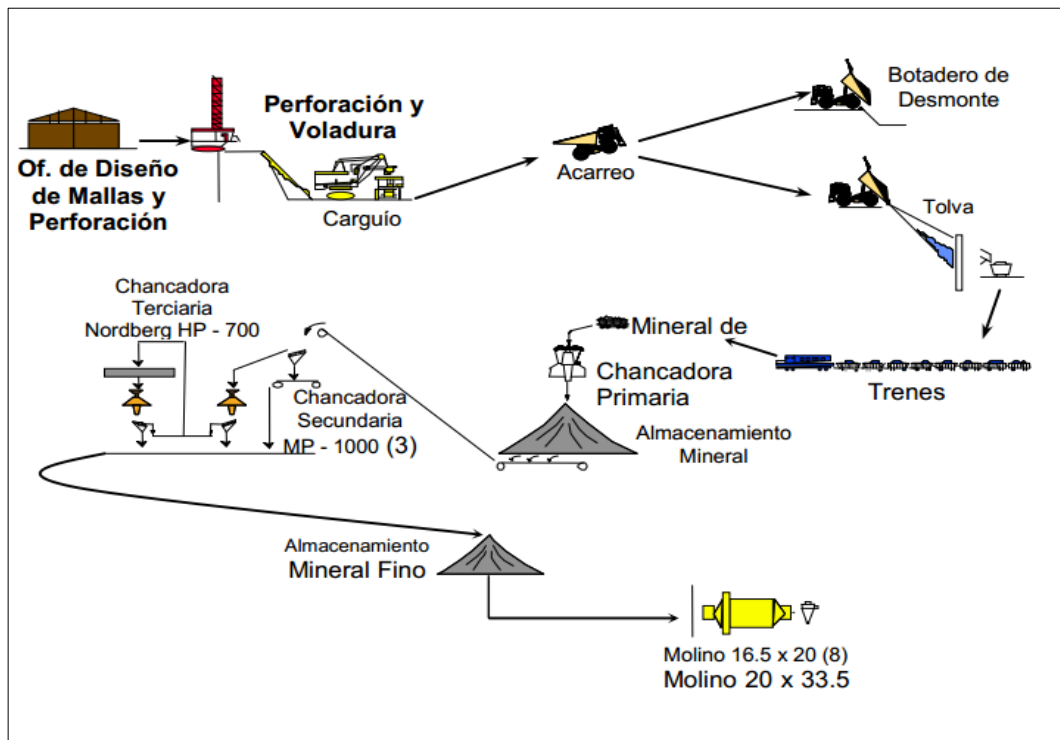


Figura 7. Diagrama de flujo de la operación en Toquepala
Fuente: SPCC, 2018.

- a) Perforación; sin una perforación ordenada y adecuada la voladura sería deficiente, lo que conlleva a una baja eficiencia en el carguío e impactando directamente a la producción. La mina Toquepala realiza el método de rotación y trituración; donde la exactitud de la operación depende del paralelismo y perpendicularidad, lo que repercutirá en el resultado de la fragmentación y control en las paredes finales del tajo.
- b) Voladura; se realiza dos tipos de voladura, en producción y para paredes finales, donde esta última corresponde a voladuras controladas con el fin de no dañar las paredes del tajo. Entre los principales factores que influyen en los resultados son: las propiedades del explosivo, distribución, secuencia de iniciación, geometría de disparo y las propiedades del macizo rocoso.

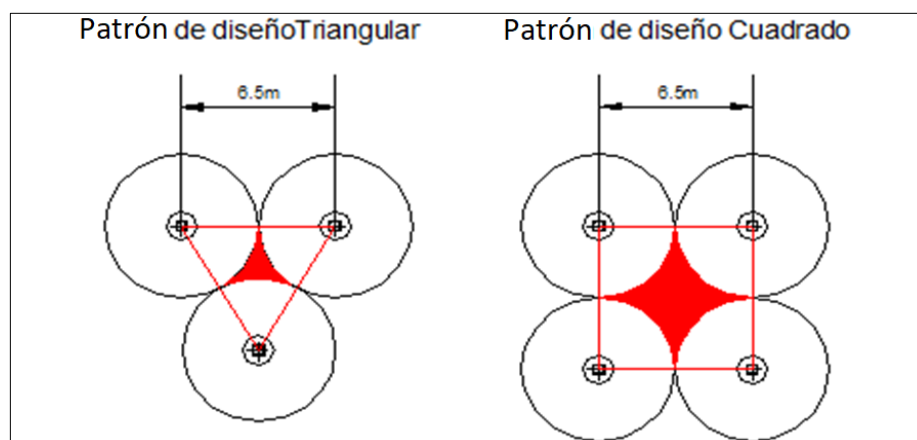


Figura 8. Patrones de voladura
Fuente: SPCC, 2018.

- c) Carguío; consiste en el recojo del material ya fragmentado para depositarlo en los volquetes, los mismos que se encargan de transportar el material hacia los destinos; si se trata de mineral, es enviado a la planta de chancado o pad de lixiviación, de lo contrario es enviado a los depósitos de desmonte o botadero.

- d) Acarreo; es el sistema de transporte que consiste en el uso de volquetes de acarreo de distintas capacidades. El sistema de acarreo es directo de la pala al camión, y sus destinos son hacia los botaderos, tolvas de mineral para chancado o tolvas de mineral lixiviable.

- e) Chancado; en la mina Toquepala, en función a las estadísticas de fragmentación, y los controles granulométricos que debemos tener en la planta de chancado, se define que el 80 % del material fragmentado debe estar en el orden de 30 cm a menos, solamente el 10 % del material volado debe de exceder el tamaño de 1 m a menos; y bajo estos rangos es que se definen los estándares y resultados de granulometría para el proceso de chancado primario.

- f) Molienda; posterior al chancado primario, consiste en reducir los fragmentos a materiales más finos; en las curvas de fragmentación, generalmente los porcentajes por debajo del tamaño medio son

considerados materiales finos; entonces, la voladura contribuye a la generación de finos para mejorar la operación de molienda.

2.2.2. Caracterización del macizo rocoso

La clasificación litológica se basa en la presencia de yeso anhidrita, la misma que presenta una configuración irregular de su tope. La presencia de yeso anhidrita favorece al macizo rocoso, porque actúa como cementante en las fisuras, generando mayor solidez y estabilidad del macizo rocoso. La siguiente clasificación, configura las rocas presentes en la mina Toquepala en rocas o brechas con yeso, brechas sin yeso, rocas volcánicas y rocas intrusitas, esta última, catalogada en dos modalidades.

Existen muchas formas de efectuar una clasificación del macizo rocoso, en todas ellas, prima las agrupaciones por semejanza en litologías y propiedades volumétricas y geomecánicas, así como también el hecho de pertenecer a un mismo dominio estructural (tabla 2). La zonificación geomecánica de la mina Toquepala está basada en la caracterización de la masa rocosa, especialmente las características estructurales establecidas a partir de un mapeo geotécnico; a fin de conocer la calidad

de la masa rocosa, determinada por la clasificación geomecánica (RMR); planos topográficos y geológicos proporcionadas por la mina Toquepala con sus respectivas observaciones in situ realizadas durante el mapeo geotécnico (SPCC, 2018).

Tabla 2
Clasificación del macizo rocoso mina Toquepala

	Tipos de rocas existentes	Símbolo	Perforación	Voladura
Rocas con yeso	Brecha con yeso anhidrita	Bx-G/A	D	D
	Brecha turmalina con yeso anhidrita	BxT-G/A	D	D
	Diorita con yeso anhidrita	DiBx-G/A	D	D
	Diorita con brecha y yeso anhidrita	Di-G/A	D	D
	Dacita con yeso anhidrita	Dp-G/A	D	D
	Pebble brecha con yeso anhidrita	PxSil-G/A	D	D
Brechas sin yeso	Brecha angular sericitizada	Bx-Qs	M	S
	Brecha angular silicificada	Bx-Sil	M	S
	Brecha turmalina	BxT	M	M
	Pebble brecha silicificada	Px-Sil	M	S
Rocas Volcánicas	Pórfido cuarífero Quellaveco	Qq	M	M
	Dolerita Toquepala	Td	M	M
	Andesita Toquepala	Ta	S	M
	Andesita Toquepala silicificada	Ta-Sil	M	D
	Riolita Toquepala silicificada	Tr	S	M
	Riolita Toquepala	Tr-Sil	M	M
	Pórfido cuarífero Toquepala	Tq	M	M
	Alta andesita	Aa	M	M
Intrusivo (a)	Diorita propílica	Di-Prop	M	D
	Diorita sericitizada	Di-Qs	S	S
Intrusivo (b)	Dacita aglomerada	Da	M	D
	Pebble brecha	Px	M	D
	Latita porfírica	Lp	M	D

Fuente: SPCC, 2018.

Tabla 3
Propiedades del macizo rocoso

Tipo de Roca	Densidad (t/m³)	Peso específico (KN/m³)	Porosidad (%)	Absorción (%)
Diorita argilizada	2,27	25,21	6,40	2,25
Brecha angular argilizada	2,73	26,18	2,22	2,24
Pebble brecha argilizada	2,56	25,11	6,51	2,32
Latita porfirítica	2,60	25,51	1,60	0,60
Dacita porfirítica silicificada	2,57	25,21	2,18	0,86
Dacita aglomerada	2,51	24,62	6,45	2,53
Toquepala andesita	2,55	25,02	-	0,69
Dacita porfirítica argilizada	2,31	22,66	3,15	1,85
Cuarzo Quellaveco silicificado	2,64	25,90	2,55	0,98
Brecha angular silicificada	2,68	26,29	1,85	0,83
Toquepala riolita	2,41	23,69	-	-
Pebble brecha silicificada	2,62	25,70	5,79	3,45
Dacita porfirítica con G/A	2,74	26,88	-	1,20
Brecha Ang. Sil. con turma. y G/A	2,67	26,19	-	-
Brecha Ang. Sil. con turmalina	2,68	26,29	2,14	-

Fuente: SPCC, 2018.

La calidad del macizo rocoso está relacionada directamente a las alteraciones, propiedades geomecánicas y la frecuencia de fracturamiento, de esta forma el macizo rocoso con contenido de rocas volcánicas y de yeso anhidrita, son de muy buena calidad, con valores de RMR entre 93 y 81,62 respectivamente. Finalmente, las rocas volcánicas, poseen una

buena calidad, con un RMR de 66,18 (SPCC, 2018). Los sectores donde se encuentran las zonas inestables tienen una calidad de mala a muy mala, cuyos valores de RMR, se encuentran por debajo del 22 (tabla 4).

Tabla 4
Caracterización geomecánica de la mina Toquepala

Macizo Rocoso		(GSI)	(RMR)	Calidad (RMR)	Clase	RC	RT
Rocas Yeso Anhidrita	G/A	88,00	93,00	I	Muy Buena	179,20	8,80
Promedio		88,00	93,00	I	Muy Buena	179,20	8,80
Rocas Intrusivas							
Dacita Aglomerada	Da	87,00	92,00	I	Muy Buena	179,20	7,80
Dioritas	Di	79,00	84,00	II	Buena	152,90	5,20
Pebble Brecha	Px	63,85	68,85	II	Buena	136,90	12,10
Promedio		76,62	81,62	I	Muy Buena	156,33	8,37
Rocas Volcánicas							
Pórfido Cuarzífero	Tq	73,00	78,00	II	Buena	122,30	5,50
Alta Andesita	Aa	54,20	59,20	III	Regular	131,90	13,30
Toquepala Andesita	Ta	65,95	70,95	II	Buena	120,90	12,80
Riolita Toquepala	Tr	57,10	62,10	II	Buena	72,50	6,10
Dolerita Toquepala	Td	62,80	67,80	II	Buena	61,20	11,80
Cuarzo Quellaveco	Qq	54,00	59,00	III	Regular	57,10	8,20
Promedio		61,18	66,18	II	Buena	94,32	9,62
Descripción				Criterios de Clasificación RMR			
RMR: Clasificación Geomecánica de Bieniawski (1989)				Calidad	Clase	Valoración	
SMR: RMR Modificado para taludes rocosos (Romana 1985)				Muy mala	V	0 a 20	
RC: Resistencia a la compresión (MPa)				Mala	IV	21 a 40	
RT: Resistencia a la Tracción (MPa)				Regular	III	41 a 60	
				Buena	II	61 a 80	
				Muy Buena	I	81 a 100	

Fuente: SPCC, 2018.

La caracterización de la masa rocosa es una herramienta indispensable para la voladura de rocas, muy aparte de la clasificación en términos de resistencia, basado en la compresión uniaxial, que en algunos casos pueden ser altos, entre R4 y R5, dependiendo de la caracterización de la roca intacta; por lo cual, es importante categorizar al macizo rocoso en valores de RMR, el cual define con mayor aceptación la calidad de roca, basado en muchos factores y variables (Ortiz, 2009).

Tabla 5
Propiedades mecánicas del macizo rocoso

Tipo de Roca	Compresión (MPa)	Tracción (MPa)	Ángulo fricción interna (°)	Cohesión (MPa)
Diorita argilizada	77,69	10,50	49,63	145,61
Brecha angular argilizada	125,16	11,89	55,74	128,83
Pebble brecha argilizada	44,79	4,93	53,50	75,75
Latita porfírica	107,48	17,20	46,40	219,19
Dacita porfírica silicificada	129,91	16,91	50,32	238,98
Dacita aglomerada	103,80	14,32	49,25	196,55
Toquepala andesita	179,92	22,49	51,06	324,31
Dacita porfírica argilizada	30,42	4,03	49,98	56,84
Cuarzo Quellaveco silicificado	118,17	15,97	49,63	221,40
Brecha angular silicificada	94,52	13,13	49,12	179,61
Toquepala riolita	136,06	18,14	49,88	253,32
Pebble brecha silicificada	95,30	13,18	49,20	180,70
Dacita porfírica con G/A	152,97	18,43	51,72	270,69
Brecha Ang. Sil. con turma. y G/A	74,18	8,61	52,38	253,16
Brecha Ang. Sil. con turmalina	138,67	17,78	50,60	252,19

Fuente: SPCC, 2018.

Tabla 6
Velocidad de propagación por macizo rocoso

Tipos de rocas existentes		Calidad (RMR)	Clase	Vp (m/s)
Rocas con yeso	Brecha con yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 851
	Brecha turmalina con yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 863
	Diorita con yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 911
	Diorita con brecha y yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 830
	Dacita con yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 868
	Pebble brecha con yeso anhidrita	I	Muy Buena	4 901
Brechas sin yeso	Brecha angular sericitizada	IV	Malo	2 115
	Brecha angular silicificada	III	Medio	2 359
	Brecha turmalina	III	Medio	2 953
	Pebble brecha silicificada	III	Medio	2 986
Rocas Volcánicas	Pórfido cuarcífero Quellaveco	III	Medio	2 207
	Dolerita Toquepala	II	Medio	2 315
	Andesita Toquepala	II	Buena	2 806
	Andesita Toquepala silicificada	II	Buena	2 134
	Riolita Toquepala silicificada	II	Buena	2 118
	Riolita Toquepala	II	Buena	2 114
	Pórfido cuarcífero Toquepala	II	Buena	3 207
	Alta andesita	III	Medio	2 204
Intrusivo (a)	Diorita propílica	II	Buena	3 144
	Diorita sericitizada	IV	Malo	2 134
Intrusivo (b)	Dacita aglomerada	I	Muy Buena	4 834
	Pebble brecha	II	Buena	3 995
	Latita porfírica	II	Buena	3 656

Fuente: SPCC, 2018.

Para obtener buenos resultados en las voladuras, es importante que el Ingeniero encargado tenga un alto grado de experiencia, conocimiento, interpretación y análisis, para implementar modelos de caracterización del macizo rocoso, y relacionarlo directamente a la acción del explosivo y mecánica de fragmentación; esta interrelación de conceptos, jugarán un papel muy preponderante. En la tabla 6, se observa la velocidad de propagación por macizo rocoso. Con los parámetros estudiados de la caracterización del macizo rocoso, se determina la velocidad de propagación para cada tipo de roca, que es el comportamiento de la facilidad o resistencia a la transmisión de las ondas en el macizo rocoso.

Cuando el macizo rocoso es masivo, se tiene valores altos de velocidad de onda, y cuando es fracturado e irregular, decrecen los valores, puesto que la presencia de fracturas actúa como filtros que amortiguan y atenúan la transmisión y continuidad de las ondas, ambos efectos deben ser tomados en cuenta para los diseños de mallas de voladura, explosivo a usar, y el análisis continuo de la mecánica de rotura. La velocidad de propagación es un parámetro para seleccionar el explosivo adecuado, lo que permite efectuar relaciones de impedancia, entre la velocidad de detonación de un explosivo, y la velocidad de propagación (Quispe, 2018).

2.2.3. Variables geomecánicas que influyen en la voladura

El objetivo de la voladura es alcanzar la fragmentación requerida con el mínimo de daño posible al macizo rocoso remanente; por ello, el avance tecnológico desarrolló nuevas técnicas para minimizar los daños al macizo rocoso remanente, generadas bajo el concepto de voladura controlada, que se enfoca en la correcta distribución de carga, tiempos de retardos y secuencia de detonación de acuerdo con las características geomecánicas que presenta la zona de interés.

Donde se establecen las principales variables geomecánicas que influyen en los resultados de la voladura, estas son la resistencia a la compresión de la roca, el espaciamiento y persistencia de los sistemas de discontinuidades, y la presencia de agua subterránea, que es un factor limitante en el rendimiento de la voladura; bajo estas variables geomecánicas se clasifica la calidad del macizo rocoso, necesarias para cuantificar las variables geomecánicas a fin de realizar el diseño geométrico de la perforación y distribución de carga explosiva. La influencia de las variables geomecánicas en los resultados de la voladura se estudian a partir de 2 aspectos diferidos, desde los resultados de interacción interna mediante el criterio de daño, y los aspectos de interacción externa,

mediante el control de daños a estructuras colindantes. Con respecto a la interacción interna, las variables influyentes son la densidad de la roca, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de Young de la roca intacta y velocidad de onda P; estos parámetros nos permitirán determinar el PPV crítico del macizo rocoso de acuerdo con la zonificación espacial.

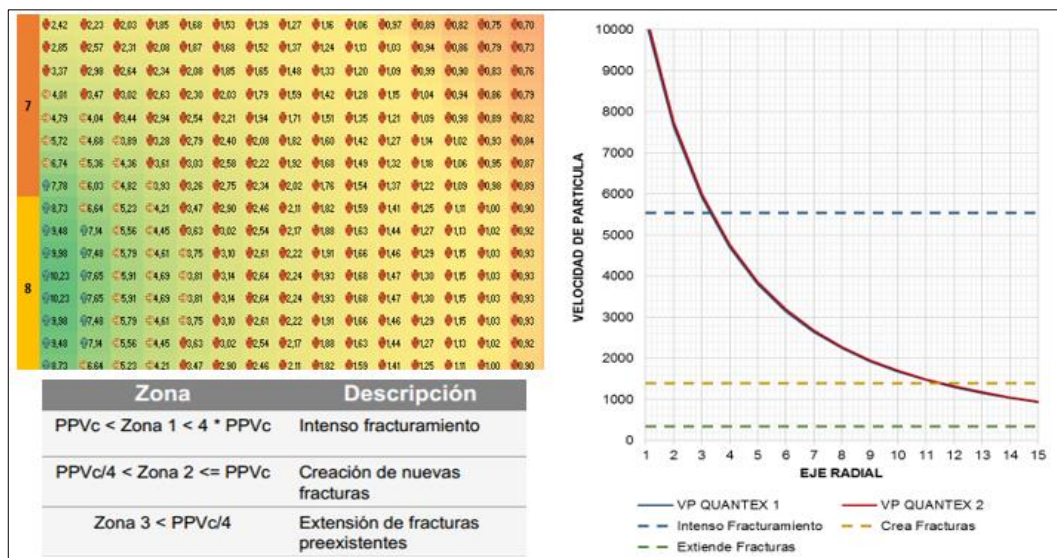


Figura 9. Análisis crítico de daño
Fuente: Delion, 2020.

En la figura 9, se observa el resultado del análisis de criterio de daño correspondiente al diseño de malla, donde se identifica la zona de intenso fracturamiento con un radio de 3 m, y una zona de extensión de fractura con un radio de 10 m., mientras que en la figura 10, se observa la

simulación del fracturamiento generado en un taladro, según el criterio de velocidad de partícula crítica de Mackenzie. Desde esta perspectiva el estudio del tiempo de retardo de acuerdo con las condiciones geomecánicas del macizo rocoso son de vital importancia para el mecanismo de fracturamiento, debido a que permite una adecuada superposición de los radios generados en el proceso de fragmentación.

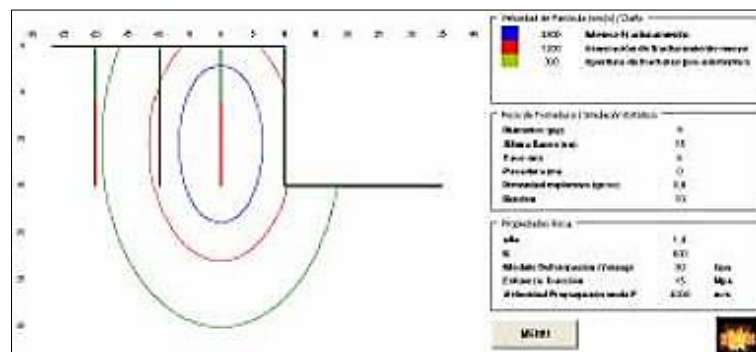


Figura 10. Criterio de daño en un taladro
Fuente: Gutiérrez, 2014.

Con respecto a la interacción externa, las variables influyentes son la caracterización geomecánica del macizo rocoso y el mapeo estructural de bancos e infraestructura colindante al proyecto de voladura, puesto que estos parámetros nos permitirán determinar el daño estructural generado por el proceso de voladura, y con el soporte de programas geotécnicos, se evaluará el estado de estabilidad de acuerdo con las condiciones observadas.

2.2.4. Detonadores pirotécnicos

Los detonadores pirotécnicos muestran un grado de dispersión igual o menor que los detonadores eléctricos. Sin embargo, dependiendo del período del retardo, y de la combinación de los retardos de superficie usados entre los taladros y entre filas, la dispersión absoluta en los tiempos de iniciación logra exceder significativamente a los detonadores eléctricos. Una adecuada selección del elemento del sistema pirotécnico permitirá que se inicien en forma segura las voladuras masivas fácilmente, lo que es posible con la iniciación eléctrica (Bernaola, Castilla y Herrera, 2013).

La principal razón del uso de sistemas de iniciación no eléctricos en voladuras masivas se debe a la probabilidad del traslape, que permanece constante en toda la voladura e indiferente respecto al tamaño de las voladuras y el número de taladros que detonan en un mismo tiempo, se reduce significativamente en comparación con el mismo diseño iniciado con detonadores eléctricos. Hoy en día, la voladura de rocas presenta diferentes variables de desarrollo como la exactitud en el diseño de tiempos, formulado a través de la interacción de las velocidades de onda del macizo rocoso y la velocidad de agrietamiento, la interacción de tiempos se encuentra entre 2 a 6 milisegundos; tiempo que no es posible lograr con

los detonadores pirotécnicos, debido al porcentaje de dispersión, que es mucho mayor a 20 ms por retardo. Por lo tanto, no es posible establecer una secuencia de detonación, motivo por el cual, existe restricciones en los diseños de voladuras con detonadores pirotécnicos.

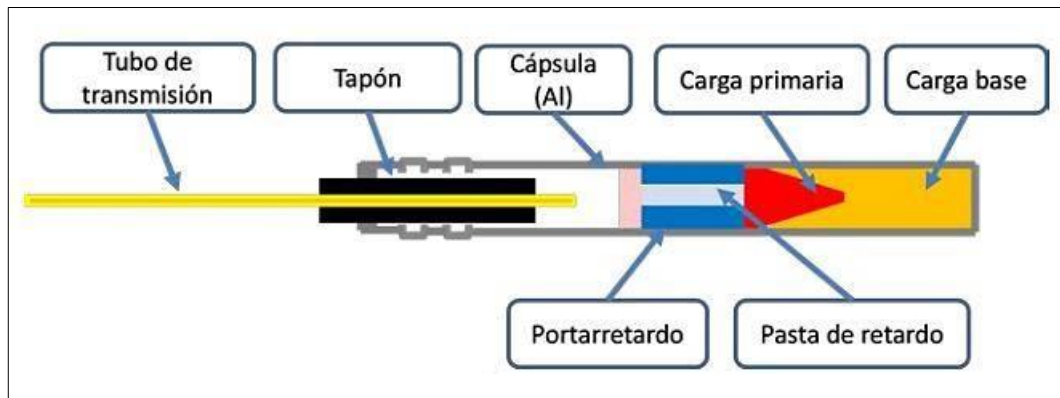


Figura 11. Partes de detonadores pirotécnicos
Fuente: Bernaola, Castilla y Herrera, 2013.

2.2.5. Detonadores electrónicos

Su función es detonar la carga explosiva, similar a un detonador pirotécnico, con la diferencia que presenta diferentes características. El detonador puede ser programable entre 0 a 15 000 ms, con un incremento de 1 milisegundo, dando oportunidad a un amplio manejo de tiempos de amarre y contando con una exactitud del retardo programado de 0,1 % de

milisegundos. Esto garantiza no tener traslapes, que guarda directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonadas simultáneamente (figura 12).



Figura 12. Detonador electrónico
Fuente: SPCC, 2018.

El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica que permite tener registrado cada detonador (figura 13). Se realiza la comunicación bidireccional entre el control del equipo y el detonador. Para registrar o conectar un detonador, los cables tienen que ser insertados dentro de las ranuras terminales del conector, cualquier cable podría ser insertado dentro de cualquier ranura, pero un solo cable por ranura (figura 14).

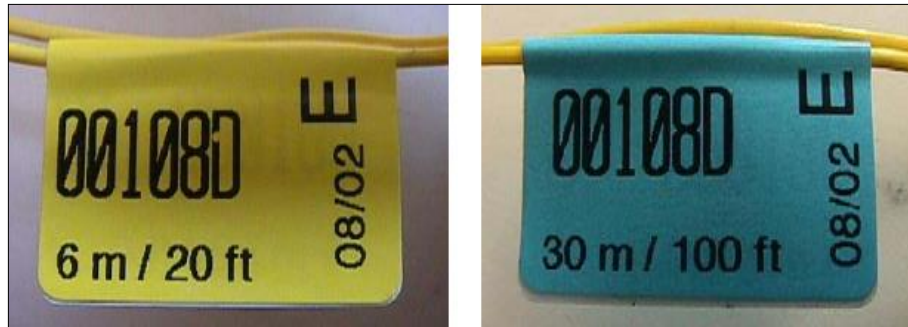


Figura 13. Número de serie del detonador electrónico
Fuente: SPCC, 2018.

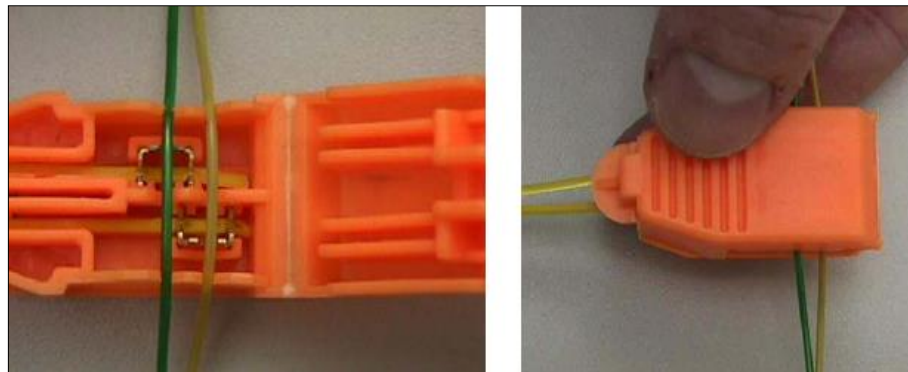


Figura 14. Conexión del detonador electrónico
Fuente: SPCC, 2018.

La detonación electrónica, consiste en diseñar un circuito de voladura cerrado bajo la acción del beneficio de los detonadores electrónicos, básicamente tiene los mismos principios de una detonación convencional, donde se busca crear caras libres dentro de la masa rocosa durante la voladura, controlando la energía explosiva disponible para obtener una mejor fragmentación; también debe estar referida a

proporcionar alivio y controlar el desplazamiento de la masa rocosa reduciendo las fracturas fuera de la última línea de taladros y la fractura de los extremos, y de esta forma tener un control adecuado en la vibración del terreno para no afectar las líneas de diseño de bancos (SPCC, 2018).

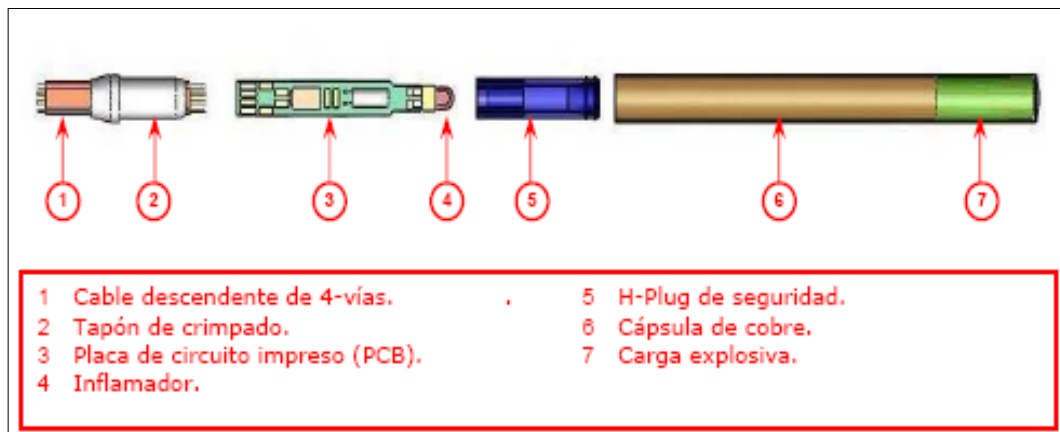


Figura 15. Estructura interna de un detonador electrónico
Fuente: SPCC, 2018.

2.2.6. Diseño de voladuras con detonadores electrónicos

2.2.6.1. Variables controlables en una voladura

Las variables controlables están en relación con los parámetros del explosivo, tales como la densidad, velocidad de detonación, transmisión o simpatía, resistencia al agua y entre otros; asimismo, es posible controlar

las variables de diseño como el diámetro, *burden*, espaciamento, diseño de carga explosiva, confinamiento, cebo, explosivo y otros; es decir, todos los parámetros de diseño manejable y modificables (Romero, 2016).

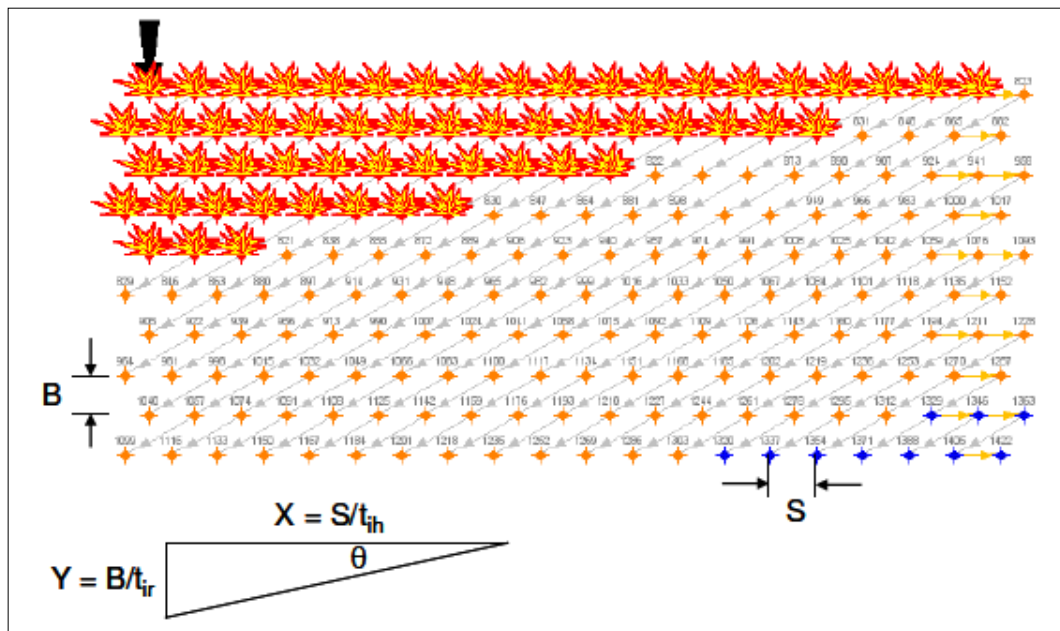


Figura 16. Detonación electrónica controlada
Fuente: SPCC, 2018.

2.2.6.2. Variables no controlables en una voladura

Se refieren a las características del macizo rocoso, en las que no se tiene el control de modificarlas, debido a que son intrínsecas, y tienen

resistencia a la compresión uniaxial de cualquier roca intacta, propiedades físicas y elásticas de la resistencia dinámica de rocas, condiciones geológicas, litológicas, estructurales del macizo rocoso, asimismo la presencia de aguas dinámicas subterráneas.

