



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**USO DE EMULSIÓN EN EL DESARROLLO HORIZONTAL DEL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAVIER IGNACIO ALCAÍNO MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:

DANKO MORALES GARRIDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAÚL CASTRO RUIZ

JAIME CHACÓN FERNÁNDEZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Enaex Servicios S.A.

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas

POR: Javier Ignacio Alcaíno Muñoz

FECHA: 17 / 04 / 2018

PROFESOR GUÍA: Danko Morales Garrido

**USO DE EMULSIÓN EN EL DESARROLLO HORIZONTAL DEL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

El presente trabajo consistió en evaluar los desempeños de las tronaduras realizadas en el desarrollo horizontal del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, con el fin de determinar las ventajas existentes al pasar de un carguío de explosivo manual a uno mecanizado. Actualmente, la empresa Enaex S.A. se encarga de suministrar las emulsiones bombeable Emultex PDBG y encartuchada Emultex CN, utilizadas como explosivo principal en la faena.

De acuerdo con la teoría estudiada, las emulsiones son los explosivos más recomendables en este tipo de labores, pues poseen un alto poder rompedor y mantienen sus características al entrar en contacto con el agua. Además, el carguío mecanizado permite adaptarse a las condiciones del terreno, variando la densidad de carga.

Luego de registrar los resultados se determinó que el ritmo de trabajo es mucho más rápido y eficiente al seleccionar el Emultex PDBG ya que en promedio avanza 10 cm más por disparo y se tarda 16 segundos menos en cargar un tiro. Además, el costo diario de construcción de una labor disminuye pues se necesita de menos tiempo para completar un mismo trabajo.

Los daños generados en las inmediaciones de la excavación pueden ser controlados realizando una perforación adecuada y diseñando diagramas apropiados, aprovechándose al máximo la energía del Emultex PDBG en fragmentar la roca sin provocar sobre-excavación excesiva.

El tiempo de ventilación de los gases tóxicos es de aproximadamente una hora para ambos explosivos y, además, las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad no afectan en gran medida en su rendimiento.

La verdadera ventaja que entrega el carguío mecanizado se presenta al mejorar las condiciones de seguridad presentes en la mina, pues los aditivos utilizados para fabricar el Emultex PDBG se almacenan y transportan de forma segregada, obteniéndose el producto final solamente al momento de cargar. Además, los trabajadores deben realizar menos esfuerzos físicos para cargar los tiros y no deben manipular el explosivo de forma directa, sino a través de las mangueras de carguío.

En conclusión, se recomienda realizar el carguío con la emulsión bombeable Emultex PDBG en la faena estudiada, debido a que permite trabajar de forma rápida, segura y con un menor costo.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Alcances	2
1.4	Metodología	3
1.4.1	Carta Gantt	3
1.4.2	Procedimiento de la investigación	3
1.4.3	Recolección de datos	5
2	Antecedentes	7
2.1	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea	7
2.1.1	Contexto	7
2.1.2	Descripción del proyecto	8
2.1.3	Aspectos técnicos	10
2.2	Enaex S.A.	14
2.2.1	Descripción de la empresa	14
2.2.2	Planta Chuquicamata Subterránea	15
3	Revisión bibliográfica	17
3.1	Desarrollos horizontales en minería	17
3.1.1	Perforación	18
3.1.2	Carguío de explosivo y tronadura	18
3.1.3	Remoción de material	19
3.1.4	Acuñadura	19
3.1.5	Fortificación de la excavación	20
3.1.6	Servicios adicionales	20
3.2	Tronadura y excavación	21
3.2.1	Principio de operación	21
3.2.2	Mecanismos de rotura de roca	24
3.2.3	Perturbaciones generadas	27
3.2.4	Aplicación en construcción de túneles	30

3.3	Explosivos industriales.....	35
3.3.1	Clasificación de sustancias explosivas.....	35
3.3.2	Termoquímica de los explosivos	36
3.3.3	Propiedades de los explosivos.....	38
3.3.4	Tipos de explosivos industriales	43
3.3.5	Criterios de selección.....	54
4	Resultados.....	58
4.1	Antecedentes de la operación.....	58
4.2	Avance por disparo.....	62
4.3	Tiempo de carguío	68
4.4	Sobre-excavación.....	74
4.5	Ventilación requerida.....	78
4.6	Vibraciones	82
4.7	Evaluación económica.....	88
4.7.1	Supuestos considerados.....	88
4.7.2	Costo de perforación.....	89
4.7.3	Costo de tronadura.....	90
4.7.4	Costo total de perforación y tronadura	93
5	Análisis de resultados.....	94
5.1	Precio del explosivo	94
5.2	Ritmo de trabajo	96
5.3	Control de daños.....	98
5.4	Gases tóxicos	100
5.5	Condiciones ambientales.....	101
5.6	Condiciones de seguridad.....	102
5.7	Problemas de suministro.....	103
6	Conclusiones y recomendaciones	104
7	Glosario.....	106
8	Bibliografía.....	111

9	Anexo y apéndices.....	113
9.1	Anexo A: Aceros de perforación.....	113
9.2	Anexo B: Diseños utilizados en el desarrollo horizontal.....	115
9.3	Anexo C: Frentes de trabajo estudiados.....	123
9.4	Anexo D: Procedimientos de carguío de emulsión	128

Índice de Tablas

Tabla 1. Reservas de mina Chuquicamata Subterránea.	9
Tabla 2. Obras principales del PMCHS.	12
Tabla 3. Criterios de daño por vibraciones considerando PPV_c	28
Tabla 4. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el indicador Q.	34
Tabla 5. Características técnicas del ANFO.	45
Tabla 6. Características técnicas del hidrogel.	47
Tabla 7. Características técnicas de las emulsiones.	49
Tabla 8. Características técnicas del ANFO pesado.	52
Tabla 9. Características de los explosivos utilizados como carga de columna.	60
Tabla 10. Características de los explosivos utilizados como carga de fondo.	61
Tabla 11. Número de datos recolectados para evaluación de avance por disparo.	63
Tabla 12. Intervalos de confianza de las muestras de avances por disparo.	64
Tabla 13. Coeficiente de determinación entre cada muestra y distribución normal estándar.	65
Tabla 14. Prueba F para varianzas de muestras de avances por disparo.	65
Tabla 15. Prueba t de Student para avances suponiendo varianzas iguales.	66
Tabla 16. Intervalos de confianza de las muestras de tiempos de carguío por tiro.	69
Tabla 17. Coeficiente de determinación entre cada muestra y distribución normal estándar.	70
Tabla 18. Prueba F para varianzas de muestras de tiempos de carguío por tiro.	70
Tabla 19. Prueba t de Student para tiempos de carguío suponiendo varianzas desiguales.	71
Tabla 20. Número de datos recolectados para evaluación de sobre-excavación generada.	74
Tabla 21. Intervalos de confianza de las muestras de sobre-excavación generada.	76
Tabla 22. Intervalos de confianza de las muestras de tiempos requeridos de ventilación.	80
Tabla 23. Propiedades principales de las UGTB intactas.	82
Tabla 24. PPV generadas en UGTB tipo GES.	83
Tabla 25. PPV generadas en UGTB tipo PEC.	83
Tabla 26. PPV generadas en UGTB tipo PEK.	84
Tabla 27. PPV generadas en UGTB tipo $Q < S$	84
Tabla 28. PPV generadas en UGTB tipo PES.	85
Tabla 29. PPV generadas en UGTB tipo ZCI.	85

Tabla 30. PPV generadas en UGTB tipo Q=S.	86
Tabla 31. Parámetros de entrada ara evaluación económica.	88
Tabla 32. Metros perforados y avances obtenidos diariamente.	88
Tabla 33. Costo por metro para equipos de perforación.	89
Tabla 34. Costo por metro para mano de obra de perforación.	89
Tabla 35. Costo por metro para materiales de perforación.	89
Tabla 36. Costo por metro para equipos de carguío con Emultex PDBG.	90
Tabla 37. Costo por metro para equipos de carguío con Emultex CN.	90
Tabla 38. Costo por metro para mano de obra de carguío con Emultex PDBG.	91
Tabla 39. Costo por metro para mano de obra de carguío con Emultex CN.	91
Tabla 40. Costo por metro para carguío con Emultex PDBG.	92
Tabla 41. Costo por metro para carguío con Emultex CN.	92
Tabla 42. Costo total de perforación.	93
Tabla 43. Costo total de tronadura.	93
Tabla 44. Precios de las emulsiones Emultex PDBG y Emultex CN.	94
Tabla 45. Diferencia de intervalos de confianza de avances entre explosivos.	96
Tabla 46. Diferencia de intervalos de confianza de tiempo de carguío por tiro.	97
Tabla 47. Máximas PPV registradas en campo lejano clasificados por UGTB.	98
Tabla 48. Diferencia de intervalos de confianza de sobre-excavación entre explosivos.	98
Tabla 49. Diferencia de intervalos de confianza de ventilación requerida por explosivo.	100
Tabla 50. Aceros de perforación utilizados en el PMCHS.	113
Tabla 51. Implementos de perforación utilizados en el PMCHS.	114
Tabla 52. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 1).	115
Tabla 53. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 2).	116
Tabla 54. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 3).	117
Tabla 55. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 4).	118
Tabla 56. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 5).	119
Tabla 57. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 6).	120
Tabla 58. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 7).	121
Tabla 59. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 8).	122
Tabla 60. Frentes estudiados pertenecientes al sector Chancado del PMCHS.	123

Tabla 61. Frentes estudiados pertenecientes al sector Pre-Acondicionamiento del PMCHS.	124
Tabla 62. Frentes estudiados pertenecientes al sector Transporte Intermedio del PMCHS.	125
Tabla 63. Frentes estudiados pertenecientes al sector Infraestructura del PMCHS.	126
Tabla 64. Frentes estudiados pertenecientes al sector Inyección del PMCHS.	126
Tabla 65. Frentes estudiados pertenecientes al sector Extracción del PMCHS.	127

Índice de Figuras

Figura 1. Carta Gantt detallando desarrollo del estudio.	3
Figura 2. Metodología de la investigación.	3
Figura 3. Planilla de muestreo para obtención de datos en terreno.	6
Figura 4. División Chuquicamata.	7
Figura 5. Configuración de mina Chuquicamata Subterránea.	8
Figura 6. Perfil de pit final y material remanente.	10
Figura 7. Explotación por Block/Panel Caving.	11
Figura 8. Producción anual del PMCHS.	11
Figura 9. Diseño de mina Chuquicamata Subterránea.	13
Figura 10. Organigrama de Planta Chuquicamata Subterránea perteneciente a Enaex S.A.	15
Figura 11. Construcción de túneles por tronadura.	17
Figura 12. Operación de perforación en minería subterránea.	18
Figura 13. Carguío mecanizado de explosivo en minería subterránea.	18
Figura 14. Transporte del material fragmentado en minería subterránea.	19
Figura 15. Acuñaadura mecanizada en minería subterránea.	19
Figura 16. Fortificación de la excavación en minería subterránea.	20
Figura 17. Tiro perforado y cargado con explosivos.	21
Figura 18. Diseño de perforación para construcción de un túnel.	22
Figura 19. Agrietamiento radial provocado por la tronadura.	24
Figura 20. Reflexión de onda de choque durante la tronadura.	25
Figura 21. Rotura del macizo rocoso por flexión.	26
Figura 22. Diagrama de disparo para construcción de un túnel.	30
Figura 23. Diseño de rainura con tiros paralelos.	31
Figura 24. Influencia del diámetro de tiros huecos en avance por disparo.	32
Figura 25. Secuencia de salida de una tronadura de túnel.	33
Figura 26. Inclinación de tiros en contorno del túnel.	33
Figura 27. Detonación de una columna explosiva.	36
Figura 28. Eficiencia del ANFO en función del balance de oxígeno.	37
Figura 29. Influencia del diámetro en la VOD.	38

Figura 30. Efecto de la longitud de un tiro en la densidad del explosivo.	39
Figura 31. Gases nitrosos generados durante una tronadura en superficie.	42
Figura 32. Agentes explosivos secos.	43
Figura 33. Prills de nitrato de amonio.	43
Figura 34. Influencia del agua en la VOD del ANFO.	44
Figura 35. Composición del ANFO y sus derivados.	45
Figura 36. Agentes explosivos acuosos.	46
Figura 37. Fabricación de emulsión explosiva.	48
Figura 38. Equipo UBT de carguío mecanizado.	50
Figura 39. Curva de gasificación de la emulsión bombeable.	51
Figura 40. Cartuchos de dinamita.	53
Figura 41. Costos de perforación y tronadura en función del agente explosivo.	54
Figura 42. Influencia del diámetro en la VOD del ANFO.	55
Figura 43. Selección del explosivo en función de la calidad de la roca.	56
Figura 44. Diagrama de disparo para desarrollo horizontal del PMCHS.	58
Figura 45. Carguío de rainura con Emultex PDBG.	59
Figura 46. Carguío de tiros con Emultex PDBG y Softron.	59
Figura 47. Comparación entre diseño y operación luego de tronadura.	62
Figura 48. Distribuciones de avances por tipo de explosivo empleado.	63
Figura 49. Avances promedio según la calidad del macizo rocoso.	64
Figura 50. Avance obtenido en función del factor de carga.	67
Figura 51. Resumen informativo impreso entregado por equipo UBT.	68
Figura 52. Distribuciones de tiempos de carguío por explosivo empleado.	69
Figura 53. Influencia del número de tiros en el tiempo total de carguío con Emultex PDBG.	72
Figura 54. Influencia del número de tiros en el tiempo de carguío por tiro con Emultex PDBG	72
Figura 55. Influencia del número de tiros en el tiempo total de carguío con Emultex CN.	73
Figura 56. Influencia del número de tiros en el tiempo de carguío por tiro con Emultex CN.	73
Figura 57. Medición de sección real obtenida luego de una tronadura.	74
Figura 58. Histograma de sobre-excavación obtenida con Emultex PDBG.	75
Figura 59. Histograma de sobre-excavación obtenida con Emultex CN.	75
Figura 60. Sobre-excavación promedio según la calidad de la roca.	76

Figura 61. Sobre-excavación generada en función del factor de carga.....	77
Figura 62. Detector de gases empleado en minería subterránea.....	78
Figura 63. Histograma de tiempo de ventilación requerido empleando Emultex PDBG.....	79
Figura 64. Histograma de tiempo de ventilación requerido empleando Emultex CN.....	79
Figura 65. Influencia del número de tiros cargados con Emultex PDBG en la ventilación.....	80
Figura 66. Influencia del número de tiros cargados con Emultex CN en la ventilación.....	81
Figura 67. Influencia de la ubicación del geófono en la PPV medida.....	86
Figura 68. Influencia del factor de carga en la PPV medida.....	87
Figura 69. Ahorro obtenido con Emultex PDBG en función del número de tiros.....	94
Figura 70. Procedimiento de carguío del Emultex PDBG.....	130

1 Introducción

La División Chuquicamata perteneciente a la empresa estatal Codelco, ajustándose a las condiciones actuales del mercado y las características intrínsecas del yacimiento de cobre que provocan una disminución de las leyes a medida que avanza la extracción, ha debido modificar su método actual de explotación de rajo abierto a minería subterránea.

El método de explotación subterránea conocido como Block/Panel Caving es aquel que se utilizará para extraer las grandes reservas que aún existen y que permitirán prolongar la vida de la División en al menos 50 años. Este sistema minero, como todos aquellos aplicados bajo la superficie, es intensivo en construcción de túneles y galerías, cuyas funciones van desde la extracción y transporte del mineral hasta la ventilación y el drenaje de las diferentes obras ubicadas dentro de la mina.

De todas las actividades necesarias para construir y operar una mina subterránea, una de las más importantes corresponde a la realización de las tronaduras. Esta etapa define el ritmo de trabajo en la faena, la granulometría del material enviado a planta, el sistema de ventilación requerido y, además, todo el monitoreo del abastecimiento y control de las sustancias explosivas.

En particular, esta investigación está centrada en el desarrollo horizontal llevado a cabo en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), contemplando todas las galerías y túneles que pertenezcan a los sectores de transporte, ventilación, y pre-acondicionamiento. El trabajo fue realizado en conjunto con la empresa Enaex, la cual fabrica y distribuye explosivos para la minería y obras civiles, por lo que el enfoque principal del estudio apunta a evaluar el impacto que tiene el explosivo utilizado en la construcción de las labores horizontales.

Actualmente, en la construcción de la mina se está utilizando emulsión como explosivo principal. Esta se comercializa en dos formatos: bombeable y encartuchada, cuyas características provocan que los desempeños obtenidos por disparo difieran al ser comparados entre sí. Así, esta investigación está centrada en cuantificar el impacto real obtenido al pasar de un sistema de carguío manual a uno mecanizado.

1.1 Motivación

Existe cierto desconocimiento sobre la influencia del carguío mecanizado en las operaciones mineras. Esta investigación busca cuantificar los resultados de dicha modificación, determinando las condiciones que definirán qué agente explosivo se adapta mejor a las características de la mina Chuquicamata Subterránea y logrando, además, un estudio que pueda ser replicable en cualquier faena similar.

Con el fin de evaluar y comparar de forma adecuada el desempeño de los explosivos, se toman en cuenta los ritmos de trabajo alcanzados, los daños generados, las condiciones de seguridad y los costos asociados a la operación de tronadura.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es evaluar técnica y económicamente la utilización de emulsión explosiva bombeable y encartuchada en las labores de desarrollo horizontal del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, determinando así qué explosivo se adapta mejor a las características de la mina y en qué condiciones.

Junto con lo anterior, los objetivos específicos son:

- Determinar el avance real obtenido con cada producto, considerando factores de carga y características del macizo rocoso.
- Estudiar y comparar los tiempos de carguío asociados a la operación, considerando el explosivo empleado y el número de tiros a cargar.
- Cuantificar el excedente de sobre-excavación generado por cada explosivo, en función de los factores de carga empleados y el tipo de roca presente.
- Determinar la influencia del explosivo seleccionado en el tiempo de ventilación requerido luego de cada disparo.
- Calcular los costos asociados a la utilización de cada explosivo y su impacto en el costo total de perforación y tronadura.
- Estudiar el transporte, la manipulación y el almacenaje de los explosivos empleados en la mina, con el fin de conocer cómo se adaptan a las operaciones realizadas diariamente.
- Evaluar todas las opciones y definir bajo qué criterios es más conveniente escoger un determinado agente explosivo.

1.3 Alcances

Los alcances que esta investigación considera son:

- Toda la información utilizada es obtenida en terreno y de las bases de datos de las empresas Enaex S.A. y Codelco, sin modificar los protocolos de muestreo presentes en la faena.
- Solamente se evalúa el efecto de la utilización de emulsión y sus dos modalidades de manejo, sin considerar otros agentes explosivos tales como el ANFO y los hidrogeles.
- Las características de cada disparo no son modificadas; es decir, diagramas de disparo, diámetros seleccionados, tacos, implementos de perforación y cualquier otro factor ajeno a los explosivos no es evaluado.
- Los accesorios de tronadura utilizados son los detonadores no eléctricos, cordones detonantes de 5 g/m y mechas ensambladas de 3 m. Esta configuración no es modificada durante la investigación.
- Los datos obtenidos corresponden a disparos en labores horizontales realizados para construir los niveles de transporte principal, transporte intermedio y ventilación. Cualquier otro sector se deja fuera del estudio debido a que no se tiene acceso a dicha información.
- Este estudio es aplicable a cualquier labor subterránea horizontal que presente condiciones de diseño y características del macizo rocoso similares. Todos los datos recolectados pertenecen a las tronaduras realizadas dentro de la mina, cualquier otro tipo de experimentación llevada a cabo en laboratorios u otras instalaciones no es considerada al momento de generar las bases de datos.

1.4 Metodología

1.4.1 Carta Gantt

La Figura 1 presenta la carta Gantt utilizada durante la investigación, donde se detalla el tiempo empleado en cada actividad realizada. El estudio abarca un tiempo de cinco meses, considerando un mes de preparación, tres meses de recolección de datos y un mes de análisis y revisión.

ACTIVIDAD \ MES	SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Redacción de informe final																				
Recopilación de antecedentes																				
Verificación de objetivos y alcances																				
Definición de metodología																				
Concentración de datos en terreno																				
Definición de resultados																				
Análisis de resultados																				
Revisión y validación																				

Figura 1. Carta Gantt detallando desarrollo del estudio.

1.4.2 Procedimiento de la investigación

La metodología empleada para llevar a cabo la investigación consta de dos etapas principales, como se detalla en la Figura 2.

- **Análisis teórico:** Aquí se plantea el problema a resolver y se busca definir una hipótesis basándose en estudios bibliográficos e investigaciones previas.
- **Investigación:** En esta etapa se procede a realizar las pruebas en terreno para luego analizar la información obtenida. Así, es posible llegar a una conclusión que pruebe o refute la hipótesis inicial.

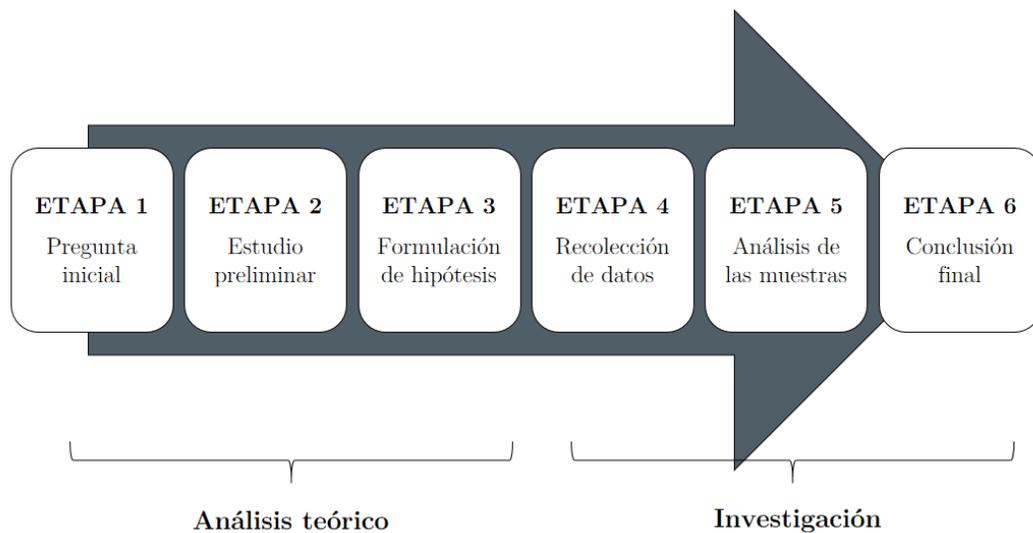


Figura 2. Metodología de la investigación.

En primer lugar, es necesario plantearse la interrogante inicial que definirá el objetivo de la investigación. Para este caso particular, la pregunta a responder es:

¿Qué agente explosivo se adapta mejor a los criterios de diseño y las restricciones operacionales presentes en el desarrollo horizontal implementado en el PMCHS?

Una vez definida la idea central de la investigación, es necesario conocer todos los aspectos teóricos y los antecedentes existentes que tienen directa relación con el problema a resolver.

- Antecedentes
 - Características de la faena.
 - Información técnica de explosivos utilizados.
 - Condiciones de terreno.
 - Metodología de trabajo actual.
- Revisión bibliográfica
 - Desarrollo horizontal en minería subterránea.
 - Tronadura y excavación.
 - Explosivos industriales.

Luego de abordar la investigación desde el punto de vista teórico, se procede a formular una hipótesis que es puesta a prueba después de recolectar los siguientes datos:

- Diseños de perforación utilizados.
- Tiempos empleados en las operaciones asociadas a tronadura.
- Desempeños obtenidos.
- Explosivos y accesorios utilizados.
- Condiciones del frente de trabajo.
- Daños generados en los sectores trabajados.

Una vez recabada, toda la información necesaria es debidamente clasificada y se procede a evaluar el desempeño obtenido según el explosivo utilizado, permitiendo así comparar los resultados.

- Evaluación técnica
 - Avance teórico v/s avance real.
 - Sección teórica diseñada y sobre-excavación obtenida.
 - Vibraciones provocadas.
 - Gases tóxicos generados y ventilación necesaria.
 - Tiempos de carguío empleados.
- Evaluación económica
 - Costo de cada disparo en función del explosivo seleccionado.
 - Costos de perforación y tronadura.

Finalmente, se estudian los resultados obtenidos para determinar si efectivamente se corrobora la hipótesis o si es necesario replantear la teoría conocida, detallando las principales conclusiones y recomendando consideraciones futuras.

1.4.3 Recolección de datos

Para generar las bases de datos es necesario definir qué información mínima debe ser obtenida, por lo que a continuación se detallan los principales valores a registrar.

a) Diseño

En primer lugar, antes de registrar cualquier resultado es necesario generar bases de datos con los diseños asociados a cada frente. La información básica que debe ser conocida para poder realizar un análisis representativo es la siguiente:

- Número de perforaciones, indicando su ubicación en el frente (zapatera, cajas, etc.) y si corresponden a tiros cargados o huecos.
- Diámetros y largos de perforación que permitan calcular el consumo de explosivo.
- Diagramas de perforación que permitan estudiar el burden, el espaciamiento y el retardo asociado a cada tiro.
- Material y longitud de tacos en cada tiro del diagrama.

Una vez recabada esta información, es posible conocer qué variables influirán en el desempeño de las tronaduras.

b) Explosivos

El siguiente paso consiste en averiguar toda la información asociada a las sustancias explosivas empleadas en cada disparo, por lo que para cada diseño deben conocerse:

- Explosivos cargados en cada tiro, considerando carga de columna y carga de fondo.
- Sistemas de iniciación utilizados en cada disparo.
- Consumo total de explosivo utilizado para remover el volumen de roca considerado.

Esta información permite clasificar los resultados según el explosivo cargado, permitiendo comparar los desempeños obtenidos con cada producto.

c) Desempeño

Luego de conocer las condiciones iniciales previas a cada disparo se registra el desempeño obtenido, definido por los siguientes parámetros:

- Avance por disparo.
- Tiempo total empleado en cargar el explosivo.
- Tiempo de ventilación requerido (en caso de existir la oportunidad de medir este valor).

Además, es necesario observar y registrar cualquier situación asociada al manejo, transporte y almacenaje de los productos explosivos con el fin de conocer su influencia en la operación y las condiciones de seguridad.

d) Control de daños

Finalmente, cualquier información relevante asociada a las perturbaciones generadas en las cercanías del disparo, tales como sobre-excavación y vibraciones, debe ser debidamente registrada si así lo permite la operación.

La Figura 3 ilustra la planilla de muestreo recomendada para recabar la información necesaria, donde se ejemplifica cómo registrar datos que permitan un análisis representativo.

PLANILLA DE MUESTREO				
Sector	Chancado		Fecha	25-02-2018
Frente	Acceso 01 Sala de Chancado N01/S01 Lado Este		Turno	Turno A (día)
Sección	5,70 m x 5,85 m		Tipo de roca	Tipo III (mala)
DISEÑO				
Detalle	N° de tiros	Largo taco (m)	n° tiros huecos	3
Zapatera	8	0,6	n° tiros cargados	69
Cajas	10	0,8	diámetro tiros huecos (mm)	102
Corona	10	0,8	diámetro tiros cargados (mm)	48
Auxiliares	29	0,9	material de taco	geda
Rainura	12	0,5	largo de perforación (m)	3,90
EXPLOSIVOS				
Detalle	Tipo carga principal	Tipo iniciador	tipo de detonador	no eléctrico 4.8 m
Zapatera	Emultex PDBG	APD-150	tipo de cordón (largo/gramaje)	80 m / 5 g/m
Cajas	Softron	Tronex Plus 1 ¹ / ₄ x 8	tipo de mecha (largo)	3 m
Corona	Softron	Tronex Plus 1 ¹ / ₄ x 8	densidad emulsión (g/cm ³)	1,15
Auxiliares	Emultex PDBG	APD-150	kg totales de ANFO equivalente	267
Rainura	Emultex PDBG	APD-150	factor de carga (g/t)	800
DESEMPEÑO				
avance (m)		3,70	tiempo de carguío (min)	46
rendimiento disparo (%)		95%	tiempo de ventilación (min)	58
CONTROL DE DAÑO				
Sobre-excavación			Vibraciones	
Ubicación (m)	Sección teórica (m ²)	Sección real (m ²)	unidad geotécnica básica (UGTB)	PEK
pk 1.300	33,3	36,5	densidad de roca (g/cm ³)	2,7
pk 1.301	33,3	37,4	tipo de sensor	geófono
pk 1.302	33,3	38,9	distancia al frente (m)	17,3
pk 1.303	33,3	39,2	PPV (mm/s)	43,3
OBSERVACIONES				
No se presentan problemas en el equipo UBT durante el carguío.				
Todo el proceso se desarrolla con normalidad.				

Figura 3. Planilla de muestreo para obtención de datos en terreno.

2 Antecedentes

2.1 Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

2.1.1 Contexto

La División Chuquicamata (Figura 4) es una mina a cielo abierto de cobre y oro ubicada a 15 km al norte de la ciudad de Calama, en la II región de Antofagasta. Explotada por la empresa estatal Codelco desde 1971, inició la extracción en 1915 luego de que la Chile Exploration Company descubriera el yacimiento, lo que la convierte en una de las minas de cobre más antiguas del mundo (Codelco, División Chuquicamata, 2017).



Figura 4. División Chuquicamata.

(Codelco, División Chuquicamata, 2017)

Ubicada a 2.870 m s.n.m., es una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo, con 5 km de largo, 3 km de ancho y poco más de 1 km de profundidad. Además, es de las mayores productoras de cobre en el mundo, con una producción anual de 302.010 toneladas métricas de cobre fino en forma de concentrado, cátodos electro-refinados y electro-obtenidos (Codelco, Memoria Anual, 2016).

Bajo el rajo existen 4.300 millones de toneladas de mineral con leyes de 0,71% de cobre y 340 ppm de molibdeno, lo que las hacen potencialmente explotables. Sin embargo, existen diversas dificultades para continuar la extracción con el método actual (Lasagna, 2016).

- Aumento en la distancia de transporte del mineral, con aproximadamente 20 km por camión en cada ciclo.
- Alta relación estéril/mineral, entre 3,6 y 5,0.
- Creciente inestabilidad de taludes.
- Leyes de cobre decrecientes, debido al cambio de mineralización.

2.1.2 Descripción del proyecto

Debido al alto costo del método actual, se tomó la decisión de evaluar técnica y económicamente la factibilidad de construir una mina subterránea (Lasagna, 2016).

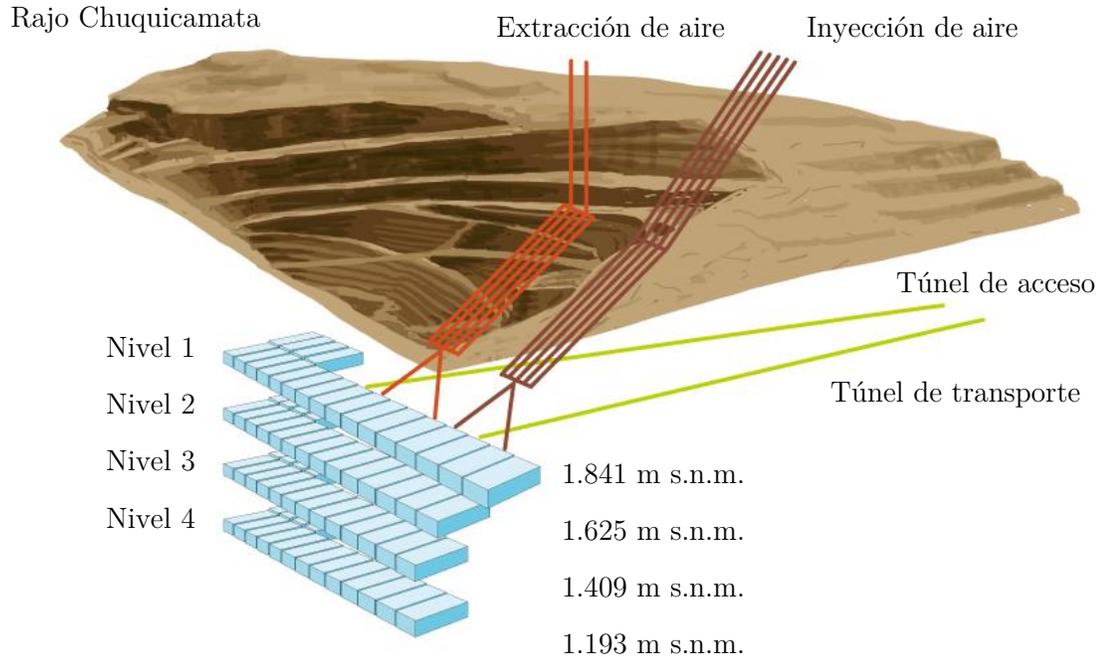


Figura 5. Configuración de mina Chuquicamata Subterránea.

(Mining & Construction, 2017)

La Figura 5 ilustra la configuración principal de la mina subterránea considerada para la extracción del mineral remanente bajo el rajo. La explotación se llevará a cabo a través del método de Block/Panel Caving, el cual consiste en realizar un corte en la base del yacimiento para luego extraer el mineral a medida que se hunde por gravedad.

El acceso a la mina se realizará por el Túnel de Acceso Principal, y la extracción y demás operaciones se implementarán en los niveles de trabajo, comenzando en el Nivel 1 y finalizando la vida del proyecto en el Nivel 4. Además, tendrá un Túnel de Transporte Principal por donde una correa transportadora acercará el mineral a la superficie, y un sistema de ventilación que mantendrá un constante flujo de aire fresco dentro de las instalaciones subterráneas.

Las principales características de la explotación se presentan en la Tabla 1. Las reservas totales de la mina se componen de 1.760 millones de toneladas de mineral, con una ley media de 0,71% de cobre, 512 ppm de molibdeno y 492 ppm de arsénico (Lasagna, 2016).

Tabla 1. Reservas de mina Chuquicamata Subterránea.

Nivel (m s.n.m.)	Tonelaje (Mt)	Ley de cobre (%)	Ley de molibdeno (ppm)	Cobre fino (kt)	Área (Ha)	Altura extraíble (m)
1.841	476	0,88	604	4.236	69	254
1.625	466	0,67	498	3.166	63	267
1.409	402	0,62	491	2.524	58	249
1.193	415	0,64	444	2.599	60	249

(Lasagna, 2016)

Considerando la gran cantidad de mineral aún por extraer y la capacidad instalada de infraestructura productiva existente (planta concentradora, fundición y refinera, cadena logística, entre otros), el proyecto presenta ventajas que permiten su implementación (Lasagna, 2016):

- Posibilidad de explotar de forma sustentable en el largo plazo.
- Costos de operación más bajos.
- Acceso a mayores leyes de mineral, removiendo menores cantidades de estéril.

De esta forma, se tiene un proyecto rentable cuyos principales objetivos son (Lasagna, 2016):

- Cero accidentes fatales, reclamos ambientales y comunitarios.
- Inicio de producción el año 2019, buscando alcanzar un ritmo de extracción estable de 140 ktpd en no más de 7 años.
- Extender la vida de la División Chuquicamata por 40 años más.

2.1.3 Aspectos técnicos

a) Criterios geomecánicos

El yacimiento considerado en la envolvente económica posee 3.000 m de largo en la dirección N-S, entre 300 y 800 m de ancho y 900 m de profundidad. Su calidad geomecánica es favorable a métodos de hundimiento, pues permite una rápida fragmentación, presenta bajo riesgo por sismicidad, y los esfuerzos in-situ son de 25 MPa (Lasagna, 2016).

Los estudios hidrogeológicos indican que no existen acuíferos en la vecindad, por lo que los aportes de agua desde el entorno serán menores a 8 L/s. Sin embargo, existen dos restricciones previas a la realización del proyecto que es necesario tomar en cuenta (Codelco, Estudio de Prefactibilidad PMCHS, 2009).

- La Falla Oeste que atraviesa el rajo, caracterizada por una permanente inestabilidad durante la vida de la mina a cielo abierto. Esta estructura restringe las excavaciones realizadas por del método de Block/Panel Caving, pues cualquier extensión que alcance la zona afectada presentará problemas geomecánicos considerables. Así, cualquier infraestructura no puede ser proyectada a una distancia menor a 60 m del sector indicado.
- Debido a la explotación a cielo abierto, se proyecta la ubicación del pit final con el objetivo de conocer el área de influencia de dicha construcción. De esta forma, se determinó un halo de seguridad de 100 m que envuelve la última fase, evitándose así que la infraestructura considerada para la mina subterránea se vea afectada por los eventos en superficie.

b) Explotación del yacimiento

Debido a que existe una gran cantidad de material estéril que debe ser removido previa obtención del mineral (Figura 6), se tomó la decisión de explotar el yacimiento con un método de minería subterránea masiva.

