



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**PROPUESTA PARA NORMALIZAR EL
AVANCE EN LA CONSTRUCCIÓN DE
DESARROLLOS HORIZONTALES
SUBTERRÁNEOS Y SU IMPACTO EN LA
PLANIFICACIÓN MINERA**

SEBASTIÁN ANTONIO RAMÍREZ CORNEJO

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
EDUARDO CÓRDOVA

Santiago de Chile, Enero 2024
2024, Sebastián Antonio Ramírez Cornejo



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

PROPUESTA PARA NORMALIZAR EL AVANCE EN LA CONSTRUCCIÓN DE DESARROLLOS HORIZONTALES SUBTERRÁNEOS Y SU IMPACTO EN LA PLANIFICACIÓN MINERA

SEBASTIÁN ANTONIO RAMÍREZ CORNEJO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

EDUARDO CÓRDOVA

ANGELINA ANANI

CARLOS MARQUARDT

SIXTO LÓPEZ

JOSÉ RICARDO PÉREZ

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Enero 2024

A mis padres que admiro, Claudia y Marco, quienes me otorgaron esta oportunidad. A mi hermano menor y amigos quienes me apoyaron y ayudaron durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

(Nota redactada sobriamente en la cual se agradece a quienes han colaborado en la elaboración del trabajo.) (*Normal*)

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
INDICE DE TABLAS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. ANTECEDENTES.....	6
3.1 Métodos de explotación subterráneos.....	6
3.2 Planificación minera.....	9
3.3 Preparación mina.....	10
3.4 Construcción de desarrollos horizontales.....	12
3.5 Simulación como herramienta de optimización minera.....	16
3.6 Investigación de métodos de normalización de tamaños de sección.....	18
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1 Simulación Montecarlo.....	22
4.2 Descripción del modelo.....	23
4.3 Comportamiento estadístico de las actividades.....	28
4.4 Cálculo de factores de normalización.....	30
4.5 Escenarios de experimentación.....	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
5.1 Actividades críticas.....	35

5.2	Tiempos de ciclo.....	37
5.3	Radio hidráulico	40
5.4	Validación según variabilidad	43
6.	CONCLUSIONES	46
	BIBLIOGRAFIA.....	49
	A N E X O S.....	52
	Anexo A : Titulo del Anexo (<i>Heading 1</i>).....	53

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1: Comportamiento estadístico asociado al tiempo de cada actividad	29
Tabla 4.2: Radio y factores de normalización para cada escenario	34
Tabla 5.1: Actividades críticas del ciclo de construcción.....	35
Tabla 5.2: Tiempo de ciclo esperado para cada escenario.....	37
Tabla 5.2: Coeficiente variación actividades críticas	45

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1: Clasificación métodos de explotación subterráneos.....	7
Figura 3.2: Infraestructura mina <i>caving</i> El Teniente, Chile	9
Figura 3.3: Ciclo de un disparo de avance de túneles mineros mediante D&B	14
Figura 3.4: Gráfico de dispersión tiempo total de ciclo v/s tamaño sección	20
Figura 4.1: Diagrama de flujo actividades perforación de tiros	24
Figura 4.2: Diagrama de flujo actividades carguío explosivos.....	25
Figura 4.3: Diagrama de flujo actividades ventilación y marina.....	25
Figura 4.4: Diagrama de flujo actividades acuñadura	26
Figura 4.5: Diagrama de flujo actividades soporte y fortificación	27
Figura 4.6: Parámetros que definen la geometría de un túnel	31
Figura 5.1: Distribución acumulada tiempos de ciclo para cada escenario	39
Figura 5.2: Relación entre radio hidráulico y tiempo de ciclo de avance.....	41
Figura 5.3: Histograma de la actividad Instalación malla metálica.....	44

RESUMEN

Los proyectos mineros conocidos como *Super Caves* o megaproyectos *caving*, traen consigo nuevos desafíos en términos de control y gestión de la preparación y planificación minera. Estudiar los indicadores actuales y las variables que impactan los desarrollos, resulta clave para definir metodologías y mejoras operativas que permitan mantener la competitividad y el nivel de producción, a pesar del envejecimiento de los yacimientos mineros. Un desafío importante en la construcción de estos megaproyectos es la basta infraestructura que van a necesitar y la gran cantidad de kilómetros de túneles que se deberán desarrollar.

El objetivo de esta tesis es proponer una metodología que permita estimar con mayor certeza el tiempo de construcción de un túnel e identificar aquellas actividades críticas del ciclo de construcción. El estudio se realiza mediante un modelo de simulación de eventos discretos que permite predecir el tiempo de ciclo de construcción para distintos tamaños de desarrollo. Los datos utilizados para este estudio y los escenarios de experimentación simulados corresponden a la División El Teniente de Codelco.

Palabras Claves: Minería Subterránea, Planificación minera,
Preparación mina, Construcción de túneles, Simulación de eventos
discretos, Desarrollos horizontales

ABSTRACT

Mining projects known as Super Caves or caving megaprojects bring with them new challenges in terms of control and management of mining preparation and planning. Studying the current indicators and the variables that impact developments is key to defining methodologies and operational improvements that allow maintaining competitiveness and the level of production, despite the aging of mining deposits. An important challenge in the construction of these megaprojects is the vast infrastructure that they will need and the large number of kilometers of tunnels that must be developed.

The objective of this thesis is to propose a methodology that allows to estimate with greater certainty the construction time of a tunnel and to identify those critical activities of the construction cycle. The study is carried out using a discrete event simulation model that allows predicting the construction cycle time for different development sizes. The data used for this study and the simulated experimentation scenarios correspond to Codelco's El Teniente Division.

Keywords: Underground Mining, Mine Planning, Mine Preparation,
Tunnel Construction, Discrete Events Simulation, Horizontal
Developments

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente la industria minera ha generado importantes beneficios en las economías locales al incentivar la inversión extranjera, aumentar los ingresos por exportaciones, aumentar las recaudaciones fiscales y al generar nuevos empleos bien remunerados (Dorin et al., 2014). En el caso particular de nuestro país, la minería aporta el 14,6% del PIB (Consejo Minero, 2022).

Actualmente esta industria deberá hacer frente a importantes desafíos para poder satisfacer el nivel de demanda, ya que los yacimientos que se han explotado por décadas se encuentran cada vez a mayor profundidad, lo que se traduce en una disminución de las leyes minerales, en un aumento de la dureza de la roca y en un aumento en la distancia de transporte (Calvo et al, 2016; Northey et al, 2014).

Para enfrentar estos desafíos y lograr mantener la competitividad, muchos de estos yacimientos envejecidos que explotan su mineral a cielo abierto, tendrán que hacer una transición hacia métodos subterráneos (King et al., 2016; Flores y Catalán, 2019). Los métodos subterráneos más tradicionales como el *cut and fill* o el *sublevel*

stoping, poseen costos operacionales elevados y niveles de productividad bajos en comparación a la explotación en cielo abierto, por lo que solo los métodos subterráneos masivos de hundimiento o *caving*, podrán transformarse en una opción interesante para la transición de los rajos (Rashidi et al., 2014).