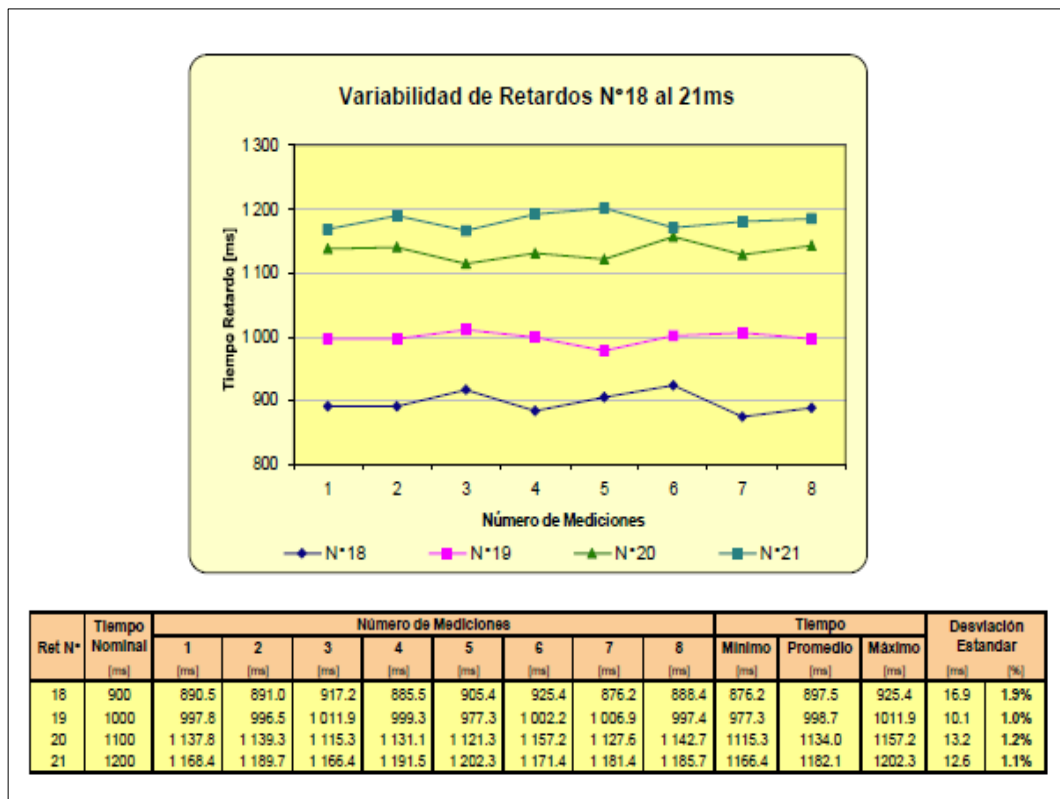
2.2.7. Ventajas del uso de detonadores electrónicos

Las ventajas que se obtienen son variadas y alcanzables en un periodo de corto plazo. Algunos beneficios adicionales se basan en la seguridad, flexibilidad y precisión (Romero, 2016).

- a) Mayor seguridad; cuando se logra la detección a tiempo de tiros quedados, cortes de cables de disparo, errores antes del tapado; y la generación de un reporte post voladura.
- b) Mayor flexibilidad; presenta la capacidad de iniciar voladuras masivas, flexibilidad en el diseño de voladura, cero stocks en los retardos de mina, mayor rapidez de amarre de taladros de campo y facilidad de conexión independiente de la secuencia de detonación.
- c) Mayor precisión; en los tiempos de retardo y control de vibración en la paredes temporales y finales del tajo.

2.2.8. Desviaciones de tiempos

En las voladuras con el sistema de detonadores electrónicos no existe traslape, ni montaje de cargas explosivas, debido a que el porcentaje de dispersión de los tiempos de retardo es cero, entonces, cada carga explosiva, detona en un intervalo de tiempo relacionado al diseño establecido, lo que repercute en los resultados de la voladura.



Ret N°	Tiempo Nominal [ms]	Número de Mediciones								Tiempo			Desviación Estándar	
		1 [ms]	2 [ms]	3 [ms]	4 [ms]	5 [ms]	6 [ms]	7 [ms]	8 [ms]	Mínimo [ms]	Promedio [ms]	Máximo [ms]	[ms]	(%)
18	900	890.5	891.0	917.2	885.5	905.4	925.4	876.2	888.4	876.2	897.5	925.4	16.9	1.9%
19	1000	997.8	996.5	1011.9	999.3	977.3	1002.2	1006.9	997.4	977.3	998.7	1011.9	10.1	1.0%
20	1100	1137.8	1139.3	1115.3	1131.1	1121.3	1157.2	1127.6	1142.7	1115.3	1134.0	1157.2	13.2	1.2%
21	1200	1168.4	1189.7	1166.4	1191.5	1202.3	1171.4	1181.4	1185.7	1166.4	1182.1	1202.3	12.6	1.1%

Figura 17. Dispersión del retardo de taladro de 600 ms
Fuente: SPCC, 2018.

Sabiendo que la secuencia de detonación en “V” es la que ha brindado mejores resultados en cuanto a fragmentación. La configuración de tiempos son los que determinan el grado de apilamiento y acomodo de material, la dirección de desplazamiento, el perfil del material y el control de vibraciones. La detonación secuencial, está basado en el ordenamiento de salida de taladros de una voladura asociado al concepto de caras libres (SPCC, 2018).

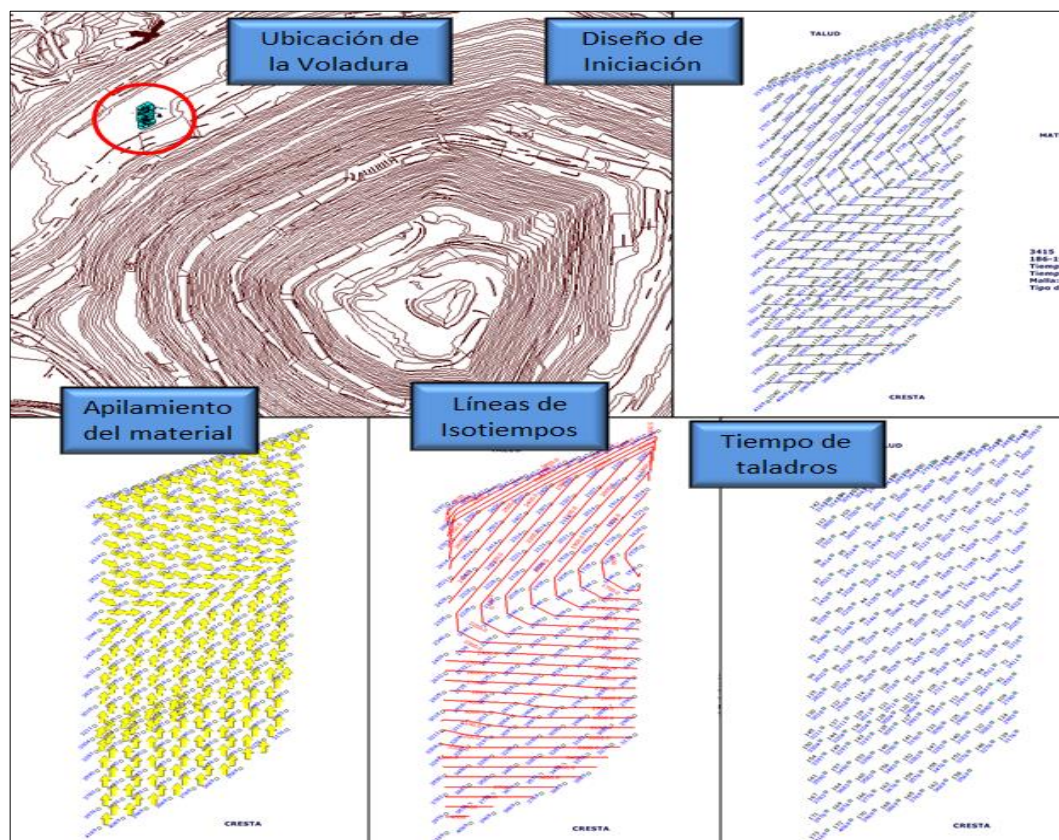


Figura 18. Diseño de secuencia de voladura
Fuentes: SPCC, 2018.

La detonación secuencial nos permite controlar la energía del explosivo durante la detonación, confinar la energía del explosivo y mantener la energía del explosivo al máximo; logrando asegurar energía suficiente para vencer la fuerza estructural del macizo rocoso y así obtener desplazamientos adecuados (Quispe, 2018).

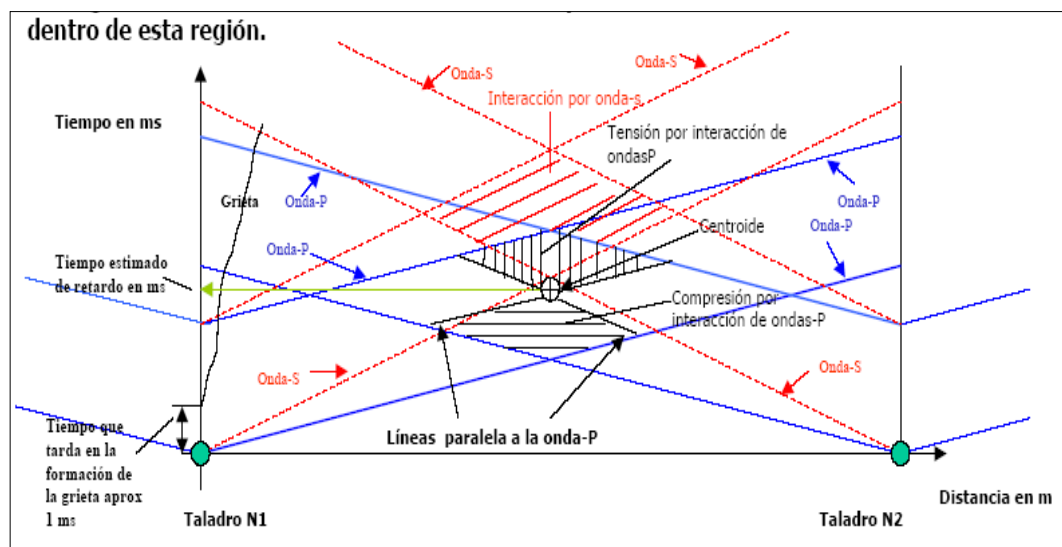


Figura 19. Interacción de ondas
Fuente: SPCC, 2018.

La velocidad con la que se propaga la onda de tensión o de choque a través del macizo rocoso, es muy importante porque afecta a la distribución de tensiones. Cuando el macizo rocoso es masivo, se tiene valores altos de velocidad de onda, y cuando es fracturado e irregular, decrecen los valores de velocidad de propagación, por la presencia de

fracturas que interactúan como filtros que atenúan y amortiguan la continuidad y transmisión de las ondas. La velocidad de propagación es un parámetro, que no solamente sirve para seleccionar el explosivo adecuado, a través de relaciones de impedancia, sino también interviene directamente en el cálculo del tiempo de cada taladro, relacionado la velocidad de grieta con la interacción de la detonación (Exsa SA, 2009).

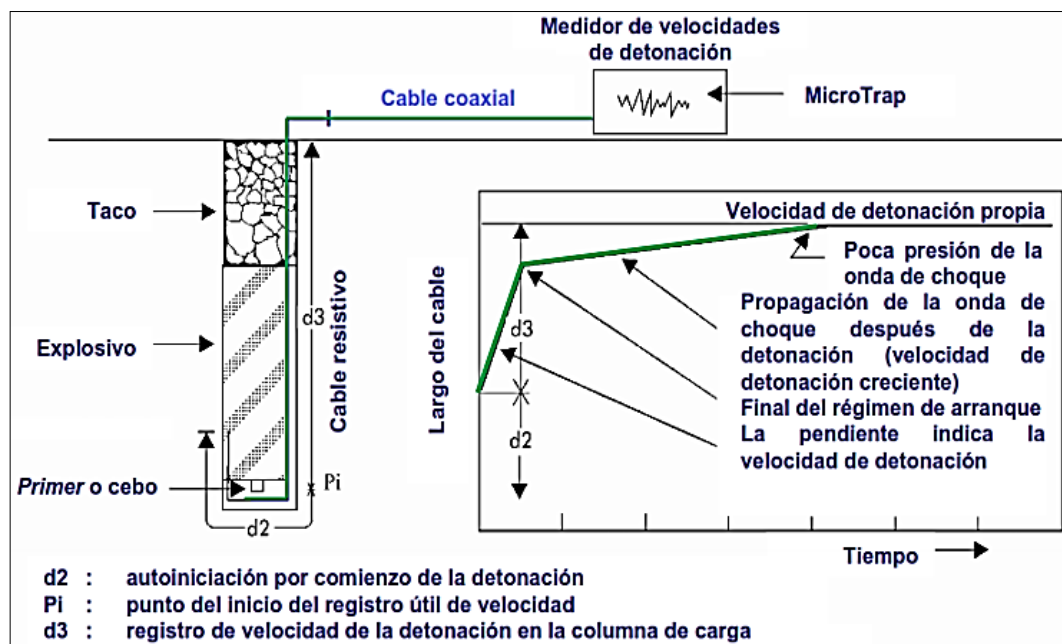


Figura 20. Método de medición de velocidad de detonación
Fuente: Exsa SA, 2009.

No se debe olvidar que los tiempos de retardo y el secuenciamiento de la voladura son los que determinan el grado de apilamiento, acomodo de material, la dirección de desplazamiento y el control de vibraciones.

2.2.9. Control de vibraciones

La detonación de la carga explosiva produce energía de gas y de choque; la onda de choque, en mayor proporción es el responsable de las vibraciones, a su vez está compuesto por ondas de compresión, transversales y superficiales. Las ondas se trasladan con sus respectivas características de movimiento y a diferentes velocidades; produciendo tensiones y deformaciones, generando de esta forma una perturbación al macizo rocoso, infraestructuras y personas circundantes a la voladura.

Para controlar la vibración durante la voladura es necesario que los tiempos de retardo a cada taladro, aseguren las vibraciones de la detonación y se disipen, antes que detone el siguiente taladro. Logrando controlar los efectos independientes de cada taladro, y por consiguiente los niveles de vibración. Como observación en la práctica, las rocas quebradizas y competentes requieren tiempos de retardo más cortos en relación con las rocas blandas y altamente fracturadas. Respecto a los detonadores electrónicos la dispersión es insignificante, esto significa que el uso de la energía del explosivo permitirá reducir la vibración, porque no existe superposición de taladros (Romero, 2016).

2.2.10. Fragmentación

La fragmentación de macizo rocoso producto de las voladuras comprende a la acción de un explosivo y la respuesta de la masa de roca circundante, influenciadas por factores de energía termodinámica como tiempos, ondas de presión, mecánica de roca y otros, en un rápido complejo mecanismo de interacción (Romero, 2018).

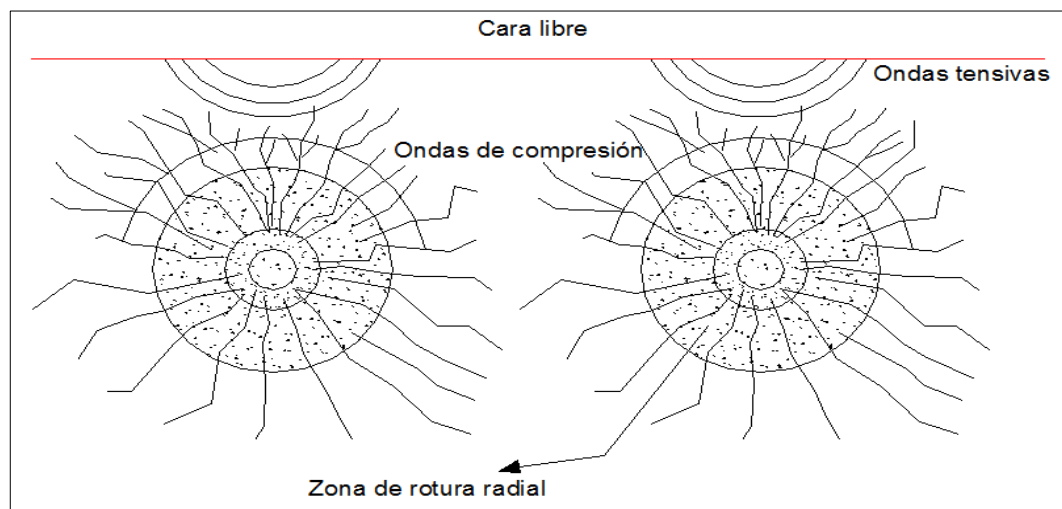


Figura 21. Mecánica de fragmentación
Fuente: Exsa SA, 2009.

Para obtener buenos resultados en la fragmentación es vital que los taladros detonen a una secuencia adecuada y asignada. Si se le asigna un solo tiempo a toda una fila de taladros, las grietas crecerán entre taladros,

pero no hacia la cara libre. Entonces, el burden se moverá como una gran hoja de roca, con insuficiente fragmentación en el burden. Si se asigna un único tiempo a cada taladro; la detonación de cada taladro fragmentará la roca circundante correspondiente, y del mismo modo se reflejará en las filas. Logrando optimizar el tiempo de retardo de cada taladro relacionado con la velocidad de interacción y fragmentación del macizo rocoso.

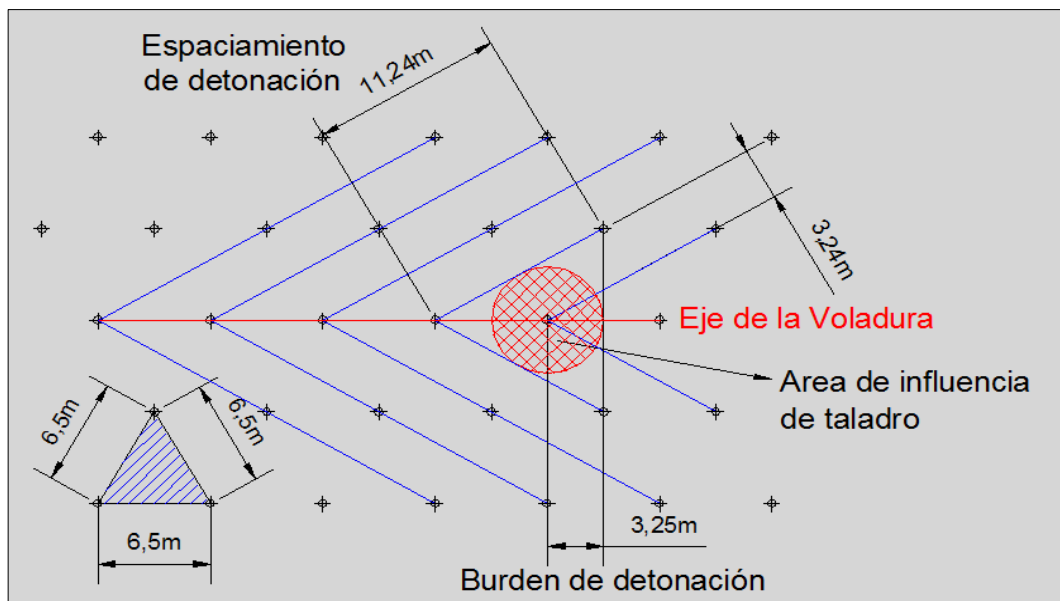


Figura 22. Configuración de *burden* de detonación
Fuente: SPCC, 2018.

Para obtener una mejora en la fragmentación del macizo rocoso, es necesario asignar un intervalo de tiempo adecuado. En la figura 23, se observa el comportamiento de las ondas en las fases de rotura del taladro.

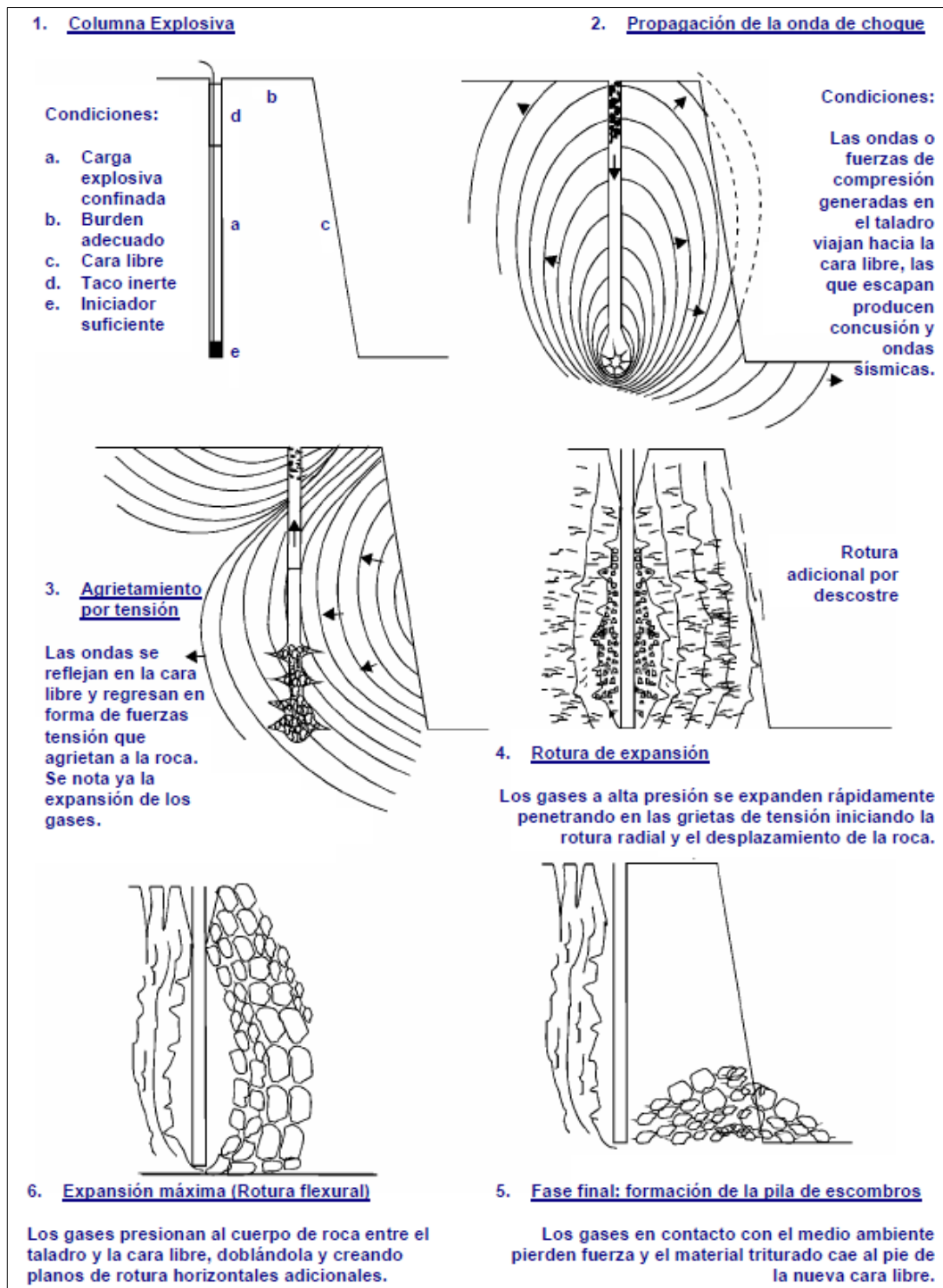


Figura 23. Fases de rotura de un taladro
Fuente: Exsa SA, 2009.

Las ondas se mueven a altas velocidades en las rocas competentes y masivas, respecto a las rocas débiles y altamente fracturadas. Donde se puede concluir que la fragmentación depende de la resistencia y grado de fragmentación que presente el macizo rocoso. La velocidad de movimiento de la roca fragmentada de una malla de *burden* pequeño es más alto que una malla con *burden* más grande. Entonces, el diseño y la caracterización geomecánica define un intervalo óptimo de tiempos entre los taladros.

2.3. Definición de términos

2.3.1. RMR

Desarrollado por Bieniawski (1972) permite de forma sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de fácil medición, establecidos en el campo de manera rápida y con costos económicos mínimos. El método RMR incluye los parámetros de UCS, RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades, condición del agua subterránea y orientación de las discontinuidades. El RMR corresponde a la suma de los respectivos valores, hay versiones variadas de este parámetro (OSINERGMIN, 2017).

2.3.2. RQD

El RQD, es el índice de calidad de roca, y es uno de los sistemas más empleados para realizar la caracterización del macizo rocoso. El RQD asigna un porcentaje de calificación al macizo rocoso, de 100 % para roca competente, y 0 % para la roca menos competente o condición de suelo. El RQD fue desarrollado por Deere como una herramienta para estimar cualitativamente la calidad del macizo rocoso a partir de testigos de sondaje, y se define como el porcentaje de trozos intactos mayores a 10 cm en el largo total del sondaje, en el intervalo de testigo 1,5 m (figura 24).

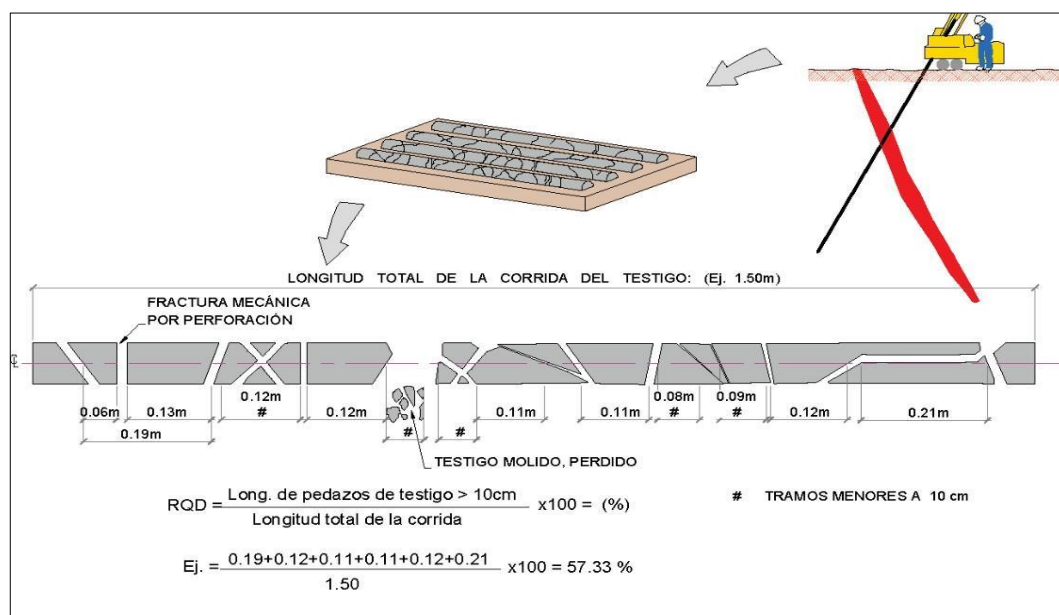


Figura 24. Proceso para evaluar el valor del RQD
Fuente: OSINERGMIN, 2017.

El espaciamiento de las juntas tiene una gran influencia sobre la estructura del macizo rocoso. La competencia de la roca va disminuyendo según va incrementando la cantidad de juntas, siendo este el factor más importante en esta disminución de la resistencia. Así resulta que un material rocoso de alta resistencia a la compresión de 100 a 200 MPa, que este muy fracturado con un espaciamiento de juntas de 5 cm, corresponde a un macizo rocoso débil (OSINERGMIN, 2017).

2.3.3. Resistencia dinámica a la compresión y tracción

La resistencia a la compresión define la fuerza bajo la cual una roca fallará por corte o cizalla. En otros términos, es la resistencia para sobrepasar a la rotura por presión, existen diversos factores que influyen a la resistencia a la compresión como la textura, tamaño de granos, forma de los granos y la presencia de agua dentro del macizo rocoso. Mientras que la resistencia a tracción logra obtener la rotura, cuando la velocidad de los esfuerzos es muy alta, la resistencia a la tracción y a la compresión se ven incrementados a valores que pueden estar entre 5 a 13 veces las resistencias estáticas, estos valores, son denominados resistencias dinámicas a la compresión y a la tracción (OSINERGMIN, 2017).

2.3.4. Macizo rocoso

Un macizo rocoso es un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo conformado en conjunto, tanto por bloques de matriz rocosa y distintos tipos de discontinuidades que lo afectan, ocurren en los medios ambientes geológicos y naturaleza, afectados principalmente por los planos de debilidad o discontinuidad, que distan a los bloques de la matriz rocosa; ambos conjuntos, la matriz rocosa y discontinuidades, forman parte del macizo rocoso (Iglesias, 2016).

2.3.5. Ángulo de fricción interna.

Como las rocas no constituyen un medio elástico, lo que genera que parte de la energía de las ondas de tensión, se propaguen y se transformen en calor por distintos mecanismos, y estos se denominan capacidad de amortización específica o fricción interna, que se encarga de medir la disponibilidad del macizo rocoso, para atenuar las ondas de tensión generadas por la detonación de un explosivo; la intensidad de fracturación está relacionada a la onda de tensión, ya que aumenta conforme se disminuye la fricción interna (OSINERGMIN, 2017).

2.3.6. Cohesión

La cohesión es el esfuerzo de corte necesario para generar el desplazamiento de bloques en cualquier parte de la diaclasa a esfuerzo normal cero, y está relacionada con la rugosidad que presenta la superficie de la diaclasa. Entonces se define cohesión de la roca intacta al grado de unión que tienen las moléculas de las rocas, aspecto que repercute en las resistencias dinámicas de las mismas (OSINERGMIN, 2017).

2.3.7. Nitrato de Amonio (NA)

Es una sal inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es 160,6 °C, aisladamente no es un explosivo, pues solamente adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una mínima cantidad de combustible y este reacciona violentamente con el NA, aportando oxígeno. El Nitrato de Amonio puede encontrarse en diversas formas, en la fabricación de explosivos se emplea aquel que se obtiene como partículas esféricas o *prills* porosos, porque posee mejores características para absorber y retener a los combustibles líquido, siendo fácilmente manipulable sin que se produzcan apelmazamientos y adherencias. La densidad del nitrato poroso a granel es aproximadamente 0,8 g/cm³ (Ortiz, 2009).

2.3.8. ANFO

En la actualidad, el ANFO es un explosivo convencional empleado en múltiples minas del mundo, cuya densidad está en el orden de 0,84 g/cm³ y cuya composición está basada en 94 % de NA y 6 % de Petróleo, y también es un ingrediente clave para la fabricación de ANFO Pesado (Ortiz, 2009).

2.3.9. ALANFO

Como la densidad del ANFO es baja, la energía que resulta por unidad de longitud de columna es pequeña, para elevar esa energía, desde 1968 se viene añadiendo a ese agente explosivo productos como el aluminio con unos buenos resultados técnicos y económicos; sobre todo, cuando las rocas son masivas y los costos de perforación altos. En estos agentes explosivos, la pureza no es tan crítica como en los hidrogeles, esto implica que restos o desechos de aluminio de otros procesos pueden emplearse en la fabricación del ALANFO. El límite inferior de tamaño es debido a que si el aluminio está en forma de polvo pueden producirse explosiones incontroladas (Ortiz, 2009).

2.3.10. Acoplamiento

El acoplamiento es el grado de interacción entre el taladro, explosivo y el macizo rocoso que lo rodea. Cuando el diámetro del explosivo es menor que el del taladro, se dice que la carga está desacoplada; por lo tanto, se define la razón entre el volumen de la carga y del taladro. Los explosivos cargados a granel, como el ANFO, tienen un factor de acoplamiento igual a 1. Algunos autores lo definen como la razón de diámetro de la carga del taladro (Ortiz, 2009).

2.3.11. Factor de carga

Es la cantidad de explosivo en peso que se emplea para fragmentar una tonelada métrica de material de banco, por lo que es necesario aplicar técnicas de voladura, que permitan combinar la diversidad de etapas a desarrollarse en la rotura de macizos a fin de predisponer geotécnicamente el yacimiento y facilitar la explotación del mineral. Este indicador sirve para controlar costos y rendimientos del tipo de explosivo; siempre y cuando las demás variables presenten las mismas características (Ortiz, 2009).

2.3.12. Desplazamiento

Consiste en el movimiento de la masa rocosa triturada como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos hacia una dirección establecida según el diseño esperado (Ortiz, 2009).

2.3.13. Cara libre

Superficie que está en contacto con el medio ambiente (figura 25), y es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión reflejadas que provocan la fragmentación de la roca (Exsa SA, 2009).

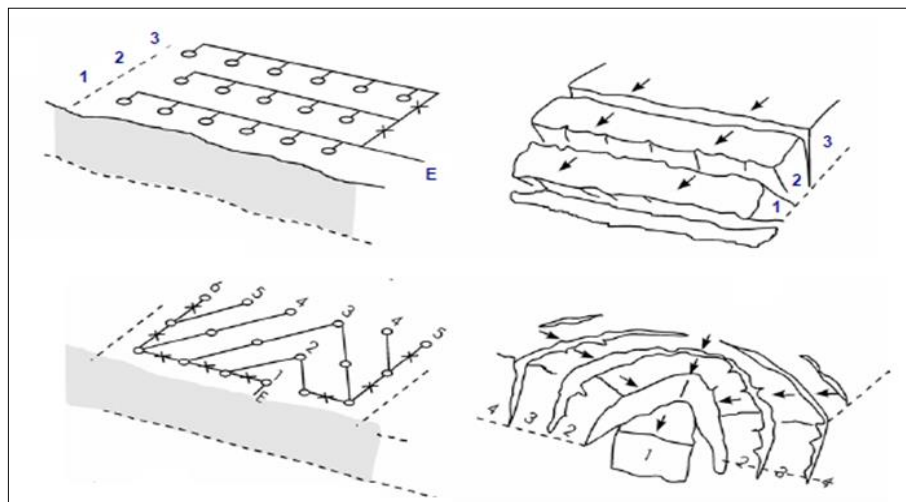


Figura 25. Secuencia de disparo con cara libre
Fuente: Exsa SA, 2009.

2.3.14. Impedancia

La impedancia es la relación de la densidad y velocidad sísmica del macizo rocoso, respecto a la densidad y velocidad de detonación del explosivo que va a fragmentar la roca. Los explosivos de alta VOD, son desarrollados para rocas de alta frecuencia sísmica (OSINERGMIN, 2017).

2.3.15. Parámetros de perforación y voladura

Los parámetros de perforación y voladura corresponden al diámetro de taladro, espaciamiento, *burden*, altura de banco, longitud de carga, taco y sobre perforación. En la figura 26, se observa la representación gráfica de los parámetros de perforación y voladura (Exsa SA, 2009).

- a) Diámetro; está definido por el diámetro de broca de perforación, equipo de perforación, altura de banco y amplitud de voladura. A medida que se incrementa el diámetro de los taladros, los costos de perforación, carga y explosivos generalmente bajan; también hace que la VOD aumente y se mantenga estable, pero a medida que baja el diámetro

de perforación existe una distribución más uniforme de la energía en los taladros; permitiendo también efectuar voladuras selectivas.