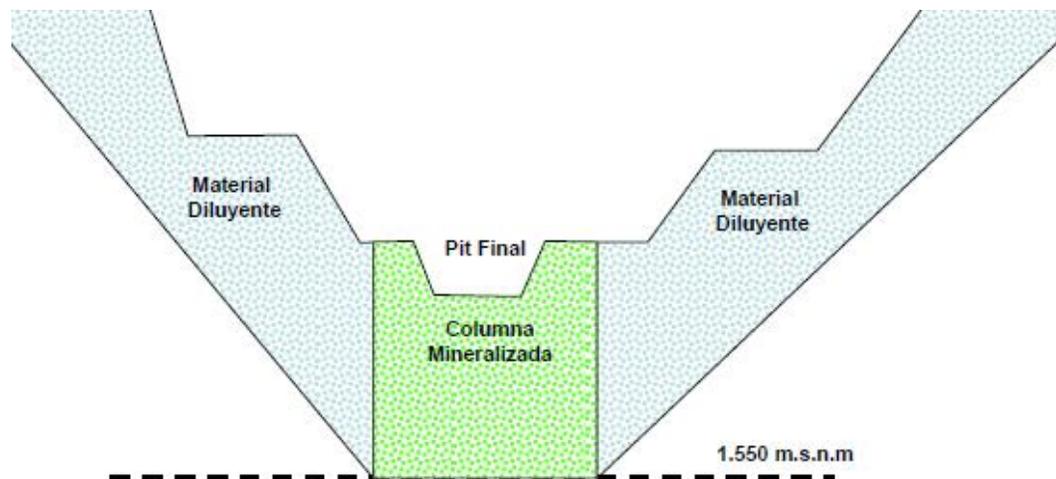


Figura 6. Perfil de pit final y material remanente.

(Codelco, Estudio de Prefactibilidad PMCHS, 2009)

La extracción del mineral se realizará a través del método de Block/Panel Caving, donde se hundirá el material en grandes volúmenes regulares de roca o macrobloques. La Figura 7 ilustra cómo el mineral (naranja) es extraído bajo el yacimiento, donde se encuentra la infraestructura principal (blanco).

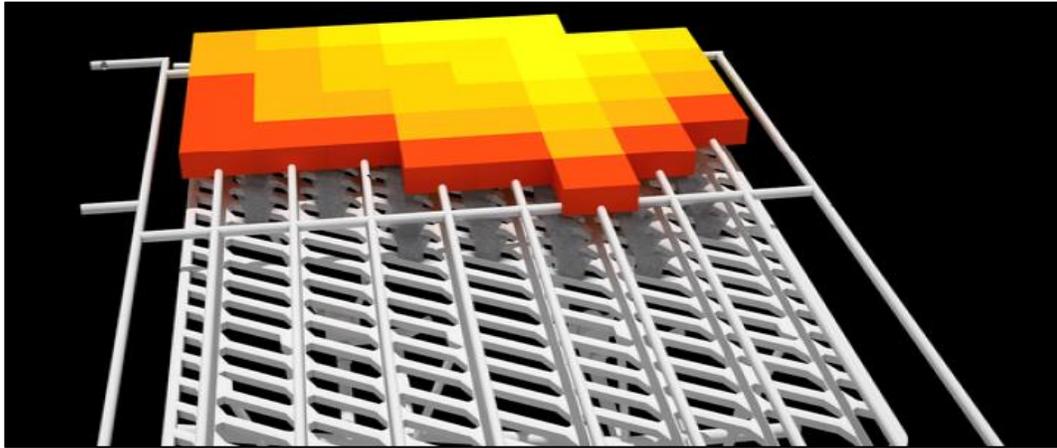


Figura 7. Explotación por Block/Panel Caving.

(Lasagna, 2016)

La Figura 8 muestra la producción anual por nivel. Al ir removiendo roca por sectores diferentes de forma consecutiva existe cierta flexibilidad operacional que permite mantener un ritmo constante de 140 ktpd durante más de 25 años.

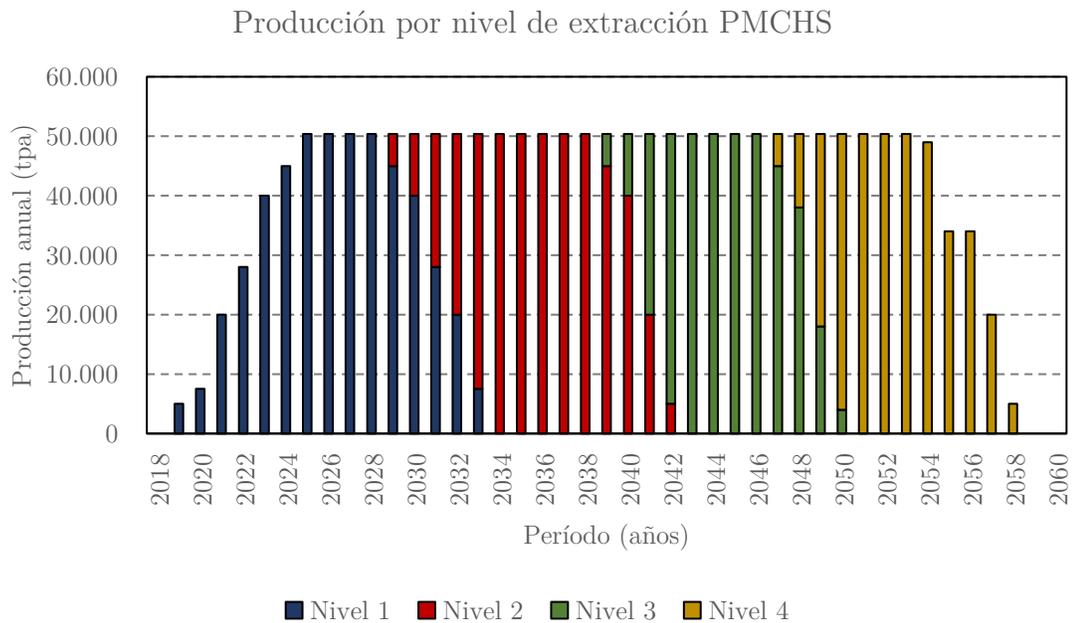


Figura 8. Producción anual del PMCHS.

(Lasagna, 2016)

c) Obras principales

El proyecto cuenta con diferentes construcciones que permiten el acceso a las instalaciones, el transporte de material y la ventilación de la mina (Lasagna, 2016).

- Un túnel de acceso principal de 7.500 m de largo, sección de 9,3 m x 5,8 m, e inclinación de -8,7%.
- Un túnel de transporte principal de 6.300 m de largo, sección de 8,6 m x 5,9 m, e inclinación de -15%.
- Cinco túneles de inyección de aire, cada uno de 4.500 m de largo, sección de 10,7 m x 8,0 m, e inclinación de -15%.
- Dos piques de extracción de aire, cada uno de 920 m de largo y con un diámetro de 11 m.

Además, la Tabla 2 presenta la longitud de desarrollos horizontales y verticales a construir durante toda la vida útil de la mina subterránea, obteniéndose un total de 1.021 km considerando todas las obras pertenecientes al proyecto.

Tabla 2. Obras principales del PMCHS.

Ítem	Construcción 2011-2019 (km)	Construcción 2020-2027 (km)	Total proyecto (km)
Túneles de sección < 40 m ²	94	92	621
Túneles de sección > 40 m ²	69	39	223
Chimeneas de ventilación	22	34	150
Piques de 11 m de diámetro	1	1	2
Piques de traspaso	4	6	25
Total	191	172	1.021

(Lasagna, 2016)

La Figura 9 ilustra un diseño tridimensional de la mina donde es posible observar la gran variedad de túneles a construir. El sector izquierdo presenta los niveles de producción, transporte y hundimiento, mientras que las excavaciones de gran longitud ubicadas a la derecha representan los accesos principales y los circuitos de ventilación.

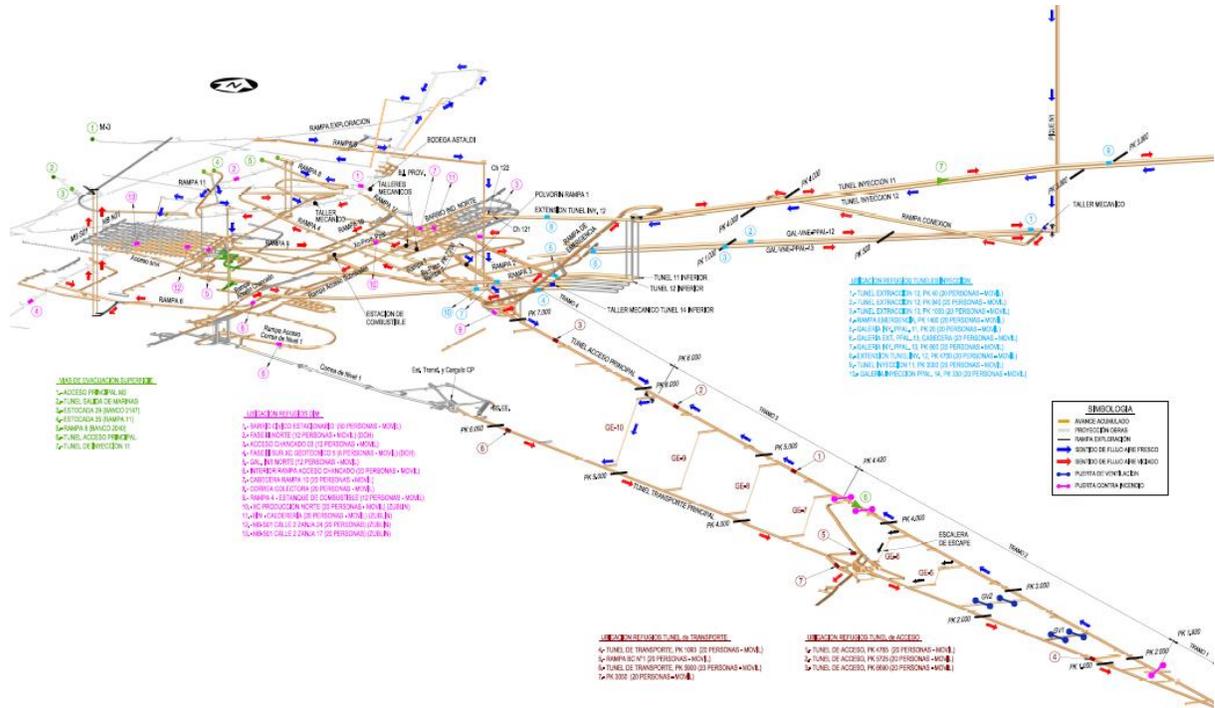


Figura 9. Diseño de mina Chuquicamata Subterránea.

(VP Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, 2017)

En esta investigación se estudian las tronaduras realizadas en los sectores de:

- **Infraestructura:** Corresponde a todas las obras asociadas al sistema de transporte principal realizado con correas.
- **Chancado:** Todas las excavaciones realizadas para acceder a las salas de chancado.
- **Inyección:** Galerías y túneles que permiten la inyección de aire fresco a la mina.
- **Extracción:** Galerías y túneles que permiten la extracción del aire viciado desde la mina hacia la superficie.
- **Pre-acondicionamiento:** Obras por sobre el nivel de producción que permiten acceder y fragmentar el mineral para facilitar su posterior extracción por gravedad.
- **Transporte intermedio:** Todas las galerías que permiten trasladar el mineral desde el nivel de producción hacia el nivel de transporte principal.

Todos los disparos estudiados corresponden a desarrollos horizontales, por lo que cualquier tronadura realizada en cavernas, bancos o cualquier otra configuración es descartada.

2.2 Enaex S.A.

2.2.1 Descripción de la empresa

Enaex S.A. tiene como objetivo fabricar y distribuir explosivos e implementos de tronadura, utilizados tanto en minería como en construcción.

La visión de la empresa es:

“Ser la compañía más prestigiosa en la industria entregando soluciones de alto valor a las regiones mineras más importantes del mundo.” (Enaex S.A., Memoria Anual, 2016)

Mientras que su misión consiste en:

“Crecer junto a los clientes, suministrando Nitrato de Amonio, químicos asociados y servicios a la minería de alta calidad. Entregar estándares de nivel mundial en seguridad, confiabilidad y servicios innovadores. Tener presencia global, con liderazgo en Latinoamérica. Generar valor a los accionistas y trabajadores. Ser reconocidos como una empresa respetuosa con la comunidad y el medio ambiente.” (Enaex S.A., Memoria Anual, 2016)

Fundada en 1920, la empresa cuenta con 97 años de experiencia en el mercado de los explosivos, entregando siempre un servicio de alto desempeño impulsado por los cuatro valores esenciales de la compañía (Enaex S.A., Compañía, 2017).

- La prioridad siempre es la vida de las personas.
- Satisfacer al cliente de la mejor forma posible.
- Trabajar siempre en busca de la excelencia.
- Potenciar la innovación y el emprendimiento.

Actualmente, Enaex cuenta con el mayor complejo productivo de nitrato de amonio de grado explosivo en el mundo. Conocida como la planta Prillex América, ubicada en la comuna de Mejillones, en la II región de Antofagasta, tiene una capacidad de 850 mil toneladas anuales. Además, la empresa cuenta con una extensa red de plantas desde donde entrega diferentes servicios para la industria minera tales como disparos de tronadura, carguío de agentes explosivos, amarre superficial, tapado de pozos, chequeo de perforaciones y administración de polvorines, entre muchos otros (Enaex S.A., Compañía, 2017).

De las diferentes instalaciones existentes, en esta investigación se consideran los explosivos suministrados por la Planta Chuquicamata Subterránea para el PMCHS, donde se tienen disponibles polvorines, equipos de carguío y personal capacitado para la manipulación y el manejo de los productos.

2.2.2 Planta Chuquicamata Subterránea

La planta de almacenamiento y suministro de explosivos presente en las inmediaciones de la mina Chuquicamata Subterránea pertenece a la empresa Enaex S.A. El organigrama de la instalación se presenta en la Figura 10.

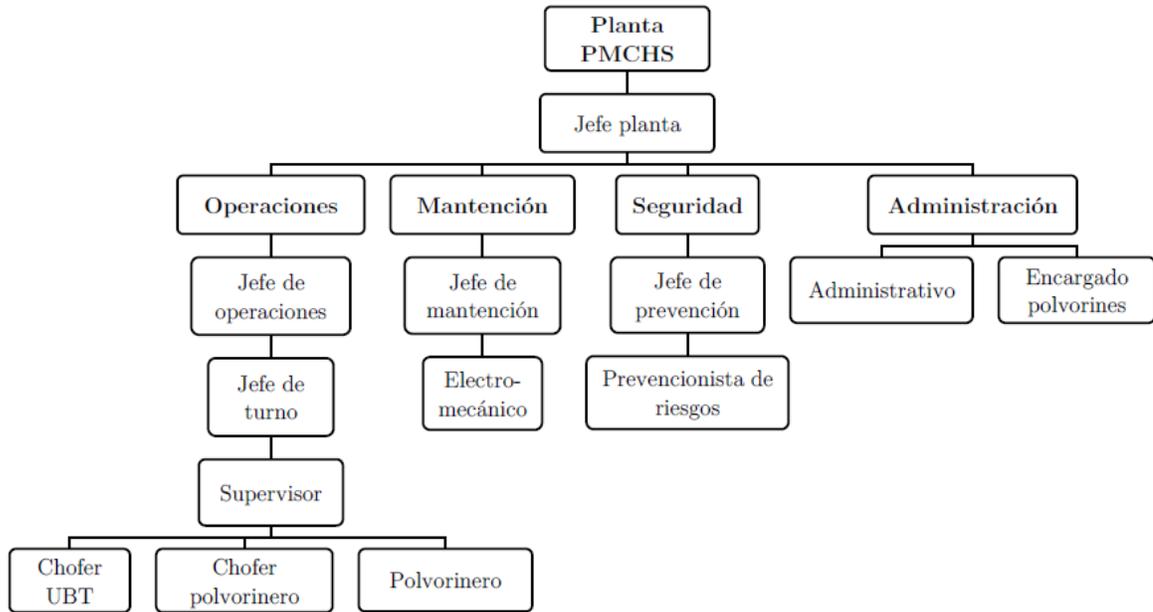


Figura 10. Organigrama de Planta Chuquicamata Subterránea perteneciente a Enaex S.A.

Las cuatro áreas de trabajo en la planta se dividen en:

- **Operaciones:** Es el personal encargado de mantener los polvorines, transportar el explosivo y operar los equipos de carguío mecanizado.
- **Mantenión:** Se encarga de reparar y mantener periódicamente los equipos utilizados.
- **Seguridad:** Área cuyo único objetivo es mantener la salud física y mental de los trabajadores, implementando programas y controles de monitoreo y autocuidado.
- **Administración:** Son todos aquellos que organizan los permisos, órdenes de compra, inventarios y cualquier otro documento necesario dentro de la planta.

La planta cuenta con variadas instalaciones consideradas específicamente para cada actividad.

- Dos contenedores de explosivos, denominados polvorines, especialmente fabricados para evitar la iniciación indebida de los productos almacenados. Ambos se ubican en la superficie y se encuentran alejados de las demás instalaciones de la mina. Uno contiene los altos explosivos, mientras que el otro protege los sistemas de iniciación.
- Una oficina donde se realizan los trabajos administrativos y charlas de seguridad.
- Camarines donde los operadores pueden cambiarse de ropa y guardar sus artículos personales, junto con una cafetería donde los trabajadores pueden descansar e ingerir alimentos.
- Contenedores con todos los repuestos mecánicos necesarios para los equipos.
- Un estacionamiento habilitado para equipos de transporte de personal, tales como camionetas y furgones.

La empresa también administra el polvorín subterráneo, destinado a abastecer de forma inmediata a los diferentes trabajos realizados que requieran material explosivo. El personal controla el flujo de los productos, manteniendo un control estricto de las cantidades que entran y salen del almacén.

Junto con lo anterior, el transporte de las sustancias es realizado con equipos especialmente habilitados para dicha tarea.

- Equipos de carguío UBT destinados para transportar, fabricar y bombear la emulsión.
- Camionetas polvorineras, habilitadas con un cajón especial que permite almacenar y transportar los explosivos.
- Un camión polvorinero similar a las camionetas, pero de mayor capacidad.
- Dos camiones Feeder, cuya función es transportar la matriz UG-06 utilizada en la fabricación de emulsión bombeable.

Los explosivos suministrados por la empresa en el proyecto son los siguientes:

- **Altos explosivos:** ANFO, APD, dinamitas, emulsión encartuchada y bombeable, cordón detonante.
- **Sistemas de iniciación:** Mecha ensamblada, detonadores no eléctricos y electrónicos, cables de conexión y disparo.

Actualmente la planta cuenta con todos los implementos necesarios para almacenar y transportar explosivo. La única actividad no realizada por Enaex es el carguío del producto en las labores a detonar, ya que esta operación es llevada a cabo por el personal de la mina.

3 Revisión bibliográfica

3.1 Desarrollos horizontales en minería

La operación de tronadura es utilizada tanto en la construcción como en las actividades de producción de una mina subterránea. Debido a que el enfoque de esta investigación consiste en estudiar su implementación en el desarrollo horizontal, se detalla brevemente esta operación.

El ciclo de construcción utilizado actualmente en minería se ilustra en la Figura 11, donde es posible observar que cuenta con diferentes operaciones unitarias que deben ser implementadas en el orden correcto para lograr la máxima productividad con el menor riesgo posible.

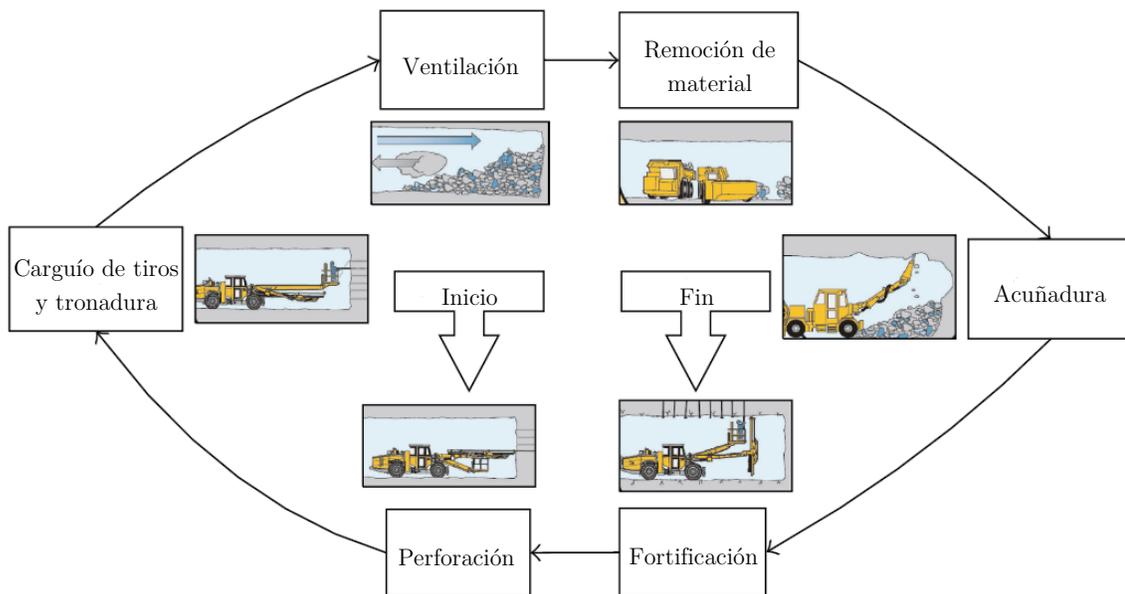


Figura 11. Construcción de túneles por tronadura.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

Las etapas necesarias para construir un túnel son:

- Perforación.
- Carguío de explosivo y tronadura.
- Remoción de material.
- Acuñadura.
- Fortificación de la excavación.
- Servicios adicionales.

Cada una de estas operaciones presenta características únicas (Rocher, 2012), las cuales serán descritas a continuación.

3.1.1 Perforación

Se emplea un sistema que genera empuje, percusión y rotación sobre un punto específico del frente, logrando perforar la roca hasta la profundidad deseada. Se deben considerar equipos, personal requerido, insumos y aspectos de diseño (Rocher, 2012).

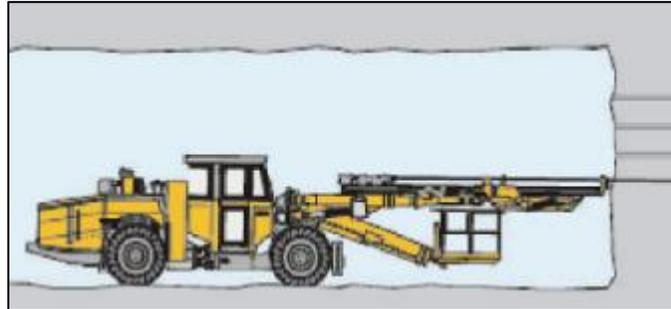


Figura 12. Operación de perforación en minería subterránea.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

La Figura 12 ilustra un equipo de perforación que, a través de barras de acero, genera los tiros que luego serán cargados con el explosivo.

3.1.2 Carguío de explosivo y tronadura

En esta operación se ingresa el agente explosivo y los accesorios de tronadura en las perforaciones realizadas, ya sea de forma manual o mecanizada. La cantidad y distribución de estos insumos está calculada para arrancar el material del frente de avance, fragmentándolo de la mejor forma posible y, a la vez, generando el menor daño en los alrededores de la excavación (Rocher, 2012).

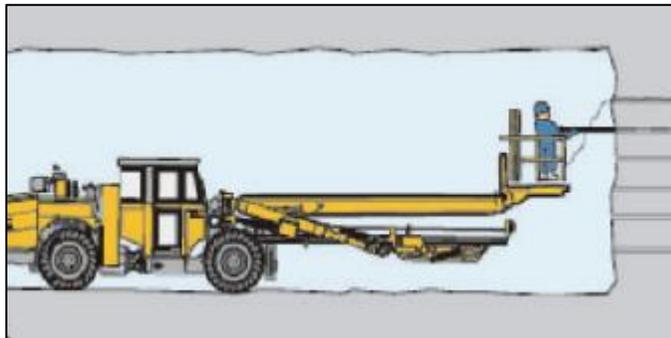


Figura 13. Carguío mecanizado de explosivo en minería subterránea.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

La Figura 13 ilustra un sistema de carguío mecanizado en el frente de trabajo. Una vez cargado el explosivo y evacuado el personal a una distancia segura, se procede a iniciar la detonación, generándose gases tóxicos que deben ser evacuados durante un cierto período de tiempo antes de permitir el reingreso del personal.

3.1.3 Remoción de material

La etapa de remoción de material consiste en extraer la roca recién tronada. Un equipo de bajo perfil, como se ve en la Figura 14, especialmente diseñado para trabajar dentro de una mina subterránea, procede a cargar el material para transportarlo desde el frente hacia un sector de descarga.

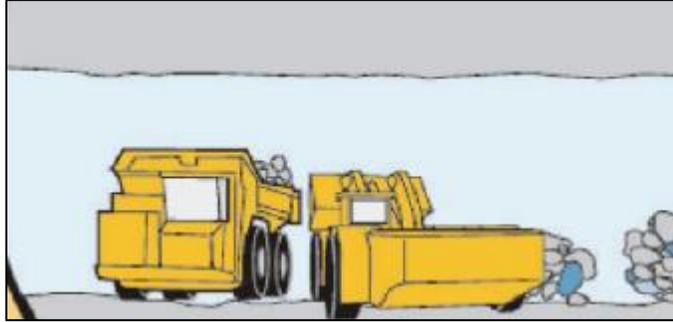


Figura 14. Transporte del material fragmentado en minería subterránea.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

Una vez el material es removido del frente, pueden presentarse dos casos: el mismo equipo de carguío deposita la roca fragmentada en un punto de vaciado o, en su defecto, debido a las grandes distancias a recorrer dentro de la mina, puede vaciar su carga en otro equipo mejor preparado para largos trayectos (Rocher, 2012).

3.1.4 Acuñaadura

Consiste en remover los fragmentos de roca que, luego de realizar la tronadura, no han sido separados del frente de trabajo y que pueden desprenderse en cualquier momento, provocando accidentes severos e incluso fatales. La Figura 15 ilustra la operación de acuñaadura, la cual puede ser manual o mecanizada (Rocher, 2012).



Figura 15. Acuñaadura mecanizada en minería subterránea.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

3.1.5 Fortificación de la excavación

Una vez que el frente de avance se encuentra libre para continuar trabajando, es necesario asegurar que la excavación soportará los esfuerzos inducidos durante el tiempo que sea requerido por la planificación de la mina. Así, debido a las características inherentes del macizo rocoso y a la violenta tronadura realizada con anterioridad, es necesario reparar parte del daño efectuado y, además, estabilizar las paredes de la obra hasta un punto que permita trabajar de forma segura (Rocher, 2012).

Las operaciones de fortificación de la excavación pueden realizarse de forma manual o mecanizada, donde los implementos más utilizados para entregar estabilidad son: pernos, cables, mallas, hormigón proyectado (shotcrete), vigas, y dovelas, entre muchos otros.

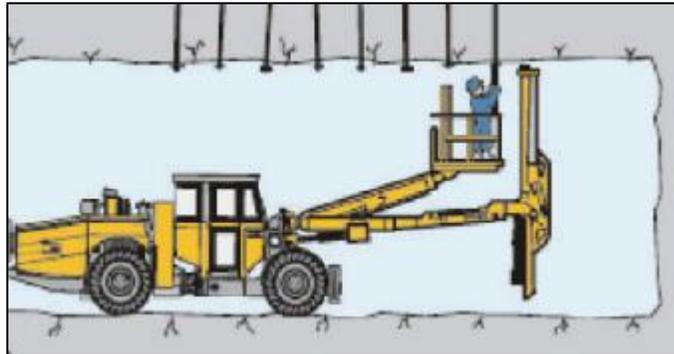


Figura 16. Fortificación de la excavación en minería subterránea.

(Vargas, Koppe, Pérez, & Hurtado, 2015)

La Figura 16 ilustra cómo se instalan pernos para fortificar el techo de un túnel.

3.1.6 Servicios adicionales

Este ítem considera todas aquellas actividades adicionales que es necesario diseñar e implementar para asegurar el correcto funcionamiento de la mina. Las principales operaciones son: generar y transmitir aire comprimido, instalación de un sistema de drenaje y ventilación, y mantenimiento de caminos, entre muchos otros (Rocher, 2012).

3.2 Tronadura y excavación

La tronadura (o voladura) consiste en la operación de hacer detonar cargas explosivas insertas en el macizo rocoso, con el fin de fragmentarlo y arrancarlo de su posición inicial. La cantidad de energía requerida para una determinada tronadura depende principalmente de las propiedades geomecánicas de la roca y de la granulometría del producto que se desea obtener (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

3.2.1 Principio de operación

Como se indica en la Figura 17, para implementar la tronadura se necesitan perforaciones (denominadas tiros, pozos o barrenos) donde se pueda ubicar el explosivo. Un taco (tapón fabricado con grava, arcilla, etc.) se inserta con el fin de contener los gases generados y así aprovechar al máximo la energía liberada por la detonación (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

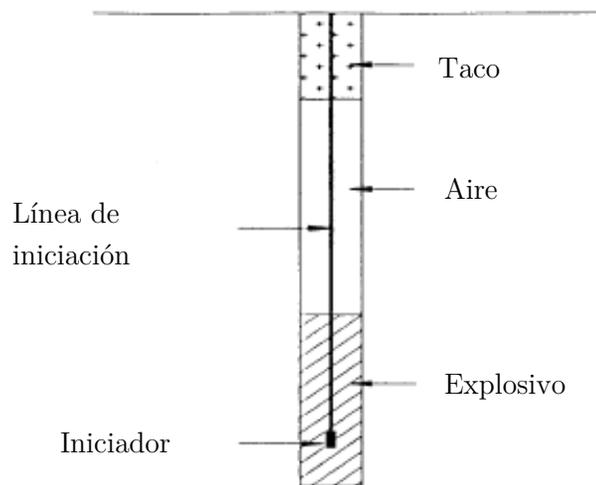


Figura 17. Tiro perforado y cargado con explosivos.

(Enaex S.A., Manual de Tronadura)

La secuencia de detonación, de forma simplificada, se presenta a continuación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- En primer lugar, se envía una señal desde un sector alejado de la tronadura para evitar accidentes.
- Las líneas de iniciación y conexión llevan dicha señal hacia los tiros, más precisamente, hacia los detonadores. Cada detonador está programado con un retardo específico, lo que permite que los tiros se activen en el orden considerado al diseñar la tronadura.
- Los iniciadores explotan una vez activado su detonador, generando la detonación de la columna explosiva desde el fondo del tiro hacia la superficie, compactando y fragmentando el macizo rocoso.
- Los gases generados se expanden y prolongan las fracturas provocadas en la roca, desplazando el material hacia la cara libre.
- Finalmente, se obtiene una pila de material fragmentado a remover por los equipos de carguío y transporte.

La Figura 18 ilustra un diseño estándar para un túnel utilizado en minería subterránea, donde los tiros se perforan sobre la superficie o frente en la dirección que se desea avanzar. Como se puede observar, el frente se divide en sectores según las características de las perforaciones que los componen.

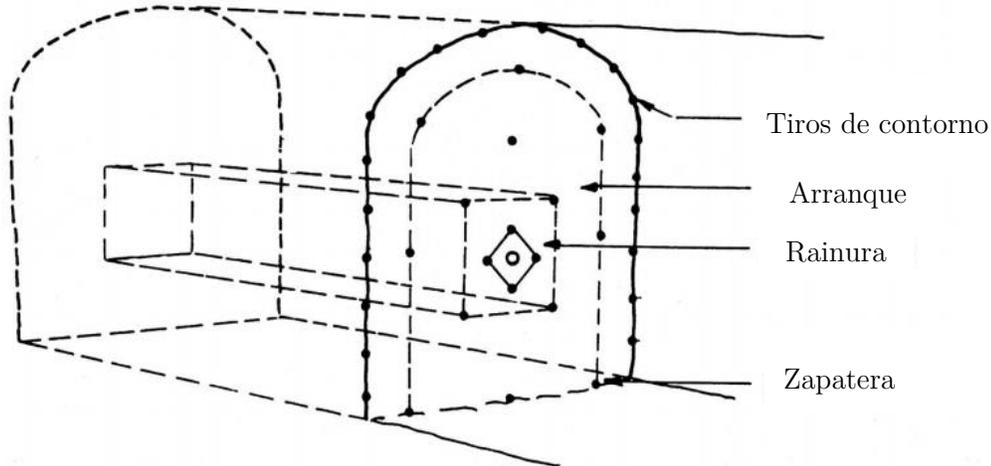


Figura 18. Diseño de perforación para construcción de un túnel.

(Satıcı, 2006)

El concepto de cara libre tiene relación con la superficie donde se genera el cambio de medio, de roca sólida a aire o agua, hacia donde se liberará la energía y se desplazará el material fragmentado. Por esta razón, al diseñar se debe tener especial cuidado en la ubicación de los tiros y los retardos asignados, pues cada columna explosiva requiere de al menos una cara libre disponible al momento de detonar (Pernía Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Para asegurar que la operación sea implementada con éxito, se han desarrollado diferentes productos explosivos (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

a) Agente explosivo

No es otra cosa que la mezcla de sustancias que, iniciadas debidamente, dan lugar a una reacción química exotérmica muy violenta que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura, químicamente más estables, y que ocupan un mayor volumen. Esta mezcla no lleva, salvo en casos excepcionales, ingredientes intrínsecamente explosivos (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Todos los agentes explosivos contienen los siguientes componentes esenciales:

- Un oxidante que provee de oxígeno a la reacción.
- Un combustible que reacciona con el oxidante para generar gases y calor.
- Un sensibilizador que entrega una fuente de calor, permitiendo generar la reacción entre el oxidante y el combustible.

Los ejemplos más conocidos a nivel industrial son el ANFO, las emulsiones y los hidrogeles. En minería, se utilizan como la columna explosiva principal a lo largo de un tiro, la cual debe ser detonada a través de un sistema de iniciación.

b) Sistema de iniciación

Consiste en todos los accesorios de tronadura que permiten detonar los tiros cargados en el orden correcto y generando la energía apropiada (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

b.1) Iniciadores

Componentes explosivos de alta potencia, que tienen como finalidad generar la detonación de la columna explosiva. Debido a que los agentes explosivos son altamente insensibles, para realizar la tronadura requieren de una gran liberación de energía, entregada por otra sustancia aún más potente (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Algunos ejemplos típicos de iniciadores son las dinamitas y los rompedores APD compuestos de pentolita, y suelen ubicarse al fondo de los tiros, junto con los detonadores.

b.2) Detonadores

Cápsulas que contienen material explosivo sensible, utilizadas para generar la detonación del iniciador en el momento exacto, respetando la secuencia de iniciación diseñada para obtener los mejores resultados. Estos se acoplan a los iniciadores para formar una prima o cebo, obteniéndose una sola unidad al fondo del tiro que es ingresada en la etapa de primado (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Existen diferentes tipos de detonadores, clasificados principalmente por su capacidad para adecuarse a la secuencia diseñada con el mínimo error posible. En orden creciente de efectividad se encuentran los detonadores no eléctricos (fabricados con compuestos pirotécnicos), detonadores eléctricos, y detonadores electrónicos (permiten programar los retardos por computadora, siendo los de mejor calidad en el mercado actual) (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

b.3) Líneas de iniciación y conexión

Corresponden a todas las conexiones que llevan la señal de iniciación de la detonación desde un sector seguro hasta los tiros cargados con explosivo. Para sistemas no eléctricos se utilizan cordones detonantes y tubos de choque, ambos compuestos de cables plásticos con un núcleo de material explosivo, generalmente pentritas; los accesorios eléctricos y electrónicos utilizan cables eléctricos, altamente confiables pues presentan una menor dispersión respecto al retardo originalmente calculado (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Una vez cargado el frente, comienza la etapa de amarre. Esta consiste en conectar todas las líneas de iniciación a las cargas explosivas dentro de los tiros, permitiendo tener un sistema que permita arrancar la roca de su posición inicial.

3.2.2 Mecanismos de rotura de roca

Al detonar la columna explosiva, ocurren una serie de fenómenos que alteran las características de la roca, fragmentándola y desplazándola. Estos sucesos pueden agruparse en dos etapas consecutivas (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994):

- El explosivo detona, provocando una violenta liberación de energía en un corto período de tiempo.
- Se produce la reacción que genera los gases de tronadura, los cuales se expanden a través de las grietas existentes.

A continuación, se explicará cómo funcionan los mecanismos presentes en dichas fases.

a) Trituración de la roca

Al iniciar la detonación, la onda de choque inicial libera tal cantidad de energía que es capaz de vencer la resistencia dinámica a la compresión de la roca, provocando que la estructura cristalina más cercana sea triturada.

