

UNIVERSIDAD SAN SEBASTIAN

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA CIVIL EN MINAS



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA



CONTROL DE GESTIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE EXPLOSIVOS  
CON PROYECCIÓN ECONÓMICA PARA OBRAS CIVILES EJECUTADAS POR  
CONVENIOS DEL CUERPO MILITAR DEL TRABAJO

**Proyecto De Título Para Optar Al Título De Ingeniero Civil En Minas**

**Convenio Trainee CMT y USS**

**Alumno:**

**Matías Andrés Del Río Cubillos**

**Docente**

**Dr. Ing. Jorge Antonio Villarroel Villalobos**

**Santiago, 2025**

## **DEDICATORIAS**

A mi familia, que ha sido siempre mi mayor sostén y motivación. A mi padre, Mariano, y a mi madre, Claudia, por enseñarme el valor del esfuerzo, la disciplina y la perseverancia. Su apoyo incondicional y su confianza en mí hicieron posible que siguiera el camino que realmente quería. A mi hermana Javiera y a mi hermano Francisco, por acompañarme en cada etapa y celebrar conmigo cada avance, por pequeño que fuera.

También agradezco la compañía de mis amigos Matías Castillo, Santiago, Sofía y Tamara quienes me motivaron constantemente a seguir adelante, recordándome que siempre valía la pena continuar. Gracias por estar presentes en los momentos difíciles y por celebrar los logros conmigo.

A todos ustedes, gracias por creer en mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto. En primer lugar, agradezco profundamente a mi profesor guía, Jorge Villarroel, por su orientación, exigencia académica y dedicación durante todo el proceso. Sus observaciones, consejos y experiencia fueron fundamentales para dar forma a este trabajo.

Extiendo mis agradecimientos al Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) por recibirme y facilitar la información necesaria para el desarrollo de este modelo. En particular, agradezco a Raúl Portilla, mi supervisor en la institución, por su acompañamiento, apoyo técnico y constante disposición para resolver dudas y guiarme en terreno.

A la Universidad por brindarme la oportunidad de ser parte del modelo de titulación Trainee, experiencia que enriqueció mi formación profesional y personal. Asimismo, agradezco a los profesores que me acompañaron a lo largo de la carrera, de quienes aprendí no solo contenidos técnicos, sino también valores que llevaron este proceso académico a un nivel superior.

A todos quienes contribuyeron directa o indirectamente, muchas gracias por ser parte de este camino y por ayudarme a llegar hasta aquí.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
Historia De Los Explosivos .....	3
Convenio CMT Y USS .....	4
ANTECEDENTES GENERALES .....	6
JUSTIFICACIÓN .....	7
OBJETIVOS .....	8
Objetivo General .....	8
Objetivos Específicos .....	8
METODOLOGÍA.....	9
Recopilación De Información Y Creación De Base De Datos .....	9
Procesamiento De Datos Y Análisis Comparativos Costo Y Consumo.....	9
Análisis De Resultados Y Proyecciones Futuras .....	9
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	10
MARCO TEORICO.....	11
Parámetros Técnicos Y Diseño De Tronadura.....	11
Tipo De Malla De Perforación .....	12
Burden .....	14
a.    Método De Rustan .....	14
b.    Método De Konya .....	15
Espaciamiento .....	15

Pasadura.....	16
Taco .....	17
Inclinación De Barrenos .....	17
Precorte .....	19
Factor De Carga.....	20
Secuencia De Encendido.....	20
Proyección De Roca (Fly Rock) .....	22
Vibraciones .....	23
Tipos De Explosivos.....	24
ANFO.....	24
Emulsiones Emultex®.....	26
Trimex™ .....	27
Exsacorte.....	28
Normativa Y Seguridad En El Uso De Explosivos .....	29
Protocolo De Tronadura.....	31
Uso De Herramientas Informáticas .....	33
DESARROLLO.....	34
Descripción Del Material Recopilado .....	34
Estructura General Del Sistema.....	38
Diseño De La Base De Datos .....	41
Implementación En Excel Y Modelo De Datos.....	47
Desarrollo Del Dashboard Interactivo .....	48
Limitaciones .....	62
RESULTADOS.....	64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA .....	69
ANEXO.....	71

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1, Malla Cuadrada.....</b>	12
<b>Ilustración 2, Malla Rectangular.....</b>	13
<b>Ilustración 3, Malla Triangular.....</b>	13
<b>Ilustración 4, Burden excesivo.....</b>	18
<b>Ilustración 5, Efecto de explosión prematura en la parte superior del barreno.....</b>	18
<b>Ilustración 6, Burden Correcto por inclinación de barreno.....</b>	19
<b>Ilustración 7, Secuencia de Tiro.....</b>	21
<b>Ilustración 8, Esquema Frontal - Secuencia de tiro .....</b>	21
<b>Ilustración 9, Esquema en "V" - Secuencia de tiro.....</b>	22
<b>Ilustración 10, Mecanismos de generación de Fly Rocks .....</b>	23
<b>Ilustración 11, Macizo Rocoso alterado por Vibraciones .....</b>	24
<b>Ilustración 12, Sacos de ANFO Premium .....</b>	25
<b>Ilustración 13, Cartuchos de Emultex .....</b>	26
<b>Ilustración 14, Explosivo Trimex.....</b>	27
<b>Ilustración 15, Cartuchos Explosivos Exsacorte.....</b>	28
<b>Ilustración 16 - Diagrama de conexiones de las tablas del Modelo de Datos .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Ilustración 17 - Segmentador de Subjefatura de la Herramienta de gestión..</b>	49
<b>Ilustración 18 - Segmentador de Frente de Trabajo de la Herramienta de gestión .....</b>	50
<b>Ilustración 19 - Segmentador de Año y Mes de la Herramienta de gestión ...</b>	50

<b>Ilustración 20 - Cuadro de Volumen removido de la herramienta de gestión</b>	51
<b>Ilustración 21 - Cuadro de Gasto de Explosivo de la Herramienta de gestión</b>	53
<b>Ilustración 22 - Cuadro de producción de la Herramienta de gestión</b>	54
<b>Ilustración 23 - Cuadro de Eficiencia de la Herramienta de gestión</b>	55
<b>Ilustración 24 - Cuadro de KG de explosivo de la Herramienta de gestión</b>	56
<b>Ilustración 25 - Cuadro de Factor de Carga de la Herramienta de gestión</b>	57
<b>Ilustración 26 - Cuadro de artículos Utilizados de la Herramienta de gestión</b>	60
<b>Ilustración 27 - Cuadro de m3 contratados y modificación de obra de la Herramienta de gestión</b>	61

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1 - Factor de carga vs tipo de roca .....</b>	20
<b>Tabla 2 - Especificaciones técnicas del Explosivo ANFO .....</b>	25
<b>Tabla 3 - Tamaño de Cartucho de Emultex .....</b>	26
<b>Tabla 4 - Especificaciones técnicas del Explosivo Emultex.....</b>	27
<b>Tabla 5 - Especificaciones técnicas del Explosivo Trimex.....</b>	28
<b>Tabla 6 - Especificaciones técnicas del Explosivo Exsacorte .....</b>	29
<b>Tabla 7 - Protocolo de Tronadura .....</b>	32
<b>Tabla 8 - Lista completa de artículos explosivos .....</b>	35
<b>Tabla 9 - Tabla puente Fechas .....</b>	42
<b>Tabla 10 - tabla puente Subjefatura .....</b>	43
<b>Tabla 11 - Tabla puente Frente de Trabajo.....</b>	44
<b>Tabla 12 - tabla Puente de Explosivos .....</b>	44
<b>Tabla 14 - Tabla de Precios Unitarios m3.....</b>	46
<b>Tabla 18 - Tabla Dinámica de Volumen removido (m3).....</b>	51
<b>Tabla 19 - Tabla Dinámica de Gasto de Explosivo .....</b>	52
<b>Tabla 20 - Tabla Dinámica de producción .....</b>	54
<b>Tabla 21 - Tabla dinámica de Grafico de Eficiencia .....</b>	54
<b>Tabla 22 - Tabla Dinámica de Kg de explosivo .....</b>	55
<b>Tabla 23 - Tabla dinamica del Factor de Carga.....</b>	57
<b>Tabla 24 - Tabla Dinámica de Artículos en total Utilizados .....</b>	58
<b>Tabla 25 - Tabla Dinámica del Saldo Caratula .....</b>	61
<b>Tabla 26 - Tabla resumen de Metros cúbicos extraídos .....</b>	71
<b>Tabla 27 - Tabla resumen de Cubicación Monetizada.....</b>	72

<b>Tabla 28 - Tabla resumen de Artículos Utilizados .....</b>	73
<b>Tabla 29 - Tabla resumen de Saldo Caratula (m3).....</b>	74

## RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito desarrollar un modelo de control de gestión de explosivos aplicado a las obras civiles realizadas por el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT). Para ello, se diseñó una metodología integral que permite organizar, analizar y visualizar la información técnica asociada a las tronaduras, con el fin de mejorar la eficiencia operativa, fortalecer la trazabilidad institucional y facilitar la toma de decisiones en futuros convenios. La metodología implementada combina procedimientos de recopilación documental, levantamiento de información técnica, normalización de datos, análisis estadístico y construcción de herramientas digitales avanzadas.

El proceso metodológico se inició con la recopilación de información proveniente de diversas fuentes operacionales y administrativas. Esto incluyó protocolos de tronadura, registros históricos de consumo de explosivos, documentación normativa, fichas técnicas y datos logísticos extraídos del sistema institucional del Ejército. Este levantamiento permitió identificar los parámetros operativos relevantes y los requerimientos normativos vigentes, constituyendo la base técnica necesaria para diseñar un sistema que integrara los aspectos operacionales, administrativos y de seguridad asociados al uso de explosivos.

Posteriormente, se elaboró una base de datos estructurada que permitiera registrar y normalizar la información relacionada con los explosivos utilizados en cada obra. Para ello, se aplicaron criterios de codificación interna, normalización de unidades de medida, estandarización de categorías y validación de campos críticos. Esta base de datos fue organizada en tablas independientes para facilitar su integración mediante técnicas de modelamiento relacional. La estructuración del

sistema en módulos permitió diferenciar claramente las etapas de registro, procesamiento y análisis.

Una vez consolidada la base de datos, se implementó un Modelo de Datos utilizando herramientas especializadas del software Microsoft Excel. Este modelo permitió relacionar múltiples tablas a través de campos clave, logrando una integración completa de la información operacional, logística y económica. Gracias a ello, fue posible automatizar cálculos, generar consultas dinámicas y establecer vínculos entre variables que previamente se encontraban dispersas. El Modelo de Datos se convirtió en el núcleo analítico que posibilitó la construcción de indicadores, la comparación entre obras y la detección de patrones operacionales.

Sobre la base del modelo analítico, se desarrolló un Dashboard interactivo orientado a transformar la información técnica en visualizaciones claras y comprensibles. Este panel incluye gráficos, tablas dinámicas e indicadores que permiten evaluar la producción, el consumo de explosivos, la eficiencia operativa. Los filtros incorporados permiten segmentar la información por zonas, períodos y frentes de trabajo, ofreciendo una herramienta flexible que facilita el análisis comparativo y la revisión de tendencias. El Dashboard constituye la interfaz principal del sistema y permite interpretar la información de manera más rápida, eficiente y accesible para el personal técnico del CMT.

## INTRODUCCIÓN

### **Historia De Los Explosivos**

Los primeros antecedentes del uso de explosivos se remontan al siglo IX en China, se desarrolló la Pólvora Negra a partir de una mezcla de salitre, carbón y azufre. Su implementación en Europa durante el siglo XIII permitió aplicaciones bélicas, pero también impulsó la minería al facilitar la fractura de rocas duras.

En el siglo XIX, un nuevo salto tecnológico se produjo con la sintetización de la Nitroglicerina, un compuesto altamente energético, pero extremadamente volátil, lo que limitó su uso inicial. El aporte decisivo llegó con Alfred Nobel, quien creó y patentó la Dinamita, al lograr estabilizar la nitroglicerina mediante la absorción de tierra de diatomeas. Esta innovación permitió disponer de un explosivo seguro, potente y transportable, revolucionando la minería y la ingeniería civil.

En su continuación, hacia fines del siglo XIX, se desarrolló otro explosivo, el Trinitrotolueno (TNT), que se caracterizó principalmente por su relativa estabilidad química, facilitando la manipulación y capacidad de almacenamiento prolongado, pese a que una de sus aplicaciones fue de uso bélico, también potenció los trabajos en aplicaciones civiles, como trabajos de demolición y minería a gran escala.