- b) Espaciamiento; es la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al *burden*. La distribución de la energía explosiva es óptima, cuando el espaciamiento es igual a 1,1 5 veces el *burden*, y el patrón está en forma triangular.
- c) *Burden*; corresponde a la distancia del taladro a la cara libre más cercana, orientando perpendicularmente a las líneas de los taladros. El *burden*, es determinado a partir de modelos matemáticos, en los cuales se consideran variables de diseño y variables del macizo rocoso.
- d) Altura de banco; relacionada con el diseño del equipo de minado, diámetro de perforación, geomecánica y ritmos de producción. En la actualidad, la gran minería presenta alturas de banco entre 20 a 30 m, lo que permite reducir la relación desbroce mineral.
- e) Longitud de taladro; corresponde a la longitud total de perforación; la profundidad del taladro debe reflejar la exactitud y estar de acuerdo con lo diseñado, los excesos no controlados en el proceso de perforación incrementan absurdamente los costos de esta operación.

- f) Taco; corresponde al material inerte que cubre la carga explosiva con la finalidad de confinar y retener la energía explosiva; reduciendo así el escape prematuro de gases, que viene a ser la energía que no es aprovechada y genera un costo.
- g) Sobre perforación; garantiza la rotura de la roca a nivel del piso diseñado, su dimensión se base en el concepto de cráteres invertidos, para ello es importante conocer las características del macizo rocoso y el grado de potencia del explosivo.

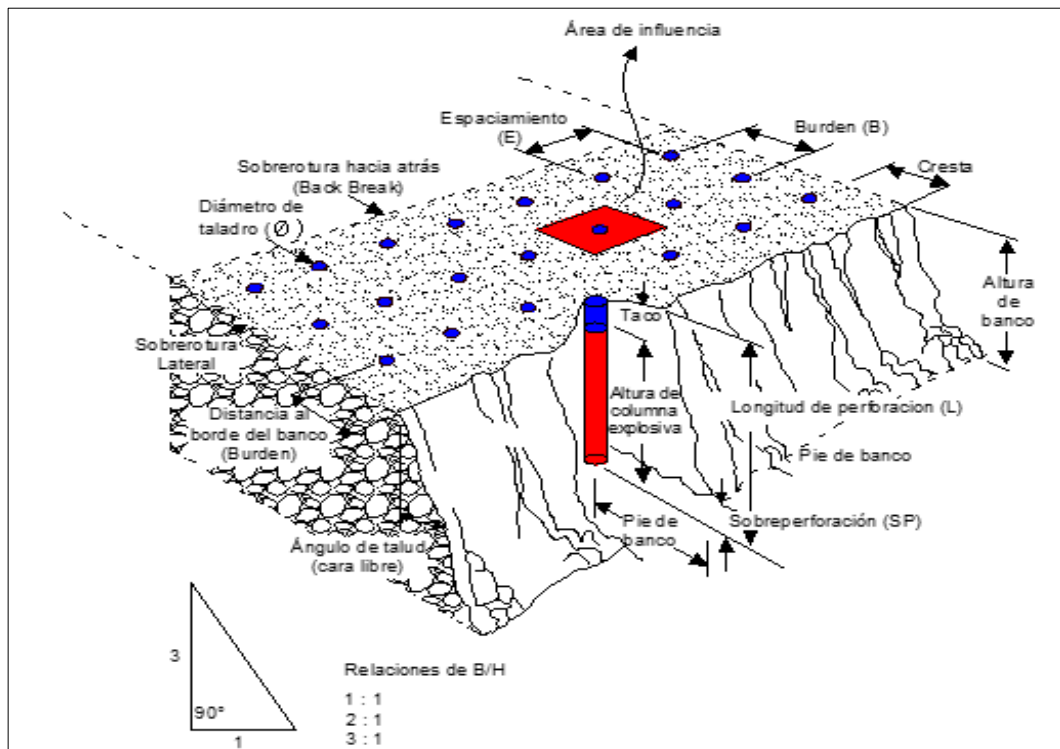


Figura 26. Parámetros de perforación y voladura
Fuente: Exsa SA, 2009.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Por el tipo de investigación, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, porque busca conocer y determinar la factibilidad de los beneficios que se obtiene en los costos de voladura y operaciones unitarias de la mina Toquepala, mediante la implementación de la detonación electrónica al proceso de voladura. Mientras que el diseño de investigación es de enfoque cuantitativo, y corresponde a un diseño de tipo experimental, por las características de recolección, medición y análisis de datos, para ser procesadas. La presente investigación pretende evaluar las bondades de la detonación electrónica, a fin de determinar su impacto en la fragmentación del macizo rocoso y su influencia en la reducción de costos unitarios.

3.2. Población y muestra

La población corresponde a las voladuras realizadas por el área de perforación y voladura de la mina Toquepala. Mientras que la muestra corresponde a los proyectos de voladura realizadas en las diferentes fases de desarrollo de la mina Toquepala. En la tabla 7, se observa el número de muestras de proyectos según detonador, y en la tabla 8, se observa el número de muestras de resultados obtenidos según detonador.

Tabla 7
Número de muestras de proyectos según detonador

Variables		Taladros	Tonelaje disparado	Explosivos	Accesorios
Unidad		und	t	Kg	und - m
Detonador	Pirotécnico	12	12	12	12
	Electrónico	8	8	8	8

Fuente: SPCC, 2018.

Tabla 8
Número de muestras de resultados según detonador

Variables		Fragmentación D90	Porcentaje bolonería	Vibración VPP	Velocidad minado efectivo	Factor carga	Tonelaje disparado
Unidad		cm	%	mm/s	t/h	kg/t	t
Detonador	Pirotécnico	12	12	12	12	12	12
	Electrónico	8	8	8	8	8	8

Fuente: SPCC, 2018.

3.3. Operacionalización de variables

En la presente investigación, se han definido las variables independientes, dependientes y asociadas; su definición operacional, indicadores y dimensiones, se detallan en las siguientes tablas. Las variables dependientes e independientes son materias de estudio, por lo tanto, se trata como data procesable, para evaluar estadísticamente su comportamiento y realizar el contraste de las hipótesis propuestas.

Tabla 9
Operacionalización de variables independientes

Operacionalización de variables independientes		
Variable	Operacional	Indicadores
Detonadores pirotécnicos	Corresponde al uso actual de detonadores pirotécnicos en los proyectos de voladura.	<u>Cantidad por proyecto</u> Detonadores pirotécnicos (und) Retardos en superficie (und) Boosters 1 libra (und) Cordón detonante (m) Mecha rápida (m) Fulminante (und)
Detonadores electrónicos	Corresponde a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en los proyectos de voladura.	<u>Cantidad por proyecto</u> Detonadores electrónicos (und) Cable eléctrico (m) Boosters 1 libra (und)

Fuente: Propia.

Tabla 10
Operacionalización de variables dependientes

Operacionalización de variables dependientes		
Variable	Operacional	Indicadores
Fragmentación	Corresponde a la fragmentación obtenida en los proyectos de voladura.	Fragmentación (P90) Bolonería (%)
Vibración	Corresponde a la vibración obtenida en los proyectos de voladura.	Vibración VPP (mm/s)
Costos unitarios	Corresponde a los costos de voladura y reflejados en los costos unitarios de minado, correspondiente al uso detonadores pirotécnicos e implementación estratégica de detonadores electrónicos.	Factor de carga (Kg/t) <u>Costos de voladura</u> Detonadores pirotécnicos (USD) Retardos en superficie (USD) Boosters 1 libra (USD) Cordón detonante (USD) Mecha rápida (USD) Fulminante (USD) Detonadores electrónicos (USD) Cable eléctrico (USD) Costo de voladura (USD) Costo unitario (USD/t) <u>Costos de minado</u> Ciclo de minado (min) Velocidad de minado efectiva (t/h) Voladura (USD/t) Carguío (USD/t) Acarreo (USD/t) Chancado (USD/t)

Fuente: Propia.

Las variables asociadas, corresponde a las variables que interfieren en la evaluación de las variables independientes y dependientes del proyecto, corresponde a la caracterización geomecánica del macizo rocoso; y al diseño de malla de perforación y simulación de la voladura. Si bien son variables que interfieren directamente en los resultados, para el presente estudio no son materia de estudio; por lo tanto, se tratará como información.

Tabla 11
Operacionalización de variables asociadas

Operacionalización de variables asociadas		
Variable	Operacional	Indicadores
Caracterización del macizo rocoso	Corresponde a las propiedades mecánicas del macizo rocoso, caracterización geomecánica de las estructuras del macizo rocoso y su comportamiento ante la propagación de ondas sísmicas y de rotura.	Densidad (t/m ³) Peso Específico (KN/m ³) Porosidad (%) Absorción (%) Tipo de Roca (#) Resistencia a la compresión (Mpa) Resistencia a la tracción (Mpa) Angulo de fricción (°) Cohesión (Mpa) Calidad RQD y RMR (%) Velocidad de onda (m/s)
Diseño de P&V	Corresponde al diseño de la malla de perforación y voladura de proyectos realizados en la mina Toquepala.	Proyecto voladura (#) Tonelaje disparado (t) <u>Consideraciones técnicas de diseño</u> Burden y espaciamiento (m) Longitud de carga y taco (m) Cantidad de taladros por proyecto (und) Tiempos (ms) <u>Cantidad por proyecto</u> Petróleo (kg) Emulsión matriz (kg) Nitrato de amonio (kg)

Fuente: Propia.

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

El presente estudio se investigó mediante las técnicas de análisis descriptivo de las variables principales a través de la experimentación y observación. La experimentación, se centraliza en la implementación estratégica de los detonadores electrónicos a los proyectos de voladura.

Con la finalidad de realizar un muestreo y seguimiento adecuado de los resultados correspondientes al proyecto de estudio.

- a) Diseño de perforación; los parámetros de perforación corresponden al diámetro de perforación (11”), geometría de la malla de perforación (triángulo equilátero de 6,5 m), altura de banco (15 m) y sobre perforación (1,5 a 2 m). La distribución de energía explosiva es óptima, cuando se cumple la relación del espaciamiento a 1,15 veces el *burden*, con patrón de forma triangular.



Figura 27. Diseño de malla de perforación
Fuente: SPCC, 2021.

- b) Diseño de columnas explosivas; consideran las características mecánicas y estructurales del macizo rocoso.

Tabla 12
Propiedades del macizo rocoso

Características de la roca		Unidad	Valores
Densidad	ρ	g/cc	2,732
Resistencia a la compresión	Rc	MPa	187,33
Resistencia a la tensión	Rt	MPa	11,37
Módulo de elasticidad	E	GPa	54,67
Módulo de poisson	σ	GPa	0,23
Velocidad Sónica	Vp	m/s	4 851 a 500
Clasificación geomecánica			
Índice de masa rocosa	RMR	%	92,83
Índice de resistencia geológica	GSI	#	87,83
Tamaño de bloques			
Número de fracturas		Masivo	2 a 5 en 4 m
Frecuencia de fracturamiento			0,8 a 2,0 m

Fuente: SPCC, 2018.

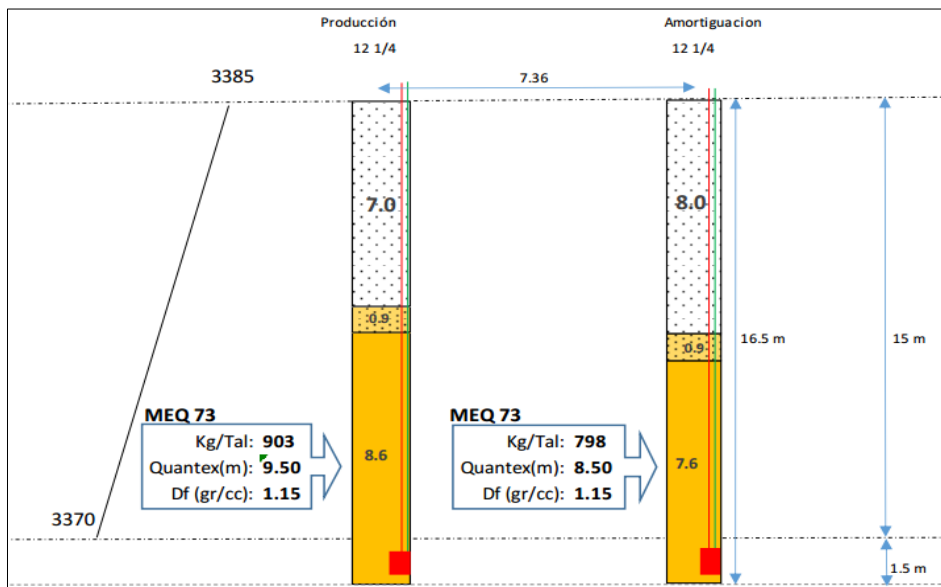


Figura 28. Diseño de carga explosiva
Fuente: SPCC, 2021.

- c) La mezcla explosiva Quantex; está conformada por la emulsión, nitrato de amonio y un agente sensibilizante en base a nitrito, semejante a las proporciones de mezcla explosiva en base al ANFO pesado 73, 70 % de emulsión y 30 % de ANFO, de acuerdo con los estudios realizados en las proporciones de mezcla, son las más estables y tienen mejor efecto rompedor (figura 29).



Figura 29. Control de mezcla explosiva
Fuente: SPCC, 2018.

- d) Secuencia de detonación; la mina Toquepala ha optado por las secuencias en “V” y echelon, según diseño de la perforación. En la figura 30, se observa la secuencia de detonación simulado en el programa JKSIMBLAST, y en la figura 31, la dirección del apilamiento que tomará el material volado.

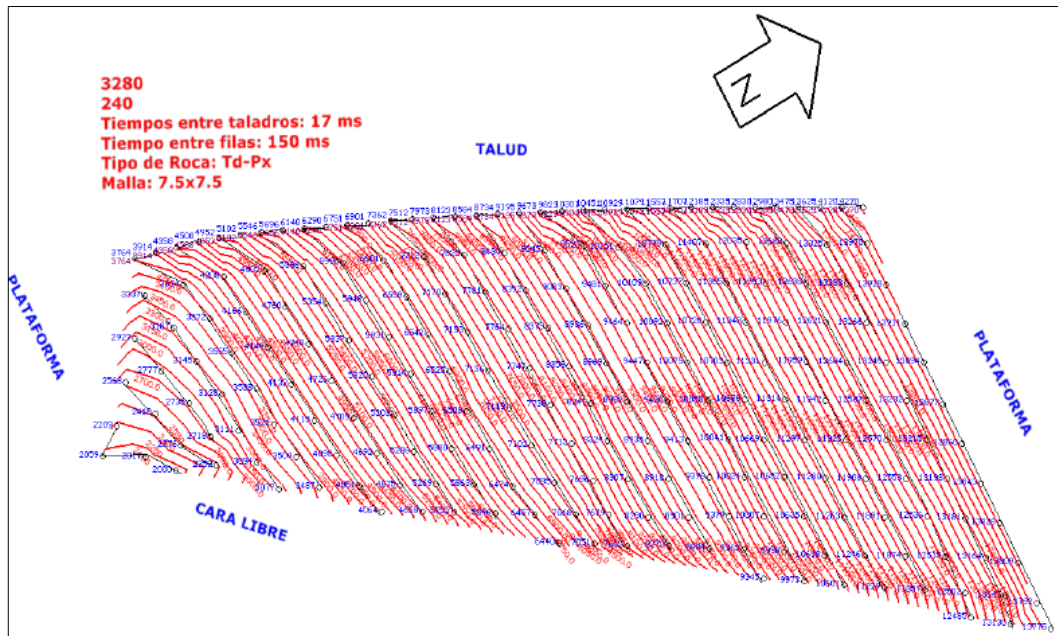


Figura 30. Secuencia de detonación
Fuente: SPCC, 2018.

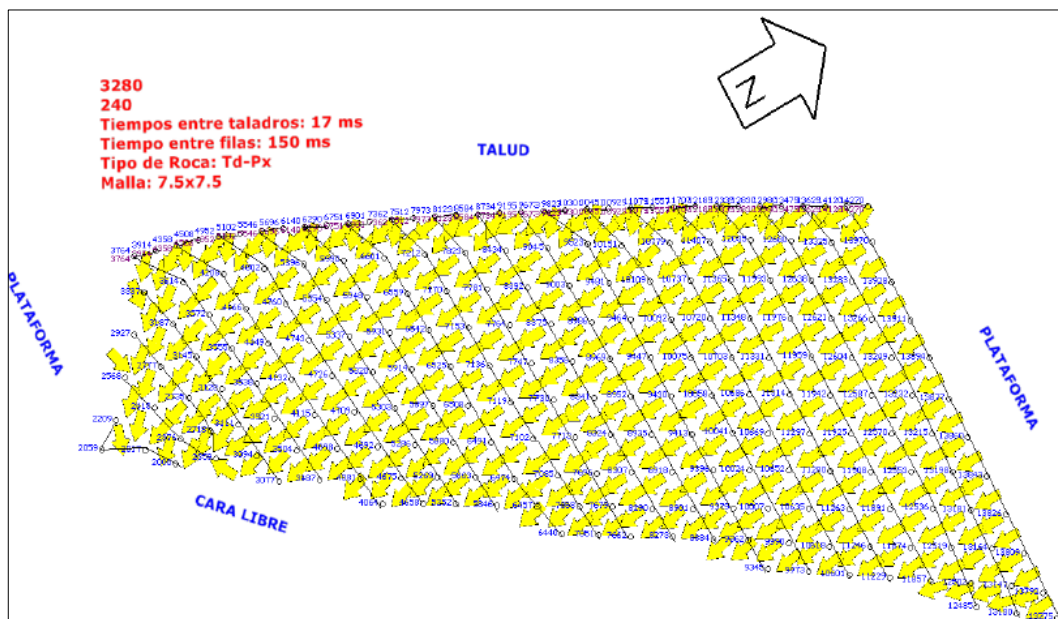


Figura 31. Apilamiento del material
Fuente: SPCC, 2018.

- e) Diseño de tiempos; se determinan los tiempos entre taladros y filas, relacionado con los resultados de la velocidad de onda P, correspondiente al macizo rocoso (tabla 13).

Tabla 13
Parámetros de voladura

Tipo de roca	Vp (m/s)	Espaciamiento (m)	Tiempo taladros (ms)	Burden (m)	Tiempo filas (ms)
Brecha con yeso anhidrita	4 851	11,24	5,79	3,25	48,75
Brecha turmalina con yeso anhidrita	4 863	11,24	5,78	3,25	48,75
Diorita con yeso anhidrita	4 911	11,24	5,72	3,25	48,75
Diorita con brecha y yeso anhidrita	4 830	11,24	5,82	3,25	48,75
Dacita con yeso anhidrita	4 868	11,24	5,77	3,25	48,75
Pebble brecha con yeso anhidrita	4 901	11,24	5,73	3,25	48,75

Fuente: SPCC, 2018.

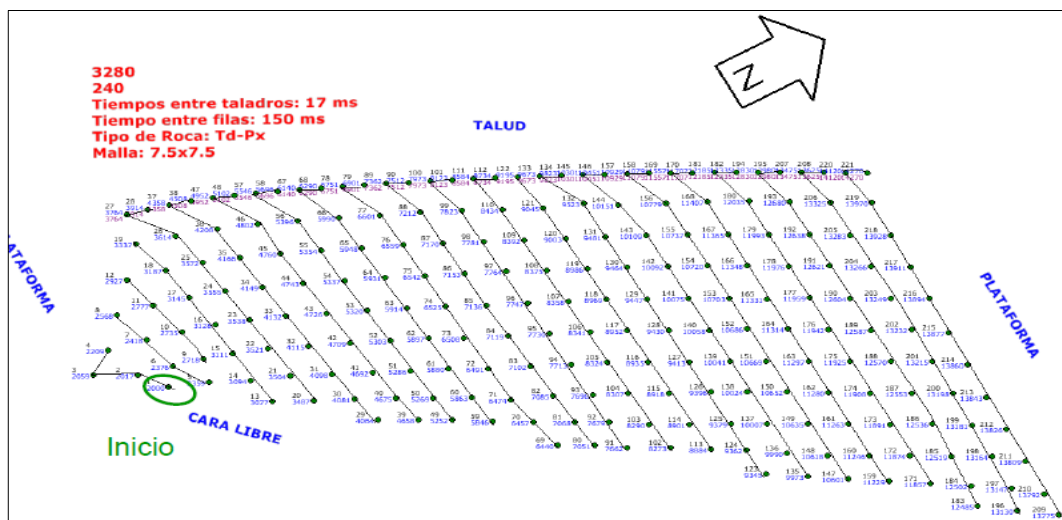


Figura 32. Configuración de tiempos
Fuente: SPCC, 2018.

f) Traslape de tiempos; en las voladuras con sistemas electrónicos, no existe traslape de tiempos, ni montaje de cargas explosivas, debido a que el porcentaje de dispersión es cero en los tiempos de retardo; entonces cada carga explosiva detona en su propio intervalo de tiempo, de acuerdo con el diseño establecido, estos controles permiten generar ventajas que repercuten en los resultados de fragmentación y vibración. En la figura 33, se observa los intervalos de tiempos.

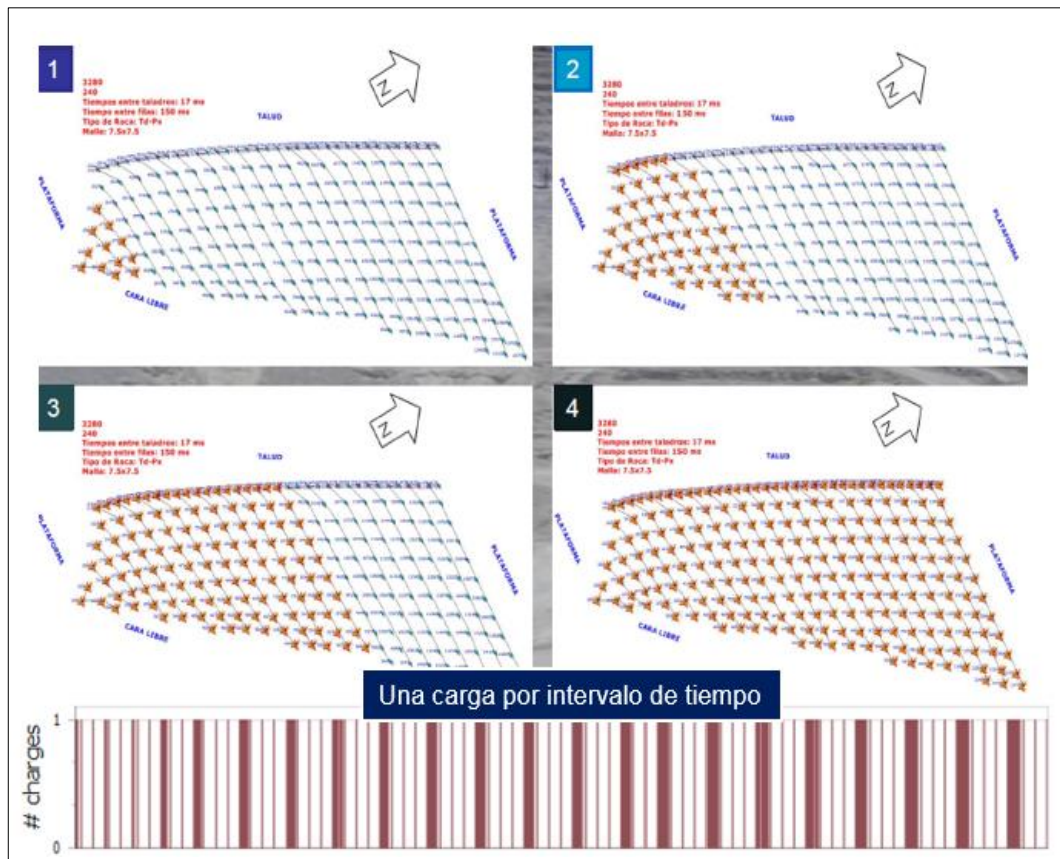


Figura 33. Simulación de voladura
Fuente: SPCC, 2018.

Mientras que la observación, se centralizo en la recolección de los resultados de la voladura de los proyectos estudiados, condiciones geológicas y operativas.

- a) Esponjamiento y geometría del escombro; las observaciones de estos resultados infirieren directamente en el desarrollo de las operaciones de manera segura, productiva y eficaz, y depende principalmente de las variables geométricas de diseño, factores de consumo de explosivo, secuencias de encendido y tiempo de retardos.



Figura 34. Esponjamiento de la pila de mineral
Fuente: SPCC, 2018.

- b) Dilución del mineral, las observaciones de estos resultados interfieren en la obtención de la ley de cabeza promedio de mineral, y depende principalmente del desplazamiento generado por las voladuras.



Figura 35. Control de dilución del mineral
Fuente: SPCC, 2018.

c) Análisis del piso blando, es importante que se refleje un piso horizontal para que los accesos de tránsito sean los adecuados y además ayuden a incrementar la vida útil de los neumáticos; y es producto de los adecuados cálculos de la sobre perforación.



Figura 36. Pisos nivelados después del minado
Fuente: SPCC, 2018.

- d) Estado físico del macizo residual; se asocia a los buenos resultados de la calidad de las paredes del tajo, mediante voladuras amortiguadas, con menor carga explosiva y espaciamiento, y al disparar en forma simultánea, exceda las resistencias dinámicas de la roca, generando un plano de debilidad que defina una pared, además de eso nos permite filtrar las vibraciones a través de la fractura creada.



Figura 37. Talud pre corte
Fuente: SPCC, 2018.

- e) Presencia de bolones en pila de escombros; constituyen un problema para la operación, con los cuales decrece la productividad del equipo de carguío. Las causas de la presencia de fragmentación gruesa, está asociado a problemas de control en los parámetros de perforación y voladura, y por sus características estructurales y geomecánicas.



Figura 38. Fragmentación gruesa en corte de pala
Fuente: SPCC, 2018.

- f) Vibraciones y daños en el entorno; mediante el análisis de las vibraciones registradas con un sismógrafo y posterior modificación de las variables indicadas, puede conseguirse un mayor aprovechamiento de la energía desarrollada por el explosivo.



Figura 39. Daño de paredes del tajo por vibraciones
Fuente: SPCC, 2018.

- g) Medición de la fragmentación; a partir de procesamientos fotográficos por el método del programa *WipFrag*, se logra determinar la fragmentación obtenida en los resultados de voladura (figura 40). Esto permite establecer rangos de fragmentación, con la finalidad de controlar escenarios de anisotropía, discontinuidad y variabilidad en cuanto a las propiedades del macizo rocoso.

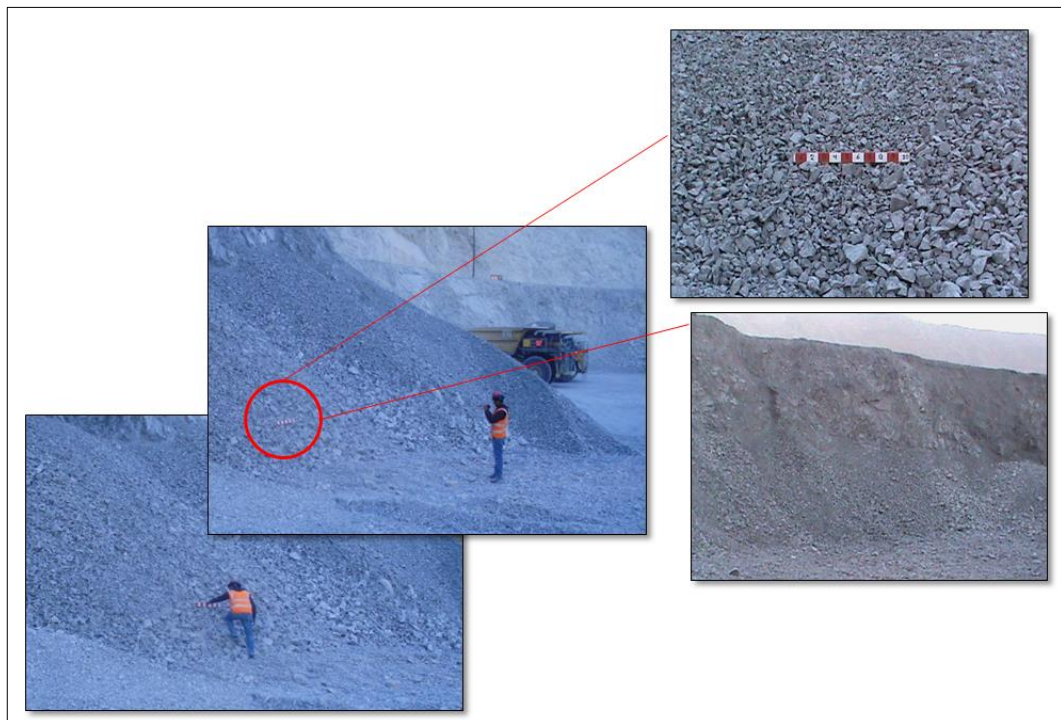


Figura 40. Análisis de fragmentación
Fuente: SPCC, 2018.

- h) Calibración de curvas granulométricas; una vez determinado los rangos de fragmentación, en función a los requerimientos de planta, es

importante efectuar actividades de calibración sobre el comportamiento de las curvas modeladas en periodos determinados, a partir de las constantes de factor de roca, P80 y el índice de uniformidad.

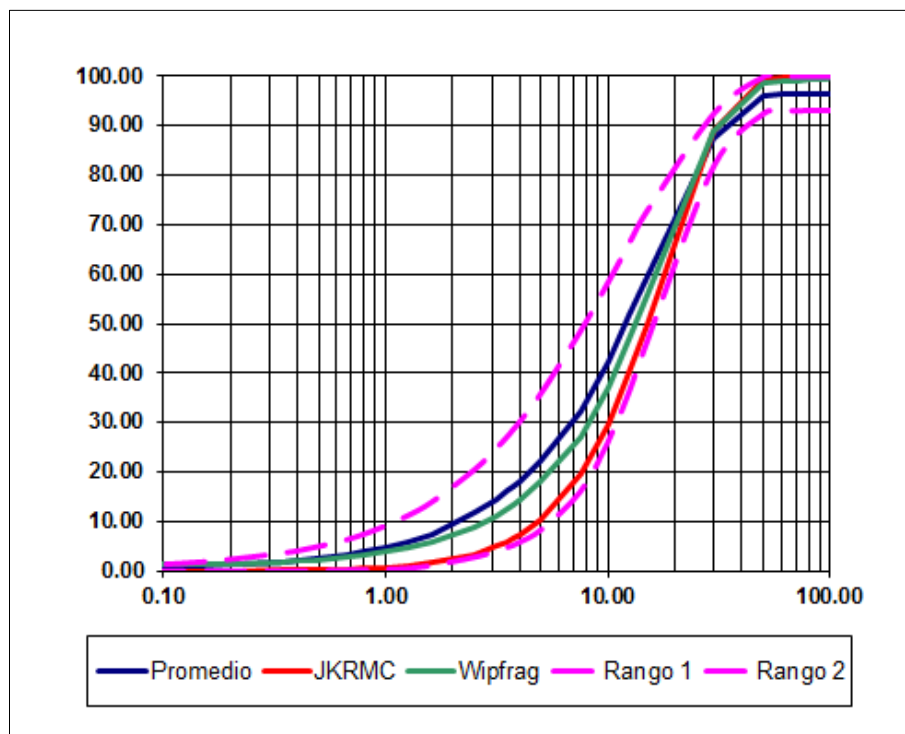


Figura 41. Calibración de curvas de fragmentación
Fuente: SPCC, 2018.

- i) Diseño del tiempo entre taladros; deben de modelarse con los resultados obtenidos de los análisis granulométricos de campo. Los mejores resultados granulométricos se han obtenido con un tiempo de 7 ms, similar al calculado por el Modelo de *Lagrange*, compensado con

una secuencia de diagonales largas y la mejor utilización de la mecánica de fragmentación.

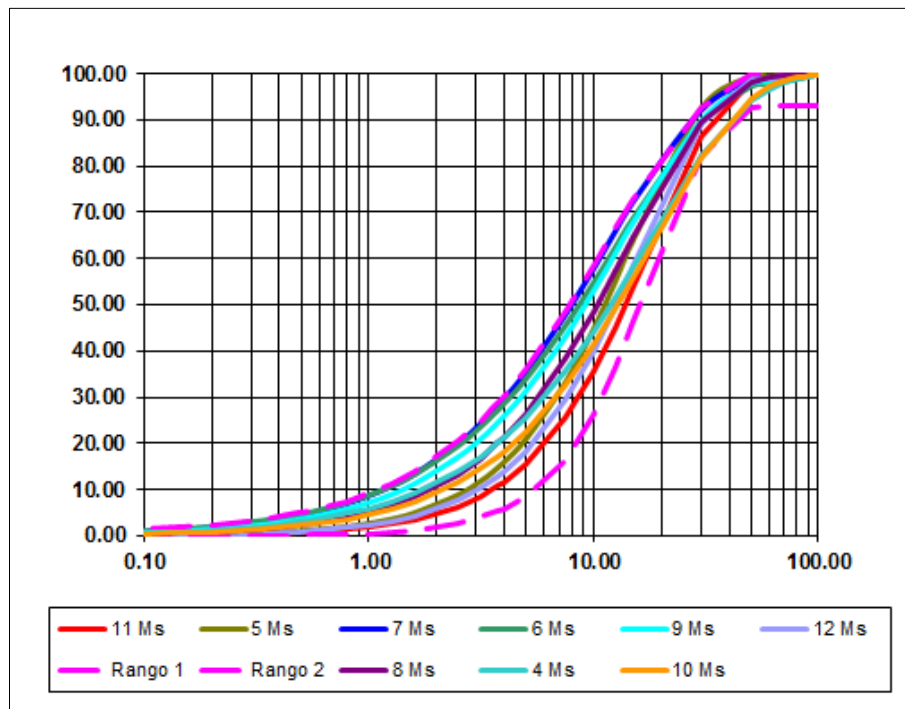


Figura 42. Modelamiento del tiempo resultante
Fuente: SPCC, 2018.

