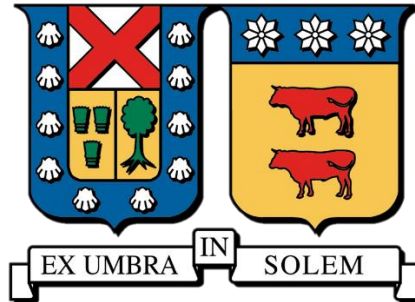


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE  
MATERIALES  
SANTIAGO-CHILE



“Planificación de avance de TBM en Block Caving mediante  
Simulación de eventos discretos”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

Francisco Ignacio Scepanovic Vergara

Profesor guía

Raúl Castro Ruiz

Profesor co-referente

Gonzalo Nelis

SANTIAGO DE CHILE

2024

# Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mis papás, Carla y Gabriel por siempre apoyarme y entregarme toda oportunidad posible. Estoy agradecido de todo lo que me han entregado y facilitado para llegar donde estoy. Para mí son los mejores papás del mundo, los amo.

De igual manera agradezco tener a mis abuelos, quienes entregan un apoyo incondicional y se alegran por cada logro por más pequeño que sea. También quiero agradecer a mis amigos y compañeros que conocí en este largo trayecto, quienes hicieron que los años pasaran de manera rápida y más cálida.

Finalmente quiero agradecer a mi novia Arianna, quien me ha acompañado en estos casi 7 años. Apoyándome en las buenas y en las malas, ayudándome en momentos en los que dudaba si podría o no.

Gracias a todos

## Resumen

En el presente trabajo se realizó una comparación de rendimiento y financiera entre perforación y tronadura convencional y Tunnel Boring Machine (TBM) en el nivel de producción y en el nivel de hundimiento del método Block Caving, mediante un software de simulación de eventos discretos llamado SimMine. Este software permite planificar y simular de manera rápida distintos escenarios, ya que no requiere de codificación ni programación en un lenguaje específico.

La primera etapa para lograr estos escenarios fue la recopilación de distintos parámetros para cada método. Para perforación y tronadura se hizo un benchmarking del rendimiento en avances horizontales, los tiempos de cada actividad, capacidad de LHD y camiones, las velocidades de cada equipos. Se implementó la utilización de múltiples frentes, ya que esto permite un aumento en la utilización de los equipos y además incrementa el rendimiento mensual con la misma cantidad de equipos. Para TBM igualmente se realizó un benchmarking de rendimiento específicamente para roca dura y se investigó sobre los costos de este equipo los cuales fueron determinados con un método de estimación realizado en el año 1999 y actualizados para el año 2024. Este estudio también contempla restricciones operacionales como el tiempo de preparación de retroceso de la TBM, los tiempos de servicios que se realizan cada 180 metros, tiempos adicionales en intersecciones y respeta los giros en ángulos de 120 grados.

Para la creación de los niveles de producción y hundimiento, se utilizó como referencia el caso base el cual se desarrolla en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) en los macrobloques N01 y S01. Se modificaron las distancias entre zanja ya que se optó por simular una malla con dimensiones actualizadas. Y para TBM se tuvo que crear galerías auxiliares para que esta pudiera excavar en los niveles.

Se obtuvo que la TBM tenía un mejor rendimiento y costos menores en comparación a perforación y tronadura convencional en el nivel de producción. En el nivel de hundimiento se obtuvo que la TBM tenía un mejor rendimiento sin embargo tiene un costo mayor, debido a que excava más metros por las restricciones que tiene este método. Aun así, lograba terminar el nivel de hundimiento unos meses antes que perforación y tronadura convencional.

Según el estudio la TBM es una opción viable para implementar en la minería de caving debido a su alto rendimiento y a su menor costo por metro. Sin embargo, tiene bastantes restricciones y no es capaz de realizar el nivel de producción sin perforación y tronadura. Lo ideal es utilizar ambos métodos en conjuntos, utilizando la TBM en sectores donde los frentes de avance disponibles sean pocos y perforación y tronadura donde se requiera versatilidad.

# 1 Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo General.....	4
1.2	Objetivos específicos .....	4
1.3	Hipótesis .....	4
1.4	Alcances .....	4
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Antecedentes generales del método Block Caving / Panel Caving.....	5
2.2	Perforación y Tronadura convencional .....	6
2.2.1	Benchmarking de rendimientos .....	7
2.3	Tunnel Boring Machine .....	9
2.4	Benchmarking TBM.....	10
2.5	Estimación de costos de una TBM .....	11
2.5.1	Costos de adquisición .....	11
2.5.2	Costos de Montaje.....	11
2.5.3	Costos de excavación y sistema back-up .....	12
2.5.4	Costos de cortadores.....	13
2.5.5	Costos mano de obra.....	14
2.5.6	Costos Mantenimiento y Reparación .....	15
2.5.7	Costos de servicio .....	15
2.5.8	Costos de Energía .....	16
2.6	Planificación .....	16
2.6.1	Filosofía Lean.....	16
2.6.2	Softwares actuales.....	16
2.6.3	Deswik .....	17
2.6.4	UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) .....	18
2.7	Simulación de Eventos Discretos .....	19
2.8	SimMine .....	20
2.8.1	Simulación de eventos discretos utilizando SimMine .....	20
3	METODOLOGÍA.....	21
3.1	Parámetros de entrada PyT.....	22
3.1.1	Propiedades de la galería .....	22
3.1.2	Propiedades de la roca .....	22

3.1.3	Ciclo de actividades .....	22
3.1.4	Definición de equipos .....	24
3.1.5	Restricciones Operacionales PyT .....	25
3.1.6	Costos Operacionales PyT .....	25
3.2	Parámetros de entrada TBM .....	26
3.2.1	Propiedades de la Galería .....	26
3.2.2	Ciclo de actividades .....	26
3.2.3	Horario turnos y restricciones operacionales .....	27
3.2.4	Costos relacionados con TBM .....	28
3.3	Diseño Malla .....	29
3.3.1	Diseño Malla para PyT en nivel de producción .....	29
3.3.2	Diseño Malla para PyT en nivel de hundimiento .....	31
3.3.3	Diseño Malla para TBM en nivel de producción .....	33
3.3.4	Diseño Malla para TBM en nivel de hundimiento .....	37
4	Resultados .....	39
4.1	Simulación PyT en nivel de producción .....	39
4.2	Simulación TBM en nivel de producción .....	40
4.3	Costos PyT y TBM en nivel de producción .....	41
4.4	Simulación PyT en nivel de hundimiento .....	41
4.5	Simulación TBM en nivel de hundimiento .....	42
4.6	Costos PyT y TBM en nivel de hundimiento .....	43
5	Discusión .....	44
6	Conclusiones .....	46
6.1	Trabajo futuro .....	46
7	BIBLIOGRAFÍA .....	47

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Producción de cobre según tipo de yacimiento (Consejo Minero, 2023). .....	1
Figura 1.2: Equipo de perforación y tronadura. ....	2
Figura 1.3:TBM utilizada para construir un túnel en los Bronces. ....	3
Figura 1.4:Malla de producción 16 x 20. Elaboración propia. ....	3
Figura 2.1:Esquema de explotación mediante Block/Panel Caving (Gómez & Labbé, 2019) .....	5
Figura 2.2: Esquema ejemplo del ciclo de perforación y tronadura convencional.....	6
Figura 2.3:Rendimientos para múltiples frentes en operaciones de Rio Tinto (Li, 2012)......	8
Figura 2.4: Sectores de PMCHS donde se aplicó estrategia de BPU(Cortés et al., 2018). ....	8
Figura 2.5: Comparación entre valores reales y valores según planificación (Cortés et al., 2018).....	9
Figura 2.6: Tipos de TBM (Penroz, 2022). ....	9
Figura 2.7:Costos de excavación de la TBM (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera,2021)......	12
Figura 2.8: Costos sistema back-up (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera,2021). ....	13
Figura 2.9: Costo de los cortadores (dc = diámetro de los cortadores) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera,2021)......	14
Figura 2.10:Costos mano de obra (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera,2021). ....	14
Figura 2.11: Esquema resumen metodología modelamiento Deswik (Cortez, 2020). ....	17
Figura 2.12: Creación de nivel de producción simulado (Penroz, 2022). ....	19
Figura 3.1: Metodología utilizada para la memoria (Elaboración propia). ....	21
Figura 3.2:Sección de los túneles del nivel de producción y hundimiento (Herrera,2021). ....	22
Figura 3.3:Ciclo de actividades de PMCHS (Cortés et al.,2018)......	23
Figura 3.4: Dimensiones galería TBM. ....	26
Figura 3.5: Malla de producción elaboración propia inspirada en malla de Chuquicamata subterránea. ....	29
Figura 3.6: Malla diseñada con vista planta dentro de SimMine. ....	30
Figura 3.7: Inicio de construcción de calles y zanjas en nivel de producción.....	30
Figura 3.8: Finalizada la primera calle y se realiza el avance en la calle 2 y 3.....	31
Figura 3.9: Nivel de producción construido por completo.....	31
Figura 3.10: Diseño en AutoCAD del nivel de hundimiento para PyT. ....	32
Figura 3.11: Avance por las primeras tres calles del nivel de hundimiento. ....	32
Figura 3.12: Nivel de hundimiento construido en su totalidad por PyT.....	33
Figura 3.13: Nivel de producción diseñado para la TBM. ....	33
Figura 3.14: Infraestructura construida por PyT como obras previas y cabeceras hechas por TBM. 34	
Figura 3.15: TBM ya construyó la primera calle, realizó el giro y excava una zanja. ....	34
Figura 3.16: Secuencia de excavación de calles 3, 5 y 7 en el nivel de producción. ....	35
Figura 3.17: Excavación de calles 2, 4y 6 en el nivel de producción.....	35
Figura 3.18: La TBM va por la ultima calle y excava todas las zanjas posibles. ....	36
Figura 3.19: Excavación de secciones de zanjas restantes en el nivel de producción. ....	36
Figura 3.20: Excavación completa del nivel de producción.....	37
Figura 3.21: Diseño nivel de hundimiento para TBM.....	37

Figura 3.22: La TBM realiza la excavación del contorno en el nivel de hundimiento. ....	38
Figura 3.23: La TBM construyó las primeras tres galerías auxiliares.....	38
Figura 4.1: Gráfico de simulación del método de PyT en el nivel de producción. ....	39
Figura 4.2: Gráfico de simulación del método TBM en el nivel de producción. ....	40
Figura 4.3: Gráfico de simulación PyT en nivel de hundimiento.....	41
Figura 4.4: Gráfico de simulación TBM en nivel de hundimiento.....	42
Figura 5.1: Gráfico de sensibilidad del número de frentes de PyT en nivel de producción. ....	44
Figura 5.2: Gráfico de sensibilidad del número de frentes de PyT en nivel de hundimiento.....	45

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Benchmarking de proyectos mineros canadienses realizado por Neumann (Contreras,2016).....	7
Tabla 2.2: Rendimientos por Nivel División El Teniente (CODELCO) para múltiples frentes (Alegría, 2010). ....	7
Tabla 2.3: Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (Herrera, 2021). ....	10
Tabla 3.1: Propiedades de roca (Contreras,2016).....	22
Tabla 3.2: Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base (Cortes et al, 2018 y Herrera, 2021).....	23
Tabla 3.3: Vehículos necesarios para cada actividad.....	24
Tabla 3.4: Velocidades preliminares para la simulación (Contreras, 2016) .....	24
Tabla 3.5: Restricciones Operacionales utilizadas para la simulación. ....	25
Tabla 3.6: Costos por actividad de perforación y tronadura (Herrera, 2021). ....	25
Tabla 3.7: Tiempo de actividades TBM. ....	27
Tabla 3.8: Minutos por metros de avance según galerías y cruces.....	27
Tabla 3.9: Horario de turnos TBM. ....	27
Tabla 3.10: Costos según fórmulas de (Bruland,2000) y actualizados respecto al IPC. ....	28
Tabla 4.1: Resultados del método PyT en nivel de producción.....	39
Tabla 4.2: Resultados del método TBM en nivel de producción.....	40
Tabla 4.3: Costos de cada método en nivel de producción.....	41
Tabla 4.4: Resultados de PyT nivel de hundimiento. ....	42
Tabla 4.5: Resultados de TBM nivel de hundimiento. ....	43
Tabla 4.6: Costos de cada método en nivel de Hundimiento. ....	43

## Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1:Costo de adquisición de la TBM (Bruland, 2000).....	11
Ecuación 2.2: Costo de adquisición del sistema back-up (Bruland, 2000). ....	11
Ecuación 2.3: Costos montaje de la TBM y sistema back-up (Bruland, 2000).....	12
Ecuación 2.4: Costos de los cortadores promedio (Bruland, 2000). ....	13
Ecuación 2.5: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM (Bruland, 2000).....	15
Ecuación 2.6: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up (Bruland, 2000). ....	15
Ecuación 2.7: Costos de servicios de la TBM (Bruland, 2000). ....	15

Ecuación 2.8: Costos de servicios del sistema back-up (Bruland, 2000).....	15
Ecuación 3.1: Ecuación de varaicion anual del IPC.....	28

# 1. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes de país. Aportando de manera directa un 14,6% del PIB nacional (Cardemil, 2023). En el ámbito internacional Chile en el año 2022 produjo el 25% de cobre (Consejo Minero, 2023) En la actualidad, la industria minera está transformándose, disminuyendo los proyectos nuevos de cielo abierto y aumentando la cantidad de minas subterráneas (ver Figura 1.1). Incluso algunos yacimientos están cambiando a minería subterránea. El mejor ejemplo es Chuquicamata, la cual corresponde a la mina de cielo abierto más grande del mundo y desde el año 2019 inició sus actividades subterráneas.

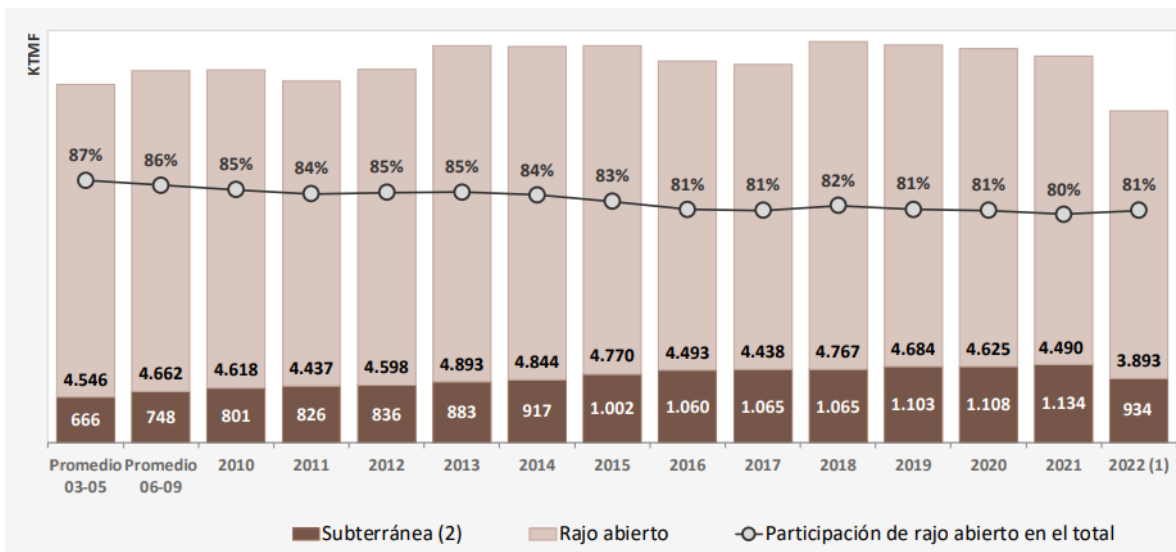


Figura 1.1: Producción de cobre según tipo de yacimiento (Consejo Minero, 2023).

La principal problemática que produce esta transición es el envejecimiento de los yacimientos a cielo abierto comienza a ser una problemática para las empresas ya que se ven obligados a realizar una transición a métodos masivos subterráneos para mantener la actual producción. Esto trae nuevos problemas como inversión inicial importante y cantidad de kilómetros a construir (Soto Ramírez, 2020).

Por estas dificultades se está investigando nuevas técnicas para llevar a cabo nuevos proyectos subterráneos lo más eficiente posible, enfocándose en todas las fases, en particular, en la fase previa a la explotación, dado que durante este tiempo el mandante invierte grandes sumas de dinero sin generar ingreso alguno. Actualmente el método más utilizado para la creación y avance de túneles es la perforación y tronadura convencional (PyT) (ver Figura 1.2). La PyT consiste en taladrar la roca para luego ejecutar una detonación controlada, con el objetivo de fracturarla. Este procedimiento tiene muchas cualidades: es versátil, rápido de adquirir, permite varios frentes de trabajo, entre otras. Sin embargo, las velocidades de avance son bajas, debido a que los procesos de perforación, tronadura, retirada de la marina y

colocación del soporte primario, son lentos y no pueden ser realizados de manera simultánea. El rendimiento de un equipo PyT es de entre 4 y 9 m/día (Penroz, 2022).



*Figura 1.2: Equipo de perforación y tronadura.*

La posible alternativa que se está investigando para aumentar la tasa de avance es incluir la excavación mecanizada. Esta se define como la excavación por medio de máquinas que transfieren la energía mediante la fuerza de empuje desde las herramientas de corte (cortadores, brocas) a la roca o suelo (Bilgin et al., 2013). Esta memoria se enfoca en la TBM, por sus siglas en inglés, Tunnel Boring Machine (ver Figura 1.3). Esta máquina no ha sido implementada aun en la minería en Chile. En un comienzo, se ha propuesto como candidata para la construcción de túneles de ventilación, secundarios, mas no ha sido considerada para niveles de producción y hundimiento. Esto se debe, principalmente, a los amplios radios de giro que la caracterizan, y al hecho de que estos niveles tienen forma de red, con dimensiones del orden de 15 a 40 metros por tramo. El rendimiento de TBM puede variar desde 8 a 45 m/día, dependiendo del tipo de tuneladora, las condiciones del terreno y la ruta que siga (Herrera, 2021; Rodriguez, 2020).



Figura 1.1: TBM utilizada para construir un túnel en los Bronces.