En la segunda mitad del siglo XX con los grandes avances realizados, se produjo otra transformación relevante con la introducción del ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil), lo que resultó en un explosivo económico y de fácil preparación,

ampliamente adoptado en minería. Sin embargo, tenía sus limitaciones frente al agua, lo que llevó al desarrollo de nuevas formulaciones.

Así surgieron las emulsiones explosivas y los hidrogeles, que aportaron mejoras significativas en la seguridad, resistencia al agua y uniformidad en la energía liberada, estas tecnologías se han convertido en la base del uso moderno de explosivos, permitiendo un mayor control y precisión en la fragmentación y eficiencia en las operaciones de voladura.

En Chile, el uso de explosivos se consolidó desde la minería del salitre, donde posteriormente fueron aplicados a la gran minería de cobre, con la participación de grandes empresas como Enaex y Orica, que han liderado la innovación en el desarrollo y aplicación de emulsiones industriales. El control de estos materiales se encuentra regulado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) para faenas mineras, lo que garantiza estándares de seguridad y sostenibilidad en su manejo. Mientras que para las Obras Civiles se regulan por el Ministerio de Defensa Nacional y el Reglamento complementario de la Ley 17.798 la cual establece las disposiciones para el control de armas y elementos similares.

## **Convenio CMT Y USS**

El Convenio Marco de colaboración académica suscrito entre la Universidad San Sebastián (USS) y el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) constituye una alianza estratégica orientada a fortalecer la formación académica como la profesional y técnica de sus integrantes.

Este acuerdo reconoce la vocación de la USS como institución superior acreditada, comprometida con la formación de Valores y social de profesionales.

El convenio establece un marco de cooperación mutua cuyo propósito central es facilitar el intercambio de conocimientos, experiencias y recursos, buscando impactar positivamente en la sociedad y responder a las necesidades de ambas instituciones.

En otros términos, el convenio contempla que se permitan concretar iniciativas con objetivos claros, plazos definidos y responsables académicos o institucionales, asegurando así el éxito y la continuidad de los proyectos.

En definitiva, este convenio busca articular la experiencia militar y académica en beneficio mutuo, consolidando un espacio de colaboración que no solo fortalezca la formación profesional de los integrantes del Ejército y de los estudiantes de la USS, sino que también contribuya al desarrollo del conocimiento, la innovación y la vinculación con el medio, respondiendo a los desafíos presentes y futuros de la sociedad chilena.

## **ANTECEDENTES GENERALES**

La ejecución de infraestructura vial en zonas de difícil acceso es la labor principal desarrollada por el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT), debido a su impacto para la conectividad del territorio, la asistencia a las comunidades aisladas y el fortalecimiento de infraestructura a nivel nacional, estas obras son financiadas a través de convenios con el Ministerio de Obras Públicas (MOP) por lo que resulta necesario que el CMT cuente con herramientas de planificación que respalden la correcta estimación de recursos a solicitar.

El uso de implementos explosivos es una herramienta indispensable para realizar actividades tronadura, donde facilita el movimiento rocoso y la habilitación de trazados en terrenos complejos.

La falta de un análisis detallado de los parámetros técnicos como el factor de carga, costos asociados al movimiento de roca y el consumo de explosivos, Genera una brecha de información que influye directamente en la estimación de recursos financieros que el CMT debe solicitar en futuros convenios con el MOP. Contar con un modelo de gestión de explosivo permitirá mejorar no solo la trazabilidad si no también ofrecer un respaldo técnico y económico a las propuestas presupuestarias.

## JUSTIFICACIÓN

La intención del proyecto se justifica por la necesidad de dotar al CMT de una herramienta metodológica y técnica que permita mejorar el control de gestión de explosivos en la construcción de caminos en zonas inaccesibles, la falta de un sistema de información limita la capacidad de proyectar consumos, estimar costos y evaluar la eficiencia de las voladuras realizadas.

Desde un punto de vista técnico, este proyecto busca apoyar con un modelo basado en la recopilación de datos, el cálculo de parámetros como factor de carga y uso de software especializado para el análisis de voladuras, permitiendo obtener indicadores que faciliten las futura tomas de decisiones en terreno.

Por la parte económica, el proyecto contribuirá a identificar patrones de consumo anual y proyectar costos asociados, Estos resultados servirán de guía para la planificación y optimización de futuros convenios.

Finalmente, la implementación de este trabajo genera una relevancia institucional para el CMT, representando una mejora en la gestión interna y un respaldo a su rol estratégico en la ejecución de obras civiles, favoreciendo la conectividad y el desarrollo de la localidad.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Desarrollar un modelo de control de gestión de explosivos en obras civiles del CMT que permita registrar, analizar y proyectar el consumo de explosivos, mediante el cálculo de parámetros técnicos, el análisis económico-comparativo y la generación de indicadores que sirvan de guía para futuros convenios.

### Objetivos Específicos

- Recopilar información técnica y normativa sobre el uso de explosivos en obras civiles del CMT
- Diseñar una base de datos que registre el consumo de explosivos por ubicaciones, tipo y costo asociado.
- Análisis de parámetros técnicos como factor de carga, consumo unitario de explosivos y rendimiento.
- Analizar los datos obtenidos desde el sistema de control de gestión para identificar patrones o anomalías que permitan mejorar la eficiencia en el uso de explosivos en obras civiles del CMT.

## **METODOLOGÍA**

### **Recopilación De Información Y Creación De Base De Datos**

En la primera etapa se realizará la recopilación de información proveniente de la bibliografía especializada, complementariamente se registrarán los datos proporcionados en el marco del Convenio con el CMT, lo que permitirá disponer de la información sobre consumos, tipos de explosivos.

### **Procesamiento De Datos Y Análisis Comparativos Costo Y Consumo**

Con la información se creará una base de datos, registrando el artículo usado, cantidad, valor, fecha de uso. donde a continuación se analizará la comparación de costos y consumos, además del movimiento de rocas por m3.

### **Análisis De Resultados Y Proyecciones Futuras**

Para finalizar, con los resultados obtenidos se estimará una proyección presupuestaria para próximos convenios, facilitando el proceso de gestión.

## ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente estudio se enmarca en el control de gestión de explosivos aplicados a las obras civiles desarrolladas por el CMT y sus convenios realizados en la construcción de caminos en zonas de difícil acceso.

Toda la información utilizada y los datos resultantes solo son de utilidad exclusiva del CMT y sus futuros proyectos.

El estudio tiene restricciones de confidencialidad ya que habla de ubicaciones, equipos e implementos explosivos.

El estudio queda limitado a Tiempo y Recursos humanos, quiere decir que se ajusta a los plazos académicos y a la disponibilidad de personal del CMT en la validación de resultados.

Como a su vez el análisis comparativo se realizará en un software de office (EXCEL) por su fácil manejo y la creación de tablas dinámicas.

## **MARCO TEORICO**

### **Parámetros Técnicos Y Diseño De Tronadura**

El proceso de tronadura es una de las etapas críticas en la construcción de caminos realizados por el Cuerpo Militar del Trabajo, especialmente en zonas de difícil acceso donde el material rocoso debe ser fragmentado para permitir el avance de la obra, el diseño de cada tronadura se basa en la aplicación de parámetros geotécnicos y operacionales que determinan la eficiencia y seguridad en todo el proceso.

Entre los parámetros más relevantes se encuentra el Burden (Distancia perpendicular entre un pozo y la cara libre), el Espaciamiento (Distancia entre pozos), la Pasadura (Longitud de la carga explosiva), el Taco (Material inerte añadido en la cima del pozo) y la inclinación de barrenos. Estos factores condicionan la cantidad requerida de explosivos, por ende, influyen en el factor de carga (kg/m<sup>3</sup>), que relaciona el explosivo utilizado y el volumen de roca removido.

Cada uno de estos parámetros es considerado variables cuantitativas la cual permite analizar en los diferentes proyectos la consistencia de los diseños de malla aplicada y su relación con la fragmentación.

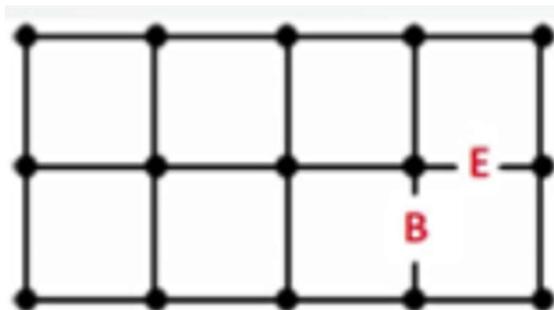
La hoja técnica utilizada en tronadura por el CMT registra la información estandarizada como el diámetro de perforación, tipo de malla, profundidad del pozo, carga por pozo, tipo de explosivo y secuencia de encendido, la cual forma la base de datos para el análisis estadístico posterior

## **Tipo De Malla De Perforación**

La malla de perforación es una disposición geométrica que se refiere a la distribución de los pozos, tomando en consideración el Burden y espaciamiento, tiene influencia directa en la forma en que se fragmentara la roca al momento de la detonación.

En el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) se emplean 3 tipos de malla de perforación, cuya elección depende de las condiciones geológicas del terreno. La malla de preferencia corresponde a una disposición de 1x1, denominada malla cuadrada.

**Ilustración 1, Malla Cuadrada**

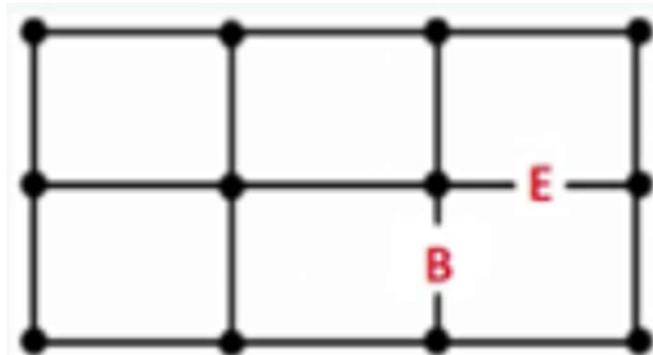


**Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)**

Este tipo de malla se utiliza generalmente en el primer disparo de prueba, con el propósito de evaluar la fragmentación de macizo rocoso ante la ausencia de estudios geomecánicos previos. Una vez ejecutada la tronadura, si el resultado muestra una fragmentación adecuada, es decir, bloques de roca de tamaño adecuado para el carguío y transporte, se mantiene el mismo patrón en las tronaduras posteriores.

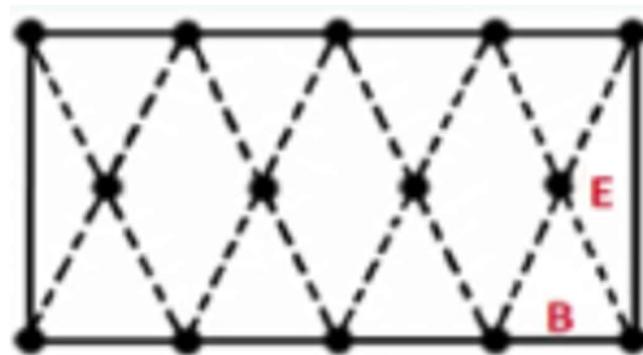
Por otra parte, si el disparo genera fragmentos de gran tamaño, se procede a ajustar los parámetros, lo que nos deja los siguientes tipos de malla utilizados como son la malla rectangular y la malla triangular.

**Ilustración 2, Malla Rectangular**



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo).

**Ilustración 3, Malla Triangular**



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo).

Estas se utilizan con el fin de optimizar la eficiencia de la voladura y mejorar la calidad del material fragmentado.

## **Burden**

Es la distancia desde la cara libre al barreno. La selección de un Burden apropiado es una de las decisiones más importantes que hay en el diseño de una tronadura, si el Burden tiene una distancia pequeña la roca es expulsada a distancia considerables de la cara libre, lo que genera fragmentación fina o sobre rompimiento, por otra parte, si el Burden es grande, la energía se disipa dentro del macizo, por lo cual significa presencia de bolones o roca mal fracturada.

Se utiliza 2 cálculos vigentes para la obtención del Burden, el método de Rustan y el método de Konya.