- j) Seguimiento de la fragmentación; los resultados de fragmentación óptima requerida por Planta Concentradora deben estar bajo un seguimiento continuo, con la finalidad de ser auditables y de recabar estadísticas para optar por elegir el mejor modelo en base a las características del macizo rocoso. En la figura 43, se observa el control

de la fragmentación en la mina Toquepala, mediante la observación en las tolvas de transferencia de descarga.



Figura 43. Resultados de fragmentación en tolva
Fuente: SPCC, 2018.

- k) Matriz de sensibilidad para voladuras; es importante ejecutar una matriz de sensibilidad en base al procedimiento de voladura, donde todas las actividades deben ser ejecutadas con la mayor responsabilidad del caso, porque depende de la buena acción o eficacia de la anterior, y donde las operaciones mantengan el orden establecido desde la etapa de la perforación con una buena información del macizo rocoso hasta

la voladura propiamente dicha con su respectivo seguimiento en cuanto a evaluación y control, y cuyos resultados deben estar ubicados en bases de datos para las estadísticas posteriores.

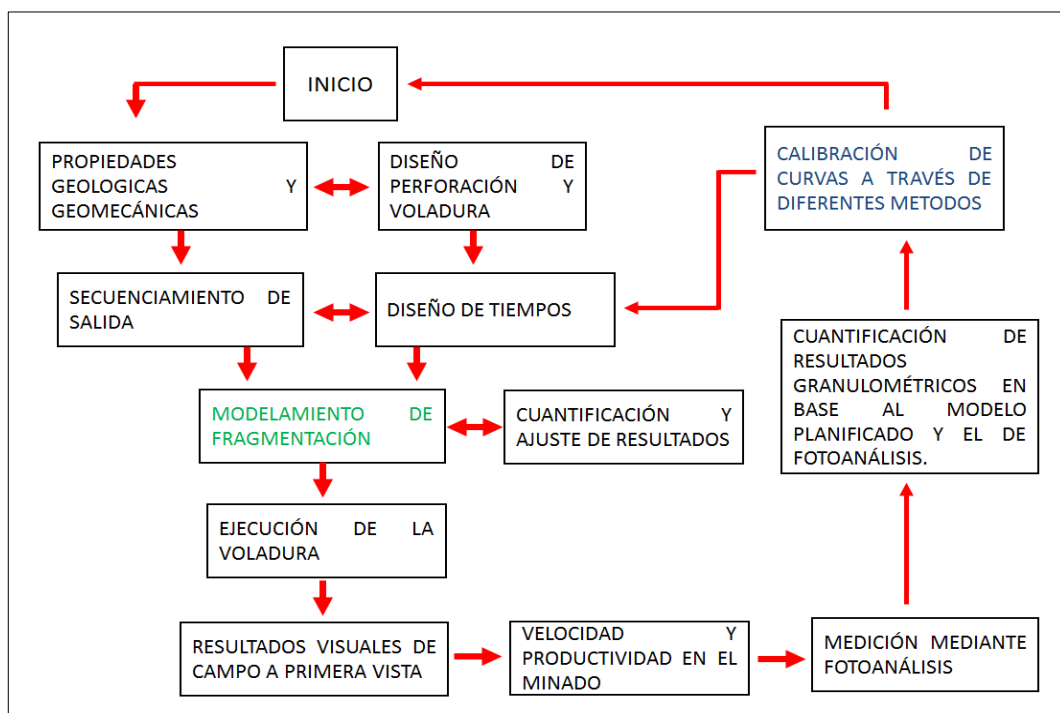


Figura 44. Matriz de sensibilidad
Fuente: SPCC, 2018.

Los instrumentos de la presente investigación son los reportes de voladura, informes de consultorías, investigaciones en campo y estudios especializados en la materia, correspondientes a voladuras con detonadores pirotécnicos y electrónicos de la mina Toquepala. En anexo 4, se observa los procedimientos de control y guías de operación.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Para obtener resultados más exactos en cuanto a la comparación de variables, se ha elaborado una línea base mensual correspondiente al material Yeso - Anhidrita, para efectuar las comparaciones de resultado mensual en voladuras con detonadores electrónicos y pirotécnicos correspondientes al año 2018, referidos al control de factor de carguío, de vibración, fragmentación, porcentaje de bolonería, ciclo de minado, y rendimientos horarios de la pala, como la velocidad de minado efectivo.

3.5.1. Análisis de fragmentación

La medición de la fragmentación se realizó mediante el método de óptica digital a través del programa *WipFrag*, que es una herramienta práctica y viable, que permite reconocer los límites de los fragmentos del material volado en base a una imagen digital del escombros, con la finalidad de diferenciar un fragmento del otro, y a partir de una referencia, se escala las dimensiones ajustadas del fragmento, para obtener una curva granulométrica del tamizado que represente la fragmentación del escombros, como se observa en la figura 45.

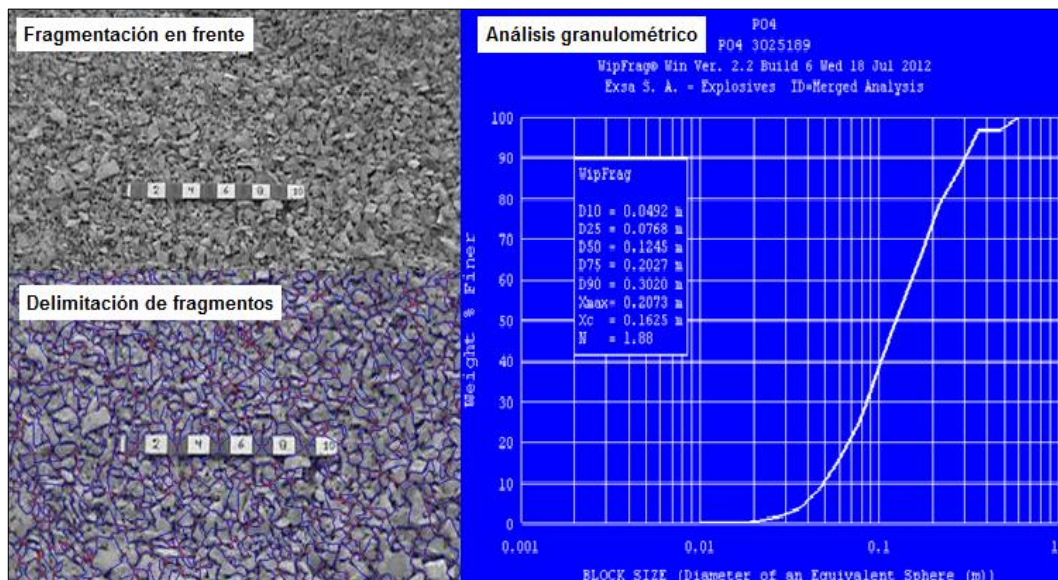


Figura 45. Análisis granulométrico del material volado
Fuente: Propia.

En la tabla 14 y 15, se observan los resultados obtenidos al realizar el análisis de fragmentación de los proyectos de voladura con detonadores pirotécnicos y electrónicos. Para comparar los resultados según detonadores, se determina el promedio del % de tamizado pasante para cada tabla de resultados, posteriormente se grafica en escala logarítmica y se obtiene la curva granulométrica de tamizado pasante que se observa en la figura 48. Donde existe una permanencia de los finos e incremento del material fragmentado, lo que se ve reflejado en los resultados de reducción del % de bolonería, observada en la figura 49.

Tabla 14
Fragmentación con detonador pirotécnico

% Retenido convencional	% Pasante convencional	Tamaño de proyectos de voladura con detonador pirotécnico (cm)												Promedio
		P0001	P0002	P0003	P0004	P0005	P0006	P0007	P0008	P0009	P0010	P0011	P0012	
98,77	1,23	0,33	0,29	0,31	0,38	0,39	0,36	0,34	0,35	0,31	0,36	0,34	0,34	0,34
97,36	2,64	0,67	0,58	0,61	0,75	0,77	0,72	0,68	0,70	0,61	0,72	0,68	0,68	0,68
94,38	5,62	1,34	1,16	1,22	1,51	1,54	1,43	1,36	1,40	1,22	1,44	1,36	1,36	1,36
88,27	11,73	2,68	2,32	2,44	3,02	3,08	2,87	2,73	2,81	2,45	2,87	2,73	2,73	2,72
76,38	23,62	5,35	4,64	4,88	6,03	6,16	5,73	5,45	5,62	4,89	5,74	5,45	5,45	5,45
65,54	34,46	8,03	6,96	7,32	9,05	9,24	8,60	8,18	8,43	7,34	8,62	8,18	8,18	8,17
55,91	44,09	10,70	9,28	9,75	12,06	12,32	11,46	10,91	11,23	9,78	11,49	10,90	10,91	10,90
47,48	52,52	13,38	11,60	12,19	15,08	15,40	14,33	13,63	14,04	12,23	14,36	13,63	13,63	13,62
40,17	59,83	16,05	13,92	14,63	18,09	18,48	17,19	16,36	16,85	14,67	17,23	16,35	16,36	16,35
33,89	66,11	18,73	16,24	17,07	21,11	21,56	20,06	19,09	19,66	17,12	20,11	19,08	19,09	19,07
28,51	71,49	21,41	18,56	19,51	24,13	24,64	22,93	21,81	22,47	19,56	22,98	21,80	21,81	21,80
23,92	76,08	24,08	20,88	21,95	27,14	27,72	25,79	24,54	25,28	22,01	25,85	24,53	24,54	24,52
20,03	79,97	26,76	23,20	24,39	30,16	30,80	28,66	27,26	28,09	24,45	28,72	27,25	27,26	27,25
16,74	83,26	29,43	25,52	26,82	33,17	33,88	31,52	29,99	30,89	26,90	31,59	29,98	29,99	29,97
13,97	86,03	32,11	27,84	29,26	36,19	36,96	34,39	32,72	33,70	29,34	34,47	32,70	32,72	32,70
11,63	88,37	34,78	30,16	31,70	39,20	40,04	37,25	35,44	36,51	31,79	37,34	35,43	35,44	35,42
9,67	90,33	37,46	32,48	34,14	42,22	43,12	40,12	38,17	39,32	34,23	40,21	38,15	38,17	38,15
8,03	91,97	40,14	34,80	36,58	45,24	46,20	42,99	40,90	42,13	36,68	43,08	40,88	40,90	40,87
6,66	93,34	42,81	37,12	39,02	48,25	49,28	45,85	43,62	44,94	39,12	45,95	43,60	43,62	43,60
5,52	94,48	45,49	39,44	41,46	51,27	52,36	48,72	46,35	47,75	41,57	48,83	46,33	46,35	46,32
4,56	95,44	48,16	41,76	43,89	54,28	55,44	51,58	49,08	50,55	44,01	51,70	49,05	49,08	49,05
3,77	96,23	50,84	44,08	46,33	57,30	58,52	54,45	51,80	53,36	46,46	54,57	51,78	51,80	51,77
3,11	96,89	53,51	46,40	48,77	60,31	61,60	57,31	54,53	56,17	48,90	57,44	54,50	54,53	54,50
2,56	97,44	56,19	48,72	51,21	63,33	64,68	60,18	57,26	58,98	51,35	60,32	57,23	57,26	57,22
2,11	97,89	58,87	51,04	53,65	66,35	67,76	63,05	59,98	61,79	53,79	63,19	59,95	59,98	59,95
1,74	98,26	61,54	53,36	56,09	69,36	70,84	65,91	62,71	64,60	56,24	66,06	62,68	62,71	62,67

Fuente: Propia.

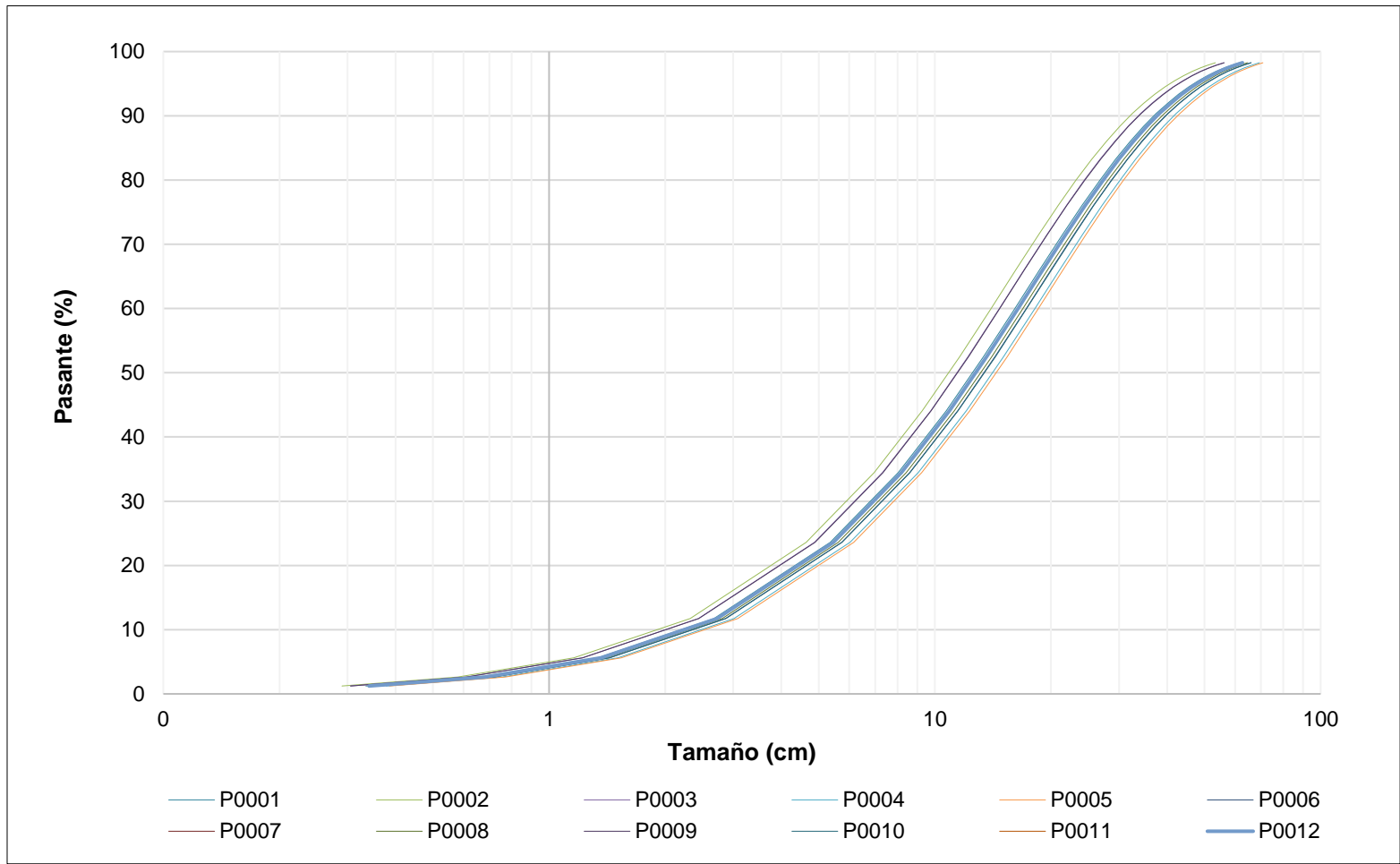


Figura 46. Análisis del D90 con detonador pirotécnico
Fuente: Propia.

Tabla 15
Fragmentación con detonador electrónico

% Retenido convencional	% Pasante convencional	Tamaño de proyectos de voladura con detonador electrónico (cm)								
		E0001	E0002	P0003	P0004	P0005	P0006	P0007	P0008	Promedio
98,77	1,23	0,29	0,28	0,31	0,28	0,31	0,30	0,29	0,30	0,30
97,36	2,64	0,59	0,56	0,62	0,56	0,63	0,59	0,59	0,59	0,59
94,38	5,62	1,17	1,12	1,25	1,11	1,25	1,18	1,18	1,18	1,18
88,27	11,73	2,34	2,25	2,50	2,23	2,50	2,36	2,35	2,36	2,36
76,38	23,62	4,69	4,49	5,00	4,45	5,01	4,73	4,71	4,72	4,73
65,54	34,46	7,03	6,74	7,50	6,68	7,51	7,09	7,06	7,09	7,09
55,91	44,09	9,38	8,99	10,00	8,91	10,01	9,45	9,42	9,45	9,45
47,48	52,52	11,72	11,24	12,50	11,13	12,52	11,82	11,77	11,81	11,81
40,17	59,83	14,07	13,48	15,00	13,36	15,02	14,18	14,13	14,17	14,18
33,89	66,11	16,41	15,73	17,50	15,59	17,53	16,55	16,48	16,54	16,54
28,51	71,49	18,75	17,98	19,99	17,81	20,03	18,91	18,83	18,90	18,90
23,92	76,08	21,10	20,22	22,49	20,04	22,53	21,27	21,19	21,26	21,26
20,03	79,97	23,44	22,47	24,99	22,26	25,04	23,64	23,54	23,62	23,63
16,74	83,26	25,79	24,72	27,49	24,49	27,54	26,00	25,90	25,98	25,99
13,97	86,03	28,13	26,97	29,99	26,72	30,04	28,36	28,25	28,35	28,35
11,63	88,37	30,48	29,21	32,49	28,94	32,55	30,73	30,61	30,71	30,71
9,67	90,33	33,64	32,24	35,86	31,95	35,92	33,91	33,78	33,89	33,90
8,03	91,97	35,16	33,71	37,49	33,40	37,55	35,45	35,31	35,43	35,44
6,66	93,34	37,51	35,95	39,99	35,62	40,06	37,82	37,67	37,79	37,80
5,52	94,48	39,85	38,20	42,49	37,85	42,56	40,18	40,02	40,16	40,16
4,56	95,44	42,20	40,45	44,99	40,08	45,06	42,54	42,38	42,52	42,53
3,77	96,23	44,54	42,70	47,49	42,30	47,57	44,91	44,73	44,88	44,89
3,11	96,89	46,89	44,94	49,99	44,53	50,07	47,27	47,09	47,24	47,25
2,56	97,44	49,23	47,19	52,49	46,76	52,58	49,64	49,44	49,61	49,61
2,11	97,89	51,57	49,44	54,98	48,98	55,08	52,00	51,79	51,97	51,98
1,74	98,26	53,92	51,68	57,48	51,21	57,58	54,36	54,15	54,33	54,34

Fuente: Propia.

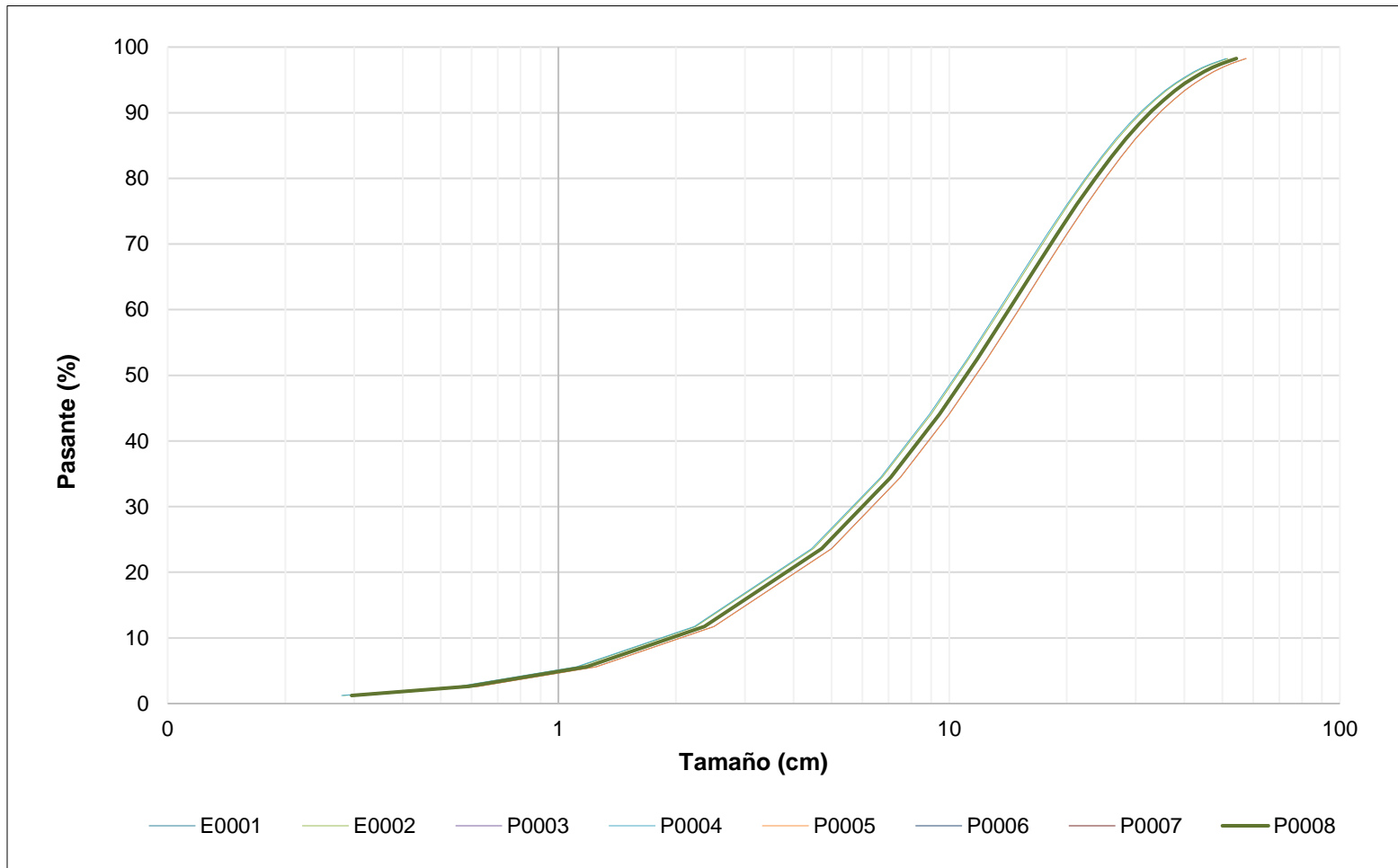


Figura 47. Análisis del D90 con detonador electrónico
Fuente: Propia.

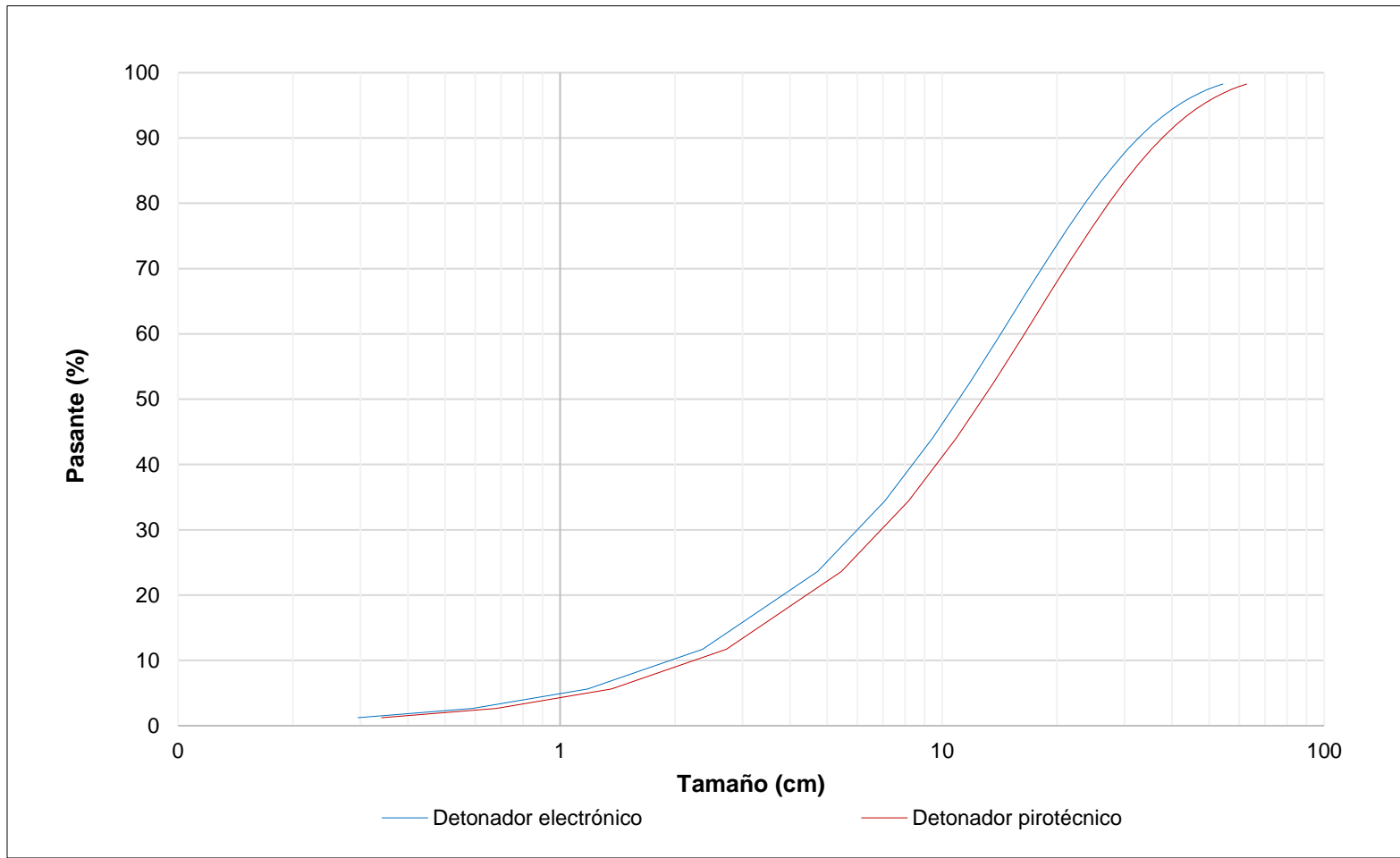


Figura 48. Análisis del D90 con detonador electrónico
Fuente: Propia.

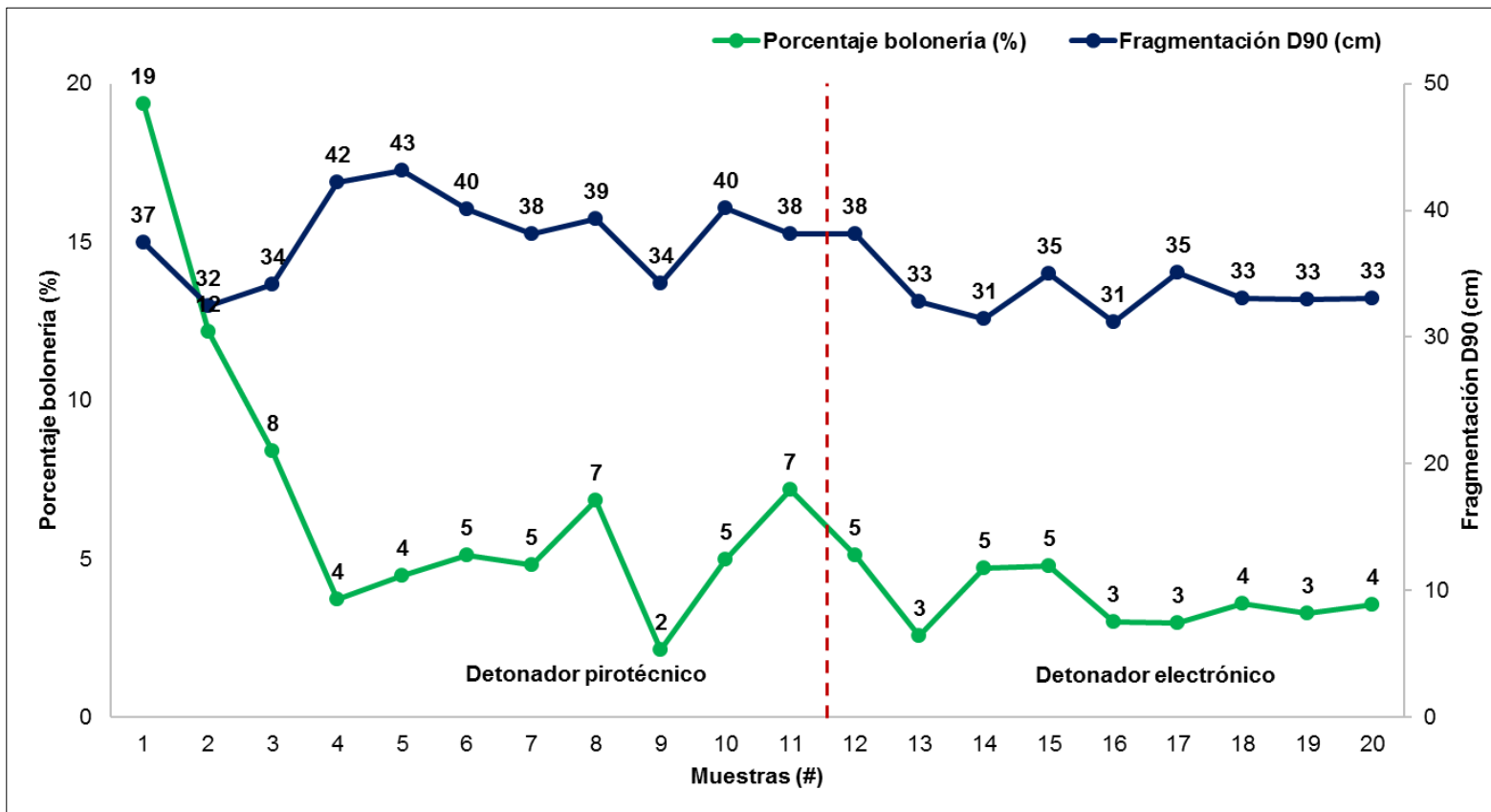


Figura 49. Porcentaje bolonería versus fragmentación D90
 Fuente: Propia.

Nota. Se visualiza una reducción del 11,14 % en la fragmentación D90 y 36,99 % en el % de bolonería, al implementar los detonadores electrónicos en los proyectos de voladura, sin considerar los altos erráticos correspondiente a las muestras # 1 y # 3.

3.5.2. Análisis de vibraciones

Los límites permisibles para las vibraciones están establecidos de acuerdo con las normativas vigentes, según el daño que pueda generar a las estructuras y construcciones aledañas al proyecto de voladura. Las mediciones se realizaron por medio de un sismógrafo, que se encarga de registrar los movimientos del macizo rocoso, generado por las ondas sísmicas, donde la velocidad de las partículas está representada por un vector de 3 componentes, denominados dirección vertical, longitudinal y transversal, los cual deben ser medido de acuerdo con las normas técnicas, con la finalidad de determinar la velocidad resultante de acuerdo con cada intervalo de tiempo, para obtener la velocidad máxima.

El monitoreo de las vibraciones se realiza a una distancia de 50 m direccionado al proyecto de voladura, donde es preferible que el sensor sea enterrado a una profundidad de 50 cm, y se encuentre lo más nivelado posible, con la finalidad de minimizar los errores de registro al pretender medir las vibraciones producto del disparo. Para descargar la información acumulada en los sismógrafos, usamos el programa *BlastWare IV* y a partir de los reportes gráficos de las vibraciones (figura 50), se identifican las

vibraciones resultantes obtenidas para cada proyecto de voladura, como se observa en la tabla 16.

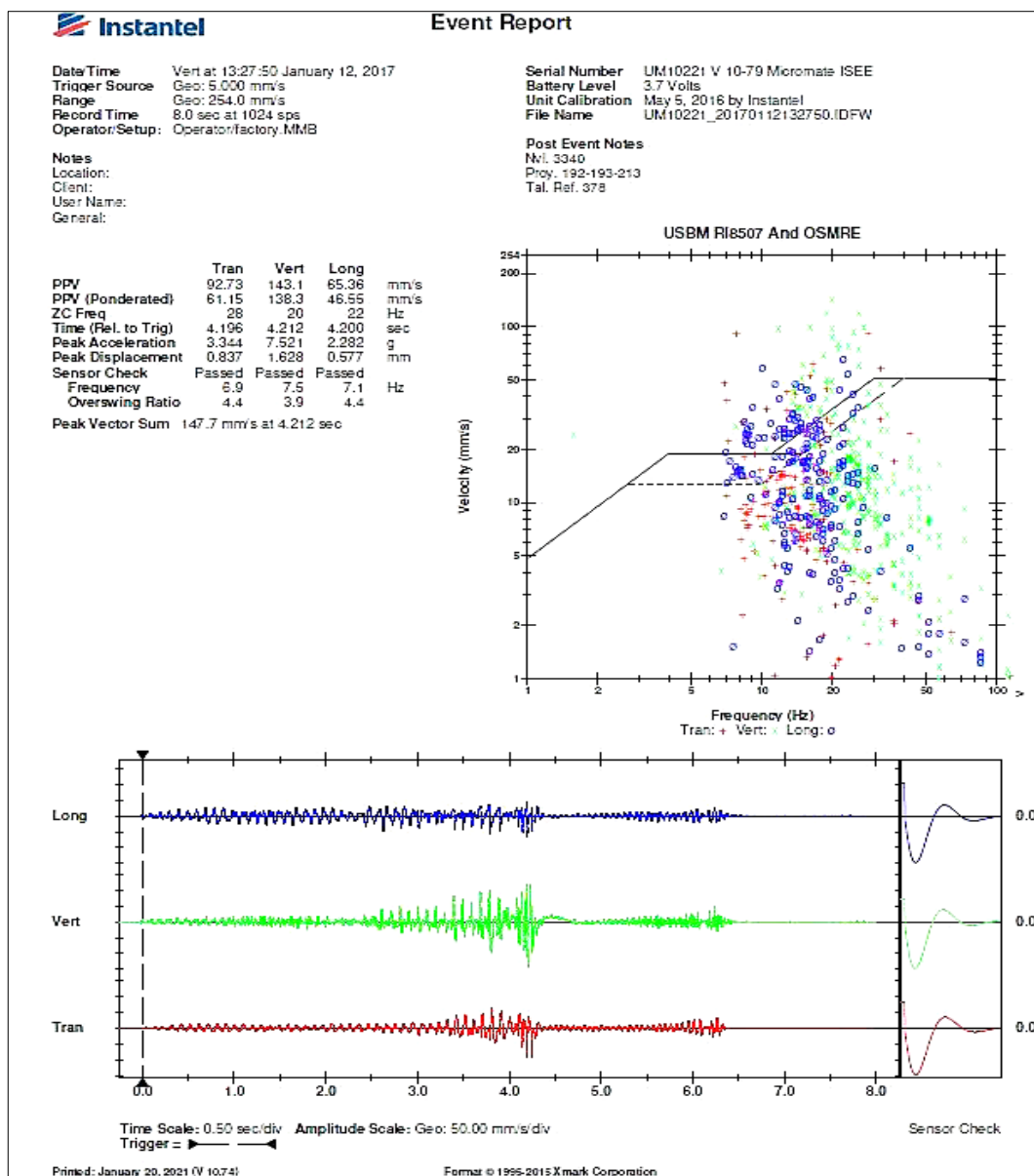


Figura 50. Reporte de vibraciones del programa *BlastWare IV*
 Fuente: Paquera, 2021.