Los megaproyectos de *caving* son muy ambiciosos en cuanto a las metas productivas que buscan tener, pues su objetivo es mantener niveles de producción similares a lo que se lograba extraer mediante minería a cielo abierto. Esto significa numerosos desafíos técnicos, geomecánicos y ambientales (Dowd et al, 2016). Uno de estos desafíos corresponde a la gran cantidad de infraestructura y túneles que se deben construir, por ejemplo, el caso del Nuevo Nivel Mina de la División El Teniente que pretende construir más de 113 kilómetros de túneles para extender la vida útil de la mina por al menos 50 años más (Díaz et al, 2019).

Por este motivo, la “*Construcción Rápida o Rapid Construction*”, es la metodología constructiva que permitirá consolidar las principales variables de la preparación minera en proyectos complejos, como es el caso de las áreas productivas en minería subterránea. El objetivo de construir de forma rápida y eficiente es crear valor a partir del aseguramiento de la capacidad de producción, dado el impacto económico que esto significa para el negocio minero.

El presente trabajo pretende desarrollar una propuesta para normalizar el avance en la construcción de desarrollos horizontales mineros que permita mejorar la precisión de la planificación de estos desarrollos y

así, lograr construir de forma más eficiente. Lo anterior, mediante el desarrollo de un modelo de simulación, como herramienta de optimización minera, que permita analizar las operaciones críticas del ciclo de construcción de desarrollos horizontales y proyectar tiempos de ciclo esperados con mayor certeza.

A continuación, se nombran los objetivos generales y específicos de la tesis y se plantea la hipótesis de investigación. Luego se hace una revisión literaria de los antecedentes relacionados a la planificación minera, construcción de túneles y de la simulación como herramienta de optimización minera. Posteriormente, se presenta una descripción del modelo de simulación desarrollado y los casos de experimentación que serán simulados, los cuales están asociados a desarrollos de la División El Teniente. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de la simulación con los datos medidos en terreno, se identifican las actividades críticas del ciclo de desarrollo y se analizan estadísticamente los resultados para obtener curvas de probabilidad acumulada y expresiones matemáticas que permitan correlacionar el tiempo de ciclo con las dimensiones del túnel a desarrollar. Para terminar con las conclusiones y trabajo futuro.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer un método válido para normalizar el avance de los desarrollos horizontales subterráneos en función del tamaño que tiene la sección a desarrollar. Lo anterior, mediante el análisis estadístico de los resultados obtenidos a partir de la simulación de las actividades involucradas en la construcción de un desarrollo subterráneo minero para diversos escenarios de tamaños de sección.

2.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general descrito anteriormente, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar y ordenar información de la productividad en el avance de construcción de los desarrollos horizontales que ha tenido una mina real, para utilizar como caso base.
- Identificar cada actividad unitaria del ciclo de construcción de un desarrollo horizontal y cuantificar el comportamiento de los tiempos recopilados en terreno a una distribución de

probabilidades.

- Proponer un método de normalización para cada actividad unitaria del ciclo de construcción de un desarrollo horizontal en función de la información disponible en la literatura y datos recopilados en terreno.
- Desarrollar un modelo de simulación que entregue el tiempo de ciclo de construcción de un desarrollo horizontal para diferentes tamaños de sección,

utilizando el método de normalización propuesto.

- Validar los resultados del modelo de simulación con registros históricos del caso base de estudio y analizando estadísticamente la variación de los resultados simulados.
- Identificar actividades unitarias críticas para el ciclo de construcción de un desarrollo horizontal.

Analizar cuantitativamente e interpretar las diferencias obtenidas en los tiempos de ciclo o productividad en la construcción de un desarrollo horizontal para distintos tamaños de sección.

3. ANTECEDENTES

3.1 Métodos de explotación subterráneos

Los métodos de explotación subterráneos se definen como aquellos que implican la construcción de túneles hacia la tierra para obtener acceso a un cuerpo mineralizado que generalmente se ubica lejos de la superficie (Dictionary of Energy, 2014).

Existen diversos tipos de métodos de explotación subterráneos, los cuales pueden clasificarse en métodos autosoportados, métodos soportados y métodos de hundimiento. El método autosoportados más común es el *room & pillar*, y la característica de este tipo de métodos es que no requieren soporte artificial para mantener la estabilidad de los distintos desarrollos (calles, caserones, etc.) La tasa de producción de los métodos autosoportados se encuentra entre las 1.500 y 10.000 toneladas por día y sus costos de operación rondan entre los 7 y 20 USD/ton (Harraz, 2010b).

Los métodos soportados como el *cut & fill*, requieren algún elemento de soporte para rellenar y otorgar estabilidad a los

desarrollos (calles, caserones, etc.) Estos métodos poseen tasas de producción bajas entre las 500 y 1.500 toneladas por día y costos más elevados que pueden llegar a superar los 70 USD/ton, por lo que estos métodos solo son aplicables en circunstancias específicas y para proyectos de muy alta ley (Harraz, 2010b).

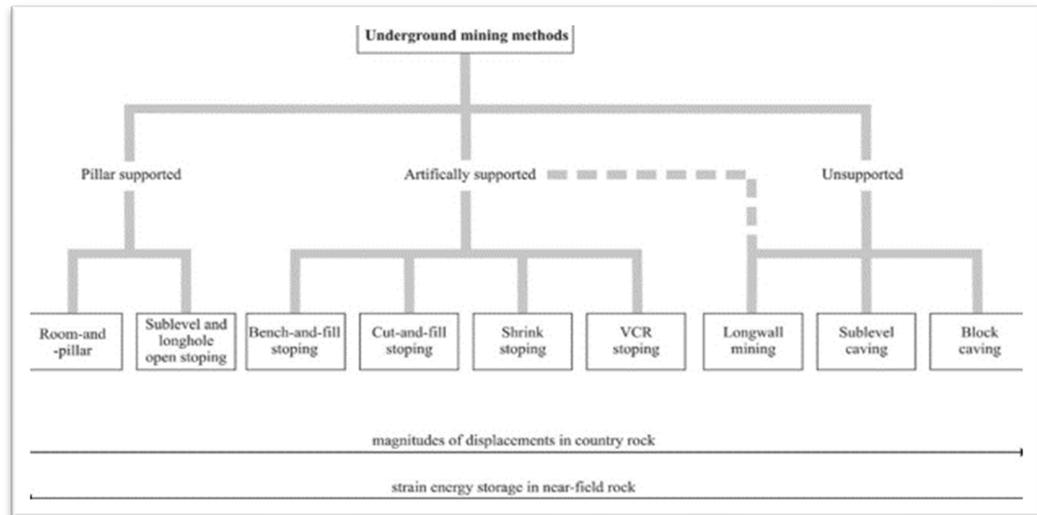


Figura 3-1: Clasificación métodos de explotación subterráneos (Brady & Brown, 1993) (Figura N)

Finalmente, los métodos de hundimiento como el *block caving* o *panel caving* tienen por característica que las cavidades generadas son rellenas por acción de la gravedad con el material superpuesto que yace encima (Oddie et al., 2014). Este tipo de métodos de explotación subterráneos son los más utilizados en la industria dado sus altas tasas de producción y bajo costo operacional. Sus tasas de producción pueden alcanzar las 100.000 toneladas por día y sus costos de operación pueden ser incluso menores a 2,5 USD/ton. Es por esto que los métodos de hundimiento con los únicos comparables con la minería a cielo abierto.