### **a. Método De Rustan**

Fue desarrollado por Aksel Rustan en 1992 publico en su obra “Burden, Spacing and Borehole Diameter at Rock Blasting” en el cual propone que el Burden no depende linealmente del diámetro del barreno, si no que se expresa con una relación de potencia.

$$B_{opt} = 18,1 * d^{0,689}$$

Donde:  $B_{opt}$  = Burden optimo (m)

$d$  = Diámetro del pozo (m)

## b. Método De Konya

Desarrollado por Calvin J. Konya, En el año 1983 Konya publico “Surface Blast Design”, texto donde formaliza su ecuación empírica para un Burden optimo, relacionando el diámetro del explosivo, la densidad del explosivo y la densidad de la roca.

$$B = 0,012 \left( \left( 2 * \frac{\gamma_{Exp}}{\gamma_{Rx}} \right) + 1,5 \right) * d$$

Donde:  $B$  = Burden

$\gamma_{Rx}$  = Densidad del explosivo (gr/cc)

$\gamma_{Exp}$  = Densidad de la roca (gr/cc)

$d$  = Diámetro del explosivo (mm)

## Espaciamiento

Se considera como espaciamiento la distancia entre un pozo y otro, en el diseño de malla de tronadura esta generalmente ligado al Burden, donde evidencia practicas sugieren una relación optima de (E/B). En el CMT se utiliza 3 fórmulas para el cálculo de espaciamiento, dependiendo de la malla a utilizar.

Malla Cuadrada:  $E = B$

Malla Rectangular:  $E = 2B$

Malla Triangular:  $E = \frac{B}{2}$

Un espaciamiento correctamente definido garantiza para la operación una fragmentación homogénea, optimización del consumo de explosivo y control del perfil del banco y estabilidad del talud.

### **Pasadura**

Corresponde a la longitud de la carga explosiva que se realiza por debajo del nivel del piso o de la base del banco, tiene como propósito asegurar que la roca ubicada en la zona inferior se fracture completamente en la voladura. La fórmula utilizada es de López Jimeno.

$$P = (0.2 \text{ a } 0.4) * B$$

Donde:  $P$  = Pasadura

$(0.2 \text{ a } 0.4)$  = Intervalo de tipo de roca (Blanda, media o compacta, dura)

$B$  = Burden

Una pasadura correctamente calculada permite obtener una rotura completa en la base del banco, evitando la formación de talones y optimizando la eficiencia del explosivo.

## **Taco**

El taco es el material inerte añadido en la cima del pozo que tiene como fin el confinamiento de los gases de la explosión garantizando la trasmisión de energía al macizo, también tiene como función el prevenir la proyección de roca. Konya y Walter (1985) establecieron el cálculo del taco en:

$$T = (0.7 \text{ a } 1.0) * B$$

Donde:  $T$  = Taco

$(0.7 \text{ a } 1.0)$  = Intervalo según características del macizo.

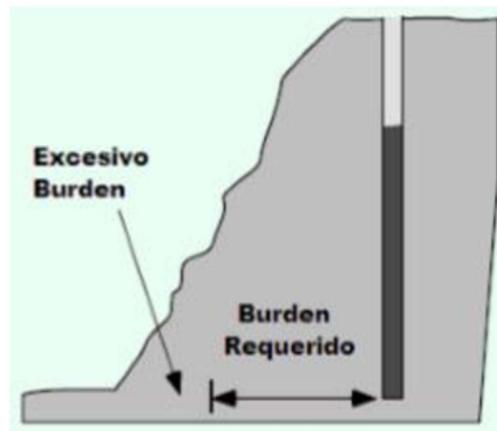
$B$  = Burden

Siguiendo la correlación entre el diámetro del barreno, el tipo de roca y el grado de confinamiento se maximiza la eficiencia energética del explosivo.

## **Inclinación De Barrenos**

Al realizarse una tronadura de cara libre, un pozo vertical a menudo deja un Burden variable entre el Collar y la Pata.

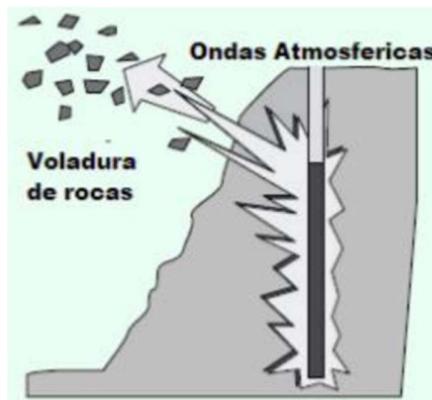
**Ilustración 4, Burden excesivo**



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

Lo que al momento de la detonación se provoca una explosión de gases prematuros en la zona superior, produciendo “airblast” y “flyrocks” y reduce la presión del pozo cerca de la Pata, impidiendo la rotura adecuada del macizo.

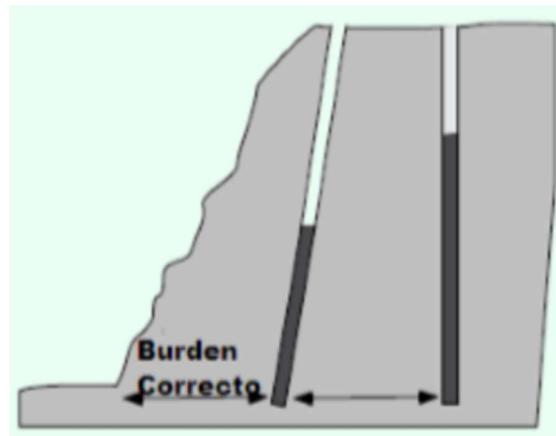
**Ilustración 5, Efecto de explosión prematura en la parte superior del barreno**



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

Para evitar esta situación se prefiere los pozos inclinados, con los ángulos más comunes de 10° a 20° grados, usando como criterio el tipo de voladura (avance o Precorte) y la altura del banco.

### Ilustración 6, Burden Correcto por inclinación de barreno



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

### Precorte

Consiste en la creación de un plano de fractura en el macizo rocoso antes de realizar las tronaduras de producción, mediante una fila de barrenos generalmente de menor diámetro, esta tiene como objetivo controlar el perfil del talud, minimizar la sobre excavaciones y evitar daño remanente al macizo. Puede ser iniciado de forma separada o en conjunto con la tronadura principal, pero debe haber una diferencia de 100 ms.

El espaciamiento del precorte tiene como calculo normalmente:

$$E = (8 \text{ a } 15) * D$$

Donde:  $E$  = Espaciamiento

$(8 \text{ a } 15)$  = Intervalo dependiente del tipo de roca.

$D$  = Diámetro del Barreno (mm)

## Factor De Carga

El término describe la cantidad de explosivo usado para remover un volumen o peso unitario de roca, se indica mediante las unidades de medida de gr/m<sup>3</sup> o kg/m<sup>3</sup>.

$$FC = \frac{Kg \ de \ explosivos}{Volumen \ a \ remover \ (m^3)}$$

Siguiendo los resultados del cálculo del factor de carga se puede identificar el tipo de roca que se está removiendo:

**Tabla 1 - Factor de carga vs tipo de roca**

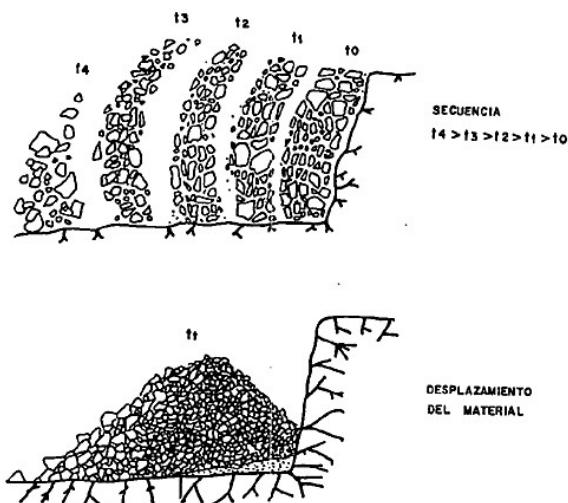
Blanda / muy fracturada	0.3 - 0.6 (Kg/m <sup>3</sup> )
Media / Compacta	0.6 – 1.0 (Kg/m <sup>3</sup> )
Dura / masiva	1.0 – 1.6 (Kg/m <sup>3</sup> )

Fuente: Elaboración propia a partir de López Jimeno (1994) y Konya & Walter (1985)

## Secuencia De Encendido

Corresponde al orden y distribución temporal con que se detonan los barrenos o las filas de la malla, El principal objetivo es controlar la dirección de la rotura, optimizar la fragmentación de rocoso, minimizar vibraciones.

### Ilustración 7, Secuencia de Tiro

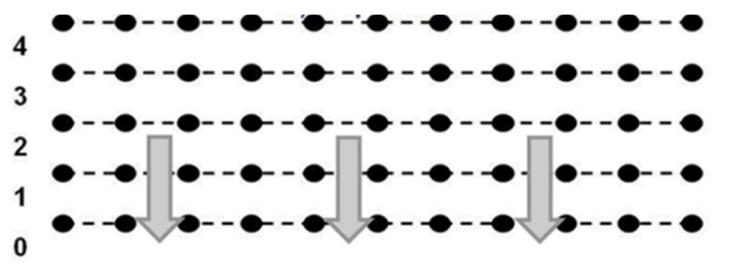


Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

En el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT), las operaciones de tronadura se ejecutan principalmente utilizando detonadores no eléctricos (NONEL). Este sistema permite mediante la combinación de conectores con distintos tiempos de retardo generar la fragmentación deseada.

Con el fin de obtener una fragmentación eficiente y segura del material, el CMT aplica diseños específicos de secuencias de detonación. Los cuales son:

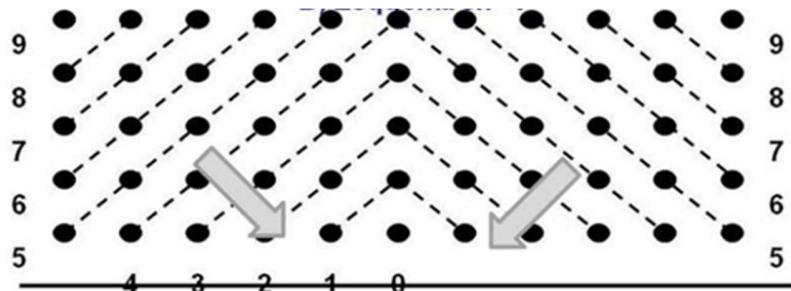
### Ilustración 8, Esquema Frontal - Secuencia de tiro



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

En esta disposición, la voladura progresiva en sentido perpendicular a la cara libre, fila por fila, cada línea de barrenos se detona de manera secuencial con retardos uniformes, permitiendo que cada fila disponga de una cara libre generada por la anterior, método simple y asegura un avance uniforme del frente y control en el desplazamiento de material.

**Ilustración 9, Esquema en "V" - Secuencia de tiro**



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

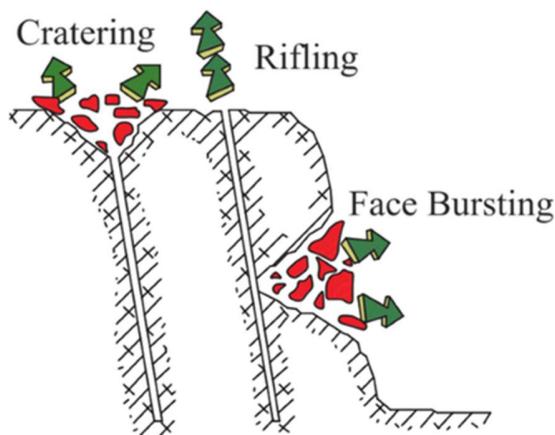
En este diseño los barrenos se detonan en forma convergente, es decir, desde los extremos hacia el centro, formando el patrón en V, posee como principal ventaja favorecer el alivio central y reducir la resistencia lateral, logrando mayor desplazamiento del material hacia el eje de la voladura.

### Proyección De Roca (Fly Rock)

En toda voladura se produce una proyección de material, este corresponde al lanzamiento no controlado de fragmentos de roca fuera del área prevista como consecuencia de una liberación súbita y no confinada de energía explosiva, es uno de los riesgos más importantes en la operaciones de tronadura, ya que puede llegar a provocar daños materiales, impactos sobre el personal, maquinaria o estructuras cercanas.

Las principales causas de las Fly rock son: taco insuficiente o mal colocado lo que genera salida prematura de gases, sobrecarga de explosivo o concentración de energía en la parte superior del barreno, fallas de retardo o encendido simultaneo, lo que elimina el confinamiento progresivo previsto en el diseño

#### Ilustración 10, Mecanismos de generación de Fly Rocks



Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)

#### Vibraciones

Las vibraciones producidas por las voladuras corresponden a las ondas sísmicas que se producen durante la detonación del explosivo y se propagan a través del terreno en forma de ondas volumétricas y superficiales. Pese a que son de corta duración pueden afectar estructuras y provocar fisuras, por lo que su control constituye un parámetro esencial en el diseño de la tronadura.