Para la presente memoria, se decide utilizar un software de elementos discretos para la simulación de desarrollos horizontales en nivel de producción o hundimiento del método block caving. Simulando avance de PyT y TBM en el nivel de producción y hundimiento, considerando secuencias de avance, restricciones operacionales y costos. Se optó por usar una malla de 16 m x 20 m, siendo 16 la distancia media entre calles y 20 m la distancia entre zanjas como se puede ver en la Figura 1.4.

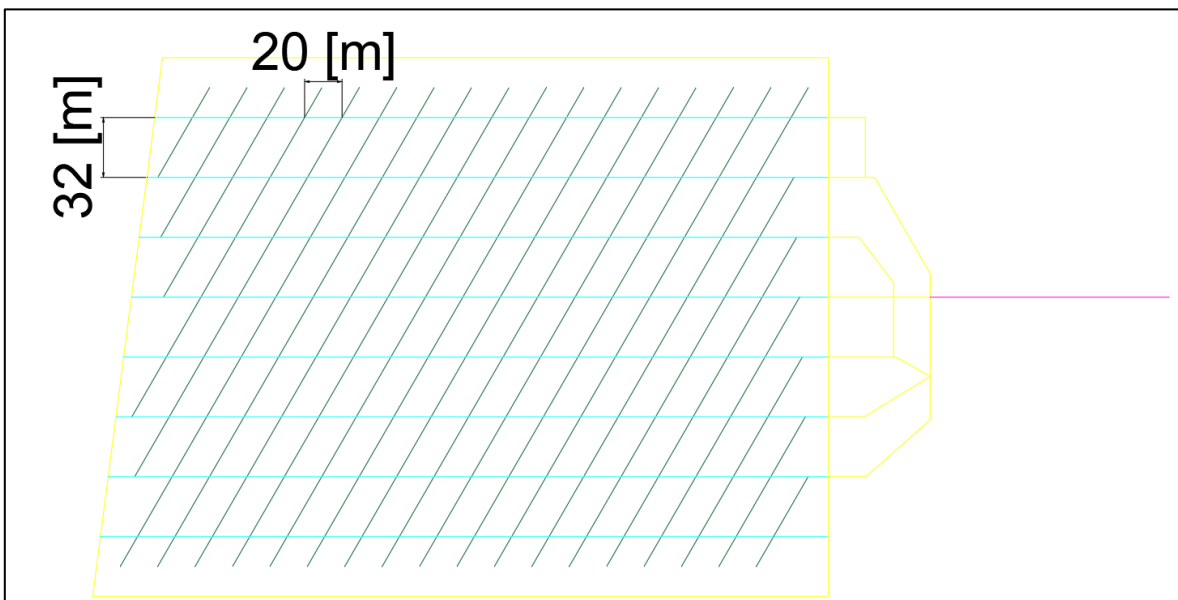


Figura 1.2: Malla de producción 16 x 20. Elaboración propia.

## **1.1 Objetivo General**

Simular los tiempos de construcción de túneles de TBM y PyT para el nivel de producción y hundimiento del método Block Caving mediante eventos discretos.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Definir las interferencias operacionales para obtener resultados más confiables.
- Implementar interferencias operacionales a la simulación.
- Establecer el mejor recorrido para la combinación de TBM y PyT.
- Comparar tasas de avance entre TBM y PyT.
- Comparar métodos a través de costos operacionales.

## **1.3 Hipótesis**

Es posible simular mediante eventos discretos secuencias de excavación de TBM en niveles de producción y hundimiento correspondientes al método Block Caving.

## **1.4 Alcances**

- La simulación modela la construcción de desarrollos horizontales en el nivel de producción o hundimiento.
- Las simulaciones se realizan en el software de simulación de eventos discretos diseñado para minería, SimMine.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se realiza la búsqueda de toda la información necesaria para sustentar la presente memoria.

### 2.1 Antecedentes generales del método Block Caving / Panel Caving.

El método de hundimiento o Caving en inglés, dentro de las opciones que existe es la preferida debido a sus bajos costos y altas tasas de producción. Esto se debe a la presencia de yacimientos de leyes bajas y rocas cajas más competente. Sin embargo, tiene desventajas como alta inversión inicial y cuando ya se comienza a operar es muy difícil realizar cambios en el diseño(Gómez & Labbé, 2019).

El método de Block Caving es una técnica de minería subterránea masiva utilizada para la extracción de grandes volúmenes de mineral de baja ley. Este método se basa en la fragmentación y el hundimiento natural del cuerpo mineralizado mediante la gravedad y los esfuerzos internos de la roca. Se inicia rompiendo el macizo rocoso desde un nivel inferior, lo que permite que el mineral se fracture y colapse en fragmentos manejables. Estos fragmentos son recogidos en puntos de extracción mediante equipos de carga, como el Load Haul Dump (LHD). El método de Panel Caving es una técnica de minería subterránea similar al Block Caving, pero con algunas diferencias clave en su implementación. En el Panel Caving, el hundimiento del cuerpo mineralizado se realiza de manera continua a través de paneles en lugar de bloques discretos. Este método también se basa en la gravedad y los esfuerzos internos de la roca para inducir el colapso del macizo rocoso, que luego se fragmenta en piezas manejables (Gómez & Labbé, 2019). Los principales niveles requeridos para la explotación del método se ilustran en la Figura 2.1.

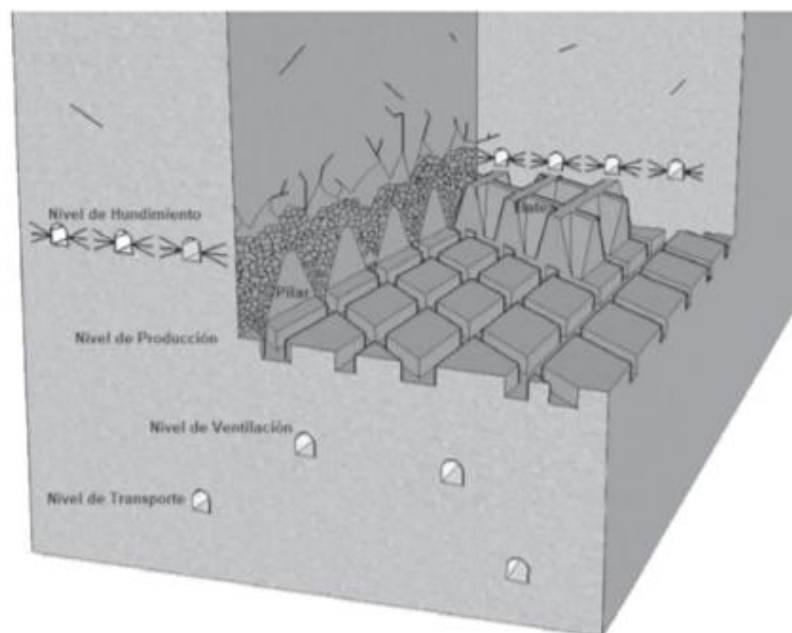


Figura 2.1: Esquema de explotación mediante Block/Panel Caving (Gómez & Labbé, 2019).

## 2.2 Perforación y Tronadura convencional

La perforación y tronadura convencional es el método más usado en la minería subterránea para el avance de galerías y lograr el diseño definido para el método de explotación, debido a su gran versatilidad, posibilidad de realizar diversos diseños geométricos y dimensiones según sea requerido. El área de estas secciones es sumamente variable, puede ir desde los 5 m<sup>2</sup> hasta los 200 m<sup>2</sup> (Penroz, 2022).

La perforación y tronadura consta de una malla de perforación, en el cual los tiros son cargados con explosivos para fracturar la roca. Posteriormente se realiza la extracción del material a través de los equipos LHD y se realizan métodos de fortificación. Los más comunes son fortificación con pernos, mallado y finalmente aplicar shotcrete, el cual es cemento proyectado. En la Figura 2.2 se muestra un esquema de un ciclo genérico de PyT.

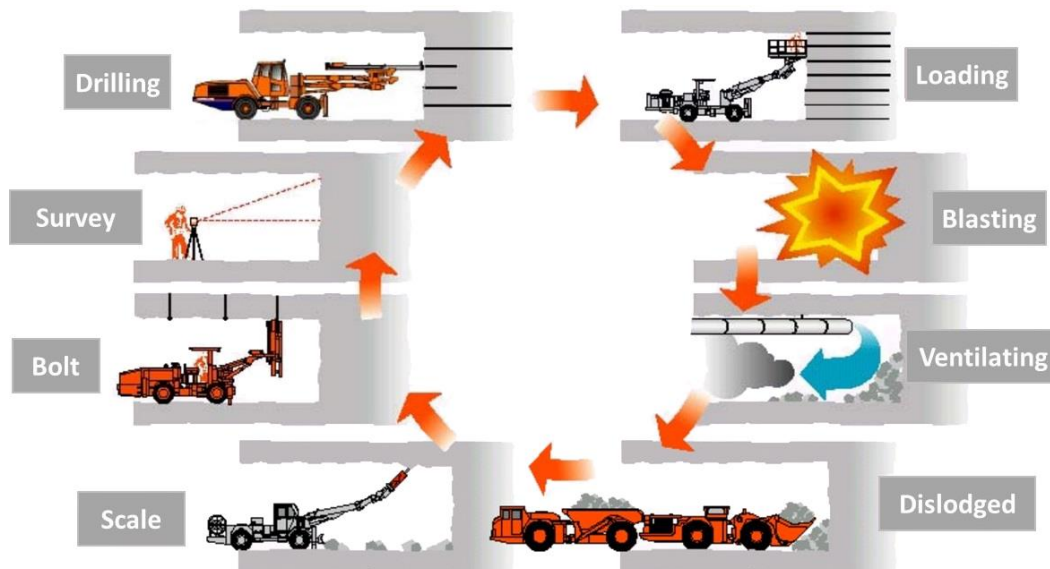


Figura 2.2: Esquema ejemplo del ciclo de perforación y tronadura convencional.

## 2.2.1 Benchmarking de rendimientos

Contreras (2016) realiza una investigación de diversos autores y uno de ellos es Neumann (2001) el cual realizó un benchmarking de 9 minas canadienses con un promedio de avance de 195 m/mes. En la Tabla 2.1 se muestra los datos de distintos proyectos.

Tabla 2.1: Benchmarking de proyectos mineros canadienses realizado por Neumann (Contreras,2016).

<b>Caso Estudio</b>	<b>Tipo Rendimiento</b>	<b>m/mes</b>	<b>m/día</b>
Kidd Creek Mine	Cobre, Zinc	159	5.3
Holt McDermott Mine	Oro	216	7.2
Creighton Mine	Níquel	150	5.0
Brunswick Mine	Plomo, Cobre, Zinc	174	5.8
Dome Mine	Oro	222	7.4
Musselwhite Mine	Oro	267	8.9
Birchtree Mine	Níquel	123	4.1
Stobie Mine	Níquel	237	7.9
Golden Giant Mine	Oro	201	6.7

Alegría (2010) realizó un análisis de los programas obras de Mina Diablo Regimiento y Mina Esmeralda (División El Teniente, CODELCO), obteniendo los siguientes resultados considerando el número de frentes de avance (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Rendimientos por Nivel División El Teniente (CODELCO) para múltiples frentes (Alegría, 2010).

<b>Desarrollos horizontales</b>	<b>m/mes por frente de avance</b>	<b>Numero de frentes</b>	<b>m/mes</b>	<b>m/día</b>
Nivel de hundimiento	50	3	151	5
Nivel de Producción	51	6	308	10,3
Subnivel de ventilación	31	3	94	3,1
Nivel de transporte	48	1	48	1,6

La Figura 2.3 resume avances horizontales registrados en algunas operaciones subterráneas de Rio Tinto. Las tasas de avance se basaron en los metros promedio que un equipo podía avanzar en un entorno de trabajo con múltiples frentes (Li, 2012).

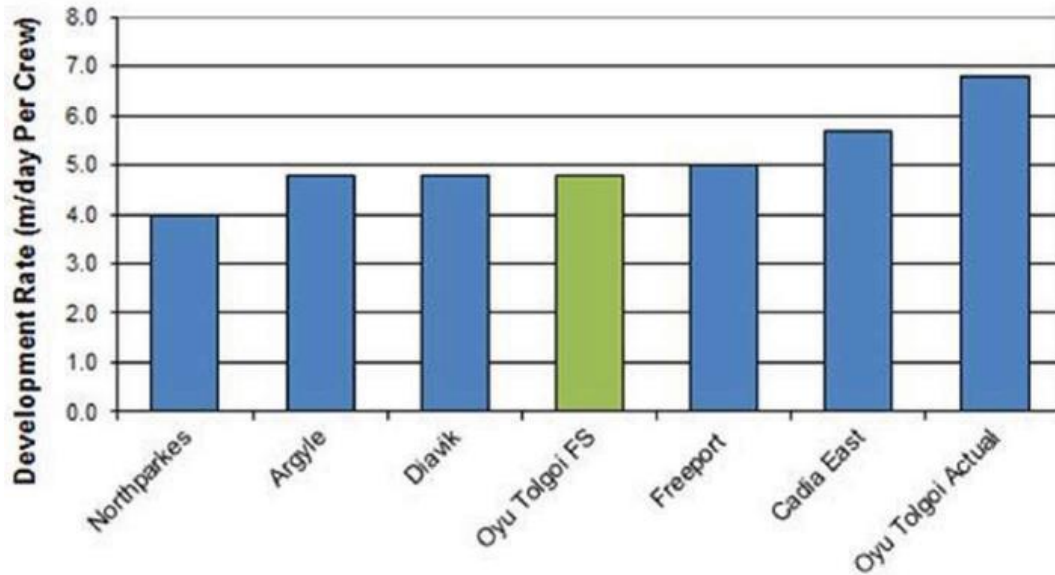


Figura 2.3: Rendimientos para múltiples frentes en operaciones de Rio Tinto (Li, 2012).

Finalizando con la revisión de PyT y múltiples frentes. En el año 2018 se realizó una estrategia de avance con múltiples frentes en Chuquicamata subterránea, específicamente en los sectores de PMCHS (Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea) (ver Figura 2.4).

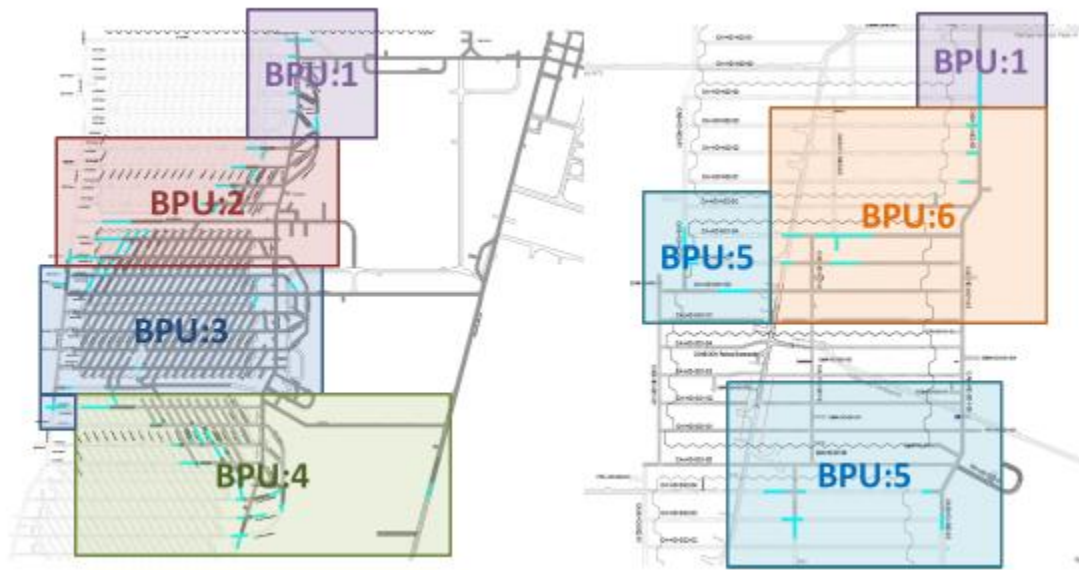


Figura 2.4: Sectores de PMCHS donde se aplicó estrategia de BPU (Cortés et al., 2018).

Definieron 6 BPUs que corresponden a unidades básicas de producción, las cuales presentaron un avance entre 300 a 350 m/s (ver Figura 2.5). Cada BPU consideraba 5 frentes principales y 4 auxiliares, buscando maximizar la utilización de los equipos. En total se obtiene un avance de 1700 m/mes (Cortés et al., 2018).

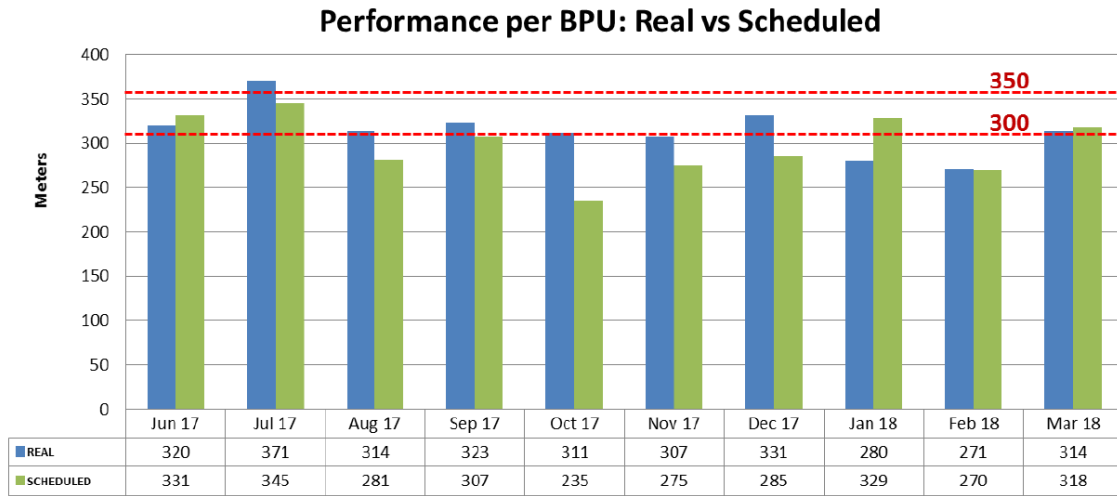


Figura 2.5: Comparación entre valores reales y valores según planificación (Cortés et al., 2018).