Tabla 16
Registro de monitoreo de vibraciones

Muestra proyecto voladura (#)	Distancia (m)	Carga operante (kg)	PPV (mm/s)
P0001	50	679	115
P0002	50	669	70
P0003	50	495	113
P0004	50	921	105
P0005	50	863	101
P0006	50	1 650	228
P0007	50	1 355	158
P0008	50	1 120	143
P0009	50	1 427	188
P0010	50	773	76
P0011	50	998	129
P0012	50	835	115
E0001	50	740	87
E0002	50	904	104
E0003	50	903	123
E0004	50	740	102
E0005	50	814	139
E0006	50	883	111
E0007	50	816	107
E0008	50	869	110

Fuente: Propia.

En base a la normativa observada en la tabla 17, se asume que el daño sobre el macizo rocoso es igual para todos los tipos de roca, sin considerar la velocidad de propagación, límites de elasticidad del macizo rocoso y material que compone la estructura minera. De acuerdo con la tabla 16, se observan los registros resultantes del monitoreo de vibraciones

correspondientes a los proyectos de voladura de estudio, donde se observa los resultados de vibración con un promedio de 121 mm/s y un máximo de 228 mm/s, según la evaluación; estos resultados no generan efectos o daños sobre el macizo rocoso de la estructura minera.

Tabla 17
Efectos de la VPP sobre el macizo rocoso

Velocidad partícula pico (mm/s)	Efectos en el macizo rocoso
Menos de 254	No hay fracturas de rocas intactas
254 - 381	Ocurre menor fractura tensional y caídas de roca
635 - 2 540	100 fracturas tensionales fuertes y radial
Más de 2 540	Rotura completa de macizo rocoso

Fuente: Dirección General de Asuntos Ambientales, 1995.

El criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generada por el tipo de la carga de explosivos es el modelo de campo lejano de Devine, según como se observa en la expresión [1]. Para determinar los valores de α y K , el modelo de campo lejano se ajusta a la ecuación lineal expresada en base logarítmica.

$$VPP = K \cdot \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^\alpha \quad [1]$$

Donde:

VPP = Velocidad de propagación de partícula en mm/s.

K = Constante de propagación del medio.

α = Constante de atenuación del medio.

D = Distancia de control en m.

W = Carga operante en Kg.

Para definir el nivel de vibración se considera el registro de la onda vertical, radial y transversal; donde cada una compone el movimiento de la tierra a una velocidad pico partícula con una máxima amplitud de onda. La VPP que se considera es la de mayor valor, expresado de acuerdo con el vector resultante. Reemplazando la distancia escalada (De) en la expresión [1] se obtiene la expresión [2].

$$VPP = K \cdot (De)^\alpha \quad [2]$$

Posteriormente, se aplica logaritmo de base 10 al modelo de Devine con la finalidad de ser ajustado a la forma de una ecuación lineal, como se observa en la expresión [3].

$$\log(VPP) = \log(K \cdot (De)^\alpha) \quad [3]$$

Mediante las propiedades de logaritmo, se estructura la expresión [3] a una ecuación lineal, como se observa en la expresión [4].

$$\log(VPP) = \log(K) + \alpha \log(De) \quad [4]$$

Finalmente, los valores se ajustan a la ecuación lineal observada en la expresión [4], obteniendo la expresión [5].

$$y = A + Bx \quad [5]$$

Donde:

y = Logaritmo de la velocidad pico partícula ($\log VPP$).

A = Intersección con el eje y ($\log K$).

B = Constante de la recta (α).

x = Distancia escalada (De).

De acuerdo con la tabla 16, se observa que el punto de control de vibraciones está ubicado a 50 m del último taladro según la secuencia de voladura; y la carga operante esta expresada en función a la suma de los taladros que detonan en forma simultánea en un intervalo menor a 8 ms. De acuerdo con la expresión [1] y [2], se determina la distancia escalada.

En la tabla 18, se observa la aplicación del logaritmo a los datos obtenidos en campo, proceso necesario para aplicar la expresión [4].

Tabla 18
Cálculo del logaritmo de la De y VPP

Muestra proyecto voladura (#)	De (m)	VPP (mm/s)	Log [De] (x)	Log [VPP] (y)
P0001	1,92	115,00	0,28	2,06
P0002	1,93	70,00	0,29	1,85
P0003	2,25	113,00	0,35	2,05
P0004	1,65	105,00	0,22	2,02
P0005	1,70	101,00	0,23	2,00
P0006	1,23	228,00	0,09	2,36
P0007	1,36	158,00	0,13	2,20
P0008	1,49	143,00	0,17	2,16
P0009	1,32	188,00	0,12	2,27
P0010	1,80	76,00	0,25	1,88
P0011	1,58	129,00	0,20	2,11
P0012	1,73	115,00	0,24	2,06
E0001	1,84	87,00	0,26	1,94
E0002	1,66	104,00	0,22	2,02
E0003	1,66	123,00	0,22	2,09
E0004	1,84	102,00	0,26	2,01
E0005	1,75	139,00	0,24	2,14
E0006	1,68	111,00	0,23	2,05
E0007	1,75	107,00	0,24	2,03
E0008	1,70	110,00	0,23	2,04

Fuente: Propia.

De acuerdo con la expresión [4] y el ajuste de regresión lineal observada en la gráfica de dispersión de la figura 51, se determina los

valores del factor controlado principalmente por el explosivo (K) y el factor de atenuación de la roca (α).

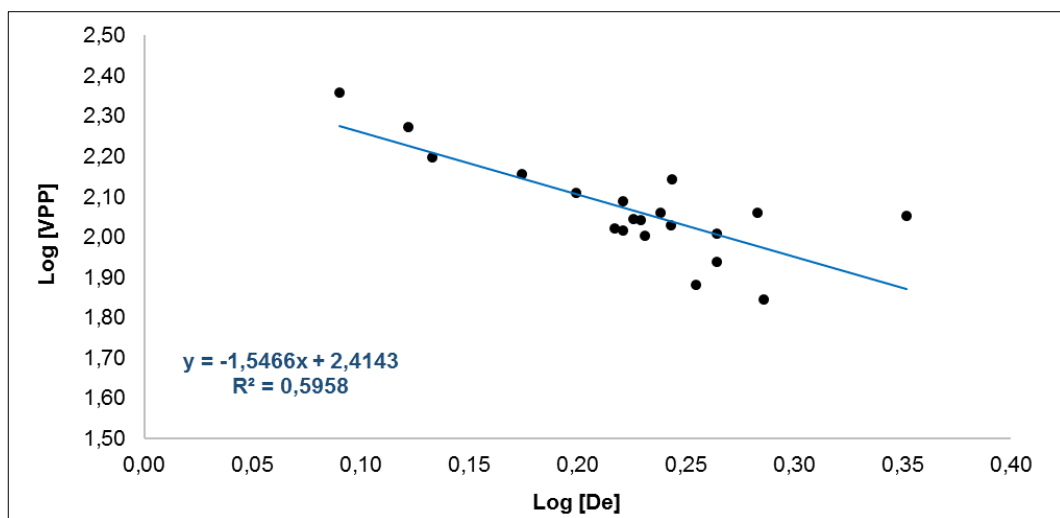


Figura 51. Modelo logarítmico de vibración
Fuente: Propia.

Mediante la figura 51 se puede explicar la relación existente entre las variables VPP y De, donde si la distancia aumenta (De), la onda se atenúa y por ende la velocidad pico partícula disminuye (VPP). Por lo tanto, si la carga operante se incrementa (W), la energía liberada será mayor, y como consecuencia, también se incrementará la velocidad pico partícula (VPP). De acuerdo con la figura 51, se obtiene la expresión [6].

$$y = 2,41 - 1,55x \quad [6]$$

Al reemplazar las constantes A y B en la expresión [4], se obtiene la expresión [7].

$$\log(VPP) = 2,41 - 1,55 \cdot \log(De) \quad [7]$$

De la expresión [6] y [7], se concluye que $\alpha = -1,55$ y $K = 259,60$. Por lo tanto, el modelo de vibración con una confiabilidad del 50 % se establece mediante la expresión [8], observada en la figura 52.

$$VPP = 259,60 \cdot \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1,55} \quad [8]$$

Los valores calculados α y K son promedios, debido a que la ecuación presenta una confiabilidad del 50 %, por lo tanto, es necesario realizar un ajuste al modelo, con la finalidad de incrementar la confiabilidad en la predicción de los valores máximos de vibración, es preciso, si el modelo es confiable, las mediciones que registren se establecerán por debajo del valor estimado. Para establecer la ecuación con una confiabilidad del 90 %, se aplica la expresión [9].

$$Ka = \text{Antilog} [\log(K) + \text{Inv. Distr. Norm. Stand. } (X\%) \cdot E(t)] \quad [9]$$

Donde:

K_a = Valor ajustado de la constante K.

Inv.Distr.Norm.Stand (X%) = Inverso de la distribución normal estándar del porcentaje de medición.

$E(t)$ = Error típico de las mediciones.

Al reemplazar los valores en la expresión [9], determinado el valor de K_a , los resultados se observan en la expresión [10].

$$K_a = \text{Antilog} [2,4143 + (90 \%) \cdot (0,0787)] \quad [10]$$

Al calcular la expresión [10], obtenemos que $K_a = 305,58$; reemplazando el valor de K_a por K en la expresión [8], se obtiene el modelo ajustado de la vibración (figura 53), observada en la expresión [11].

$$VPP = 305,58 \cdot \left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1,55} \quad [11]$$

Reemplazando los valores de la expresión [11] en la expresión [7], obtenemos la expresión [12].

$$y = 2,49 - 1,55x \quad [12]$$

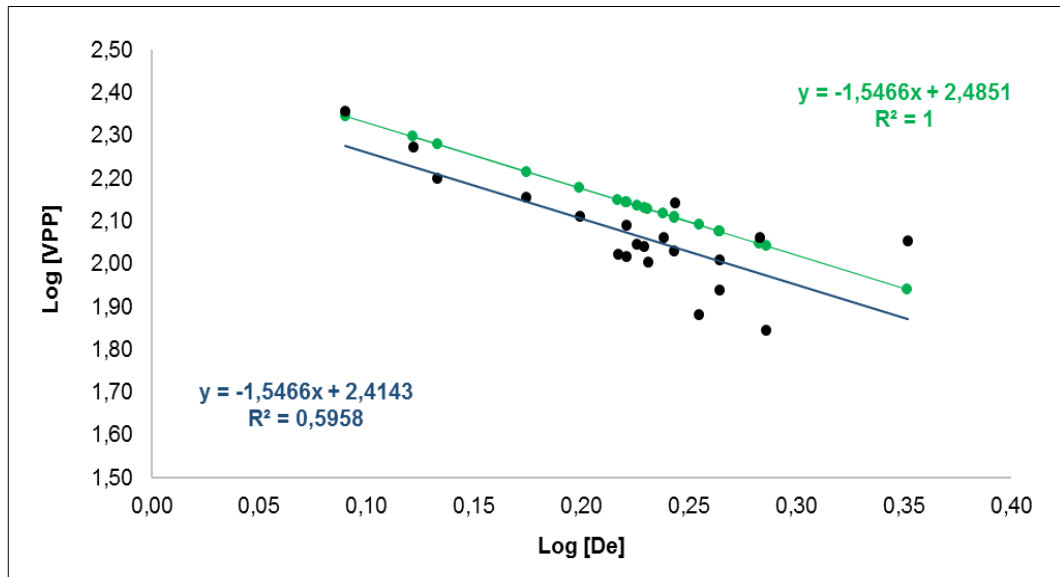


Figura 52. Modelo logarítmico de vibración ajustado
Fuente: Propia.

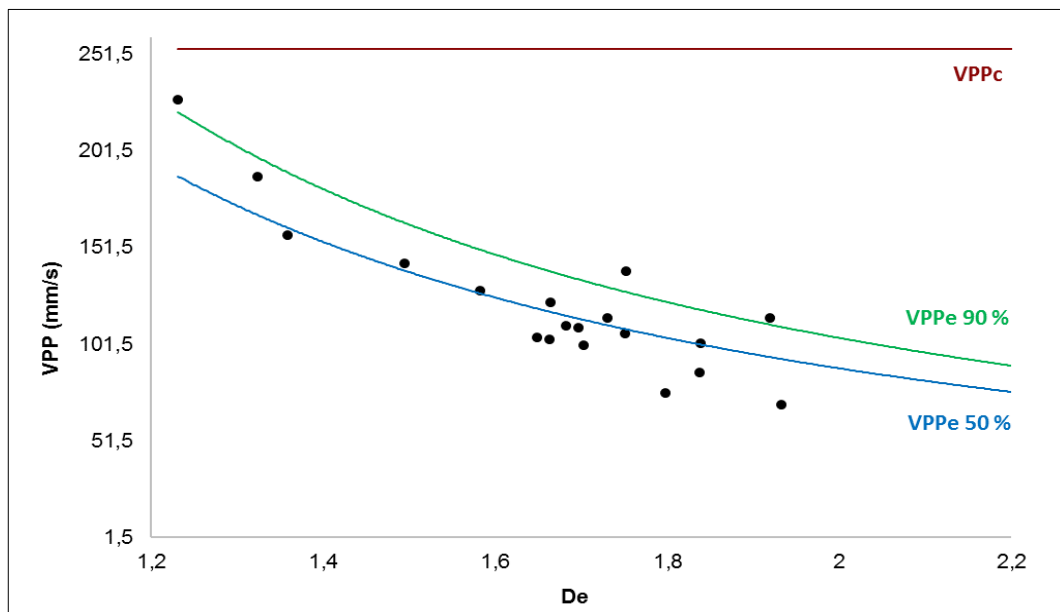


Figura 53. Modelo de vibración ajustado
Fuente: Propia.

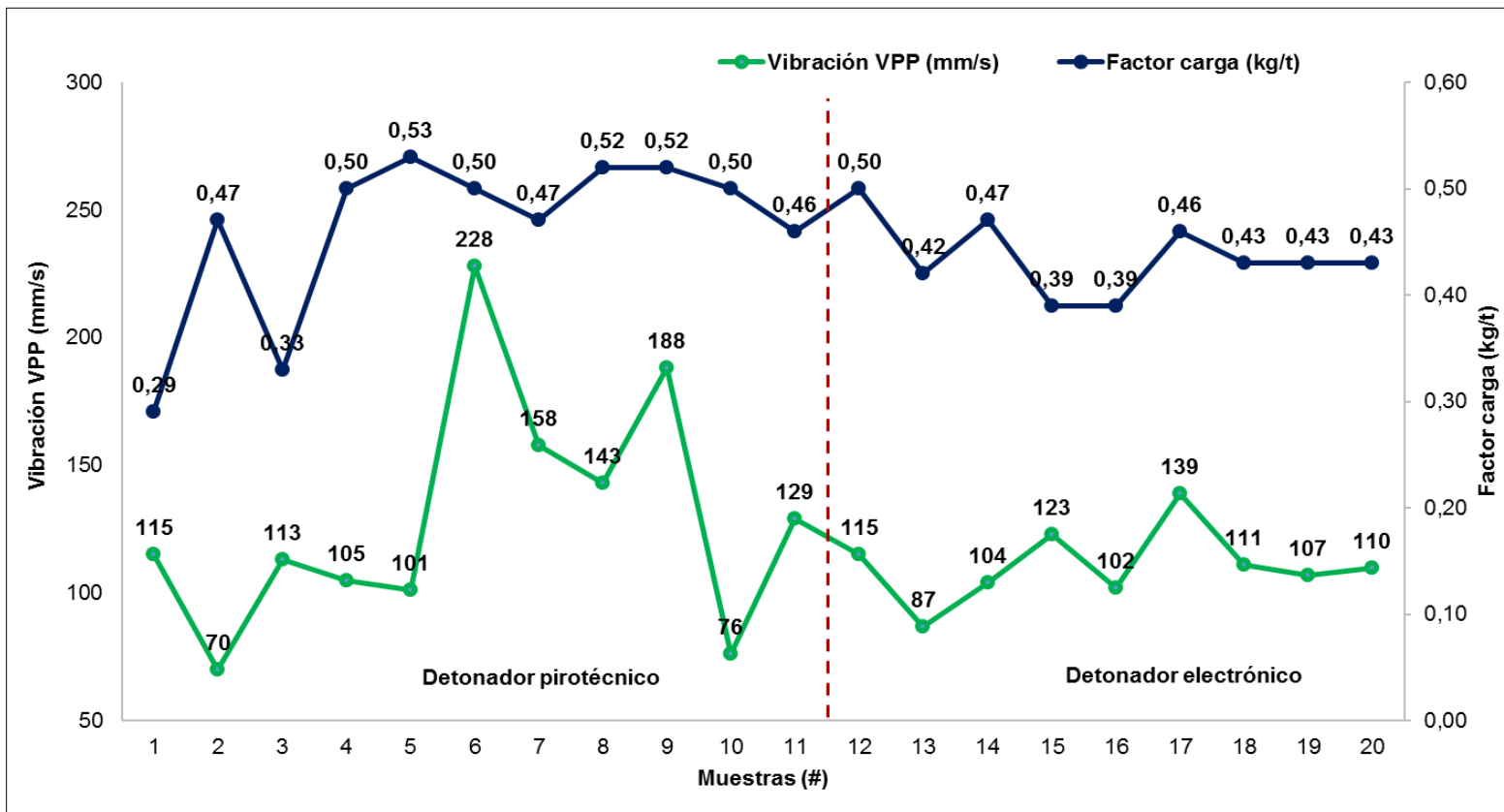


Figura 54. Vibración VPP versus factor carga
Fuente: Propia.

Nota. Se visualiza una reducción del 14,05 % en la vibración VPP y 14 % en el factor de carga, al implementar los detonadores electrónicos en los proyectos de voladura, sin considerar los altos erráticos correspondiente a las muestras # 1 y # 3.

3.5.3. Cálculo y análisis de costos unitarios

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 19, se procede a calcular los costos unitarios para cada proyecto de voladura.

Tabla 19
Datos de proyectos de voladura según detonadores

N°	Detonador	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Factor carga (kg/t)	Tonelaje disparado (t)
P0001	Pirotécnico	37,46	19,36	115	4 611	0,29	89 154
P0002	Pirotécnico	32,48	12,16	70	6 081	0,47	160 097
P0003	Pirotécnico	34,14	8,4	113	6 233	0,33	190 681
P0004	Pirotécnico	42,22	3,74	105	7 635	0,5	284 414
P0005	Pirotécnico	43,12	4,46	101	7 252	0,53	263 113
P0006	Pirotécnico	40,12	5,1	228	6 376	0,5	223 841
P0007	Pirotécnico	38,17	4,8	158	6 619	0,47	256 212
P0008	Pirotécnico	39,32	6,83	143	6 990	0,52	202 525
P0009	Pirotécnico	34,23	2,12	188	7 366	0,52	139 036
P0010	Pirotécnico	40,21	4,99	76	6 997	0,5	214 886
P0011	Pirotécnico	38,15	7,2	129	6 616	0,46	202 396
P0012	Pirotécnico	38,17	5,1	115	6 619	0,5	209 113
E0001	Electrónico	32,82	2,58	87	6 894	0,42	191 154
E0002	Electrónico	31,46	4,7	104	7 235	0,47	265 695
E0003	Electrónico	34,99	4,78	123	7 138	0,39	207 866
E0004	Electrónico	31,17	3,01	102	8 144	0,39	214 696
E0005	Electrónico	35,05	2,97	139	7 552	0,46	279 277
E0006	Electrónico	33,09	3,6	111	7 393	0,43	231 738
E0007	Electrónico	32,96	3,3	107	7 314	0,43	223 217
E0008	Electrónico	33,07	3,56	110	7 381	0,43	230 520

Fuente: SPCC, 2018.

En la tabla 20, se observa el registro del explosivo utilizado en los proyectos de voladura con detonadores pirotécnicos y electrónicos, y en la tabla 21, se observan los registros de accesorios correspondientes a los proyectos de voladura.

Tabla 20
Registro de explosivos en proyectos de voladura

Muestra proyecto voladura (#)	Detonador	Taladros (und)	Petróleo (kg)	Emulsión matriz (kg)	Nitrato de amonio (kg)
P0001	Pirotécnico	46	647	15 385	10 139
P0002	Pirotécnico	113	1 954	43 047	30 614
P0003	Pirotécnico	148	1 766	33 230	27 669
P0004	Pirotécnico	165	3 940	76 546	61 729
P0005	Pirotécnico	166	3 690	79 134	57 803
P0006	Pirotécnico	136	2 754	65 417	43 143
P0007	Pirotécnico	155	3 497	61 127	54 789
P0008	Pirotécnico	145	3 102	52 579	48 593
P0009	Pirotécnico	111	2 033	38 925	31 844
P0010	Pirotécnico	139	2 664	63 104	41 731
P0011	Pirotécnico	132	2 605	52 849	40 806
P0012	Pirotécnico	139	3 534	55 659	44 780
E0001	Electrónico	108	2 111	44 793	33 068
E0002	Electrónico	146	3 354	69 171	52 539
E0003	Electrónico	117	2 142	45 846	33 554
E0004	Electrónico	118	2 220	47 667	34 776
E0005	Electrónico	156	3 419	70 061	53 558
E0006	Electrónico	129	2 649	55 507	41 499
E0007	Electrónico	124	2 434	51 587	38 138
E0008	Electrónico	128	2 618	54 947	41 019

Fuente: SPCC, 2018.

Tabla 21
Registro de accesorios en proyectos de voladura

Muestra proyecto voladura (#)	Detonador electrónico /pirotécnico (und)	Retardo superficie (und)	Boosters 1 libra (und)	Cordón detonante (m)	Mecha seguridad (m)	Fulminante # 06 (und)	Cable eléctrico (m)
P0001	92/-	46	46	400	3	2	-
P0002	226/-	113	113	1 400	3	2	-
P0003	296/-	148	148	1 400	3	2	-
P0004	330/-	165	165	1 400	3	2	-
P0005	332/-	166	166	1 400	3	2	-
P0006	272/-	136	136	1 400	3	2	-
P0007	310/-	155	155	1 400	3	2	-
P0008	290/-	145	145	1 400	3	2	-
P0009	222/-	111	111	1 400	3	2	-
P0010	278/-	139	139	1 400	3	2	-
P0011	264/-	132	132	1 300	3	2	-
P0012	278/-	139	139	1 400	3	2	-
E0001	108/108	-	108	-	-	-	108
E0002	146/146	-	146	-	-	-	146
E0003	117/117	-	117	-	-	-	117
E0004	118/118	-	118	-	-	-	118
E0005	156/156	-	156	-	-	-	156
E0006	129/129	-	129	-	-	-	129
E0007	124/124	-	124	-	-	-	124
E0008	128/128	-	128	-	-	-	128

Fuente: SPCC, 2018.

Como se puede observar, la implementación estratégica de los detonadores electrónicos consiste en la instalación de un detonador electrónico y pirotécnico por taladro, con la finalidad de reducir los costos operacionales de voladura y mejorar los resultados en la fragmentación.

Tabla 22
Precios unitarios de los insumos de voladura

Descripción del ítem	Unidad	Costo
Explosivo		
Heavy ANFO 55 (HA55)	USD/m	48,37
Heavy ANFO 64 (HA64)	USD/m	49,02
Accesorios de voladura (sistema electrónico)		
Detonador Electrónico	USD/und	31,18
Cable de conexión (10 000 m = 50 rollos)	USD/m	0,22
Cable de disparo (1 000 m = 2 carretes)	USD/m	0,22
Accesorios de voladura (sistema pirotécnico)		
Detonador pirotécnico (nonel - retardo de fondo)	USD/und	2,50
Retardo de superficie	USD/und	2,10
Boosters 1Lb	USD/und	3,50
Cordón detonante 5G (1 400 m)	USD/caja	136,00
Mecha de Seguridad	USD/m	0,11
Fulminante # 06	USD/und	0,21

Fuente: SPCC, 2018.

Teniendo presente las tablas anteriores, donde se mencionan los precios unitarios de los insumos de voladura para ambos sistemas de iniciación; se procede a calcular el costo del explosivo para cada proyecto aplicando la expresión [13], el costo de accesorio aplicando la expresión [14] y [15] con respecto al uso de detonadores pirotécnicos y electrónicos,

y al relacionarlos con el tonelaje disparado, se obtiene el costo unitario por tonelada, expresado en USD/t, según el sistema de iniciación.

$$Cost_{exp} = Cost_{petro} + Cost_{emul} + Cost_{na} \quad [13]$$

Donde:

$Cost_{exp}$ = Costo del explosivo por proyecto en USD.

$Cost_{petro}$ = Costo de petróleo por proyecto en USD.

$Cost_{emul}$ = Costo de emulsión matriz por proyecto en USD.

$Cost_{na}$ = Costo de nitrato de amonio por proyecto en USD.

$$Cost_{acces} = Cost_{dp} + Cost_{rs} + Cost_b + Cost_{cd} + Cost_{ms} + Cost_{ful} \quad [14]$$

Donde:

$Cost_{acces}$ = Costo de accesorios por proyecto en USD.

$Cost_{dp}$ = Costo de detonador pirotécnico por proyecto en USD.

$Cost_{rs}$ = Costo de retardo de superficie por proyecto en USD.

$Cost_b$ = Costo de Boosters por proyecto en USD.

$Cost_{cd}$ = Costo de cordón detonante por proyecto en USD.

$Cost_{ms}$ = Costo de mecha de seguridad por proyecto en USD.

$Cost_{ful}$ = Costo de fulminante por proyecto en USD.

$$Cost_{acces} = Cost_{dp} + Cost_{de} + Cost_b + Cost_{ce} \quad [15]$$

Donde:

$Cost_{acces}$ = Costo de accesorios por proyecto en USD.

$Cost_{dp}$ = Costo de detonador pirotécnico por proyecto en USD.

$Cost_{de}$ = Costo de detonador electrónico por proyecto en USD.

$Cost_b$ = Costo de Boosters por proyecto en USD.

$Cost_{ce}$ = Costo de cable eléctrico por proyecto en USD.

$$Costt_{vol} = Cost_{exp} + Cost_{acces} \quad [16]$$

Donde:

$Costt_{vol}$ = Costo total de voladura por proyecto en USD.

$Cost_{exp}$ = Costo del explosivo por proyecto en USD.

$Cost_{acces}$ = Costo de accesorios por proyecto en USD.

$$CU_{vol} = \frac{Costt_{vol}}{t_{disp}} \quad [17]$$

Donde:

CU_{vol} = Costo unitario de voladura por proyecto en USD/t.

$Costt_{vol}$ = Costo total de voladura por proyecto en USD.

t_{disp} = Tonelaje disparado por proyecto en t.

En la tabla 23, se observa el cálculo de costo de cada componente del explosivo, considerando los precios de 0,77 USD/Kg de petróleo, 0,62 USD/Kg de emulsión matriz y 0,58 USD/Kg de nitrato de amonio, y al aplicar la expresión [13], se obtiene el costo total de explosivo.

Tabla 23
Cálculo de costos de explosivos

Muestra proyecto voladura (#)	Detonador	Petróleo (USD)	Emulsión matriz (USD)	Nitrato de amonio (USD)	Total de explosivo (USD)
P0001	Pirotécnico	500,91	9 600,05	5 830,00	15 931
P0002	Pirotécnico	1 512,46	26 861,14	17 603,17	45 977
P0003	Pirotécnico	1 366,98	20 735,77	15 909,94	38 013
P0004	Pirotécnico	3 049,64	47 764,77	35 494,04	86 308
P0005	Pirotécnico	2 855,68	49 379,43	33 236,59	85 472
P0006	Pirotécnico	2 131,45	40 820,02	24 807,49	67 759
P0007	Pirotécnico	2 706,80	38 143,00	31 503,80	72 354
P0008	Pirotécnico	2 400,68	32 809,48	27 940,99	63 151
P0009	Pirotécnico	1 573,21	24 288,89	18 310,25	44 172
P0010	Pirotécnico	2 061,68	39 376,96	23 995,44	65 434
P0011	Pirotécnico	2 015,95	32 977,95	23 463,17	58 457
P0012	Pirotécnico	2 735,43	34 730,91	25 748,41	63 215
E0001	Electrónico	1 633,71	27 950,71	19 014,36	48 599
E0002	Electrónico	2 595,63	43 162,39	30 209,90	75 968
E0003	Electrónico	1 657,70	28 608,09	19 293,53	49 559
E0004	Electrónico	1 718,09	29 744,08	19 996,45	51 459
E0005	Electrónico	2 645,95	43 717,94	30 795,64	77 160
E0006	Electrónico	2 050,21	34 636,64	23 861,97	60 549
E0007	Electrónico	1 884,15	32 190,36	21 929,21	56 004
E0008	Electrónico	2 026,49	34 287,17	23 585,86	59 900

Fuente: SPCC, 2018.

En la tabla 24, se observa el cálculo de costo de cada accesorio según detonadores, de acuerdo con los precios observados en la tabla 22, y al aplicar la expresión [14] y [15], respectivamente, se obtiene el costo total de accesorios, observada en la tabla 25.

Tabla 24
Cálculo de costos de accesorios

Muestra proyecto voladura (#)	Detonador electrónico /pirotécnico (USD)	Retardo superficie (USD)	Boosters 1 libra (USD)	Cordón detonante (USD)	Mecha seguridad (USD)	Fulminante # 06 (USD)	Cable eléctrico (USD)
P0001	0/230	97	161	39	0,34	0,42	-
P0002	0/565	237	396	136	0,34	0,42	-
P0003	0/740	311	518	136	0,34	0,42	-
P0004	0/825	347	578	136	0,34	0,42	-
P0005	0/830	349	581	136	0,34	0,42	-
P0006	0/680	286	476	136	0,34	0,42	-
P0007	0/775	326	543	136	0,34	0,42	-
P0008	0/725	305	508	136	0,34	0,42	-
P0009	0/555	233	389	136	0,34	0,42	-
P0010	0/695	292	487	136	0,34	0,42	-
P0011	0/662	278	463	126	0,34	0,42	-
P0012	0/695	292	487	136	0,34	0,42	-
E0001	3 367/270	-	378	-	-	-	319
E0002	4 552/365	-	511	-	-	-	447
E0003	3 647/293	-	410	-	-	-	149
E0004	3 679/295	-	413	-	-	-	319
E0005	4 863/390	-	546	-	-	-	542
E0006	4 022/323	-	452	-	-	-	355
E0007	3 850/309	-	432	-	-	-	337
E0008	3 997/321	-	449	-	-	-	353

Fuente: SPCC, 2018.

Es importante realizar la evaluación económica de forma preponderante para determinar el costo beneficio resultante con el fin de rentabilizar la operación de minado. En la tabla 25, se observa el resultado de los costos unitarios por proyecto de acuerdo con la expresión [17].

Tabla 25
Costos por proyecto de voladura

Muestra proyecto voladura (#)	Detonador	Costo de explosivo (USD)	Costo de accesorios (USD)	Costo total voladura (USD)	Tonelaje disparado (t)	Costo unitario (USD/t)
P0001	Pirotécnico	15 931	527	16 458	89 154	0,18
P0002	Pirotécnico	45 977	1335	47 311	160 097	0,30
P0003	Pirotécnico	38 013	1706	39 718	190 681	0,21
P0004	Pirotécnico	86 308	1886	88 194	284 414	0,31
P0005	Pirotécnico	85 472	1896	87 368	263 113	0,33
P0006	Pirotécnico	67 759	1578	69 337	223 841	0,31
P0007	Pirotécnico	72 354	1780	74 133	256 212	0,29
P0008	Pirotécnico	63 151	1674	64 825	202 525	0,32
P0009	Pirotécnico	44 172	1313	45 486	139 036	0,33
P0010	Pirotécnico	65 434	1610	67 044	214 886	0,31
P0011	Pirotécnico	58 457	1530	59 988	202 396	0,30
P0012	Pirotécnico	63 215	1610	64 761	209 113	0,31
E0001	Electrónico	48 599	4 334	52 933	191 154	0,28
E0002	Electrónico	75 968	5 874	81 842	265 695	0,31
E0003	Electrónico	49 559	4 498	54 057	207 866	0,26
E0004	Electrónico	51 459	4 706	56 164	214 696	0,26
E0005	Electrónico	77 160	6 342	83 501	279 277	0,30
E0006	Electrónico	60 549	5 151	65 699	231 738	0,28
E0007	Electrónico	56 004	4 928	60 932	223 217	0,27
E0008	Electrónico	59 900	5 119	65 018	230 520	0,28

Fuente: SPCC, 2018.

De la tabla 25, se determina que las voladuras con detonadores pirotécnicos, presenta un costo unitario promedio de 0,30 USD/t, mientras que en las voladuras con detonadores electrónicos, el costo unitario es de 0,28 USD/t, la diferencia para este estudio, correspondiente al 2018, radica principalmente a que se ha empleado un factor de carga explosiva menor que en la detonación pirotécnica, por lo que existe muchas variables que se pueden modificar en función a las necesidades granulométricas que se desea obtener. En la tabla 26, se observa el resultado del ahorro generado por la implementación de detonadores electrónicos correspondientes al estudio del 2018, logrando una mejora en los resultados muestrales, obteniendo un ahorro de USD 22 431.