No existe ningún incentivo en aumentar este efecto, pues consume el 30% de la energía que transporta la onda de choque, fragmentando cerca de un 0,1% del total del volumen de roca a remover por tiro (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

b) Agrietamiento radial

La onda de compresión inducida en el macizo rocoso genera esfuerzos tangenciales de tracción que cuando superan la resistencia dinámica a la tracción de la roca, alrededor del tiro se crea una zona de fracturas radiales, formándose grietas orientadas hacia afuera de la perforación. La Figura 19 ejemplifica este mecanismo de fractura, el cual puede verse alterado si existen estructuras previas en el macizo rocoso, pues podrían atenuar y hasta interrumpir la propagación de las grietas (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

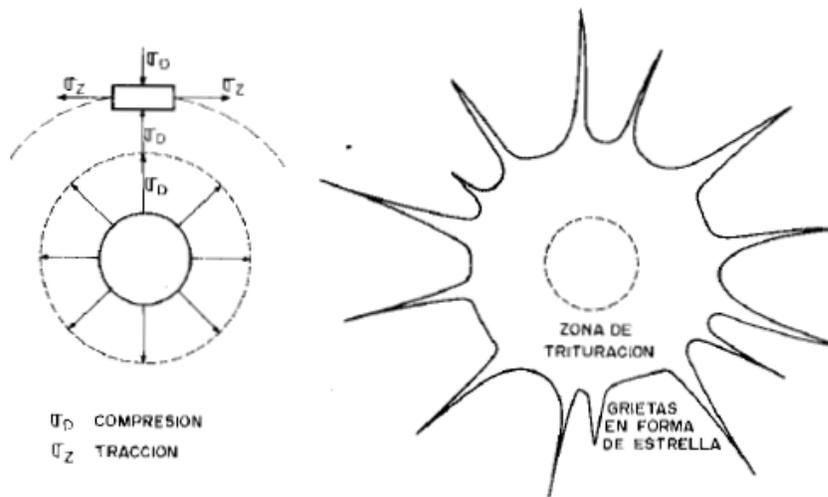


Figura 19. Agrietamiento radial provocado por la tronadura.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

c) Reflexión de la onda de choque

Cuando la onda de choque se refleja debido a un cambio de medio, como ocurre cuando se alcanza la interfase entre el macizo rocoso y la atmósfera, la onda incidente de compresión se refleja como onda de tracción en dirección opuesta. Como las rocas en general resisten mucho menos a la tracción que a la compresión se pueden generar fracturas por un proceso de descostramiento (spalling).

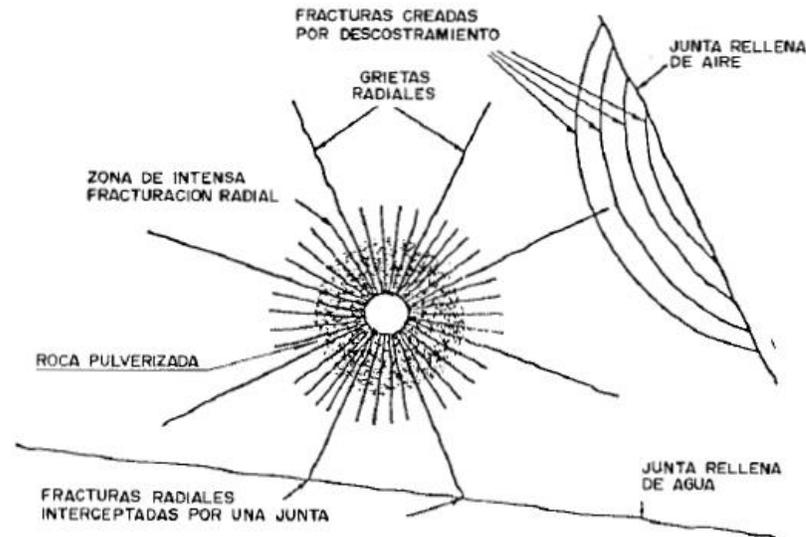


Figura 20. Reflexión de onda de choque durante la tronadura.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

La Figura 20 representa un fracturamiento por reflexión de ondas. Este mecanismo no aporta mayormente a la tronadura, a menos que se aprovechen estructuras preexistentes que no se encuentren rellenas con material de meteorización (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

d) Extensión y apertura de las grietas radiales

Los gases generados por la detonación del explosivo se expanden rápidamente, induciendo altas presiones dentro de las grietas radiales existentes tanto por tronadura como previas a esta. Así, el gas aumenta su volumen, extendiendo y abriendo dichas estructuras (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

e) Fractura por descompresión violenta

Cuando la onda de choque se propaga por el macizo rocoso y avanza hacia la cara libre induce esfuerzos de compresión y la roca acumula energía de deformación. Cuando la cara libre cede esta energía se libera violentamente, generándose esfuerzos de tracción y cizalle sobre el macizo que fracturan un gran volumen de roca (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

f) Fractura por cizallamiento

Cuando se tiene un macizo rocoso conformado por estratos, cada uno poseerá un módulo de elasticidad diferente. Al detonar la columna explosiva, la onda de choque que atraviesa el medio sólido genera movimiento de partículas, produciéndose la rotura de la roca en los planos que separan las diferentes formaciones rocosas (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

g) Rotura por flexión

Una vez que los gases terminan de expandirse, la roca ha sido doblada, como si se tratase de una viga doblemente empotrada. Cuando la presión ejercida alcanza su límite, el macizo rocoso se fractura, como se muestra en la Figura 21 (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

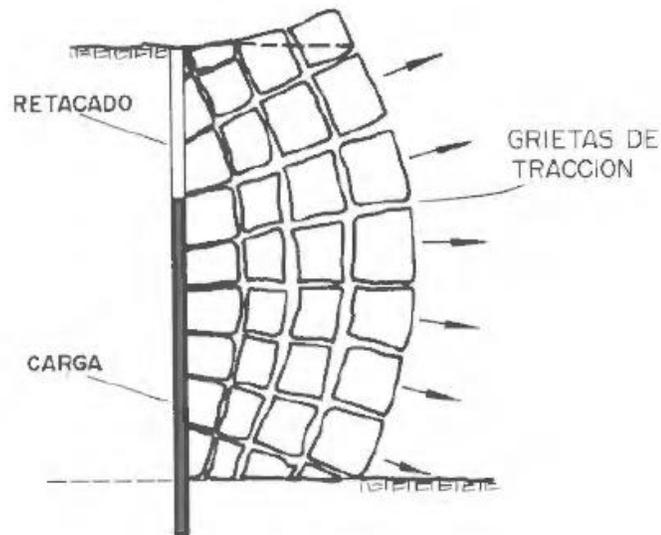


Figura 21. Rotura del macizo rocoso por flexión.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

h) Rotura por colisión

Los fragmentos de roca generados son proyectados hacia la atmósfera producto de la gran energía liberada. Una vez en el aire, estos fragmentos colisionan entre sí, formando partículas de roca más pequeñas (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

3.2.3 Perturbaciones generadas

Junto con la fragmentación del macizo rocoso existen otros efectos no siempre positivos sobre el medio que deben ser monitoreados y controlados (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Vibraciones y onda aérea

Una vez que la columna explosiva detona, parte de la energía empleada se disipa a través de la roca (vibraciones) y la atmósfera (onda aérea). Ambas perturbaciones se ven afectadas por las mismas variables que influyen en el desempeño de una tronadura, presentadas a continuación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

– Geología local

La magnitud y la distancia recorrida por las vibraciones puede ser alta o baja dependiendo de si se tiene un macizo rocoso homogéneo o si existen variados estratos, suelos porosos y presencia de agua, respectivamente.

– Tiempo de retardo

La magnitud de las ondas generadas depende principalmente de la cantidad de cargas explosivas que son detonadas al mismo tiempo y en un área reducida, producto de las consideraciones de diseño del diagrama de disparo. Las vibraciones pueden acoplarse provocando interferencias constructivas, cooperando para propagar las perturbaciones.

– Distancia al punto de la tronadura

La distancia desde el punto de medición al sector donde se realiza la tronadura tiene gran importancia en la magnitud percibida por personas e infraestructura. Conforme la distancia aumenta la intensidad de las vibraciones sísmicas y de la onda aérea disminuye considerablemente.

– Consumo específico de explosivo

Es poco recomendable reducir de forma excesiva la cantidad de explosivo empleada por disparo, pues se han llegado a registrar tronaduras en las que bajando el consumo un 20% con respecto al óptimo se han duplicado y triplicado los niveles de vibraciones medidos. Esto se debe al gran confinamiento del explosivo y su mala distribución espacial, lo que origina una falta de energía para desplazar y esponjar la roca fragmentada.

– Tipos de explosivos

Explosivos de baja densidad y velocidad de detonación provocan niveles de vibración inferiores, mientras que explosivos de mayor poder tienden a generar mayores perturbaciones.

– Variables geométricas de la tronadura

El diseño de la tronadura tiene como finalidad aprovechar al máximo la energía liberada por el explosivo. Así, diámetros demasiado grandes, distancia inadecuada a la cara libre, sobreperforaciones, tacos muy largos y tiros inclinados provocan un aumento del nivel de vibraciones y onda aérea.

La instrumentación requerida para obtener las características de las vibraciones de forma representativa debe cumplir con ciertos criterios (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

- Orientar el sensor en la dirección de la tronadura de forma precisa.
- Acoplarlo firmemente, utilizando cemento o un adhesivo para evitar que se genere “ruido” por la oscilación del sensor.

La distancia desde la ubicación del sensor hasta el sector de la tronadura puede ser menor a 15 m si se necesita medir todas las características de las ondas (campo cercano), o mayor a este límite si solamente se busca conocer el daño generado en las inmediaciones de la excavación (campo lejano).

Para evaluar la dispersión de los retardos se requerirá un solo sensor. Por otro lado, si se necesita conocer las características de las ondas producidas por cada carga se requerirá un mayor número de sensores con una ubicación bien definida (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Actualmente, los sensores más utilizados en minería son los geófonos, los cuales entregan una medición directa de la velocidad de partícula. La velocidad de partícula crítica o PPV_C (Tabla 3) tiene relación con la deformación máxima que puede resistir la roca antes que ocurra fractura por tensión (Enaex S.A., Manual de Tronadura). Normalmente se considera para evaluar los daños generados por una tronadura suponiendo que la Ley de Hooke se cumple en el macizo rocoso.

Tabla 3. Criterios de daño por vibraciones considerando PPV_C .

Criterio de daño por vibraciones	
Dilatación de fracturas	$1/4 \times PPV_C$
Aparición de nuevas grietas	PPV_C
Daño notorio u obvio	$4 \times PPV_C$
Sobre-excavación	$8 \times PPV_C$

(Enaex S.A., Manual de Tronadura)

Considerando todo lo anterior, se recomiendan las siguientes medidas para atenuar el efecto de las vibraciones sobre el entorno (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Minimizar la cantidad de explosivo por retardo.
- Utilizar detonadores con la mínima dispersión posible.
- Diseñar la secuencia de disparo para aprovechar la interferencia destructiva de las ondas.
- Disponer la secuencia de disparo para que se aleje de la infraestructura más cercana.
- Utilizar cantidades adecuadas de explosivo.
- Monitorear la perforación para que el diseño se vea reflejado en la operación.
- Disponer siempre de al menos una cara libre.
- Adaptar la tronadura en los contornos de las construcciones para evitar daño excesivo en el macizo rocoso.

De la misma forma, existen medidas para evitar la propagación de ondas aéreas descontroladas (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Al igual que con las vibraciones, minimizar la cantidad de explosivo por retardo.
- Implementar una secuencia que permita el desplazamiento de la tronadura a una velocidad inferior a la del sonido en el aire.
- Aumentar el confinamiento del explosivo utilizando tacos de material y longitud adecuados.
- Evitar el empleo de cordón detonante, pues cuando la señal pasa por este también se produce una onda de choque.
- Diseñar la secuencia de disparo para evitar interferencia constructiva entre ondas.

b) Proyecciones de roca

Consisten en lanzamientos incontrolados de material fragmentado, propulsados desde el lugar de la tronadura hacia la atmósfera debido a la súbita liberación de energía. Estos eventos deben ser controlados e idealmente minimizados, dado que pueden llegar a provocar graves accidentes y dañar la infraestructura (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Aquellas condiciones que deben ser consideradas para evitar las proyecciones de roca son (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994):

– Geología local

Debido a que la fragmentación se lleva a cabo gracias a que los gases se expanden para romper y desplazar la roca, es de vital importancia conocer la calidad del macizo rocoso, especialmente su dureza y cantidad de fracturas preexistentes.

– Tipo y distribución del explosivo

El tipo de explosivo definirá su poder rompedor y su capacidad para generar gases. Dependiendo del tipo de roca, al escoger el explosivo correcto la detonación fragmentará el material y lo desplazará lo suficiente para permitir el carguío, sin proyectar fragmentos de forma violenta producto de un exceso de gases o mal uso de la energía.

Junto con lo anterior, la distribución del explosivo también debe ser controlada, pues las condiciones en terreno no siempre se asemejan a lo planificado y es necesario realizar el carguío de tal forma que las cantidades de explosivo en cada tiro se adapten a la calidad de la perforación.

– Diseño empleado

El desempeño de la tronadura se ve directamente influenciado por la ubicación de las perforaciones y el diagrama de disparo. Mientras mejor sea el diseño, una mayor parte de la energía liberada será empleada en fragmentar la roca considerada para ser removida, en vez de malgastar la detonación de las cargas en proyectar rocas hacia la atmósfera.

3.2.4 Aplicación en construcción de túneles

El desarrollo horizontal de un túnel mediante perforación y tronadura apunta principalmente a construir obras que permitan la circulación de vehículos y personal hacia y dentro de la mina. Sus principales atributos son (Hung, Monsees, Munfah, & Wisniewski, 2009):

- Perturbaciones generadas tales como ruido y emisión de polvo se ven restringidas al sector de la tronadura, sin interferir con las actividades realizadas fuera del sector.
- Mínimas interferencias con otras operaciones, ajenas al ciclo de construcción.
- Si se implementa correctamente, el nivel de vibraciones es mucho menor en comparación con el método de construcción por tuneleras TBM.
- Como desventaja se tiene el hecho de trabajar con explosivos, los cuales pueden ser peligrosos si no se manejan, transportan y almacenan según los protocolos de seguridad existentes en la industria.

La geometría de los tiros, su ubicación y secuencia de salida definen cómo se utiliza la energía liberada por la detonación del explosivo y además modifica la forma del macizo rocoso para ir desplazando material fragmentado hacia el espacio disponible (Enaex S.A., Manual de Tronadura). La Figura 22 ilustra un ejemplo del diagrama diseñado para la construcción de un túnel, donde se puede ver que los tiros se agrupan en sectores según sus características.

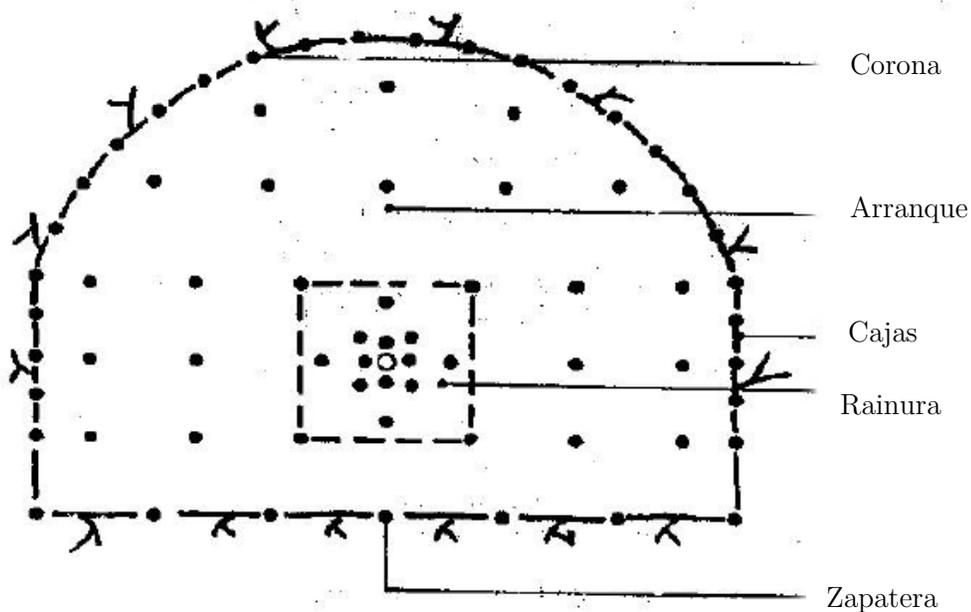


Figura 22. Diagrama de disparo para construcción de un túnel.

(Enaex S.A., Manual de Tronadura)

A continuación, se explicará brevemente el propósito de cada grupo de perforaciones en el frente de trabajo (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

– Rainura

Consiste en crear una cavidad en el macizo rocoso para generar caras libres adicionales al frente de trabajo y entregar el espacio suficiente a la roca para desplazarse. La preparación de la rainura es una de las etapas más importantes en la operación, pues mientras más grande es el corte inicial generado, mayor será la disponibilidad de la cara libre.

Las perforaciones utilizadas pueden variar su configuración e inclinación; sin embargo, el esquema más utilizado consiste en perforar tiros paralelos formando cuadriláteros concéntricos como los presentados en la Figura 23, en torno a 2 o 3 tiros de mayor diámetro y sin carga.

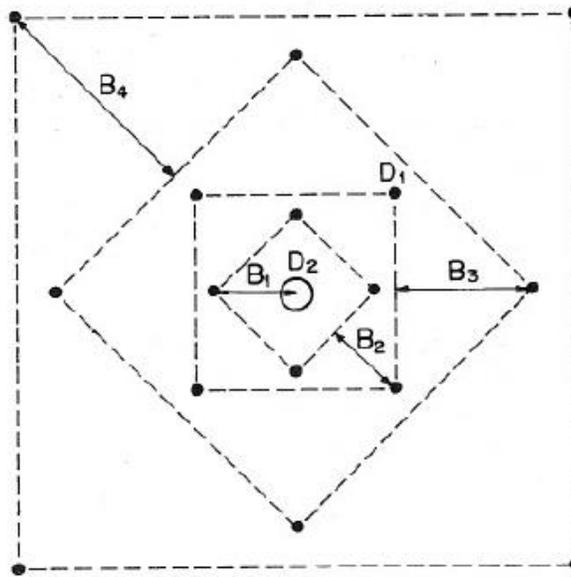


Figura 23. Diseño de rainura con tiros paralelos.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

La cantidad de cuadrantes empleados suele variar entre 1 y 4, donde el material es removido desde el centro hacia afuera con el mayor poder rompedor posible, permitiendo que el espacio generado con los tiros huecos vaya expandiéndose a medida que continua la secuencia de disparo.

Su ubicación puede variar dependiendo de los criterios de diseño empleados, pero suele diseñarse en el centro del frente sobre la zapatera pues proporciona una menor proyección de rocas y un menor consumo de explosivos (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Como se explicó anteriormente, las caras libres son las que definen en gran medida el desempeño de una tronadura. Así, en la construcción de túneles la rainura y, más específicamente, los tiros huecos utilizados determinarán el avance obtenido por disparo.

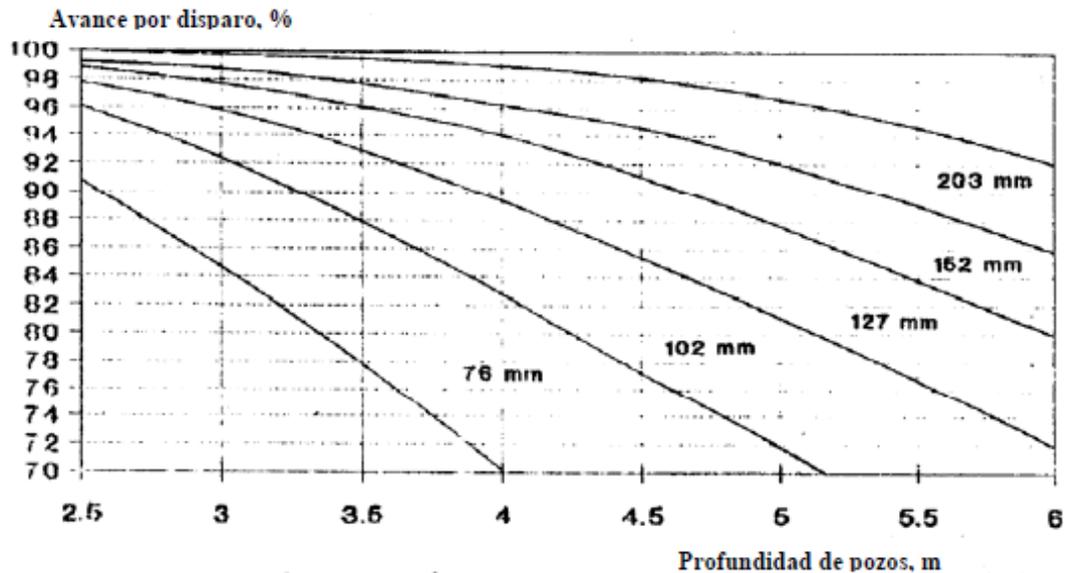


Figura 24. Influencia del diámetro de tiros huecos en avance por disparo.
(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

La Figura 24 ilustra cómo el largo y el diámetro de dichas perforaciones afectan la efectividad del sistema empleado. Si bien existen otros factores que influyen en los resultados obtenidos, es evidente que mientras mayor sea el espacio liberado previo a la iniciación de la rainura, mayor será la distancia excavada.

– **Zapatera**

Tiros horizontales o inclinados cuyo objetivo es controlar el efecto de la tronadura en el piso de la excavación, evitando daños severos.

– **Contorno**

Son todas aquellas perforaciones de la periferia cuyo objetivo es mantener un control sobre la energía liberada, evitando provocar daños severos y sobre-excavación innecesaria en las paredes del túnel. Las perforaciones pueden ser horizontales o inclinadas y suelen ser cargadas con un explosivo de menor potencia, ubicándose en las paredes (cajas) y el techo (corona).

– **Arranque**

Todos aquellos tiros cuyo objetivo es remover la roca, sin considerar las perforaciones de control de daños como zapatera, cajas y corona. Se ubican alrededor de la rainura, aprovechando el espacio disponible para arrancar gran parte del macizo rocoso considerado en el diseño. También llamados tiros auxiliares.

Cada uno de estos conjuntos de perforaciones tiene un orden de salida calculado para aprovechar al máximo la energía liberada. La secuencia varía según el criterio empleado, pero la Figura 25 ilustra un caso típico donde se remueve la roca aprovechando la cara libre en el centro del frente.

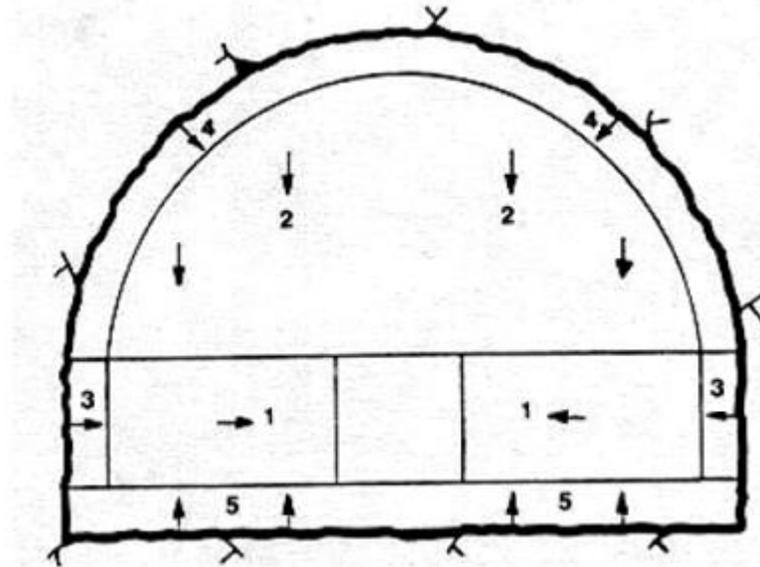


Figura 25. Secuencia de salida de una tronadura de túnel.

(Enaex S.A., Manual de Tronadura)

Junto con lo anterior, la inclinación de las perforaciones debe ser considerada al momento de realizar la tronadura. En el contorno y la zapatera se inclinan los tiros por razones de espacio para la operación de la perforadora, así una vez se reinicie el ciclo podrá ingresar y continuar con la operación. Ángulos entre 2 y 5° suelen ser suficientes, dependiendo del equipo escogido. La Figura 26 ilustra una vista en planta de esta medida.

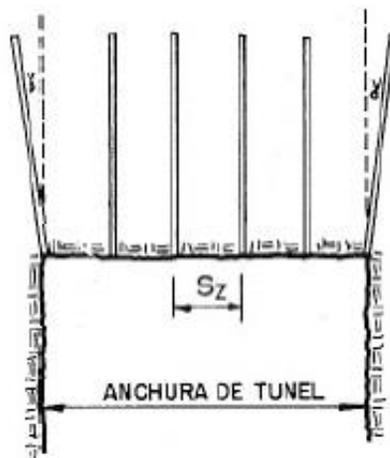


Figura 26. Inclinación de tiros en contorno del túnel.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Para clasificar la calidad de la roca presente en un frente se utiliza el indicador Q (Rock Quality Index), el cual considera los siguientes factores para calcular específicamente las condiciones observadas (Barton, Lien, & Lunde, 1974).

- Frecuencia de fracturas existentes, sin considerar aquellas provocadas por el proceso de perforación o el operador al momento de extraer una muestra.
- Número de conjuntos de discontinuidades.
- Rugosidad de discontinuidades.
- Alteración de discontinuidades.
- Agua presente en discontinuidades.
- Efecto de la condición de esfuerzos en el macizo rocoso.

Estos criterios permiten obtener un valor numérico que clasifica la roca según la Tabla 4 presentada a continuación. Mientras menor sea este resultado, peores serán las condiciones presentes; es decir, existirán mayores discontinuidades, anisotropías, abundancia de agua, y bajas capacidades para resistir esfuerzos.

Tabla 4. Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el indicador Q.

Q (Rock Mass Quality)	Valoración de la roca	Tipo
$Q \geq 10$	Buena a Excepcional	I
$1,0 \leq Q < 10$	Mala a Regular	II
$0,4 \leq Q < 1$	Mala	III
$0,1 \leq Q < 0,4$	Muy Mala	IV
$0,02 \leq Q < 0,1$	Extremadamente Mala	V
$Q < 0,02$	Excepcionalmente Mala	VI

(Barton, Lien, & Lunde, 1974)

Si el Q calculado se encuentra entre un determinado rango, es posible calificar la roca desde el tipo I (excepcionalmente buena) al tipo VI (excepcionalmente mala).

3.3 Explosivos industriales

El objetivo esencial de la utilización de un explosivo en el arranque de rocas consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada en el lugar apropiado y en cantidad suficiente de forma que, liberada de un modo controlado en tiempo y espacio, pueda lograr la fragmentación del material rocoso (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

3.3.1 Clasificación de sustancias explosivas

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos según la reacción química asociada (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Bajos explosivos (deflagrantes)

La reacción química es una deflagración, proceso exotérmico en el que la propagación de la reacción a través de la sustancia explosiva se basa principalmente en la conductividad térmica. Es un fenómeno superficial donde la liberación de energía ocurre a bajas velocidades, del orden de los 400 a 800 m/s.

Algunos ejemplos de sustancias explosivas deflagrantes son: la pólvora, los compuestos pirotécnicos y los compuestos propulsores; donde para provocar la iniciación basta con la energía de una llama.

b) Altos explosivos (detonantes)

La reacción en este caso es una detonación, proceso fisicoquímico caracterizado por su gran velocidad de propagación y formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura. La transmisión de energía es provocada por una onda de choque, generando un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva a una velocidad del orden de los 2.000 a 8.000 m/s. Provocar la iniciación dependerá de si se trata de explosivos primarios o secundarios.

b.1) Primarios

Son aquellos que sólo requieren de una mínima cantidad de energía para alcanzar el estado de detonación; por ejemplo, una llama, chispa o golpe. Los explosivos primarios más típicos son las dinamitas, el azida de plomo, y las pentolitas.

b.2) Secundarios

Son aquellos que requieren de una gran energía de iniciación, proporcionada generalmente por el impacto de la onda de choque de un explosivo primario. Los ejemplos más típicos son los agentes explosivos (ANFO, emulsiones, hidrogeles).

3.3.2 Termoquímica de los explosivos

La detonación de una sustancia explosiva presenta fenómenos fisicoquímicos que determinan el desempeño de la operación de tronadura. Los más relevantes para esta investigación se presentan a continuación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Proceso de detonación

Una vez iniciado el explosivo, se genera una onda de choque que provoca una reacción en cadena, liberando energía. Si la presión generada actúa de forma rápida y violenta, se pasa de una reacción de deflagración a una de detonación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

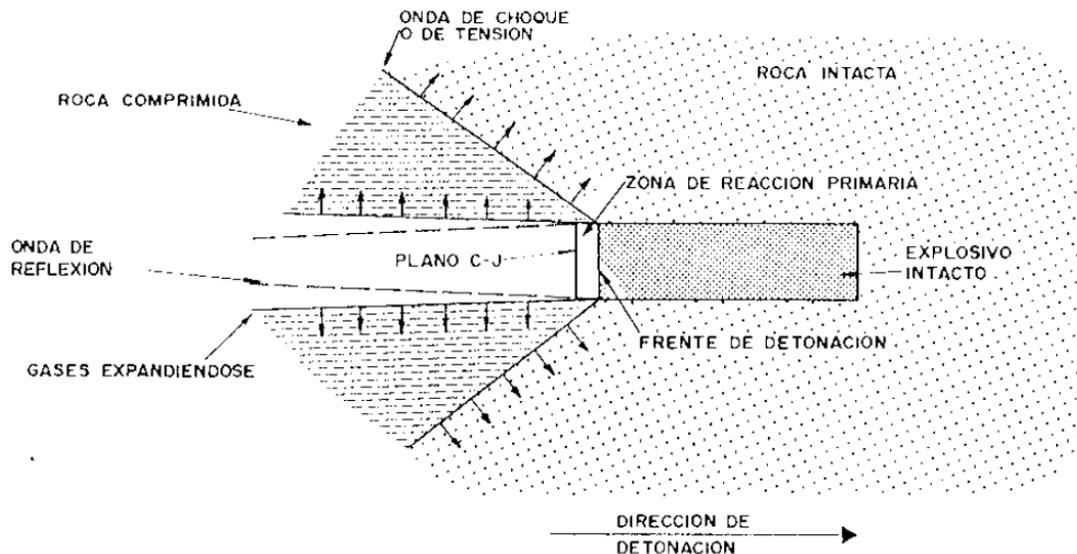


Figura 27. Detonación de una columna explosiva.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

La Figura 27 ilustra cómo se desarrolla el proceso de detonación de una columna explosiva. Como se puede observar, la detonación se desplaza de izquierda a derecha donde, a medida que el explosivo reacciona, la roca a su alrededor se comprime gracias al efecto de los gases generados. En la zona de reacción primaria, donde ocurre la transformación de la sustancia explosiva, se encuentra el límite entre la columna intacta y los gases generados por la detonación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

b) Calor de explosión

Tiene relación con la energía calórica liberada por la detonación de un explosivo. Debido a que el objetivo de la tronadura es realizar el arranque del macizo rocoso, los resultados dependen de la energía destinada a la fragmentación y esponjamiento de la roca, usualmente presentada en kJ/kg para los explosivos industriales (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

c) Balance de oxígeno

Durante la detonación de un explosivo, la reacción de oxi-reducción generada en el espacio confinado no permite aprovechar los gases presentes en la atmósfera. Lo anterior, junto con la composición química de las sustancias que componen un explosivo industrial, provocan un déficit de oxígeno al momento de realizar la tronadura (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Esta reacción incompleta libera gases tóxicos a la atmósfera en forma de monóxido de carbono, mientras que un exceso de oxígeno al momento de la detonación, producto de una mala fabricación o por presencia de agua en los tiros, genera gases nitrosos altamente dañinos para la salud de los trabajadores (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

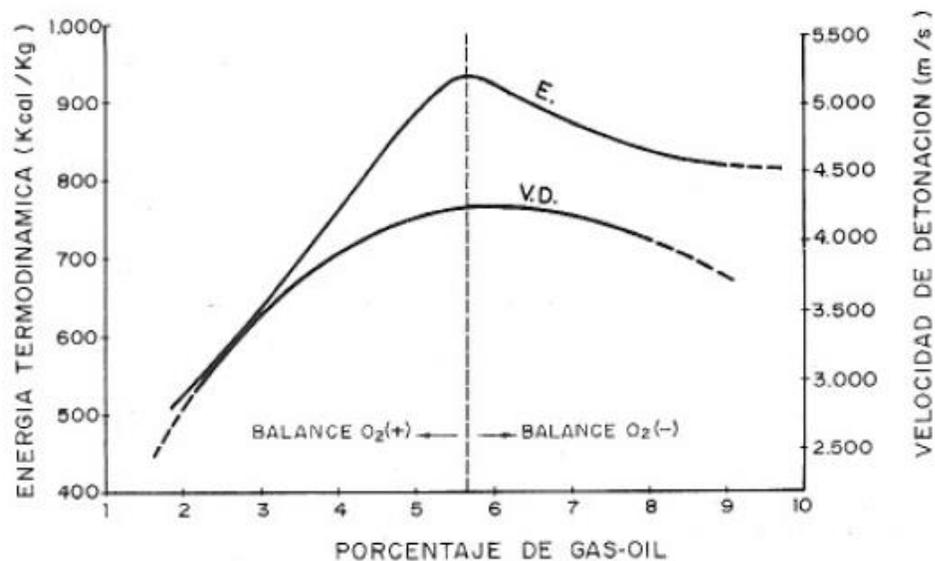


Figura 28. Eficiencia del ANFO en función del balance de oxígeno.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Como se observa en la Figura 28, existe un punto donde la mezcla de los productos que componen un explosivo (en este caso particular se trata del ANFO) permite alcanzar una mayor energía termodinámica y también una mayor velocidad de detonación. Es en este balance donde se busca maximizar el efecto de la detonación y disminuir la cantidad de gases tóxicos generados.

d) Volumen de gases

Corresponde al volumen que ocupan los gases generados por la tronadura, los cuales son utilizados para fragmentar la roca y desplazarla hacia la cara libre. Se expresa en volumen de gases por cantidad de explosivo, por lo general en L/kg (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

3.3.3 Propiedades de los explosivos

Existen variadas propiedades que definen el comportamiento del explosivo y determinan el desempeño de una tronadura realizada tanto en minería como en construcción (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Velocidad de detonación (VOD)

Velocidad de propagación de la reacción química a través del explosivo. Principalmente influenciada por (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994):

- La densidad del explosivo.
- El diámetro de carga.
- El grado de confinamiento de la sustancia.
- El envejecimiento del explosivo.

La Figura 29 ilustra como el diámetro de la carga afecta la velocidad de detonación para diferentes explosivos.

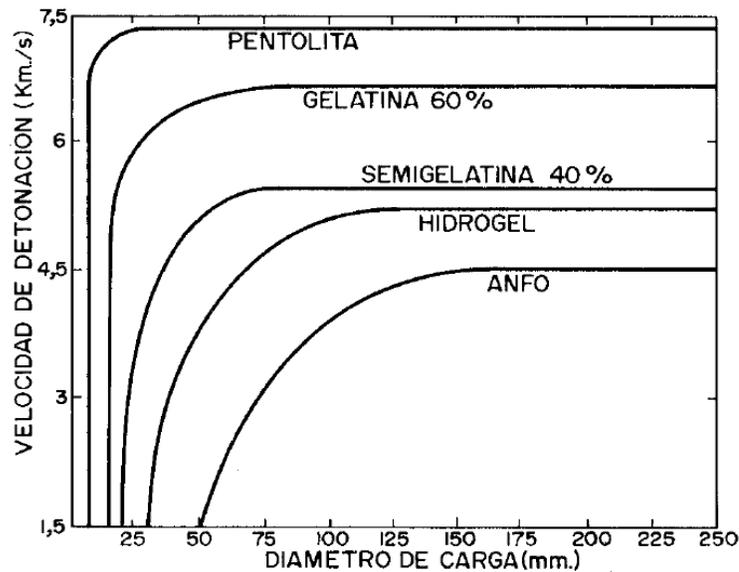


Figura 29. Influencia del diámetro en la VOD.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

b) Densidad

A mayor densidad se tiene mayor energía disponible, pero disminuye la sensibilidad de la sustancia explosiva frente a estímulos externos. Además, define el comportamiento físico y de estabilidad ante presencia de agua, pues con densidades mayores a 1 g/cm^3 el agua dentro del tiro es reemplazada por el explosivo ingresado (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Cuando los tiros tienen una gran longitud suele haber mayor densidad en el fondo de la columna, debido a la presión hidrostática (fenómeno presente en tiros verticales donde el explosivo se acumula por gravedad). La Figura 30 muestra un ejemplo de este fenómeno.