### **Ilustración 11, Macizo Rocoso alterado por Vibraciones**



**Fuente: Capacitación CMT – (Cuerpo Militar del Trabajo)**

### **Tipos De Explosivos**

#### **ANFO**

Agente de voladura de alta calidad, fabricado con nitrato de amonio, explosivo de baja densidad y alta absorción de petróleo.

El “ANFO PREMIUM” es especialmente recomendable para uso en pequeño diámetro de voladuras de superficie y minería subterránea, en especial cuando se presenta una roca competente, en perforaciones sin agua, su presentación es entregada en sacos de 25 Kg.

### Ilustración 12, Sacos de ANFO Premium



Fuente: Enaex S.A. (2024). Disponible en: [www.enaex.com](http://www.enaex.com)

**Tabla 2 - Especificaciones técnicas del Explosivo ANFO**

Densidad vaciado	0.77 +/- 3%	g/cc
Velocidad de detonación	(3600 - 4100)* / (2000 – 2500)**	m/s
Presión de detonación	28*	Kbar
Energía	3818	KJ/Kg
Volumen de gases	1050	L/Kg
Diámetro mínimo	1	pulgada
Resistencia al agua	Nula	

**\*: Confinado en 3" de diámetro**

**\*\*: No Confinado en 3" de diámetro**

Fuente: Ficha técnica ANFO Premium, Enaex Servicios S.A.

## Emulsiones Emultex®

Emulsión explosiva envasada de diámetro pequeño, sensible al fulminante N°8, diseñada para un amplio rango de aplicaciones en voladuras.

**Tabla 3 - Tamaño de Cartucho de Emultex**

Tamaño (Pulgadas)	Unidades por caja	Peso unidad (g)
EMULTEX 1 X 8	195	119
EMULTEX 1" 1/4 X 8	124	186.56
EMULTEX 1" 1/4 X 16	61	378
EMULTEX 2 X 8	48	480.8

Fuente: Ficha técnica Emultex CN, Enaex Servicios S.A.

**Ilustración 13, Cartuchos de Emultex**



Fuente: Enaex S.A. (2024). Disponible en: [www.enaex.com](http://www.enaex.com)

**Tabla 4 - Especificaciones técnicas del Explosivo Emultex**

Densidad	1.15 +/- 4%	g/cc
Velocidad de detonación	4600 +/- 600	m/s
Presión de detonación	61	Kbar
Energía	3940	KJ/Kg
Resistencia al agua	Excelente	
Volumen de gases	930	L/Kg

\*: Cartucho de 1" 1/4 x 8" sin confinar

**Fuente: Ficha técnica Emultex CN, Enaex Servicios S.A.**

### **Trimex™**

Emulsión explosiva sensible a un detonador, color blanco y su empaquetadura es un tubo plástico rígido de color amarillo translucido de 7/8" x 20" (diámetro y largo) las puntas vienen selladas con tapas y uniones interconectadas para facilitar el ensamblaje, está diseñado para voladuras de barrenos de contorno en desarrollo y coronas de túneles.

**Ilustración 14, Explosivo Trimex**



**Fuente: Orica Mining Services (2024). Disponible en: [www.oricaminingservices.com](http://www.oricaminingservices.com)**

**Tabla 5 - Especificaciones técnicas del Explosivo Trimex**

Densidad	1.10 +/- 10%	g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de detonación	>3000	m/s
Energía	2.30	MJ/Kg
Resistencia al agua	excelente	
Volumen de gases	898	L/Kg

Fuente: Ficha técnica Senatel Trimex, Orica Perú S.A.

### **Exsacorte**

Explosivo especial para trabajos de voladura controlada, pre-corte en canteras y taludes de carreteras. Se proporciona en cartuchos rígidos de 22 x 710 mm que son acoplables entre sí.

**Ilustración 15, Cartuchos Explosivos Exsacorte**



Fuente: EXSA S.A. – Ficha técnica del producto (2022)

**Tabla 6 - Especificaciones técnicas del Explosivo Exsacorte**

Densidad vaciado	1.08 +/- 3%	g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de detonación	3900	m/s
Presión de detonación	41	Kbar
Energía	900	Kcal/kg
Volumen de gases	916	L/kg
Resistencia al agua	Buena	

Fuente: Ficha técnica EXSA, Exsa S.A.

### **Normativa Y Seguridad En El Uso De Explosivos**

El manejo, transporte y aplicación de explosivos en las obras civiles desarrolladas por el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) se encuentra sujeto a la estricta normativa nacional donde busca garantizar la seguridad de las operaciones, la protección del personal y la integridad de las obras. En Chile, el marco legal que regula estas actividades está compuesto por la Ley N° 17.798 sobre Control de Armas Y explosivos y su reglamento Complementario además del Manual de Carreteras (Volumen 5).

De acuerdo con lo establecido en dichos reglamentos, se consideran sometidos a control los explosivos, artificios de tronadura, detonadores, cordones detonantes, mechas, fulminantes y otros elementos auxiliares para la tronadura, así como las instalaciones usadas para su almacenamiento (polvorín), transporte y empleo. La autoridad encargada de la regulación de estos materiales es la Dirección General de Movilización Nacional (DGMN) y la autoridad fiscalizadora es

Carabineros de Chile, entre sus funciones destacan aprobar la autorización de transporte y almacenamiento y que se cumplan los requisitos impuestos en el reglamento.

El CMT en su carácter de entidad ejecutora de obras públicas debe cumplir con los procedimientos y exigencias establecidos por los manuales. Los cuales establecen criterios técnicos sobre distancias de seguridad, manipulación, secuencia de encendido, comunicación previa y medidas de prevención ante proyecciones de roca o vibraciones. En este contexto el personal en obra que ejecuta la tronadura debe contar con autorización vigente como programador calculista o manipulador de explosivos. Acreditada por Carabineros de Chile y respaldada mediante cursos de capacitación certificados.

Por otra parte, el manual de carreteras, Volumen N° 5 (MOP, 2024) establece en sus especificaciones técnicas generales de construcción disposiciones complementarias que rigen las obras de infraestructura vial, especialmente en las secciones 5.003 (Consideraciones Ambientales y Sustentabilidad) y 5.004 (Disposiciones de Seguridad). Dicho documento estipula que el contratista, en este contexto el CMT, Es responsable de adoptar todas las medidas necesarias para preservar la seguridad durante la construcción de la obra, esto incluye la señalización de zonas de riesgo, restricción del tránsito durante eventos de tronadura. Además, especifica que toda manipulación debe realizarse conforme a normas y supervisión técnica calificada.

La integración de estas normativas tiene como finalidad prevenir accidentes, minimizar el impacto ambiental y asegurar la continuidad operacional de las obras. El Ministerio de Obras Públicas (MOP) establece que el CMT aplique un sistema de control de trazabilidad de explosivos, mediante registros que incluyen el tipo, cantidad, número de lote, ubicación y responsable de uso, esta trazabilidad permite

establecer estadísticas de consumo, detectar desviaciones y fortalecer mecanismos de gestión preventiva de riesgos.

Finalmente, la aplicación conjunta de la Ley N°17.798, su reglamento y las directrices del manual de carretera configura una marco técnico-legal que garantiza que las obras en ejecutadas por el CMT cumplan con los principios de seguridad, eficiencia y responsabilidad institucional.

### **Protocolo De Tronadura**

El protocolo de tronadura empleado por el Cuerpo Militar del Trabajo constituye de un documento técnico estandarizado que permite registrar los principales parámetros operacionales de cada voladura, como diseño, cantidad de explosivo, Burden, espaciamiento, Taco y otras más. Este protocolo asegura la trazabilidad de las operaciones y la correcta ejecución de las tronaduras Conforme a los criterios de seguridad y normas vigentes.

La incorporación de esta tabla en el estudio permite sistematizar y analizar los datos históricos de consumo de explosivos, facilitando el cálculo estadístico a futuro, La comparación entre los distintos diseños de malla y la evaluación de desempeño económico por convenio.

## Tabla 7 - Protocolo de Tronadura

## DIAGRAMA DE DISPARO N°

Fecha:

• 2.1.1

**Kilómetro**

MALLA TIPO		Carga	Tipo
TIROS CONTORNO		PRODUCCION	TALUD
TIROS PRODUCCION			
OBSERVACIONES			

DATOS DE PERFORACION		PRODUCCION
DIAMETRO	(Pulgada)	
ESPACIAMIENTO	(Metros)	
BURDEN	(Metros)	
LONG PROMEDIO TIRO	(Metros)	
NUMERO TIROS	(un)	
METROS LINEALES		
CORDON DETONANTE	(Metros)	
MECHA LENTA	(Metros)	
DETONADOR N° 8	(un)	
RETARDO 17 m/s	(un)	
RETARDO 200 m/s	(un)	
NONEL 200 m/s	(un)	
NONEL 300 m/s	(un)	
NONEL 400 m/s	(un)	
NONEL 500 m/s	(un)	
NONEL 600 m/s	(un)	
DATOS DE CARGA		PRODUCCION
ANFO		KILOS
EMULTEX		KILOS
FACTOR DE CARGA		Kg/m3
VOLUMEN		
VOLUMEN TOTAL A REVOMER		m3

DATOS DE PERFORACION		TALUD
DIAMETRO	(Pulgada)	
ESPACIAMIENTO	(Metros)	
BURDEN	(Metros)	
LONG PROMEDIO TIRO	(Metros)	
NUMERO TIROS	(un)	
METROS LINEALES		
DATOS DE (TALUD)		
SOFTRON Y/O EXSACORTE		KG
VOLUMEN		m <sup>3</sup>
PREVENCION DE RIESGOS		JEFE DE TRONADURA
Cdtro. CINGCO N° 43		PROFESSIONAL RESIDENTE

## Asesoria Inspector Fiscal

**Fuente: Elaboración Propia**

## **Uso De Herramientas Informáticas**

Las herramientas informáticas desempeñan un rol fundamental en la gestión y análisis de datos, en particular el software Microsoft Excel el cual se ha consolidado como una plataforma versátil para la sistematización de información técnica, permitiendo la integración de dato provenientes de diferentes fuentes utilizando modelos relacionales y funciones estadísticas avanzadas.

El empleo de bases de datos estructuradas y modelos de análisis dinámicos permiten convertir registros técnicos en indicadores cuantificables, lo que a su vez facilita la evaluación de desempeño, comparación de resultados entre proyectos y identificación de tendencias o desviaciones en las operaciones.

Además, el desarrollo de Dashboards interactivos en Excel, complementado con modelo de datos, permite una visualización intuitiva de los indicadores clave, facilitando la interpretación de resultados y la toma de decisiones informadas. En este sentido el uso de software de análisis estadístico aplicado a la gestión de explosivos se alinea con los principios modernos de la gestión basada en datos, donde se promueve la eficacia operativa, la rendición de cuentas institucional y optimización de recursos públicos en contexto de las obras desarrolladas por el CMT.

## **DESARROLLO**

En el presente capítulo se describe el proceso de desarrollo del modelo de control de gestión de explosivos propuesto, el cual integra información técnica y económica mediante el uso de herramientas informáticas y métodos de análisis estadístico.