Tabla 26
Ahorro en costo de voladura

Descripción del Ítem	Unidad	Valor
Costo unitario - detonador pirotécnico	USD/t	0,30
Costo unitario - detonador electrónico	USD/t	0,28
Diferencia - costo unitario	USD/t	0,02
Tonelaje disparado	t	1 158 688
Ahorro - costo voladura	USD	22 431,94

Fuente: SPCC, 2018.

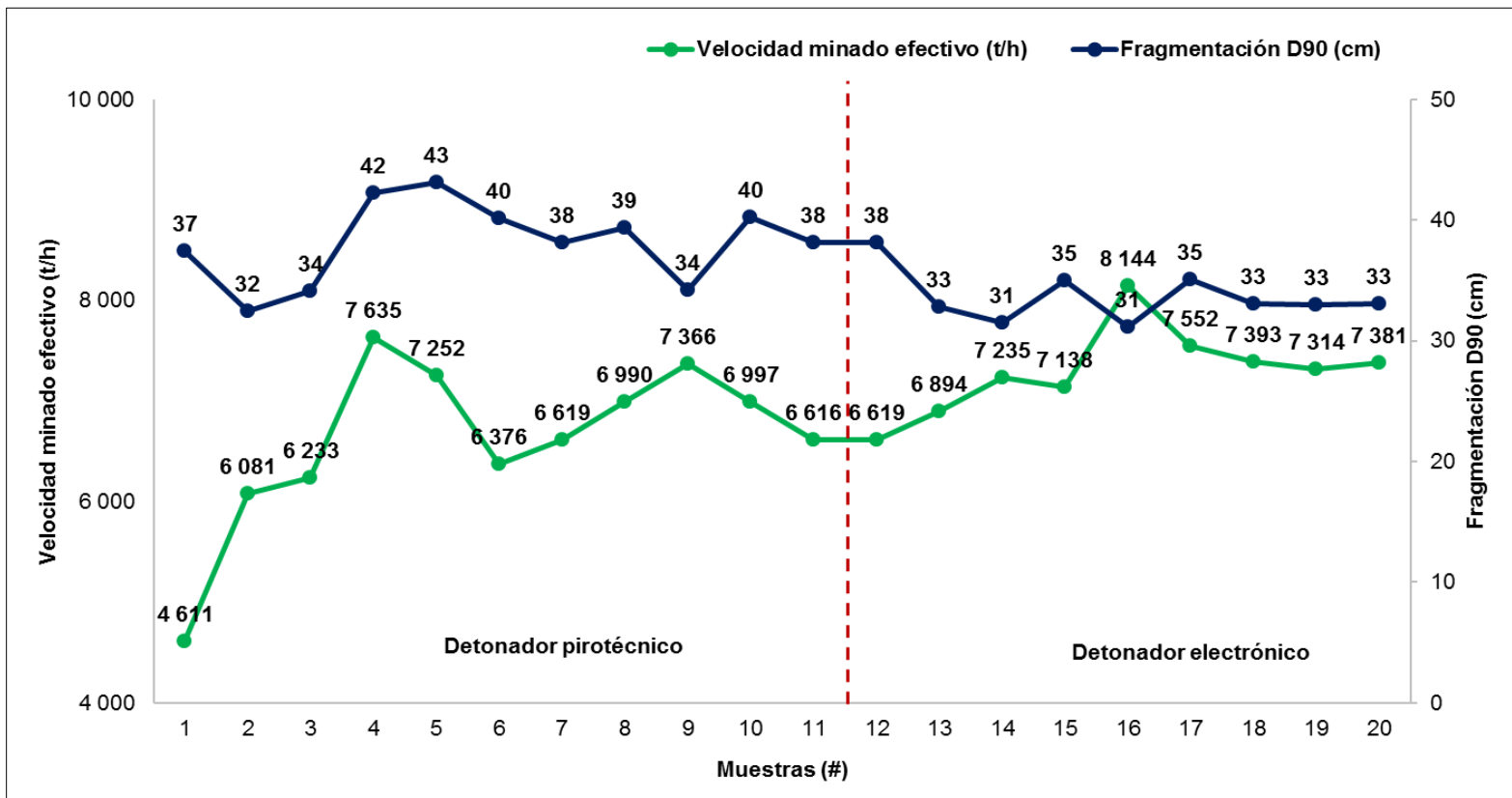


Figura 55. Velocidad minado efectivo versus fragmentación D90
 Fuente: Propia.

Nota. Se visualiza una reducción del 11,14 % en la fragmentación D90, generando un incremento del 11,56 % en la velocidad de minado efectivo, al implementar los detonadores electrónicos en los proyectos de voladura.

Como se observa en la figura 55, la velocidad de minado efectivo se incrementa al reducir levemente la fragmentación producto de la implementación de detonadores electrónicos, desde ese punto de vista se establece un estudio de costos de post voladura correspondiente a los resultados del año 2017, centralizándose en la determinación de los costos de post voladura que generan mayor impacto en el proceso minero, como el carguío, acarreo y chancado; con la finalidad evaluar el costo beneficio de la implementación de los detonadores electrónicos en el proceso minero; donde el costo unitario de operaciones está estructurado por el costo de operación, mantenimiento, electricidad y depreciación unitaria.

$$CUD_p = \frac{CTD_p}{t} \quad [18]$$

$$CUD_e = \frac{CTD_e}{t} \quad [19]$$

Donde:

CUD_p = Costo unitario según detonador pirotécnico en USD.

CUD_e = Costo unitario según detonador electrónico en USD.

CTD_p = Costo total según detonador pirotécnico en USD.

CTD_e = Costo total según detonador electrónico en USD.

t = Tonelaje de operación en t.

De acuerdo con las expresiones [18] y [19], se procede a calcular los costos unitarios de las operaciones de carguío según equipos, observadas en la tabla 27, donde se diferencia en la recolección de registros de acuerdo con el tiempo de operación según detonadores.

Tabla 27
Cálculo de costos unitarios en carguío

Flota mina	CTDp (MUSD)	CTDe (MUSD)	Tonelaje (Mt)	CUDp (USD/t)	CUDe (USD/t)
(3) P&H 4100 A	12,44	11,98	46,07	0,27	0,26
(1) BE495B	5,42	5,42	22,57	0,24	0,24
(3) BE495HR	25,01	23,76	125,07	0,20	0,19
(1) CF-1400	1,88	1,91	2,76	0,68	0,69
(1) CF-994F	1,53	1,82	4,79	0,32	0,38
Total	46,28	44,88	201,26	0,23	0,22

Fuente: SPCC, 2018.

En la tabla 28, podemos observar que el costo unitario promedio en la detonación pirotécnica es de 0,23 USD/t, el cual se redujo con la detonación electrónica a 0,22 USD/t, por lo tanto, al realizar el cálculo de utilidad acumulado, se obtiene una ganancia de 1,76 MUSD, producto de la variabilidad que presenta el costo unitario en los equipos, al ser más

productivos en sus rendimientos horarios, produciendo más tonelaje que el programado, por los mejores resultados de fragmentación.

Tabla 28
Costos unitarios en operaciones de carguío

Flota mina	Detonadores pirotécnicos (USD/t)	Detonadores electrónicos (USD/t)	Diferencia (USD/t)	Tonelaje 2017 (t)	Utilidad 2017 (USD)
(3) P&H 4100 A	0,27	0,26	0,01	46 067 002	307 113
(1) BE495B	0,24	0,24	0,00	22 568 852	75 230
(3) BE495HR	0,20	0,19	0,01	125 074 187	1 667 656
(1) CF-1400	0,68	0,69	-0,01	2 761 196	-18 408
(1) CF-994F	0,32	0,38	-0,06	4 792 065	-271 550
Total	0,23	0,22	0,01	201 263 302	1 760 040

Fuente: SPCC, 2018.

Para calcular los costos unitarios de las operaciones de acarreo según equipos, se aplica las expresiones [18] y [19], los resultados se observan en la tabla 29, donde se diferencia en la recolección de registros de acuerdo con el tiempo de operación según detonadores. Para expresar los resultados de costo beneficio en el proceso de acarreo de la mina Toquepala, se ha generado las estadísticas del progreso en cuanto a los costos operativos obtenidos en el año 2017.

Tabla 29
Cálculo de costos unitarios en acarreo

Flota mina	CTDp (MUSD)	CTDe (MUSD)	Tonelaje (Mt)	CUDp (USD/t)	CUDe (USD/t)
(18) V. Komatsu 830E	23,53	21,50	27,05	0,87	0,80
(18) V. Caterpillar 793C	25,49	25,16	33,54	0,76	0,75
(1) V. Cat 797F	13,34	9,29	23,83	0,56	0,39
(4) V. Komatsu 930E-I	7,06	7,13	14,13	0,50	0,51
(24) V. Komatsu 930E-III	56,50	59,33	80,72	0,70	0,74
Total	125,93	122,41	179,26	0,70	0,68

Fuente: SPCC, 2018.

En la tabla 30, podemos observar que el costo unitario promedio en la detonación pirotécnica es de 0,70 USD/t, el cual se redujo con la detonación electrónica a 0,68 USD/t, por lo tanto, al realizar el cálculo de utilidad acumulado, se obtiene una ganancia de 2,69 MUSD, producto de la variabilidad que presenta el costo unitario en los equipos, al ser más productivos en sus rendimientos horarios, produciendo más tonelaje que el programado, por los mejores resultados de fragmentación. Los costos unitarios promedios en el 2017 fueron elevados, debido a que se realizaron adquisiciones en la flota de transporte, se compraron 5 volquetes marca Cat, modelo 797F; sin embargo, la utilidad acumulada generó ganancias.

Tabla 30
Costos unitarios en operaciones de acarreo

Flota mina	Detonadores pirotécnicos (USD/t)	Detonadores electrónicos (USD/t)	Diferencia (USD/t)	2017 (t)	Utilidad 2017 (USD)
(18) V. Komatsu 830E	0,87	0,80	0,07	27 049 973	1 775 134
(18) V. Caterpillar 793C	0,76	0,75	0,01	33 540 912	253 460
(1) V. Cat 797F	0,56	0,39	0,17	23 826 318	4 036 366
(4) V. Komatsu 930E-I	0,50	0,51	-0,01	14 125 590	-141 256
(24) V. Komatsu 930E-III	0,70	0,74	-0,04	80 717 289	-3 228 692
Total	0,70	0,68	0,02	179 260 082	2 695 012

Fuente: SPCC, 2018.

Para expresar los resultados de costo beneficio en el proceso de chancado primario, también se realiza las estadísticas del proceso, y al aplicar las expresiones [18] y [19], se calcula el costo unitario de chancado observado en la tabla 31, donde se diferencia en la recolección de registros de acuerdo con el tiempo de operación según detonadores

Tabla 31
Cálculo de costos unitarios en chancado

Costo año calendario	CTDp (MUSD)	CTDe (MUSD)	Tonelaje (Mt)	CUDp (USD/t)	CUDe (USD/t)
Costo unitario	3,91	3,29	20,59	0,19	0,16

Fuente: SPCC, 2018.

En la tabla 32, se observa que el costo unitario acumulado con la detonación pirotécnica es de 0,19 USD/t, el cual decreció con la detonación electrónica a 0,16 USD/t, lo que implica que los tamaños granulométricos han tenido un periodo corto de residencia en la operación, pasando sin problemas los sets de las aberturas, donde se logró una utilidad de USD 549 093, correspondiente al periodo 2017.

Tabla 32
Costos unitarios en operaciones de chancado

Costo año calendario	Detonadores pirotécnicos (USD/t)	Detonadores electrónicos (USD/t)	Diferencia (USD/t)	2017 (t)	Utilidad 2017 (USD)
Costo unitario	0,19	0,16	0,03	20 591 000	549 093

Fuente: SPCC, 2018.

De acuerdo con los datos obtenidos, se procede a realizar los cálculos de costos de factibilidad correspondientes a los proyectos de prueba del año 2018, respecto a los costos unitarios de post voladura del año 2017. Sin embargo, es necesario registrar los datos obtenidos en el arranque de la implementación de los detonadores pirotécnicos y su impacto en los costos unitarios de la voladura del año 2017, donde se considera los costos de adquisición con un determinado porcentaje de flete

con lo cual el producto e insumo es puesto en la operación. En el mercado, existen precios similares para los productos de diferentes proveedores. La mina Toquepala, desde hace muchos años atrás, cuenta con proveedores como EXSA SA, Famesa Explosivo, Orica, Cachimayo y otros para el abastecimiento de los insumos de voladura. En la tabla 33, se observa los datos registrados, y al aplicar la expresión [18] y [19], se obtiene los costos unitarios de voladura en la etapa de adquisición.

Tabla 33
Cálculo de costos unitarios de voladura del 2017

Costo año calendario	CTDp (MUSD)	CTDe (MUSD)	Tonelaje (Mt)	CUDp (USD/t)	CUDe (USD/t)
Costo unitario	3,91	3,29	20,59	0,19	0,16

Fuente: SPCC, 2018.

Como se observa en la tabla 34, el promedio de costo unitario con detonación pirotécnica es de 0,20 USD/t, el cual se incrementó con la detonación electrónica a 0,21 USD/t, generando un excedente en costos de más de 1,52 MUSD, producto de la introducción de la detonación electrónica en el proceso de voladura, que es mucho más cara que la detonación pirotécnica, en otras palabras los costos de voladura se incrementan, pero bajan los costos de las operaciones posteriores a la

voladura, por tener un material más fragmentado y de más fácil manejo para las operaciones de carguío, acarreo y chancado.

Tabla 34
Costos unitarios de operaciones de voladura

Costo año calendario	Detonadores pirotécnicos (USD/t)	Detonadores electrónicos (USD/t)	Diferencia (USD/t)	2017 (t)	Utilidad 2017 (USD)
Costo Unitario	0,20	0,21	-0,01	152 949 577	-1 529 496

Fuente: SPCC, 2018.

Con respecto al análisis de costos unitarios de voladura y post voladura, realizados en el estudio del 2017, se adapta la diferencia obtenida en los resultados del estudio del 2018, donde se considera las diferencias de + 0,02 USD/t y - 0,01 USD/t, correspondientes a las diferencias del costo unitario de voladura del año 2018 y 2017, respectivamente. Al mantener los costos unitarios de carguío, acarreo y chancado constantes, se obtiene una utilidad neta estimada de 7,96 MUSD al año 2018, producto de la continuidad de uso de los detonadores electrónicos en proceso minero. Esta diferencia contribuye a las mejoras de las operaciones unitarias en productividad y rendimiento, además las nuevas adquisiciones de equipos sumarán la rentabilidad operativa al reducir los aceros consumibles en las

palas y volquetes. En la tabla 35, se observa el costo beneficio de la operación en la etapa de adquisición y continuidad operativa del uso de detonadores electrónicos en los procesos mineros.

Tabla 35
Costo beneficio de la operación

Utilidad de operación unitaria	2017 (USD)	2018 esperado (USD)
Operación de carguío	1 760 040	1 760 040
Operación de acarreo	2 695 012	2 695 012
Operación de chancado	549 093	549 093
Subtotal	5 004 146	5 004 146
Utilidad en operación de voladura	-1 529 496	2 961 069
Utilidad neta	3 474 650	7 965 215

Fuente: SPCC, 2018.

3.5.4. Análisis de optimización y sensibilidad

Para determinar el modelo de optimización, es necesario establecer los modelos de correlación entre las variables de estudio, como se observa en la tabla 36, se realizó la correlación según Pearson debido a la

parametrización de las variables, donde no se consideraron los altos erráticos de las muestras # 1 y # 3.

Tabla 36
Correlación de variables de estudio según Pearson

Variables	Estadístico correlación	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Factor carga (kg/t)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Costo unitario voladura (USD/t)
Fragmentación D90 (cm)	Pearson	1	0,096	0,233	,705**	-0,221	,594**
	Sig. (bilateral)		0,705	0,352	0,001	0,377	0,009
	N	18	18	18	18	18	18
Porcentaje bolonería (%)	Pearson	0,096	1	-0,211	0,201	-,715**	0,169
	Sig. (bilateral)	0,705		0,401	0,423	0,001	0,501
	N	18	18	18	18	18	18
Vibración VPP (mm/s)	Pearson	0,233	-0,211	1	0,303	-0,156	0,274
	Sig. (bilateral)	0,352	0,401		0,222	0,535	0,271
	N	18	18	18	18	18	18
Factor carga (kg/t)	Pearson	,705**	0,201	0,303	1	-0,310	,973**
	Sig. (bilateral)	0,001	0,423	0,222		0,210	0,000
	N	18	18	18	18	18	18
Velocidad minado efectivo (t/h)	Pearson	-0,221	-,715**	-0,156	-0,310	1	-0,261
	Sig. (bilateral)	0,377	0,001	0,535	0,210		0,295
	N	18	18	18	18	18	18
Costo unitario voladura (USD/t)	Pearson	,594**	0,169	0,274	,973**	-0,261	1
	Sig. (bilateral)	0,009	0,501	0,271	0,000	0,295	
	N	18	18	18	18	18	18

Fuente: Propia.

De acuerdo con la tabla 36, para que exista correlación entre las variables el P-valor (sig. bilateral) debe ser menor al 5 % ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, se observa que la variable costo unitario presenta correlación significativa con la variable fragmentación ($\rho = 0,594$) y factor de carga ($\rho = 0,973$), así mismo, la variable porcentaje de bolonería presenta correlación significativa con la variable velocidad de minado efectivo ($\rho = -0,715$), y finalmente la variable factor de carga presenta correlación significativa con la variable costo unitario ($\rho = 0,973$). En la figura 56, se observa el modelo obtenido de la correlación existente entre la variable costo unitario de voladura y el factor de carga.

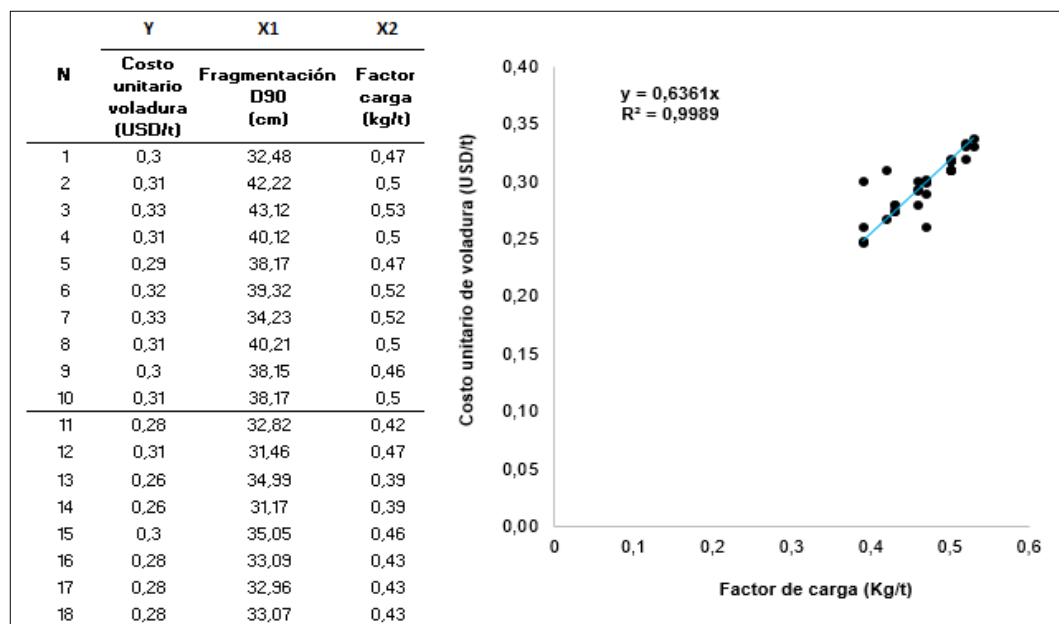


Figura 56. Modelo del costo unitario de voladura
Fuente: Propia.

Si bien es cierto, según el análisis de la tabla 36, el costo unitario de voladura presenta relación con las variables fragmentación y factor de carga, al realizar el modelo de regresión múltiple ($\rho = 0,999$), se obtuvo la expresión [20], donde se observa que la variable fragmentación presenta un peso insignificante respecto a la variable factor de carga.

$$Y = - 0,0003 X_1 + 0,66 X_2 \quad [20]$$

Donde:

Y = Costo unitario de voladura en USD/t.

X₁ = Fragmentación D90 en cm.

X₂ = Factor de carga en Kg/t.

De la misma forma se realizó el modelo de regresión múltiple de la variable velocidad de minado efectivo (figura 57), respecto al porcentaje de bolonería ($\rho = 0,715$), donde se obtuvo la expresión [21].

$$Y = 7\,823,35 - 115,51 X \quad [21]$$

Donde:

Y = Velocidad de minado efectivo en t/h.

X = Porcentaje de bolonería en %.

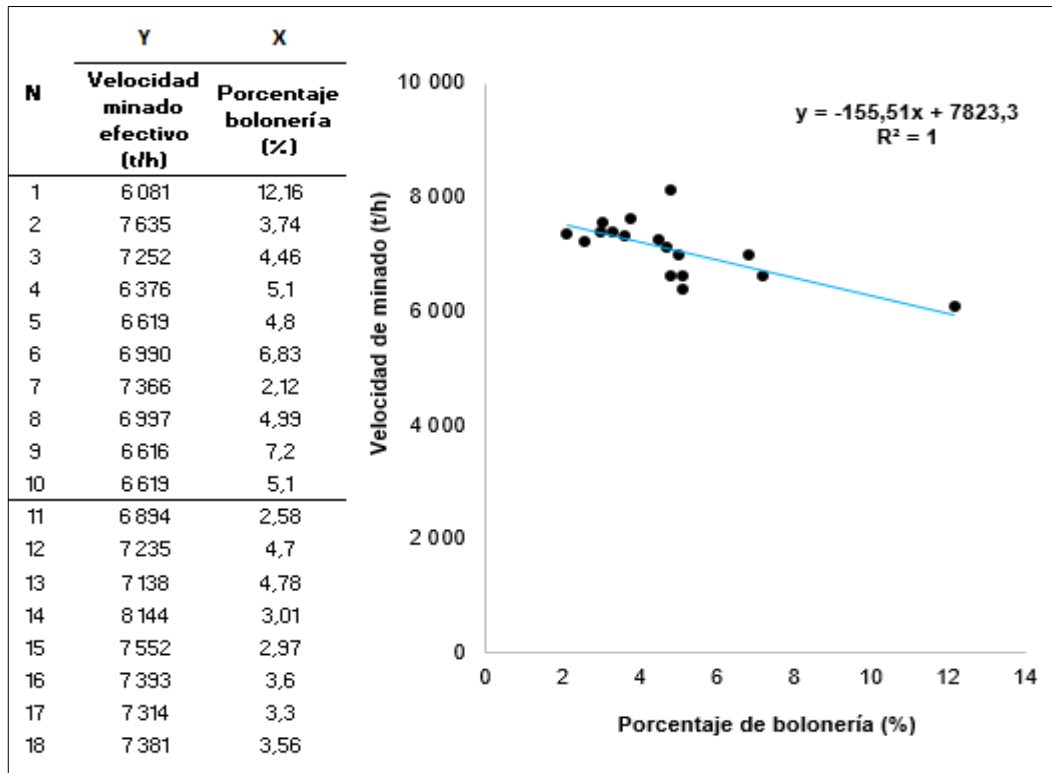


Figura 57. Modelo de la velocidad de minado efectivo
Fuente: Propia.

Como se observa en la figura 57, la velocidad de minado es inversamente proporcional al porcentaje de bolonería. Al implementar los detonadores electrónicos en el proceso de fragmentación del macizo rocoso, se logra reducir el porcentaje de bolonería a 3,56 %, generando un incremento en la velocidad de minado efectivo a 7 381 t/h, permitiendo de esta forma reducir los costos unitarios de post voladura en las operaciones de carguío, acarreo y chancado. En la tabla 37, se observa los resultados

obtenidos del análisis estadístico de relación de variables, sin considerar los datos de altos erráticos, observados posteriormente en el gráfico de bigotes, incrementado de esta forma la diferencia existente entre los costos unitarios, donde el costo total se determina mediante la expresión [22].

$$CU_T = CU_V + CU_C + CU_A + CU_{CH} \quad [22]$$

Donde:

CU_T = Costo unitario total en USD/t.

CU_V = Costo unitario de voladura en USD/t.

CU_C = Costo unitario de carguío en USD/t.

CU_A = Costo unitario de acarreo en USD/t.

CU_{CH} = Costo unitario de chancado en USD/t.

Tabla 37
Resumen de costos unitarios

Detonadores	Porcentaje bolonería (%)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Costo unitario				Costo total (USD/t)
			Voladura (USD/t)	Post voladura			
				Carguío (USD/t)	Acarreo (USD/t)	Chancado (USD/t)	
Pirotécnicos	5,65	6 616	0,31	0,23	0,70	0,19	1,43
Electrónicos	3,56	7 381	0,28	0,22	0,69	0,16	1,35

Fuente: Propia.

Como se observa en la tabla 37, se establecen los resultados promedios para las variables porcentaje de bolonería y velocidad de minado. Para los costos unitarios de voladura y post voladura, se aplican las expresiones mencionadas con anterioridad a los promedios obtenidos en las tablas de resultados de los costos de post voladura.

a) Cálculo del costo unitario de voladura

Según la expresión [13] se procede a calcular el costo de explosivo para detonadores pirotécnicos según los datos de la tabla 23.

$$Cost_{exp} = Cost_{petro} + Cost_{emul} + Cost_{na}$$

$$Cost_{exp} = 24\ 910,88\ USD + 397\ 488,37\ USD + 283\ 843,28\ USD$$

$$Cost_{exp} = 706\ 242,53\ USD$$

Según la expresión [13] se procede a calcular el costo de explosivo para detonadores electrónicos según los datos de la tabla 23.

$$Cost_{exp} = Cost_{petro} + Cost_{emul} + Cost_{na}$$

$$Cost_{exp} = 16\ 211,93\ USD + 274\ 297,39\ USD + 188\ 686,91\ USD$$

$$Cost_{exp} = 479\ 196,23\ USD$$

Según la expresión [14] se procede a calcular el costo de accesorios para detonadores pirotécnicos según los datos de la tabla 24.

$$Cost_{acces} = Cost_{dp} + Cost_{rs} + Cost_b + Cost_{cd} + Cost_{ms} + Cost_{ful}$$

$$Cost_{acces} = 7\,977\,USD + 3\,350,3\,USD + 5\,584\,USD + 1\,525,1\,USD + 4\,USD + 5,1\,USD$$

$$Cost_{acces} = 18\,445,50\,USD$$

Según la expresión [15] se procede a calcular el costo de accesorios para detonadores electrónicos según los datos de la tabla 24.

$$Cost_{acces} = Cost_{dp} + Cost_{de} + Cost_b + Cost_{ce}$$

$$Cost_{acces} = 2\,564,29\,USD + 31\,976,64\,USD + 3\,590\,USD + 2\,820,02\,USD$$

$$Cost_{acces} = 40\,950,95\,USD$$

Según la expresión [16] se procede a calcular el costo total de voladura para detonadores pirotécnicos según los datos de la tabla 25.

$$Costt_{vol} = Cost_{exp} + Cost_{acces}$$

$$Costt_{vol} = 706\,242,53\,USD + 18\,445,50\,USD$$

$$Costt_{vol} = 724\,688,03\,USD$$

Según la expresión [16] se procede a calcular el costo total de voladura para detonadores electrónicos según los datos de la tabla 25.

$$Costt_{vol} = Cost_{exp} + Cost_{acces}$$

$$Costt_{vol} = 479\,196,23\,USD + 40\,950,95\,USD$$

$$Costt_{vol} = 520\,147,18\,USD$$

Según la expresión [17] se procede a calcular el costo unitario de voladura para detonadores pirotécnicos según los datos de la tabla 25.

$$CU_{vol} = \frac{Costt_{vol}}{t_{disp}}$$

$$CU_{vol} = \frac{724\,688,03\,USD}{2\,435\,467,52\,t}$$

$$CU_{vol} = 0,30\,USD/t$$

Según la expresión [17] se procede a calcular el costo unitario de voladura para detonadores electrónicos según los datos de la tabla 25.

$$CU_{vol} = \frac{Costt_{vol}}{t_{disp}}$$

$$CU_{vol} = \frac{520\,147,18\ USD}{1\,844\,162,74\ t}$$

$$CU_{vol} = 0,28\ USD/t$$

b) Cálculo del costo unitario de carguío

Para determinar el costo unitario de carguío para detonadores pirotécnicos se aplica la expresión [18] a los datos obtenidos en la tabla 27.

$$CUDp = \frac{CTDp}{t} = \frac{46,28\ MUSD}{201,6\ Mt} = 0,23\ USD/t$$

Y para determinar el costo unitario de carguío para detonadores electrónicos se aplica la expresión [19].

$$CUDe = \frac{CTDe}{t} = \frac{44,88\ MUSD}{201,6\ Mt} = 0,22\ USD/t$$

c) Cálculo del costo unitario de acarreo

Para determinar el costo unitario de acarreo para detonadores pirotécnicos se aplica la expresión [18] a los datos obtenidos en la tabla 29.

$$CUDp = \frac{CTDp}{t} = \frac{125,93 \text{ MUSD}}{179,26 \text{ Mt}} = 0,70 \text{ USD/t}$$

Y para determinar el costo unitario de acarreo para detonadores electrónicos se aplica la expresión [19].

$$CUDe = \frac{CTDe}{t} = \frac{122,41 \text{ MUSD}}{179,26 \text{ Mt}} = 0,68 \text{ USD/t}$$

d) Cálculo del costo unitario de chancado

Para determinar el costo unitario de chancado para detonadores pirotécnicos se aplica la expresión [18] a los datos obtenidos en la tabla 31.

$$CUDp = \frac{CTDp}{t} = \frac{3,91 \text{ MUSD}}{20,59 \text{ Mt}} = 0,19 \text{ USD/t}$$

Y para determinar el costo unitario de chancado para detonadores electrónicos se aplica la expresión [19].

$$CUDe = \frac{CTDe}{t} = \frac{3,29 \text{ MUSD}}{20,59 \text{ Mt}} = 0,16 \text{ USD/t}$$

Para determinar el impacto del costo unitario obtenido en la tabla 37, se procede a realizar el modelado del costo total de voladura en relación con la cantidad de taladros y tonelaje disparado respecto al uso del detonador pirotécnico ($\rho = 0,999$), donde se obtiene la expresión [23].

$$Y = 75,44 X_1 + 0,26 X_2 \quad [23]$$

Donde:

Y = Costo total de voladura en USD.

X_1 = Taladros en und.

X_2 = Tonelaje disparado en t.

De la misma forma se realiza el modelado del costo total de voladura en relación con la cantidad de taladros y tonelaje disparado, respecto al uso del detonador electrónico ($\rho = 0,998$), donde se obtiene la expresión [24].

$$Y = -871,31 X_1 + 0,77 X_2 \quad [24]$$

Donde:

Y = Costo total de voladura en USD.

X_1 = Taladros en und.

X_2 = Tonelaje disparado en t.

Ahora se realiza el modelado del costo total en relación con la cantidad de taladros y tonelaje disparado respecto al uso del detonador pirotécnico ($\rho = 0,999$), donde se obtiene la expresión [25].

$$Y = 75,44 X_1 + 1,38 X_2 \quad [25]$$

Donde:

Y = Costo total en USD.

X_1 = Taladros en und.

X_2 = Tonelaje disparado en t.

De la misma forma se realiza el modelado del costo total en relación con la cantidad de taladros y tonelaje disparado respecto al uso del detonador electrónico ($\rho = 0,998$), donde se obtiene la expresión [26].

$$Y = -871,31 X_1 + 1,83 X_2 \quad [26]$$

Donde:

Y = Costo total en USD.

X_1 = Taladros en und.

X_2 = Tonelaje disparado en t.

Con los modelos obtenidos se procede a construir la tabla 38 en base a las variables cantidad de taladros y tonelaje disparado. En la Figura 58 y 59, se observa el análisis de sensibilidad del costo total de voladura y costo total respecto al uso de detonadores, respectivamente. Donde se identifica que el beneficio de ahorro en el costo de voladura y costo total se magnifica a partir de los 80 y 100 taladros, respectivamente.

Tabla 38
Datos ajustados según modelo de costo

Muestra proyecto voladura (#)	Taladros (und)	Tonelaje disparado (t)	Costo total voladura (USD)	Costo total (USD)
P0002	113	160 097	47 311	226 620
P0004	165	284 414	88 194	406 738
P0005	166	263 113	87 368	382 055
P0006	136	223 841	69 337	320 039
P0007	155	256 212	74 133	361 091
P0008	145	202 525	64 825	291 653
P0009	111	139 036	45 486	201 206
P0010	139	214 886	67 044	307 717
P0011	132	202 396	59 988	286 671
P0012	139	209 113	64 825	299 031
E0001	108	191 154	52 933	255 556
E0002	146	265 695	81 842	363 479
E0003	117	207 866	54 057	274 395
E0004	118	214 696	56 164	283 742
E0005	156	279 277	83 501	379 535
E0006	129	231 738	65 699	311 341
E0007	124	223 217	60 932	297 542
E0008	128	230 520	65 018	309 370

Fuente: Propia.