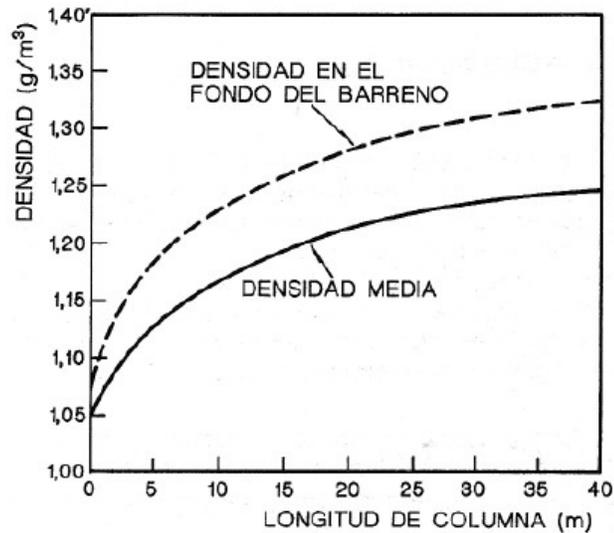


Figura 30. Efecto de la longitud de un tiro en la densidad del explosivo.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

c) Potencia

Consiste en la razón entre la energía calórica liberada y el tiempo transcurrido, el cual se puede estimar en función del largo de la columna explosiva y la VOD (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Actualmente, una de las fórmulas empíricas más utilizadas para conocer la potencia de un explosivo es la propuesta por Langefor. Esta consiste en determinar la potencia relativa en peso de una sustancia explosiva en tanto por ciento de otro que se toma como patrón (usualmente ANFO). La Ecuación 1 muestra cómo se obtiene dicho valor.

$$PRP = \frac{5}{6} \times \frac{Q_c}{Q_o} + \frac{1}{6} \times \frac{VG}{VG_o}$$

Ecuación 1. Ecuación de Langefor para potencia relativa en peso.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Donde:

- PRP: Potencia relativa en peso.
- Q_c : Calor de explosión del explosivo a emplear (kJ/kg).
- Q_o : Calor de explosión del explosivo patrón (kJ/kg).
- VG: Volumen de gases liberados por el explosivo a emplear (L/kg).
- VG_o : Volumen de gases liberados por el explosivo patrón (L/kg).

El indicador más utilizado para conocer cuánto explosivo será empleado para realizar la excavación es el factor de carga (FC). Normalmente expresado en g/t, representa la cantidad de explosivo utilizado para remover una cantidad específica de roca, como se ve en la Ecuación 2.

$$FC = \frac{M_{cc} + M_{cf} + M_{si}}{V \times \rho}$$

Ecuación 2. Factor de carga.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Donde:

- FC: Factor de carga (g/t).
- M_{cc} : Masa total de cargas de columna en un disparo (g).
- M_{cf} : Masa total de cargas de fondo en un disparo (g).
- M_{si} : Masa total de explosivo en sistema de iniciación en un disparo (g).
- V: Volumen de roca a remover (m^3).
- ρ : Densidad de la roca a remover (t/m^3).

Debido a que cada sustancia explosiva posee un poder rompedor distinto, es necesario ponderar la masa explosiva de cada implemento (columna, iniciador, detonadores, etc.) por la potencia relativa en peso. Mayor FC implica mayor fragmentación, pero al mismo tiempo, se aumenta el daño provocado sobre las zonas aledañas a la excavación diseñada (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

d) Presión de detonación

La presión de detonación de un explosivo es función de la densidad de la sustancia y de la VOD, se propaga a lo largo de la columna explosiva y varía según la composición química.

Los explosivos comerciales generan una presión que varía entre 30 y 70 kbar. Generalmente, en rocas duras y competentes la fragmentación se efectúa más fácilmente con explosivos de alta presión de detonación, mientras que en rocas más blandas y fracturadas el efecto de los gases es el que desplaza de mejor forma el material (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

e) Estabilidad química

Consiste en el intervalo de tiempo que un explosivo puede permanecer sin un cambio en su composición química o en sus propiedades físicas (horas, días o semanas). Los explosivos deben ser químicamente estables y no descomponerse en condiciones ambientales normales (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

f) Resistencia al agua

Consiste en la capacidad para soportar una prolongada exposición al agua sin que la sustancia explosiva pierda sus características, generalmente vinculada a la proporción de nitroglicerina o aditivos especiales contenidos en el explosivo (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

La escala de clasificación normalmente va desde: Nula, Limitada, Buena, Muy Buena y Excelente. En la primera, el explosivo no tiene ninguna resistencia al agua, mientras que la última garantiza una exposición superior a 12 horas (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

g) Sensibilidad

Representa una medida para la facilidad de la iniciación. Se la puede describir en función de la acción requerida para iniciar la reacción (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Al tener una acción controlada, la sensibilidad es equivalente a la aptitud a la detonación por un iniciador.
- Por otro lado, en una acción incontrolada la sensibilidad es una medida de la facilidad con la que el explosivo puede ser detonado por calor, fricción, impacto o choque.

Las cargas de explosivo con forma cilíndrica tienen un diámetro por debajo del cual la onda de detonación no se propaga o si lo hace es con una velocidad muy por debajo a la de régimen. A dicha dimensión se le llama “diámetro crítico”, valor que debe ser conocido al momento de diseñar una tronadura (Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016).

h) Detonación por simpatía

Este fenómeno se produce cuando un cartucho al detonar induce la detonación en otro próximo. En la mayoría de los explosivos industriales las distancias máximas hasta las que se produce esta detonación están entre 2 y 8 veces el diámetro del cartucho, dependiendo de la sustancia empleada.

Factores como el envejecimiento, la densidad, la composición química y el confinamiento influyen en la capacidad para transmitir la energía resultante a una carga adyacente (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

i) Desensibilización

Consiste en disminuir la capacidad de un explosivo para detonar. Puede estar producida por dos situaciones particulares (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- La carga explosiva se concentra en el fondo del pozo (por presiones hidrostáticas), donde la densidad es tan alta que es extremadamente difícil iniciar la detonación. Ocurre en perforaciones muy profundas y por lo tanto es poco común.
- La carga no detona como es debido (por presiones dinámicas), debido a que el sistema de iniciación no es el adecuado, el diámetro del explosivo es demasiado pequeño en comparación con la perforación, o cargas adyacentes ejercen presión sobre el tiro al momento de detonar.

j) Resistencia a cambios de temperatura

Temperaturas por sobre los 80°C pueden provocar la descomposición de algunas sustancias explosivas y, en algunos casos, pueden iniciar la detonación. Por otro lado, cuando la temperatura ambiente se encuentra por debajo de los 8°C, los explosivos que contienen nitroglicerina tienden a congelarse, por lo que se suele añadir una cierta cantidad de nitroglicol que disminuye su punto de congelación a menos de -20°C (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

k) Gases tóxicos

Depende del balance de oxígeno realizado al momento del carguío. Un exceso de oxígeno generará gases nitrosos (NO_x), mientras que un déficit de oxígeno generará monóxido de carbono (CO). Si bien la mayor eficiencia de un explosivo se alcanza cuando el balance de oxígeno es perfecto, debido a la dificultad de alcanzar este valor es preferible trabajar con un balance negativo (déficit de oxígeno), pues es más seguro y se aprovecha mejor la energía de la detonación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

La Figura 31 presenta una foto de un disparo en superficie donde hubo un exceso de oxígeno en el balance, pues los gases generados son de color naranja. En el caso de realizar un balance negativo, la reacción genera gases de color gris oscuro.



Figura 31. Gases nitrosos generados durante una tronadura en superficie.

(International Mining, 2018)

3.3.4 Tipos de explosivos industriales

En la minería se utilizan diferentes explosivos que permiten implementar la operación de tronadura de la mejor forma posible (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Agentes explosivos secos

Todos aquellos agentes explosivos que no contienen agua en su composición. La Figura 32 ilustra aquellos fabricados con nitrato de amonio, siendo el ANFO el más importante.

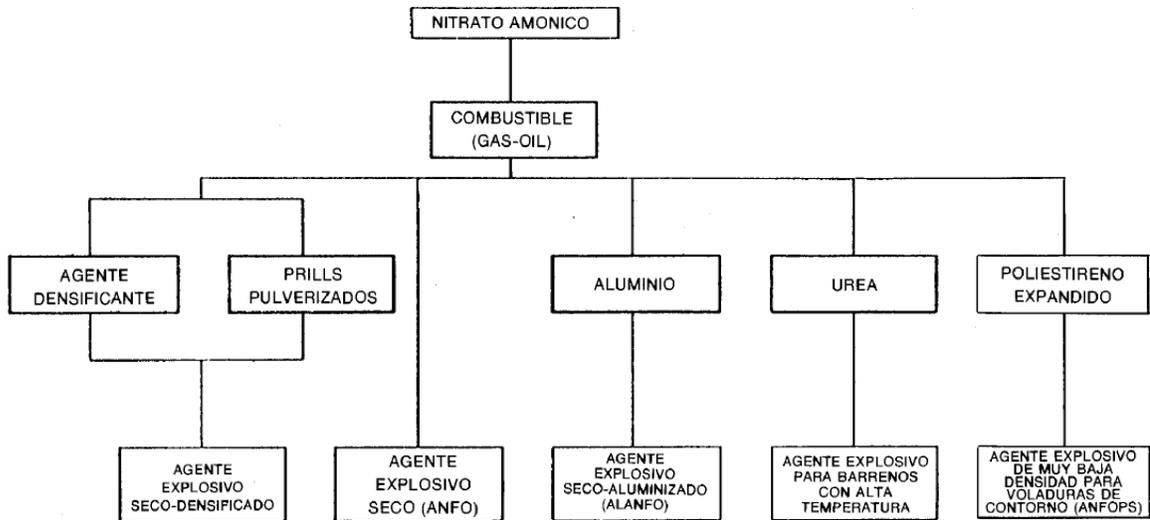


Figura 32. Agentes explosivos secos.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

El nitrato de amonio es una sal inorgánica de color blanco, fabricada como partículas esféricas o prills porosos, presentados en la Figura 33.

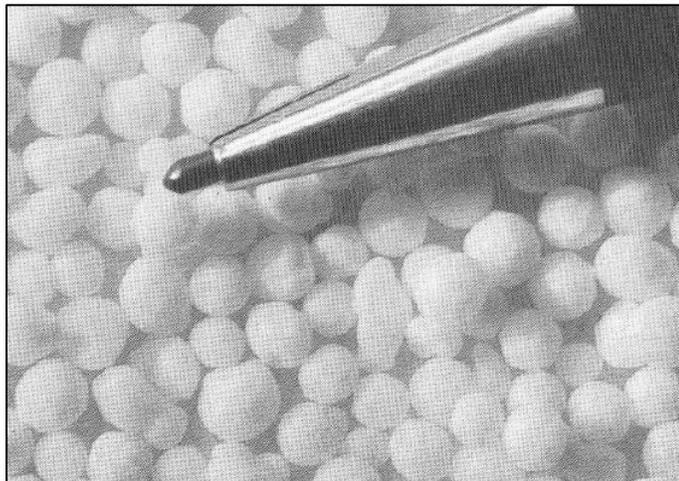


Figura 33. Prills de nitrato de amonio.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Por sí solo, este producto no se considera explosivo, por lo que es necesario mezclarlo con un combustible para obtener un agente explosivo. Los prills permiten una mejor absorción y retención del combustible, facilitando el manejo y el carguío del explosivo (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a.1) ANFO

Es un agente explosivo seco compuesto por una base de prills de nitrato de amonio mezclada con un combustible, normalmente petróleo diésel, siendo actualmente el producto más utilizado en el mercado para realizar tronaduras en minería subterránea y a cielo abierto. (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

Esta sustancia es altamente susceptible a la presencia de agua, perdiendo gran parte de sus características al encontrarse en un ambiente acuoso. La Figura 34 muestra cómo la velocidad de detonación de una columna de ANFO se ve afectada por la cantidad de agua presente en un tiro.

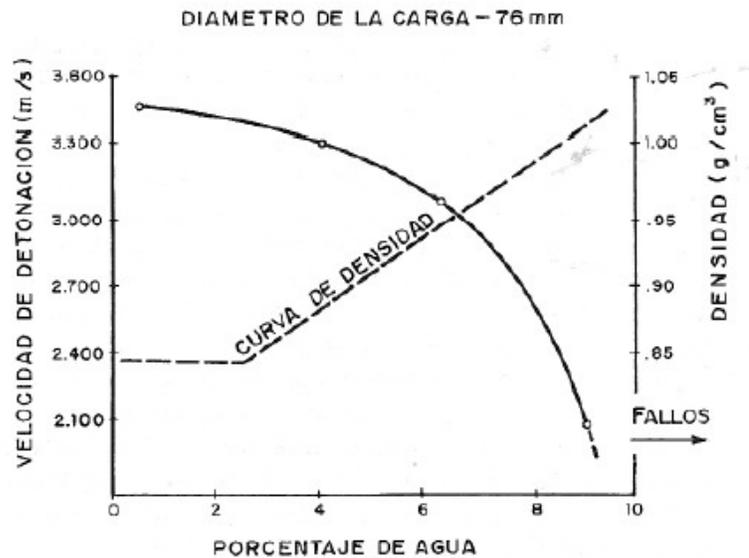


Figura 34. Influencia del agua en la VOD del ANFO.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Las características explosivas del ANFO varían con la densidad obtenida. Al ser fabricado con prills, no permite variar libremente la densidad final obtenida para adecuarse a los requerimientos energéticos en terreno, volviéndose altamente insensible fuera de valores entre 0,8 y 1,2 g/cm³ (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Para enfrentar ese déficit de energía, es posible agregar diferentes aditivos a la composición inicial del ANFO, tales como aluminio para formar ANFO aluminizado o ALANFO, y nitrato de sodio para fabricar SANFO, donde la cantidad agregada debe ser cuidadosamente calculada para no generar explosiones no controladas.

La Figura 35 muestra variaciones de dichos productos, junto con los porcentajes necesarios para su fabricación.

ANFO		AN + FO			
	%	94,5 - 5,5			
ANFO		AN	+	FO	+
Aluminizado	%	93 - 86		5 - 2	2 - 12
ANFO		ANFO	+	RELLENO	
Liviano	%	80 - 60		20 - 40	
SANFO		AN + FO	+	SN + C	
	%	94,5 - 5,5		85 - 15	
SANFO		AN + FO	+	SN + C	+
Aluminizado	%	94,5 - 5,5		85 - 15	2 - 8

Figura 35. Composición del ANFO y sus derivados.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

La Tabla 5 entrega valores encontrados en el mercado para las características técnicas del ANFO en saco y a granel.

Tabla 5. Características técnicas del ANFO.

Ítem	Unidad	ANFO	
		en saco	a granel
Densidad	g/cm ³	0,77 - 0,83	0,77
Velocidad de detonación	m/s	3.600 - 4.700	3.800 - 4.100
Presión de detonación	kbar	28 - 45	30
Energía	kJ/kg	3.700 - 5.300	3.800
Volumen de gases	L/kg	890 - 1.050	1.050
Potencia relativa al ANFO	en peso	0,98 - 1,31	1
Diámetro crítico	pulgadas	1 - 2 1/2	2 1/2
Resistencia al agua	-	nula	nula

(Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016)

b) Agentes explosivos acuosos

Consisten en todas aquellas sustancias explosiva donde, además del nitrato de amonio y un combustible, se utilizan sensibilizantes y agentes espesantes que forman una solución líquida, evitándose la segregación de los productos sólidos (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994). La Figura 36 presenta los agentes más conocidos.

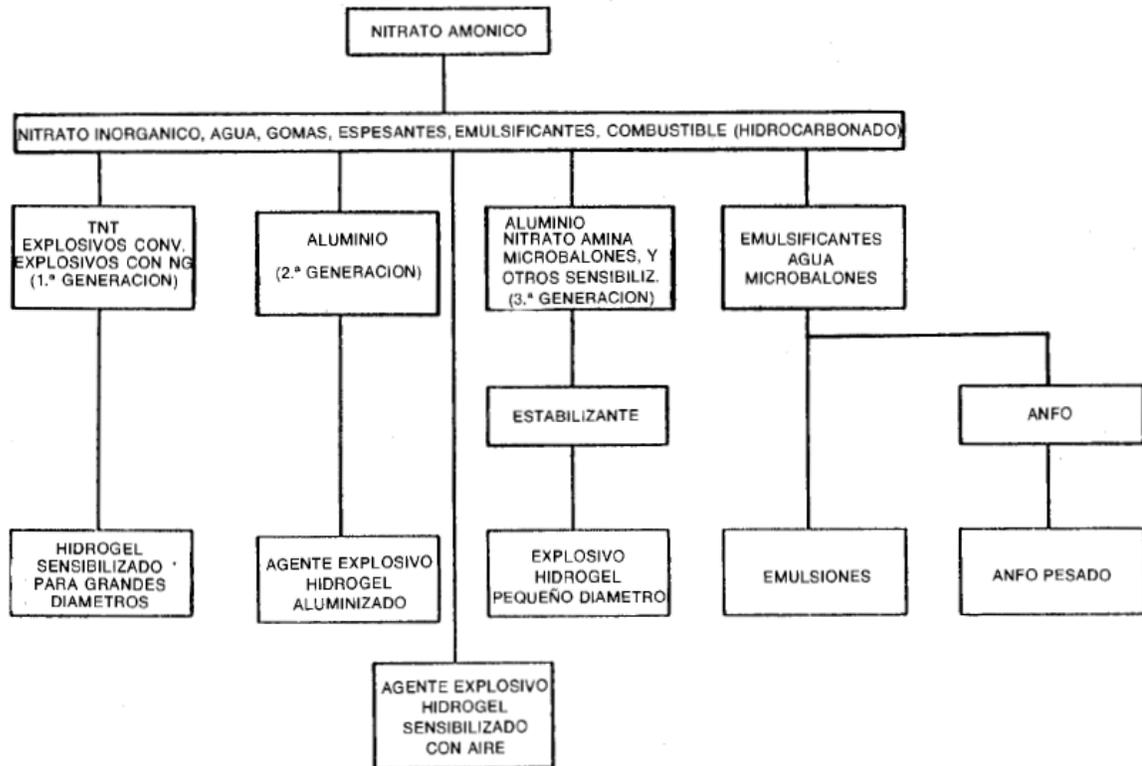


Figura 36. Agentes explosivos acuosos.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Los agentes explosivos acuosos obtenidos a partir de nitrato de amonio pueden clasificarse en los dos grupos más importantes:

- Hidrogeles o acuageles.
- Emulsiones explosivas.

Todos estos productos entregan mayor flexibilidad a la operación, pues permiten el carguío mecanizado y presentan mayor estabilidad en presencia de agua (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

b.1) Hidrogeles

También llamados acuageles, consisten en agentes explosivos cuya composición es similar a la de una gelatina. Se fabrican mezclando oxidantes (agua, nitrato de amonio y nitrato sódico), nitrato de monometilamina, espesantes y gelatinizantes, los que permiten obtener una sustancia con características especiales (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Excelente resistencia al agua.
- Alta viscosidad.
- Alta densidad.
- Balance de oxígeno muy negativo.
- Poco sensible a choques y roces.

Presentan una alta seguridad de manipulación y una buena aptitud para detonar, lo que los hace especialmente recomendados para tiros de diámetro pequeño (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Debido a su alta densidad, tiene la capacidad de liberar grandes cantidades de energía de forma controlada, la cual puede ser modificada agregando aditivos sólidos tales como aluminio, almidón y gomas. Por esta razón, su aplicación principal es en tronaduras de contorno y control de taludes (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

La Tabla 6 entrega valores encontrados en el mercado para las características técnicas de los hidrogeles explosivos.

Tabla 6. Características técnicas del hidrogel.

Ítem	Unidad	Hidrogel
Densidad	g/cm ³	0,5 – 0,9
Velocidad de detonación	m/s	2.500 – 3.400
Presión de detonación	kbar	7,8 - 26
Energía	kJ/kg	2.900 – 3.030
Volumen de gases	L/kg	1.000 – 1.035
Potencia relativa al ANFO	en peso	0,82
Diámetro crítico	pulgadas	6
Resistencia al agua	-	buena

(Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016)

b.2) Emulsiones

Similar a los hidrogeles, es un agente explosivo acuoso resistente al agua, con buen poder rompedor y de manipulación segura. Para su fabricación se utilizan diversos compuestos, detallados a continuación (Enaex S.A., Manual descriptivo del equipo UBT, 2005).

- **Fase aceitosa o continua:** Fluido combustible, normalmente petróleo o parafina.
- **Fase acuosa o discontinua:** Solución saturada de nitratos orgánicos, suspendida en forma de gotas microscópicas, dentro de la fase continua. Son 100 veces más pequeñas que los prills, pero mucho más potentes.
- **Fase gaseosa y/o sólida dispersa:** Pequeñas burbujas de aire o de vidrio, polvo de aluminio y microsferas de plástico o resinas que, al ser comprimidas adiabáticamente, producen el fenómeno de “puntos calientes” que favorecen tanto la iniciación como la propagación de la detonación. Su función principal es la de controlar la sensibilidad y la densidad del explosivo.
- **Agentes emulsificantes:** Aditivos que permiten que la mezcla se comporte como un fluido aceitoso o emulsión.

El esquema de preparación de las emulsiones, tanto encartuchadas como a granel, se representa en la Figura 37.

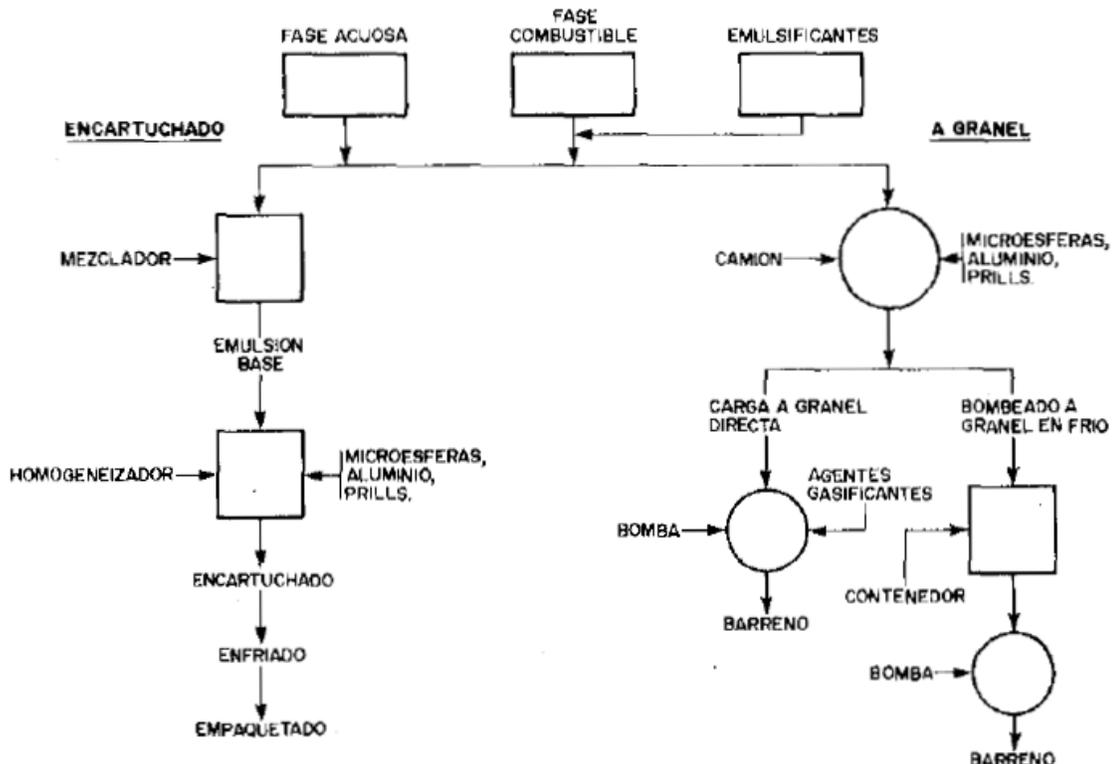


Figura 37. Fabricación de emulsión explosiva.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

El método de fabricación consiste en diferentes etapas que determinarán las características del explosivo. En primer lugar, se calientan los componentes principales para obtener una emulsión base, para luego agregar los aditivos (aluminio en polvo, agentes gasificantes reductores de densidad, gránulos de nitrato de amonio, etc.) que permiten ajustar la densidad y la potencia (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Finalmente, se obtiene un producto final que posee numerosas ventajas en comparación a los demás agentes explosivos (Budin, 2009).

- Excelente resistencia al agua debido a su composición basada en aceites.
- Posibilidad de conseguir productos con densidad variable, gracias a su método de fabricación.
- Elevadas velocidades de detonación, con poco efecto del diámetro de encartuchado.
- Gran seguridad de fabricación y manipulación, pues sus ingredientes no son considerados explosivos por separado.
- Posibilidad de mecanizar la carga al ser un fluido fácil de fabricar y transportar.
- Posibilidad de preparar mezclas con ANFO dada la naturaleza de su fabricación.
- Bajas emisiones de gases de tronadura, debido principalmente al control empleado en el balance de oxígeno durante la fabricación.

La Tabla 7 entrega valores encontrados en el mercado para las características técnicas de las emulsiones explosivas encartuchadas y bombeables.

Tabla 7. Características técnicas de las emulsiones.

Ítem	Unidad	Emulsión	
		encartuchada	bombeable
Densidad	g/cm ³	1,15 – 1,28	1,05 – 1,15
Velocidad de detonación	m/s	4.600 – 5.300	3.600 – 5.000
Presión de detonación	kbar	61 - 90	42 - 60
Energía	kJ/kg	3.800 – 4.200	2.800
Volumen de gases	L/kg	920 – 1.000	1.040
Potencia relativa al ANFO	en peso	0,79 – 1,07	0,78
Diámetro crítico	pulgadas	1	1 1/2
Resistencia al agua	-	buena	buena

(Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016)

La emulsión bombeable presenta numerosas ventajas por sobre el explosivo encartuchado, detalladas a continuación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Aprovechamiento del volumen perforado al conseguir que el explosivo ocupe todo el tiro, estando en contacto directo con la roca.
- Posibilidad de aumentar la densidad del explosivo adaptándose a las condiciones del terreno. Además, permite generar cargas selectivas variando la densidad y la energía liberada a lo largo del tiro.
- Utilización de explosivos encartuchados, mucho más costosos, se ve disminuida.
- Significativa reducción de los tiempos de carguío, junto con una disminución de la mano de obra necesaria.
- Mejor control en el manejo y monitoreo del explosivo y la operación de carguío.

La empresa Enaex utiliza los equipos UBT (Unidad de Bombeo en Túneles) para el carguío de la emulsión bombeable. Dichos equipos están diseñados para bombear el explosivo en perforaciones horizontales a través de mangueras, y cuentan con tres estanques principales (Enaex S.A., Manual descriptivo del equipo UBT, 2005).

- El primero consiste en un contenedor de 1.500 kg de capacidad para almacenar emulsión base, también llamada matriz UG-06.
- El segundo, de 80 L de capacidad, almacena el modificador de pH denominado N-17.
- El tercero, también de 80 L, contiene la solución reactante L-9.

Además, el equipo cuenta con un sistema de inyección de agua que permite reducir la presión de bombeo a un nivel tolerable, evitando problemas indeseados al momento del carguío. La Figura 38 muestra una foto de los equipos UBT pertenecientes a la empresa, los cuales permiten transportar, almacenar y transferir una sustancia inerte de alta estabilidad sin riesgo de explosión.



Figura 38. Equipo UBT de carguío mecanizado.

(Enaex S.A., Emultex PDBG, 2018)

La fabricación de la emulsión bombeable consiste en iniciar una reacción química entre la matriz y la solución de L-9 que se adiciona al momento del bombeo. Esta interacción genera nitrógeno gaseoso que queda incorporado en forma de pequeñas burbujas al explosivo, las que definen el grado de sensibilidad.

La velocidad de la reacción depende fundamentalmente de dos factores: temperatura y pH. Normalmente esta velocidad disminuirá cuando baje la temperatura, mientras que aumentará cuando decrezca el pH. Así, la solución de N-17 se adiciona a la mezcla dependiendo de las condiciones de temperatura para permitir alcanzar la reacción en el tiempo deseado.

La Figura 39 ilustra cómo evoluciona la densidad del explosivo a medida que pasa el tiempo, considerando una temperatura constante de 20°C. Por esta razón, es necesario que los operadores evalúen las condiciones en terreno para lograr alcanzar la densidad necesaria al momento de realizar la tronadura.

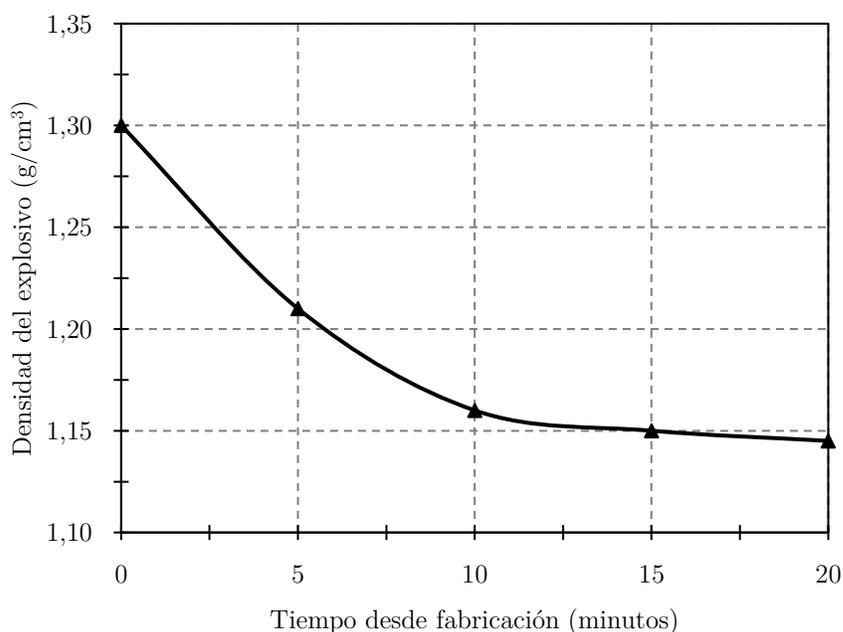


Figura 39. Curva de gasificación de la emulsión bombeable.

(Enaex S.A., Manual descriptivo del equipo UBT, 2005)

El producto final corresponde a emulsiones sensibilizadas mediante un proceso de gasificación in-situ que permite obtener el explosivo en no más de 15 minutos después de inyectada la sustancia dentro de un tiro.

b.3) ANFO pesado

Consiste en una mezcla de emulsión base con ANFO, permitiendo aprovechar ciertas ventajas de ambos explosivos (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Mayor energía.
- Mejores características de sensibilidad.
- Mayor resistencia al agua, comparado con el ANFO.
- Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del tiro.

Su fabricación es sencilla, permitiendo que los prills generen los puntos calientes necesarios para que la emulsión explosiva funcione correctamente. Además, es posible variar la densidad del producto obtenido, adecuándose a las características requeridas en terreno.

Su principal desventaja es que es altamente insensible, presentando un diámetro crítico demasiado alto para permitir su uso en labores subterráneas tales como construcción de túneles y galerías (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

La Tabla 8 entrega valores encontrados en el mercado para las características técnicas del ANFO pesado vaciable y bombeable.

Tabla 8. Características técnicas del ANFO pesado.

Ítem	Unidad	ANFO pesado	
		vaciable	bombeable
Densidad	g/cm ³	0,9 – 1,32	1 – 1,33
Velocidad de detonación	m/s	3.500 – 4.900	3.000 – 5.400
Presión de detonación	kbar	35 - 65	38 - 80
Energía	kJ/kg	3.100 – 3.700	2.900 – 3.600
Volumen de gases	L/kg	1.050 – 1.100	950 – 1.120
Potencia relativa al ANFO	en peso	0,86 – 0,98	0,81 – 0,96
Diámetro crítico	pulgadas	3 - 5 1/2	4 1/2 - 5 1/2
Resistencia al agua	-	nula / baja	buena

(Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016)

c) Explosivos gelatinosos

Corresponden a sustancias explosivas a base de nitroglicerinas y nitrocelulosas, mezcladas con oxidantes como el nitrato de amonio, combustibles y demás aditivos que permiten generar un gel de gran poder detonante (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Sus principales ventajas son:

- Potencias elevadas, mucho mayores a las que poseen los agentes explosivos.
- Altas densidades, entre 1,2 y 1,5 g/cm³.
- Velocidades de detonación muy elevadas, entre 5.000 y 6.000 m/s.
- Gran resistencia al agua y estabilidad química.

Sin embargo, presentan variadas desventajas:

- Al estar compuestos de sustancias explosivas propiamente tales, son altamente peligrosos al momento de fabricar y transportar.
- Son muy sensibles a choques, roces y llamas, por lo que deben ser manejados con extrema precaución.
- Son poco flexibles ante cambios bruscos en las condiciones atmosféricas.

Los principales explosivos gelatinosos comercializados son las dinamitas, utilizadas en la operación de tronadura como iniciadores. La Figura 40 muestra una fotografía donde se ven cartuchos de dinamita.



Figura 40. Cartuchos de dinamita.

(Enaex S.A., Permicarb, 2017)

3.3.5 Criterios de selección

En las operaciones mineras suelen cometerse errores al momento de seleccionar un explosivo, sin tomar en cuenta el impacto real de este producto en el desempeño de la operación y los costos asociados (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

a) Precio

El precio de un explosivo tiene influencia directa en la decisión final que toman las empresas al momento de adquirir el producto. Es sabido que la calidad de un bien normalmente crece junto a su valor económico; sin embargo, para obtener buenos resultados no siempre es necesario utilizar el explosivo de mayor precio.

Seleccionar un producto basándose en el valor unitario de USD/kg puede llevar a subestimar el costo real asociado a la tronadura. Se recomienda analizar cuánto cuesta por unidad de energía, normalmente USD/kJ, pues los resultados de una tronadura dependen de la energía destinada a fragmentar y desplazar la roca (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

Si bien el costo de la tronadura aumenta al pasar a explosivos de mejor calidad, el costo total de arrancar un determinado volumen de roca decrece. Esto ocurre principalmente porque la etapa de perforación disminuye considerablemente sus costos al diseñar utilizando un explosivo más energético. La Figura 41 ilustra cómo el costo total del arranque varía con el tipo de explosivo utilizado.

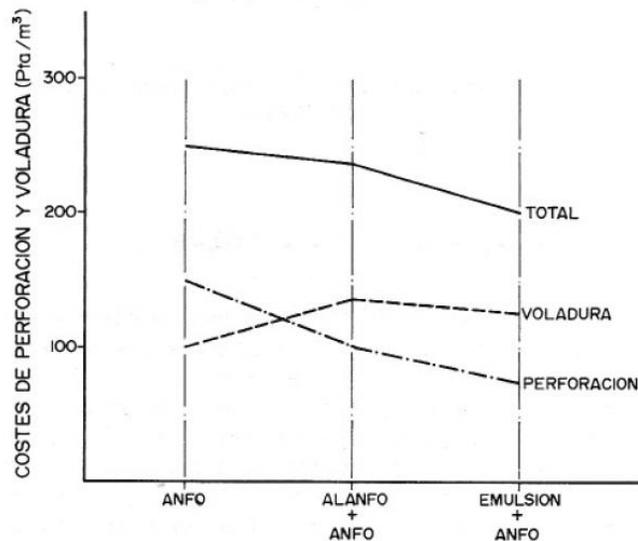


Figura 41. Costos de perforación y tronadura en función del agente explosivo.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

b) Diámetro de carga

Considerando los productos disponibles en el mercado actual, para perforaciones pequeñas es recomendable utilizar hidrogeles y emulsiones, pues entregan la energía necesaria. La Figura 42 muestra cómo la VOD del ANFO disminuye drásticamente al bajar de los 50 mm de diámetro.

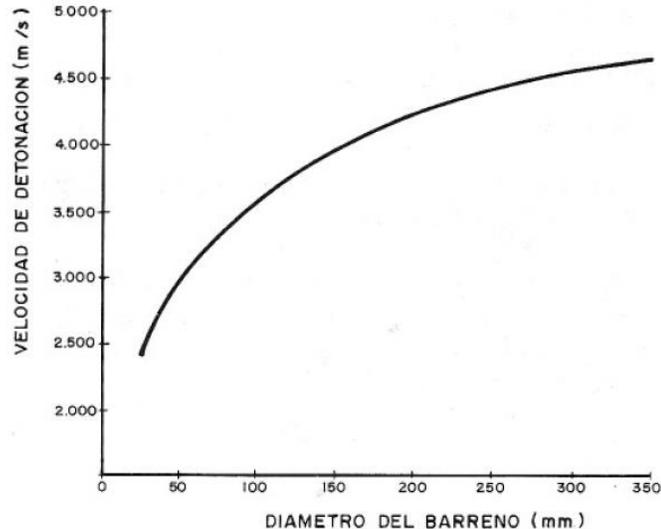


Figura 42. Influencia del diámetro en la VOD del ANFO.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

Debido al tiempo empleado en cargar los tiros de diferente diámetro, es recomendable utilizar equipos cargadores de explosivos pues entregan mayor flexibilidad operacional (Budin, 2009).

c) Características de la roca

El macizo rocoso afecta directamente en la selección del explosivo, pues sus características determinarán los criterios de diseño y la energía necesaria para el arranque. Las consideraciones necesarias son (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994):

- **Rocas masivas resistentes:** En este caso es necesario que el explosivo provoque nuevas fracturas para generar el arranque, por lo que se recomiendan explosivos de alta densidad y VOD, tales como las emulsiones y los explosivos gelatinosos.
- **Rocas muy fracturadas:** En este caso lo importante es que se expandan los gases, aprovechando las fracturas existentes. Así, explosivos como el ANFO son más recomendables para el arranque de la roca.
- **Rocas conformadas en bloques:** En macizos conformados por grandes bloques ubicados dentro de matrices plásticas se recomienda buscar un equilibrio entre la energía rompedora del explosivo y el efecto de los gases, por lo que normalmente se utilizan el ALANFO y el ANFO pesado.
- **Rocas porosas:** En este tipo de rocas se produce gran amortiguación de la energía liberada, por lo que el arranque es producido principalmente por la expansión de los gases. En este caso es recomendable utilizar ANFO, debido a su baja densidad y VOD.