## 2.3 Tunnel Boring Machine

Se han diseñado distintos tipos de TBM, los cuales se definen según el tipo de terreno a excavar. Para suelos con presión de agua en la frente se utiliza le EPB y la Slurry, para suelos barroso. Para la presente memoria, se enfoca en las TBM para roca dura, como lo son la Gripper, Escudo simple y Escudo Doble que se muestran en la Figura 2.6.

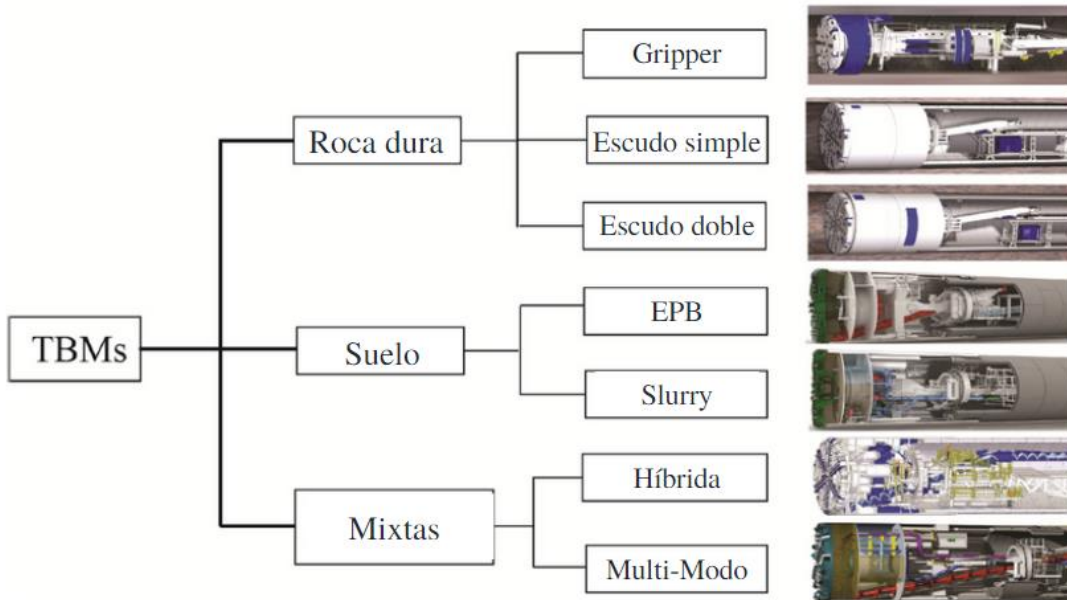


Figura 2.6: Tipos de TBM (Penroz, 2022).

La TBM Gripper, también conocida como TBM desnuda, diseñada para roca muy dura, fractura la roca gracias a dos fuerzas. En primer lugar, la fuerza de roce que ejercen los discos que se encuentran en la cabeza de la maquinaria sobre la frente del túnel, y en segundo lugar, el empuje efectuado gracias a los “grippers”, unas zapatas que se adhieren a las paredes del túnel para que, al ejercer el empuje, la tuneladora se quede estática en lugar de retroceder (Penroz, 2022).

La TBM de Escudo Simple se utiliza en terrenos de roca dura con poca estabilidad y susceptibles a desprendimientos. En estos casos, es necesario incorporar un escudo protector detrás de la cabeza de corte y colocar un anillo de revestimiento prefabricado. El escudo no funciona como un sostenimiento temporal, sino que solo como una barrera que impide la caída de rocas dentro de la máquina y a los trabajadores (Herrera, 2021).

Las TBM Doble Escudo constan de dos partes dispuestas en secuencia, donde el escudo delantero se encuentra equipado con la cabeza de corte y los cilindros principales de empuje, mientras que el escudo trasero alberga los cilindros auxiliares, los grippers de apoyo y el sistema erector de dovelas. Entre ambos escudos se desliza un escudo telescópico de menor diámetro, permitiendo al escudo delantero avanzar mientras mantiene la máquina resguardada y protegida del terreno durante el proceso de excavación. Esta estructura permite una variedad de modos de funcionamiento adaptados a la calidad del terreno que se está excavando (Bilgin et al., 2013).

## 2.4 Benchmarking TBM

Herrera (2021) realizó una revisión de proyectos de TBM en roca dura, comparando parámetros considerados relevantes en la excavación de los túneles (ver Tabla 2.3).

*Tabla 2.3: Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (Herrera, 2021).*

<b>Caso Estudio</b>	<b>Tipo de TBM</b>	<b>m/día</b>	<b>Diámetro túnel [m]</b>	<b>Largo túnel [km]</b>	<b>UCS [Mpa]</b>
San manuel	Gripper	22,6	4,6	10,5	150 - 180
Stillwater	Gripper	13	4,6	5,6	60 - 190
El Teniente	Gripper	9,5	4,6	10	200
Los Bronces	D. Escudo	12	4,5	8	72 - 200
San Gotardo	Gripper	10	9 - 9,5	57	90 - 200
Alto Maipo	D/S Escudo	10	4,1 - 4,5 - 6,9	40	70 - 180
Culver- Goodman	Gripper	18,5	4	5	-
Chicago Tarp	Gripper	18,7	6,5	7,2	-
Nowsood Project	D. Escudo	20,6	5,28	13,6	-

## 2.5 Estimación de costos de una TBM

Debido a la escasa información de la TBM en la actualidad, se decide utilizar un modelo de estimación realizado por Bruland (2000), el cual fue creado a partir de diversos proyectos y construcciones de túneles en Noruega gracias a la base de datos que proporcionó la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU)(Bruland, 2000)

La fecha del modelo de los costos de excavación es enero de 1999, por lo que se deben actualizar al año 2024. La actualización de estos costos se realiza respecto al IPC. Esto estará detallado en el capítulo 4.

### 2.5.1 Costos de adquisición

Los costos de adquisición corresponden al precio de todos los equipos despachados en el sitio del proyecto (Bruland, 2000). La Ecuación 2.1 y la Ecuación 2.2 permiten estimar los costos de adquisición de la TBM y del sistema back-up a partir del diámetro de la TBM.

$$C_{TBM} = 2,1409 * D_{TBM} - 2,0767$$

*Ecuación 2.1: Costo de adquisición de la TBM (Bruland, 2000).*

$$C_{back-up} = 0,4967 * D_{TBM} - 1,6442$$

*Ecuación 2.2: Costo de adquisición del sistema back-up (Bruland, 2000).*

Donde:

$C_{TBM}$ : Costos de adquisición de la TBM [MUSD]

$C_{back-up}$ : Costo de adquisición del sistema back-up [MUSD]

$D_{TBM}$ : Diámetro de la TBM [m]

### 2.5.2 Costos de Montaje

Los costos de transporte de la tuneladora y del sistema back-up, hormigonado de los bloques de partida, montaje, desmontaje y retroceso de la máquina fuera del túnel en función del diámetro de la TBM se pueden estimar con la Ecuación 2.3 (Bruland, 2000).

$$C_M = 0,1507 * D_{TBM} + 0,3391$$

Ecuación 2.3: Costos montaje de la TBM y sistema back-up (Bruland, 2000).

Donde:

$C_M$ : Costo de montaje de la TBM [USD]

$D_{TBM}$ : Diámetro de la TBM [m]

### 2.5.3 Costos de excavación y sistema back-up

La Figura 2.7 y Figura 2.8 muestran los costos de excavación y del sistema back-up en función del diámetro de la TBM y la tasa de penetración sobre la roca (Bruland, 2000).

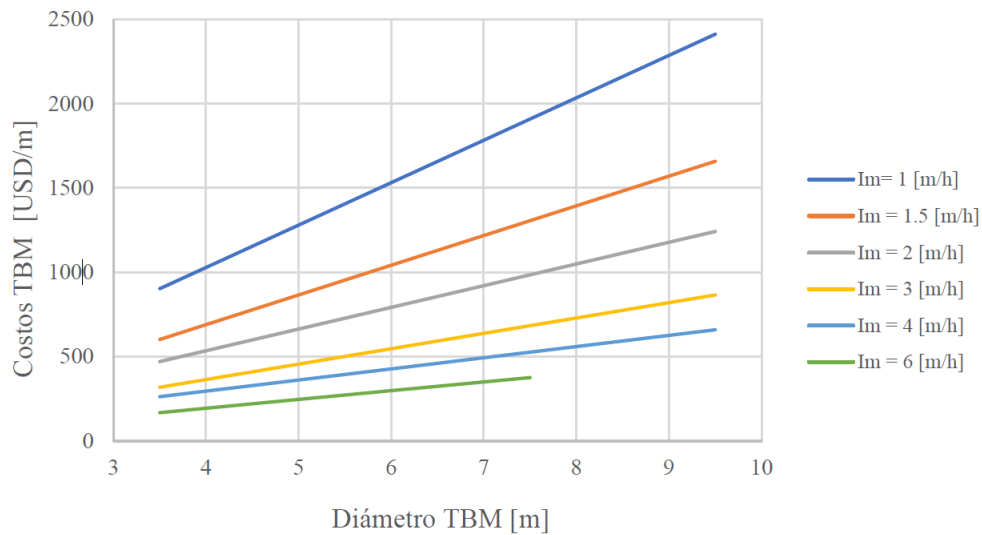


Figura 2.7: Costos de excavación de la TBM ( $I_m$  = tasa de penetración) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Hererra, 2021).

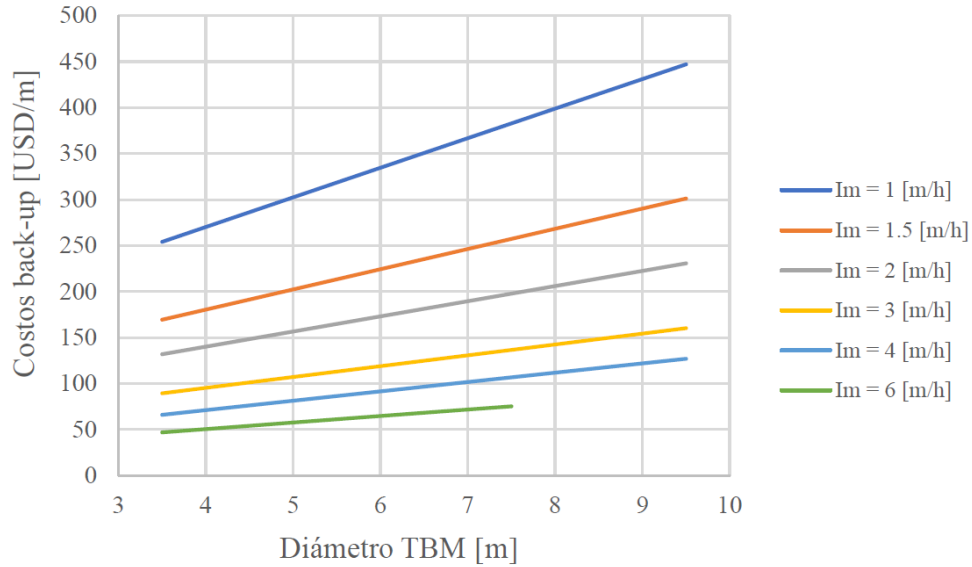


Figura 2.8: Costos sistema back-up ( $I_m$ = tasa de penetración) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera,2021).

## 2.5.4 Costos de cortadores

La Figura 2.9 muestra los costos básicos de los cortadores en función de la vida útil de los anillos cortadores y su diámetro. Los costos promedio de los cortadores se calculan según la Ecuación 2.4.

$$C_b = C_{0b} \times \frac{N_{TBM}}{I_m}$$

Ecuación 2.4: Costos de los cortadores promedio (Bruland, 2000).

Donde:

$C_b$ : Costos de los cortadores promedio [USD/m]

$C_{0b}$ : Costos básicos de los cortadores [USD/m\*h]

$N_{TBM}$ : Número de cortadores en la cabeza de corte

$I_m$ : Tasa de penetración sobre la roca [m/h]

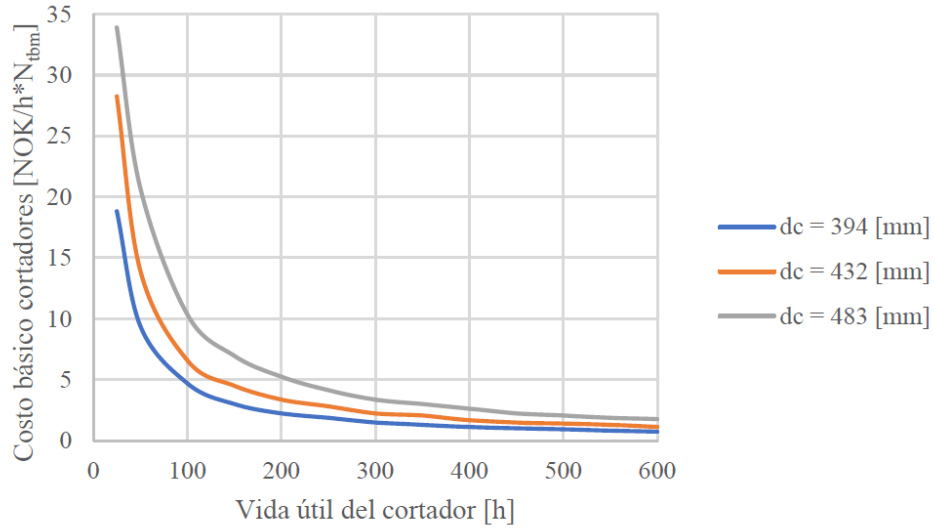


Figura 2.9: Costo de los cortadores ( $dc$  = diámetro de los cortadores) (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera, 2021).

### 2.5.5 Costos mano de obra

La Figura 2.10 muestra los costos de la mano de obra en función de la tasa de penetración. (Bruland, 2000).

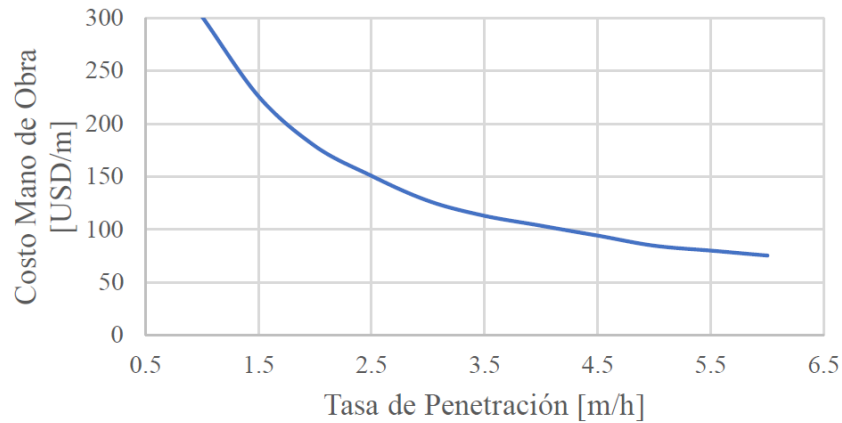


Figura 2.10: Costos mano de obra (Bruland, 2000). Gráfico rediseñado (Herrera, 2021).

## 2.5.6 Costos Mantenimiento y Reparación

Los costos de reparación y mantenimiento incluyen los costos de repuestos y costos de taller. Los costos de reparación y mantenimiento de la TBM y el sistema back-up se estiman de acuerdo con la Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6 (Bruland, 2000).

$$C_{m,TBM} = 15,757 * D_{TBM} + 1,3702$$

*Ecuación 2.5: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM (Bruland, 2000).*

$$C_{m,back-up} = 6,8509 * D_{TBM} + 5,1382$$

*Ecuación 2.6: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up (Bruland, 2000).*

Donde:

$C_{m,TBM}$ : Costos de mantenimiento y reparación de la TBM [USD/h]

$C_{m,back-up}$ : Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up  
[USD/h]

$D_{TBM}$ : Diámetro de la TBM [m]

## 2.5.7 Costos de servicio

La Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8 permiten estimar los costos de servicio para la TBM y el sistema back-up en función del diámetro de la TBM (Bruland, 2000)

$$C_{S,TBM} = 5,1382 * D_{TBM} + 10,276$$

*Ecuación 2.7: Costos de servicios de la TBM (Bruland, 2000).*

$$C_{S,back-up} = 0,8564 * D_{TBM} + 7,3647$$

*Ecuación 2.8: Costos de servicios del sistema back-up (Bruland, 2000).*

Donde:

$C_{S,TBM}$ : Costos de servicios de la TBM [USD/h]

$C_{S,back-up}$ : Costos de servicios del sistema back-up [USD/h]

## 2.5.8 Costos de Energía

Los costos incluyen el consumo de energía eléctrica estimados mediante la Ecuación 2.9. Se considera un costo de energía eléctrica de 0.1 USD/kWh (Bruland, 2000).

$$C_e = 400 * D_{TBM} - 700$$

Figura 2. 9: Costos del consumo de energía (Bruland, 2000).

Donde:

$C_e$ : Costos del consumo de energía [kWh/h]

## 2.6 Planificación

Actualmente existen distintos métodos para planificar en las distintas industrias. Sin embargo, no todas pueden ser aplicadas a la minería debido a su alta complejidad y diversas variables.

### 2.6.1 Filosofía Lean

La filosofía Lean busca maximizar el valor para el cliente al tiempo que minimiza el desperdicio. Se centra en optimizar los procesos, mejorar la eficiencia, y eliminar todo aquello que no agrega valor al producto o servicio final (Ccatamayo Barrios,2017).

Esta filosofía tiene varias ventajas como es, la reducción de tiempos de producción, eliminación de tiempos de espera, aumento en la eficiencia de los equipos, mejora en la entrega en plazo de las obras y mejora gestión de riesgo y calidad. A pesar de eso, es una metodología rígida, la cual es difícil de implementar en una mina y requiere de gran inversión del personal y económico (Cortez, 2020).

Las tres áreas con más potencial en la industria minera son los talleres mecánicos, avances horizontales y verticales, y trabajos de desarrollo complementarios. Esta filosofía de trabajo se ha implementado en la División El teniente, en mina diablo regimiento aumentando su producción un 27%. En PMCHS aumento un 20% el avance mensual de desarrollos horizontales (Cortez, 2020).

### 2.6.2 Softwares actuales

Actualmente en la industria minera se está utilizando softwares para planificar que no son específicamente para aquello y mucho menos desarrolladas para la minería.