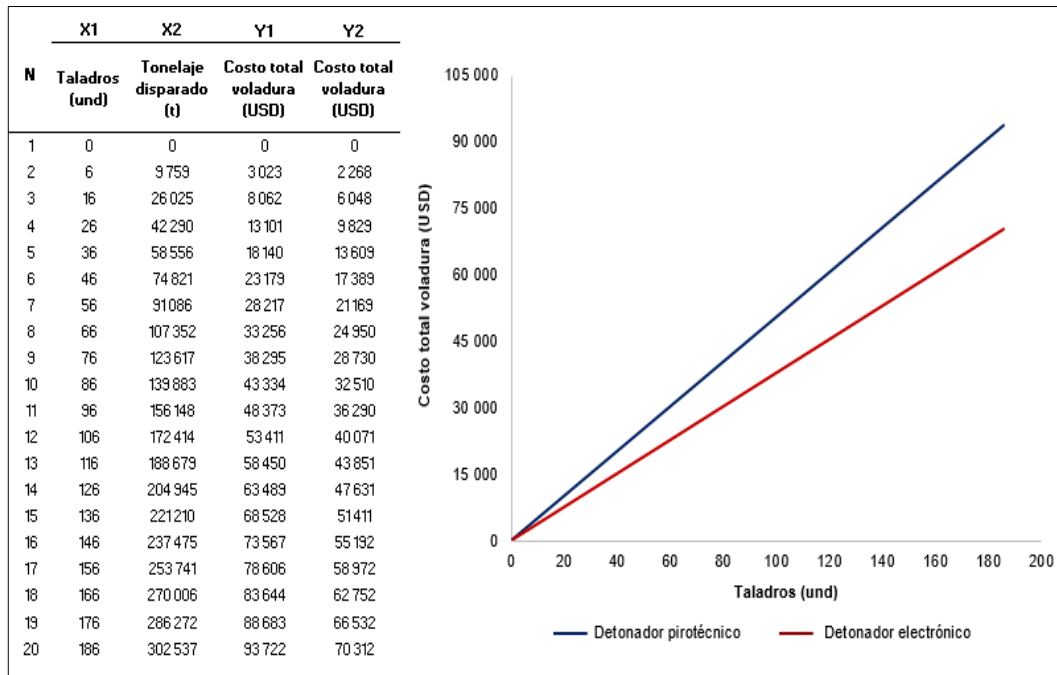


Figura 58. Modelo de costo de voladura ajustado
Fuente: Propia.

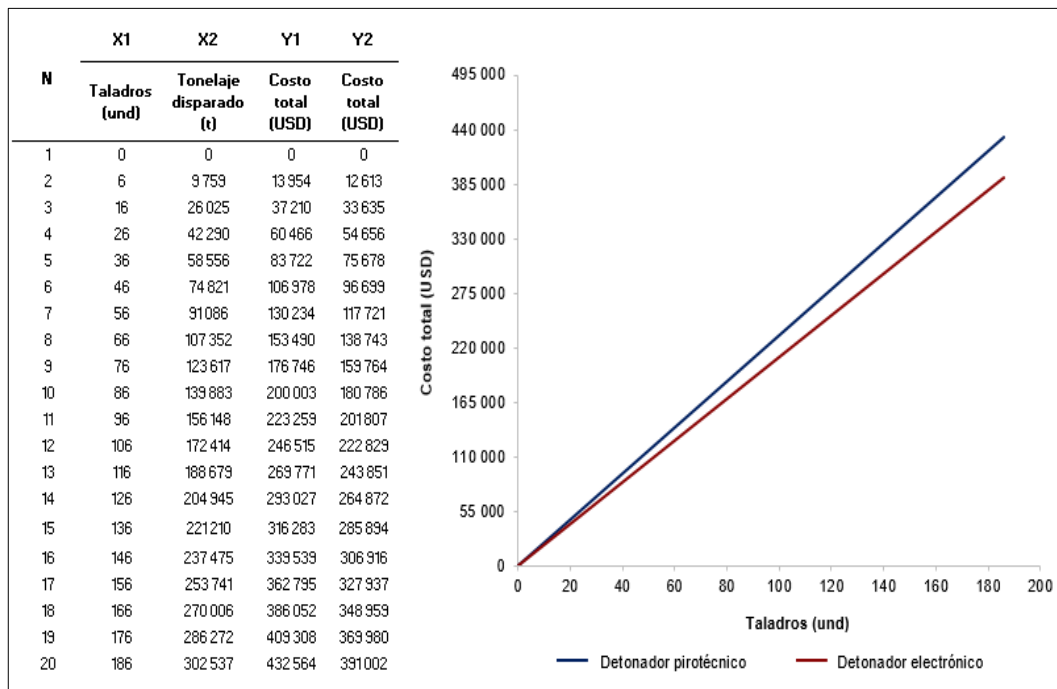


Figura 59. Modelo de costo total ajustado
Fuente: Propia.

3.5.5. Análisis de datos con estadística descriptiva

En la tabla 39, se observan los datos obtenidos en los *ítems* de recolección y procesamiento de datos, donde las principales variables de análisis son la fragmentación, vibración y costos.

Tabla 39
Datos de estudio

N°	Detonador	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Factor carga (kg/t)	Costo unitario voladura (USD/t)
P0001	Pirotécnico	37,46	19,36	115	4 611	0,29	0,26
P0002	Pirotécnico	32,48	12,16	70	6 081	0,47	0,3
P0003	Pirotécnico	34,14	8,4	113	6 233	0,33	0,21
P0004	Pirotécnico	42,22	3,74	105	7 635	0,5	0,31
P0005	Pirotécnico	43,12	4,46	101	7 252	0,53	0,33
P0006	Pirotécnico	40,12	5,1	228	6 376	0,5	0,31
P0007	Pirotécnico	38,17	4,8	158	6 619	0,47	0,29
P0008	Pirotécnico	39,32	6,83	143	6 990	0,52	0,32
P0009	Pirotécnico	34,23	2,12	188	7 366	0,52	0,33
P0010	Pirotécnico	40,21	4,99	76	6 997	0,5	0,31
P0011	Pirotécnico	38,15	7,2	129	6 616	0,46	0,3
P0012	Pirotécnico	38,17	5,1	115	6 619	0,5	0,31
E0001	Electrónico	32,82	2,58	87	6 894	0,42	0,28
E0002	Electrónico	31,46	4,7	104	7 235	0,47	0,31
E0003	Electrónico	34,99	4,78	123	7 138	0,39	0,26
E0004	Electrónico	31,17	3,01	102	8 144	0,39	0,26
E0005	Electrónico	35,05	2,97	139	7 552	0,46	0,3
E0006	Electrónico	33,09	3,6	111	7 393	0,43	0,28
E0007	Electrónico	32,96	3,3	107	7 314	0,43	0,28
E0008	Electrónico	33,07	3,56	110	7 381	0,43	0,28

Fuente: SPCC, 2018.

a) Prueba de normalidad de datos; en la tabla 40, se observa los resultados del análisis de normalidad de las variables correspondientes a voladuras con detonadores electrónicos; de acuerdo a la evaluación del P-valor ($\alpha > 0,05$), donde se considera la prueba de Shapiro-Wilk, por tener muestras menores a 50, y se determina que las variables fragmentación, porcentaje bolonería, vibración, factor carga, velocidad minado efectivo y costo unitario voladura, presentan una distribución normalizada; por lo tanto, no muestra la presencia de valores erráticos.

Tabla 40
Prueba de normalidad variables con detonador electrónico

Pruebas de normalidad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Fragmentación D90 (cm)	0,246	8	0,168	0,891	8	0,240
Porcentaje bolonería (%)	0,231	8	0,200*	0,892	8	0,244
Vibración VPP (mm/s)	0,234	8	0,200*	0,947	8	0,680
Factor carga (Kg/t)	0,215	8	0,200*	0,909	8	0,347
Velocidad minado efectivo (t/h)	0,237	8	0,200*	0,904	8	0,314
Costo unitario voladura (USD/t)	0,279	8	0,067	0,882	8	0,196

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.

Fuente: Propia.

En la tabla 41, se observa los resultados del análisis de normalidad de las variables correspondientes a voladuras con detonadores pirotécnicos; de acuerdo a la evaluación del P-valor ($\alpha > 0,05$), donde se considera la prueba de Shapiro-Wilk, por tener muestras menores a 50, y se determina que las variables porcentaje bolonería, factor carga y costo unitario voladura, alcanzan la distribución normalizada a 10 grados de libertad (gl), de acuerdo al análisis de distribución de las variables, realizada con el gráfico caja de bigotes, donde se identifica como valores erráticos a las muestras # 1 y # 3.

Tabla 41
Prueba de normalidad variables con detonador pirotécnico

Pruebas de normalidad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Fragmentación D90 (cm)	0,167	12	0,200*	0,950	12	0,638
Porcentaje bolonería (%)	0,281	10	0,025	0,847	10	0,054
Vibración VPP (mm/s)	0,200	12	0,200*	0,925	12	0,330
Factor carga (Kg/t)	0,251	10	0,075	0,905	10	0,247
Velocidad minado efectivo (t/h)	0,167	12	0,200*	0,886	12	0,105
Costo unitario voladura (USD/t)	0,231	10	0,139	0,924	10	0,392

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors.

Fuente: Propia.

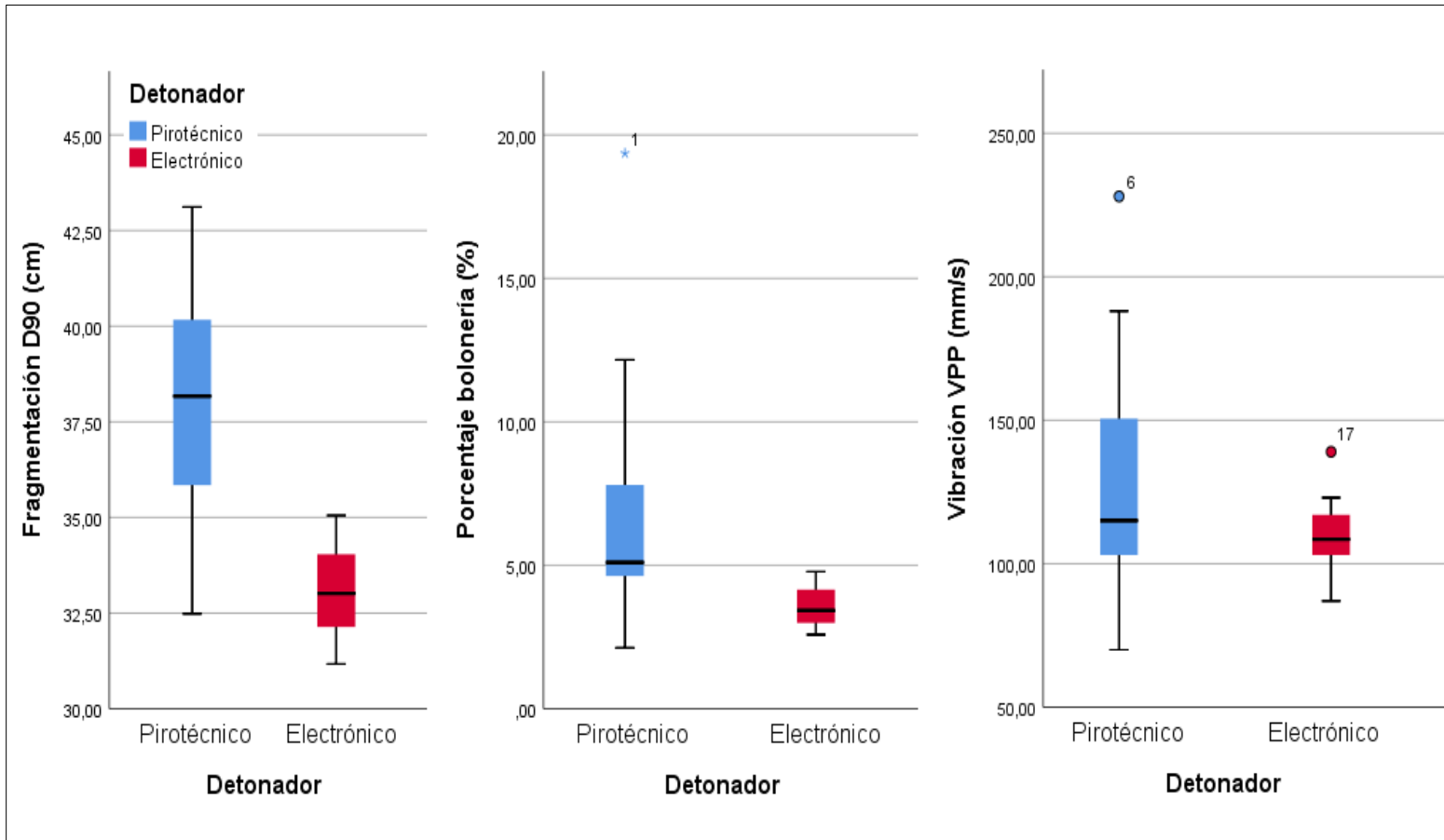


Figura 60. Caja de bigotes de la variable fragmentación y vibración
Fuente: Propia.

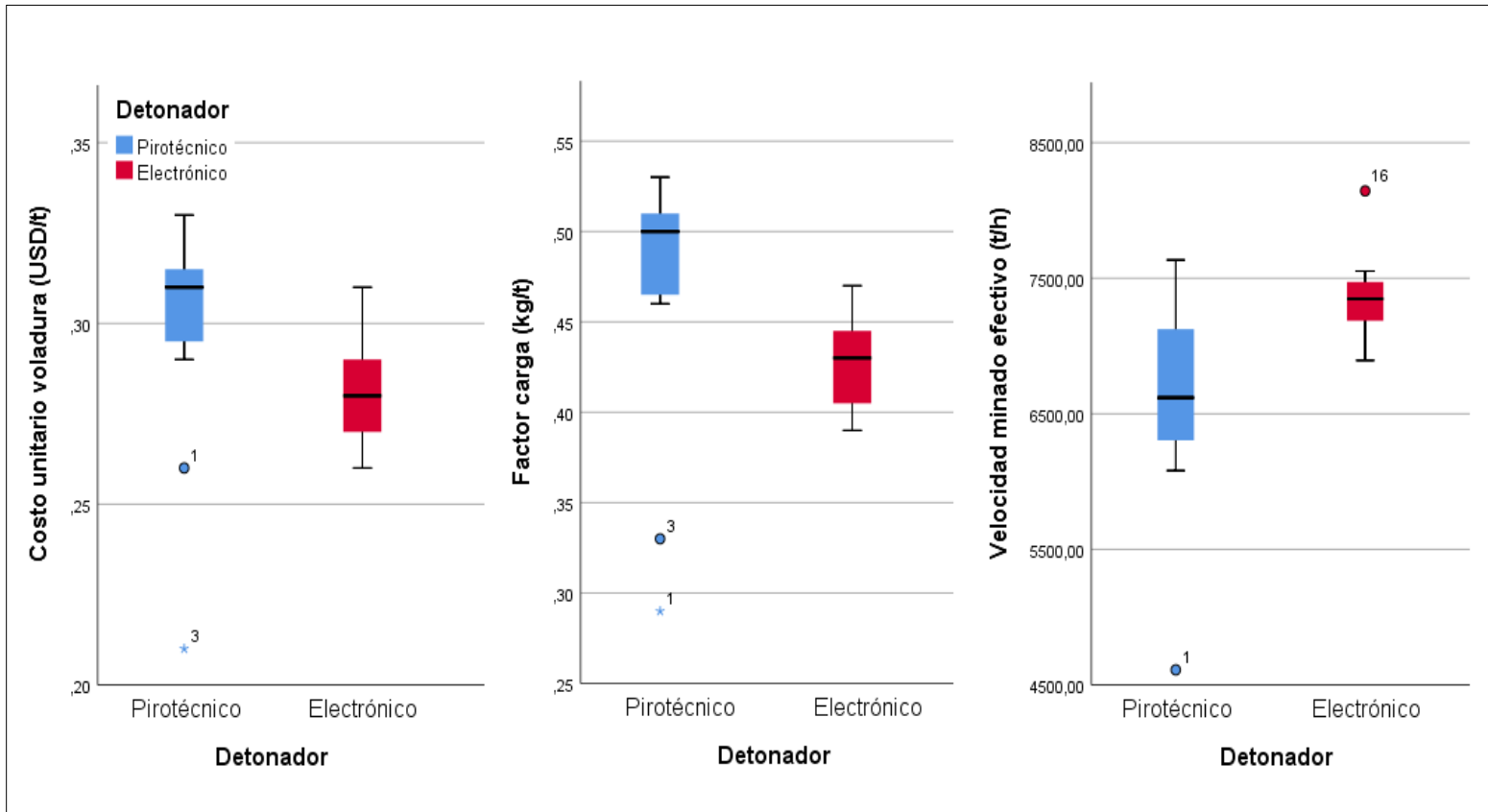


Figura 61. Caja de bigotes de la variable costos unitarios
Fuente: Propia.

Tabla 42
Análisis estadístico-variables con detonadores electrónicos

Estadístico	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Factor carga (Kg/t)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Costo unitario voladura (USD/t)
Media	33,90	3,56	110,38	0,43	7 381,38	0,28
Mediana	33,01	3,43	108,50	0,43	7 347,50	0,28
Desviación	1,41	0,80	15,34	0,03	365,20	0,02
Desv. Error	0,50	0,28	5,42	0,01	129,12	0,01
Mínimo	31,17	2,58	87,00	0,39	6 894,00	0,26
Máximo	35,05	4,78	139,00	0,47	8 144,00	0,31
Rango	3,88	2,20	52,00	0,08	1 250,00	0,05
Asimetría	0,24	0,72	0,62	0,42	1,23	0,41
Curtosis	-0,66	-0,67	1,30	-0,66	2,80	-0,22

Fuente: Propia.

Tabla 43
Análisis estadístico-variables con detonadores pirotécnicos

Estadístico	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Factor carga (Kg/t)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Costo unitario voladura (USD/t)
Media	38,15	5,65	128,42	0,50	6 616,25	0,31
Mediana	38,17	5,05	115,00	0,50	6 619,00	0,31
Desviación	3,23	2,70	45,34	0,02	786,30	0,01
Desv. Error	0,93	0,85	13,09	0,01	226,99	0,01
Mínimo	32,48	2,12	70,00	0,46	4 611,00	0,29
Máximo	43,12	12,16	228,00	0,53	7 635,00	0,33
Rango	10,64	10,04	158,00	0,07	3 024,00	0,04
Asimetría	-0,32	1,61	0,99	-0,31	-1,45	0,16
Curtosis	-0,49	3,81	0,89	-1,04	3,33	-0,43

Fuente: Propia.

- b) Análisis descriptivos de datos; luego de comprobar la normalización de las variables e identificar los valores erráticos, por medio del gráfico de bigotes, se identificaron 2 muestras (# 1 y # 3) con altos erráticos, correspondiente a la variable detonador pirotécnico; por lo tanto, se procede a realizar el análisis estadístico descriptivo de cada variable según el tipo de detonación (tablas 42 y 43).
- c) Análisis homogeneidad de varianzas; se realiza la prueba de Levene, de acuerdo con el P-valor ($\alpha > 0,05$), se observa que las variables de fragmentación, % bolonería, factor carga, velocidad de minado y costo unitario, presentan homogeneidad en las varianzas por detonador (tabla 44), a excepción de la variable vibración.

Tabla 44
Análisis de homogeneidad de varianzas

Prueba de homogeneidad de varianzas	Levene	gl1	gl2	Sig.
Fragmentación D90 (cm)	3,218	1	18	0,091
Porcentaje bolonería (%)	3,375	1	16	0,085
Vibración VPP (mm/s)	5,02	1	18	0,038
Factor carga (Kg/t)	0,103	1	16	0,752
Velocidad minado efectivo (t/h)	1,85	1	18	0,190
Costo unitario voladura (USD/t)	0,278	1	16	0,605

Fuente: Propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

En la tabla 45, se observa el resumen de los resultados de la investigación obtenida en los capítulos anteriores.

Tabla 45
Resumen de resultados por detonador

Estadístico	Fragmentación D90 (cm)	Porcentaje bolonería (%)	Vibración VPP (mm/s)	Factor carga (kg/t)	Velocidad minado efectivo (t/h)	Costo unitario voladura (USD/t)	Costo unitario post voladura (USD/t)
Detonador pirotécnico ($\mu 1$)							
Media	38,15	5,65	128,42	0,50	6616,25	0,31	1,43
Desv.	3,23	2,70	45,34	0,02	786,30	0,01	0,01
Desv. Error	0,93	0,85	13,09	0,01	226,99	0,01	0,01
Detonador electrónico ($\mu 2$)							
Media	33,90	3,56	110,38	0,43	7381,38	0,28	1,35
Desv.	1,41	0,80	15,34	0,03	365,20	0,02	0,02
Desv. Error	0,50	0,28	5,42	0,01	129,12	0,01	0,01

Fuente: Propia.

4.2. Análisis y pruebas del contraste de hipótesis

4.2.1. Influencia en la fragmentación

Para contrastar la hipótesis alternativa, la implementación de detonadores electrónicos mejora el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador fragmentación D90; para contrastar resultados de mejora de fragmentación con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos mejora el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la fragmentación del macizo rocoso se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

De acuerdo con la tabla 46, el P-valor (Sig = 0,001) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar

Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que la implementación de detonadores electrónicos mejora la fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

Tabla 46
Prueba hipótesis para el indicador fragmentación

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Fragmentación D90 (cm)	Varianzas iguales	4,156	18	0,001	5,073	1,221	2,509	7,637
	Varianzas diferentes	4,798	16,107	0,000	5,073	1,057	2,833	7,313

Fuente: Propia.

Respecto al indicador % bolonería; para contrastar resultados de mejora de fragmentación con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos reduce el % bolonería de la mina Toquepala.

- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el % bolonería se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

Tabla 47
Prueba hipótesis para el indicador porcentaje bolonería

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Porcentaje bolonería (%)	Varianzas iguales	2,105	16	0,051	2,088	0,992	-0,015	4,190
	Varianzas diferentes	2,324	10,91	0,040	2,088	0,898	0,108	4,067

Fuente: Propia.

De acuerdo con la tabla 47, el P-valor (Sig = 0,051) es mayor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar H1, porque existe igualdad entre las medias; y al observar los valores del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 = 0$), se acepta Ho; entonces se puede afirmar que la variable porcentaje de bolonería no influye en los resultados de la implementación de detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala, con una significancia del 5 %. Para el análisis no se considera las muestras # 1 y # 3.

4.2.2. Influencia en la vibración

Para contrastar la hipótesis alternativa, el uso de detonadores electrónicos reduce la vibración de las voladuras de la mina Toquepala; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador vibración VPP; para contrastar resultados de mejoras en la vibración con una significancia (α): $\alpha = 0,05$ y se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; el uso de detonadores electrónicos reduce la vibración de las voladuras de la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la vibración de las voladuras se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

De acuerdo con la tabla 48, el P-valor (Sig = 0,223) es mayor a la significancia ($\alpha = 0,05$), por lo que la variable vibración no presenta homogeneidad entre las varianzas por detonadores. Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar H1, porque existe igualdad entre las medias; y al observar los valores del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 = 0$), se acepta Ho; entonces se puede afirmar que la variable vibración no influye

en los resultados de la implementación de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

Tabla 48
Prueba hipótesis para el indicador vibración

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Vibración VPP (mm/s)	Varianzas iguales	1,077	18	0,296	18,042	16,757	-17,163	53,247
	Varianzas diferentes	1,273	14,434	0,223	18,042	14,168	-12,260	48,344

Fuente: Propia.

4.2.3. Factibilidad económica

Para contrastar la hipótesis alternativa, la implementación estratégica de los detonadores electrónicos es factible en la mina Toquepala; es necesario proponer la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho) en base a los indicadores de evaluación. Respecto al indicador factor de carga; para contrastar resultados de mejora en la factibilidad con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos reduce el factor de carga de la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el factor de carga se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

De acuerdo con la tabla 49, el P-valor (Sig = 0,000) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que mediante la implementación de detonadores electrónicos se logra reducir el factor de carga de la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

Tabla 49
Prueba hipótesis para el indicador factor carga

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Factor carga (Kg/t)	Varianzas iguales	5,650	16	0,000	0,070	0,012	0,043	0,096
	Varianzas diferentes	5,523	13,55	0,000	0,070	0,013	0,042	0,097

Fuente: Propia.

Respecto al indicador velocidad de minado efectivo; para contrastar resultados de mejora en la factibilidad con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos incrementa la velocidad de minado de la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la velocidad de minado efectivo se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

Tabla 50
Prueba hipótesis para el indicador velocidad minado

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Velocidad minado efectivo (t/h)	Varianzas iguales	-2,557	18	0,020	-765,125	299,199	-1 393,72	-136,53
	Varianzas diferentes	-2,930	16,548	0,010	-765,125	261,139	-1 317,23	-213,02

Fuente: Propia.

De acuerdo con la tabla 50, el P-valor (Sig = 0,020) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar

Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que mediante la implementación de detonadores electrónicos se logra incrementar la velocidad de minado efectivo de la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

Respecto al indicador costo unitario de voladura; para contrastar resultados de mejora en la factibilidad con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos reduce el costo unitario de voladura en la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el costo unitario de voladura se mantiene al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

De acuerdo con la tabla 51, el P-valor (Sig = 0,001) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que mediante la implementación de detonadores

electrónicos se logra reducir el costo unitario de voladura en la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

Tabla 51
Prueba hipótesis para el indicador costo unitario voladura

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Costo unitario voladura (USD/t)	Varianzas iguales	4,194	16	0,001	0,030	0,007	0,015	0,045
	Varianzas diferentes	4,055	12,657	0,001	0,030	0,007	0,014	0,046

Fuente: Propia.

4.2.4. Optimización de costos unitarios

En la tabla 37, se observa el resumen de los resultados de costos unitarios operativos de las operaciones de voladura, carguío, acarreo y chancadora, correspondiente a capítulos anteriores. Respecto al indicador costos unitarios de post voladura; para contrastar resultados de optimización de costos unitarios de post voladura con una significancia (α): $\alpha = 0,05$, se define las hipótesis de evaluación.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la implementación de detonadores electrónicos optimiza los costos unitarios de post voladura en la mina Toquepala.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; los costos unitarios de post voladura se mantienen al usar detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

Tabla 52
Prueba hipótesis para optimización de costos unitarios

Prueba de muestras independientes H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$		Prueba t para la igualdad de medias						
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencias		Intervalo confianza al 95 %	
					Medias	Error estándar	Inferior	Superior
Costo unitario carguío (USD/t)	Varianzas iguales	11,244	16	0,000	0,080	0,007	0,061	0,098
	Varianzas diferentes	10,869	12,657	0,000	0,080	0,007	0,060	0,099

Fuente: Propia.

De acuerdo con la tabla 52, el P-valor (Sig = 0,000) es menor a la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la decisión que se toma es rechazar Ho, porque existe diferencia entre las medias; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que mediante la implementación de detonadores

electrónicos se logra optimizar el costo unitario de post voladura en la mina Toquepala, con una significancia del 5 %.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Resultado de la influencia en la fragmentación

Ortiz (2009) establece el grado de influencia de la implementación estratégica de detonadores electrónicos, para mejorar la fragmentación en las voladuras de la mina Cerro de Pasco, donde logró obtener una mejora del 11,4 %. Mientras que Romero (2016) logra reducir la fragmentación en 16,7 % al implementar los detonadores electrónicos en las voladuras del tajo Toromocho, asegurando de esta forma la seguridad en las operaciones. Mamani (2018) logró mejorar la fragmentación en 13,26 %, con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala.

De acuerdo con el resultado y contraste obtenido en la presente investigación, la reducción de la fragmentación en 11,14 %, presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Por lo tanto, se logró

una congruencia con la afirmación de Ortiz (2009), Romero (2016) y Mamani (2018), con una reducción promedio de 4,25 cm en la fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.

Mientras que la reducción del porcentaje de bolonería en 36,99 %, no presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Si bien es cierto, se logró reducir el porcentaje de bolonería, pero la reducción de 2,09 %, está dentro del margen de variabilidad del resultado de las voladuras con detonadores pirotécnicos.

4.3.2. Resultado de la influencia en la vibración

Gutiérrez (2014) desarrollo un estudio de la implementación de detonadores electrónicos en la mina Toquepala, para reducir los niveles de vibración, mediante el control adecuado del tiempo, lo que permitió bajar el factor de carga, y controlar los daños, dada la precisión, exactitud y versatilidad. Y de acuerdo con el resultado y contraste obtenido en la presente investigación, la reducción de la vibración en 14,05 %, no presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores

electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Si bien es cierto, se logró una congruencia con la afirmación de Gutiérrez (2014), pero la reducción de 18,04 mm/s, está dentro del margen de variabilidad del resultado de las voladuras con detonadores pirotécnicos.

4.3.3. Resultado de la factibilidad económica

Ortiz (2009) establece que el uso de detonadores electrónicos permite reducir los costos unitarios de las voladuras de la mina Cerro de Pasco, donde logró reducirlo en 14,28 %, respecto al costo con detonares pirotécnicos. Mientras que Gutiérrez (2014) concluye que la aplicación de detonadores electrónicos en la mina Toquepala, ha permitido efectuar voladuras masivas, gracias al excelente control de daños, permitiendo bajar el factor de carga, haciendo factible su implementación, al reducir los costos unitarios de voladura.

Romero (2016) afirma que, al implementar los detonadores electrónicos, su costo compensará los procesos posteriores a la voladura, donde la productividad de la pala, el chancado y molienda mejoran significativamente. De acuerdo con el resultado y contraste obtenido en la

presente investigación, la reducción del factor de carga en 14 %, presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de Gutiérrez (2014), con una reducción promedio de 0,07 kg/t en el factor de carga, respecto al uso de detonadores pirotécnicos en las voladuras de la mina Toquepala.

Mientras que el incremento de la velocidad de minado efectivo en 11,56 %, presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de Romero (2016), con un incremento promedio de 765,13 t/h en la velocidad de minado efectivo de la pala, respecto a las voladuras con detonadores pirotécnicos.

Y la reducción del costo unitario de voladura en 9,68 %, presenta significancia respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de Ortiz (2009), con una reducción promedio de 0,03 USD/t en los costos unitarios de voladura, respecto al uso de detonadores pirotécnicos.

4.3.4. Resultado de optimización de costos unitarios

Según Quispe (2018) afirma que, mediante la aplicación de explosivo gasificado y uso de detonadores electrónicos, se logra mejorar la fragmentación en la mina Toquepala, generando ganancias de productividad en las operaciones posteriores a la voladura, incluidas el proceso de chancado y molienda. En cambio, Mamani (2018) establece que el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala, permite reducir el costo global de minado en 1,5 MUSD, a través del incremento en las dimensiones de la malla y reducción del factor de carga.

De acuerdo con el resultado y contraste obtenido en la presente investigación, la reducción del costo unitario post voladura en 5,59 %, presenta significancia con respecto a la implementación estratégica de detonadores electrónicos en las voladuras de la mina Toquepala. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de Quispe (2018) y Mamani (2018), al obtener una ganancia de 3,5 MUSD al reducir el costo unitario post voladura, mejorando los resultados de fragmentación, factor de carga, velocidad de minado efectivo y costos unitarios; y generando una factibilidad acumulada en las variables porcentaje de bolonería y vibración.

CONCLUSIONES

El uso estratégico de detonadores electrónicos reduce en 11,14 % la fragmentación resultante de la voladura, lo que permite mitigar la presencia de bolonería en 36,99 %, sin embargo, la reducción de 2,09 % de bolonería, corresponde al margen de variabilidad del uso de detonadores pirotécnicos.

El uso de detonadores electrónicos reduce la vibración de voladuras en 14,05 %; sin embargo, la reducción de 18,04 mm/s corresponde al margen de variabilidad del uso de detonadores pirotécnicos.

La implementación de detonadores electrónicos reduce el costo unitario de voladura en 9,68 %, respecto al uso de detonadores pirotécnicos, lo que permite incrementar la velocidad de minado en 11,56 % e impacta favorablemente a los costos unitarios de post voladura, generando una utilidad adicional de 3,5 MUSD.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la implementación de nuevas tendencias tecnológicas que permitan seguir fortaleciendo el sistema integrado de mina a planta, para fundamentar las bases de rediseño y cuantificar su impacto en los resultados de post voladura.

Se recomienda recolectar más muestras de la implementación de detonadores electrónicos, con la finalidad de incrementar la significancia de la mejora; y estandarizar el modelamiento de voladuras masivas, que permita controlar el nivel de vibraciones.

Se recomienda realizar un estudio de costos unitarios post voladura correspondientes a los registros del año 2018, para contrastar con los costos esperados, lo que ayudará a optimizar el costo global de minado, haciendo que las operaciones sean más productivas y rentables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, P. (2007). *Predicción de fragmentación, tiempo es oro*. ASIEX, Chile.

Barbosa Martínez, J. y Vallejo Rodríguez, A. (2019). *Análisis de la afectación por vibraciones de la cantera “La Roca” en zonas cercanas a poblaciones*. Universidad Católica de Colombia.

Bernaola, Castilla y Herrera (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid.

Bravo Sánchez, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por voladuras en minera Spence*. Universidad de Chile.

Camac, A. (2005). *Curso de voladura de rocas*. Universidad Nacional del Altiplano.

Cameron, M. (1998). *Tecnología de voladura de roca*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Cameron, M. (2006). *Foco en granulometría de voladuras*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Cameron, M. (2007). *Las limitaciones para alcanzar la excelencia en la tronadura*. ASIEX, Chile.

Codelco (2002). *Optimización del Proceso de Conminución en Codelco Norte, mina Chuquicamata*. Codelco, Chile.

Condori Burgos, C. (2018). *Diseño de perforación voladura de precorte mediante las características de macizo rocoso para evitar desprendimiento de bolones de la pared en banco de producción en U.M. TACAZA – CIEMSA*. Universidad Nacional de Altiplano.

Dirección General de Asuntos Ambientales (1995). *Guía ambiental para la perforación y voladuras en operaciones mineras*. Ministerio de Energía y Minas, República del Perú.

Dyno Nobel (2004). *Optimización de diseños de voladura de producción*. Publicaciones Dyno Nobel, Chile.

Enaex SA (2001). *Comparación modelo de predicción de fragmentación kuz-Ram versus resultados de mediciones en terreno con sistema WipFrag*. Tercer Coloquio de Voladura – OPEN PIT. Enaex SA, Chile.

Enaex SA (2004). *Manual de voladura*. Enaex SA, Chile.

Exsa SA (2009). *Manual práctico de voladura 3ra edición*. EXSA SA, Chile.

Flores Cobos, D. (2019). *Determinación de los parámetros de voladura para optimizar la fragmentación en zona de mineral en la unidad minera Cuajone*. Universidad Tecnológica del Perú.

Floyd J. (2001). *Técnicas de voladura eficiente en operaciones superficiales*. Ediciones Dyno Nobel.

Fuentes, R. (2005). *Modelos de fragmentación para voladuras en bancos y costo global mina*. Orica Chile SA, ASIEX, Chile.

Gonzales, M. (2001). *Micro fracturamiento producido por el explosivo y el aumento de la disolución del metal en una mena oxidada de cobre*. ASIEX, Chile.