La Figura 43 muestra un criterio empírico utilizado para seleccionar el explosivo más adecuado, considerando la resistencia a la compresión de la roca y el espaciamiento entre las fracturas existentes.

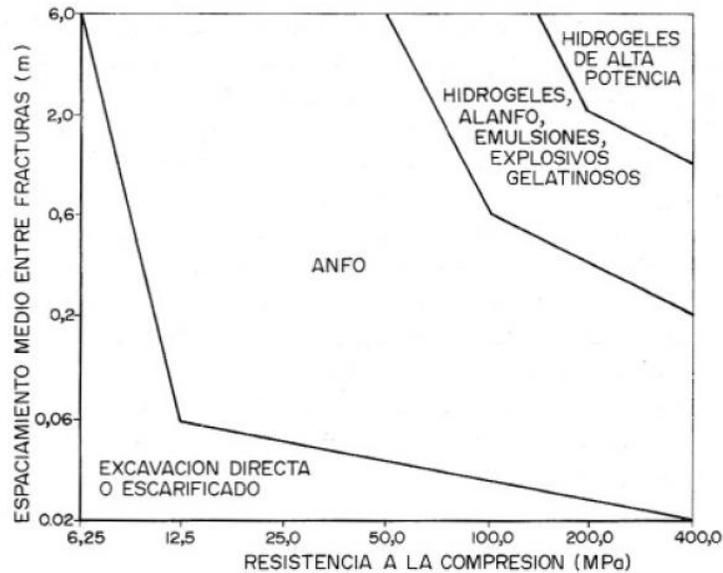


Figura 43. Selección del explosivo en función de la calidad de la roca.

(Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994)

d) Volumen de roca a volar

El volumen de roca a remover y el ritmo de trabajo asociado definen la cantidad de explosivo a utilizar. Así, en trabajos de gran envergadura es recomendable utilizar explosivos a granel o bombeables, pues el carguío es más rápido, se disminuyen los costos de mano de obra, y se aprovecha mejor el volumen perforado (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

e) Condiciones atmosféricas

En condiciones de bajas temperaturas (-20°C) se debe tener precaución al utilizar explosivos acuosos, pues tienden a disminuir su sensibilidad. Por otro lado, al trabajar a altas temperaturas el combustible utilizado para fabricar ANFO debe ser monitoreado para evitar su evaporación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

f) Problemas de entorno

Las dos perturbaciones de mayor impacto a tener en cuenta al realizar una tronadura son las vibraciones producidas y la onda aérea generada. Así, se recomienda utilizar explosivos a granel o bombeables, pues al ser de densidad y composición variable entregar mayor flexibilidad al diseño y mejor control de la operación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

g) Presencia de agua

Los explosivos acuosos tienden a resistir mucho mejor la presencia de agua, especialmente las emulsiones e hidrogeles, capaces de mantener sus propiedades en presencia de agua por más de 12 horas. Por otro lado, para utilizar ANFO es necesario proceder de la siguiente forma (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

- Si la presencia de agua es pequeña, se debe utilizar ANFO en saco con una densidad cercana a los 1,1 g/cm³, evitando que la envoltura se rompa e ingrese el agua.
- Si la cantidad de agua es superior y no permite realizar el procedimiento anterior, se debe bombear el agua fuera del tiro antes de ingresar el explosivo, siempre cubierto de un saco impermeable.
- Cuando la cantidad de agua es demasiada como para ser bombeada no es posible utilizar ANFO, siendo los agentes acuosos la única opción viable.

h) Gases tóxicos

Los gases tóxicos generados en la tronadura producto de un balance de oxígeno inadecuado deben ser considerados al momento de seleccionar un explosivo, pues a pesar del cuidado con el que se fabriquen siempre existirá un déficit o un exceso oxígeno (Enaex S.A., Manual de Tronadura).

La utilización de ANFO, envolturas plásticas y diámetros de carga inadecuados facilitan la generación de gases tóxicos, por lo que se recomienda utilizar explosivos bombeables o a granel que permitan un mayor control en la fabricación (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

i) Condiciones de seguridad

El transporte y manejo de explosivos debe ser lo más seguro posible, por lo que se recomienda utilizar aquellos que resistan golpes, roces y estímulos subsónicos. Debido a que sus componentes no son intrínsecamente explosivos y, además, son altamente insensibles, se recomienda utilizar agentes explosivos acuosos, principalmente hidrogeles y emulsiones (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

j) Atmósferas explosivas

Si se trabaja en ambientes donde existe gran cantidad de polvos o gases inflamables es necesario utilizar inhibidores y/o explosivos de seguridad, evitando explosiones secundarias en la atmósfera (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

k) Problemas de suministro

Finalmente, se debe tener en cuenta la posibilidad de suministrar el explosivo al lugar de trabajo. Así, la ubicación del polvorín, las distancias a recorrer y los métodos de transporte definirán si el explosivo se carga de forma manual o mecanizada, el tiempo de almacenamiento permitido y las condiciones atmosféricas existentes, tales como humedad y temperatura (Pernia Llera, López Jimeno, López Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1994).

4 Resultados

4.1 Antecedentes de la operación

Los diagramas de disparo utilizados para la construcción de los túneles y galerías se asemejan al presentado en la Figura 44.

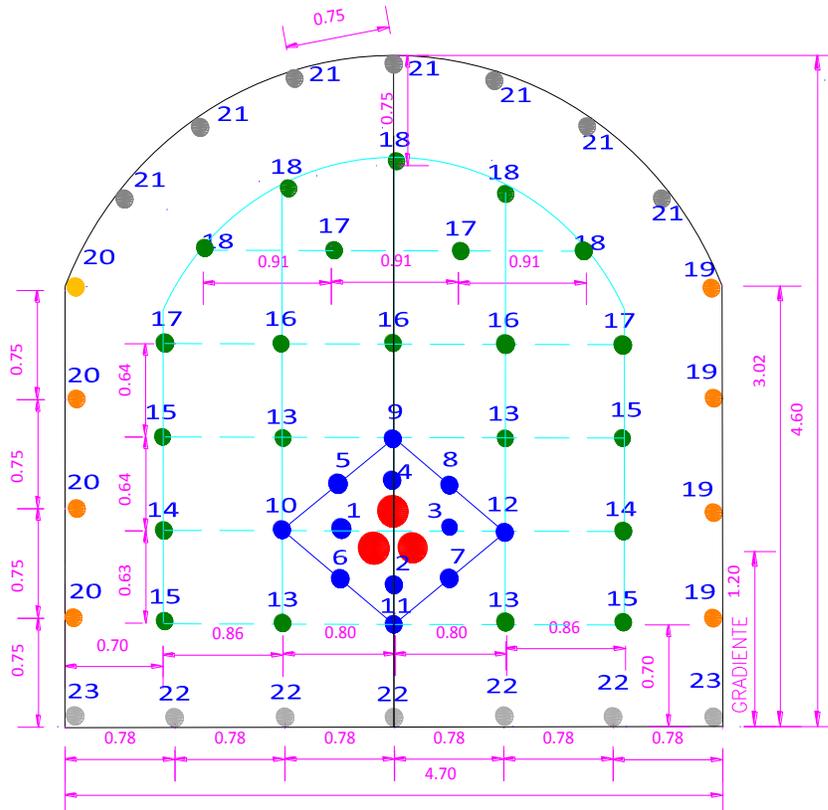


Figura 44. Diagrama de disparo para desarrollo horizontal del PMCHS.

Independiente de las dimensiones de la excavación, todos los diseños poseen:

- Rainura de tres cuadrantes en el centro del frente, a una altura de 1,2 m del piso.
- Tres tiros huecos de 102 mm de diámetro ubicados en forma de triángulo.
- Tiros cargados de 48 mm de diámetro.
- Largo de perforación de 3,9 m de largo, tanto para los tiros huecos como para los tiros cargados.
- Supuesto de un 95% de avance por disparo.

La secuencia de salida siempre es la misma: rainura, tiros auxiliares, cajas, corona, y finalmente la zapatera. Además, el número de tiros perforados se adapta a la calidad del macizo rocoso. Los resultados recolectados para esta investigación fueron clasificados según el método de la Q de Barton, donde se tiene roca tipo II, III y IV; es decir, roca cuya calidad va de regular a muy mala.

El número de tiros cargados utilizados por disparo aumenta a medida que crecen las dimensiones de la excavación y mejora la calidad del macizo rocoso, pues es necesaria una mayor cantidad de explosivo para remover la roca.

Los explosivos escogidos para cada tronadura varían dependiendo de si se carga con explosivo bombeable o encartuchado. La Figura 45 ilustra la distribución de los diferentes productos al utilizar un sistema de carguío mecanizado en la rainura.

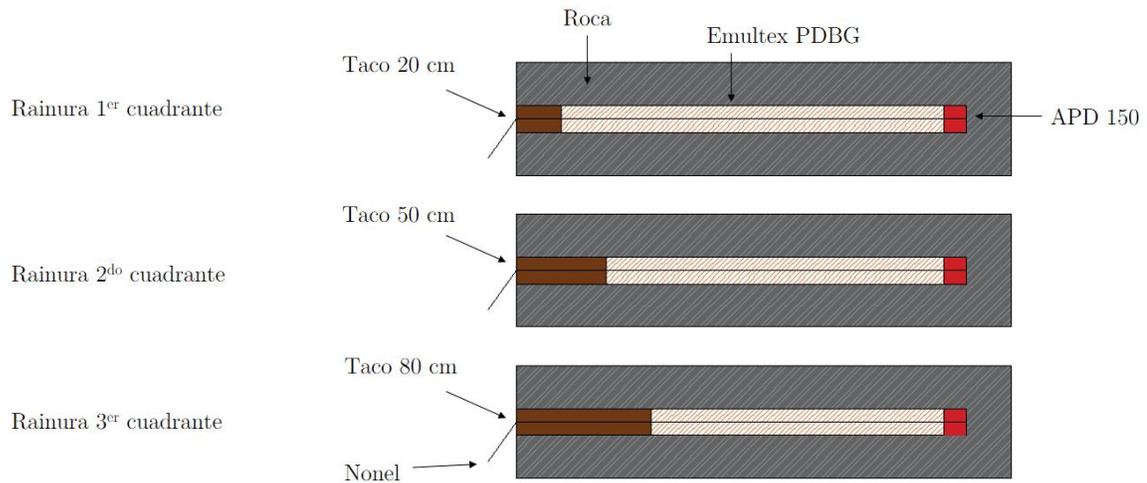


Figura 45. Carguío de rainura con Emultex PDBG.

La carga de columna consiste en emulsión bombeable Emultex PDBG, mientras que como carga de fondo se utilizan iniciadores APD-150. Los tacos son fabricados con greda y su longitud varía entre 20 y 80 cm a medida que se pasa de un cuadrante al siguiente.

De forma similar, la Figura 46 ilustra el carguío de las demás perforaciones. Tanto la carga de columna como de fondo se mantienen constantes; sin embargo, en cajas y coronas el explosivo principal se cambia al Softron, cuyo iniciador es la dinamita Tronex Plus. Este cambio se debe a que este explosivo es de menor potencia, lo que permite obtener un contorno más parejo y preciso.

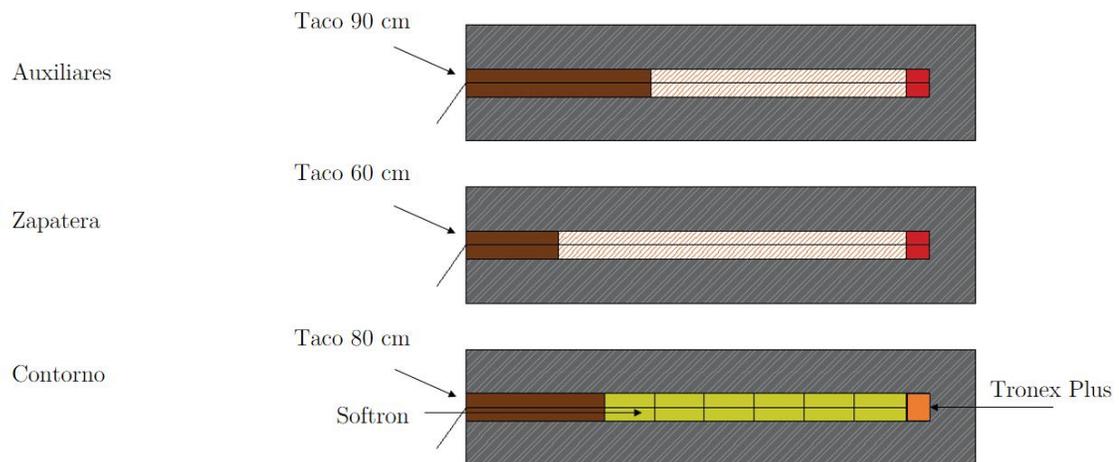


Figura 46. Carguío de tiros con Emultex PDBG y Softron.

Nuevamente, los tacos son de greda y su longitud varía entre 60 y 100 cm dependiendo de si los tiros se ubican en el contorno o en el centro de la excavación.

En caso de cargar los tiros con emulsión encartuchada la configuración es básicamente similar, pero se reemplaza el Emultex PDBG por las cargas de Emultex CN y el APD se cambia por Tronex Plus.

La cantidad de cartuchos cargados por tiro corresponde a 5 si se utiliza Emultex CN y 6 si se trata de Softron. Además, siempre se carga un solo iniciador por tiro, independiente de las condiciones presentes al momento de realizar la operación.

En todas las tronaduras se utiliza el mismo sistema de iniciación.

- Un detonador no eléctrico de 4,8 m de largo por tiro cargado.
- Cordón detonante de 5 g/m con una longitud de 80 m.
- Dos mechas ensambladas de 3 m de largo por cada disparo, activadas con un sistema de iniciación electrónico Davey Tronic.

La Tabla 9 presenta las características principales de los explosivos empleados como carga de columna.

Tabla 9. Características de los explosivos utilizados como carga de columna.

Ítem	Unidad	Emultex CN*	Emultex PDBG**	Softron
Densidad	g/cm ³	1,15	1,05 – 1,15	1,19
VOD	m/s	4.600	3.600 – 4.000	3.000
Pd	kbar	61	42	33
Energía	kJ/kg	3.940	2.877	4.480
Res. Agua	-	excelente	buena	12 horas
Vol. Gases	L/kg	930	1.044	968
PRP (ANFO)	-	1,01	0,79	1,13
Duración	meses	6	-	24
Tamaño	pulgadas	1 ½ x 24	1 ½	1 1/16 x 20
Peso	g	806,5	-	141

* CN: Cartridged Normal Energy

** PDBG: Pequeño Diámetro Bombeada Gasificada

(Enaex S.A., Emulsiones Envasadas y a Granel)

De forma similar, la Tabla 10 presenta las características de los iniciadores utilizados.

Tabla 10. Características de los explosivos utilizados como carga de fondo.

Ítem	Unidad	Tronex Plus	APD-150
Densidad	g/cm ³	1,18	1,62
VOD	m/s	4.500	7.200
Pd	kbar	77	216
Energía	kJ/kg	4.908	5.598
Res. Agua	-	12 horas	excelente
Vol. gases	L/kg	942	692
PRP (ANFO)	-	1,22	1,5
Duración	meses	24	60
Tamaño	pulgadas	1 1/4 x 8	1 1/2 x 4 3/4
Peso	g	185	150

(Enaex S.A., Guía del Explosivista, 2016)

Según la información estudiada la hipótesis de esta investigación es que el Emultex PDBG debería ser capaz de avanzar más por disparo, provocar menos daños, generar menos gases tóxicos y entregar mayor flexibilidad a la operación.

Con el fin de conocer el desempeño de las tronaduras en el desarrollo horizontal se obtuvieron datos en terreno, definiendo cinco variables principales que permitieran cuantificar los efectos de las emulsiones.

- Avance obtenido por disparo.
- Tiempo de carguío necesario para cada explosivo.
- Sobre-excavación generada en las paredes de la excavación.
- Tiempo de ventilación requerido para evacuar los gases tóxicos.
- Vibraciones producidas y el daño generado en la excavación y las obras más cercanas.

En cada caso se busca comparar los valores obtenidos y, de ser posible, determinar qué tipo de emulsión se adapta mejor a las condiciones presentes en la mina. Además, se realizó una evaluación económica donde se comparan los costos de construcción de un túnel al seleccionar los agentes explosivos estudiados.

4.2 Avance por disparo

El avance corresponde a la distancia en la que un túnel o galería aumenta su longitud luego de una tronadura. Principalmente se define por criterios de diseño tales como configuración de la rainura, longitud de perforación, tipo de taco empleado y secuencia de disparo. También se ve afectada por el comportamiento del explosivo seleccionado al momento de la tronadura, debido a que es este producto el que finalmente se encargará de remover la roca desde su posición inicial.

Para medir esta variable es necesario seguir el siguiente procedimiento.

- En primer lugar, una vez realizado el disparo y ventilados los gases tóxicos, los topógrafos deben acercarse al frente y marcar el nuevo punto donde termina el túnel recién extendido.
- El equipo de trabajo mide la distancia desde dicho punto hasta el punto final demarcado en el disparo anterior.
- Finalmente, esta medición es considerada como el avance obtenido por disparo, el cual es comparado con el largo de perforación utilizado para conocer así la eficiencia de la tronadura y si fue posible remover toda la longitud planificada.

Debido a que el frente presenta una superficie irregular, normalmente esta variable es medida tres veces en tres puntos diferentes de la labor, considerándose el promedio final como el avance real. La Figura 47 ejemplifica un plano donde se han ingresado los avances luego de cada disparo, de derecha a izquierda, comparando lo obtenido con el diseño original.

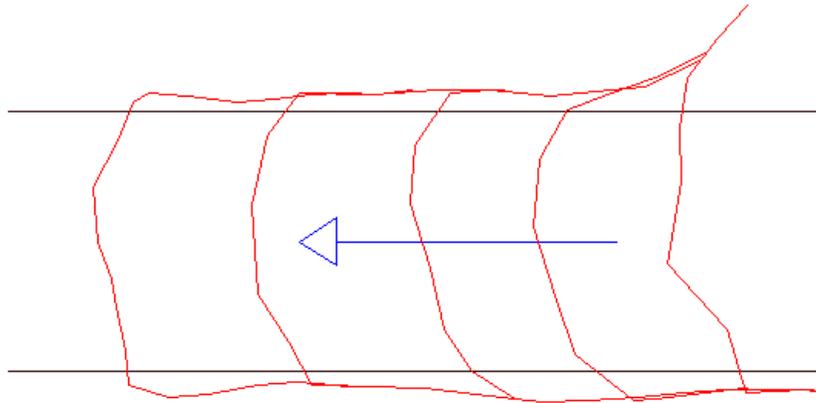


Figura 47. Comparación entre diseño y operación luego de tronadura.

La Tabla 11 resume el número de datos estudiados, clasificados por el explosivo empleado y la calidad del macizo rocoso.

Tabla 11. Número de datos recolectados para evaluación de avance por disparo.

Tipo de roca	Emultex PDBG	Emultex CN
II	101	75
III	155	145
IV	51	53
Total	307	273

En primer lugar, se presentan las distribuciones de los avances en la Figura 48, donde se puede observar que la emulsión bombeable Emultex PDBG presenta una menor variabilidad, pues los datos se encuentran más concentrados en un sector del gráfico. Además, el valor promedio asociado es de 3,70 m de avance por disparo, ligeramente superior a los 3,60 m de avance obtenidos con los cartuchos de Emultex CN.

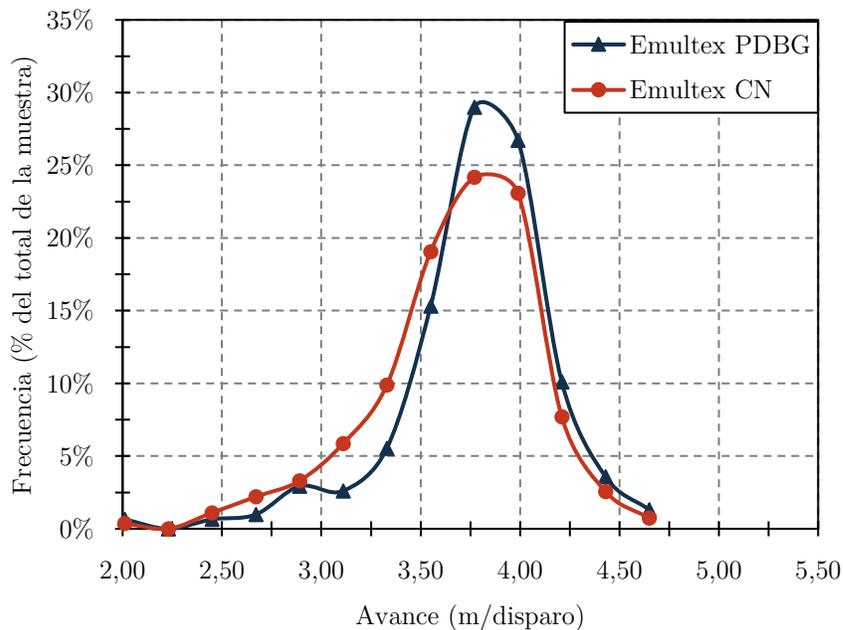


Figura 48. Distribuciones de avances por tipo de explosivo empleado.

Además, la Figura 49 ilustra cómo varía el avance promedio en los diferentes tipos de roca. A medida que la calidad del macizo rocoso disminuye, también lo hará el avance obtenido, independiente del explosivo escogido; sin embargo, la emulsión bombeable presenta un desempeño superior en todos los casos.

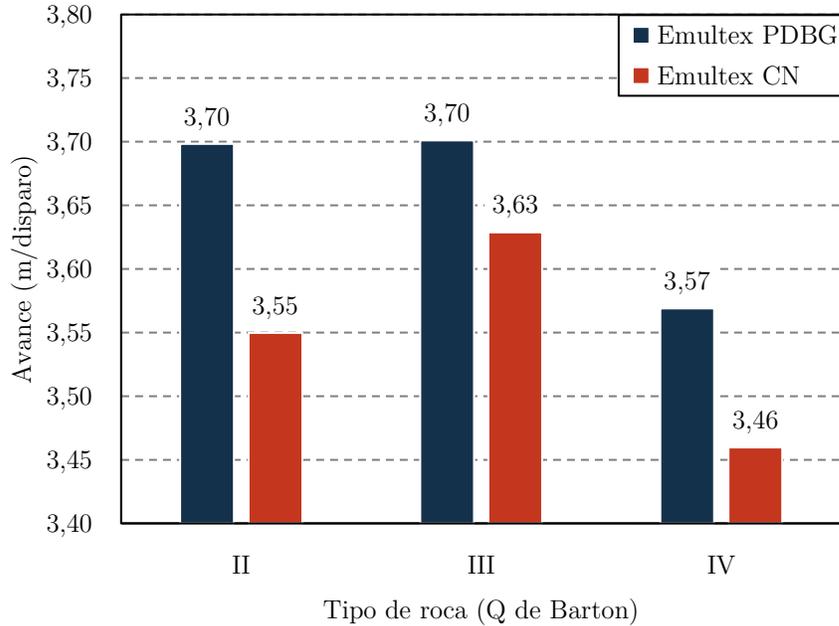


Figura 49. Avances promedio según la calidad del macizo rocoso.

Para comprender mejor el caso anterior, se presenta la Tabla 12 con los intervalos de confianza de las muestras considerando un nivel de significación $\alpha = 5\%$, donde es posible determinar que la media de los avances por disparo al utilizar Emultex PDBG siempre presentará una menor variabilidad y un mejor desempeño, en comparación con los datos asociados al Emultex CN. Esta tendencia se observa en todos los tipos de roca estudiados.

Tabla 12. Intervalos de confianza de las muestras de avances por disparo.

Tipo de Roca	Emultex PDBG (m/disparo)	Emultex CN (m/disparo)
II	3,62 – 3,77	3,46 – 3,64
III	3,64 – 3,77	3,56 – 3,69
IV	3,41 – 3,73	3,33 – 3,58
Total	3,63 – 3,73	3,53 – 3,62

Se realizó una prueba t de Student para evaluar si efectivamente las medias de ambas muestras poseen una diferencia significativa. Para comenzar, fue necesario comprobar que los datos se distribuyeran normalmente, por lo que se compararon con una distribución normal estándar y se calculó el coeficiente de determinación presentado en la Tabla 13.

Tabla 13. Coeficiente de determinación entre cada muestra y distribución normal estándar.

Explosivo	R² (coeficiente de determinación)
Emultex PDBG	0,8781
Emultex CN	0,9569

Es posible observar que ambos coeficientes indican que existe una estrecha relación entre cada muestra y una distribución normal estándar, comprobándose que los datos se distribuyen normalmente.

El siguiente paso consistió en realizar una prueba F con un nivel de significación $\alpha = 5\%$ para comprobar si las varianzas obtenidas de los avances por disparo son similares. La Tabla 14 resume los resultados, donde se tiene que las varianzas de ambos grupos pueden considerarse iguales con una probabilidad de 18,3% de cometer un error; es decir, se acierta con un 81,7% de probabilidad.

Tabla 14. Prueba F para varianzas de muestras de avances por disparo.

Ítem	Emultex PDBG	Emultex CN
Media	3,68	3,57
Varianza	0,19	0,17
Número de datos	307	273
Grados de libertad	306	272
P(F ≤ f) una cola	18,3%	

Luego de demostrar la normalidad de los datos y que las varianzas de ambas muestras son similares, se procede a completar la prueba t de Student con un nivel de significación $\alpha = 5\%$ considerando las características recién evaluadas. Las hipótesis por comprobar son:

- **Hipótesis nula:** La diferencia de las medias es igual a cero.
- **Hipótesis alternativa:** La diferencia de las medias es distinta de cero.

La Tabla 15 resume los resultados de la prueba, de donde se obtiene una probabilidad de 0,3% de cometer un error al rechazar la hipótesis nula. Este valor es menor a 2.5% (la mitad del nivel de significación) por lo que se considera que es apropiado optar por la hipótesis alternativa la cual afirma que la diferencia de las medias es distinta de cero.

Tabla 15. Prueba t de Student para avances suponiendo varianzas iguales.

Ítem	Emultex PDBG	Emultex CN
Media	3,68	3,57
Varianza	0,19	0,17
Número de datos	307	273
Grados de libertad	578	
P(T ≤ t) una cola	0,2%	
P(T ≤ t) dos colas	0,3%	

Gracias a la prueba t de Student llevada a cabo es posible afirmar que efectivamente las medias entre ambas muestras son diferentes, favoreciendo al avance por disparo levemente superior obtenido al utilizar Emultex PDBG.

Finalmente, se consideró el hecho de que el avance pudiera verse influenciado no por las características físicas y químicas del explosivo empleado, sino por la cantidad utilizada en cada disparo. Debido a esto, se graficaron los datos recolectados en función del factor de carga asociado y separados según el tipo de carguío seleccionado, como se ve en la Figura 50.

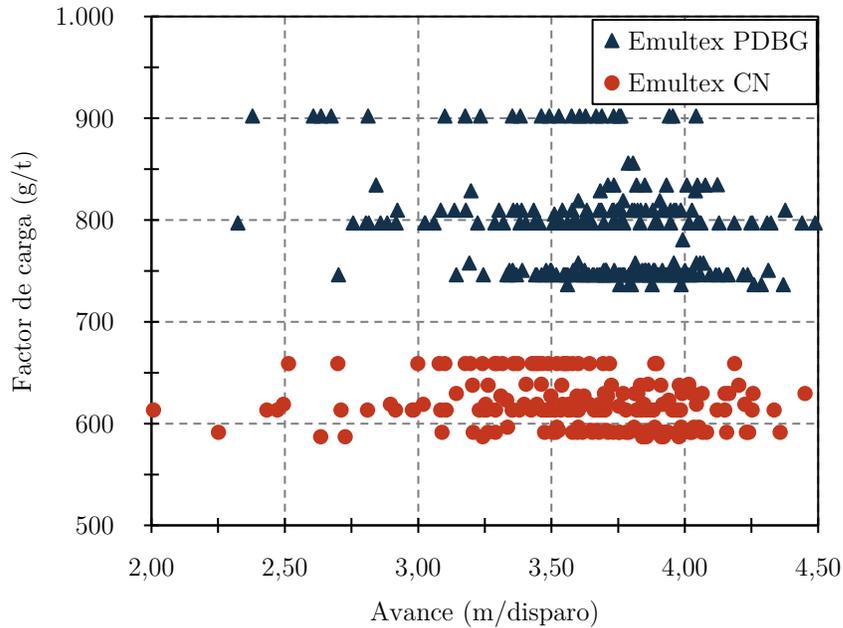


Figura 50. Avance obtenido en función del factor de carga.

Se puede comprobar que el Emultex PDBG presenta un mayor factor de carga, entre 750 y 900 g/t, mientras que para la emulsión encartuchada varía entre 580 y 670 g/t. Esta diferencia no asegura un mayor rendimiento al momento de la tronadura, pues se puede observar que en ambos casos el avance por disparo se encuentra entre los 3,0 y 3,9 m.

Es necesario destacar que este valor se obtuvo considerando todo el material empleado en un disparo; es decir, cargas de columna, cargas de fondo y sistema de iniciación. La masa total fue calculada como la suma de cada explosivo, ponderándola por su potencia relativa en peso. Así, se determina el factor de carga como el cociente entre los gramos de explosivo utilizado (en este caso como gramos de ANFO equivalente) y las toneladas de roca removida.

4.3 Tiempo de carguío

El tiempo de carguío de un explosivo corresponde al período que se requiere para completar dicha operación, considerando todas las actividades realizadas desde la llegada al frente hasta la liberación de este. Suele estudiarse en función del lapso empleado por tiro cargado, obteniéndose así un valor que puede ser utilizado para conocer cuánto tardará en cargarse un determinado sector simplemente conociendo el número total de perforaciones.

Existen dos métodos para medir el tiempo total, dependiendo del sistema de carguío seleccionado.

- Al utilizar emulsión bombeable, el equipo que transporta, mezcla y bombea el explosivo posee un reloj integrado que registra las horas de inicio y término de la operación.
- La emulsión encartuchada, por otro lado, no trabaja con sistemas mecanizados, siendo responsabilidad de los operadores y jefes de turno medir el tiempo de la operación con un cronómetro o, en su defecto, registrar las horas de inicio y término de la actividad.

La Figura 51 presenta el documento impreso obtenido luego de realizar el carguío mecanizado de la emulsión bombeable, donde se registra la cantidad de tiros cargados, el tiempo de carguío y la cantidad de explosivo bombeado.

```
ENAEX S.A.  
CLIENTE: ZUBLIN  
FAENA: TUNEL QUILLECO  
EQUIPO: UBT-101  
PRODUCTO: EMULSION PDBG  
OPERADOR: S. PEREZ  
FECHA: 4/ 5/20 5  
POSTURA: VENTANA 1  
DISPARO: 38  
IMPRESION: OFFLINE
```

PERF	KILOS	HORA	TIPO
1	7.0	4:41	N
2	7.0	4:42	N
3	1.5	4:43	M
4	7.0	4:43	Z
5	7.0	4:44	Z
6	7.0	4:45	Z

Figura 51. Resumen informativo impreso entregado por equipo UBT.

Para esta investigación fue posible obtener 583 mediciones del tiempo de carguío con emulsión bombeable y 238 mediciones para la emulsión encartuchada. Es necesario destacar que todos los datos recolectados solamente consideran la utilización del agente explosivo principal, pues las etapas de primado y amarre no son llevadas a cabo de forma continua, sino que se completan apenas se libera el frente para ahorrar tiempo y permitir que los trabajadores se encarguen de otras labores.

La Figura 52 ilustra las distribuciones de los tiempos de carguío por tiro, separados por el tipo de emulsión seleccionada en cada caso. Se puede observar que los datos asociados al Emultex PDBG presentan una variabilidad mucho menor, pues cargar un tiro toma entre 20 y 60 segundos con una media de 41 segundos, mientras que el Emultex CN tarda entre 20 y 90 segundos con un valor promedio de 57 segundos.

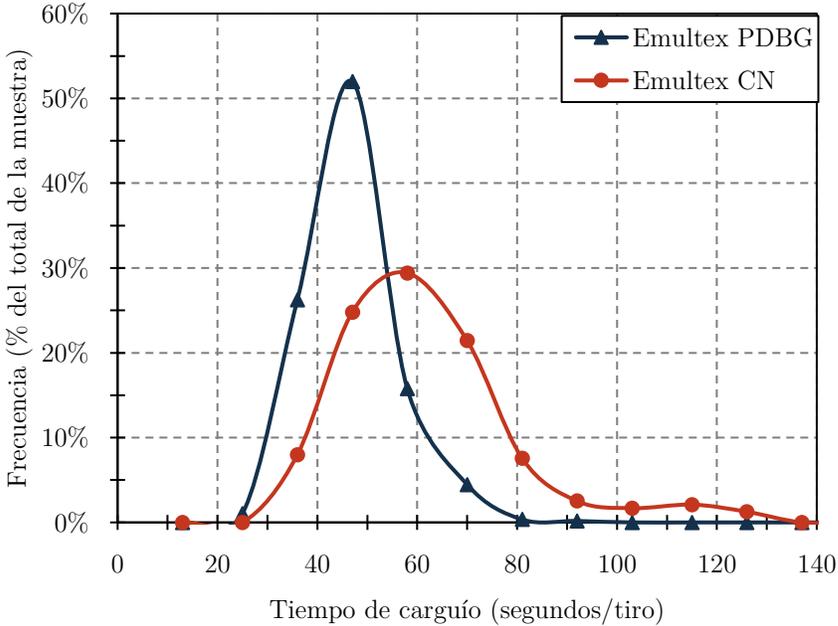


Figura 52. Distribuciones de tiempos de carguío por explosivo empleado.

Con el objetivo de comprender mejor la representatividad real de los promedios antes descritos, se presentan los intervalos de confianza de las muestras considerando un nivel de significación $\alpha = 5\%$ en la Tabla 16. De estos valores es posible concluir que la media de los datos asociados al Emultex PDBG siempre será menor que la media de los tiempos de carguío por tiro del Emultex CN.

Tabla 16. Intervalos de confianza de las muestras de tiempos de carguío por tiro.

Explosivo	Segundos/tiro
Emultex PDBG	40 - 42
Emultex CN	54 - 60

Se realizó una prueba t de Student para evaluar si efectivamente las medias de ambas muestras poseen una diferencia significativa. Para comenzar, fue necesario comprobar que los datos se distribuyeran normalmente, por lo que se compararon con una distribución normal estándar y se calculó el coeficiente de determinación presentado en la Tabla 17.

Tabla 17. Coeficiente de determinación entre cada muestra y distribución normal estándar.

Explosivo	R² (coeficiente de determinación)
Emultex PDBG	0,9442
Emultex CN	0,8382

Es posible observar que ambos coeficientes indican una estrecha relación entre cada muestra y una distribución normal estándar, comprobándose que los datos se distribuyen normalmente.

El siguiente paso consistió en realizar una prueba F con un nivel de significación $\alpha = 5\%$ para comprobar si las varianzas obtenidas con los tiempos de carguío por tiro son similares. La Tabla 18 resume los resultados, donde se tiene que las varianzas de ambos grupos pueden considerarse desiguales con una probabilidad de 0% de cometer un error; es decir, se acierta con un 100% de probabilidad.

Tabla 18. Prueba F para varianzas de muestras de tiempos de carguío por tiro.

Ítem	Emultex PDBG	Emultex CN
Media	41,3	56,8
Varianza	78,4	427,3
Número de datos	583	238
Grados de libertad	582	237
P(F ≤ f) una cola	0%	

Luego de demostrar la normalidad de los datos y que las varianzas de ambas muestras son distintas, se procede a completar la prueba t de Student con un nivel de significación $\alpha = 5\%$ considerando las características recién evaluadas. Las hipótesis por comprobar son:

- **Hipótesis nula:** La diferencia de las medias es igual a cero.
- **Hipótesis alternativa:** La diferencia de las medias es distinta de cero.

La Tabla 19 resume los resultados de la prueba, de donde se obtiene una probabilidad de $6 \times 10^{-22} \%$ de cometer un error al rechazar la hipótesis nula. Este valor es menor a 2.5% (la mitad del nivel de significación) por lo que se considera que es apropiado optar por la hipótesis alternativa la cual afirma que la diferencia de las medias es distinta de cero.

Tabla 19. Prueba t de Student para tiempos de carguío suponiendo varianzas desiguales.

Ítem	Emultex PDBG	Emultex CN
Media	41,3	56,8
Varianza	78,4	427,3
Número de datos	583	238
Grados de libertad	273	
P(T ≤ t) una cola	$3 \times 10^{-22} \%$	
P(T ≤ t) dos colas	$6 \times 10^{-22} \%$	

Gracias a la prueba t de Student llevada a cabo es posible afirmar que efectivamente las medias entre ambas muestras son diferentes, favoreciendo enormemente al Emultex PDBG pues tarda mucho menos tiempo en cargar un tiro.