Excel, es la herramienta más utilizada actualmente para la planificación. Los tiempos y actividades se deben colocar de manera manual, se necesita un alto conocimiento de

planificación para lograr resultados confiables. AutoCAD es otro software muy utilizado, el cual se enfoca en diseño industrial y generalmente se utiliza como base para ingresar algún modelo a otro software. Todo esto se complementa de igual manera con el software Primavera, el cual es un visualizador de actividades mediante carta Gantt. Se debe ingresar un archivo tipo Excel con las actividades y sus tiempos. Debido a esto la industria busca implementar softwares que permitirán reducir tiempos dedicados a la planificación y logren resultados más confiables.

### 2.6.3 Deswik

Deswik es un conjunto de herramientas especializadas para la planificación y gestión de operaciones mineras que está diseñado para cubrir una amplia gama de necesidades en la minería, desde el diseño y planificación de minas hasta la programación de actividades y la optimización de procesos. Entregando una secuencia constructiva óptima permitiendo identificar rutas críticas, utilización de recursos y factores de consumo. En la Figura 2.11 se muestra un resumen de la metodología de modelamiento del software.

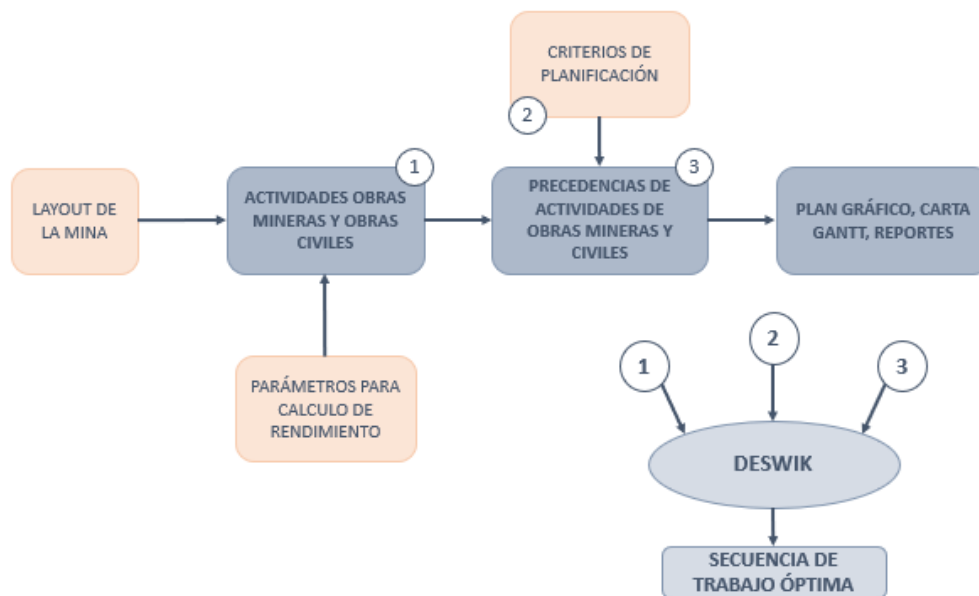


Figura 2.11: Esquema resumen metodología modelamiento Deswik (Cortez, 2020).

Deswik tiene 3 interfaces principales las cuales se describen a continuación

### **Deswik.CAD**

Es la plataforma de diseño del software, la cual permite trabajar tanto en minería subterránea como en cielo abierto. El diseño puede ser creado a partir de cero o puede ser importado desde AutoCAD. En esta plataforma es donde se generan las entidades y se define la sección del túnel, los atributos y la ubicación espacial.

### **Deswik.SCHED**

Es el módulo de planificación, donde se programa en base a los tiempos o rendimientos. Planifica a partir de una nivelación de recursos, esto permite establecer prioridades, restricciones y objetivos requeridos. Puede generar la planificación a corto o largo plazo

### **Deswik.IS**

Es la interfaz que vincula de forma dinámica el diseño creado con Deswik.CAD con la planificación minera generada en Deswik.SCHED. Permite la planificación de escenarios sin manipular datos del programador y visualizar los resultados de la programación gráfica.

Cortez (2020) realiza un estudio de planificación integrada de mediano/largo plazo para obras interior mina en proyecto Andes Norte, con el objetivo de establecer un modelo de planificación optimizante que permita realizar la planificación de mediano y largo plazo en la etapa de desarrollo. Para lograr el estudio utilizó Deswik, con el cual logra disminuir la variabilidad de los planes de construcción y desarrollo. Aumentó la precisión de los tiempos de los ciclos. Finalmente concluye que los tiempos de desarrollo de un modelo ya sea en Deswik o con los softwares actuales no es una gran diferencia. Sin embargo, la facilidad y mejoras a la planificación hacen de Deswik una herramienta competente, más aún si el operador tiene ya conocimiento en la utilización del software.

## **2.6.4 UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler)**

Es un software agendador optimo de actividades, el cual está diseñado con programación matemática. Planifica a partir de actividades, precedencias y restricciones. Entrega soluciones optimas, debido a que incorpora un algoritmo de optimización lineal. Los resultados los entrega como un archivo tipo carta Gantt con el orden y porcentaje de avance de cada actividad.

Penroz (2022) realizó un análisis de constructibilidad y puntos críticos del uso de TBM en minería de Block Caving, con el objetivo de desarrollar, evaluar e implementar herramientas de decisión para la construcción de infraestructura de minería subterránea mediante el uso de TBM. Utilizó el software UDESS para crear un modelo genérico del nivel de producción para poder analizar y decidir el mejor recorrido para la TBM. Creó niveles con distintos números de calles y cruzados como 3x3, 4x4 y finalmente 13x7 como se puede observar en la Figura 2.12.

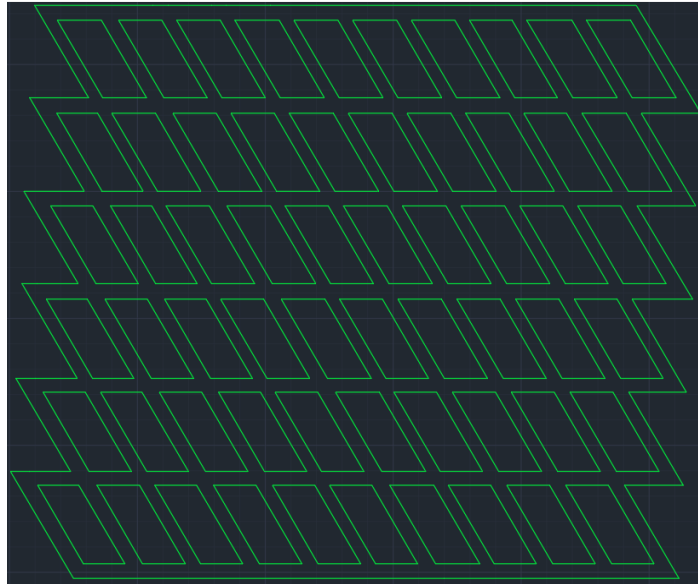


Figura 2.12: Creación de nivel de producción simulado (Penroz, 2022).

Finalmente logra proponer una metodología para encontrar la ruta más favorable para la construcción del nivel de producción. Sin embargo, el software no fue capaz de implementar ciertos aspectos de la TBM como son los tiempos de traslado y preparación, tampoco toma en consideración el área circular de la TBM.

## 2.7 Simulación de Eventos Discretos

La simulación busca imitar el funcionamiento de un proceso o sistema del mundo real. Logra crear diversos casos hipotéticos los cuales son analizados y permite solucionar problemas reales. La simulación de eventos discretos es una técnica de modelado que se utiliza para analizar y comprender sistemas complejos donde los cambios de estado ocurren en puntos específicos en el tiempo. (Banks, 2000).

La ventaja de una simulación de eventos discretos es que permite conocer el impacto de los procesos, permite conocer mejor el proceso actual y sirve como herramienta complementaria para la toma de decisiones. Las desventajas que tiene es que requiere de una alta inversión de tiempo laboral, altos costos de adquisición y el analista debe tener dominio del software.

## 2.8 SimMine

SimMine es un software de simulación de eventos discretos diseñado para la planificación y optimización de operaciones unitarias de un sector minero o productivo, entregando un set de resultados lo cual permite identificar problemas como cuellos de botella y tiempos de espera. La ventaja de este software a diferencia de los descritos anteriormente es la variabilidad que le puede asignar a los datos, logrando obtener resultados más confiables. Otra ventaja que presenta el software es que no requiere de programación en un lenguaje en específico. El software trae distintas pestañas que permite definir rápidamente los parámetros de entrada y el software calcula la interacción entre equipos, el comportamiento con la roca, los tiempos de traslado, tiempos de preparación y restricciones operacionales. Es importante destacar se debe ingresar un diseño previamente construido en AutoCAD como en Deswik.CAD, ya que esto permite guiar el software por donde se moverán los equipos.

### 2.8.1 Simulación de eventos discretos utilizando SimMine

Actualmente existe una gran variedad de softwares y lenguajes de programación destinados a la simulación en general como específicos. En la presente memoria se ha optado por utilizar el software de simulación de eventos discretos diseñado específicamente para la minería. SimMine se ha demostrado como una herramienta sumamente valiosa para representar de manera precisa el comportamiento de los procesos mineros a lo largo del tiempo.

Botha & Nichol (2010) realizaron un estudio de optimización de avance horizontal en la mina de diamante Cullinan mediante el software SimMine, ya que este software es flexible y fácil de utilizar, permitiendo reducir tiempos de construcción del modelo y probar diversos escenarios. El objetivo era lograr maximizar las tasas de desarrollo, logrando a su vez maximizar ingresos y una rentabilidad temprana. Los escenarios que propusieron y aceptaron en la mina fueron múltiples tronaduras, adicionar equipos para los desarrollos horizontales y alternar horarios en los turnos. Los resultados mostraron que las múltiples tronaduras aumentan la tasa de desarrollo en un 8%, el cambio de los turnos a 12 horas logra un aumento del 16% y determinaron que los cuellos de botella en las actividades son la perforación y la carga (Botha & Nichol, 2010)

Salama & Greberg (2014) realizaron un estudio de simulación de eventos discretos para modelar la operación de carguío y transporte (LHD-camion) en Sublevel Open Stopping. El objetivo era estudiar la producción mediante la relación entre el LHD y camión. Llegaron a la conclusión que utilizar 2 camiones y un LHD para para las galerías superiores y 3 camiones y un LHD para las galerías inferiores logrando una mejora de la producción promedio de 52% a un 75%(Salama et al., 2014).

Herazo (2018) realiza un estudio de simulación de desarrollos horizontales en múltiples frentes considerando interferencias. Su caso de estudio es la mina Esmeralda perteneciente a

la División El Teniente, donde se recogen los tiempos de las actividades de la perforación y tronadura como también el tiempo de las interferencias. La finalidad del estudio fue construir un modelo calibrado para poder estimar los avances horizontales a corto plazo. Como resultado obtuvo que el avance promedio de las simulaciones con interferencias fue más cercano a la realidad que el avance planificado (Herazo, 2018).

### 3 METODOLOGÍA

La metodología aplicada a este trabajo es la siguiente (ver Figura 3.1).

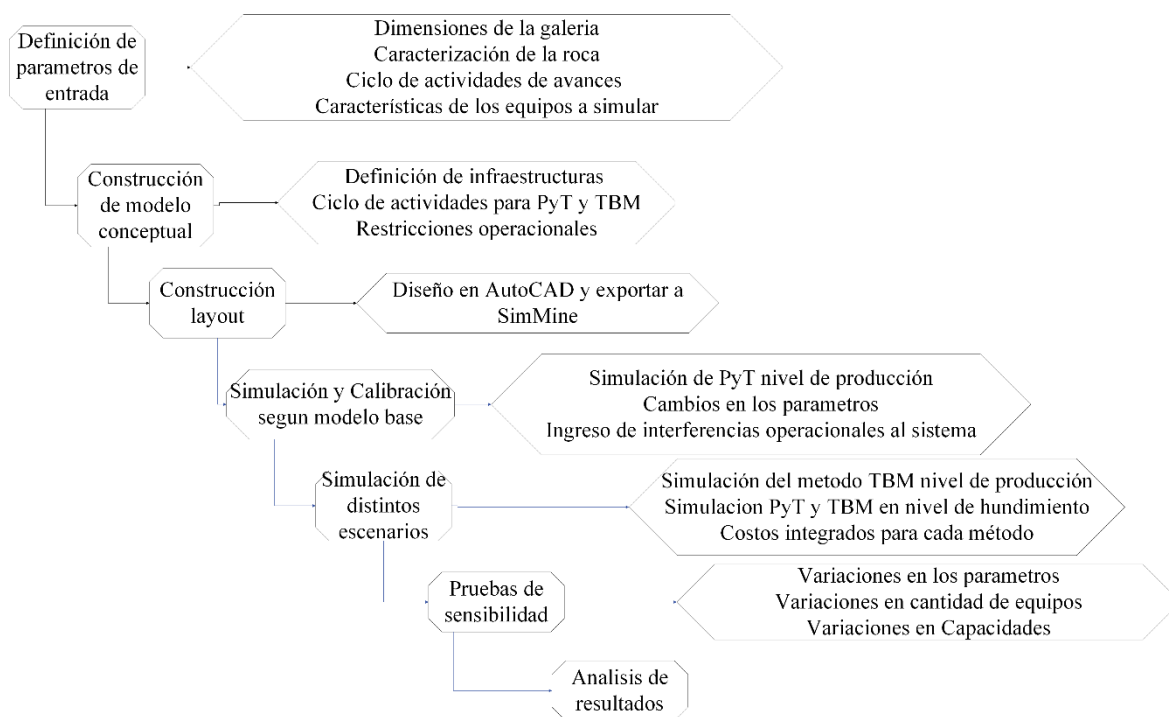


Figura 3.1: Metodología utilizada para la memoria (Elaboración propia).

### 3.1 Parámetros de entrada PyT

Estos parámetros son seleccionados según lo que solicita el software y son necesarios para realizar las distintas simulaciones. Lo primero es definir las propiedades de la galería, propiedades de la roca, las actividades del ciclo y los equipos a utilizar.

#### 3.1.1 Propiedades de la galería

Las propiedades de la galería varían dependiendo de las necesidades operacionales de cada uno de los sistemas de Block Caving. Para esta memoria se considera la malla de producción o hundimiento de Chuquicamata subterránea por ende las dimensiones de las galerías son las siguientes (ver Figura 3.2).

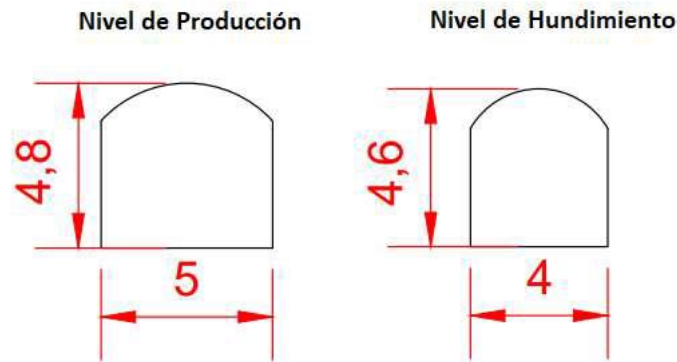


Figura 3.2: Sección de los túneles del nivel de producción y hundimiento (Herrera, 2021).

#### 3.1.2 Propiedades de la roca

Las propiedades de la roca que se pueden ingresar al software son la densidad y el factor de llenado, los cuales se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Propiedades de roca (Contreras, 2016).

Densidad de la roca [t/m <sup>3</sup> ]	2,62
Factor de llenado %	90
Esponjamiento %	30

#### 3.1.3 Ciclo de actividades

Como la simulación busca ser lo más realista posible se considera el ciclo de actividades descrito por Cortés et al. (2018) para el avance en el nivel de producción de PMCHS. Donde considera las siguientes actividades (ver Figura 3.3)

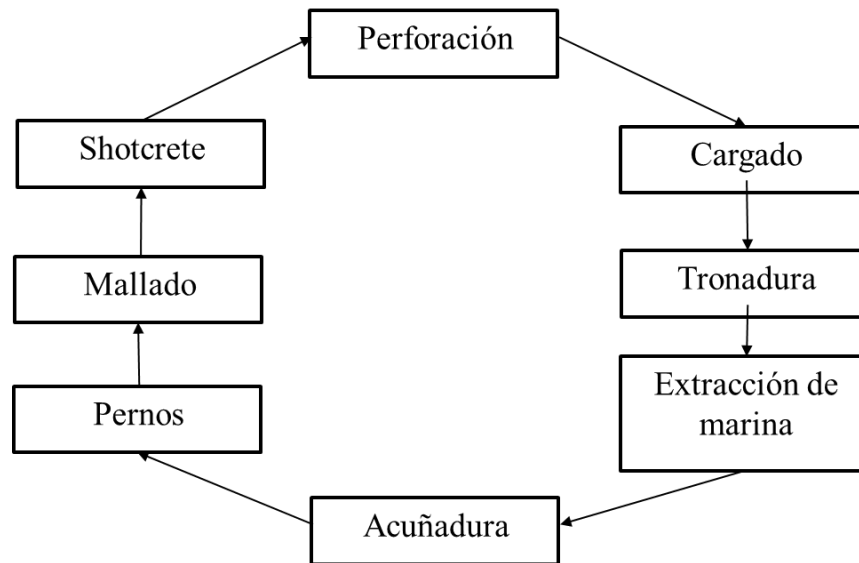


Figura 3.3: Ciclo de actividades de PMCHS (Cortés et al., 2018).

Para definir los tiempos preliminares, se consideraron los tiempos utilizados por Contreras (2016), ya que tiene un ciclo de actividades similar al de PMCHS (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base (Cortes et al, 2018 y Herrera, 2021)

Actividad	Tiempo mínimo [min]	Tiempo moda [min]	Tiempo máximo [m]
Perforación	157	192	227
Cargado explosivo	130	144	158
Tronadura	36	36	36
Ventilación	60	60	60
Acuñadura	36	48	58
Pernos	101	135	184
Lechado	87	105	123
Mallado	110	120	130
Shotcrete	66	66	97

### 3.1.4 Definición de equipos

La definición de los equipos está dada por la capacidad de una BPU a máxima capacidad. Es importante considerar que para el ciclo solo se necesita un vehículo de cada tipo, se muestran en la Tabla 3.3.