La infraestructura típica e imprescindible para permitir la producción de una mina subterránea explotada por métodos de hundimiento o *caving*, está conformada por cinco niveles:

- Nivel de hundimiento: Nivel desde donde se socava el mineral presente en la roca de caja del yacimiento.
- Nivel de producción: Nivel donde el mineral socavado será recolectado por el equipo de carga LHD para ser transportado hasta los piques de traspaso.
- Nivel de ventilación: Nivel desde donde se inyectará aire fresco al nivel de producción y se extraerá el aire viciado mediante desarrollos verticales denominados chimeneas.
- Nivel de transporte: Nivel el cual se conectará al nivel de producción mediante los piques de traspaso y cuyo objetivo es llevar de forma eficiente el mineral hacia la superficie.
- Nivel de chancado: Nivel ubicado por debajo o dentro del nivel de producción cuyo objetivo consiste en fragmentar la roca mineral depositada por el equipo LHD para facilitar su transporte hacia superficie.

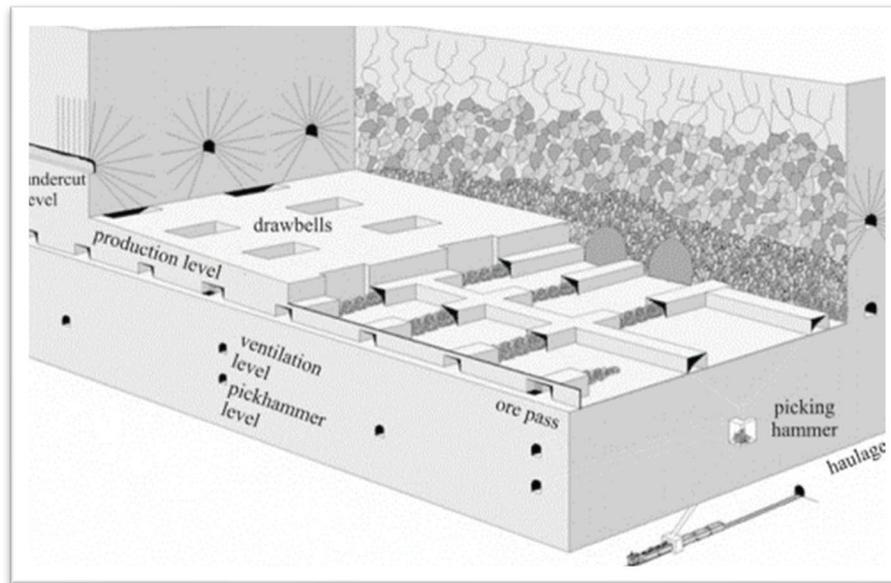


Figura 3-2: Infraestructura mina *caving* El Teniente, Chile. (Brady & Brown, 1993) (Figura N)

Cada uno de los cinco niveles descritos anteriormente está compuesto por una serie de túneles y galerías, por lo cual la construcción de túneles es y seguirá siendo uno de los principales desafíos y preocupaciones de los métodos de explotación por hundimiento (Olavarría et al., 2006).

3.2 Planificación minera

La planificación minera se define como el proceso de ingeniería

de minas que provee las orientaciones y requerimientos para transformar el recurso mineral en el mejor negocio productivo, tomando en cuenta el eficiente aprovechamiento de éstos a los mínimos costos de producción. Para esto, la planificación minera debe estar alineada a los objetivos estratégicos de la compañía, sean estos maximizar el valor presente

neto (VAN), maximizar el volumen total de reservas, maximizar el tiempo de explotación, minimizar el riesgo de inversión, etc., e integrando las restricciones impuestas por el contexto geomecánico, mercado y entorno medioambiental.

En general, la cobertura de la planificación minera comienza en la evaluación de los recursos mineros disponibles, por la necesidad de estimar de manera confiable él o los elementos con valor económico y otros parámetros metalúrgicos que influyen en el procesamiento del producto, hasta la programación y análisis de los resultados de las operaciones, para optimizar la eficiencia de éstas.

Los factores a considerar son varios y deben reflejar las características y condiciones específicas de cada yacimiento minero particular. Esto conlleva a un alto grado de variabilidad en cada planificación minera diseñada y por ello, recurrentemente se separar en niveles el proceso de planificación. Un nivel asociado a la planificación enfocada en las características de las decisiones tomadas (estratégicas, tácticas y operacionales), y otra en función del nivel de precisión de los datos y la escala espacial de los

periodos de duración del plan minero (corto, mediano y largo plazo) (Rodríguez, 2014).

3.3 Preparación mina

La preparación mina puede ser entendida como el conjunto de actividades de desarrollo de túneles y de construcciones, mecánica, eléctrica, instrumentación, ingeniería e infraestructura de montaje de diferentes niveles o sectores que se

utilizarán para incorporar un área que permita la continuidad de la explotación. Esta actividad se desarrolla de forma continua siguiendo una secuencia específica durante todo el ciclo de vida de la operación. Las demoras, ineficiencias o interferencias en la preparación mina producen impactos en el cumplimiento de las metas de producción (Díaz y Morales, 2008).

Durante los años 2000-2004, el gasto promedio en preparación minera fue de 115 MUSD, equivalente al 45% del gasto total de la operación minera (Díaz y Morales, 2008). Además, en ese periodo la preparación minera se caracterizó por tener un bajo cumplimiento promedio y una deficiente tasa de incorporación de área que llegó al 70% de lo proyectado. Las consecuencias de este incumplimiento son la pérdida de flexibilidad del plan minero asociado a producción que puede afectar seriamente los resultados esperados por la empresa (Díaz y Morales, 2008).

Las causas más relevantes que explican lo anterior son por un lado el aumento de la producción, que genera una mayor necesidad de preparación de minas, y por lo tanto, un aumento en la cantidad de contratos, personal, logística e infraestructura, lo

que disminuyó los tiempos de ciclo efectivo de trabajo. Por otro lado, las deficiencias en la planificación generan programaciones poco aterrizadas a los tiempos de ciclo efectivos reales permitiendo que se generen incumplimientos en los planes de ejecución y construcción (Díaz y Morales, 2008).

Establecer secuencias para cada una de las actividades de preparación minera permite entender los procesos de construcción de los diversos desarrollos y obras civiles para un sector productivo, y los tiempos totales de ciclo. De esta manera se pueden anticipar incumplimientos en los plazos proyectados, ajustar los programas y planes de ejecución y en general, reducir ineficiencias.

Los tiempos de cada una de las subactividades de las secuencias de construcción de desarrollos mineros subterráneos son generados actualmente en base a rendimientos promedio históricos de preparación minera. Estos datos deben ser representativos y de buena calidad para evitar planificar ineficiencias.