### **Descripción Del Material Recopilado**

Durante el periodo treinee en el CMT, se realizó la actividad sobre el análisis de explosivo el cual abarcaba un total de 4 Subjefatura, con 7 frentes de trabajo, y un periodo de análisis del uso de explosivos de enero de 2024 a noviembre de 2025. Donde se analizaron los estados de pago, informes de avance y tablas de consumo histórico, documentos normativos del CMT(Manual)

### **Convenios**

SJZ CMT "ARICA"- Ollagüe

SJZ CMT "PUERTO MONTT" - Futaleufú

SJZ CMT "PUERTO MONTT" - Puelo X

SJZ CMT "COYHAIQUE" - La Tapera

SJZ CMT "COYHAIQUE" - Lago Brown

SJZ CMT "PUNTA ARENAS" - Troncal XI

SJZ CMT "PUNTA ARENAS" - Caleta 2 de mayo

Lista de Artículos Explosivo:

**Tabla 8 - Lista completa de artículos explosivos**

Artículos Explosivos
ANFO PREMIUM
BID. TECNEL F12 10.2M RETARD.42MS F69 EX
CONECTOR 17 MS
CONECTOR 25 MS
CONECTOR BID 42 MS
CONECTOR DE RETARDO BI M/S 200
CONECTOR RET BID 100 MS
CONECTOR RETARDADOR BID 42 MS
CORDON DETONANTE 10 GR/M
CORDON DETONANTE N°5 BRITACORD 5R
CORDON DETONANTE N° 5 GR
CORDON DETONANTE N° 5 GRS REFORZADO
DETONADOR N° 8
DETONADOR NO ELECTRICO
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 200 M/S
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 300 M/S

DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 400 M/S
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 500 M/S
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 600 M/S
EMULEX 1 1/4 X 8
EMULEX 1" 1/4 x 16
EMULSIONES EMULEX 1 X 8
EMULSIONES EMULEX 2 X 8
EMULTEX 1" 1/4 X 16
EXSACORTE-D
FULMINANTE N° 8
MANGAS PLASTICAS
MECHA LENTA
NONEL FIREX 14 (4,3 M ) MS 4
NONEL FIREX 20 (6,1 M) MS 10
NONEL FIREX 20 (6,1 M) MS 14
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 12)
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 15)
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 16)
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 4)

NONE FIREX 6,1 M MS 8 200 M
RETARDADOR 42 MS
RETARDADOR DE 17 MS
RETARDADOR DE 200 MS
RETARDADOR DE 25 MS
RETARDADOR DE 42 MS
T-ANFO
TRIMEX

Fuente: Elaboración Propia

Abastecimiento de explosivo: El abastecimiento de explosivos para las obras civiles del Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) se realiza mediante un requerimiento anual de materiales, elaborado en función de la programación de cortes en roca planificados para cada convenio. Para este proceso, el CMT estima la cantidad de voladuras necesarias y calcula el consumo esperado de explosivos considerando factores como el tipo de terreno, el diseño de malla y el volumen de roca a remover. Una vez aprobado el requerimiento, los explosivos son suministrados de acuerdo con los cronogramas de obra

### Presupuesto para explosivos

El presupuesto destinado a explosivos se define mediante un requerimiento anual presentado al Ministerio de Obras Públicas (MOP). Este cálculo se basa en la planificación de cortes en roca programados y en el consumo estimado de explosivos según las características del proyecto. A medida que avanza la

construcción y se ejecutan las tronaduras, el CMT documenta la producción obtenida en cada tramo y el MOP valida y firma los estados de pago, financiando únicamente el volumen de obra efectivamente ejecutado. De esta manera, el presupuesto se ajusta progresivamente en función del rendimiento real de la obra

### **Contabilización de los movimientos en roca**

El movimiento de roca producido en cada tronadura se contabiliza mediante cálculos topográficos, los cuales permiten determinar con precisión los metros cúbicos removidos. Para ello, se comparan los modelos de terreno antes y después de la tronadura, obteniendo el volumen real excavado a partir de diferencias de nivel y modelación digital.

### **Criterios de normalización usados**

Códigos para Explosivos: Para garantizar la trazabilidad y estandarización de la información, en la base de datos del Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) se aplican criterios de normalización basados en la codificación interna utilizada por el (CGU). Los materiales empleados en las tronaduras cuentan con un grupo de asignación específico, al cual se le asocia un código único que identifica el tipo de explosivo, lo que permite su correcta clasificación dentro del sistema logístico y asegura que el registro del consumo sea consistente, verificable y compatible con los procesos administrativos y de abastecimiento del CMT.

### **Estructura General Del Sistema**

El sistema se compone de 4 componentes principales, la Base de Datos, Hojas de registro, Modelo de Datos (Excel) Y el Dashboard.

Módulo de Base de datos: El módulo de base de datos corresponde al origen principal de la información utilizada en el sistema de control de gestión. Actualmente, el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT) obtiene sus registros operativos y logísticos a través del software institucional CGU (Centro General de Abastecimiento), plataforma que administra la totalidad de los bienes y materiales empleados en obra.

Este sistema contiene la codificación oficial de cada artículo, incluyendo explosivos, accesorios de iniciación, implementos de perforación y demás insumos asociados a las tronaduras. Cada material posee un código único, una descripción estandarizada y un grupo de asignación, lo que permite mantener orden, trazabilidad y consistencia en los registros de consumo.

### **Módulo de Registro**

Está compuesto por un conjunto de tablas diseñadas para recopilar y organizar la información proveniente de las bases de datos del CMT y de los protocolos de tronadura. Estas tablas consolidan variables operacionales, administrativas y económicas, permitiendo estructurar los datos de manera uniforme y estandarizada.

Cada tabla fue construida a partir de los registros obtenidos del sistema CGU y de la documentación técnica levantada en terreno, integrando información como fechas de tronadura, Artículos explosivos, Valor total, volumen de roca removido y costos asociados.

## Módulo de Modelo de Datos

Corresponde a la estructura interna de Excel que permite relacionar varias tablas independientes mediante conectores y campos clave. Esta herramienta transforma múltiples fuentes de información en un único modelo integrado, evitando la duplicación de datos y permitiendo realizar análisis conjuntos entre variables provenientes de distintos registros.

El modelo de datos opera mediante los siguientes principios:

- **Relaciones entre tablas:** se vinculan campos comunes (por ejemplo, Fechas, Artículo, Frente de Trabajo) para permitir que la información fluya entre distintos conjuntos de datos.
- **Conectores o llaves:** cada tabla posee columnas clave que actúan como identificadores únicos, permitiendo unir registros sin alterar la estructura original de la información.
- **Normalización:** las tablas se mantienen separadas (tronaduras, explosivos, costos, ubicaciones), pero Excel las interpreta como un solo sistema lógico gracias a las conexiones del modelo.
- **Consulta unificada:** al generar tablas dinámicas o Dashboard interactivos, Excel combina automáticamente los datos vinculados y permite comparar consumos, costos, factores de carga y resultados operacionales sin necesidad de copiar o fusionar manualmente la información.
- **Flexibilidad analítica:** el modelo permite filtrar, segmentar y analizar grandes volúmenes de información desde una interfaz única, facilitando la identificación de patrones o desviaciones operacionales.

Módulo de Visualización: corresponde al Dashboard interactivo desarrollado en Excel, el cual transforma los datos del sistema en indicadores gráficos que

permiten interpretar de manera clara y rápida el comportamiento del consumo de explosivos en las obras del CMT. Este panel centraliza la información procesada por el Modelo de Datos y la presenta mediante gráficos, indicadores y Segmentadores que facilitan el análisis operacional.

Sus características principales son la Integración automática. El Dashboard se alimenta directamente desde el Modelo de Datos, lo que permite que cualquier modificación o actualización en las tablas se refleje de manera inmediata en las visualizaciones. También están los Indicadores clave (KPI), los cuales incluyen métricas esenciales como consumo total por obra, factor de carga, costo por metro cúbico y KG de los tipos de explosivos utilizados. Los Gráficos dinámicos, se utilizan gráficos de barras, líneas y tablas comparativas que permiten observar diferencias entre convenios, zonas y períodos. Los Segmentadores, herramientas de filtrado interactivo que permiten seleccionar Año, Mes, convenio u otros parámetros, modificando todas las visualizaciones del panel de manera sincronizada.

## **Diseño De La Base De Datos**

Cada una de estas ubicaciones operativas posee su propio registro de movimientos de explosivos, los cuales se encuentran almacenados en una base de datos externa y segmentada según criterios administrativos y logísticos.

En este contexto, se implementa la solución mediante una herramienta de análisis y gestión, cuyo desarrollo se inicia con la creación de cuatro tablas puente que constituyen el primer criterio de filtrado del sistema. Dichas tablas corresponden a:

- Tabla de Subjefatura

- Tabla de Frente de Trabajo
- Tabla de Artículos Explosivos
- Tabla de Calendario

Estas tablas son incorporadas al sistema mediante el modelo de datos del software Microsoft Excel, quedando enlazadas y preparadas para su vinculación con las tablas principales de la base de datos, lo que permite establecer relaciones dinámicas entre los distintos conjuntos de información técnica y administrativa.

**Tabla 9 - Tabla puente Fechas**

AÑO	MES	N° MES	Año-Mes
2024	Enero	1	2024-01
2024	Febrero	2	2024-02
2024	Marzo	3	2024-03
2024	Abril	4	2024-04
2024	Mayo	5	2024-05
2024	Junio	6	2024-06
2024	Julio	7	2024-07
2024	Agosto	8	2024-08
2024	Septiembre	9	2024-09
2024	Octubre	10	2024-10
2024	Noviembre	11	2024-11

2024	Diciembre	12	2024-12
2025	Enero	1	2025-01
2025	Febrero	2	2025-02
2025	Marzo	3	2025-03
2025	Abril	4	2025-04
2025	Mayo	5	2025-05
2025	Junio	6	2025-06
2025	Julio	7	2025-07
2025	Agosto	8	2025-08
2025	Septiembre	9	2025-09
2025	Octubre	10	2025-10
2025	Noviembre	11	2025-11
2025	Diciembre	12	2025-12

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 10 - tabla puente Subjefatura**

<b>Subjefatura</b>
<b>SJZ CMT "ARICA"</b>
<b>SJZ CMT "PUERTO MONTT"</b>
<b>SJZ CMT "COYHAIQUE"</b>

**SJZ CMT "PUNTA ARENAS"**

**Fuente: Elaboración Propia**

**Tabla 11 - Tabla puente Frente de Trabajo**

Frente De Trabajo	Orden
Ollagüe	1
Futaleufú	2
Puelo X	3
La Tapera	4
Lago Brown	5
Troncal XI	6
Caleta 2 de mayo	7

**Fuente: Elaboración Propia**

**Tabla 12 - Puente de Explosivos**

<b>Articulo</b>
ANFO PREMIUM
EMULEX 1" 1/4 X 8
EMULEX 1" 1/4 x 16
EMULSIONES EMULEX 1 X 8

EMULSIONES EMULEX 2 X 8
EMULTEX 1" 1/4 X 16
EXSACORTE-D
T-ANFO
TRIMEX

**Fuente: Elaboración Propia**

Una vez finalizado el proceso de creación de las primeras tablas puente, se procede a la recopilación y estructuración de la información necesaria para conformar la primera tabla principal de datos. Esta tabla contiene los metros cúbicos de roca removida, tanto en tareas de excavación general como en sistemas de drenaje, clasificados por ubicación, fecha y otros criterios operacionales relevantes. Posteriormente esta información es incorporada al modelo de datos, permitiendo su integración con las demás estructuras del sistema (Tabla correspondiente adjunta en el Anexo) (Tabla 26)

En la segunda tabla principal, se llevó a cabo el análisis del costo unitario por metro cúbico de roca removida en cada frente de trabajo. A partir de este análisis, se construyó la tabla de cubicación monetizada, en la cual mediante el uso de la tabla de precios unitarios se obtuvieron los valores económicos asociados a las actividades de remoción. Esta estructura permite vincular el rendimiento físico con su impacto económico, proporcionando un insumo fundamental para la evaluación de costos y la gestión presupuestaria del proyecto.