*Tabla 3.3: Vehículos necesarios para cada actividad.*

Actividad	Vehículo
Perforación	Jumbo
Cargador explosivos	Equipo de Levante
Tronadura y ventilación	No requiere
Extracción de marina	LHD y camión
Acuñadura	Scaler
Fortificación: Pernos	Bolter
Fortificación: Lechado	Equipo de Levante
Fortificación: Malla	Equipo de Levante
Fortificación: Shotcrete	Camión Mixer
	Roboshot

La longitud de perforación del equipo jumbo es de 3,6 m. La capacidad del LHD es de 10 ton. La velocidad de los vehículos igualmente se ingresa al software, sin embargo, estos pueden variar. Se pueden ingresar para que tengan velocidades constantes o que varíen según la pendiente y si están cargados o descargados en el caso del LHD (ver Tabla 3.4).

*Tabla 3.4: Velocidades preliminares para la simulación (Contreras, 2016)*

Equipo	Velocidad [km/h]
Jumbo	5
Equipo de Levante	7
LHD	9
Camión	9
Scaler	5
Bolter	5
Camión Mixer	6
Roboshot	6

### 3.1.5 Restricciones Operacionales PyT

Dentro de la simulación se consideran restricciones operacionales, como son el horario de las tronaduras, la interacción entre equipos (corresponde al tiempo de maniobras entre equipos cuando se cruzan en la galería), al momento de la tronadura y ventilación no se permite que se realicen otras actividades, el número de frentes activos, la distribución estadística del tiempo de trabajo, disponibilidad de equipos y hora de los turnos. En la Tabla 3.5 se muestran los valores.

*Tabla 3.5: Restricciones Operacionales utilizadas para la simulación.*

Restricciones Operacionales	
Tronadura	0:00; 8:00; 16:00
Interacción entre equipos	3 [min]
Ventilación no permite otras actividades	60 [min]
Frentes de avance	5
Distribución tiempo de trabajo	triangular
Disponibilidad de equipos	85%

### 3.1.6 Costos Operacionales PyT

Para realizar la comparación de costos se decidió considerar el costo de perforación, tronadura, transporte de marina y fortificación medidos en USD/m. Los valores que se muestran en la Tabla 3.6 fueron extraídos del estudio realizado por Herrera en el 2021.

*Tabla 3.6: Costos por actividad de perforación y tronadura (Herrera, 2021).*

Actividad	Costo	Unidad
Perforación	628	USD/m
Tronadura	583	USD/m
Transporte Marina	448	USD/m
Fortificación	2854	USD/m

## 3.2 Parámetros de entrada TBM

### 3.2.1 Propiedades de la Galería

La TBM al ser circular con un diámetro de 6,1 m se debe instalar una dovela de 1,3 m para igualar las dimensiones del nivel de producción (ver Figura 3.4). Para el nivel de hundimiento se realiza de la misma manera, pero con una dovela de 1,5 m. El área de la sección en el nivel de producción es de 32,7 m<sup>2</sup> y del nivel de hundimiento es de 31,49 m<sup>2</sup>.

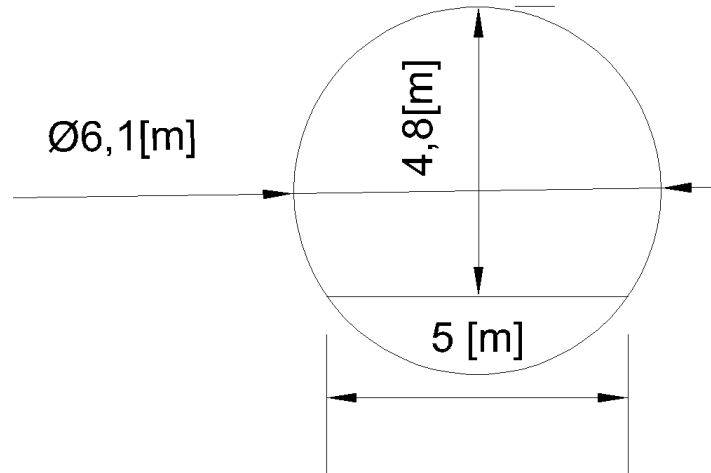


Figura 3.4: Dimensiones galería TBM.

### 3.2.2 Ciclo de actividades

Las actividades realizadas por el método TBM es simple en comparación al de PyT. El ciclo consta de excavación continua, carguío y traslado de marina, pernos, mallado y shotcrete. Se promedió los avances por día de los distintos casos estudiados de TBM obteniendo un promedio de 15 m/día. Es importante destacar que los tiempos definidos es para avanzar un metro. Inicialmente se utilizó una tasa de penetración de 20 min/m (Simaan et al., 1999) y los tiempos de fortificación de PyT. Sin embargo, resultaba en ciclos de trabajos muy altos y no era capaz de llegar a 15 m/día, por esta razón se optó por reducir los tiempos y acercarse a tiempos de ciclos reales. En la Tabla 3.7 se muestran los tiempos de cada actividad para la TBM.

Tabla 3.7: Tiempo de actividades TBM.

Actividad	Tiempo Min. [min]	Tiempo medio [min]	Tiempo Máx. [min]
Cutting	15	17	20
Transport	18	20	23
Bolting	13	15	17
Meshing	12	14	16
Shotcreting	20	22	25
Total	78	88	101

### 3.2.3 Horario turnos y restricciones operacionales

Al comenzar a operar la TBM, esta presenta un Ramp-up de dos meses, en el cual se trabaja un turno por día. Existe una curva de aprendizaje con relación a la construcción de las galerías auxiliares, donde la primera galería se demora 1,5 veces más que la velocidad final. La segunda galería se demora 1,25 veces más y de la tercera en adelante se alcanza la velocidad de construcción optima. Las galerías auxiliares no pueden tener un radio de giro menor a 30 m debido a la limitación de la máquina (Gratias et al., 2014). La TBM retrocede a una velocidad de 10 m/h, para lograr el retroceso necesita un tiempo de preparación equivalente a 6,5 h. Cada 180 metros se realizan trabajos de servicios, los cuales detienen a la TBM durante 1 día. La TBM cuando atraviesa algún cruce, necesita un refuerzo en los puntos de apoyo, los cuales ralentizan el avance de esta. A continuación, se muestran los valores de avance por sección y el horario de la TBM en la Tabla 3.8 y en la Tabla 3.9 respectivamente.

Tabla 3.8: Minutos por metros de avance según galerías y cruces.

Secciones específicas	Tiempo mínimo [min]	Tiempo moda [min]	Tiempo máximo [min]
Primera galería auxiliar 1,5	45	51	60
Segunda galería auxiliar 1,25	37,5	42,5	50
Galería auxiliar	30	34	40
Cruces	47	53	61

Tabla 3.9: Horario de turnos TBM.

Inicio	Fin	Inicio	Fin
0:00	11:00	12:00	23:00

### 3.2.4 Costos relacionados con TBM

Los costos de la TBM se calcularon con las fórmulas vistas en la revisión bibliográfica, considerando un diámetro de 6,1 m, 39 cortadores con una dimensión de 17 pulgadas cada uno. Es importante considerar el ajuste del IPC, ya que las fórmulas fueron creadas en el año 2000, dando valores inferiores a los actuales.

$$\text{Variación anual} = \left[ \frac{IPC_t}{IPC_{mes\ t\ año\ anterior}} - 1 \right] * 100$$

*Ecuación 3.1: Ecuación de variación anual del IPC.*

Donde:

$IPC_t$  : Valor del IPC en el periodo en curso

$IPC_{mes\ t\ año\ anterior}$  : Valor del IPC del mismo mes en año anterior

Como guía se utilizó el valor de la UTM en la fecha de marzo del 2000 y del 2024. Siendo 26573 CLP y 64793 CLP respectivamente. Utilizando la Ecuación 3.1, se obtiene una variación del 144,2%. Nada más queda utilizar este factor con el valor obtenido y sumarlo al valor original. En la Tabla 3.10 se muestran los valores relacionados con la TBM.

*Tabla 3.10: Costos según fórmulas de (Bruland,2000) y actualizados respecto al IPC.*

Adquisición TBM	26	MUSD
Adquisición Sistema buck-up	3	MUSD
Montaje	3	MUSD
Excavación	3785	USD/h
Sistema back-up	830	USD/h
Servicios TBM	103	USD/h
Servicios sistema back-up	32	USD/h
Costo eléctrico	403	USD/h
Mantenimiento TBM	239	USD/h
Mantenimiento sistema back-up	115	USD/h
Mano de obra	611	USD/h
Cortadores	234	USD/h

### 3.3 Diseño Malla

#### 3.3.1 Diseño Malla para PyT en nivel de producción

Se busca en la literatura diseño de la malla de producción del sector MB-N01 y MB-S01, considerando que es una malla tipo teniente con dimensiones de 16 x 20 m<sup>2</sup>, siendo 32 m la distancia entre calles de producción y 20 m la distancia lateral entre zanjas como se muestra en la Figura 3.5. Esto se optó ya que actualmente se están creando mallas con esas dimensiones.

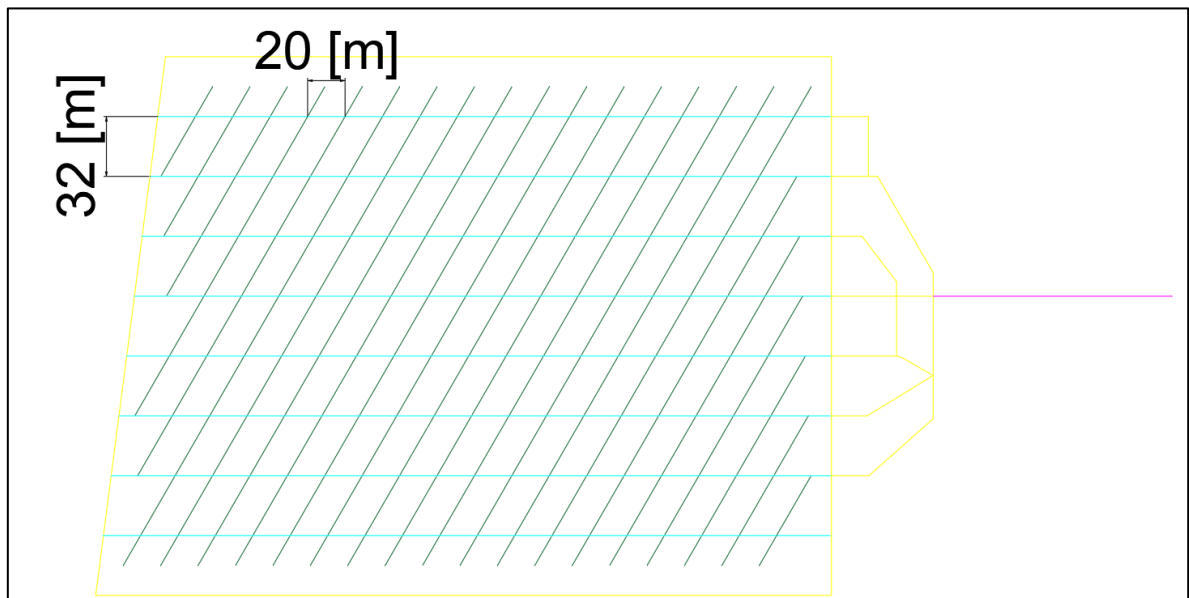


Figura 3.5: Malla de producción elaboración propia inspirada en malla de Chuquicamata subterránea.

Este layout es exportado al SimMine, en el cual permite simular y trabajar a partir de la malla diseñada y de los parámetros ingresados. La Figura 3.6 muestra el layout dentro del software. Las secciones que se ven más anchas ya están construidas previamente. El cuadro rojo corresponde al chancador periférico donde se dirige el camión a depositar el material fragmentado. La sección morada es la entrada al nivel de producción, se diseñó simplemente para la entrada de los equipos.

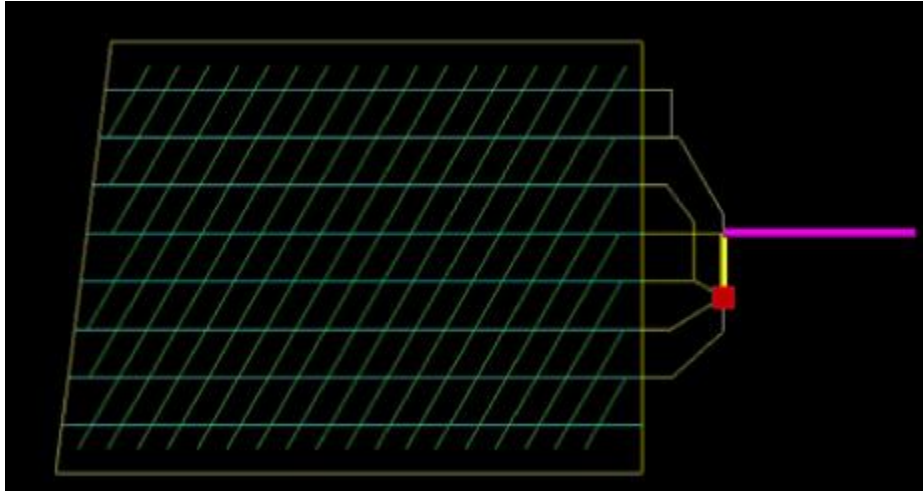


Figura 3.6: Malla diseñada con vista planta dentro de SimMine.

En primer lugar, la escuadrilla de PyT comienza construyendo la infraestructura cercana al chancador, para así tener más alternativas al momento de realizar el trayecto del camión hacia el chancador. Una vez construida esa zona, se procede a excavar las calles de producción y las zanjas cercanas a las calles. El software siempre busca mantener 5 frentes de avance activos, por esta razón al momento de desarrollar la primera calle de igual manera construye el inicio de otras, hasta llegar a las zanjas. El desarrollo es de derecha a izquierda y de arriba abajo (ver Figura 3.17).

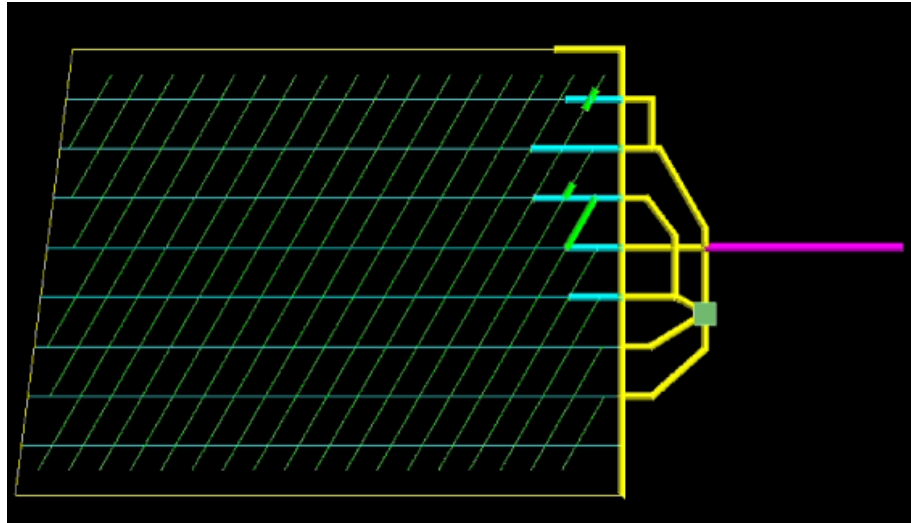


Figura 3.7: Inicio de construcción de calles y zanjas en nivel de producción.

Una vez construida la primera calle, se construye la cabecera cercana a la calle y se procede con la segunda y tercera calle. Donde la segunda calle se trabaja lineal sin considerar las zanjas inferiores, ya que estas son realizadas por la tercera calle como se puede ver en la Figura 3.8.

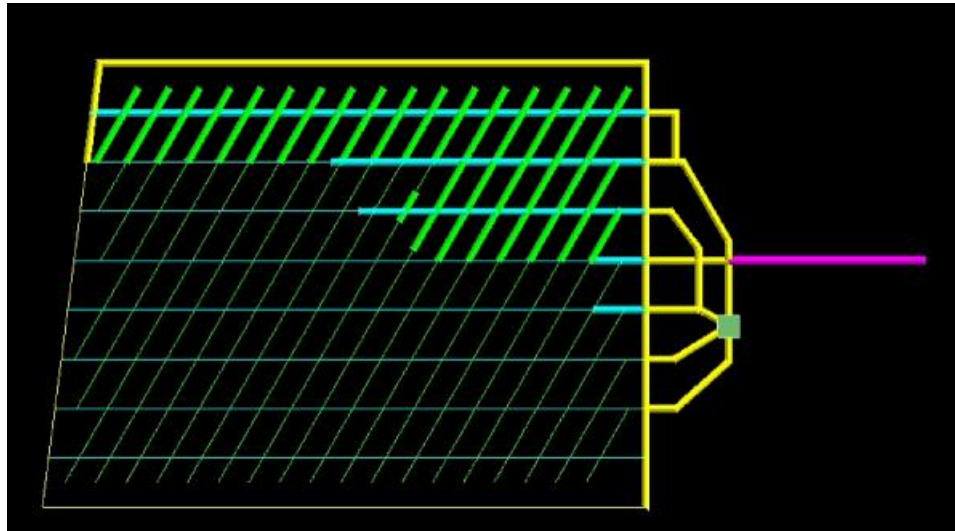


Figura 3.8: Finalizada la primera calle y se realiza el avance en la calle 2 y 3.

En la Figura 3.9, se puede observar el nivel de producción construido por la escuadrilla de PyT. Siendo la cabecera inferior la última sección a desarrollarse.