3.4 Construcción de desarrollos horizontales

La construcción de túneles y galerías son las actividades base de toda preparación mina. Este tipo de construcciones se denominan en minería desarrollos horizontales, ya que siguen una dirección de tendencia horizontal a diferencia de otros desarrollos como los

piques de vaciado que tienen orientación vertical. La necesidad de desarrollar túneles mineros de forma rápida y eficiente no ha sido una definición que lleve mucho tiempo (Nord, 2008). La perspectiva de los preparadores de mina que desarrollan túneles y galerías tienen como regla general que el costo final del desarrollo estará un 70% asociado al tiempo y solo un 30% asociado a costo de materiales, equipo y personal (Nord, 2008). Por esta razón desde la última década tomo interés el valor económico que significa para el negocio minero reducir el tiempo de los desarrollos horizontales.

El método de construcción de túneles más utilizado en la minería debido a su gran performance en rocas de alta y media dureza es la perforación y tronadura (D&B) (Satici, 2000). Este método consiste en un ciclo de actividades unitarias que pueden englobarse en:

- Perforación, actividades relacionadas a marcar el frente de explotación para que un equipo mecanizado jumbo perfora la roca y así, crear los pozos.
- Carguío, actividades asociadas a cargar los pozos con explosivos.
- Tronadura, actividades en la cual los explosivos son detonados y se produce la fragmentación de la roca, incluyendo la quema y ventilación post tronadura.
- Extracción de marina, actividades relacionadas a levantar el material fragmentado del frente de explotación y trasladarlo a un punto de vaciado mediante un equipo LHD.

- Fortificación, actividades asociadas a reforzar la estabilidad del túnel dependiendo de sus condiciones geomecánicas (Maidl et al., 2014).

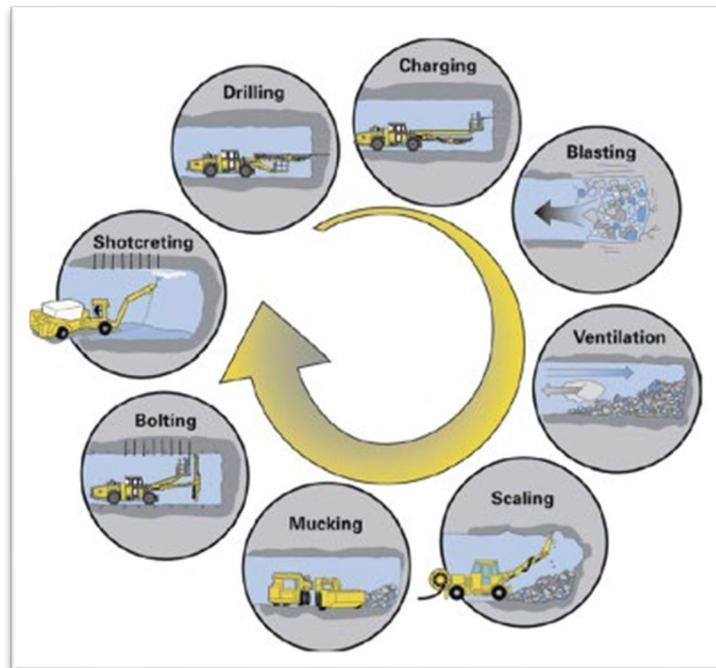


Figura 3-3: Ciclo de un disparo de avance de túneles mineros mediante D&B.

(Nord, 2008) (Figura N)

Las tasas de desarrollo del método perforación y tronadura van entre los 4 y 9 metros por día, y se estima que su límite teórico está en los 19 metros por día (Steward et al., 2006). Los nuevos proyectos tipo *caving* que entrarán en producción durante los próximos años, deberán contar con túneles a grandes profundidades lo que induce un aumento en la sismicidad aparente y en la ocurrencia de estallidos de roca (Kaiser y Cai, 2012). Lo anterior prevé condiciones de ventaja para el método

de perforación y tronadura, el cual será el método de construcción a considerar durante el desarrollo de la tesis.

Debido al interés actual por reducir los tiempos de desarrollo hay cuatro principales consideraciones al momento de definir el tiempo de ciclo estimado. Estas son:

- Las dimensiones de la sección del túnel o galería a desarrollar
- La distancia de avance que se quiere realizar
- El número de actividades por ciclo
- Elección de los equipos y materiales de construcción.

Como podemos ver en cada una de las actividades representadas en la Figura 3-3 se utilizan distintos equipos durante el ciclo de desarrollo. El comportamiento de los equipos que participan en las actividades de desarrollo minero debe considerar disponibilidades mecánicas altas entre un 90%-95%, y por lo general estos equipos tienen una baja utilización (Rodríguez, 2014).

Para cada uno de los frentes de desarrollo se realiza este ciclo de actividades de forma secuencial y repetitiva hasta lograr la longitud deseada. Por esta razón, definir la distancia de avance que se pretende obtener por cada uno de los tiros de desarrollo y

la dimensión de la sección del túnel o galería deseado es fundamental, dado que estos factores influyen en el número de ciclos diarios, lo cual generará una mayor o menor productividad final. Esto debe ser complementado con una ingeniería que defina de forma detallada la cantidad de perforaciones que se deben generar en el frente y el tipo de fortificación requerida según las características geomecánicas del

túnel o galería. Solamente la definición correcta de los factores anteriores permite determinar correctamente los materiales, equipos, cantidad de actividades y, por ende, los tiempos de ciclo.

3.5 Simulación como herramienta de optimización minera

Las actividades minerales como la preparación mina y operación, e incluso el precio del *commodity*, están definidos con un alto grado de incertidumbre (Singer & Kouda, 1999). En este sentido, la simulación ha sido una herramienta útil para optimizar la gestión de los riesgos asociados a la incertidumbre. Diferentes métodos de simulación han sido utilizados en el área de la minería. La simulación secuencial gaussiana es un método comúnmente utilizado en geoestadística para cuantificar los riesgos asociados con la estimación de la ley y tonelaje del mineral presente en cierto yacimiento (Paithankar y Chatterjee, 2017). La simulación de eventos discretos es utilizada para modelar sistemas a través de una secuencia de eventos bien definida. En minería subterránea, este método ha aportado en la comparación de diseño de diferentes mallas de extracción en

minas tipo *caving* (Ahmed et al., 2014).

La simulación puede lograr grandes avances reduciendo la incertidumbre en el área de los desarrollos horizontales mineros. Los cuales, al no ser gestionados correctamente impactarían negativamente de forma fuerte en el valor de un proyecto minero (Maybee et al., 2009). En la industria minera se conoce que uno de los principales cuellos de botella en la construcción de túneles en minas de tipo *caving*, es la baja tasa de avance de los desarrollos (Chitombo, 2010). Considerando lo

anterior junto a que los nuevos megaproyectos de *caving* son muy ambiciosos en cuanto a las metas productivas comprometidas, será clave que el avance de los desarrollos sea eficiente, porque se necesitará un gran número de kilómetros de túneles que serán para cumplir con dichas metas.