Gutiérrez Cervantes, E. (2014). *Diseño de voladura y predicción de la fragmentación en zonas de mineral para optimizar las operaciones unitarias en mina Toquepala*. Universidad Nacional de San Agustín.

Herrera, M. (2008). *Informe final de voladuras efectuadas con detonadores electrónicos en el sector de yeso anhidrita de la mina Toquepala*. Southern Perú.

Herrera, M. (2009). *Optimización y predicción de la fragmentación, en base a la exactitud de tiempos en el diseño de voladura: mina Toquepala*. Convención Minera.

Iglesias Salas, L. (2016). *Estudio técnico económico del uso de la mezcla explosivo Quantex 73 en la Unidad Minera Toquepala SPCC*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

INGEMMET (2017). *Mapa geológico y ubicación de muestras Cuajone Toquepala y Quellaveco, GE33A-4 estudios metalogénicos de la franja magmática jurásico cretáceo asociado a los depósitos tipo IOCG y Pórfidos entre Ica, Arequipa y Tacna*. INGEMMET.

Mamani Valdez, Y. (2018). *Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Mucho, R. (2009). *Voladura de rocas*. Instituto de Capacitación Minera.

Ortiz Sosa, S. (2009). *Optimización de voladura con el uso de detonadores electrónicos en la mina Cerro de Pasco, Compañía Minera Volcán*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

OSINERGMIN (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. Minería y Geología.

Paquera Quispe, F. (2021). *Aplicación de modelo de predicción de vibración Devine para reducir el impacto por voladura de rocas en mina Toquepala*. Universidad Nacional de Moquegua.

Quispe Cuaila, M. (2018). *Optimización de fragmentación en mina Toquepala, mediante la aplicación explosivo gasificado*. Universidad Continental.

Romero Paucar, R. (2016). *Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A.* Universidad Nacional de Centro del Perú.

Scherpenisse, C. (2005). *Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras.* Curso de Voladura, Lima.

Scherpenisse, C. (2007). *Reducción de finos por tronadura en minas a cielo abierto.* ASIEX, Chile.

SPCC (2018). *Informe de operaciones mina Toquepala.* Southern Perú Copper Corporation – SPCC, Perú.

SPCC (2018). *Informes geológicos y geotécnicos de la mina Toquepala.* Southern Perú Copper Corporation - SPCC, Perú.

Vilca Acero, O. (2016). *Optimización de voladura mediante la aplicación de detonadores no eléctricos y emulsión explosiva en mina San Juan de Chorunga.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Villalba, I. (2006). *Modelos predictivos de fragmentación.* ENAEX, Chile.

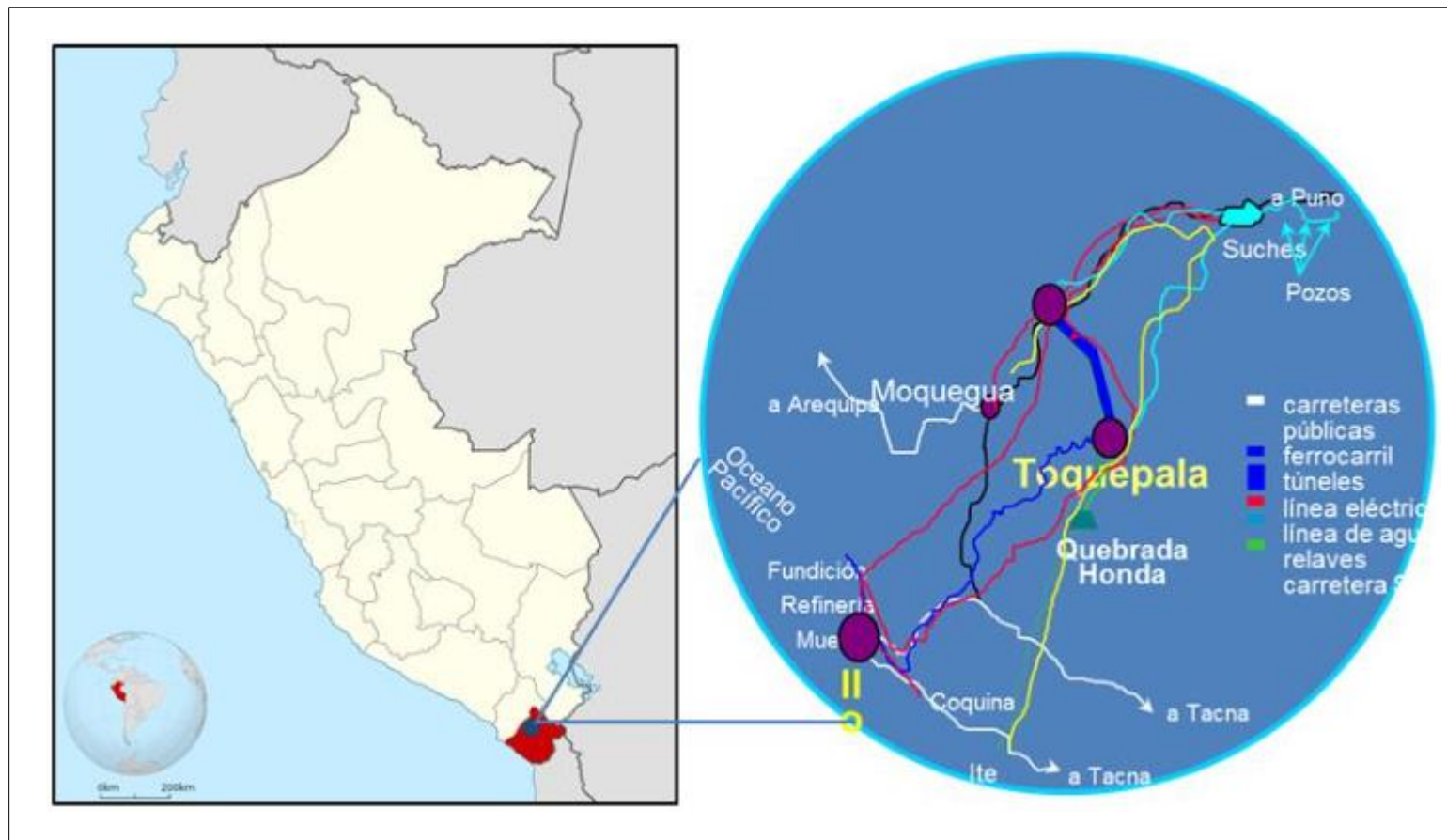
ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicadores	Metodología	
	Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Variable Independiente	Tipo de Investigación	
Implementación de Detonadores Electrónicos en la Voladura para Optimizar los Costos Unitarios en las Operaciones de Mina Toquepala	¿En qué medida la aplicación de la detonación electrónica optimiza los costos unitarios de las operaciones de la voladura en la mina Toquepala?	Determinar la influencia de la detonación electrónica en la optimización de los costos unitarios de las operaciones de voladura de la mina Toquepala.	La aplicación de la detonación electrónica optimiza significativamente los costos unitarios de las operaciones de voladura en la mina Toquepala.	VI 1: Detonadores pirotécnico	Proyecto voladura con detonador pirotécnico	Investigación aplicada de enfoque cuantitativo	
				VI 2: Detonadores electrónicos	Proyecto voladura con detonador pirotécnico y electrónico	Investigación de diseño experimental	
						Nivel de Investigación	
						Método de Investigación	
						La investigación cuantitativa de diseño experimental	
		Problema Específico	Objetivo Específico	Hipótesis Específico	Variable Dependiente	Variable Dependiente	Población y Muestra
		¿Influye la implementación de los detonadores electrónicos en el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala?	Determinar la influencia de los detonadores electrónicos en el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.	La implementación de detonadores electrónicos mejora el grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala.	VD1: Fragmentación	D90 (cm) % Bolonería	La población corresponde a las voladuras realizadas por el área de Perforación y Voladura de la mina Toquepala. Mientras que la muestra corresponde a los proyectos de voladura realizadas en las diferentes fases de desarrollo de la mina Toquepala.
				VD2: Vibración	VPP (mm/s)		
				VD3: Costos unitarios	Voladura (USD/t) Carguío (USD/t) Acarreo (USD/t) Chancado (USD/t)		
					Variables Asociadas	Variables Asociadas	Técnicas e Instrumentos
	¿Cómo influye los detonadores electrónicos en la vibración de las voladuras de la mina Toquepala?	Analizar la influencia de los detonadores electrónicos en la vibración de las voladuras de la mina Toquepala.	El uso de detonadores electrónicos reduce la vibración de las voladuras de la mina Toquepala.	Caracterización del macizo rocoso	Densidad (t/m3) Porosidad (%) Tipo de Roca (#) Resistencia (Mpa) Calidad RQD RMR (%) Velocidad de onda (m/s)	Técnicas de análisis descriptivo de las variables principales a través de experimentación en los proyectos de voladura al implementar estratégicamente los detonadores electrónicos; y observación de campo de los resultados obtenidos.	
						Técnicas de Procesamiento de Datos	
	¿Es económicamente factible la implementación de los detonadores electrónicos para el proceso de producción de la mina Toquepala?	Determinar la factibilidad económica de la implementación de los detonadores electrónicos en la mina Toquepala.	La implementación estratégica de los detonadores electrónicos es factible en la mina Toquepala.	Diseño de P&V	Proyecto voladura (#) Consideraciones técnicas de diseño	El tratamiento de datos corresponde al análisis descriptivo de las muestras, 10 muestras de voladura con detonador pirotécnico y 5 muestras con detonador electrónico, análisis estadístico y comportamiento de variable con SPSS; recolección y análisis de costos unitarios de voladura, carguío, acarreo y chancado, estimación de utilidad proyectada y determinación de contraste de hipótesis del investigador con la prueba t <i>Student</i> del programa SPSS.	

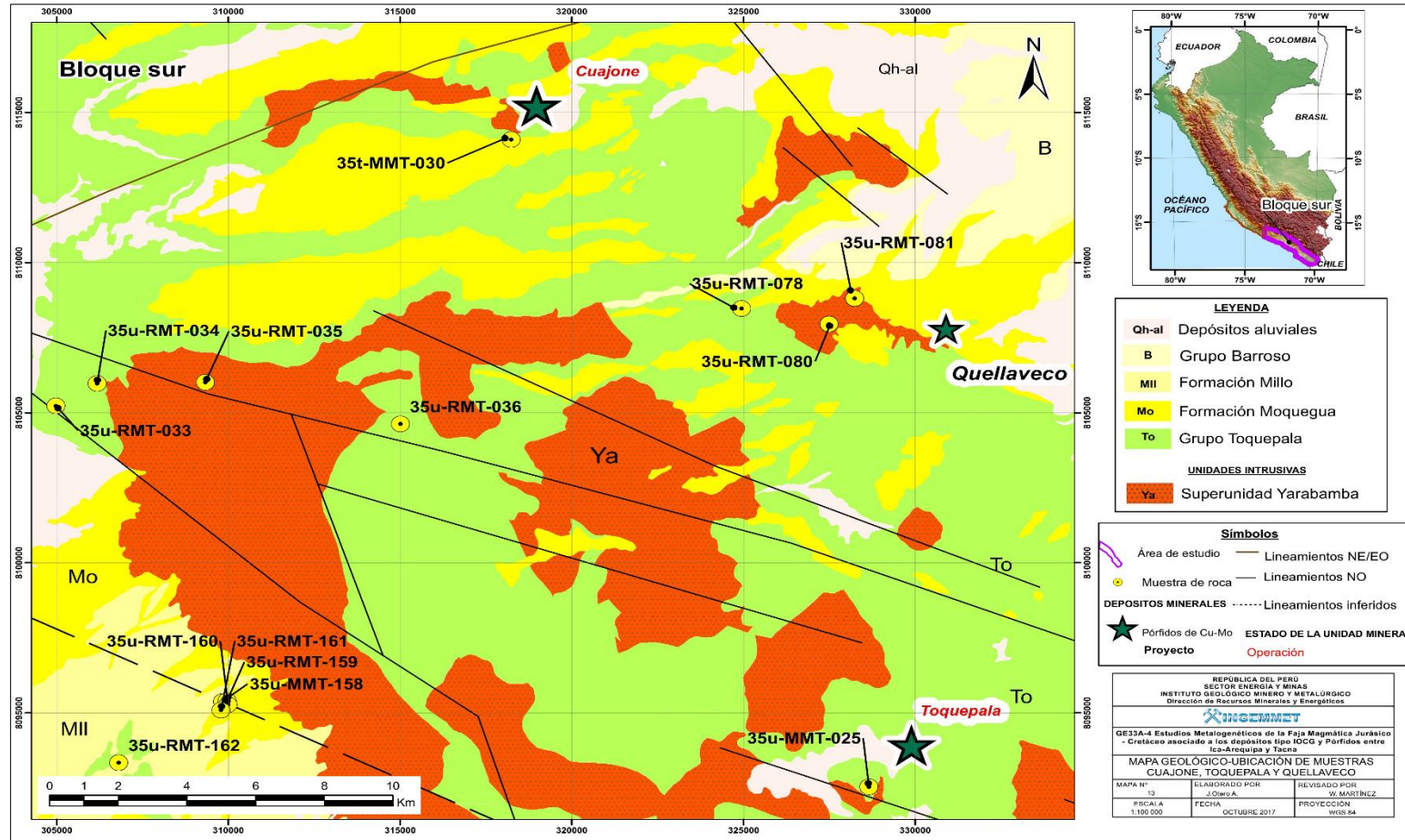
Fuente: Propia.

Anexo 2. Ubicación de la mina Toquepala



Fuente: SPCC, 2018.

Anexo 3. Mapa geológico Toquepala Cuajone Quellaveco



Fuente: Ingemmet, 2017.

Anexo 4. Guía de sistema de iniciación electrónica

La introducción de los detonadores electrónicos a la minería y la capacidad de precisión de disparo que estos poseen, han proporcionado a la industria minera una herramienta de optimización para las voladuras, que antes no se encontraban disponibles con los sistemas pirotécnicos, esto proporciona a los usuarios por primera vez, refinar y mejorar los resultados obtenidos en las voladuras para superar las restricciones de sus procesos y satisfacer las necesidades operacionales específicas.

El resultado ha tenido significantes beneficios financieros y un mayor control sobre las funciones primarias y secundarias de la fragmentación de rocas. Este control a optimizado la productividad y la eficiencia de los procesos mineros; así mismo, la voladura electrónica ha traído un mayor nivel de confianza, posibilitando a los usuarios revisar la funcionalidad del sistema completo antes de disparar, ayudando de este modo la prevención de errores en la voladura, y las consecuencias que podrían suscitarse.

Para la descripción de todos los accesorios de voladura que conforman el sistema de iniciación electrónica, nos basamos en la información del *Sistema I-kon de Orica*, con la cual hemos ejecutado las voladuras.



Ilustración 1. Componentes del sistema electrónico

1. Detonador electrónico

Su función es detonar la carga explosiva, similar a un detonador pirotécnico, con la diferencia que presenta las siguientes características:

- a) Este detonador puede ser programable entre 0 a 15,000 milisegundos, con un incremento de 1 milisegundo, dando oportunidad a un amplio manejo de tiempos de amarre y contando con una exactitud del retardo programado de más o menos 0.1% de milisegundos. Esto garantiza no tener traslapes, que guarda directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonadas simultáneamente.



Ilustración 2. Detonador electrónico

- b) El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica que permite tener registrado cada detonador.

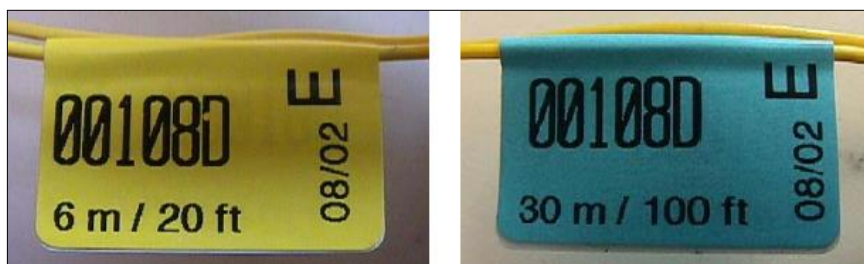


Ilustración 3. Número de serie del detonador electrónico

- c) Se realiza la comunicación bidireccional entre el control del equipo y el detonador. Para registrar o conectar un detonador, los cables tienen que ser insertados dentro de las ranuras terminales del conector, cualquier cable podría ser insertado dentro de cualquier ranura, pero un solo cable por ranura.

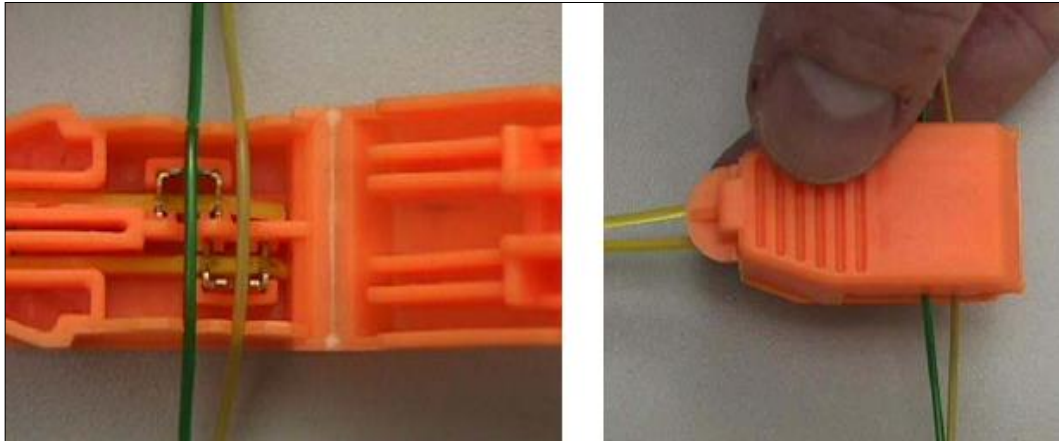


Ilustración 4. Conexión del detonador electrónico

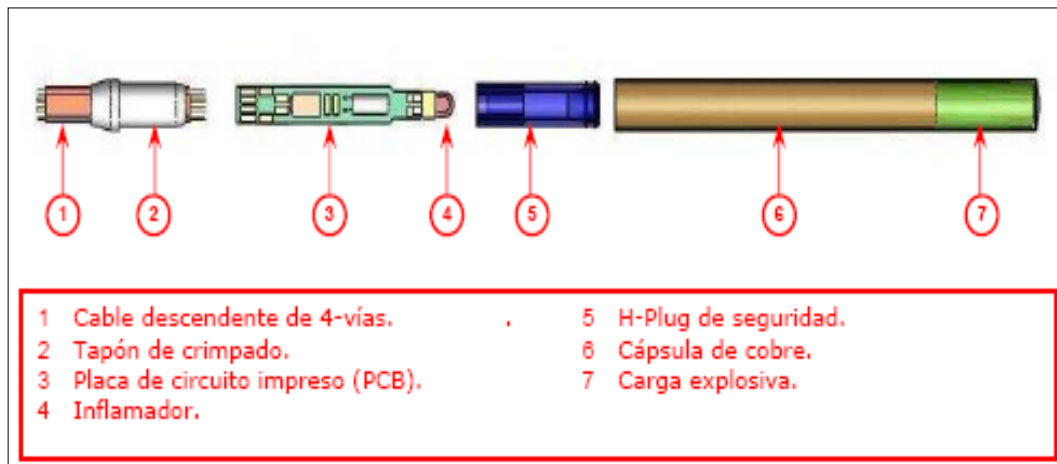


Ilustración 5. Estructura interna de un detonador electrónico

2. Cable de conexión

El cable de disparo de dos vías se utiliza para conectar los detonadores electrónicos del proyecto de voladura, también sirve para la conexión del Logger al Blaster.



Ilustración 6. Cable de conexión

3. Logger (Programador de retardos)

El Logger, es el dispositivo del sistema de voladura electrónica, mediante el cual, se puede testear todos los taladros del proyecto, a través del *software Shot Plus I* o en forma manual, su trabajo es el siguiente:

- a) Este dispositivo verifica el estado del detonador.
- b) Lee y describe el ID del detonador en la memoria.
- c) Asigna tiempos de detonación.
- d) Chequea automáticamente el detonador y el cable, mediante una prueba de continuidad de línea.
- e) Cada *Logger* tiene una capacidad de registrar 200 detonadores.
- f) Es inherentemente seguro y tiene 5 voltios de salida



Ilustración 7. Logger

4. Blaster (Sistema de iniciación de alta seguridad)

Una vez efectuada la conexión, testeo y programación de tiempos de los taladros que conforman el proyecto de voladura, se procede con la detonación a través del Blaster, el cual, también cumple las siguientes funciones:

- a) Este equipo realiza un auto chequeo completo y automático de la funcionalidad del sistema y programación del detonador.
- b) Cuenta con una capacidad de 1,600 detonadores (control de 8 Logger con 200 detonadores por Logger).

- c) Único con una llave de activación digital.
- d) Único con códigos de armado y fuego.
- e) Trabaja con un voltaje de salida de 24 V.



Ilustración 8. Blaster – Iniciador de voladura

5. Software Shot Plus i

Luego de recolectar los datos del computador, se traslada la información al terreno, para conectar cada detonador al Logger, el cual se encarga de asignar al detonador su tiempo de salida de acuerdo con el diseño previamente establecido e indicado y a su vez reconoce el estado de este, indicando si la línea descendente tiene problemas

o existe alguna fuga de corriente (comunicación bidireccional). El *software*, nos permite los siguientes beneficios:

- a) Trabaja directamente con los detonadores electrónicos, y permite dar simulaciones de salida, considerando parámetros de tipo de material.
- b) Los amarres diseñados son descargados directamente al Logger.
- c) Permite analizar los tiempos de amarre.

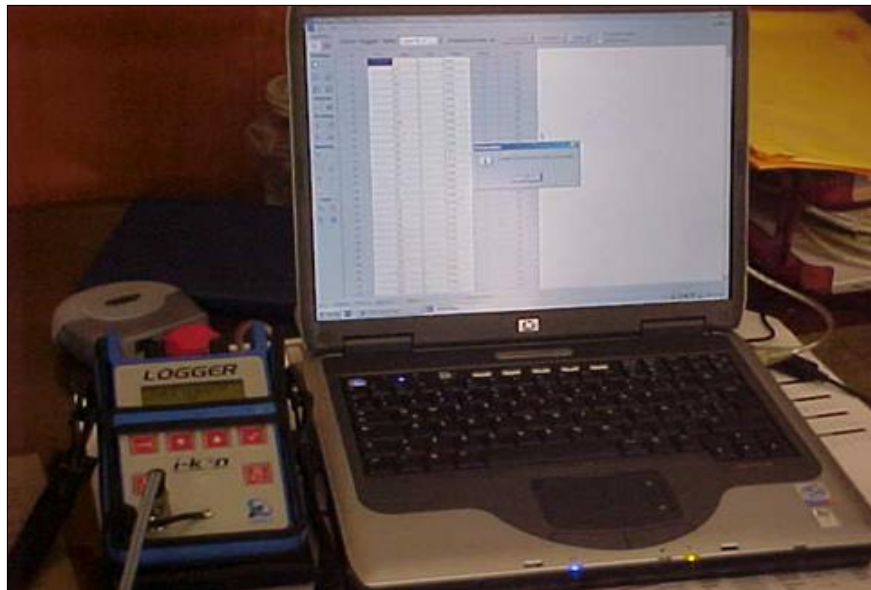


Ilustración 9. Programación de tiempos en *Software Shot plus i*

Para una mejor apreciación del Sistema de Voladura con Detonadores Electrónicos, mostramos el siguiente esquema gráfico, en el cual se detalla, todos los componentes del sistema, veamos la siguiente ilustración.

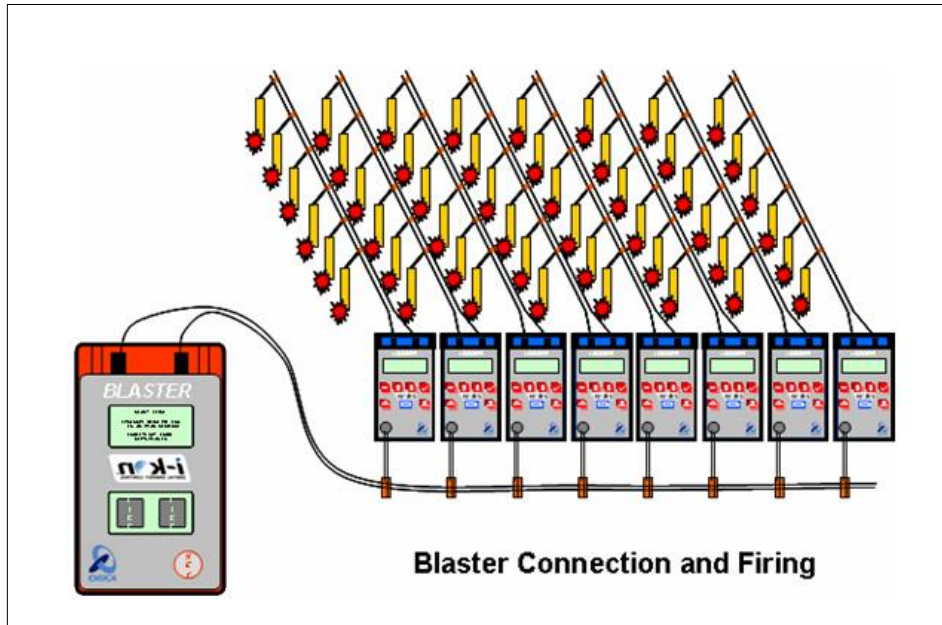


Ilustración 10. Circuito de voladura con detonadores electrónicos

Fuente: SPCC, 2018.

Anexo 5. Procedimiento carguío y conexión e iniciación detonadores

Para la ejecución del presente procedimiento, es requisito indispensable, que las personas involucradas cuenten con su Equipo de Protección Personal (EPP), asimismo, las personas involucradas, deben de contar con la Licencia de Manipuladores de Explosivos, otorgada por la DICSCAMEC.

En el siguiente procedimiento, se indican las siguientes etapas secuenciales de operación de voladura con detonadores electrónicos:

- a) Delimitar la zona del proyecto de voladura a cargar, a través de estacas, cinta de seguridad, y carteles con indicaciones “Zona Cargada”, con la finalidad de evitar el ingreso de personal extraño al área de voladura.

- b) Realizar la medición de taladros con wincha, y escribir la profundidad real en la estaca de perforación, para efectos de incrementar la profundidad si fuese menor que la indicada en la estaca, y para rellenar en el caso de haber un exceso en la perforación (consideramos como estándar más menos (+/-) 50Cm de diferencia), una vez efectuada la medición, se para la estaca de perforación sobre el detritus del taladro.

- c) Cuando los taladros tienen presencia de agua, se mide el nivel del agua con la ayuda de una wincha, y se escribe dicha medida de nivel en la estaca de perforación, junto con la profundidad del taladro, posteriormente, se ubica la estaca sobre el detritus del taladro en forma invertida, esta posición de la estaca indica a simple vista que el taladro tiene presencia de agua.

- d) Después de la medición del taladro, y de haber llegado a la profundidad solicitada, el personal especializado de voladura reparte en forma ordenada el Boosters y los detonadores pirotécnicos y electrónicos para realizar el primado de los taladros de perforación, el cebo generalmente se ubica a una altura entre 1.0 a 1.5m de la base inferior del taladro.

- e) La operación de primado consiste en insertar un detonador electrónico y un detonador pirotécnico de respaldo a través de un orificio con salida, ubicado en el eje central de Boosters cilíndrico, una vez que aparecen las cápsulas de ambos detonadores en el otro extremo del iniciador, estos se introducen nuevamente, pero en sentido contrario en los orificios de salida, de manera que los detonadores quedan anclados y totalmente alojados en los orificios ciegos del Boosters.

- f) Una vez ubicado el cebo, se procede con el carguío de explosivos en los taladros, de acuerdo con un diseño de carga explosiva, esta operación se realiza mediante los Camiones Fábrica de Explosivos, el cual debe transitar en forma ordenada y con el cuidado del caso sobre el área a cargar, esta operación es realizada por el Operador de Piso quien realiza el trabajo mediante una wincha, y el Operador del Camión Fábrica.

- g) El Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, en su artículo 227, inciso e), establece que, en situaciones climáticas adversas como el caso de tormentas, se suspenderá el carguío de taladros hasta que pase el riesgo de contacto de una descarga eléctrica hacia los explosivos.

- h) Una vez cargados los taladros, se procede a introducir el material de taco en los taladros, mediante un Bob Cat, y jalando las líneas descendentes con un operador de piso, para verificar el anclado del Primer, y cuidar que las líneas no vayan a ser cortadas. Este proceso debe ser realizado con mucho cuidado, para evitar que su acción dañe las líneas descendentes de los detonadores y se obtenga de esta forma un tiro quedado, lo que perjudicaría los procesos siguientes. La altura del taco ayuda al confinamiento del explosivo, que favorece la fragmentación del material en la zona del taco.

- i) Antes de realizar el registro y conexión de los detonadores electrónicos, el operador del sistema deberá validar la malla en terreno, en caso de existir diferencias, se deberá informar al jefe de Perforación y Voladura de la mina.

- j) Para registrar y conectar el detonador, el operador del sistema deberá abrir el conector de rápida unión y colocar los cables en las ranuras correspondientes, y luego cerrarlo para que se produzca la comunicación entre el Logger y el detonador.

- k) Una vez finalizado el amarre y conexión del disparo se ejecuta las siguientes verificaciones, cantidad de taladros de la malla, cantidad de taladros totales cargados por camión fábrica, cantidad utilizada de detonadores electrónicos, y cantidad total registrada de detonadores. Toda desviación registrada en la malla de voladura debe ser solucionado y equilibrado de inmediato, en todos los puntos antes señalados, caso contrario, de no dar alguna solución o control, se procede a la cancelación de la voladura. El sistema electrónico detecta cuando un

detonador registrado no ha sido conectado e indica al operador del sistema de este error, lo que permite corregir las conexiones y evitar los tiros cortados ocultos antes de realizar la voladura.

- l) Una vez concluida las conexiones, y haber verificado que todo el sistema de conexión se encuentra correctamente, se procede con la detonación de la voladura a través del Blaster, el cual iniciará la misma de manera instantánea

Fuente: SPCC, 2018.

Anexo 6. Procedimiento de voladura

1. PRE VOLADURA

- a) El jefe de Perforación y Voladura (B-1), en la Reunión de Operaciones indicará la zona de la voladura a través de un Line Up, el mismo que se distribuye a todas las secciones involucradas en el proceso productivo de la mina (Operaciones, Perforación y Disparos, y Mantenimiento).
- b) En el Line Up de Voladura, se menciona, la zona y pala del disparo (Primaria o Secundario) los lugares donde NO DEBE quedar Personal o Equipo, los lugares donde PUEDE quedar Personal o Equipo, Los lugares donde QUEDA LIBRE personal o equipo, y los lugares donde estarán ubicados los vigías. Asimismo, esta información es corroborada en el campo, por el supervisor de voladura y los supervisores de operaciones.
- c) El Line Up de voladura, debe ser cumplido por todo el personal que labora en mina. Este line up es leído por el controlador Dispatch tanto por frecuencia de operaciones y mantenimiento en reiteradas oportunidades. Aparte de ello, se escribe diariamente en las pizarras de voladura; la fecha, lugar del disparo, pala de referencia y la hora de la voladura.
- d) Concluida la Reunión de Operaciones, el Jefe de Perforación y Disparos junto con el Residente del Servicio de Voladura coordinan los trabajos que se deben ejecutar, referentes a diseños de carga, diseño y secuencias de amarre, y distribución de vigías.

- e) Los Supervisores de Voladura, deben chequear continuamente el proceso de carguío de explosivos, el proceso de amarre según la secuencia, y todas las coordinaciones presentes en el proceso de voladura, es decir, que todos los trabajos se ejecuten de acuerdo con los procedimientos.
- f) Los vigías de voladura son personas que cumplen una delicada misión, la cual es impedir el ingreso de personas, y vehículos al área de influencia de las voladuras, evitando, posibles accidentes e incidentes; ellos, están identificados con un cartel rojo de “Alto, Vigía y Voladura”, y deben estar ubicados en sus áreas 10 minutos antes de las 13:00 horas. Reportando su ubicación al Supervisor de Voladura. En ese momento, también se encienda la sirena.
- g) Una vez cerrado el pase para una voladura, ningún vigía podrá autorizar el ingreso hacia el área de la voladura a cualquier persona por decisión propia, salvo con autorización del Jefe de Perforación y Disparos de la Mina. Es obligación de toda persona obedecer y respetar a los vigías de voladura cuando están cumpliendo su misión.

2. VOLADURA PROPIAMENTE DICHA

- a) Antes de las 13:00 horas, el Supervisor de Operaciones (O-1), el Supervisor de Mantenimiento de Turno, y el Residente del Servicio de Voladura, reportarán al encargado de realizar la voladura (B-1).

- b) Una vez librada la mina por parte del Supervisor de Operaciones, la frecuencia de Radio de Operaciones Mina está destinada para uso exclusivo del personal de Voladura.
- c) El Residente del Servicio de Voladura, luego de haber librado el área afectada por la voladura debe esperar la orden radial del Jefe de Perforación y Voladura de la Mina, para iniciar el sistema de voladura electrónica.
- d) Después de 5 minutos de concluida la voladura el jefe de Perforación y Disparos, autorizará al Encargado del Servicio de Voladura el ingreso a la zona disparada, para verificar que el disparo ha sido concluido sin ningún problema.
- e) El encargado del Servicio de Voladura ingresará a la zona disparada, para verificar que todos los taladros hayan detonado, y así de esta manera, reporte al Jefe de Perforación y Voladura que el disparo ha concluido sin novedad.

3. POST VOLADURA

- a) Concluida la voladura, solamente el Supervisor de Perforación y Voladura dará por finalizada la misma, comunicando al Supervisor de Operaciones y Mantenimiento por las frecuencias de radio respectivas, aparte de indicar el retiro de los vigías y el apagado de la sirena.

Fuente: SPCC, 2018.