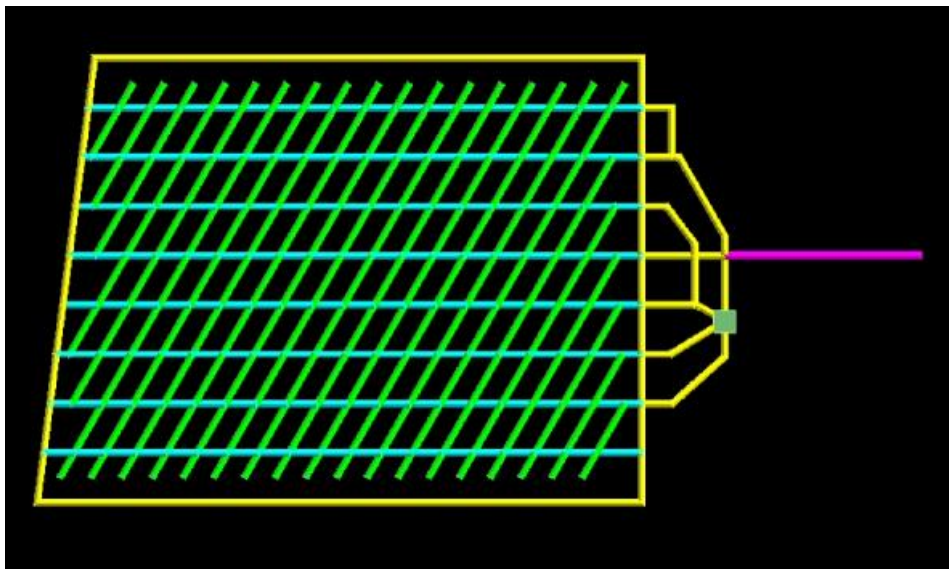


Figura 3.9: Nivel de producción construido por completo.

### 3.3.2 Diseño Malla para PyT en nivel de hundimiento

En la Figura 3.10, se visualiza el diseño de la malla de hundimiento para PyT el cual abarca 360 m x 224 m, teniendo 8 calles y 3 cruzados. Para este nivel se trabaja con 3 frentes de avance y realizando 2 tronaduras diarias, ya que así se logró calibrar el modelo para este nivel. La longitud total de desarrollo es de 3553 m.

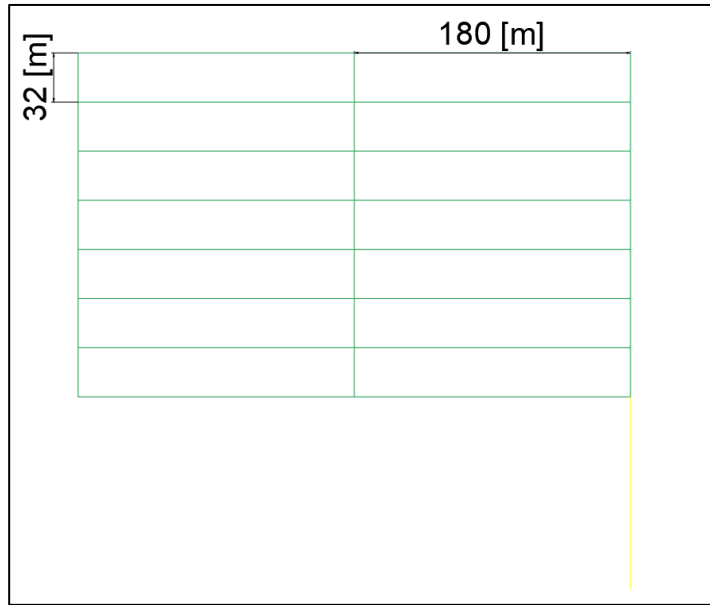


Figura 3.10: Diseño en AutoCAD del nivel de hundimiento para PyT.

El chancador se localiza en la zona inferior del diseño. Teniendo como entrada al nivel de hundimiento el túnel morado el cual ya está construido. El desarrollo inicia con el cruzado de la derecha y con las primeras 3 calles, la cuales se desarrollan de derecha a izquierda. Como se puede observar en la Figura 3.11, la escuadrilla de PyT trabaja solo con 3 frentes de avance. Las calles se desarrollan hasta llegar al cruzado de al medio y se continua con las otras calles, esto con la finalidad de aumentar el área abarcada.

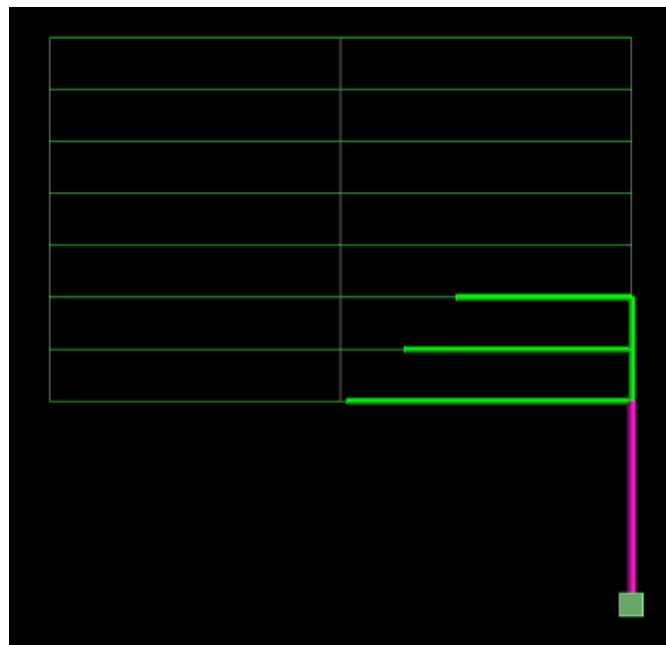


Figura 3.11: Avance por las primeras tres calles del nivel de hundimiento.

En la Figura 3.12, se puede observar cómo queda construido el nivel de hundimiento realizado por PyT.

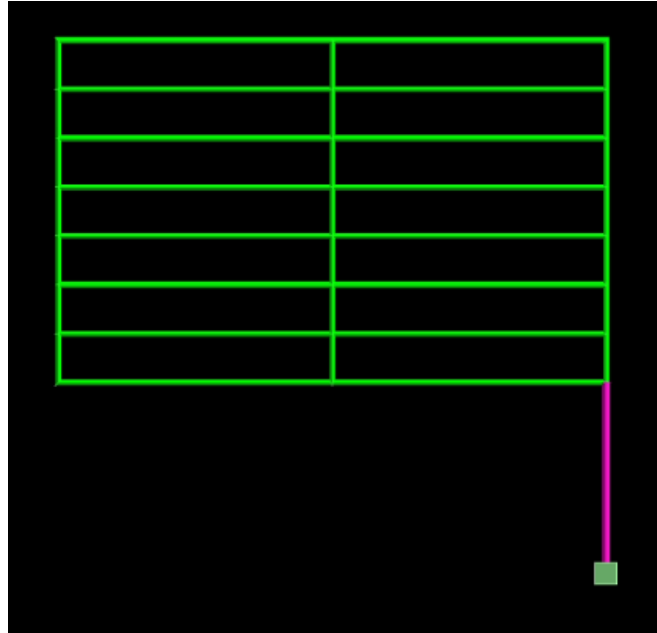


Figura 3.12: Nivel de hundimiento construido en su totalidad por PyT.

### 3.3.3 Diseño Malla para TBM en nivel de producción

El nivel de producción para la TBM es similar, sin embargo, requiere de galerías auxiliares para hacer el giro y continuar excavando, esto con el fin de minimizar el retroceso de la maquina y evitando pérdidas de tiempo. En la Figura 3.13 se puede observar que el nivel cuenta con 8 calles, 23 zanjas y 4 galerías auxiliares con un radio de giro de 32 m. La longitud total de desarrollo es de 10336 m.

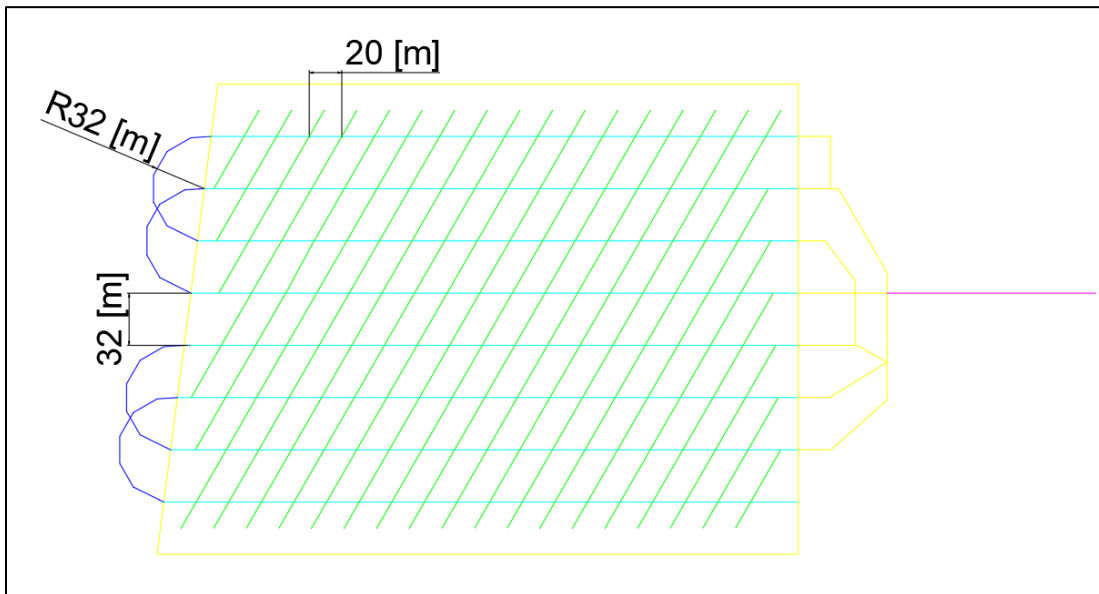


Figura 3.13: Nivel de producción diseñado para la TBM.

Como existen calles cortas y con ángulos cerrados alrededor del chancador, es necesario la inclusión de una escuadrilla PyT para realizar los trabajos de obras previas. Posterior a eso, entra la TBM a realizar el contorno y las cabeceras. Como se puede observar en la Figura 3.14.

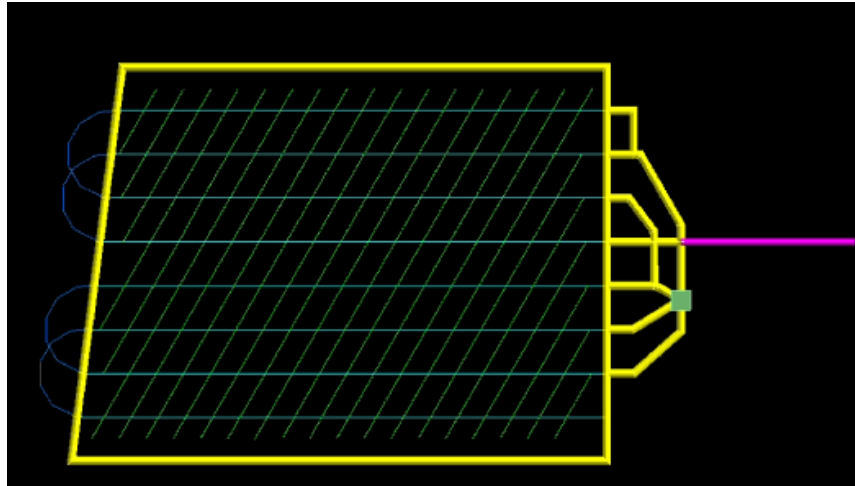


Figura 3.14: Infraestructura construida por PyT como obras previas y cabeceras hechas por TBM.

Una vez finalizado el contorno, la TBM comenzará por la primera calle de arriba y seguirá su trayecto por la primera galería auxiliar hasta llegar a la primera zanja la cual excavará ya que tiene el ángulo de 120 grados necesario para doblar. Esto se hizo así porque es la manera más fácil de excavar ciertas zanjas que posteriormente requerirían mayores secuencias de retroceso. Para entender mejor se expone la siguiente Figura 3.15.

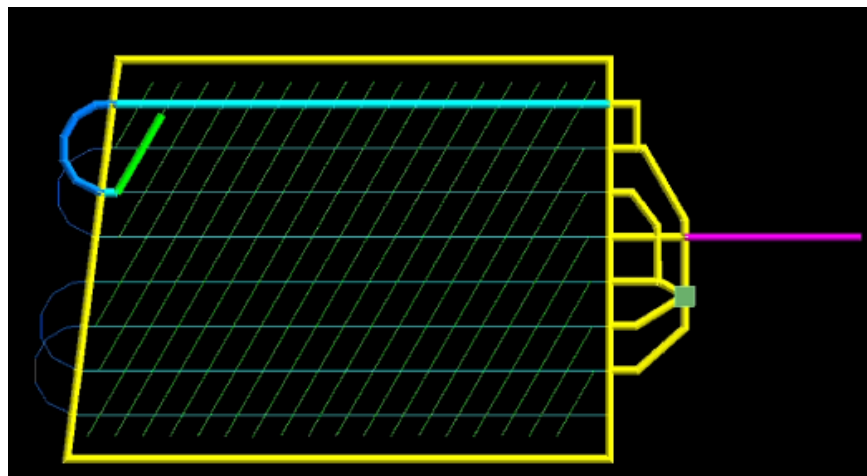
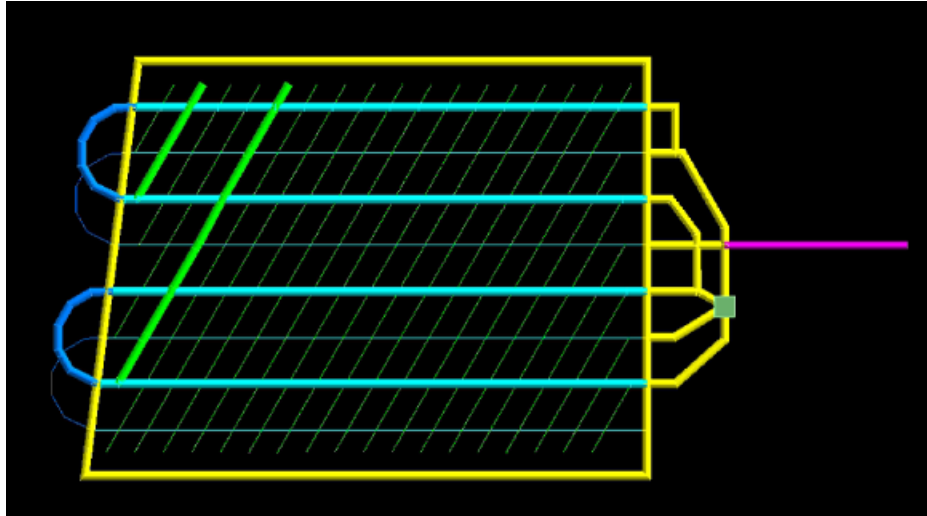


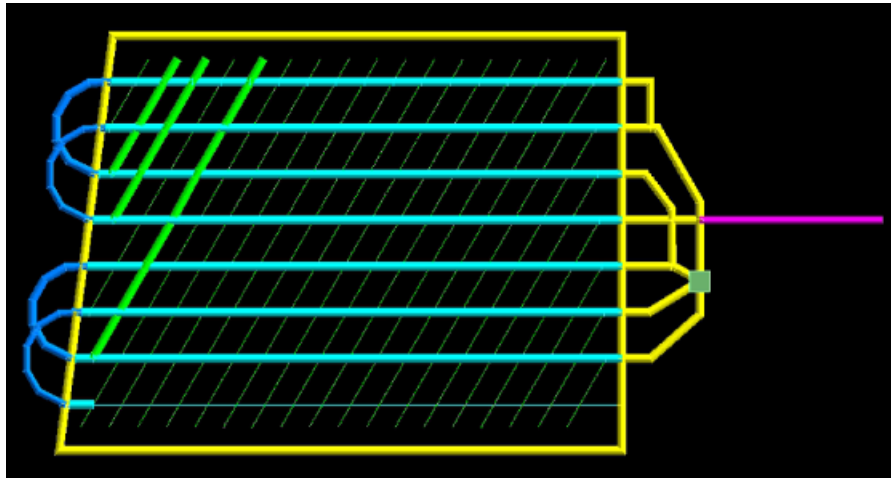
Figura 3.15: TBM ya construyó la primera calle, realizó el giro y excava una zanja.

La TBM continúa excavando por la calle 3, 5 y 7 donde se procede a excavar una zanja para facilitar la secuencia y realizar menos maniobras. Una vez realizada la zanja activa el retroceso para continuar excavando la calle 7 como se puede observar en la Figura 3.16.



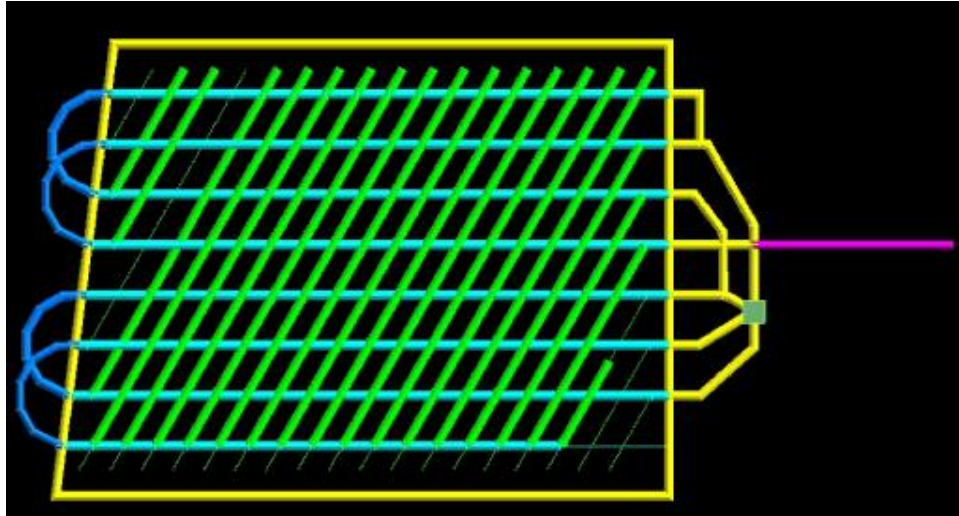
*Figura 3.16: Secuencia de excavación de calles 3, 5 y 7 en el nivel de producción.*

De ahí comienzan los trabajos por la calle 2, 4, 6. Cabe destacar que en la calle 4 se excava una zanja, que esta sección comienza en la calle, esto se aprecia en la Figura 3.17. Cuando llega a la calle 8, la TBM procede a excavar las zanjas disponibles.