Investigaciones pasadas han concluido que los esfuerzos en la planificación de una operación minera deberían centrarse en la planificación de los desarrollos y no en la producción en sí, ya que la producción es el resultado del avance de los desarrollos (Rocher et al., 2011). Siguiendo estos lineamientos, otros autores han aplicado la simulación en el ciclo de construcción de un desarrollo. Ejemplos de esto son la investigación de Navarro que realiza un modelo tipo Montecarlo que permite simular el tiempo de construcción de las galerías y con estos resultados optimizar sus desarrollos (Navarro, 2012); y la investigación de Leiva que ajusta las actividades unitarias del ciclo de desarrollo a distribuciones probabilísticas para reproducir el comportamiento estocástico de cada una de éstas operaciones y así, obtener una función de densidad de probabilidad de la duración total del ciclo para definir la configuración de turnos

más óptima (Leiva, 2015).

A pesar de que estos trabajos han significado contribuciones a la planificación eficiente de los desarrollos horizontales en minas subterráneas, éstas se han realizado en operaciones de mediana a pequeña escala con condiciones dispares a un megaproyecto tipo *caving*. Además, éstos tampoco han considerado factores claves como actividades de soporte del techo en los túneles, la variación en las

dimensiones de cada túnel a desarrollar ni han propuesto cambios en la gestión de la planificación del avance de desarrollos para mejorar sus rendimientos. Es por ello, que en las siguientes secciones se presenta una propuesta aplicable a casos de estudio de la gran minería.

3.6 Investigación de métodos de normalización de tamaños de sección

El problema asociado a la poca eficiente planificación de los desarrollos horizontales no es nuevo. La empresa minera Freeport hace unos 10 años empezó a experimentar problemas en alcanzar los objetivos de avance que tenían planificados, lo cual repercutió negativamente en la productividad y bonos asignados a los trabajadores, generando que el sindicato se involucrará y amenazará con declararse en huelga. En consecuencia, la gerencia de la empresa investigó que había cambiado, descubriendo que la distribución del tamaño de los frentes de desarrollo era diferente. Antes del inicio de los problemas, había una distribución constante y consistente de los tamaños de los túneles a realizar, ya que todos estos desarrollos estaban asociados a los niveles de producción y hundimiento. Sin embargo, los nuevos desarrollos

planificados estaban asociados al nivel de transporte, donde las dimensiones de los túneles a desarrollar en este nivel suelen ser notablemente más grandes que los desarrollos realizados en otros niveles de la mina. Se reconoció que el progreso planificado de desarrollo fue estimado simplemente de forma lineal, lo cual no capta el esfuerzo adicional requerido para excavar, fortificar todos estos metros de frente adicionales. Esta normalización lineal errada estableció los objetivos de desarrollo, y

fue la dinámica responsable de que los equipos de desarrollo no alcancen los objetivos (Ramírez y Tarigan, 2013).

Para normalizar el avance de los desarrollos en función al tamaño del túnel algunas minas ubicadas en Australia y EE.UU utilizan el área/volumen como factor de normalización. Es común en los planificadores de minas considerar las toneladas extraídas como un método para igualar el esfuerzo de avance. Sin embargo, la investigación de Ramírez y Tarigan descubrió que existe una correlación más fuerte con el perímetro de la sección del túnel, en comparación con el área/volumen. Por ende, las minas que utilizaban el factor área/volumen para normalizar el avance están sobreestimando el esfuerzo asociado a desarrollar túneles más grandes (Ramírez y Tarigan, 2013).

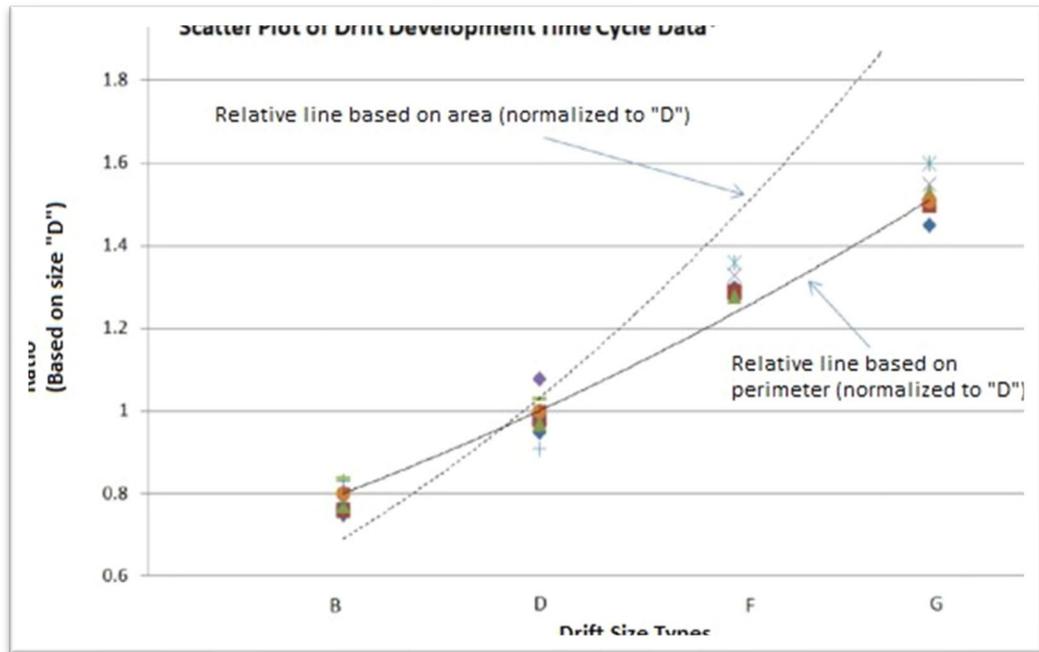


Figura 3-4: Gráfico de dispersión relación entre tiempo total de ciclo y tamaño sección. (Ramírez y Tarigan, 2013)
(Figura N)

La explicación de porqué normalizar en base al perímetro entrega mejores estimaciones con respecto al área se puede evidenciar en las actividades que componen el ciclo de desarrollo. La mayoría de las actividades de desarrollo siguen el perímetro de la sección del túnel a desarrollar en vez del área. Podemos ver esto en tres tipos de actividades:

- 1) Apoyo en tierra: Siguen literalmente el perímetro de la sección. A mayor perímetro que cubrir, se requerirán colocar más pernos y hormigón proyectado.
- 2) Perforación y carga de barrena: Los agujeros perforados siguen el contorno o perímetro del frente del túnel. Los agujeros perimetrales suelen constituir una gran parte del número de perforaciones requeridas.
- 3) Marina: Estas son las únicas actividades en el ciclo de

desarrollo que sigue puramente una relación basada en área/volumen. Dado que está relacionada a la cantidad de tierra/roca extraída.