En la Figura 53 se grafican los tiempos de carguío en función del número de tiros cargados con Emultex PDBG, de donde se concluye que a mayor número de tiros a cargar más tiempo será necesario para completar la operación.

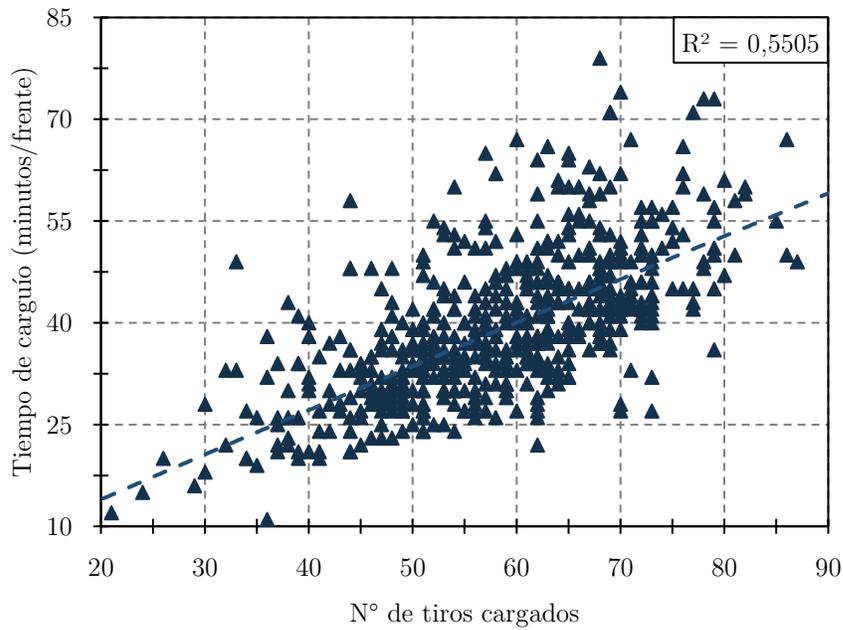


Figura 53. Influencia del número de tiros en el tiempo total de carguío con Emultex PDBG.

Además, la Figura 54 muestra cómo el aumentar el número de tiros no implica un aumento directo del tiempo de carguío por tiro al cargar con Emultex PDBG.

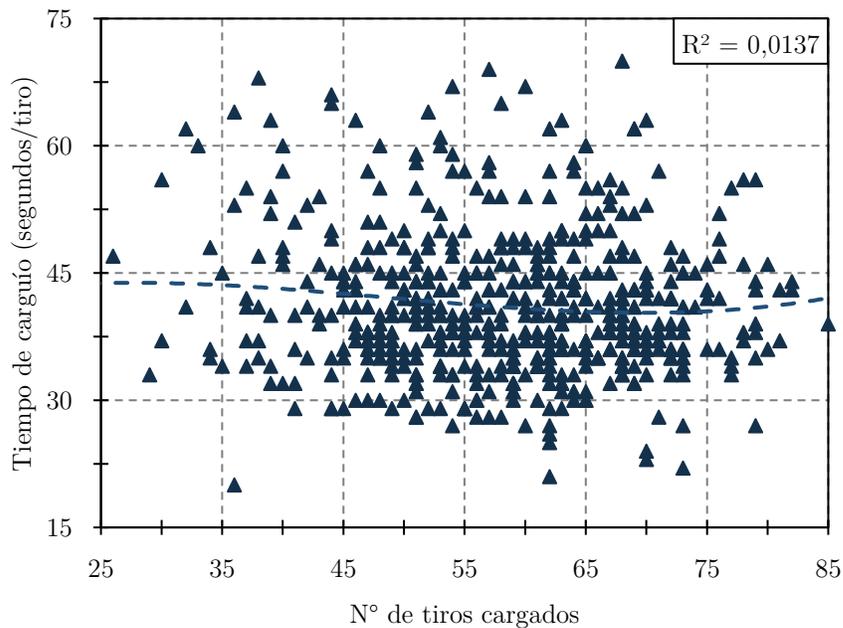


Figura 54. Influencia del número de tiros en el tiempo de carguío por tiro con Emultex PDBG

En la Figura 55 se graficaron los tiempos de carguío en función del número de tiros cargados con Emultex CN, donde los constantes cambios en la cantidad de trabajadores disponibles no permiten observar una tendencia clara.

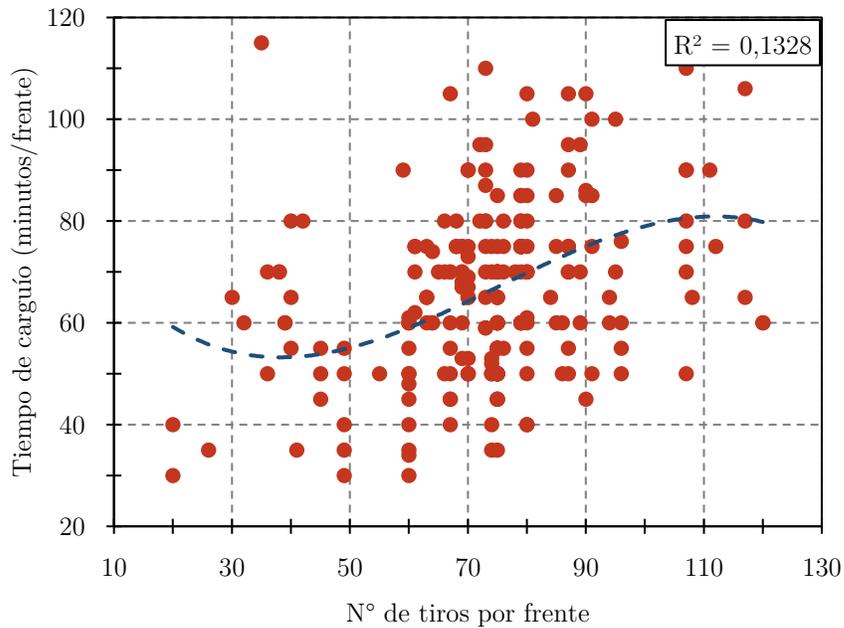


Figura 55. Influencia del número de tiros en el tiempo total de carguío con Emultex CN.

Además, se graficaron los tiempos de carguío por tiro en la Figura 56, donde es posible observar que al aumentar el número de tiros el lapso empleado por tiro puede disminuir levemente. Al igual que en el caso anterior, esta tendencia se debe a los cambios en la cantidad de trabajadores disponibles.

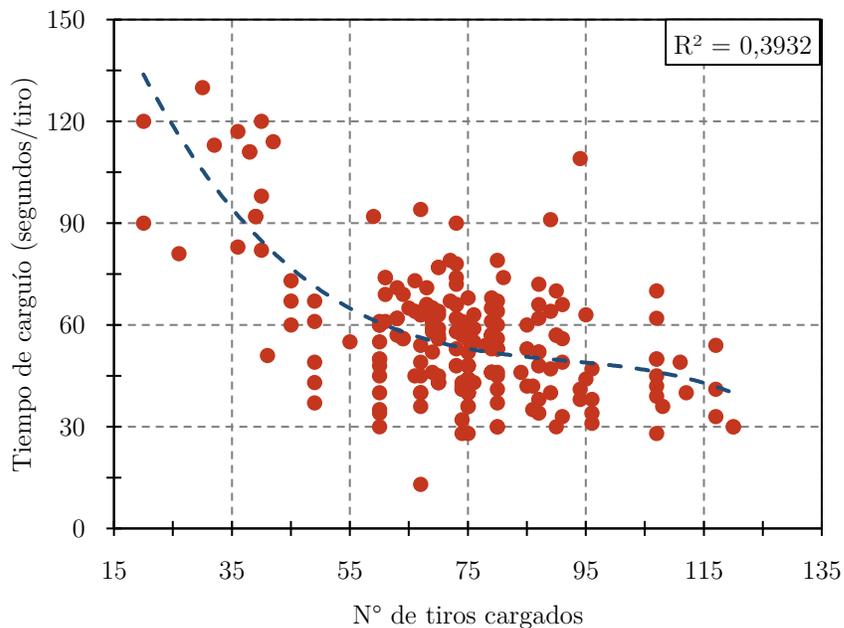


Figura 56. Influencia del número de tiros en el tiempo de carguío por tiro con Emultex CN.

4.4 Sobre-excavación

La sobre-excavación o sobre-quebre se asocia a la cantidad de material removido fuera del contorno diseñado en un túnel. Normalmente es considerada como el excedente de la sección real sobre la sección teórica y se mide con equipos de levantamiento topográfico que permiten conocer el daño generado en un punto específico.

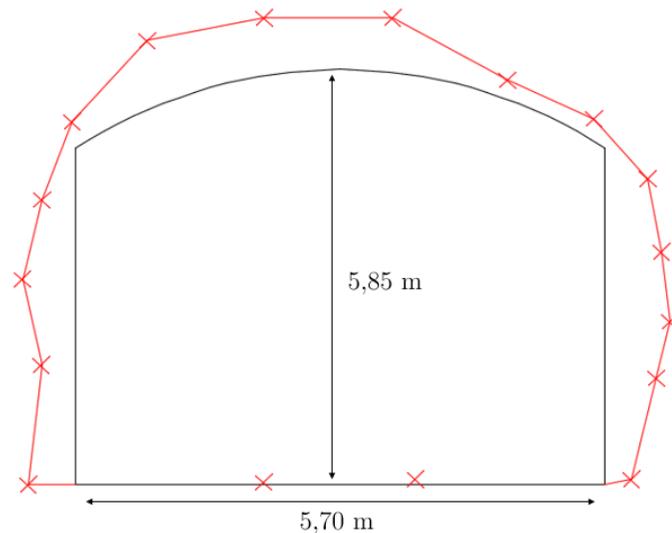


Figura 57. Medición de sección real obtenida luego de una tronadura.

La Figura 57 ilustra cómo los equipos miden la sección real tomando como referencia 17 puntos ubicados en las cajas, corona y piso del túnel, comparándola con el diseño original.

En el caso particular de esta investigación, los levantamientos fueron realizados luego de cada disparo con una separación de 1 m, comenzando en el inicio del túnel o galería respectiva. La base de datos relacionada a la sub-excavación; es decir, secciones menores a las teóricas, se ha dejado fuera de este estudio al no existir una muestra representativa.

La Tabla 20 resume la cantidad de información disponible, clasificada según el explosivo empleado y la calidad del macizo rocoso.

Tabla 20. Número de datos recolectados para evaluación de sobre-excavación generada.

Tipo de roca	Emultex PDBG	Emultex CN
II	38	36
III	64	109
IV	42	87
Total	144	232

En primer lugar, se obtuvo el histograma de la Figura 58 con los datos asociados al uso del Emultex PDBG, donde la mayor parte de los valores se encuentra entre un 41 y 101% de sobre-excavación.

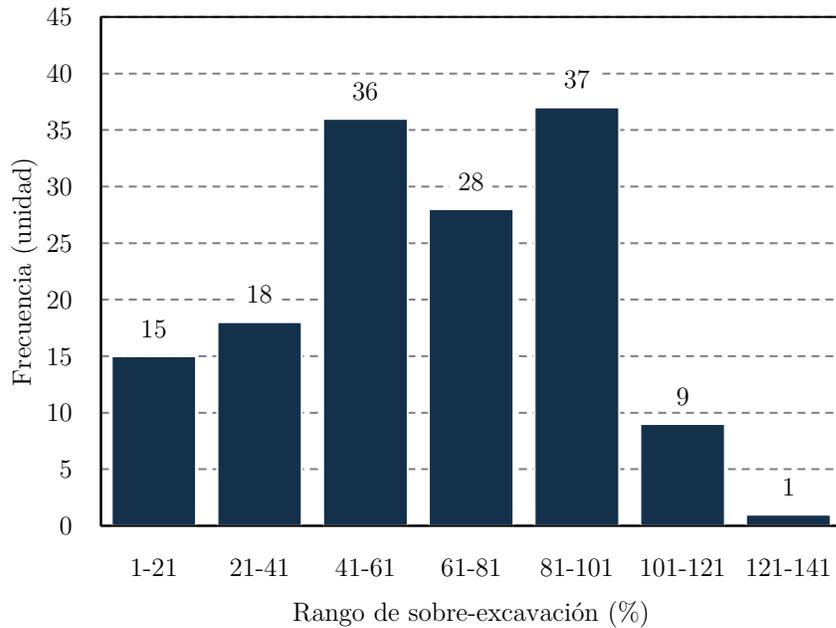


Figura 58. Histograma de sobre-excavación obtenida con Emultex PDBG.

De forma similar, la Figura 59 presenta el histograma de los datos asociados al Emultex CN, donde gran parte de los valores se encuentra entre un 15 y 75% de sobre-excavación.

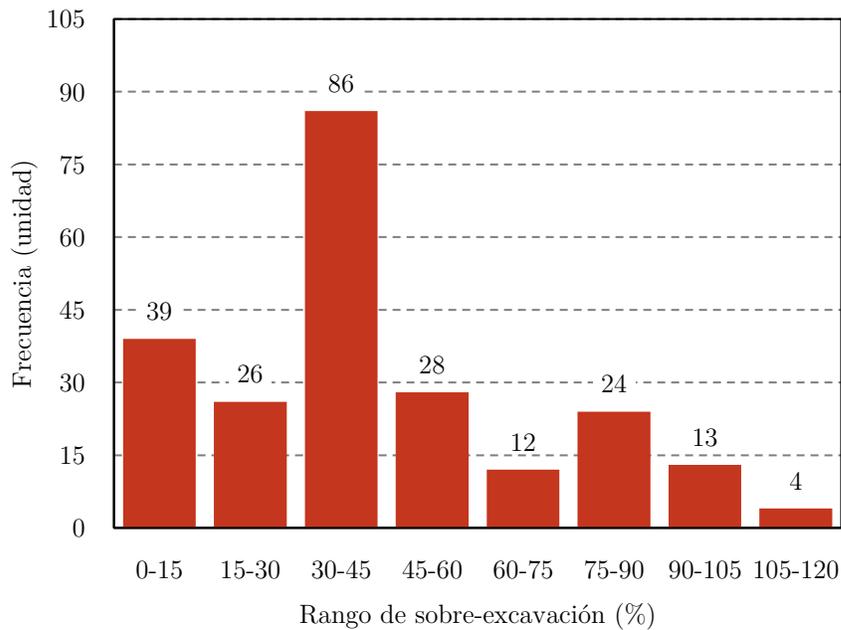


Figura 59. Histograma de sobre-excavación obtenida con Emultex CN.

En ambos histogramas la sobre-excavación es elevada, presentando alta variabilidad. Estos resultados permiten concluir que el poco control del daño en las inmediaciones de la excavación puede deberse a factores ajenos al explosivo empleado como carga principal.

Para comprender mejor el caso anterior, en la Figura 60 se compara el excedente generado donde se tiene que al utilizar Emultex CN la sobre-excavación disminuye al decrecer la calidad del macizo rocoso, mientras que con el Emultex PDBG no se observa una diferencia significativa.

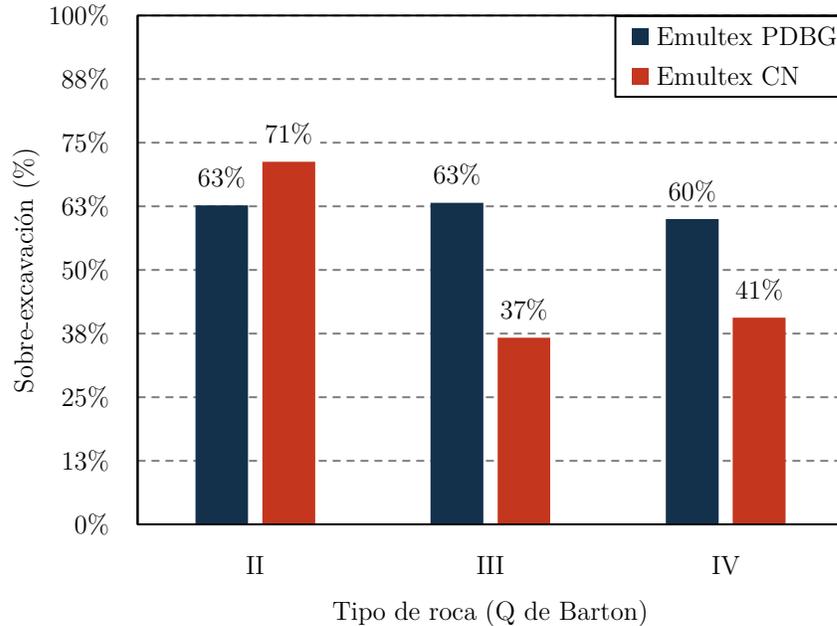


Figura 60. Sobre-excavación promedio según la calidad de la roca.

Los valores recién presentados varían según los intervalos de confianza obtenidos de las muestras con un nivel de significación $\alpha = 5\%$, como se presentan en la Tabla 21. En esta ocasión, las medias de los datos asociados al Emultex CN siempre son menores que aquellas obtenidas al utilizar el Emultex PDBG, exceptuando los disparos efectuados en roca tipo II donde ambas muestras presentan un comportamiento similar.

Tabla 21. Intervalos de confianza de las muestras de sobre-excavación generada.

Tipo de Roca	Emultex PDBG (excedente)	Emultex CN (excedente)
II	53 – 72 %	60 – 82 %
III	56 – 71 %	33 – 41 %
IV	51 – 69 %	36 – 45 %
Total	57 – 67 %	40 – 47 %

Finalmente, se estudió la influencia del factor de carga en la sobre-excavación, pues es lógico pensar que mientras más explosivo por cantidad de roca removida se utilice, mayor será la perturbación generada en el medio rocoso y, por lo tanto, más grande será el daño provocado en la excavación.

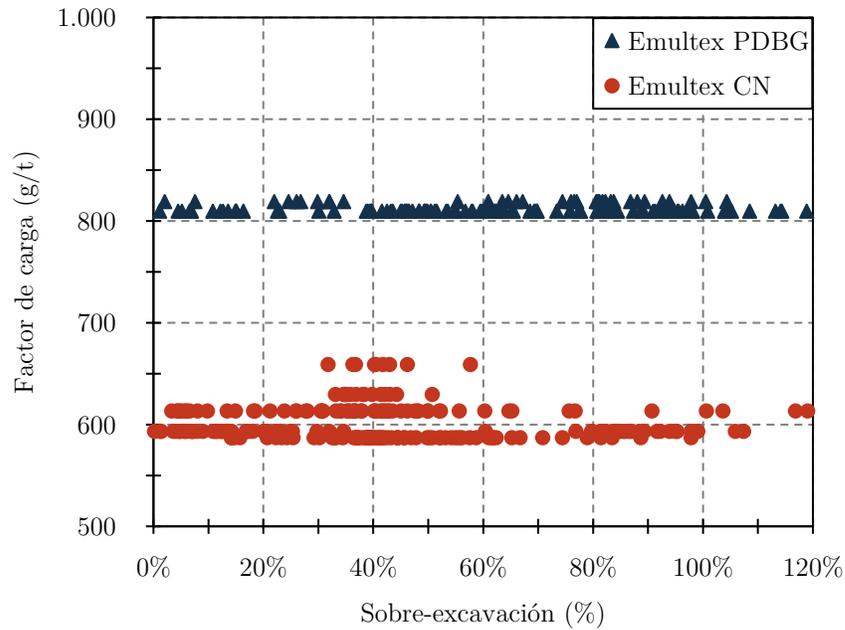


Figura 61. Sobre-excavación generada en función del factor de carga.

La Figura 61 presenta los diferentes valores de sobre-excavación generados en función del factor de carga empleado, separado además por el tipo de explosivo utilizado como carga de columna. Al igual que en el caso estudiado de los avances por disparo, si bien la emulsión bombeable presenta un mayor consumo de explosivo por tonelada de roca removida, el excedente obtenido luego de cada tronadura varía entre un 15 y 100% independiente del producto seleccionado.

4.5 Ventilación requerida

Luego de cada disparo es necesario ventilar el área para permitir que los gases tóxicos generados sean extraídos y enviados a superficie a través del sistema de ventilación de la mina. Debido a que esta etapa requiere que todo el personal se encuentre fuera del sector afectado, es necesario conocer el tiempo empleado pues es considerado una pérdida importante dentro del ciclo.

La metodología escogida para medir este lapso consiste en registrar tanto la hora del disparo como la hora de liberación del frente. Esta última es obtenida luego que el jefe de turno o el encargado de área se acerca al sector y utiliza su detector de gases para medir la concentración de CO y NO_x en el aire. Una vez la atmósfera se encuentra libre de contaminantes, la zona se considera liberada y el ciclo de construcción continúa.

En la operación estudiada durante esta investigación fue posible recolectar 78 mediciones del tiempo de ventilación para la emulsión bombeable y 120 mediciones para la emulsión encartuchada, donde se considera un tiempo de espera obligatorio de 30 minutos antes de que el personal pueda acercarse al frente y medir la concentración de gases.



Figura 62. Detector de gases empleado en minería subterránea.

(HSE Safety, 2018)

La Figura 62 muestra un detector de gases típico empleado en las operaciones de minería subterránea, el cual se configura para informar los porcentajes de CO, NO₂ y O₂ en el aire. El caso ideal es tener en la atmósfera un 20,8% de oxígeno y 0% de gases contaminantes.

La Figura 63 presenta el histograma de los datos asociados a la emulsión bombeable, donde la mayor parte de los valores fluctúa entre 30 y 60 minutos de tiempo requerido para la ventilación.

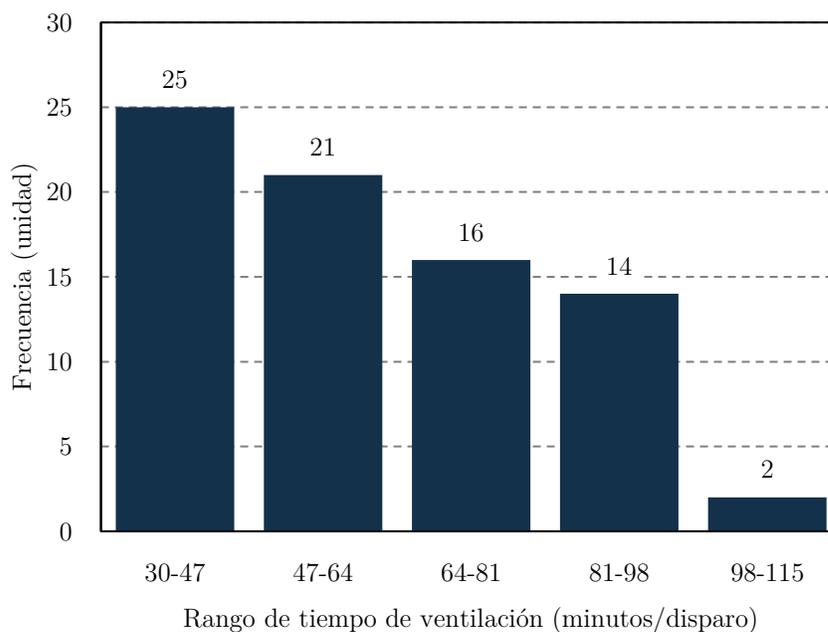


Figura 63. Histograma de tiempo de ventilación requerido empleando Emultex PDBG.

Junto con lo anterior, la Figura 64 presenta el histograma de los datos obtenidos al utilizar emulsión encartuchada, cuyos valores también se encuentran concentrados entre 30 y 60 minutos principalmente.

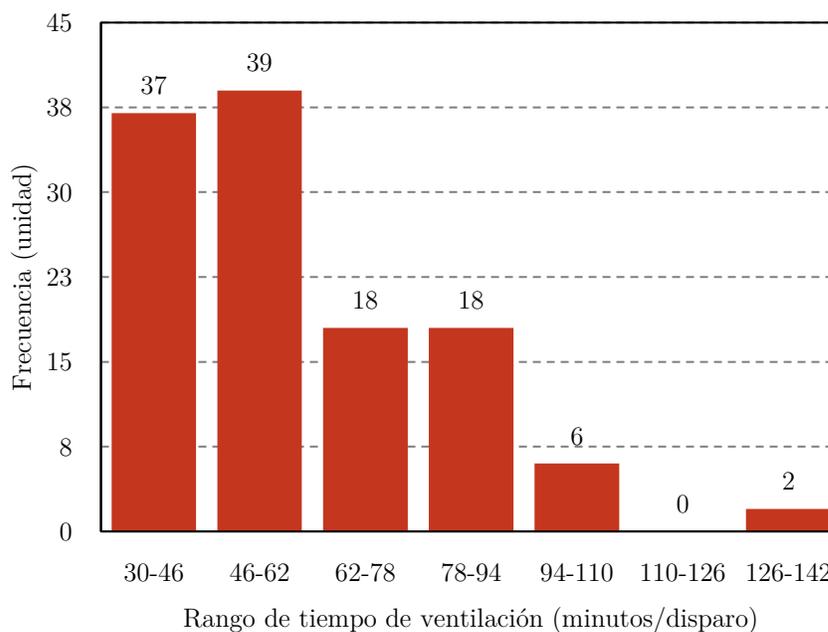


Figura 64. Histograma de tiempo de ventilación requerido empleando Emultex CN.

En ambos casos, se calcularon los intervalos de confianza de las muestras con un nivel de significación $\alpha = 5\%$ presentados en la Tabla 22. Se puede observar que, si bien existe una leve diferencia, no resulta lo suficientemente significativa como para determinar que un explosivo es superior al otro en términos del tiempo requerido de ventilación.

Tabla 22. Intervalos de confianza de las muestras de tiempos requeridos de ventilación.

Explosivo	Ventilación (minutos)
Emultex PDBG	57 - 65
Emultex CN	57 - 63

Además, se estudió la influencia del número de tiros cargados en el tiempo de ventilación requerido, pues la concentración de gases tóxicos generados aumenta con cada kilogramo de explosivo utilizado.

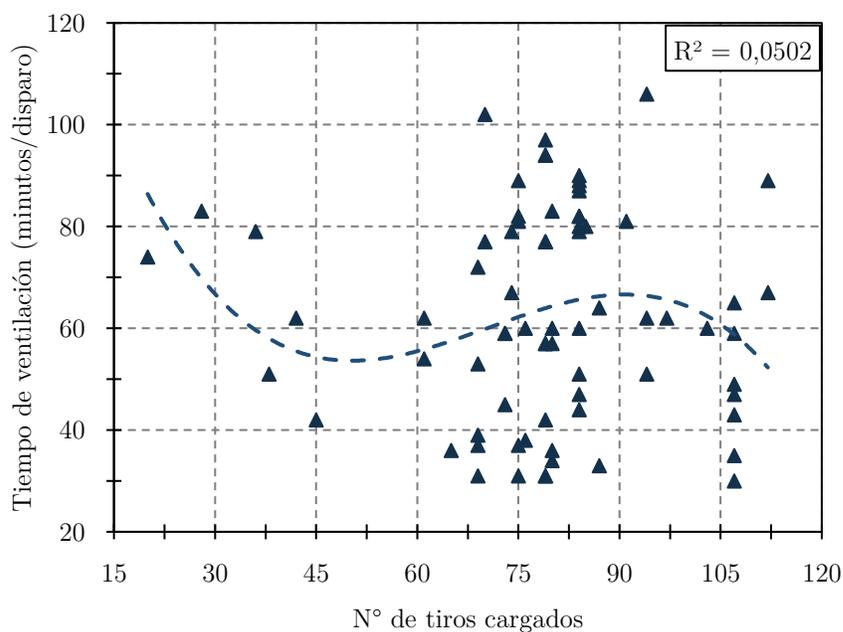


Figura 65. Influencia del número de tiros cargados con Emultex PDBG en la ventilación.

La Figura 65 ilustra este fenómeno al cargar con Emultex PDBG, donde se ve que no es posible determinar una relación directa. Esto se debe principalmente a las restricciones operacionales existentes en la mina que no permiten un monitoreo en tiempo real de la liberación de los gases tóxicos.

Junto con lo anterior, la Figura 66 ilustra una comparación similar entre el tiempo de ventilación y el número de tiros cargados, esta vez utilizando Emultex CN.

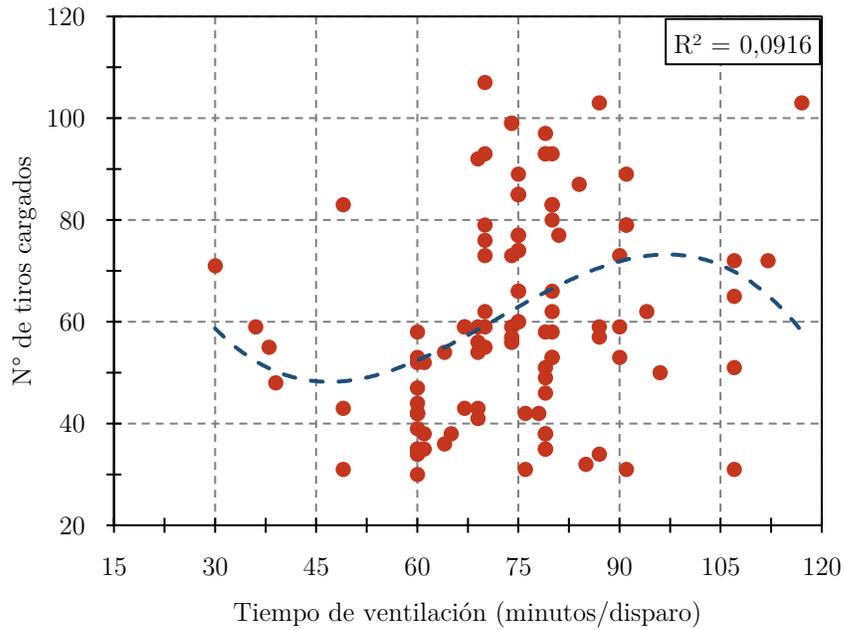


Figura 66. Influencia del número de tiros cargados con Emultex CN en la ventilación.

Al igual que con la emulsión bombeable, no existe una relación que permita cuantificar el efecto de la cantidad de explosivo en la concentración de gases tóxicos generados y su posterior ventilación, ya que las características de la operación no permiten un muestreo detallado y libre de interferencias.

4.6 Vibraciones

Las vibraciones corresponden a perturbaciones generadas en el medio rocoso en forma de ondas de diferentes magnitudes, las cuales pueden provocar fracturas en las cercanías de la excavación. En esta investigación los datos fueron recolectados con dos sismógrafos calibrados y certificados, y geófonos triaxiales, los que permitieron conocer la velocidad de partícula (PPV) obtenida luego de cada disparo.

Dependiendo de la ubicación de la tronadura, la intensidad de estas vibraciones estará sujeta a las propiedades físicas del medio rocoso. Así, los datos fueron divididos según las Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB) presentadas en la Tabla 23, que clasifican la roca según sus características geológicas y de alteración.

Tabla 23. Propiedades principales de las UGTB intactas.

Unidad Geotécnica	γ (t/m ³)	V _p (m/s)	UCS (MPa)	TS (MPa)	E (GPa)	PPV _c (mm/s)	4×PPV _c (mm/s)
GES	2,67	4.194	141	16,00	35,10	1.912	7.647
PEC	2,63	4.796	78	9,30	47,90	931	3.725
PEK	2,61	4.160	116	5,40	38,60	582	2.328
PES	2,63	4.028	97	5,20	45,50	460	1.841
Q=S	2,71	3.728	49	3,10	22,40	516	2.064
Q<S	2,60	2.803	17	1,50	13,30	316	1.265
ZCI	2,22	1.966	22	1,50	7,20	410	1.638

Estas propiedades corresponden a la condición inicial de cada UGTB, es decir, antes de ser alteradas por una tronadura. Además, los límites de velocidad de partícula considerados, asumiendo que el macizo rocoso cumple la Ley de Hooke y que las ondas son de tipo armónicas planas son:

- PPV_c: Aparición de nuevas grietas.
- 4×PPV_c: Daño notorio u obvio.

La distancia de las tronaduras al punto de medición varía entre 15 y 66 m, por lo que se considera un levantamiento de vibraciones en campo lejano.

En primer lugar, la Tabla 24 presenta la muestra de los datos asociados a la UGTB tipo Granodiorita Elena Sur (GES), donde la PPV obtenida no superan el criterio de 1.912 mm/s que indica creación de nuevas grietas.

Tabla 24. PPV generadas en UGTB tipo GES.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
GES	III	32,0	42,20	868,9	Emultex PDBG
GES	III	36,4	23,60	868,9	Emultex PDBG
GES	III	34,7	13,70	696,6	Emultex PDBG

La Tabla 25 presenta resultados similares, pero esta vez en la UGTB denominada Pórfido Este Clorítico (PEC), donde tampoco se supera la PPV_c de 931 mm/s para la generación de nuevas fracturas.

Tabla 25. PPV generadas en UGTB tipo PEC.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
PEC	III	40,8	40,40	912,5	Emultex PDBG
PEC	III	24,1	52,90	912,5	Emultex PDBG
PEC	III	29,3	23,50	912,5	Emultex PDBG
PEC	III	35,0	20,00	912,5	Emultex CN
PEC	IV	43,7	20,70	912,5	Emultex CN

La Tabla 26 presenta los datos asociados a la unidad geotécnica Pórfido Este Potásico (PEK), donde el límite de generación de nuevas grietas de 582 mm/s no es alcanzado en ningún caso.

Tabla 26. PPV generadas en UGTB tipo PEK.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
PEK	III	32,4	18,00	655,2	Emultex PDBG
PEK	III	22,5	27,38	888,9	Emultex PDBG
PEK	III	17,4	43,34	919,5	Emultex PDBG
PEK	III	38,5	21,20	919,5	Emultex PDBG
PEK	III	36,9	36,30	659,0	Emultex PDBG
PEK	II	15,0	24,90	946,4	Emultex CN
PEK	II	25,5	38,23	919,5	Emultex CN
PEK	III	17,4	32,52	919,5	Emultex CN

La Tabla 27 presenta los datos asociados a la unidad geotécnica Cuarzo menor a Sericita ($Q < S$), donde el criterio de PPV_C de 316 mm/s no es superado.

Tabla 27. PPV generadas en UGTB tipo $Q < S$.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
$Q < S$	IV	26,4	30,67	251,0	Emultex CN
$Q < S$	IV	22,8	54,40	251,0	Emultex CN

La Tabla 28 presenta la muestra de la UGTB denominada Pórfido Este Sericítico (PES), donde el criterio para generación de nuevas grietas de 460 mm/s no es alcanzado por ningún disparo.

Tabla 28. PPV generadas en UGTB tipo PES.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
PES	II	18,1	58,21	912,5	Emultex PDBG
PES	III	32,1	15,36	912,5	Emultex PDBG
PES	III	24,4	73,39	912,5	Emultex PDBG
PES	IV	25,7	38,20	912,5	Emultex PDBG
PES	IV	29,3	32,93	912,5	Emultex PDBG
PES	IV	30,0	37,89	912,5	Emultex PDBG
PES	IV	30,7	26,88	912,5	Emultex PDBG
PES	III	20,7	120,90	912,5	Emultex CN
PES	III	27,5	63,43	912,5	Emultex CN

La Tabla 29 presenta los datos asociados a la unidad Zona de Cizalle Intenso (ZCI) donde no se supera el límite PPV_C de 410 mm/s.

Tabla 29. PPV generadas en UGTB tipo ZCI.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
ZCI	IV	41,2	17,40	297,3	Emultex CN

Finalmente, la Tabla 30 entrega la muestra de los datos asociados a la unidad Cuarzo igual a Sericita (Q = S), donde una vez más el límite para generación de nuevas grietas de 516 mm/s no es superado.

Tabla 30. PPV generadas en UGTB tipo Q=S.

UGTB	Tipo de roca	Distancia de geófono (m)	PPV (mm/s)	FC (g/t)	Explosivo
Q = S	III	46,6	51,40	228,2	Emultex PDBG
Q = S	III	31,0	51,40	228,2	Emultex PDBG
Q = S	IV	26,9	29,90	228,2	Emultex PDBG
Q = S	IV	66,0	11,40	228,2	Emultex CN

Es posible observar que al variar la unidad geotécnica y el explosivo escogido no se provoca un cambio significativo en las vibraciones generadas, logrando un bajo nivel de daños en el campo lejano. Para comprender mejor el efecto de las tronaduras en las PPV alcanzadas se obtuvo la Figura 67, donde se estudia la influencia de la ubicación de los geófonos.