**Tabla 13 - Tabla de Precios Unitarios m3**

<b>SUBJEFATURA</b>	<b>FRENTE DE TRABAJO</b>	<b>PRODUCCION CORTE EN ROCA</b>	<b>EXCAVACION EN ROCA DRENAJE Y ESTRUCTURA</b>
<b>SJZ CMT "ARICA"</b>	Ollagüe	\$ 27.755	\$ 31.097
<b>SJZ CMT "PUERTO MONTT"</b>	Futaleufú	\$ 18.662	\$26.092
<b>SJZ CMT "PUERTO MONTT"</b>	Puelo X	\$ 21.780	\$ 33.561
<b>SJZ CMT "COYHAIQUE"</b>	La Tapera	\$ 24.179	\$ 25.618
<b>SJZ CMT "COYHAIQUE"</b>	Lago Brown	\$ 22.256	\$24.594
<b>SJZ CMT "PUNTA ARENAS"</b>	Troncal XI	\$ 24.495	\$25.865
<b>SJZ CMT "PUNTA ARENAS"</b>	Caleta 2 de mayo	\$ 26.192	\$ 21.021

**Fuente: Elaboración Propia**

Con la información recopilada, los datos fueron organizados según los criterios previamente definidos, completándose así la segunda tabla principal, la cual fue posteriormente incorporada al modelo de datos para su integración y análisis (Tabla correspondiente adjunta en el Anexo.) (Tabla 27)

Posteriormente, se procedió a la creación de la Tabla 3: Artículos, destinada a registrar el movimiento de cada insumo utilizado en las operaciones de tronadura en los distintos frentes de trabajo. Esta tabla incluye información detallada como cantidad utilizada, valor total, fecha de consumo y otros atributos relevantes para el control de gestión (Tabla correspondiente adjunta en el Anexo.) (Tabla 28)

Finalmente, se desarrolló la tabla de Saldo Carátula, En ella se consolida el presupuesto disponible para las actividades de excavación en roca, junto con el ejecutado, identificando además el tipo de movimiento de roca asociado y el mes de operación (Tabla correspondiente adjunta en el Anexo.) (Tabla 29)

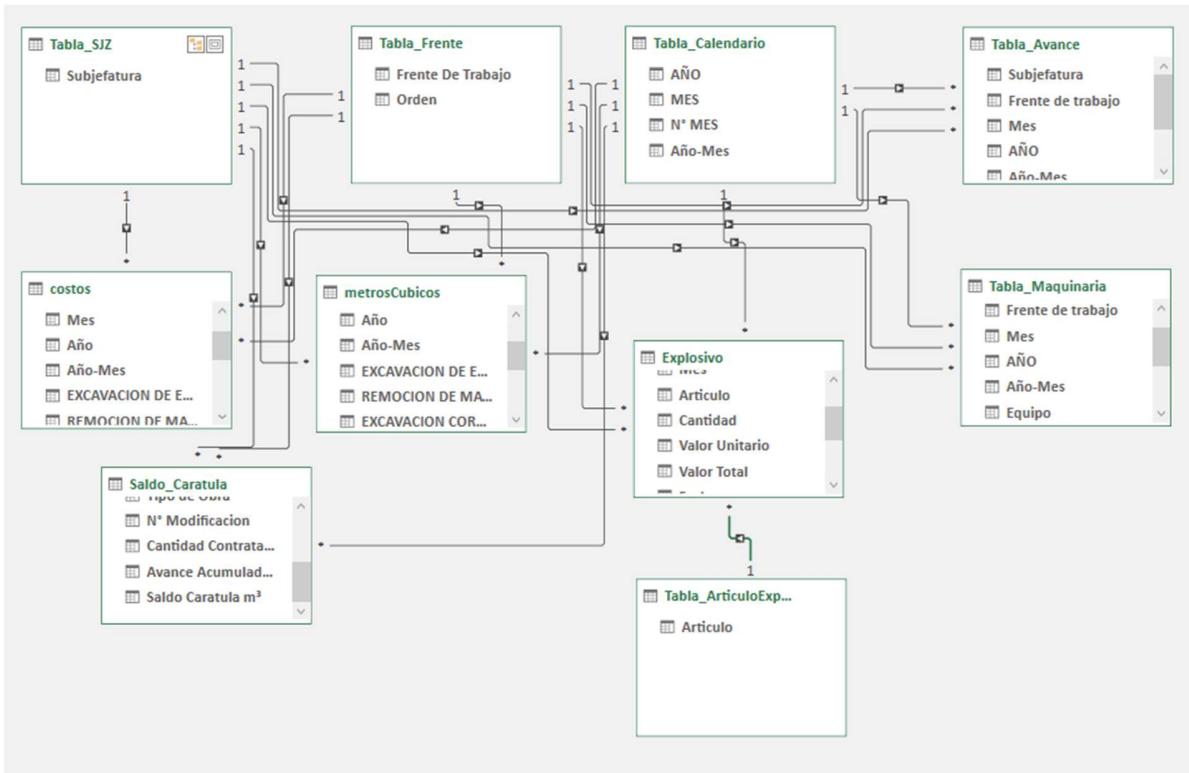
Una vez que todas las tablas han sido completadas y cargadas en el modelo de datos de Microsoft Excel, se procede a establecer los vínculos y relaciones entre los distintos conjuntos de información, con el fin de consolidar el sistema relacional que sustenta el análisis técnico y económico del proyecto.

### **Implementación En Excel Y Modelo De Datos**

Utilizando Microsoft Excel como plataforma principal, aprovechando la función Modelo de Datos para integrar y relacionar la información proveniente de distintas fuentes. En total se cargaron 9 tablas correspondientes las cuales son, excavación en roca (m3), cubicación monetizada, artículos explosivos utilizados, saldo caratula, avance físico vs presupuestado además de las 4 tablas puente nombradas anteriormente.

El Modelo de Datos permitió establecer conexiones directas entre las tablas mediante identificadores clave, lo cual facilitó la construcción de tablas dinámicas y gráficos interactivos capaces de relacionar columnas provenientes de diferentes conjuntos de información. Gracias a estas relaciones, las visualizaciones y métricas del sistema responden automáticamente a los Segmentadores (filtros), permitiendo evaluar variables específicas por Subjefatura, Frente de Trabajo, Año, Mes.

**Ilustración 16, Diagrama de conexiones de las tablas del Modelo de Datos**



**Fuente: Elaboración Propia**

## Desarrollo Del Dashboard Interactivo

Se procedió a generar la Hoja donde estarán las tablas dinámicas, la cual sirvió como base para la construcción del panel.

La secuencia de desarrollo fue la siguiente:

Creación de la hoja del Dashboard: Se definió un espacio dedicado exclusivamente a la visualización, independiente del área de cálculos y de las tablas de registro.

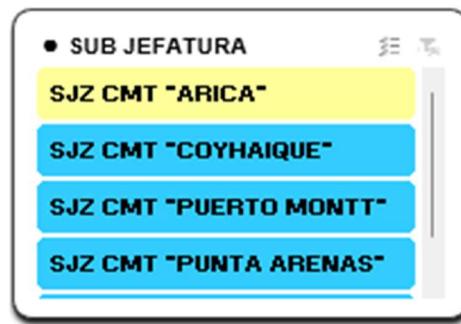
Inserción de segmentadores (filtros interactivos): Para permitir el análisis dinámico, se incorporaron segmentadores que permiten filtrar de forma simultánea todos los cuadros del Dashboard.

Los Segmentadores seleccionados fueron:

- Subjefatura
- Frente de Trabajo
- Año
- Mes

Estos filtros permiten obtener visualizaciones específicas según la zona, periodo de ejecución y frente operativo.

#### Ilustración 17 - Segmentador de Subjefatura de la Herramienta de gestión



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 18 - Segmentador de Frente de Trabajo de la Herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 19 - Segmentador de Año y Mes de la Herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

Después de implementar los Segmentadores, se generaron una serie de tablas dinámicas que alimentan los diferentes cuadros del Dashboard. Cada tabla dinámica cumple una función específica

La primera tabla dinámica muestra el volumen removido ( $m^3$ ) efectivamente extraídos en el periodo seleccionado, permitiendo analizar la producción.

**Tabla 14 - Tabla Dinámica de Volumen removido ( $m^3$ )**

PRODUCCION CORTE EN ROCA	EXCAVACION EN ROCA DRENAGE Y ESTRUCTURA
162491,18	566,06

Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 20 - Cuadro de Volumen removido de la herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente, se elaboró una segunda tabla dinámica destinada a Presentar el gasto económico asociado a los explosivos utilizado.

**Tabla 15 - Tabla Dinámica de Gasto de Explosivo**

<b>Movimiento</b>	<b>GASTO</b>
<b>Fecha</b>	<b>Valor Total</b>
2024-01	\$ 14.372.029,16
2024-02	\$ 16.612.012,82
2024-03	\$ 22.556.810,55
2024-04	\$ 22.365.899,27
2024-05	\$ 15.746.524,60
2024-06	\$ 8.438.853,57
2024-07	\$ 12.313.629,47
2024-08	\$ 12.199.033,03
2024-09	\$ 29.249.048,27
2024-10	\$ 21.836.527,97
2024-11	\$ 25.101.358,72
2024-12	\$ 39.736.353,53
2025-01	\$ 30.002.840,64
2025-02	\$ 15.404.206,23
2025-03	\$ 23.249.287,74
2025-04	\$ 19.769.669,11

2025-05	\$ 25.610.153,85
2025-06	\$ 12.738.568,20
2025-07	\$ 25.172.632,55
2025-08	\$ 22.244.577,30
2025-09	\$ 25.776.660,48
2025-10	\$ 20.390.967,36
2025-11	\$ 44.432.134,57
<b>Total</b>	<b>\$ 505.319.778,99</b>

Fuente: Elaboración Propia

#### Ilustración 21 - Cuadro de Gasto de Explosivo de la Herramienta de gestión



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se creó una tercera tabla dinámica que representa la producción monetizada, es decir, la cubicación convertida en valor económico según los Valores unitarios designados en cada Convenio.

**Tabla 16 - Tabla Dinámica de producción**

PRODUCCION CORTE EN ROCA	EXCAVACION EN ROCA DRENAGE Y ESTRUCTURA
\$ 3.673.491.659,11	\$ 11.411.667,40

Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 22 - Cuadro de producción de la Herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

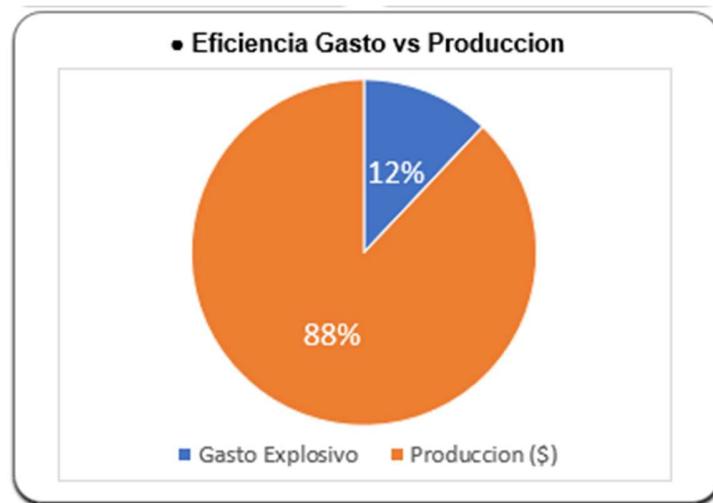
Con estas tablas iniciales se desarrolló el primer análisis comparativo del Dashboard, el cual consiste en un gráfico que relaciona el gasto en explosivos con la producción monetizada, permitiendo evaluar de manera directa la eficiencia del uso de explosivos en cada periodo.

**Tabla 17 - Tabla dinámica de Grafico de Eficiencia**

Gasto Explosivo	Producción (\$)
\$ 505.319.778,99	\$ 3.684.903.327

Fuente: Elaboración Propia

### Ilustración 23 - Cuadro de Eficiencia de la Herramienta de gestión



Fuente: Elaboración Propia

Según lo mostrado en el gráfico, las obras ejecutadas por el CMT pueden considerarse operacionalmente eficientes, dado que la producción generada es significativamente superior al costo total asociado al uso de explosivos. Esto evidencia una relación favorable entre el rendimiento físico de las actividades.

A partir de allí se añadió una cuarta tabla dinámica que permite calcular los kilogramos de explosivos utilizados. Este cálculo se obtiene multiplicando la cantidad de unidades consumidas por el peso unitario de cada explosivo según su ficha técnica, lo que permite obtener una estimación precisa del consumo real en terreno

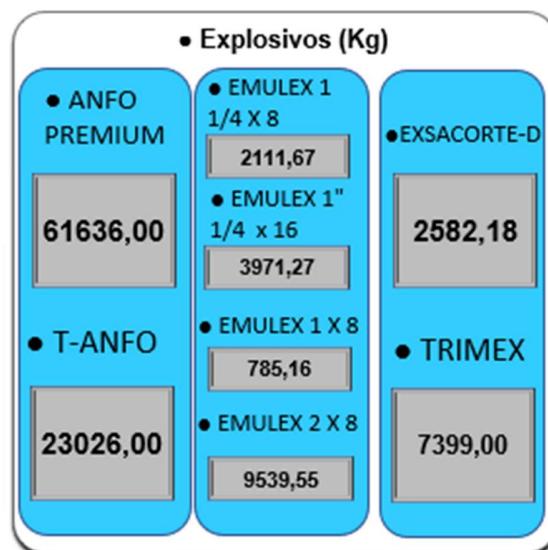
Tabla 18 - Tabla Dinámica de Kg de explosivo

Movimiento	GASTO
Explosivo	Suma de Kg Explosivo

ANFO PREMIUM	61636,00
EMULEX 1 1/4 X 8	2111,67
EMULEX 1" 1/4 x 16	3971,27
EMULSIONES EMULEX 1 X 8	785,16
EMULSIONES EMULEX 2 X 8	9539,55
EXSACORTE-D	2582,18
T-ANFO	23026,00
TRIMEX	7399,00

Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 24 - Cuadro de KG de explosivo de la Herramienta de gestión



Fuente: Elaboración Propia

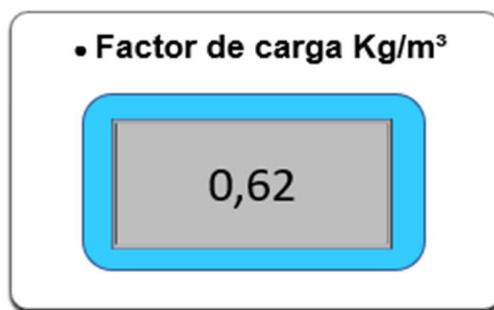
Posteriormente, se incorporó una nueva tabla dinámica destinada a calcular el factor de carga, uno de los indicadores fundamentales para evaluar la calidad y eficiencia de una tronadura. Este parámetro permite relacionar la cantidad de explosivo utilizado con el volumen de roca removida, proporcionando una medida directa del desempeño del diseño de voladura. En el caso del CMT, se procura mantener este valor en torno a 0,7, lo que constituye el rango operativo considerado óptimo para sus condiciones de trabajo.