El problema del método de normalización por perímetro es que las actividades relacionadas a marina corresponden típicamente al 10%-20% del ciclo de desarrollo total algo que los investigadores impulsores de este método catalogan como un

porcentaje bajo o marginal, pero que en realidad no es menor y puede afectar los objetivos de avance planificados. Además, ambos métodos (área/volumen y perímetro sección) se calculan en base al tiempo de ciclo total y no se aplican de forma diferenciada en cada actividad unitaria de desarrollo. La propuesta de normalización que se describe a continuación representa una contribución significativa para la evaluación del impacto que tiene el tamaño de la sección que se desea desarrollar en la etapa de planificación de la construcción de desarrollos horizontales mineros. Además, entrega herramientas visuales y expresiones matemáticas útiles para implementar de forma práctica en la operación. Investigaciones anteriores solo normalizaban de forma lineal y no habían implementado la simulación como herramienta de optimización minera para estudiar y cuantificar la relación entre los tiempos de construcción de los túneles de una mina subterránea y el cambio de dimensión de la sección a desarrollar, ni tampoco habían propuesto factores de normalización de área/perímetro específico para cada actividad unitaria del ciclo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Simulación Montecarlo

Dada la alta incertidumbre que se tiene en las actividades de preparación mina y su dependencia directa a la variabilidad de cada una de las operaciones unitarias que componen el ciclo de desarrollo, la metodología de simulación debe tener la capacidad para abordar esta incertidumbre. La simulación Montecarlo es un tipo de simulación que se basa en muestreos aleatorios repetidos y análisis estadísticos para calcular resultados. Suele utilizarse para simular experimentos donde no se conoce de antemano el resultado específico a obtener (Raychaudhuri, 2008).

El procedimiento general que sigue la simulación Montecarlo consiste en:

- 1) Identificar una distribución estadística que pueda representar el comportamiento de cada uno de los parámetros de entrada
- 2) Obtener para cada parámetro de entrada, un parámetro de salida que represente un escenario de resultado particular en la ejecución de la simulación.

- 3) Recopilar los valores de salida de cada una de las ejecuciones de la simulación y analizarlos estadísticamente para tomar decisiones sobre el curso de acción (obtener resultados globales).

Siguiendo el procedimiento anterior, la metodología específica que se describirá a continuación se resume en cinco pasos principales:

- 1) Definir qué actividades unitarias del ciclo de desarrollo se analizarán y cómo se representarán sus comportamientos reales de forma estadística
- 2) Definir el método de normalización de avance (área/volumen o perímetro sección) que se asignará para cada actividad unitaria a analizar.
- 3) Definir los escenarios de experimentación que se simular en base a tamaños de desarrollos horizontales mineros reales.
- 4) Programar y ejecutar cada escenario de experimentación 1000 veces para recopilar una cantidad representativa de datos.
- 5) Analizar los resultados de cada escenario de experimentación en función del tiempo de ciclo total proyectado y la diferencia entre los tamaños de cada desarrollo.

4.2 Descripción del modelo

El objetivo por modelar consiste en un ciclo clásico de construcción de túneles usando el método de perforación y tronadura. Este ciclo está compuesto de varias etapas, las cuales se pueden agrupar principalmente en: Perforación disparos, carguío

explosivos y tronadura, ventilación, extracción de marina, acuñadora del frente y fortificación.

La perforación de disparos corresponde a las actividades donde se utiliza un jumbo de dos brazos como recurso para perforar el frente de acuerdo con el diagrama de tiros previamente diseñado. Para el caso de estudio cada disparo tendrá una longitud de 3,2 metros.

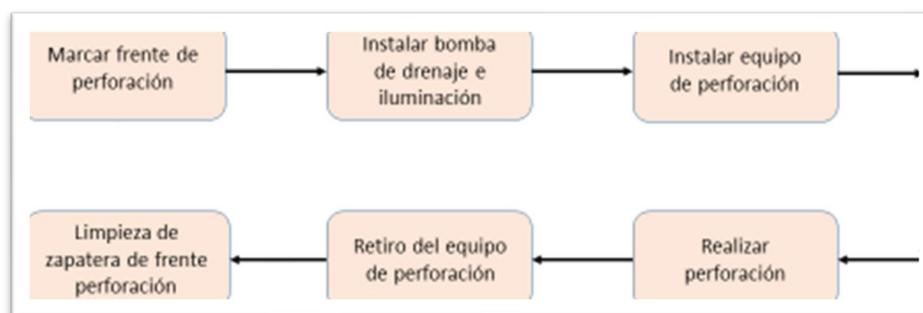


Figura 4-1: Diagrama de flujo actividades perforación de tiros. (Elaboración propia) (Figura N)

El carguío de explosivos y tronadura abarca las actividades en la cual la grúa de levante carga con explosivos cada uno de los tiros perforados previamente. El tipo de explosivo a utilizar en cada

disparo está definido en base a un diagrama de diseño. Luego estos explosivos se conectan y el jefe de turno es el encargado de solicitar la autorización para realizar la tronadura del frente.

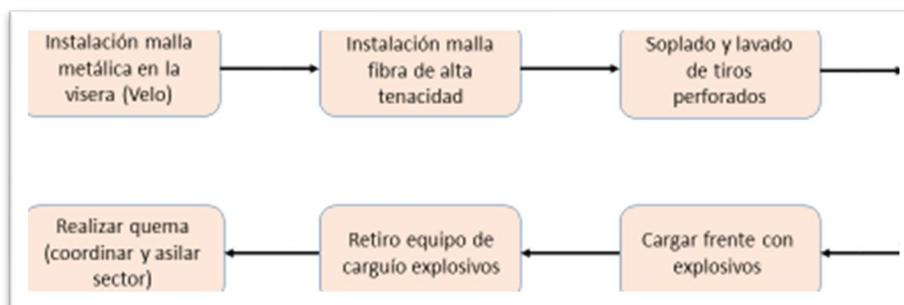


Figura 4-2: Diagrama de flujo actividades carguío de explosivos. (Elaboración propia) (Figura N)

La ventilación corresponde a la actividad asociada a la extracción del aire viciado de la mina subterránea e inyección de aire puro. Esta actividad es fundamental para la seguridad y salud de los trabajadores, incluso está regulada por ley. Por otro lado, la extracción de marina corresponde a las actividades necesarias para remover la marina o estéril generado por la excavación de túneles de las galerías de desarrollo, para esto se utilizan puntos de traspaso al igual que para extraer el mineral.



Figura 4-3: Diagrama de flujo actividades

ventilación y retiro marina.

(Elaboración propia) *(Figura N)*

La acuñadura corresponde a actividades que buscan remover las rocas sueltas que quedan en el techo y paredes de la frente. A diferencia de las otras actividades, la acuñadura será necesaria siempre que se encuentren rocas sueltas, por lo tanto, es una actividad siempre presente a lo largo del ciclo de desarrollo. En el modelo creado se considerarán actividades de acuñadura posterior a la tronadura y retiro de la marina, justo antes de las actividades de perforación final.