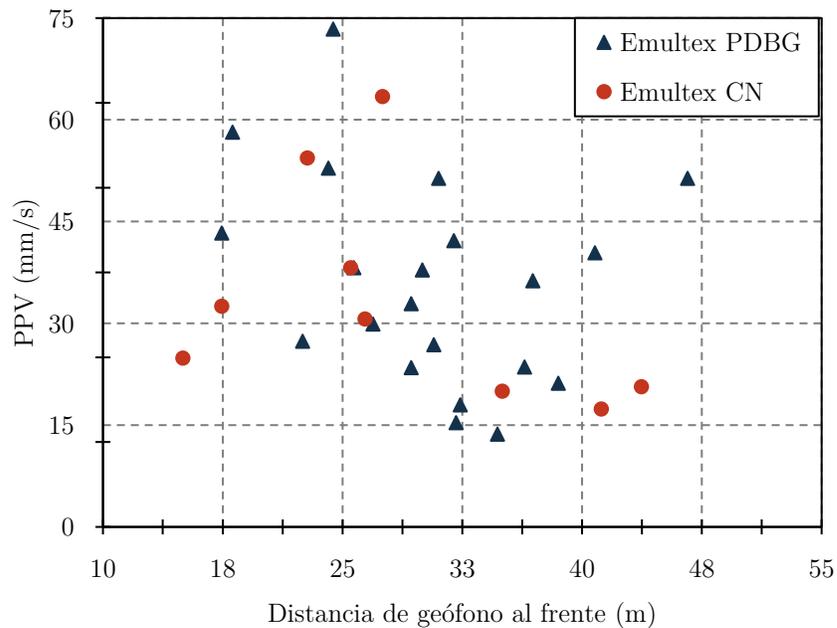


Figura 67. Influencia de la ubicación del geófono en la PPV medida.

Es posible concluir que en este caso particular no se observa una relación directa entre la distancia de medición y las perturbaciones muestreadas, debido principalmente a la alta variabilidad de la roca presente desde que las ondas se generan hasta que son registradas por el sensor. Otros factores por considerar son los errores de medición existentes en todo muestreo aplicado en minería, junto con la poca cantidad de información recolectada en esta faena.

De forma similar, la Figura 68 presenta la comparación entre los factores de carga empleados y las perturbaciones generadas, donde se interpreta que, a pesar de existir una ligera variación entre 20 y 80 mm/s dependiendo de la cantidad de explosivo utilizado, no se observa una tendencia que favorezca a un producto por sobre otro.

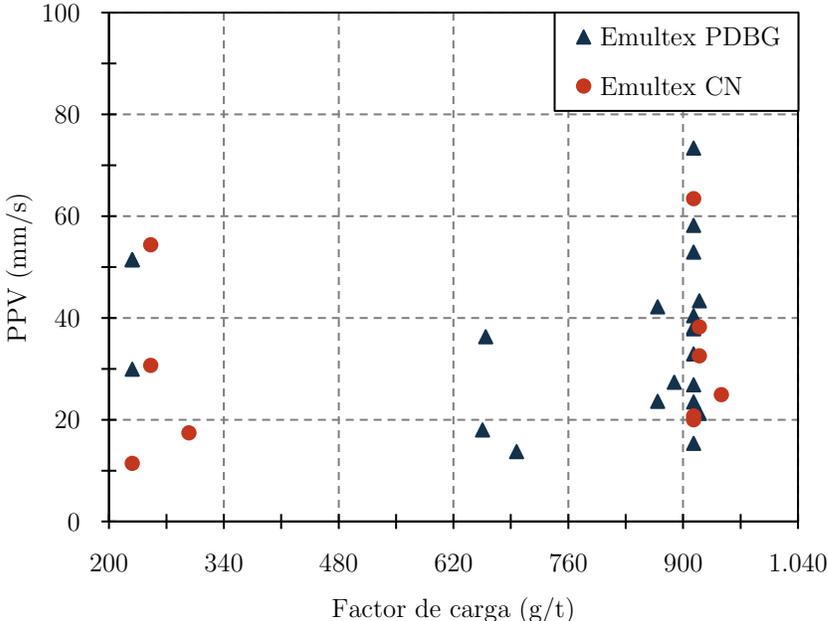


Figura 68. Influencia del factor de carga en la PPV medida.

El resultado obtenido es consistente con la teoría, pues el factor de carga no influye directamente en el nivel de vibraciones, sino que es la secuencia de disparo la que finalmente define la cantidad de explosivo detonado por unidad de tiempo.

4.7 Evaluación económica

A continuación, se presentan los costos de perforación y tronadura considerando las características del desarrollo horizontal realizado en Chuquicamata Subterránea.

4.7.1 Supuestos considerados

Para este ejemplo se escogió el frente denominado Rampa de Pre-Acondicionamiento, cuya dimensión es de 6,0 m x 6,0 m. La Tabla 31 resume los supuestos considerados, obtenidos directamente de la operación.

Tabla 31. Parámetros de entrada para evaluación económica.

Ítem	Unidad	Valor
Tiros cargados (sin contorno)	u	60
Tiros de contorno	u	19
Tiros huecos	u	3
Largo de perforación	m	3,9
Eficiencia del disparo	%	95
Frentes activos	u	12

Para la evaluación se consideran dos cuadrillas diarias (turno día y turno noche), permitiendo conocer cuánto cuesta realizar las etapas de perforación y tronadura con el mínimo de personal y así tener un valor que puede ser multiplicado por la cantidad que sea necesaria. Además, se toma como supuesto que dicho grupo es capaz de completar el proceso en 12 frentes a lo largo del día.

El siguiente paso es obtener los avances y metros perforados (m_p) diarios de la Tabla 32.

Tabla 32. Metros perforados y avances obtenidos diariamente.

Ítem	Unidad	Valor
Metros de tiros cargados	m_p /disp	308,1
Metros de tiros huecos	m_p /disp	23,4
Avance por disparo	m/disp	3,7
Avance diario	m/día	44,5

4.7.2 Costo de perforación

El costo de perforación considera principalmente tres componentes que es necesario costear: equipos, mano de obra y aceros de perforación. En primer lugar, la Tabla 33 presenta el cálculo del costo por metro de avance del equipo de perforación horizontal Jumbo utilizado.

Tabla 33. Costo por metro para equipos de perforación.

Equipos	Ciclo (hrs/disp)	Costo (USD/hrs)	Uso (hrs/m)	Costo (USD/m)
Jumbo	2,7	112,0	0,74	82,9

De forma similar, la Tabla 34 resume el cálculo del costo por metro construido considerando la mano de obra requerida.

Tabla 34. Costo por metro para mano de obra de perforación.

Mano de obra	Cantidad	Costo (USD/día)	Avance (m/día)	Costo (USD/m)
Operador Jumbo	2	140,0	44,5	6,3

Finalmente, la Tabla 35 presenta el cálculo de los costos por metro al utilizar los aceros de perforación.

Tabla 35. Costo por metro para materiales de perforación.

Materiales	Costo (USD/u)	Vida útil (m _p)	Costo (USD/m _p)	Uso (m _p /m)	Costo (USD/m)
Barras 4,3 m	270,0	1.200,0	0,23	89,6	20,6
Culatín	120,0	800,0	0,15	89,6	13,4
Bit 48 mm	100,0	400,0	0,25	86,4	21,6
Bit 102 mm	200,0	400,0	0,5	3,1	1,6
Copla	80,0	200,0	0,4	89,6	35,8

4.7.3 Costo de tronadura

El costo del carguío de explosivo fue calculado de forma similar a los costos de perforación, con la diferencia de que se varía la carga de columna entre Emultex PDBG y Emultex CN. La Tabla 36 presenta el costo de equipos para la emulsión bombeable, mientras que la Tabla 37 presenta los mismos valores, pero asociados al carguío de emulsión encartuchada.

Tabla 36. Costo por metro para equipos de carguío con Emultex PDBG.

Equipos	Ciclo (hrs/disp)	Costo (USD/hrs)	Uso (hrs/m)	Costo (USD/m)
Camioneta polvorinera	1,0	2,7	0,27	0,7
Manipulador telescópico	0,9	10,0	0,24	2,4
Equipo UBT	0,8	18,0	0,22	4,0

Tabla 37. Costo por metro para equipos de carguío con Emultex CN.

Equipos	Ciclo (hrs/disp)	Costo (USD/hrs)	Uso (hrs/m)	Costo (USD/m)
Camioneta polvorinera	1,0	2,7	0,27	0,7
Manipulador telescópico	1,3	10,0	0,35	3,5

Como se puede observar, el equipo UBT sólo es utilizado para transportar y cargar emulsión bombeable, por lo que no se considera para el carguío del explosivo encartuchado. Además, las horas de uso del manipulador telescópico cambian al pasar de un explosivo a otro, debido a que el Emultex PDBG se carga más rápido.

La Tabla 38 resume el cálculo de los costos de mano de obra para el Emultex PDBG.

Tabla 38. Costo por metro para mano de obra de carguío con Emultex PDBG.

Mano de obra	Cantidad	Costo (USD/día)	Avance (m/día)	Costo (USD/m)
Minero	4	38,0	44,5	3,4
Chofer polvorinero	4	70,0	44,5	6,3
Chofer manipulador	2	50,0	44,5	2,3
Chofer UBT	2	130,0	44,5	5,8

La Tabla 39 presenta los costos por metro construido al emplear mano de obra en cargar Emultex CN.

Tabla 39. Costo por metro para mano de obra de carguío con Emultex CN.

Mano de obra	Cantidad	Costo (USD/día)	Avance (m/día)	Costo (USD/m)
Minero	8	38,0	44,5	6,8
Chofer polvorinero	4	70,0	44,5	6,3
Chofer manipulador	2	50,0	44,5	2,3

Una vez más, el equipo UBT no es necesario por lo que se elimina el operador asociado al pasar de un carguío mecanizado a uno manual. Además, es posible notar que la cantidad de mineros pasa de 4 a 8, debido a que cuando se trabaja con emulsión encartuchada se tienen 4 trabajadores por turno cargando el explosivo, a diferencia de los 2 por turno al escoger Emultex PDBG.

El costo de los explosivos es presentado a continuación, donde se separa por tipo carga de columna y además se considera el Softron escogido para cargar los tiros de contorno. La Tabla 40 resume los costos asociados al Emultex PDBG.

Tabla 40. Costo por metro para carguío con Emultex PDBG.

Materiales	Consumo por disparo	Costo unitario	Costo (USD/disp)	Costo (USD/m)
Emultex PDBG	361,8 kg	868,7 USD/t	314,3	85,0
Softron	114 u	0,6 USD/u	68,4	18,5
APD-150	60 u	1,3 USD/ u	78,0	21,1
Tronex Plus	19 u	0,7 USD/u	13,3	3,6
Cordtex 5 g/m	80,0 m	0,3 USD/m	24,0	6,5
Carmex 3 m	2 u	1,6 USD/u	3,2	0,9
Nonel 4,8 m	79 u	2,4 USD/u	189,6	51,2

De forma similar, la Tabla 41 presenta el costo de cargar con Emultex CN.

Tabla 41. Costo por metro para carguío con Emultex CN.

Materiales	Consumo por disparo	Costo unitario	Costo (USD/disp)	Costo (USD/m)
Emultex CN	300 u	1,8 USD/u	540,0	146,0
Softron	114 u	0,6 USD/u	68,4	18,5
APD-150	-	1,3 USD/ u	-	-
Tronex Plus	79 u	0,7 USD/u	55,3	15,0
Cordtex 5 g/m	80,0 m	0,3 USD/m	24,0	6,5
Carmex 3 m	2 u	1,6 USD/u	3,2	0,9
Nonel 4,8 m	79 u	2,4 USD/u	189,6	51,2

4.7.4 Costo total de perforación y tronadura

En primer lugar, el costo total de perforación, considerado como los dólares necesarios para construir un metro de túnel, se presenta en la Tabla 42.

Tabla 42. Costo total de perforación.

Ítem	Costo (USD/m)
Equipos	82,9
Mano de obra	6,3
Materiales	93,0
Total	182,2

Además, la Tabla 43 presenta los costos de tronadura al escoger cualquiera de los explosivos estudiados. Si bien los equipos y la mano de obra son más costosos al utilizar el explosivo bombeable pues se requiere de equipos especiales y personal calificado, el costo del explosivo encartuchado provoca que el Emultex PDBG sea más conveniente desde un punto de vista económico.

Tabla 43. Costo total de tronadura.

Ítem	Costo carguío Emultex PDBG (USD/m)	Costo carguío Emultex CN (USD/m)	Diferencia
Equipos	7,1	4,2	- 2,9
Mano de obra	17,8	15,4	- 2,4
Materiales	186,7	238,1	51,4
Total	211,6	257,7	46,1

Finalmente, el costo total de perforación y tronadura es de 393,8 USD/m al cargar con Emultex PDBG y 439,9 USD/m al cargar con Emultex CN, existiendo una diferencia de 46,1 dólares por metro construido.

5 Análisis de resultados

A continuación se analizan los resultados presentados en la sección anterior, considerando criterios de selección que permitan determinar qué agente explosivo se adapta mejor a las condiciones presentes en la mina Chuquicamata Subterránea.

5.1 Precio del explosivo

En primer lugar, se evalúa el precio de cada producto. Si bien este factor puede ser clave, debe ser analizado de forma tal que no genere un sesgo en la decisión final. La Tabla 44 presenta el precio de ambas emulsiones en función de los kilogramos adquiridos y la energía liberada.

Tabla 44. Precios de las emulsiones Emultex PDBG y Emultex CN.

Explosivo	Precio (USD/kg)	Precio (USD/kJ)
Emultex PDBG	0,87	3,02
Emultex CN	2,21	5,60

Como se puede observar, la emulsión bombeable no sólo es más económica por unidad de masa, sino que también es posible adquirir la misma cantidad de energía contenida por un precio más bajo. Junto con lo anterior, se adjunta la Figura 69 donde es posible determinar el ahorro obtenido al pasar de Emultex CN a Emultex PDBG, en función del número de tiros cargados.

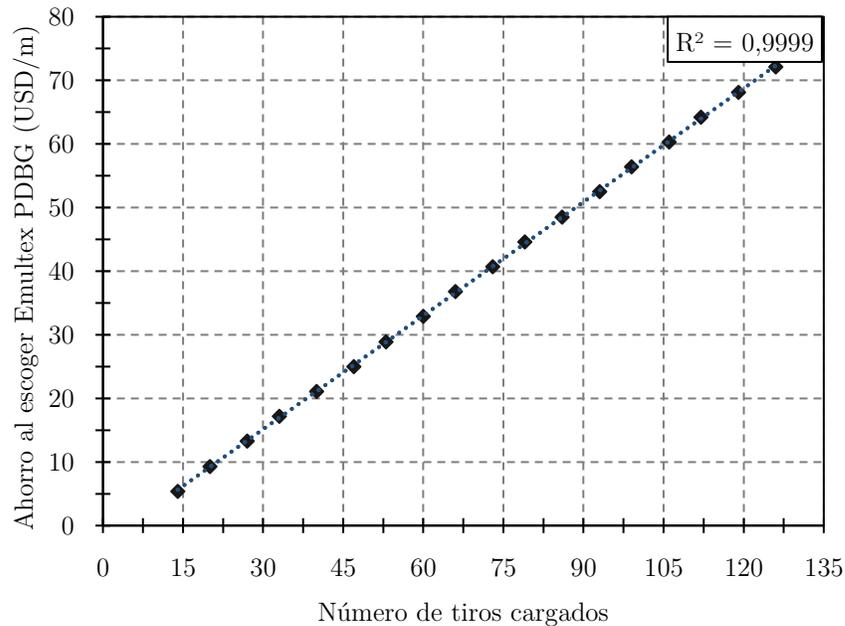


Figura 69. Ahorro obtenido con Emultex PDBG en función del número de tiros.

Se determina que la emulsión bombeable entrega una clara ventaja al momento de seleccionar el tipo de explosivo a emplear. En el gráfico recién presentado el ahorro obtenido varía entre 5 y 70 USD/m, tomando como supuesto que todos los demás criterios de diseño se mantienen constantes.

Modificar los parámetros de entrada provocaría cambios importantes en los resultados finales, favoreciendo al Emultex PDBG:

- La emulsión bombeable permite remover la misma cantidad de roca con un número menor de tiros, por lo que el costo de perforación y el tiempo necesario para realizar la operación disminuyen considerablemente.
- El rendimiento de cada disparo es diferente al variar el explosivo. En el caso del Emultex PDBG su rendimiento medio es de un 95% con un avance de 3,7 m, mientras que con el Emultex CN es de un 92% con un avance de 3,6 m.

El último punto indica que por cada disparo realizado la emulsión bombeable avanza 10 cm más que su contraparte encartuchada. Cada 36 disparos, al cargar con Emultex CN es necesario realizar una tronadura extra para alcanzar el resultado obtenido con el Emultex PDBG. Así, considerando que en la mina actualmente se construyen cerca de 2.600 km mensuales, se deben pagar 20 disparos de más cada mes (72 m más) si se quiere completar dicha meta con el explosivo encartuchado

Finalmente, se concluye que tanto el costo de perforación como el costo de tronadura se ven fuertemente influenciados por el agente explosivo seleccionado, por lo que en este caso particular el Emultex PDBG es superior al Emultex CN.

5.2 Ritmo de trabajo

El ritmo de trabajo dentro de una mina es uno de los criterios más importantes a considerar, pues los proyectos cuentan con plazos estrictos y cualquier demora no programada puede comprometer su factibilidad técnica y económica. En primer lugar, la Tabla 45 presenta el rango en que los avances medios obtenidos con el Emultex PDBG varían por sobre el Emultex CN al modificar el tipo de roca, calculados con los intervalos de confianza de ambas muestras.

Tabla 45. Diferencia de intervalos de confianza de avances entre explosivos.

Tipo de Roca	Emultex PDBG (m/disparo)	Emultex CN (m/disparo)	Diferencia (m/disparo)
II	3,62 – 3,77	3,46 – 3,64	-0,02 a 0,31
III	3,64 – 3,77	3,56 – 3,69	-0,05 a 0,21
IV	3,41 – 3,73	3,33 – 3,58	-0,17 a 0,40

Se puede interpretar que en todos los casos la emulsión bombeable presenta cierta ventaja por sobre la emulsión encartuchada, pues en promedio su avance resultará superior en cualquier tipo de roca.

La comparación realizada entre avances obtenidos y factores de carga empleados permitió comprobar que para un mismo consumo de explosivo por tonelada de roca removida es posible obtener rendimientos adecuados e inadecuados por igual, lo que descarta al factor de carga como el parámetro responsable del mayor avance obtenido con Emultex PDBG. Esta diferencia se debe a que la emulsión bombeable, al ocupar todo el espacio de un tiro, permite un contacto directo entre la roca y el explosivo, lo que asegura una mejor transferencia de la energía al momento de la detonación.

Junto con lo anterior, se observa que existe una disminución del avance obtenido al decrecer la calidad del macizo rocoso, pues las discontinuidades y la heterogeneidad en la composición de la roca provocan que la onda de choque generada se vea atenuada, perdiéndose efectividad al momento de remover el material desde su posición inicial.

Los avances por disparo de muy bajo rendimiento son provocados por una mala implementación de los controles en terreno:

- Perforación desigual con tiros mucho más cortos que otros.
- No utilizar tacos para contener los gases generados.
- No soplar las perforaciones para remover el material remanente.

Estos errores no permiten aprovechar al máximo el potencial del Emultex PDBG, pues la energía liberada no se transmite de la forma considerada inicialmente en los diseños.

Otro parámetro a considerar es el tiempo de carguío, ya que al modificar el sistema de carguío implementado en una faena es posible disminuir los períodos empleados para esta operación, liberando los frentes antes de lo programado. La Tabla 46 presenta la diferencia entre intervalos de confianza de las muestras de tiempo de carguío por tiro, clasificadas según el tipo de explosivo empleado.

Tabla 46. Diferencia de intervalos de confianza de tiempo de carguío por tiro.

Explosivo	Segundos/tiro
Emultex PDBG	40 - 42
Emultex CN	54 - 60
Diferencia	-20 a -12

La diferencia entre los tiempos de carguío promedio por tiro entre el Emultex PDBG y el Emultex CN varía entre -20 a -12 segundos por tiro. Esto quiere decir que cargar un frente con emulsión encartuchada siempre tardará más, entre 12 a 20 segundos extra por tiro cargado.

La diferencia en los lapsos requeridos se debe principalmente a la disponibilidad de mano de obra y a la dificultad de la operación.

- La emulsión bombeable es manipulada por dos obreros cuyo único trabajo consiste en ubicar la manguera dentro de cada tiro y retirarla una vez el producto es cargado, manteniendo un ritmo promedio de 41 segundos por tiro.
- Los cartuchos son cargados por cuatro obreros que deben realizar el carguío de forma manual. Se asignan dos trabajadores más al carguío del explosivo encartuchado, pues la dificultad de la operación y el cansancio producido por las actividades diarias provocan que a medida que se cargan los tiros, el tiempo empleado aumente. Así, se asigna más personal para mantener un ritmo constante de 57 segundos por tiro.

Finalmente, en este caso particular la emulsión bombeable es superior a la emulsión encartuchada, considerando un avance por disparo superior que se traduce en más metros construidos diariamente y tiempos de carguío más bajos que entregan mayor flexibilidad a la operación.

5.3 Control de daños

Las tronaduras producen perturbaciones en el entorno donde se realizan, por lo que es necesario cuantificar su efecto y minimizarlo de ser necesario. En primer lugar, la Tabla 47 resume las máximas PPV registradas en el campo lejano para ambos explosivos, clasificadas según la unidad geotécnica presente en cada medición. Se observa que en todos los casos las vibraciones son mínimas, evitando la generación de nuevas grietas.

Tabla 47. Máximas PPV registradas en campo lejano clasificadas por UGTB.

UGTB	Distancia (m)	PPV (mm/s)	PPV _c (mm/s)	Explosivo
GES	32,0	42,20	1.912	Emultex PDBG
PEC	24,1	52,90	931	Emultex PDBG
PEK	17,4	43,34	582	Emultex PDBG
PES	20,7	120,90	460	Emultex CN
Q < S	22,8	54,40	460	Emultex CN
QIS	46,6	51,40	1.024	Emultex PDBG
ZCI	41,2	17,40	410	Emultex CN

Además, se estudian las muestras de la sobre-excavación generada en las paredes de la excavación. La Tabla 48 presenta la diferencia de los intervalos de confianza de ambas muestras, donde se determina que la emulsión bombeable genera una mayor sobre-excavación en rocas tipo III y IV, mientras que en roca tipo II presenta una leve ventaja en el mejor de los casos.

Tabla 48. Diferencia de intervalos de confianza de sobre-excavación entre explosivos.

Tipo de Roca	Emultex PDBG (excedente)	Emultex CN (excedente)	Diferencia (excedente)
II	53 – 72 %	60 – 82 %	-29 a 12%
III	56 – 71 %	33 – 41 %	15 a 38%
IV	51 – 69 %	36 – 45 %	6 a 33%

En ambas muestras la sobre-excavación es excesiva, superándose el 25% de excedente normalmente considerado como el límite superior en la mayoría de las faenas. Esta mala implementación de las tronaduras no está sujeta a los factores de carga, pues se demostró que para un mismo consumo de explosivo por tonelada de roca removida fue posible obtener buenos y malos resultados. Además, los tiros de contorno son cargados con Softron, producto especialmente fabricado para controlar el daño en las inmediaciones de la excavación, por lo que el explosivo queda descartado como el causante de dichos excedentes.

Finalmente, las vibraciones registradas indican que no existen perturbaciones en las inmediaciones de las tronaduras, por lo que la cantidad de explosivo detonado por unidad de tiempo no supera los límites recomendados. Por esta razón, los daños excesivos se deben al ineficiente control de las operaciones en terreno:

- Perforaciones desviadas al utilizar equipos demasiado pequeños como para perforar adecuadamente en frentes de gran tamaño.
- Perforaciones desviadas y de largos variables al no existir un protocolo de medición que permita corroborar la implementación de los diseños.
- Diseños inadecuados con burdens y espaciamientos demasiado pequeños, con tiros muy cercanos a los contornos. Estos diagramas provocan que se anule el efecto atenuante del Softron cargado en cajas y coronas.

Al considerar los daños generados en las inmediaciones de la excavación, se recomienda utilizar Emultex PDBG solamente si la perforación fue implementada correctamente, pues de lo contrario existirá una alta probabilidad de sobre-excavar de forma excesiva.

5.4 Gases tóxicos

La ventilación de los gases tóxicos es vital para la operación, pues permite continuar el ciclo de construcción de un túnel sin exponer a los trabajadores a los graves problemas de salud. Actualmente, las condiciones de la mina no permiten un seguimiento completo de la liberación de los gases, por lo que una vez pasado un tiempo mínimo de 30 minutos se debe evaluar si el sector se encuentra apto para la siguiente etapa de trabajo.

La Tabla 49 resume las diferencias en los intervalos de confianza de las muestras recolectadas para ambos explosivos, de donde se obtiene que en promedio el Emultex PDBG puede tardar entre 6 minutos menos y 8 minutos más.

Tabla 49. Diferencia de intervalos de confianza de ventilación requerida por explosivo.

Explosivo	Ventilación (minutos)
Emultex PDBG	57 - 65
Emultex CN	57 - 63
Diferencia	-6 a 8

Dependiendo de la ubicación de cada tronadura, los tiempos de traslado para llegar a dicho sector y comprobar la calidad del aire pueden ser muy diferentes. Esta condición, junto con el tiempo mínimo de 30 minutos que debe ser respetado antes de acercarse a medir, provocan que los tiempos de ventilación registrados no representen el comportamiento real dentro de la mina.

Además, se entiende que a mayor cantidad de explosivo más alta será la concentración de gases generados por la tronadura; sin embargo, los resultados no permiten corroborar dicha tendencia. Así, las condiciones inherentes a la operación limitan el registro apropiado de la ventilación requerida para cada producto.

Si bien el fabricante afirma que al detonar la emulsión bombeable los gases tardan aproximadamente 30 minutos en ventilarse, ambas muestras poseen una media similar de 60 minutos, por lo que no es posible determinar una ventaja significativa que favorezca a un determinado explosivo.

5.5 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales en la mina corresponden a todas las características de la atmósfera dentro de la faena cuyas propiedades es imposible o, en el mejor de los casos, muy difícil de modificar.

En primer lugar, se tienen las altas temperaturas sujetas a la calidad del sistema de ventilación implementado. Si bien existen sectores que permiten una operación más amena para los trabajadores, la temperatura promedio varía entre los 25 y los 35°C, pues es inevitable que los frentes de trabajo, al encontrarse en construcción, no posean todos los implementos de ventilación necesarios para la generación de una atmósfera más limpia y fresca.

Debido a lo anterior, existen ciertas consideraciones que deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar el sistema de carguío de explosivo:

- Altas temperaturas pueden desestabilizar la composición de un explosivo, principalmente si se encuentra encartuchado. Además, este tiende a exudar cuando se almacena en sectores mal ventilados, situación que ha sido observada en la mina.
- Los equipos de carguío mecanizado transportan químicos cuyas características no se ven afectadas por la temperatura de forma tan inmediata, dado que los contenedores en los que se encuentran evitan una exposición intensiva a los factores ambientales. Además, los equipos UBT pueden ser estacionados en sectores habilitados que se encuentren debidamente ventilados, a diferencia de los explosivos encartuchados que están sujetos a la ubicación del polvorín.
- La emulsión bombeable es fabricada in-situ, es decir, al momento de cargar un frente, por lo que es posible adaptar el producto final a la temperatura del sector para obtener el explosivo requerido según las condiciones de dicha operación.
- El equipo de carguío mecanizado funciona con motor diésel, por lo que genera gases que contaminan el aire y aumentan su temperatura; sin embargo, al momento del carguío el motor se encuentra apagado y el sistema de bombeo funciona solamente con energía eléctrica, haciendo que la exposición a los gases de combustión sea mínima.

Como se puede observar, la temperatura es un factor que debe ser considerado al momento de seleccionar el sistema de carguío de explosivo. Depende fuertemente de las condiciones de cada faena, por lo que al tener en cuenta las altas temperaturas y la baja disponibilidad de ventilación en la mina Chuquicamata Subterránea, el Emultex PDBG es más recomendable.

Finalmente, la humedad y la presencia de agua son otras condiciones ambientales que deben ser consideradas cuando se debe seleccionar entre un sistema de carguío mecanizado o uno manual. Es sabido que el agua puede desestabilizar un explosivo al momento de cargar un frente; sin embargo, las emulsiones son especialmente fabricadas para soportar dicha exposición y, además, remover el agua de los pozos debido a la diferencia de densidades.

Ambos explosivos estudiados, el Emultex PDBG y el Emultex CN, se adaptan sin problemas al agua presente en los frentes, por lo que la única diferencia mencionable corresponde a la mayor facilidad que entrega la emulsión bombeable para cargar los tiros y desalojar el agua, mientras que para el carguío manual se requiere de un mayor esfuerzo físico.

5.6 Condiciones de seguridad

Ambas emulsiones estudiadas poseen la capacidad de detonar a grandes velocidades, lo que las convierte en sustancias altamente peligrosas de manejar, almacenar y transportar. Las características principales de cada producto se detallan a continuación.

- El ingreso del explosivo desde superficie hasta el polvorín es realizado con camionetas y pequeños camiones polvorineros, lo que limita la cantidad transportada y expone de forma excesiva a los trabajadores. La emulsión bombeable es ingresada en camiones de gran capacidad que permiten el traslado de las sustancias por separado, disminuyendo enormemente el riesgo inherente al transporte de agentes explosivos.
- Durante la manipulación del explosivo encartuchado, existe el riesgo de dañar la envoltura o, en casos más extremos, entrar en contacto con la sustancia exudada si las condiciones atmosféricas no son las adecuadas. Por otro lado, los trabajadores jamás entran en contacto directo con la emulsión bombeable.
- Los agentes explosivos son capaces de resistir choques y golpes sin mayores problemas; sin embargo, la emulsión bombeable presenta una ventaja pues sus componentes no son intrínsecamente explosivos y el producto final solamente es fabricado al estar la manguera dentro de los tiros. Así, esta sustancia no se encuentra expuesta a las condiciones peligrosas del transporte de suministros.
- El almacenamiento de los explosivos encartuchados se realiza en el polvorín, el cual debe contar con la capacidad adecuada, siendo necesaria además la implementación de un sistema contra incendios que permita evitar una catástrofe. Por otro lado, los aditivos de la emulsión bombeable representan un peligro mucho menor al momento de existir cualquier indicio de incendio dentro de la mina, pues no son explosivos hasta haber formado la mezcla. Además, su transporte y almacenaje no requiere de espacio extra en el polvorín, pudiendo ser ubicados en el sector destinado a los UBT.

La manipulación, el transporte y el almacenaje del Emultex PDBG presentan mejores condiciones de seguridad, al compararlas con aquellas asociadas al Emultex CN.

5.7 Problemas de suministro

El suministro de los explosivos dentro de una faena minera es considerado una de las actividades más relevantes, pues determina el ritmo de trabajo en un ciclo de desarrollo horizontal. Los factores a tener en cuenta son:

- **La cantidad de explosivo disponible:** Si bien en las faenas mineras existe un sistema de logística que permite mantener un stock suficiente de todos los suministros, pueden generarse eventualidades cuando el polvorín no ha sido mantenido apropiadamente, el equipo de carguío mecanizado no cuenta con insumos suficientes o cuando una camioneta polvorinera no posee la cantidad y el tipo adecuado de explosivo en el cajón de almacenaje, por lo que debe reabastecerse. Esta actividad involucra grandes pérdidas de tiempo si no son previstas adecuadamente.
- **Medios de transporte disponibles:** Los equipos de carguío mecanizado y las camionetas polvorineras están sujetas a fallas debido a las condiciones del terreno, capacidad de los operadores y calidad de sus componentes. En particular, los equipos UBT requieren de un mantenimiento especializado al poseer la fábrica de emulsión bombeable, pero al ser diseñados específicamente para minería subterránea, soportan mejor los daños generados por el polvo, la humedad, y las diferentes sustancias químicas inherentes a toda obra de construcción subterránea.
- **Transporte eficaz:** El tiempo de traslado requerido por los diferentes equipos se encuentra sujeto a su velocidad y las distancias recorridas. Normalmente, los equipos UBT son más lentos que las camionetas y poseen menor maniobrabilidad, por lo que es común que tarden más en arribar a un determinado sector.
- **Interferencias con la operación:** El suministro de los explosivos implica operar equipos dentro de la mina. Estos ocupan espacio que puede estar destinado a otras actividades y, además, interferir el movimiento de personal y otros equipos tales como perforadoras o manipuladores telescópicos en un determinado sector. Por esta razón es necesario coordinar bien las etapas de un ciclo de desarrollo horizontal, especialmente al trabajar con equipos de mayor tamaño, como es el caso de los UBT.

Considerando todo lo anterior, la selección del sistema de carguío dependerá de las características de diseño y logística dentro de una mina. Por lo tanto, es recomendable utilizar equipos UBT para cargar Emultex PDBG siempre y cuando la operación lo permita.

6 Conclusiones y recomendaciones

Debido al desconocimiento existente sobre el impacto real que provoca el carguío mecanizado en el desarrollo horizontal de una faena minera, se registraron los desempeños de las tronaduras realizadas en la mina Chuquicamata Subterránea.

De acuerdo con la teoría estudiada, las emulsiones poseen una buena capacidad de fragmentar la roca y además mantienen sus propiedades al entrar en contacto con el agua. Junto con lo anterior, el carguío mecanizado posibilita variar la densidad del explosivo y ocupar todo el volumen disponible en un tiro, lo que conlleva a un mejor aprovechamiento de la energía generada por disparo. Así, la hipótesis de esta investigación es que el Emultex PDBG entrega mayor flexibilidad operacional, pues permite adaptarse a las condiciones presentes al momento del carguío.

Con el fin de corroborar o refutar lo anterior, se recabaron muestras que permitieran definir la influencia de las emulsiones bombeable y encartuchada en el ritmo de trabajo, los daños generados, la ventilación requerida y el costo de perforación y tronadura.

En primer lugar, se determinó que el Emultex PDBG permite obtener un avance por disparo promedio de 3,70 m, superior a los 3,60 m alcanzados en promedio por el Emultex CN. Además, los tiempos de carguío por tiro al escoger el carguío mecanizado son de 41 segundos en promedio, muy superior a los 57 segundos obtenidos con el carguío manual. Así, se determinó que el ritmo de trabajo alcanzado con la emulsión bombeable es mucho mejor que aquel obtenido con la emulsión encartuchada.

Al comparar los costos de perforación y tronadura luego de cargar con ambos explosivos, se concluye que el Emultex PDBG presenta un costo en USD/m menor. Además, el avance superior obtenido por disparo al cargar con emulsión encartuchada permite completar la construcción de una labor en un menor tiempo, lo que se traduce en menores costos diarios para la faena.

El control de daños existente en la mina permitió determinar que las vibraciones registradas en el campo lejano (geófono ubicado entre 15 a 45 m de distancia del frente tronado) no generan nuevas fracturas en las inmediaciones de la excavación, por lo que la secuencia de disparo permite detonar la cantidad apropiada de explosivo por unidad de tiempo. Por otro lado, las muestras de sobre-excavación indican un daño excesivo en los contornos, superándose el 25% máximo considerado normalmente. Los excedentes alcanzados son producto de una mala perforación y malos diseños, pues al calcular factores de carga apropiados y cargar Softron en los contornos la sobre-excavación debería ser mínima independiente del tipo de emulsión seleccionada.

Finalmente, la ventilación de ambos explosivos es similar, tardando en promedio 60 minutos en disiparse los gases tóxicos generados. Cualquier seguimiento en tiempo real de este proceso es actualmente imposible de realizar, pues las mediciones deben llevarse a cabo luego de un tiempo de espera mínimo de 30 minutos y, además, los tiempos de traslado a los diferentes sectores hacen que los datos registrados no sean necesariamente representativos. Por todo lo anterior, se considera que ambos explosivos generan una cantidad de gases similar que debería ser liberada en un tiempo no superior a una hora.

Si bien conocer los aspectos técnicos del Emultex PDBG es importante, la verdadera ventaja que presenta este explosivo es la seguridad y flexibilidad que entrega a la operación.

Las condiciones ambientales influyen levemente en el desempeño del Emultex PDBG, pues las altas temperaturas y la humedad presente en la atmósfera no alteran sus propiedades. Esto se debe a que los aditivos necesarios para su fabricación se encuentran aislados de cualquier interacción no planificada antes del carguío, cuando el explosivo es fabricado. El caso del Emultex CN es diferente debido a que existe la posibilidad de que este producto exude si no se encuentra debidamente protegido de las condiciones ambientales presentes en la mina.

Suministrar el explosivo bombeable presenta ciertas ventajas por sobre los cartuchos, dado que los equipos UBT son capaces de cargar un mínimo de tres frentes antes de necesitar reabastecerse y el ingreso de los aditivos a la mina es realizado con camiones que descargan dichos productos de forma mecanizada. Por otro lado, todo el suministro de los cartuchos está sujeto al espacio disponible en las camionetas y la disponibilidad de mano de obra al momento de realizar los traslados. La única desventaja presente al escoger el carguío mecanizado se presenta cuando no se tiene un control eficiente de la disponibilidad de equipos, por lo que es necesaria una flota debidamente calculada para mantener un suministro sin interferencias.

En cuanto a las condiciones de seguridad, el Emultex PDBG es mucho más seguro de manipular pues los obreros jamás entran en contacto directo con el explosivo. También es más seguro de transportar, ya que los equipos UBT trasladan los aditivos en contenedores que mantienen los productos debidamente segregados, siendo mezclados al momento de cargar un frente. Almacenar estos aditivos es más seguro, debido a que no se encuentran sujetos a la posición del polvorín, donde cualquier incidente con los otros productos almacenados puede provocar una emergencia de consecuencias fatales dentro de cualquier faena minera.