**Tabla 19 - Tabla Dinámica del Factor de Carga**

Volumen removido	KG explosivo
163057,24	101069,66

Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 25 - Cuadro de Factor de Carga de la Herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

Como siguiente paso se añadió otra tabla dinámica que alimenta un gráfico de barras horizontales donde se presenta la lista detallada de los artículos utilizados.

**Tabla 20 - Tabla Dinámica de Artículos en total Utilizados**

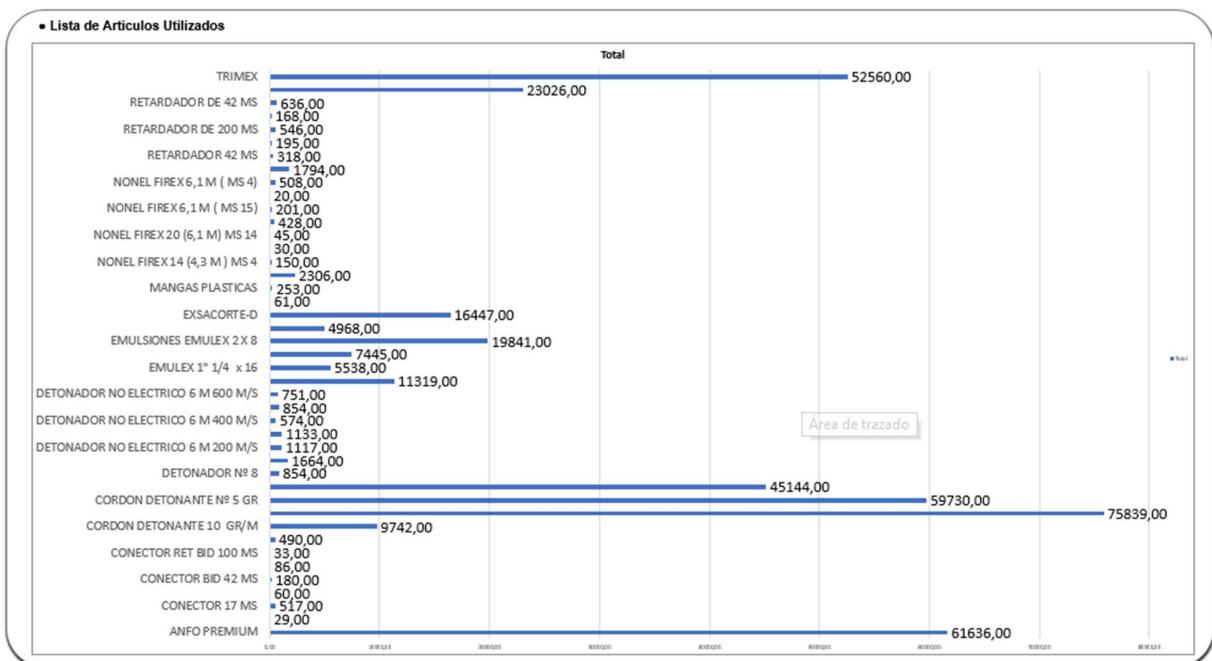
<b>Movimiento</b>	<b>GASTO</b>
<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Suma de Cantidad</b>
ANFO PREMIUM	61636,00
BID. TECNEL F12 10.2M RETARD.42MS F69 EX	29,00
CONECTOR 17 MS	517,00
CONECTOR 25 MS	60,00
CONECTOR BID 42 MS	180,00
CONECTOR DE RETARDO BI M/S 200	86,00
CONECTOR RET BID 100 MS	33,00
CONECTOR RETARDADOR BID 42 MS	490,00
CORDON DETONANTE 10 GR/M	9742,00
CORDON DETONANTE N°5 BRITACORD 5R	75839,00
CORDON DETONANTE N° 5 GR	59730,00
CORDON DETONANTE N° 5 GRS REFORZADO	45144,00
DETONADOR N° 8	854,00
DETONADOR NO ELECTRICO	1664,00
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 200 M/S	1117,00
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 300 M/S	1133,00

DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 400 M/S	574,00
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 500 M/S	854,00
DETONADOR NO ELECTRICO 6 M 600 M/S	751,00
EMULEX 1 1/4 X 8	11319,00
EMULEX 1" 1/4 x 16	5538,00
EMULSIONES EMULEX 1 X 8	7445,00
EMULSIONES EMULEX 2 X 8	19841,00
EMULTEX 1" 1/4 X 16	4968,00
EXSACORTE-D	16447,00
FULMINANTE N° 8	61,00
MANGAS PLASTICAS	253,00
MECHA LENTA	2306,00
NONEL FIREX 14 (4,3 M ) MS 4	150,00
NONEL FIREX 20 (6,1 M) MS 10	30,00
NONEL FIREX 20 (6,1 M) MS 14	45,00
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 12)	428,00
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 15)	201,00
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 16)	20,00
NONEL FIREX 6,1 M ( MS 4)	508,00

NONEL FIREX 6,1 M MS 8 200 M	1794,00
RETARDADOR 42 MS	318,00
RETARDADOR DE 17 MS	195,00
RETARDADOR DE 200 MS	546,00
RETARDADOR DE 25 MS	168,00
RETARDADOR DE 42 MS	636,00
T-ANFO	23026,00
TRIMEX	52560,00

Fuente: Elaboración Propia

### Ilustración 26 - Cuadro de artículos Utilizados de la Herramienta de gestión



Fuente: Elaboración Propia

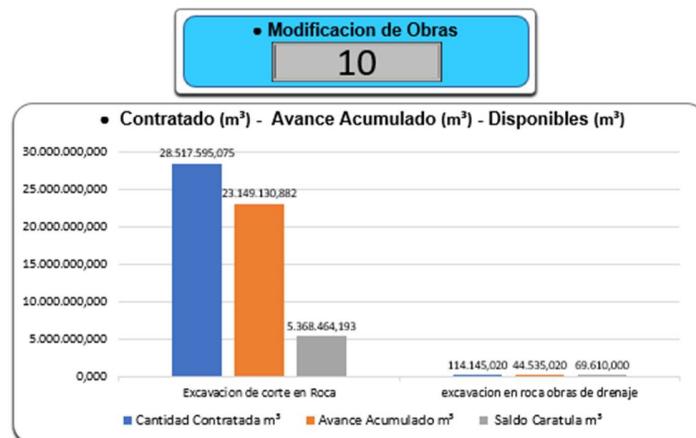
Finalmente, se incorporó la tabla asociada al saldo de carátula, que muestra la relación entre los metros cúbicos presupuestados en el contrato, los ya ejecutados y el saldo disponible, generando un cuadro que permite evaluar la situación contractual del convenio, además un cuadro que muestra si se realizó alguna modificación al contrato.

**Tabla 21 - Tabla Dinámica del Saldo Caratula**

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Cantidad Contratada m<sup>3</sup></b>	<b>Avance Acumulado m<sup>3</sup></b>	<b>Saldo Caratula m<sup>3</sup></b>
Excavación de corte en Roca	28.517.595,075	23.149.130,882	5.368.464,193
Excavación en roca obras de drenaje	114.145,020	44.535,020	69.610,000

Fuente: Elaboración Propia

**Ilustración 27 - Cuadro de m<sup>3</sup> contratados y modificación de obra de la Herramienta de gestión**



Fuente: Elaboración Propia

## **Limitaciones**

### **Problemas por los estados de pago**

Una de las principales limitaciones del sistema se relaciona con los desfases generados por los estados de pago. Debido al modo de funcionamiento entre el CMT y el Ministerio de Obras Públicas (MOP), los ingresos correspondientes a los trabajos ejecutados en el mes dependen de la aprobación y firma de los estados de pago, lo que introduce un retraso administrativo respecto del registro financiero.

Como consecuencia, los saldos de carátula, el avance presupuestario y los movimientos de tierra pueden presentar fechas distintas a las del momento en que las actividades ocurrieron físicamente en terreno. Esta discrepancia temporal afecta la sincronización entre los datos operacionales y los datos contables.

### **Incongruencias de visualización del sistema**

Como segunda limitación se identifican las incongruencias generadas dentro del sistema, donde en determinados meses se registran gastos de explosivos sin producción asociada, o bien el fenómeno inverso: producción registrada sin consumo de explosivos. Estas discrepancias generan errores en los análisis y cálculos del modelo, afectando la precisión de los indicadores operacionales.

Este problema puede originarse por diversas situaciones. Una de ellas corresponde a la modalidad de turnos del CMT; cuando una tronadura se ejecuta al término de un turno, el sistema puede registrar el gasto de explosivos, pero la producción asociada al movimiento de roca se contabiliza recién al turno siguiente, generando un desfase temporal en los datos. De modo similar, puede registrarse

producción sin consumo del mes si el gasto de explosivos quedó imputado al período anterior.

Una segunda situación corresponde al registro del consumo de explosivos en kilogramos para el cálculo del factor de carga. En este indicador únicamente se consideran los explosivos principales, excluyendo aquellos utilizados en pre-corte, lo que puede generar diferencias entre el consumo total informado y el consumo considerado por el modelo analítico.

### **Proceso de carga de datos**

Como última limitación, Pese a que se ha logrado una semi-automatización en la incorporación de información, aún existen registros que deben ser ingresados manualmente, lo que puede generar demoras y dificultades al momento de requerir un análisis oportuno de la situación operativa en los distintos frentes de trabajo. Esta dependencia de tareas manuales introduce el riesgo de errores de digitación, inconsistencias temporales y retrasos en la actualización del modelo, afectando la capacidad de obtener indicadores en tiempo real y disminuyendo la eficiencia del proceso de gestión.

## RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación corresponden a la aplicación del sistema de control de gestión de explosivos desarrollado en este estudio. Como primer logro, se concretó la recolección integral de la información proveniente de los distintos medios utilizados por el CMT, lo que permitió la construcción de las cuatro tablas principales del sistema. Esta consolidación favoreció una mayor trazabilidad, al centralizar los datos en un único modelo, proporcionando los insumos técnicos necesarios para identificar variables operacionales clave tales como tipo de artículo explosivo, cantidad utilizada, volumen de roca removido y costos asociados.

En segundo lugar, se consiguió la integración completa de cada tabla mediante el Modelo de Datos de Excel, generando una estructura coherente, sin duplicidades y con la codificación oficial del CGU. De esta forma, el sistema fue capaz de registrar información crítica como: consumo total de explosivos por período, consumo por tipo de explosivo, consumo por frente de trabajo, costo total, costo unitario, volumen removido y cubicación monetizada. Este resultado evidencia el cumplimiento del objetivo específico relacionado con el establecimiento de una base estructurada y funcional que soporte el análisis técnico y económico del proceso de voladura.

Finalmente, la herramienta permitió calcular los parámetros técnicos esenciales a partir de la integración de los registros recopilados. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Factor de carga promedio para los dos años analizados:  $0,62 \text{ kg/m}^3$

- Kilogramos totales de explosivo utilizados: indicador que permite estimar requerimientos futuros y proyectar consumos en obras similares.
- Eficiencia operativa promedio en los años evaluados: 88 %

Estos resultados demuestran que el modelo desarrollado permitió registrar, analizar y visualizar de manera integrada el comportamiento del consumo de explosivos, cumpliendo directamente con lo establecido en el Objetivo General. Asimismo, el cálculo de parámetros técnicos, el análisis económico y la identificación de patrones y anomalías consolidan al sistema como una herramienta robusta de apoyo para la planificación y la toma de decisiones en futuros convenios y proyectos del CMT.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del modelo de control de gestión de explosivos permitió integrar, organizar y analizar información técnica, logística y económica asociada al uso de explosivos en las obras civiles ejecutadas por el Cuerpo Militar del Trabajo (CMT).