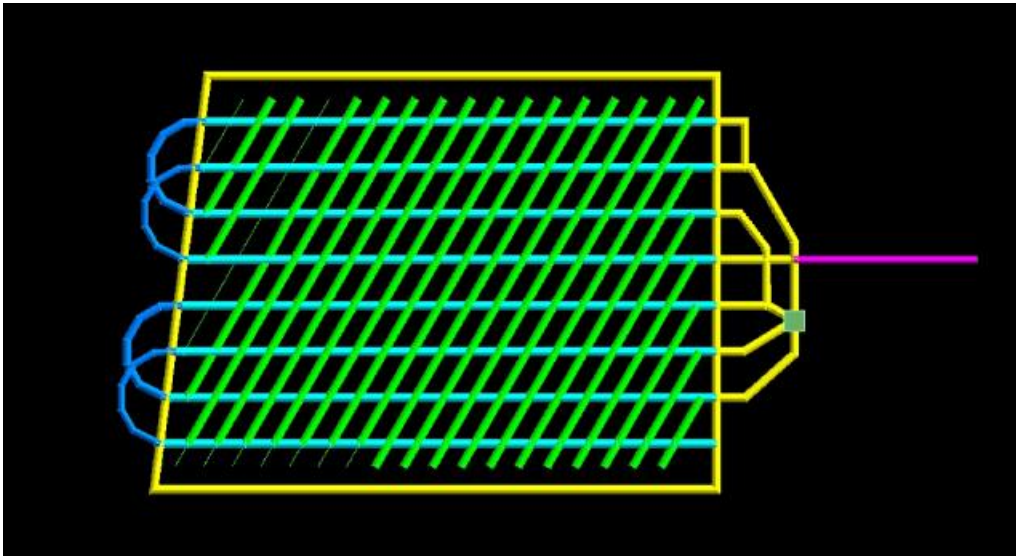
*Figura 3.17: Excavación de calles 2, 4 y 6 en el nivel de producción.*

Como se puede ver en la siguiente Figura 3.18 la TBM excava de Sur a Norte sin excavar las secciones pasadas de la calle 8 ya que no puedo realizar el giro. Finalmente realiza maniobras para poder excavar las zanjas restantes, donde al llegar al final de estas, procede a retroceder para comenzar la excavación de la zanja de la derecha.



*Figura 3.18: La TBM va por la última calle y excava todas las zanjas posibles.*

En la Figura 3.19 se puede observar que comienza la excavación de las secciones faltantes de las zanjas, esta secuencia es de derecha a izquierda. Para lograr esto la TBM tiene que hacer un giro en la zanja 3 contando de derecha a izquierda, en donde sube por esta zanja e ingresa a la infraestructura para poder girar y comenzar a avanzar en sentido contrario a como excavó las calles.



*Figura 3.19: Excavación de secciones de zanjas restantes en el nivel de producción.*

Finalmente, la TBM avanza por la calle 8 e ingresa a la galería auxiliar para llegar a la calle 6 y proceder a excavar la zanja que comienza a partir de ahí como se puede observar en la Figura 3.19. La excavación finaliza con la última zanja que comienza en la calle 2 (ver Figura 3.20).

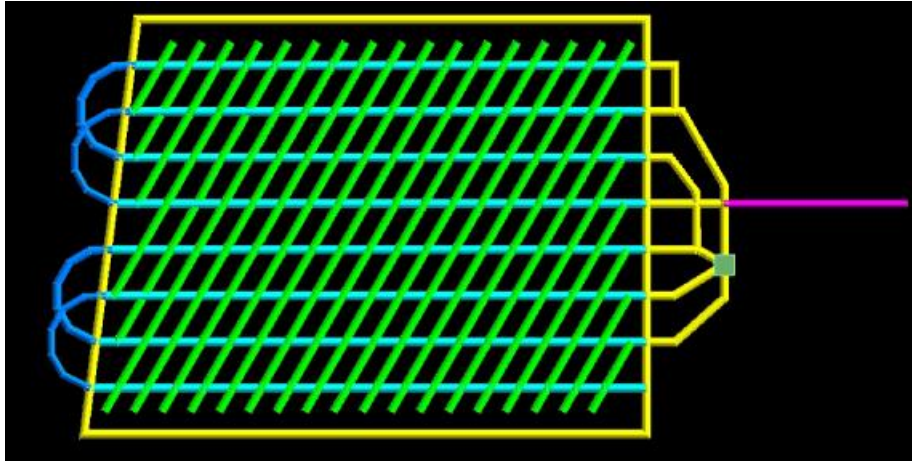


Figura 3.20: Excavación completa del nivel de producción.

### 3.3.4 Diseño Malla para TBM en nivel de hundimiento

El diseño del nivel de hundimiento para la TBM es distinto, ya que en este nivel se probaron curvas con radio de giro igual a 32 m, para respetar de mejor manera los límites de la TBM. Como se puede apreciar en la Figura 3.21, el nivel de hundimiento tiene 5 galerías auxiliares, 7 curvas, 8 calles y 3 cruzados. Tiene una longitud total de desarrollo igual a 4313 m.

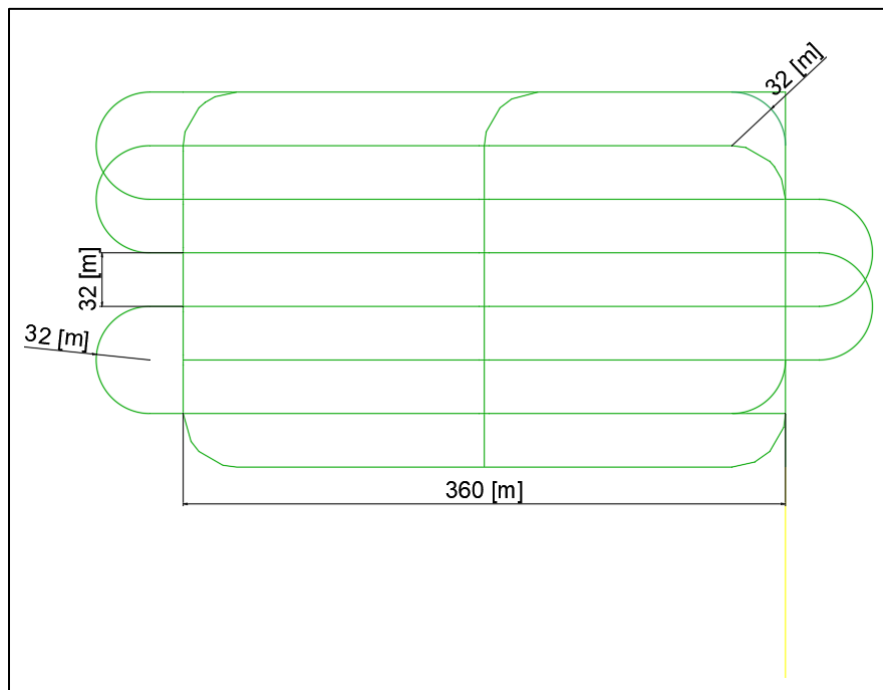
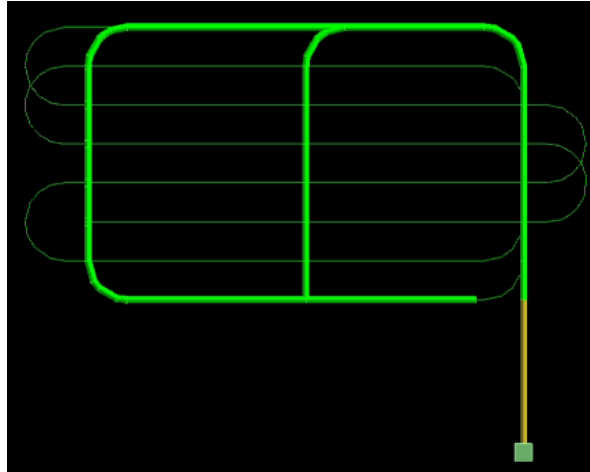


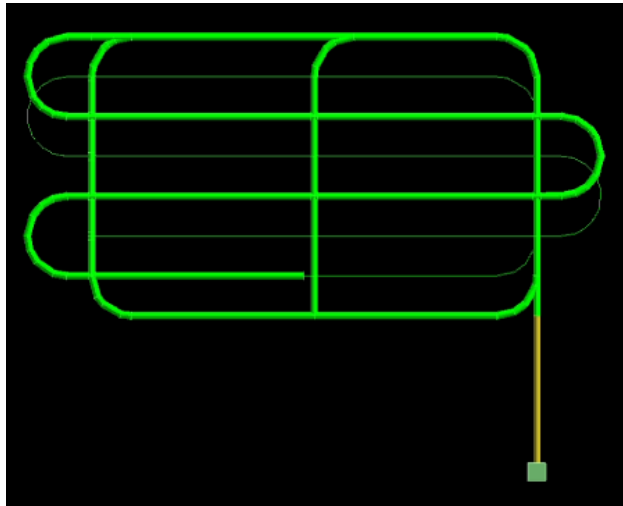
Figura 3.21: Diseño nivel de hundimiento para TBM.

La TBM comienza la excavación en la parte inferior derecha, avanzando en un sentido antihorario. Pasa por el cruzado de al medio, realiza maniobras de retroceso y continúa con el contorno del nivel de hundimiento, esto se puede ver en la Figura 3.22.



*Figura 3.22: La TBM realiza la excavación del contorno en el nivel de hundimiento.*

Una vez excavado el contorno, la TBM procede a la primera galería auxiliar ubicada arriba a la izquierda, esto permite que se excave la calle 3, 5 y 7. Logrando que la TBM siga en curso a la calle 2 hasta terminar con la calle 6. Se puede ver de mejor manera en la Figura 3.23.



*Figura 3.23: La TBM construyó las primeras tres galerías auxiliares.*

## 4 Resultados

En este capítulo se describen los resultados obtenidos finales, esto quiere decir que fue calibrado el modelo y se agregaron todas las interferencias operacionales correspondientes a cada método. Es importante destacar que en cada simulación se realizaron 10 réplicas para obtener resultados más confiables.

### 4.1 Simulación PyT en nivel de producción

En la Figura 4.1, se puede observar el rendimiento mensual de la escuadrilla de PyT. El avance mensual tiene un promedio de 309 m/mes, promediando 82 tronaduras por mes, sin considerar los últimos meses donde decae rendimiento. El tiempo promedio de construcción es de 2,9 años. Se puede observar en la Tabla 4.1 un resumen de los valores obtenidos y la utilización de los equipos.

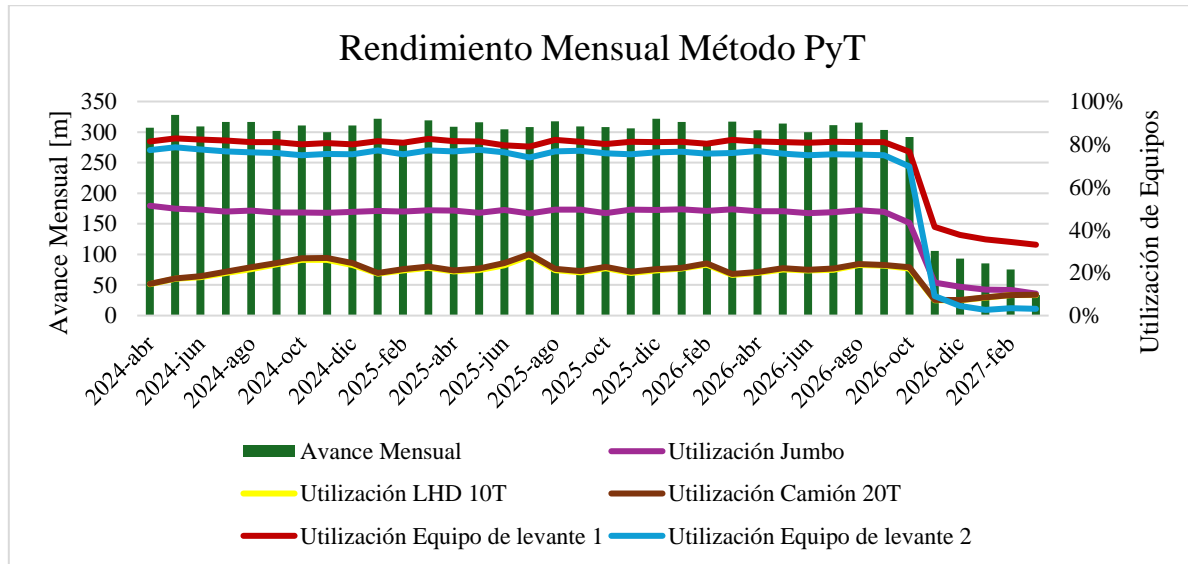


Figura 4.1: Gráfico de simulación del método de PyT en el nivel de producción.

Como se puede observar en la Tabla 4.1 los equipos con mayor rendimiento son los equipos de levante. Los equipos con menor utilización son el LHD y el camión.

Tabla 4.1: Resultados del método PyT en nivel de producción.

Avance Mensual Promedio en régimen [m]	309 ± 10
Tiempo de construcción [año]	2,9
Promedio de Tronaduras Mensuales	82
Utilización Jumbo	45 ± 11%
Utilización LHD 10T	20 ± 5%
Utilización Camión 20T	21 ± 5%
Utilización Equipo de Levante 1	77 ± 13%
Utilización Equipo de Levante 2	69 ± 20%

## 4.2 Simulación TBM en nivel de producción

En la Figura 4.2, se puede observar el avance mensual de la TBM en el nivel de producción. Se puede observar la utilización de la TBM como la utilización del camión de 20 toneladas. Cabe destacar que en el rendimiento solo se consideró la TBM y no la escuadrilla de PyT que realiza las obras previas. Sin embargo, se toma en cuenta el tiempo que demora en realizar el trabajo.

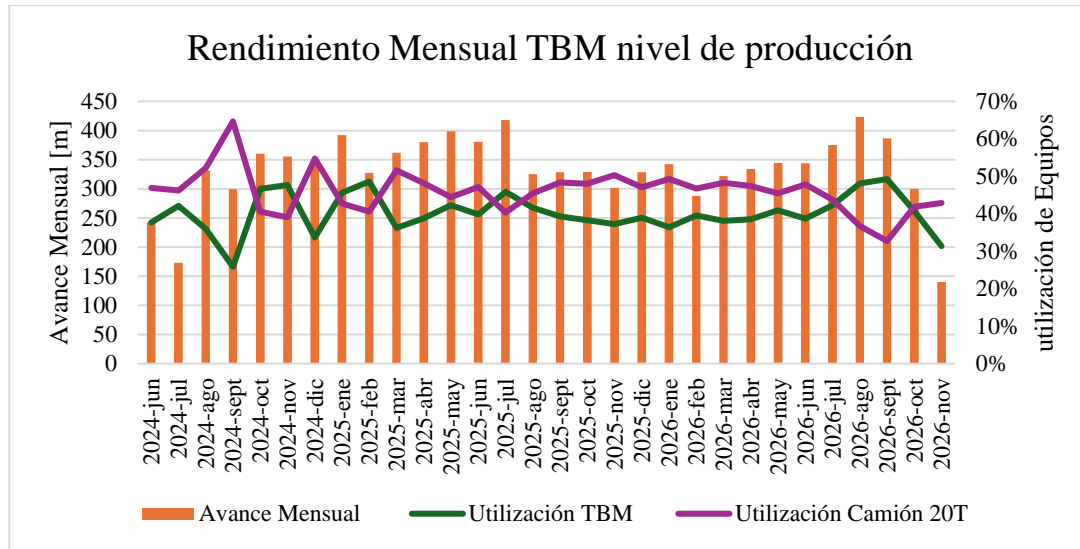


Figura 4.2: Gráfico de simulación del método TBM en el nivel de producción.

En la Tabla 4.2, aparece el promedio del rendimiento mensual considerando los 2 meses de ramp-up, donde se promedió cada mes de cada replica y posteriormente se promedió el total de los meses. Obteniendo un promedio mensual de 332 m, un rendimiento máximo y mínimo de 423 y 288 metros respectivamente. El tiempo de construcción obtenido es de 2,6 años.

Tabla 4.2: Resultados del método TBM en nivel de producción.

Rendimiento Mensual Promedio [m]	332 ± 62
Rendimiento Máximo Promedio [m]	423
Rendimiento Mínimo Promedio [m]	288
Tiempo de construcción [año]	2,6
Utilización TBM	40 ± 5%
Utilización Camión 20T	46 ± 6%

### 4.3 Costos PyT y TBM en nivel de producción

Se promediaron los costos de cada replica para cada simulación, obteniendo aproximadamente un costo de 51 MUSD para PyT y 45 MUSD para TBM. En la Tabla 4.3 se puede ver la comparación de los costos, junto al tiempo de construcción, avance mensual, avance total realizado y el costo por metro de cada método.

Tabla 4.3: Costos de cada método en nivel de producción.

Método	PyT	TBM
Costo total [USD]	51.169.667	45.461.964
Tiempo de construcción [año]	2,9	2,6
Avance Mensual [m]	309	332
Avance total [m]	9976	10376
Costo por metro [USD/m]	5129	4382

### 4.4 Simulación PyT en nivel de hundimiento

La simulación de PyT en el nivel de hundimiento, como se comentó anteriormente, cuenta con 3 frentes de avance y 2 tronaduras diarias. Obteniendo un avance mensual promedio de 209 m. En la Figura 4.3 se puede observar el avance de cada mes y la utilización de los equipos durante el desarrollo.