En conclusión, se corrobora la hipótesis debido a que el Emultex PDBG no solo posibilita trabajar de forma eficiente desde un punto de vista técnico-económico, sino que además permite realizar el ciclo de desarrollo horizontal de forma más rápida y segura.

Como consideración final se propone realizar cambios en la operación que permitan generar muestras más representativas:

- Controlar la perforación realizada para asegurar que los tiros posean la longitud e inclinación apropiada.
- Seleccionar adecuadamente los explosivos, utilizar tacos en todos los tiros de un diagrama e implementar diseños que aprovechen adecuadamente la energía generada.
- Capacitar al personal para que conozca el impacto real de cada operación unitaria en la construcción de túneles y galerías.
- Generar protocolos de muestreo que registren la mayor cantidad de información posible, de la forma adecuada y en el momento adecuado.

En suma, se recomienda realizar nuevamente esta investigación, pero en una faena que posea metodologías de control y monitoreo apropiadas, permitiendo así obtener resultados más confiables y representativos que aquellos recabados en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

7 Glosario

Agente explosivo: Mezcla de sustancias combustibles y oxidantes que no son intrínsecamente explosivas por separado.

ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil): Agente explosivo granular obtenido al mezclar nitrato de amonio y combustible diésel, utilizado en perforaciones secas.

ANFO pesado: Agente explosivo constituido por una mezcla de emulsión y ANFO.

Arranque: Extracción de roca desde el macizo para generar una excavación.

Avance: En desarrollo, es la longitud excavada en la roca, pudiendo ser horizontal o vertical.

Balance de oxígeno: Cantidad de oxígeno considerada en la fabricación de un explosivo, la cual busca respetar las proporciones estequiométricas ideales para generar la combustión completa. Puede existir un balance negativo (déficit) o un balance positivo (exceso).

Block/Panel Caving: Método de explotación minero donde se induce el hundimiento de la roca a través de un corte basal. El hundimiento se propaga en la medida que la roca es extraída utilizando la infraestructura de producción.

Burden: En tronadura, es la mínima distancia desde un tiro o parada de tiros hacia la cara libre.

Cajas: Perforaciones en la pared de un túnel o una galería, ya sean horizontales, inclinadas o verticales.

Cara libre: Superficie de roca hacia la cual un tiro o parada de tiros puede romper con facilidad.

Carga: Columna de explosivo y cebo dentro de un tiro.

Cargar: Acción de introducir o ubicar el explosivo y cebo en el interior de un tiro.

Cartucho: Explosivo envuelto en papel encerado o plástico, generalmente de forma cilíndrica.

Cebo: Carga formada al acoplar un iniciador con un detonador, cuya función es provocar la iniciación de la detonación de una columna explosiva. También llamado prima o carga de fondo.

Columna de explosivo: Sustancia colocada por encima de la carga de fondo y que llega hasta el taco.

Combustión: Reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.

Confinamiento: Grado de compactación de una carga explosiva en el interior de un tiro.

Contorno: Perfil final proyectado en una excavación.

Cordón detonante: Cable con cubierta de plástico y núcleo de un explosivo potente de alta velocidad de detonación usado para iniciar las cargas de explosivo y transmitir la detonación.

Corona: Tiros distribuidos en la parte superior de una galería o túnel.

Deflagración: Reacción explosiva rápida, aunque subsónica, acompañada por la formación de gases y presión de barreno, pero sin choque.

Desarrollo: Excavación realizada en roca que no posee material valioso, mediante la perforación de tiros y tronadura de ellos, cualquiera sea su dirección, tamaño y forma de su sección. Tiene la finalidad de poder acceder a un cuerpo mineralizado.

Detonación: Reacción química que consiste en la propagación de una onda de choque a través del explosivo acompañada por la liberación de una gran cantidad de gases a alta presión y temperatura.

Detonación por simpatía: Activación de un material explosivo por medio del impulso transmitido por la detonación de otra carga a través del aire, tierra o agua.

Detonador: Accesorio de tronadura fabricado de una cápsula de aluminio o cobre cuyo interior contiene el explosivo primario que puede ser activado por el fuego, electricidad u onda detonante. Se diferencian según el retardo asociado y su impulso de encendido.

Diagrama de disparo: Plan de disposición geométrica de los tiros a ser perforados junto con su secuencia de activación.

Diámetro crítico: Diámetro por debajo del cual no tiene lugar la detonación estable de una carga explosiva.

Dinamita: Explosivo cuya base es la nitroglicerina, mezclada con sales de nitrato de amonio, carbonato de calcio y aserrín, entre otros.

Disparo: Detonación de cualquier explosivo mediante iniciadores o cordones detonantes apropiados.

Emulsión: Agente explosivo donde el nitrato de amonio está disuelto en agua y en forma de pequeñas gotas rodeadas de un combustible.

Espaciamiento: Distancia entre dos tiros de una corrida o parada.

Esponjamiento: Aumento del volumen de una roca después de ser arrancada del macizo.

Explosión: Proceso termoquímico en el que una mezcla de gases, líquidos o sólidos reacciona con la formación instantánea de gases a alta presión y temperatura.

Explosivo: Sustancia o mezcla de sustancias que por liberación súbita de su energía produce una sobrepresión en sus alrededores seguida de llama y ruido.

Factor de carga: Indicador de cuánto explosivo se utiliza por disparo, calculado como los gramos de explosivo necesarios para remover una tonelada de roca.

Falla: Discontinuidad planar en la roca producida por el quiebre con desplazamiento de un lado respecto al otro.

Fortificación: Operación unitaria donde se reparan y estabilizan las paredes de la excavación para permitir un trabajo seguro dentro de esta.

Fractura: Plano de discontinuidad o rotura de la roca dentro de un macizo. También llamado grieta.

Fragmentación: Trozos de roca obtenidos luego de la tronadura, medidos en cantidad y tamaño.

Frente: Pared normal a las cajas, piso y techo de cualquier labor donde se realizan las actividades de perforación y disparo para continuar su desarrollo.

Galería: Excavación hecha en la roca, normalmente horizontal o con pendiente suave. No conecta con la superficie y su función principal es unir diferentes sectores dentro de la mina.

Greda: Arcilla húmeda encartuchada utilizada como taco.

Hidrogel: Fluido explosivo constituido por una solución acuosa de nitrato de amonio sensibilizada por un combustible y espesada con aditivos gelificantes. También llamado acuagel.

Iniciación: Acto de detonar un explosivo por medio de un detonador o cualquier otro accesorio.

Iniciador: Accesorio de tronadura empleado para hacer detonar un explosivo.

Macizo rocoso: Conjunto de bloques de matriz rocosa y de discontinuidades. Mecánicamente es un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo.

Marina: Roca quebrada que resulta de la acción de los disparos en general. Puede o no ser mineralizada.

Microesferas: Pequeñas esferas de vidrio o plástico que se adicionan a los explosivos para aumentar la sensibilidad.

Mineral: Elemento o compuesto químico formado mediante un proceso inorgánico natural que constituye las rocas de la corteza terrestre. Desde un punto de vista económico, es toda porción de un yacimiento que paga sus costos de producción y el costo de oportunidad

Nitrato de amonio: Sal inorgánica de color blanco utilizada en la fabricación de agentes explosivos industriales.

Onda aérea: Sobrepresión del aire que se produce durante la voladura. También llamado airblast.

Onda de detonación: Onda de choque que se propaga por la carga explosiva a una velocidad superior a la del sonido en ese medio.

Parada: Hilera de tiros largos perforados en abanico y en forma perpendicular a las cajas de una galería.

Pentrita (PETN): Sustancia explosiva de alta potencia empleada en los cordones detonantes y como carga base de los detonadores.

Perforación: Operación que emplea empuje, rotación y percusión con el fin de generar un hueco en la roca.

Polvorín: Recinto portátil o construcción fija utilizada para almacenar explosivos y accesorios en estocadas o frontones acondicionados para tal efecto en los distintos niveles de la mina.

Potencia: Consiste en la razón entre la energía calórica liberada por un explosivo y el tiempo transcurrido.

Preparación minera: Toda excavación que se realiza al interior del cuerpo mineralizado y tiene la función de poder facilitar el arranque, la selección y el transporte del mineral.

Presión de barreno: Presión que los gases calientes de la detonación ejercen sobre las paredes de un tiro.

Presión de detonación: Presión generada durante el momento de la detonación de una carga explosiva, la cual se propaga a través de la columna.

Presión de muerte: Presión a la cual el explosivo pierde su sensibilidad para detonar debido a una densidad de fabricación demasiado alta.

Prill: Pequeña esfera porosa de nitrato de amonio.

Rainura: Conjunto de tiros de un diagrama que son comúnmente perforados en el centro de la labor, cuya función es crear la cara libre en un disparo confinado. También llamado corte o cuele.

Retardo: Desfase de tiempo en milisegundos con que se fabrican diversos accesorios de voladura. Permite determinar la secuencia de detonación de los tiros.

Roca: Cualquier agregado o masa mineral formado naturalmente en la corteza terrestre.

Rompedor APD (Alto Poder de Detonación): Explosivo fabricado en forma de conos o cilindros utilizados como carga de fondo o para fragmentar sobre-tamaños.

Sensibilidad: Medida de la susceptibilidad de un explosivo para detonar cuando recibe un impulso externo subsónico. También medida de la disponibilidad de un explosivo para propagar la detonación.

Sensibilizante: Ingrediente utilizado en la fabricación de un explosivo para aumentar la facilidad a la iniciación o propagación de las reacciones.

Sobre-excavación: Arranque de roca producido fuera del límite teórico de actuación de la tronadura. También llamado sobre-quebre.

Taco: Tapón en un tiro con carga explosiva, compuesto de grava, gravilla o arcilla cuya finalidad es contener los gases generados para obtener un mayor rendimiento de la tronadura.

Tiro: Hueco cilíndrico perforado en la roca con cualquier tipo de maquinaria para alojar explosivo. También llamado barreno, perforación o pozo.

Tiro cargado: Perforación utilizada en el desarrollo de labores mineras y explotación de minerales, el cual es cargado con explosivo y disparado para lograr el arranque de la roca.

Tiro hueco: Perforación hecha normalmente en el centro de un diagrama de disparo, como una pequeña cara libre, o línea de menor resistencia. No se carga con explosivo.

Tiro quedado: Explosivo que no detonó según lo previsto y donde toda la columna explosiva o parte de ella permanece en el tiro.

Tronadura: Fragmentación de la roca y otros materiales sólidos mediante explosivos confinados en barrenos o adosados a su superficie. También llamado voladura.

Túnel: Excavación subterránea lineal normalmente horizontal o con pendiente suave, con salida a superficie.

UBT (Unidad de Bombeo en Túneles): Equipo utilizado para realizar el carguío mecanizado de la emulsión bombeable en labores horizontales.

UGTB (Unidad Geotécnica Básica): Sector del macizo rocoso que presenta características geológicas y geomecánicas definidas.

Velocidad de detonación (VOD): Velocidad a la que la onda de detonación se propaga en una carga de explosivo.

Velocidad de partícula (PPV): En inglés Peak Particle Velocity, es la velocidad a la que una partícula del terreno se mueve desde su posición de reposo.

Yacimiento: Concentración de mineral en la corteza terrestre que puede ser explotada con beneficio económico.

Zapatera: Tiros hechos en la parte inferior del frente de cualquier tipo de labor, sea horizontal o inclinada.

8 Bibliografía

- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*.
- Budin, M. (2009). The Benefits of Bulk Emulsion Explosives in Underground Applications through String Loading. Denver: Dyno Nobel.
- Codelco. (2009). *Estudio de Prefactibilidad PMCHS*. División Codelco Norte: Vicepresidencia Corporativa de Proyectos.
- Codelco. (2016). *Memoria Anual*. Santiago de Chile: Codelco Casa Matriz.
- Codelco. (03 de octubre de 2017). *División Chuquicamata*. Obtenido de Operaciones Codelco: https://www.codelco.com/division-chuquicamata/prontus_codelco/2016-02-25/122529.html
- Enaex S.A. (2005). *Manual descriptivo del equipo UBT*. Santiago de Chile: Gerencia de Ingeniería Enaex S.A.
- Enaex S.A. (2016). Guía del Explosivista. Santiago de Chile: Enaex Servicios S.A.
- Enaex S.A. (2016). *Memoria Anual*. Santiago de Chile: Enaex Casa Matriz.
- Enaex S.A. (04 de octubre de 2017). *Compañía*. Obtenido de Enaex S.A. Productos y servicios: <http://www.enaex.com/compania/>
- Enaex S.A. (02 de octubre de 2017). *Permicarb*. Obtenido de Enaex S.A. Productos y servicios: <http://www.enaex.com/productos/permicarb/>
- Enaex S.A. (30 de enero de 2018). *Emultex PDBG*. Obtenido de Enaex S.A. Productos y servicios: <http://www.enaex.com/productos/emultex-pdbg/>
- Enaex S.A. (s.f.). *Emulsiones Envasadas y a Granel*. Santiago de Chile: Enaex Servicios S.A.
- Enaex S.A. (s.f.). *Manual de Tronadura*. Santiago de Chile: Gerencia Técnica Enaex S.A.
- HSE Safety. (07 de abril de 2018). *MSA ALTAIR 4X Multi Gas Detector*. Obtenido de Gas Detectors: <https://www.safety.kiwi/shop/Gas+Detection/MSA+ALTAIR+4X+Multi+Gas+Detector+LELO2COH2S.html>
- Hung, J., Monsees, J., Munfah, N., & Wisniewski, J. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels*. Nueva York: National Highway Institute.
- International Mining. (07 de febrero de 2018). *Developing alternative explosives: blasting without NOx hazard*. Obtenido de International Mining News: <https://im-mining.com/2014/10/27/developing-alternative-explosives-blasting-without-nox-hazard/>
- Lasagna, G. (2016). Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. División Chuquicamata: Gerencia Minería Subterránea.

- Mining & Construction. (03 de octubre de 2017). *The Transformation of a Giant*. Obtenido de Mining & Construction Atlas Copco: <https://miningandconstruction.com/mining/the-transformation-of-a-giant-underground-3255/>
- Pernia Llera, J., López Jimeno, C., López Jimeno, E., & Ortiz de Urbina, F. (1994). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Rocher, W. (2012). *Secuenciamiento Óptimo de Preparación Minera Subterránea*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Satici, Ö. (2006). *Drilling and blasting as a tunnel excavation method*. Ankara.
- Vargas, J., Koppe, J., Pérez, S., & Hurtado, J. (2015). Planning Tunnel Construction Using Markov Chain Monte Carlo (MCMC). *Mathematical Problems in Engineering*.
- VP Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. (septiembre de 2017). Disposición de salidas de emergencia y ubicación de refugios. *Infraestructura de nivel 1*. Calama, El Loa, Chile.

9 Anexo y apéndices

9.1 Anexo A: Aceros de perforación

A continuación se detallan los aceros de perforación utilizados en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. La Tabla 50 presenta las barras y los bits empleados junto con sus dimensiones y el consumo durante el mes de diciembre del 2017.

Tabla 50. Aceros de perforación utilizados en el PMCHS.

Ítem	Consumo mensual	Uso
Barra 1,50 m T38	19	Fortificación y desarrollo
Barra 3,15 m T38	0	Fortificación y desarrollo
Barra 3,70 m SR35	2	Fortificación y desarrollo
Barra 4,3 m R35-H35-T38	48	Fortificación y desarrollo
Barra 4,3 m SR35-T38	2	Fortificación y desarrollo
Barra 4,9 m SR35-H35-T38	7	Fortificación y desarrollo
Barra 5,6 m SR35-T38	0	Fortificación y desarrollo
Bit 45 mm BAL	124	Fortificación
Bit 45 mm ESF	164	Fortificación
Bit 48 mm BAL	177	Desarrollo
Bit 48 mm ESF	0	Desarrollo
Bit 51 mm BAL RS35	0	Instalación geófonos
Bit 64 mm T38	30	Desarrollo (escareado) y VCR
Bit 76 mm T38	0	Instalación geófonos

Además, la Tabla 51 presenta la copla, los culatines y los cabezales de escareado utilizados.

Tabla 51. Implementos de perforación utilizados en el PMCHS.

Ítem	Consumo mensual	Uso
Copla T38	59	Fortificación y desarrollo
Culatín COP 1838 38 mm T38 4,35 m	23	Fortificación y desarrollo
Culatín COP 1838 38 mm T45 5,45 m	0	Fortificación y desarrollo
Culatín COP 1838 38 mm T45 5,65 m	7	Fortificación y desarrollo
Culatín HLX 5,00 m T38	46	Fortificación y desarrollo
Dome Bit 102 mm BAL T38	0	Desarrollo
Dome Bit 102 mm ESF T38	16	Desarrollo

9.2 Anexo B: Diseños utilizados en el desarrollo horizontal

Todos los diagramas de disparo utilizados en el desarrollo horizontal presentan las siguientes características:

- Longitud de perforación de 3,9 m.
- Tiros cargados de 48 mm de diámetro.
- Tres tiros huecos de 102 mm de diámetro.

En primer lugar, la Tabla 52 presenta las principales características de los diseños utilizados de anchos no superiores a 4,20 m, variando el tipo de roca presente y el explosivo utilizado como carga de columna.

Tabla 52. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 1).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
4,00	4,10	IV	43	976,6	518,8
4,00	4,10	III	45	1.037,6	549,3
4,00	4,10	II	48	1.129,2	592,1
4,20	4,10	IV	42	901,0	482,5
4,20	4,10	III	50	1.092,8	581,3
4,20	4,10	II	53	1.156,8	616,2
4,20	4,25	IV	46	964,5	510,3
4,20	4,25	III	49	1.043,1	555,2
4,20	4,25	II	51	1.099,1	572,0

La Tabla 53 presenta los diseños cuyo ancho varía entre 4,50 y 5,00 m.

Tabla 53. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 2).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
4,50	4,50	IV	47	874,9	692,1
4,50	4,50	III	50	944,2	746,4
4,50	4,50	II	51	954,0	751,4
4,70	4,60	IV	50	884,3	699,1
4,70	4,60	III	52	930,6	736,2
4,70	4,60	II	56	1.023,2	805,6
5,00	5,00	IV	56	824,8	656,7
5,00	5,00	III	60	904,9	716,7
5,00	5,00	II	64	985,0	776,8
5,00	5,50	IV	57	782,6	618,8
5,00	5,50	III	61	840,8	666,1
5,00	5,50	II	66	931,8	735,3
5,00	5,75	IV	60	772,9	612,8
5,00	5,75	III	63	825,2	654,6
5,00	5,75	II	71	964,4	759,0

La Tabla 54 presenta los diseños con anchos de 5,20 m.

Tabla 54. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 3).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
5,20	5,35	IV	61	802,4	636,9
5,20	5,35	II	63	838,4	665,7
5,20	5,35	II	68	928,3	734,0
5,20	5,60	V	49	835,3	642,8
5,20	5,60	IV	60	776,9	615,3
5,20	5,60	III	65	862,8	680,6
5,20	5,60	II	70	948,8	745,9
5,20	5,85	IV	62	763,4	605,5
5,20	5,85	II	64	796,3	628,5
5,20	5,85	II	72	927,9	730,5
5,20	6,00	IV	62	744,3	590,3
5,20	6,00	III	71	888,7	699,4
5,20	6,00	II	77	981,8	773,2
5,20	6,60	IV	67	737,9	583,3
5,20	6,60	III	70	793,3	624,2
5,20	6,60	II	73	837,1	659,2

La Tabla 55 presenta los diseños de ancho 5,50 m y 5,70 m.

Tabla 55. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 4).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
5,50	5,50	IV	57	711,5	562,5
5,50	5,50	III	61	777,6	612,2
5,50	5,50	II	64	827,3	651,9
5,50	5,75	IV	65	781,8	617,2
5,50	5,75	III	68	841,9	661,5
5,50	5,75	II	71	876,8	690,0
5,70	5,60	IV	66	790,3	624,1
5,70	5,60	III	69	837,3	658,6
5,70	5,60	II	74	915,7	721,3
5,70	5,85	IV	67	771,5	609,4
5,70	5,85	III	69	801,5	630,4
5,70	5,85	II	73	861,6	678,4
5,70	6,00	IV	69	769,8	608,8
5,70	6,00	III	74	842,9	664,4
5,70	6,00	II	79	916,1	720,0

La Tabla 56 presenta los diseños cuyos anchos van de 6,00 a 6,60 m de longitud.

Tabla 56. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 5).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
6,00	6,00	III	79	889,8	953,7
6,20	6,35	III	73	737,3	579,7
6,50	5,25	IV	69	771,5	610,1
6,50	5,25	III	73	830,1	654,1
6,50	5,25	II	77	888,8	698,1
6,50	6,00	IV	71	711,0	559,5
6,50	6,00	III	75	752,0	592,9
6,50	6,00	II	78	790,5	621,1
6,60	6,30	IV	78	712,6	563,3
6,60	6,30	III	82	760,7	599,4
6,60	6,30	II	85	796,9	628,3
6,60	6,50	IV	81	725,7	574,0
6,60	6,50	III	83	749,0	590,3
6,60	6,50	II	86	784,0	618,3

La Tabla 57 presenta los diseños de ancho 6,70 a 7,20 m.

Tabla 57. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 6).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
6,70	5,35	IV	73	790,3	622,7
6,70	5,35	III	76	832,2	653,5
6,70	5,35	II	80	888,0	698,1
6,70	6,60	IV	80	701,7	552,3
6,70	6,60	III	87	781,0	613,5
6,70	6,60	II	93	848,9	665,5
6,70	6,85	III	80	700,1	549,6
7,00	4,15	IV	59	775,3	613,4
7,00	4,15	III	62	827,0	651,3
7,00	4,15	II	67	909,7	716,7
7,20	4,25	IV	60	752,4	592,1
7,20	4,25	III	68	880,0	693,5
7,20	4,25	II	73	961,7	755,7
7,20	7,10	III	87	689,3	356,4

La Tabla 58 presenta los diseños con anchos entre 7,70 y 8,70 m.

Tabla 58. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 7).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
7,70	6,30	IV	84	664,4	524,1
7,70	6,30	III	90	726,3	571,6
7,70	6,30	II	97	798,6	627,3
7,70	7,60	III	103	732,1	573,0
7,75	5,85	III	85	772,8	605,0
8,20	5,85	III	85	722,0	565,5
8,30	7,28	IV	103	670,9	528,5
8,30	7,28	III	107	704,1	553,3
8,30	7,28	II	115	770,3	604,7
8,40	8,35	IV	118	673,6	529,5
8,40	8,35	III	123	709,3	556,6
8,40	8,35	II	132	773,5	605,1
8,70	5,85	IV	95	741,5	582,2
8,70	5,85	III	100	790,7	619,5
8,70	5,85	II	109	877,2	688,4
8,70	7,35	IV	107	671,6	527,5
8,70	7,35	III	113	718,5	563,5
8,70	7,35	II	124	803,1	629,3

Finalmente, la Tabla 59 presenta los diseños cuyos anchos van de 8,86 a 12,30 m.

Tabla 59. Diseños empleados en el desarrollo horizontal del PMCHS (Parte 8).

Ancho (m)	Alto (m)	Tipo de roca	Tiros cargados	Factor de carga (g/t)	
				Emultex PDBG	Emultex CN
8,86	6,01	IV	96	710,6	560,2
8,86	6,01	III	107	814,0	639,2
8,86	6,01	II	111	849,7	667,4
9,06	6,11	IV	87	623,9	490,0
9,06	6,11	III	91	660,0	517,2
9,06	6,11	II	99	730,5	573,2
9,10	6,65	III	107	727,8	570,7
9,30	6,30	IV	93	620,2	488,6
9,30	6,30	III	99	671,4	527,9
11,30	6,00	III	112	674,7	530,0
11,57	6,00	III	112	664,7	520,5
11,83	6,00	III	112	667,1	520,4
12,09	6,00	III	115	662,4	517,5
12,30	6,00	III	119	661,9	519,5
12,30	6,35	III	134	726,7	566,5

9.3 Anexo C: Frentes de trabajo estudiados

Los frentes de trabajo estudiados durante esta investigación se presentan a continuación, detallándose además sus dimensiones.

En primer lugar, la Tabla 60 presenta los frentes asociados al sector denominado Chancado, cuya función es generar el espacio suficiente para acceder a los chancadores y descargar mineral.

Tabla 60. Frentes estudiados pertenecientes al sector Chancado del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
Acceso 01 Sala Chancado N01/S01 (RAC Norte) Apron Feeder	5,70	5,85
Acceso 01 Sala de Chancado N01/S01 Lado Este por RAC Sur	5,70	5,85
Acceso 01 Sala de Chancado N01/S01 Lado Oeste por RAC Sur	5,70	5,85
Acceso 02 Sala Chancado N01/S01 (RAC Norte)	5,70	5,85
Acceso 02 Sala Chancado N01/S01 (RAC Norte) por RAC Sur	5,70	5,85
Acceso Principal Sala Chancado N01/S01	5,70	5,85
Apron Feeder S01 (Galería Traspaso Descarga)	5,70	5,85
Frontón Inyección FR-CH-IN-S01-05	4,70	4,60
Galdes Apron S02-01 (por S03)	5,50	5,75

La Tabla 61 presenta los frentes asociados al sector Pre-Acondicionamiento, los que permiten acceder al yacimiento para fragmentarlo y facilitar su posterior extracción.

Tabla 61. Frentes estudiados pertenecientes al sector Pre-Acondicionamiento del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
Estación de Bombeo por Rampa PA 28,3	6,00	6,00
Estación de Bombeo por Rampa PA 45	6,00	6,00
Estocada EB (Desde Estocada S28,3)	6,00	6,00
Frontón CT1/FT2 (Desde Estocada S35)	6,00	6,00
Frontón RM1 (Desde Estocada S35)	6,00	6,00
Frontón SC2 por Rampa PA (E28,3)	6,00	6,00
Galería Sondaje 4 GS4 Lado Este (E28,3)	6,00	8,00
Galería Sondaje 4 GS4 Lado Oeste (E28,3)	6,00	8,00
GS-3 Este por Rampa PA E2 (E45) Sur	6,00	6,00
GS-3 Oeste por Rampa PA E2 (E45) Sur	6,00	6,00
GS-4 Lado Este por Rampa PA (E35)	6,00	6,00
GS-4 por Rampa PA (E35)	6,00	6,00
GS-5 por Rampa PA (E35)	6,00	6,00
Piscina Drenaje por Rampa PA (E28,3) PD1	6,00	6,00
Rampa PA (E28,3)	6,00	6,00
Rampa PA (E35)	6,00	6,00
Rampa PA E2 (E45)	6,00	6,00
Rampa PA E2 (E45) Sur	6,00	6,00

La Tabla 62 presenta los frentes asociados al sector denominado Transporte Intermedio, cuya función consiste en permitir el traslado de mineral desde el nivel de producción hasta el nivel de transporte principal.

Tabla 62. Frentes estudiados pertenecientes al sector Transporte Intermedio del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
BYP-TI-N03-01	5,00	5,25
FRE-TI-S03-01	4,70	4,60
Frontón Chimenea Inyección (Colectora Norte por CH-03)	4,70	4,60
Galería Correa Colectora Norte (al Norte de CH-03)	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Norte (al Norte de Correa Reversible)	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Norte (al Sur de CH-03)	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Norte (Lado Norte)	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Norte (Lado Sur)	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Sur (hacia el Norte) por S03	8,86	6,00
Galería Correa Colectora Sur (hacia el Sur) por S03	8,86	6,00
Galería Correa Intermedia S03 (Lado Este) GAL-TI-S03-01	6,50	5,25
Galería GAL-TI-N03-01	6,50	5,25
Galería GAL-TI-N03-01 (lado Oeste)	6,50	5,25
RAC-TI-N03-01	5,00	5,25
RAC-TI-N03-01 (por Colectora Norte)	5,00	5,25
Subestación Nivel 1 Sur 20253-SEE-01 (Frontón Norte)	6,00	5,00
Subestación Nivel 1 Sur 20253-SEE-01 (Frontón Oeste)	6,00	5,00
Subestación Nivel 1 Sur 20253-SEE-01 (Frontón Sur)	6,00	5,00

La Tabla 63 presenta los frentes asociados al sector denominado Infraestructura, correspondiente a las obras asociadas al sistema de transporte principal.

Tabla 63. Frentes estudiados pertenecientes al sector Infraestructura del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
Acceso a Estación de Descarga Silo 1 Sur	5,50	5,75
Acceso a Estación de Carguío Correa de Nivel 1	7,00	5,75
Acceso a Estación de Carguío Correa de Nivel 1 (cola)	7,00	5,75
Galería Correa de Nivel 1 (Lado Este) por By-Pass CNV1	8,86	6,00
Galería Correa de Nivel 1 (Lado Oeste) por By-Pass CNV1	8,86	6,00

La Tabla 64 presenta los frentes asociados al sector denominado Inyección, cuya función es ingresar aire limpio a la mina subterránea desde la superficie.

Tabla 64. Frentes estudiados pertenecientes al sector Inyección del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
Cruzado de Ventilación 3 (XC-INS-INI-03 (Este))	7,70	7,60
Frontón FR-CH-GAL-INS-S02-04 (Sur)	4,70	4,60
Frontón FR-CH-INS-S02-01	4,70	4,60
Frontón FR-CH-INS-S02-03	4,70	4,60
Frontón FR-CH-INS-S03-02	4,70	4,60
Galería Conexión Sur SNVI por GAL-INS-SUR	4,00	4,00
Galería de Inyección N02-02 (GAL-INS-N02-02)	5,20	5,10
RA-INS-N02/N03-01	5,50	5,50
Rampa Conexión Inyección Túnel N°12	5,70	5,10

Finalmente, la Tabla 65 presenta los frentes asociados al sector denominado Extracción, cuya función consiste en extraer el aire contaminado de la mina para trasladarlo a la superficie.

Tabla 65. Frentes estudiados pertenecientes al sector Extracción del PMCHS.

Frente	Ancho (m)	Alto (m)
Cruzado de Extracción 3 (XC-EXS-IN1-03 Oeste)	7,20	7,10
Frontón FR-CH-EXS-S01-01	5,20	5,60
Frontón FR-CH-EXS-S01-02	5,20	5,60
Frontón Marinas por Cabecera Sur	5,00	5,00
Galería GAL-EXS-IN1-02 por Rampa 4	4,70	4,60
Galería GAL-EXS-S01-02 (Lado Norte) por GAL-EXS-S02-01 (Norte)	4,70	4,60
Galería GAL-EXS-S01-02 (Lado Sur) por GAL-EXS-S02-01 (Norte)	4,70	4,60
Galería GAL-EXS-S02-01 (Norte)	4,70	4,60
Galería GAL-EXS-S02-02 por Fase 3 Sur	4,70	4,60
Galería GAL-EXS-S03-02 por Fase 3 Sur	4,70	4,60

9.4 Anexo D: Procedimientos de carguío de emulsión

En el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea se ha definido un protocolo de carguío para cada tipo de explosivo, el cual debe ser respetado para obtener un buen desempeño y minimizar los riesgos asociados a la manipulación de sustancias explosivas.

Los criterios de seguridad que deben cumplirse antes de iniciar el carguío de la emulsión se presentan a continuación.

- Se debe señalar el área involucrada con cenefas o letreros metálicos que restrinjan el ingreso a todo personal o equipo no autorizado.
- El punto de carguío se recibe con todos los tiros limpios (sin material remanente) para que el explosivo considerado por tiro pueda ser cargado. Además, se debe revisar que el área esté libre de obstáculos, materiales o vehículos que impidan la operación normal de carguío.
- Los productos explosivos y detonadores deben ser transportados en cubículos diferentes y separados en el vehículo de transporte de explosivos.
- Está estrictamente prohibido dejar explosivos sueltos en el área de carguío y dejar rollos de cordón detonante colgados en las paredes de la excavación, pues existe la posibilidad de provocar roces o golpes que inicien una detonación prematura.
- Durante la operación de carguío con explosivos queda estrictamente prohibido realizar otras operaciones unitarias a una distancia menor a 30 m con respecto al frente.
- Los cebos no deben ser preparados en el interior de los polvorines, sino que esto debe realizarse inmediatamente antes de ser introducido en el tiro. El lugar elegido debe estar limpio, seco, seguro y ubicado a no menos de 15 m del frente a ser cargado.
- Todos los tiros deben tener un diámetro que permita que los explosivos puedan ser insertados hasta el fondo de la perforación sin ser forzados y evitar daños en los envoltorios.
- Antes de comenzar el carguío se debe instalar el cebo al inicio de la perforación, indicando que el tiro no ha sido cargado. Por ningún motivo se debe introducir el iniciador al fondo del tiro perforado antes de iniciar el carguío de la emulsión.
- La distribución de los cebos en los tiros debe ser fiscalizada para comprobar que se encuentren ubicados según el retardo previamente establecido, con el fin de evitar alteraciones en el orden de salida.
- Las líneas de iniciación acopladas a los detonadores no eléctricos deben ser de mayor longitud que la perforación de tal forma que permita una conexión segura y sin problemas.

a) Carguío manual

El carguío de los cartuchos de emulsión se realiza de la siguiente forma, considerando etapas consecutivas.

- Se introduce el cebo al inicio de la perforación.
- Se empuja el cebo hasta el final del tiro con una barra de madera o plástico endurecido denominada taqueador.
- Los cartuchos de emulsión se van ingresando hasta completar la cantidad de explosivo considerada, empujándolos hacia el fondo del tiro con el taqueador.
- Una vez finalizado el carguío, se deben colocar los tacos.

b) Carguío mecanizado

Las consideraciones previas a la etapa de carguío de la emulsión bombeable son las siguientes.

- Se debe evitar el estrangulamiento de la manguera debido a que la presión puede subir y romper el sello de ruptura de seguridad, causando la paralización del equipo. Previo a la ruptura del sello el equipo emitirá dos alarmas, una de alta presión y una de muy alta presión, para que el operador pueda tomar los resguardos necesarios y detener el carguío de la emulsión bombeable. Solucionado el problema de estrangulamiento se procede con el carguío en forma normal.
- Se deben respetar todas las normas de seguridad, procedimientos, reglamentación y decretos vigentes que rigen para el carguío de frentes con explosivo encartuchado.

El procedimiento de carguío de un frente está conformado de las siguientes actividades, las cuales deben realizarse de forma consecutiva.

- Se introduce el cebo al inicio de la perforación.
- La manguera de carga de la emulsión se introduce junto al cebo hasta el fondo del tiro.
- El personal minero debe indicar la profundidad y tipo de tiro (rainura, contorno, zapatera, corona o tiros auxiliares).
- El operador del equipo UBT ingresa las características del tiro en el computador acoplado a los estanques de aditivos, con el fin de preparar la mezcla requerida.
- Una vez el cebo se ubica en el fondo del tiro, se comienza a bombear la emulsión. De forma simultánea, la manguera se extrae a un ritmo constante posibilitando el llenado de acuerdo a lo calculado.
- Introducida la cantidad de emulsión deseada se retira la manguera y se procede a colocar el taco.
- El operador del equipo UBT debe tomar una muestra de la emulsión bombeable luego de cargar cuatro tiros, con el fin de registrar las características del producto cargado.

La Figura 70 ilustra el procedimiento de carguío del Emultex PDBG. El carguío del explosivo encartuchado se realiza de forma similar, pero la manguera es reemplazada por cartuchos que son empujados hasta el fondo del tiro.

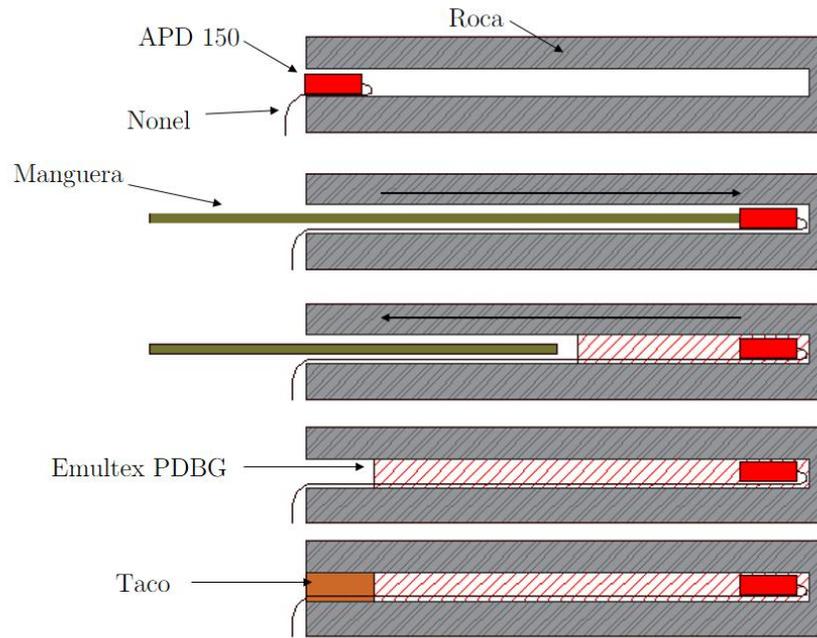


Figura 70. Procedimiento de carguío del Emultex PDBG.