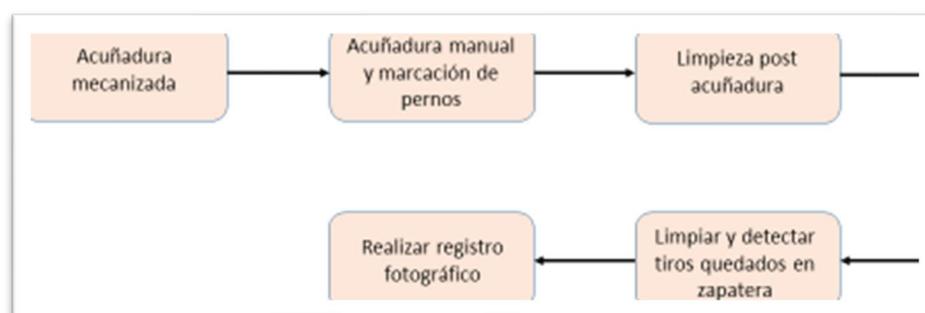


Figura 4-4: Diagrama de flujo actividades acuñadura (Elaboración propia)

(Figura N)

La fortificación abarca a todas las actividades requeridas para otorgar soporte y estabilidad a los túneles desarrollados y así,

minimizar el riesgo de accidentes por desprendimientos de roca tanto al personal como a los equipos involucrados. Los recursos utilizados para la ejecución de estas actividades con una grúa, jumbo, LHD y mixer. La fortificación de la frente comienza con las marcas de las perforaciones, para dar paso al arribo del jumbo que realiza las perforaciones que permiten la

instalación de los pernos helicoidales y pernos Split-set. La grúa entra a la frente para la lechada de los pernos, con una mezcla de agua, cemento y aditivos. Una vez los pernos han fraguado, entra la grúa con jaula para el acondicionamiento e instalación de la malla de fortificación. El último paso de la fortificación corresponde a la proyección de *shotcrete* mediante el equipo *roboshot*. La suma de todas estas actividades constituye el mayor tiempo de ciclo de desarrollos mineros.

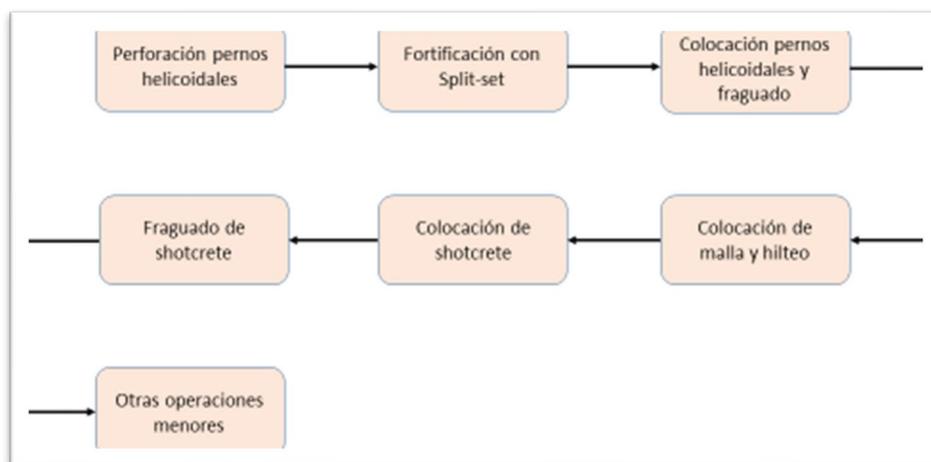


Figura 4-5: Diagrama de flujo actividades soporte y fortificación. (Elaboración

propia) (Figura N)

El modelo de simulación será construido considerando estas 27 actividades unitarias de forma secuencial. Las cuales corresponden a un ciclo típico de desarrollo de túneles usando el método de perforación y tronadura.

4.3 Comportamiento estadístico de las actividades

Para asignar un comportamiento estadístico representativo de cada una de las actividades unitarias de desarrollo se midió el tiempo de cada actividad durante alrededor de 8 turnos en un sector de una operación minera subterránea nacional (El Teniente). Dada la dificultad de recopilar estos datos en terreno algunas actividades tuvieron menor cantidad de datos de tiempo recopilados. En general se consideró que una muestra con menos de 2 mediciones no sería suficiente para representar su comportamiento de forma estadística correctamente. De las 27 actividades, solo 4 de ellas tuvieron muestras con 2 o menos mediciones, por lo tanto, estas actividades serán modeladas con su tiempo promedio de forma constante.

En base a los datos recopilados en terreno se determinó una distribución estadística representativa para cada actividad unitaria de desarrollo. Para esto se utilizó la herramienta *Input Analyzer* del *software Arena*, que agrupa los datos en intervalos generando histogramas que se ajustan a diferentes distribuciones estadísticas. El software ajusta los histogramas con las distribuciones que entregan el menor error cuadrático y utiliza pruebas de bondad de

ajuste tales como Chi-cuadrado y Kolmogorov. Las actividades unitarias de desarrollo, su distribución estadística ajustada y el error cuadrático respectivo se presentan en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Comportamiento estadístico asociado al tiempo de cada actividad unitaria. (TablaN)

Actividad	Expresión probabilidad ajustada	Error cuadrático
Marcar frente	$14.5 + 53 * \text{BETA}(0.118, 0.364)$	0.131
Instalar bomba drenaje	$4.5 + 21 * \text{BETA}(0.187, 0.275)$	0.131
Instalar equipo perforación	$4.5 + 16 * \text{BETA}(0.597, 0.579)$	0.132
Realizar perforación	UNIFORME(130, 232)	0.144
Retirar equipo perforación	$4.5 + 16 + \text{BETA}(0.506, 0.679)$	0.147
Limpieza zapatera frente	$9.5 + 31 * \text{BETA}(0.219, 0.46)$	0.144
Instalación malla metálica	$15 + \text{WEIBULL}(9.6, 0.263)$	0.112
Cargar frente	$63 + \text{GAMMA}(84.9, 0.43)$	0.118
Retiro equipo carguío	$4.5 + 17 * \text{BETA}(0.725, 0.782)$	0.196
Realizar quema	$9.5 + 36 * \text{BETA}(0.215, 0.344)$	0.144
Ventilación	$29.5 + 31 * \text{BETA}(0.401, 0.401)$	0.138
Riego marina	$9.5 + 21 * \text{BETA}(0.276, 0.396)$	0.162
Retiro marina	TRIANGULAR(160, 173, 295)	0.013
Acuñadura mecanizada	$9.5 + 36 * \text{BETA}(0.134, 0.0981)$	0.125

Como se puede apreciar en la tabla anterior, 19 de las 23 actividades se ajustaron a una distribución estadística con un error cuadrático menor al 15%. Esto indica que la distribución de probabilidad determinada es representativa del comportamiento que tiene el tiempo en cada una de estas actividades. Sin embargo, aquellas 4 actividades que se ajustaron a una distribución con un error cuadrático superior al 15% se modelarán utilizando su valor promedio de forma constante.

4.4 Cálculo de factores de normalización

Los factores de normalización tienen por objetivo comparar rendimientos entre diferentes tamaños de desarrollos para así obtener una aproximación del tiempo e incluso de los recursos e insumos requeridos. Como estos factores dependen directamente de las dimensiones de los túneles, es importante conocer la geometría básica que estos desarrollos horizontales poseen. Los parámetros que definen el tamaño de un túnel de desarrollo se muestran en la figura 10.