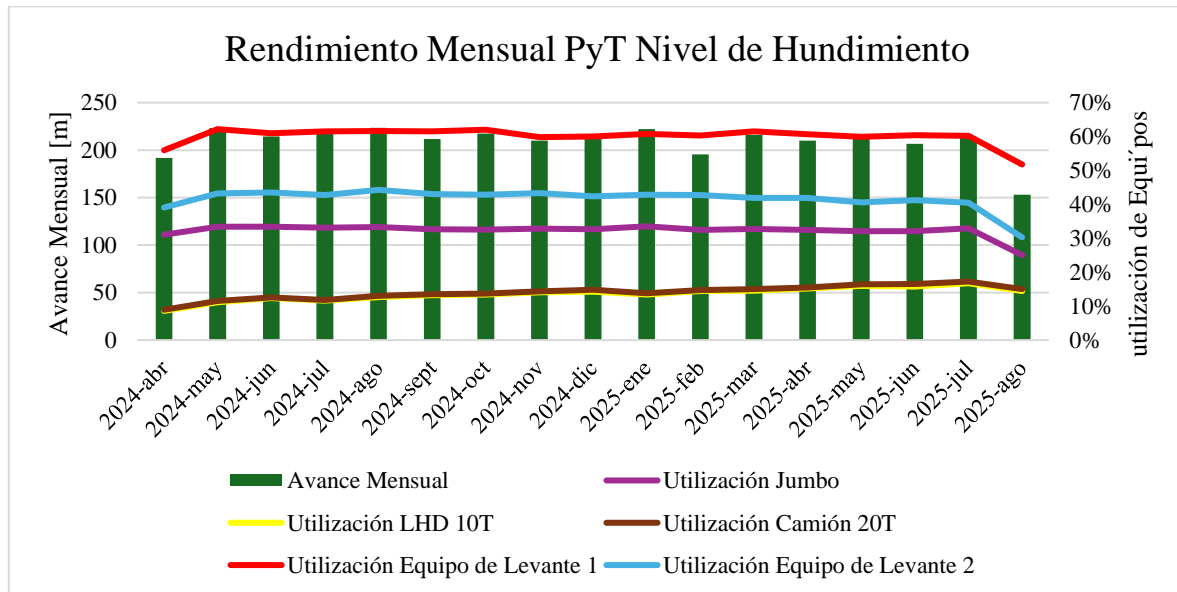


Figura 4.3: Gráfico de simulación PyT en nivel de hundimiento.

En la Tabla 4.4 se muestra el avance mensual, el tiempo de construcción que fue de 1,42 años, las tronaduras promedio mensuales. Al igual que en el nivel de producción, los equipos de levante tienen mayor utilización y el LHD junto al camión tienen la utilización más baja.

Tabla 4.4: Resultados de PyT nivel de hundimiento.

Avance Mensual Promedio [m]	209 ± 17
Tiempo de construcción [año]	1,42
Promedio de Tronaduras Mensuales	58
Utilización Jumbo	32 ± 2%
Utilización LHD 10T	14 ± 2%
Utilización Camión 20T	14 ± 2%
Utilización Equipo de Levante 1	60 ± 3%
Utilización Equipo de Levante 2	42 ± 3%

#### 4.5 Simulación TBM en nivel de hundimiento

En la Figura 4.4, se puede observar el avance mensual de la TBM en el nivel de hundimiento. Se puede observar la utilización de la TBM como la utilización del camión de 20 toneladas. Los dos primeros meses corresponden al ramp-up, por esa razón tienen un avance mensual menor al resto de meses.

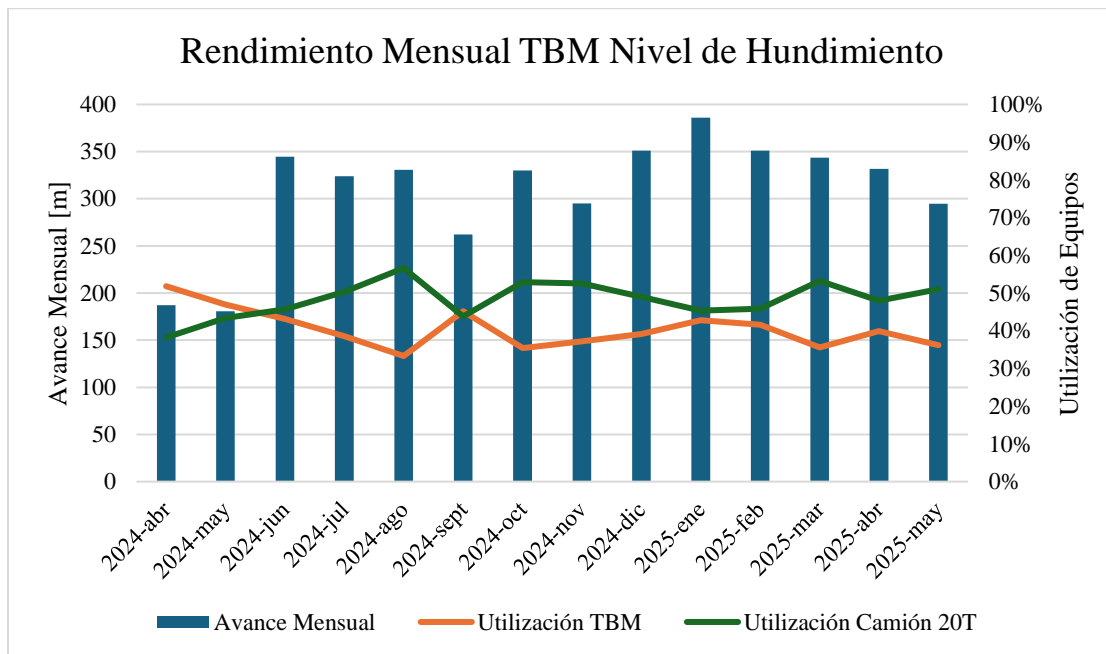


Figura 4.4: Gráfico de simulación TBM en nivel de hundimiento

En la tabla 4.5, se puede apreciar que el rendimiento promedio fue 308 m/mes, logrando que el tiempo de desarrollo del nivel de hundimiento sea de 1,17 años.

*Tabla 4.5: Resultados de TBM nivel de hundimiento.*

Rendimiento Mensual Promedio [m]	308 ± 60
Tiempo de construcción [año]	1,17
Utilización TBM	40 ± 5%
Utilización Camión 20T	48 ± 5%

#### 4.6 Costos PyT y TBM en nivel de hundimiento

Como se puede observar en la Tabla 4.6, se obtuvo un costo total operacional de aproximadamente 18 MUSD correspondiente a PyT y 19 MUSD correspondiente a TBM. El tiempo de construcción es menor con el método TBM, a pesar de desarrollar más metros. El coste por metro es mayor el de PyT.

*Tabla 4.6: Costos de cada método en nivel de Hundimiento.*

Método	PyT	TBM
Costo total [USD]	18.116.097	19.256.993
Tiempo de construcción [año]	1,4	1,2
Avance Mensual [m]	209	308
Avance total [m]	3553	4313
Costo por metro [USD/m]	5099	4465

## 5 Discusión

En este capítulo se realiza un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

En primer lugar, el rendimiento de PyT en el nivel de producción decae debido a la falta de frentes disponibles en los últimos meses, esto posiblemente se debe a la planificación de avance que se simuló, en el cual avanzaba por una calle y por las zanjas de esta misma. Si se hubiera comenzado a trabajar en todas las calles por igual, se habría logrado abarcar una mayor área con más frentes disponibles para trabajar. Esto permitiría que al final de la construcción se mantuviese 5 frentes de avance disponibles.

Se realizó una prueba de sensibilidad en la cual se cambiaba el número de frentes, el cual mostró que por cada frente faltante disminuye el rendimiento mensual aproximadamente en 40 m/mes. En el Gráfico 5.1 se puede observar la diferencia de avance mensual por cada número de frentes máximo designado. El avance se estabiliza con 7 frentes, ya que los equipos están trabajando a su máxima capacidad. Es importante destacar que estos valores incluyen los meses donde disminuye la cantidad de frentes disponibles durante la simulación. La línea horizontal naranja es el avance promedio de la TBM en el nivel de producción, con el fin de comparar el avance de PyT.

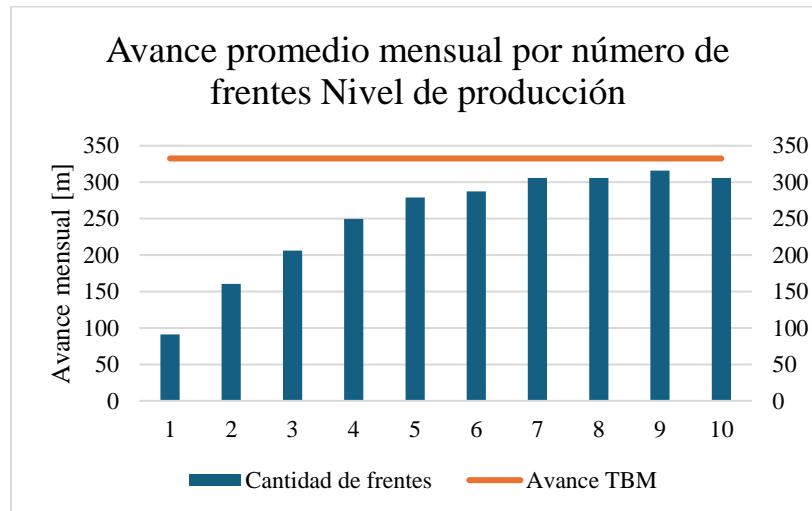


Figura 5.1: Gráfico de sensibilidad del número de frentes de PyT en nivel de producción.

Actualmente la TBM no es capaz de construir el nivel de producción completo por sí mismo. Debido a la baja versatilidad de la TBM es necesario una escuadrilla de PyT para construir las secciones cortas y con ángulos cerrados. El radio de giro mínimo de 30 m limita el plan de avance, obligando a crear galerías auxiliares, las cuales se intersecan y pueden provocar alguna estabilidad en esa área. En la simulación, se obligó a la TBM a excavar todas las zanjas, sin embargo, sería mejor utilizar la misma escuadrilla de PyT que realiza las obras previas, considerando ciertas restricciones operacionales, como puede ser la distancia de seguridad entre métodos de 60 m.

Un radio de giro mínimo cercano a la distancia entre zanjas permitiría un mejor desarrollo y ampliaría las opciones al momento de decidir la secuencia de excavación. Un ejemplo sería un radio de giro mínimo de 15 m, el cual permitiría terminar una calle y seguir excavando hasta llegar a la siguiente, a diferencia del caso simulado, donde se salta una calle debido al radio de giro mínimo establecido. En el gráfico del rendimiento de la TBM se puede observar mayor variación durante los meses, esto se debe al tiempo de preparación y velocidad de retroceso.

En términos de costos, el método TBM inicialmente es mayor, sin embargo, el costo por metro es un 13% menor al costo por metro de PyT. A los 10.000 m la diferencia es de unos 6 MUSD.

Respecto al nivel de hundimiento, se observa que a pesar de que PyT tiene menos metros que desarrollar que la TBM, este método no logra terminar el nivel antes que su competencia. Esto se debe a los 3 frentes de avance asignados y las 2 tronaduras diarias. Como se puede observar en el Gráfico 5.2, PyT es capaz de acercarse al rendimiento de la TBM cuando logra trabajar con 6 frentes de avance.

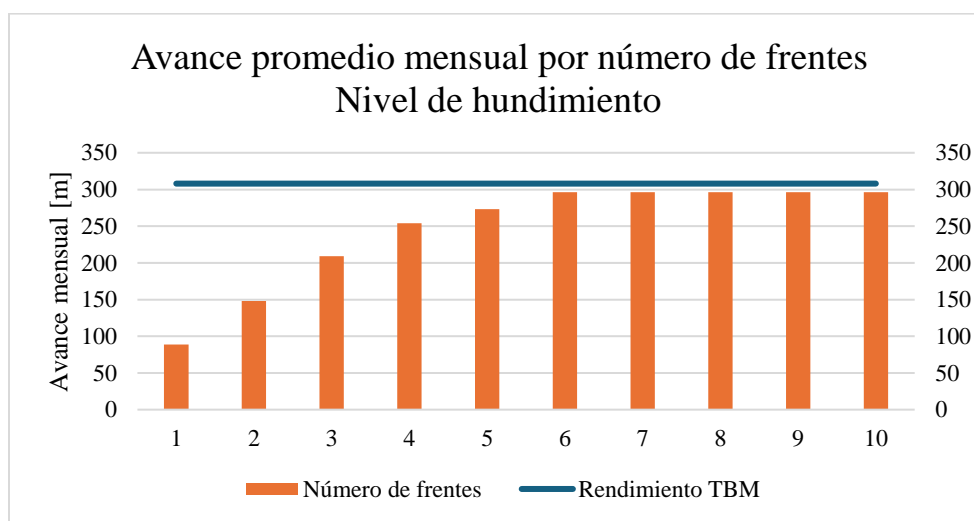


Figura 5.2: Gráfico de sensibilidad del número de frentes de PyT en nivel de hundimiento.

Es importante destacar que PyT avanza constantemente los 3,6 m por cada ciclo. Si se llegase a aumentar ese avance, posiblemente la TBM no tendría mucha oportunidad contra PyT en el nivel de producción. Además, que en el nivel de hundimiento TBM termina siendo más costoso por el hecho de que tiene que excavar más metros.

## 6 Conclusiones

El método PyT tiene un promedio de 309 m/mes siempre y cuando tenga 5 frentes de avance activos. Si se considera todos los meses incluyendo cuando tenía menos frentes el promedio decae a 285 m/mes. Por cada frente menos, pierde cerca de 40 m/mes. Esto significa que en la planificación es importante mantener siempre la mayor cantidad de frentes activos y abarcar la mayor área posible. Porque con la planificación que se hizo en el estudio a pesar de aumentar los frentes, nunca alcanza el mismo rendimiento que la TBM. En el nivel de hundimiento ocurre exactamente lo mismo, la TBM es considerablemente más rápida que PyT y a su vez más costoso debido que desarrollar más metros para construir el nivel. Gracias al estudio de sensibilidad realizado se observa que PyT se acerca al rendimiento de la TBM utilizando 6 frentes de avance, con lo cual finalizaría el nivel de hundimiento antes que la TBM.

En el gráfico de TBM existe mayor variación, debido al tiempo de preparación y velocidad de retroceso. Esto producido por la baja versatilidad de la TBM, la cual tiene la ventaja de realizar excavaciones largas en menor tiempo, pero debe retroceder una gran cantidad para poder excavar la siguiente zanja. Además, la TBM no es capaz de realizar el desarrollo completo del nivel de producción, siendo necesario la integración de una escuadrilla de PyT, realizando obras previas.

La TBM tiene una inversión inicial mayor al método de PyT. Sin embargo, el costo por metro es de un 13% menos. A los 10.000 m PyT supera por una cifra cercana a los 6 MUSD.

SimMine a través de eventos discretos permite la simulación de excavación continua en el nivel de producción y hundimiento, considerando interferencias, variabilidad en las actividades y restricciones operacionales. Mostrando el comportamiento dinámico de los equipos y facilita la optimización de la flota. La gran ventaja que tiene este software es la rápida capacidad para preparar un modelo y lograr la simulación con los datos necesarios.

### 6.1 Trabajo futuro

Un buen trabajo a futuro sería realizar una simulación con una TBM más versátil, ideal que tenga un radio de giro mínimo de 15 m. Esto disminuiría las galerías auxiliares y por tanto la longitud total de avance en los niveles serían menores, disminuyendo los costos del método.

Otro buen trabajo es realizar una simulación considerando todas las restricciones operacionales posibles que tiene cada método y las restricciones operacionales que surgen cuando trabajan en conjunto como es la distancia de seguridad entre métodos, horario de las tronaduras las cuales pueden detener a la TBM, se podría agregar la excavación de rampas. Otro punto importante sería los cambios de rocas dentro del mismo nivel, eso produciría distintas velocidades de avance en la TBM probablemente ralentizando el avance de 2 a 5 m/día menos siendo una aproximación.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Alegría. (2010). Evaluación Técnica de la Preparación Minera para el Proyecto Nuevo Nivel Mina. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería.
- Banks, J. (2000). 2000: INTRODUCTION TO SIMULATION.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2013). Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries. CRC Press.
- Botha, J., & Nichol, S. (2010). RAPID UNDERGROUND DEVELOPMENT OPTIMISATION AT CULLINAN DIAMOND MINE USING COMPUTER SIMULATION.
- Bruland, A. (2000). Hard Rock Tunnel Boring Vol. 4- Costs. <https://doi.org/10.13140/2.1.4074.8482>
- Cardemil, M. (2023, abril 4). Impactos socioeconómicos de la minería en Chile. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones - Biblioteca del Congreso Nacional. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe\\_N\\_04\\_23\\_Impactos\\_socioeconomicos\\_de\\_la\\_mineria\\_en\\_Chile.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf)
- Ccatamayo, J. H. C. (s. f.). APLICACIÓN DE FILOSOFIA LEAN EN LA PREPARACIÓN MINERA, MINA EL TENIENTE CODELCO CHILE.
- Consejo Minero. (2023). Cifras Actualizadas de la minería 2023 Septiembre. <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/09/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2023-Septiembre.pdf>
- Cortés, D., Martínez, Y., & Silva Balocchi, M. (2018). Maximising resource utilisation in scheduling of underground mining works with multiple faces. Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, 399-406. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1815\\_28\\_Cortes](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_28_Cortes)
- Cortez, J. A. (2020). PLANIFICACIÓN INTEGRADA DE MEDIANO/LARGO PLAZO PARA OBRAS INTERIOR MINA EN PROYECTO ANDES NORTE – NUEVO NIVEL MINA.

- Gómez, R., & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: La actual metodología aplicada en Chile del “block caving”. *BOLETÍN GEOLÓGICO Y MINERO*, 130(1), 181-198. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.1.011>
- Gratias, R., Allan, C., & Willis, D. (2014). The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining.
- Herazo, Y. Y. (2018). SIMULATION AND EXCAVATION OF HORIZONTAL DEVELOPMENTS IN BLOCK/PANEL CAVING MINING.
- Herrera, G. G. H. (2021). ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE TBM EN NIVEL DE PRODUCCIÓN DE MINERÍA BLOCK CAVING.
- Li, Z. (2012). APPLICATION OF SIMULATION TECHNIQUES IN DEVELOPMENT PLANNING FOR CAVING METHODS.
- Penroz, G. (2022). ANÁLISIS DE CONSTRUCTIBILIDAD Y PUNTOS CRÍTICOS DEL USO DE TBM EN MINERÍA DE BLOCK CAVING.
- Rodríguez, C. E. R. (2020). DESAFÍOS GEOMECÁNICOS PARA EL USO DE TBM EN MINERIA MASIVA DE CHILE.
- Salama, A., Greberg, J., & Schunnesson, H. (2014). The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection.
- Simaan, A., Janaka, R., K, E., & Siri, F. (1999). 1999: SPECIAL PURPOSE SIMULATION TEMPLATE FOR UTILITY TUNNEL CONSTRUCTION.
- Soto Ramírez, I. J. (2020). Simulación como herramienta para identificar y comprender las operaciones críticas en el ciclo de desarrollos horizontales [Magíster en Ciencias de la Ingeniería]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ING/33331>