Mediante la recopilación de registros operacionales, documentos normativos y datos provenientes del sistema CGU, fue posible construir una base de datos estandarizada que sistematiza el consumo de explosivos por tipo, ubicación y período. La aplicación del Modelo de Datos y la construcción del Dashboard interactivo permitieron calcular de forma automática parámetros operacionales clave como el factor de carga, el consumo unitario, los kilogramos utilizados y la relación entre producción física y gasto económico. Estos resultados permitieron identificar variaciones, tendencias y comportamientos diferenciados entre frentes de trabajo.

Asimismo, la integración visual lograda con el Dashboard permitió detectar patrones y anomalías relevantes, tales como inconsistencias en registros como, variaciones atípicas del factor de carga y desfases entre el consumo registrado en terreno y los datos recopilados. La herramienta evidenció oportunidades de mejora en la estandarización de registros y en la planificación del uso de explosivos. En síntesis, el modelo desarrollado demostró ser una herramienta eficaz para el análisis integrado del consumo de explosivos, permitiendo transformar datos dispersos en indicadores útiles para la toma de decisiones.

A partir de los resultados obtenidos y del análisis del comportamiento operacional del uso de explosivos en las obras civiles del CMT, se proponen las siguientes recomendaciones:

Se sugiere continuar perfeccionando la estandarización de los registros. Esto mejoraría la precisión del sistema y reduciría las inconsistencias observadas en algunos convenios antiguos.

Asimismo, se recomienda avanzar hacia la automatización del sistema, integrando la base de datos desarrollada con plataformas de actualización automática como Power BI o módulos internos del CGU. La digitalización completa del flujo de datos permitiría obtener análisis en tiempo real y facilitaría la trazabilidad del consumo de explosivos, fortaleciendo el control institucional.

En el ámbito técnico, se sugiere profundizar en líneas de investigación orientadas a la optimización de tronaduras, como análisis de energías específicas, fragmentación estimada, influencia geomecánica en el factor de carga y eficiencia comparativa entre distintos tipos de explosivos. Estas líneas permitirían correlacionar el comportamiento del macizo rocoso con el rendimiento económico y operativo.

Finalmente, se recomienda evaluar la integración de nuevas variables operacionales en futuros convenios, así como la incorporación de indicadores de vibración y proyección, lo cual permitiría mejorar la seguridad y la eficiencia del proceso de tronadura.

Por otra parte, se recomienda mejorar los procedimientos internos de registro en los casos de transferencias de explosivos, vencimiento de material o movimientos no asociados directamente a una tronadura, ya que actualmente estos eventos se contabilizan como “gasto” al momento de retirarse del polvorín. Este método genera desviaciones que afectan el cálculo automático del sistema, obligando a realizar correcciones manuales para evitar distorsiones en el análisis del consumo real.

Se sugiere realizar un curso sobre como registrar estos datos con su código específico ya que es posible pero no se realiza, logrando de esta manera que el sistema pueda identificarlos y excluirlos de los cálculos operacionales. La implementación de esta codificación permitiría mejorar la trazabilidad, reducir errores de interpretación y asegurar que los indicadores del modelo reflejen únicamente el consumo asociado a la producción efectiva de obra.

## BIBLIOGRAFIA

- CMT-Chile. (s. f.). CMT Chile. Recuperado de <https://www.cmt-chile.cl/>
- CodelcoEduca. (s. f.). Glosario (entrada: burden). Recuperado de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/glosario.html?busqueda=burden>
- Dirección General de Movilización Nacional (DGMN). (2007). Reglamento complementario (versión junio 2021). Recuperado de [https://www.dgmn.cl/leydearmas/wp-content/uploads/2021/06/reglamento\\_complementario\\_2007.pdf](https://www.dgmn.cl/leydearmas/wp-content/uploads/2021/06/reglamento_complementario_2007.pdf)
- Enaex S.A. (2022). Ficha técnica ANFO Premium. Santiago de Chile: Enaex Servicios S.A. Recuperado de <https://www.enaex.com/cl/es/>
- Enaex S.A. (2022). Ficha técnica Emultex CN. Santiago de Chile: Enaex Servicios S.A. Recuperado de <https://www.enaex.com/cl/es/>
- ENAELEX. (s. f.). Enaex Chile. Recuperado de <https://www.enaex.com/cl/es/> Enaex+1 Encyclopaedia Britannica. (s. f.). Explosive. Recuperado de <https://www.britannica.com/technology/explosive>
- Escuelapedia. (s. f.). Historia y constitución química de los explosivos. Recuperado de <https://escuelapedia.com/historia-y-constitucion-quimica-de-los-explosivos/>
- EXSA S.A. (2022). Hoja técnica EXSACORTE y EXSATRON. Lima, Perú: EXSA S.A. Recuperado de <https://www.ilide.info/exsa-hoja-tecnica-exsacorte-y-exsatron-pr>
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1985). Surface Blast Design. International Society of Explosives Engineers.

López Jimeno, C. (1994). Manual de perforación y voladura de rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España.

López Jimeno, C. (2011). Perforación y voladura de rocas (3.<sup>a</sup> ed.). Ediciones del Castillo.

Mining alati Noticias. (s. f.). Diseño de mallas de perforación y fragmentación. Recuperado de <https://noticias.miningalati.com/diseno-de-mallas-de-perforacion-fragmentacion/>

Ministerio de Defensa Nacional. (2007). *Reglamento Complementario de la Ley N° 17.798 sobre Control de Armas y Elementos Similares* (Decreto MDN.SSG.DEPTO.III N° 83, de 22 de febrero de 2007). Santiago, Chile: Subsecretaría de Guerra.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. (2024). *Manual de Carreteras, Volumen N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción* (Edición junio 2024). Santiago, Chile: MOP – Dirección General de Obras Públicas.

Orica Mining Services. (2022). Senatel Trimex – Explosivo encartuchado. Lima, Perú: Orica Perú S.A. Recuperado de [https://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products\\_and\\_services/packaged\\_explosives/senatel\\_trimex/595](https://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/packaged_explosives/senatel_trimex/595)

Orica Mining Services. (s. f.). Senatel Trimex. Recuperado de [https://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products\\_and\\_services/packaged\\_explosives/senatel\\_trimex/595](https://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/packaged_explosives/senatel_trimex/595) Orica Mining Services

Rustan, A. (1992). Burden, spacing and borehole diameter at rock blasting (Tesis). Luleå University of Technology.

## ANEXO

**Tabla 22 - Tabla resumen de Metros cúbicos extraídos**

Subjefatura	Frente de Trabajo	Mes	Año	Año - Mes	Excavación en Roca	Excavación en Roca para Drenaje
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Puerto Montt"	Futaleufu	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Puerto Montt"	Puelo X	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Coyhaique"	La Tapera	enero	2024	2024 - 01	1.603,50	
SJZ CMT "Coyhaique"	Lago Brown	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Punta Arenas"	Trocal XI	enero	2024	2024 - 01	2.482,19	
SJZ CMT "Punta Arenas"	Caleta 2 de Mayo	enero	2024	2024 - 01	266,67	
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	febrero	2024	2024 - 02	3.198,17	
SJZ CMT "Puerto Montt"	Futaleufu	febrero	2024	2024 - 02	9.296,00	
SJZ CMT "Puerto Montt"	Puelo X	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Coyhaique"	La Tapera	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Coyhaique"	Lago Brown	febrero	2024	2024 - 02	317,27	
SJZ CMT "Punta Arenas"	Trocal XI	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Punta Arenas"	Caleta 2 de Mayo	febrero	2024	2024 - 02	87,43	3,55

**Fuente: Elaboración Propia**

**Tabla 23 - Tabla resumen de Cubicación Monetizada**

Subjefatura	Frente de Trabajo	Mes	Año	Año - Mes	Excavación en Roca	Excavación en Roca para Drenaje
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Puerto Montt"	Futaleufu	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Puerto Montt"	Puelo X	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Coyhaique"	La Tapera	enero	2024	2024 - 01	38.771.002,32	
SJZ CMT "Coyhaique"	Lago Brown	enero	2024	2024 - 01		
SJZ CMT "Punta Arenas"	Trocal XI	enero	2024	2024 - 01	60.801.244,05	
SJZ CMT "Punta Arenas"	Caleta 2 de Mayo	enero	2024	2024 - 01	6.984.594,45	
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	febrero	2024	2024 - 02	88.765.208,35	
SJZ CMT "Puerto Montt"	Futaleufu	febrero	2024	2024 - 02	173.481.952,00	
SJZ CMT "Puerto Montt"	Puelo X	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Coyhaique"	La Tapera	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Coyhaique"	Lago Brown	febrero	2024	2024 - 02	7.061.161,12	
SJZ CMT "Punta Arenas"	Trocal XI	febrero	2024	2024 - 02		
SJZ CMT "Punta Arenas"	Caleta 2 de Mayo	febrero	2024	2024 - 02	2.289.966,56	74.625,00

**Fuente: Elaboración Propia**

**Tabla 24 - Tabla resumen de Artículos Utilizados**

Subjefatura	Frente de Trabajo	Mes	Artículo	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total	Fecha	Año-Mes	Movimiento	Factor k	Kg Explosivo
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Enero	ANFO PREMIUM	1.920	1578 \$	3.029.875,20	18/01/2024	2024-01	GASTO	1	1920
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Enero	ANFO PREMIUM	460	1578 \$	725.907,60	22/01/2024	2024-01	GASTO	1	460
SIZ CMT "PUNTA ARENAS"	Troncal XI	Enero	ANFO PREMIUM	195	1280 \$	249.664,35	26/01/2024	2024-01	GASTO	1	195
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Febrero	ANFO PREMIUM	1.065	1578 \$	1.680.633,90	12/02/2024	2024-02	GASTO	1	1065
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Febrero	ANFO PREMIUM	340	1578 \$	536.540,40	19/02/2024	2024-02	GASTO	1	340
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Marzo	ANFO PREMIUM	1.625	1578 \$	2.564.347,50	20/03/2024	2024-03	GASTO	1	1625
SIZ CMT "PUNTA ARENAS"	Troncal XI	Marzo	ANFO PREMIUM	360	1280 \$	460.918,80	27/03/2024	2024-03	GASTO	1	360
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Abri	ANFO PREMIUM	940	1578 \$	1.483.376,40	17/04/2024	2024-04	GASTO	1	940
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Abri	ANFO PREMIUM	615	1578 \$	970.506,90	18/04/2024	2024-04	GASTO	1	615
SIZ CMT "PUNTA ARENAS"	Troncal XI	Abri	ANFO PREMIUM	100	1280 \$	128.033,00	29/04/2024	2024-04	GASTO	1	100
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Mayo	ANFO PREMIUM	970	1578 \$	1.530.718,20	16/05/2024	2024-05	GASTO	1	970
SIZ CMT "PUERTO MONTT"	Futaleufú	Mayo	ANFO PREMIUM	1.065	1578 \$	1.680.633,90	20/05/2024	2024-05	GASTO	1	1065

**Fuente: Elaboración Propia**

**Tabla 25 - Tabla resumen de Saldo Caratula (m3)**

Subjefatura	Frente de Trabajo	Mes	Año	Año - Mes	Tipo de Obra	Numero de Modificación	Cantidad Contratada m3	Avance Acumulado m3	Saldo Caratula m3
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	enero	2024	2024 - 01	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	29.710.100	22.637.900
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	febrero	2024	2024 - 02	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	29.710.100	22.637.900
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	marzo	2024	2024 - 03	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	29.710.100	22.637.900
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	abril	2024	2024 - 04	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	30.754.910	21.593.090
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	mayo	2024	2024 - 05	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	31.199.910	21.148.090
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	junio	2024	2024 - 06	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	31.703.290	20.644.710
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	julio	2024	2024 - 07	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	31.800.680	20.547.320
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	agosto	2024	2024 - 08	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	34.294.780	18.053.220
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	septiembre	2024	2024 - 09	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	36.461.180	15.886.820
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	octubre	2024	2024 - 10	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	39.421.420	12.926.580
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	noviembre	2024	2024 - 11	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	40.309.510	12.038.490
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	diciembre	2024	2024 - 12	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	40.309.510	12.038.490
SJZ CMT "Arica"	Ollagüe	enero	2025	2025 - 01	Excavación de corte en Roca	2	52.348.000	47.011.110	5.336.890

**Fuente: Elaboración Propia**