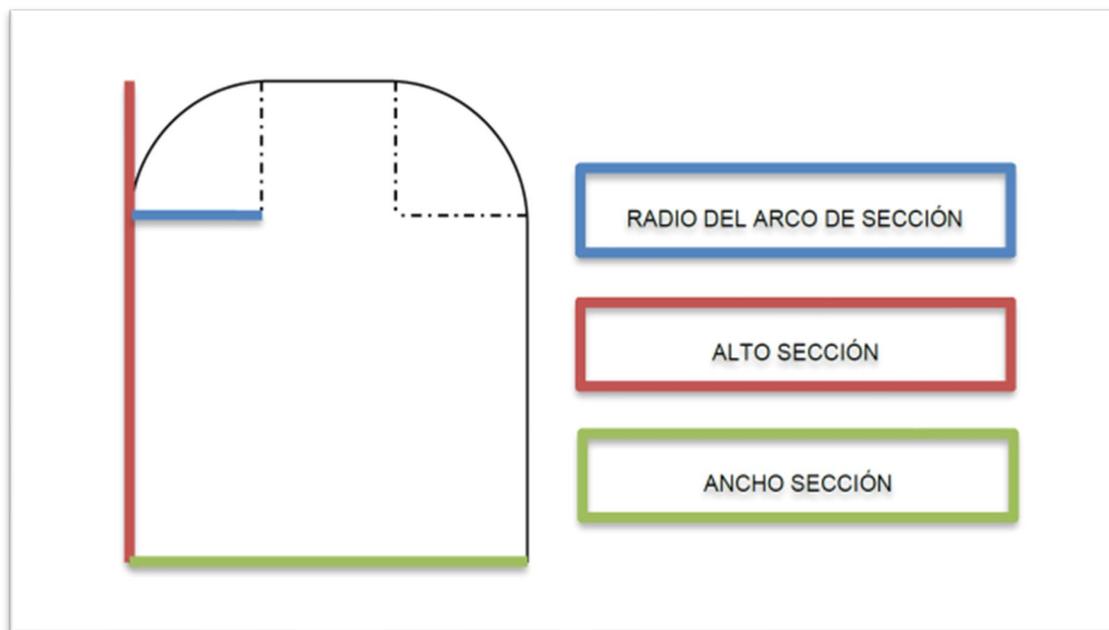


Figura 4-6: Parámetros que definen la geometría de un túnel (CODELCO, 2022)

(Figura N)

El procedimiento para calcular los factores de normalización que se aplicarán en la modelación del ciclo de construcción de un desarrollo horizontal subterráneo posee distinta fórmula en función si se considera un factor de normalización por área/volumen o uno por perímetro de la sección. Para las actividades relacionadas a retiro de marina, se aplicará el factor de normalización por área/volumen, el cual sigue la siguiente fórmula (Codelco, 2022):

$$M_{eqa} = \frac{\text{Área Sección por desarrollar}}{\text{Área Sección base}} \quad (1.1)$$

Lo cual es equivalente a decir que:

$$M_{eqa} = \frac{\text{Alto}_{secDes} * \text{Ancho}_{secDes} - (\text{Radio arco}_{secDes})^2 * (2 - \frac{\pi}{2})}{\text{Alto}_{secBase} * \text{Ancho}_{secBase} - (\text{Radio arco}_{secBase})^2 * (2 - \frac{\pi}{2})} \quad (1.2)$$

De forma equivalente, para todas las actividades unitarias del ciclo de construcción restante se utilizará el factor de normalización con respecto al perímetro de la sección. Éste es calculado mediante la siguiente fórmula (Codelco, 2022):

$$M_{eqp} = \frac{\textit{Perímetro Sección por desarrollar}}{\textit{Perímetro Sección base}} \quad (1.3)$$

Lo cual es equivalente a decir que:

$$M_{eq\alpha} = \frac{2 * Alto_{secDes} + 2 * Ancho_{secDes} - 4 * Radio arco_{secDes} + \pi * Radio arco_{secDes}}{2 * Alto_{secBase} + 2 * Ancho_{secBase} - 4 * Radio arco_{secBase} + \pi * Radio arco_{secBase}} \quad (1.4)$$

Cabe mencionar que para estos cálculos se utilizó como “sección base” una sección de 7.0 x 6.6 metros cuadrados, debido a que las mediciones en terreno de los tiempos para cada actividad unitaria del ciclo de desarrollo fueron adquiridas en un túnel de estas dimensiones.

4.5 Escenarios de experimentación

Los escenarios de experimentación a simular corresponden a 6 tamaños de túneles diferentes. Las dimensiones escogidas están extraídas de desarrollos reales en distintos niveles de la mina subterránea y buscan abarcar desde dimensiones de desarrollo pequeñas utilizadas comúnmente en los niveles de producción a desarrollos de dimensiones mayores usualmente realizadas en los niveles de transporte. Los escenarios específicos por utilizar son los siguientes:

- Sección Esmeralda NP (Nivel Producción) – 3.9 x 4.2 m²
- Sección Típica NP (Nivel Producción) – 4.5 x 4.5 m²
- Sección Dacita NP (Nivel Producción) – 5.1 X 4.3 m²
- Sección XC-ACC NH (Nivel Hundimiento) – 5.2 x 5.1 m²
- Sección Cruzado NTI (Nivel Transporte Intermedio) – 6.2 x 6.1 m²
- Sección Base NT (Nivel Transporte) – 7.0 x 6.6 m²

Una vez definidos los escenarios de estudio se calculó mediante una ponderación simple, el radio de cada uno de ellos para posteriormente poder calcular los factores de normalización. Para esto se utilizó la Sección Esmeralda como referencia ya que esta sección procedente de El Teniente posee un radio de 2.1 metros, junto a la siguiente fórmula:

$$Radio\ arco_{secDes} = \frac{(Alto_{secDes} + Ancho_{secDes}) * Radio_{secBase}}{(Alto_{secBase} + Ancho_{secBase})} \quad (1.5)$$

Como resultado a todo lo anterior, tenemos definidos los escenarios de experimentación en los cuales se simulará el ciclo de desarrollo completo realizando 1000 replicaciones para cada caso. El detalle de los escenarios se visualiza en la Tabla 2.

Tabla 4-2: Radio y factores de normalización para cada escenario.

(TablaN)

Escenario	Dimensiones	Radio	Factor Perímetro	Factor Área/Volumen
Esmeralda NP	4.2 x 3.9 m ²	2.1 m	0.60	0.35
Típico NP	4.5 x 4.5 m ²	2.3 m	0.66	0.44
Dacita NP	5.1 x 4.3 m ²	2.4 m	0.69	0.48
XC-ACC NH	5.2 x 5.1 m ²	2.7 m	0.76	0.57
CRUZADO NTI	6.2 x 6.1 m ²	3.2 m	0.90	0.82
BASE NT (sección base)	7.0 x 6.6 m ²	3.5 m	1.0	1.0

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Actividades críticas

En base a los datos obtenidos en terreno y las simulaciones realizadas para cada escenario se logró identificar aquellas actividades unitarias que tienen un mayor porcentaje de participación en el tiempo de ciclo total de construcción. Estas actividades son la realización de la perforación de los tiros, la perforación y colocación de pernos helicoidales para el soporte y la colocación de la malla de hilteo para la fortificación del frente. En la Tabla 5-1 se pueden apreciar los porcentajes de participación de cada una de ellas con respecto al tiempo de ciclo total.

Tabla 5-1: Actividades críticas del ciclo de construcción. (TablaN)

Actividad unitaria	Porcentaje participación (%)						
	Base NT	Cruzado NTI	XC-AC C NH	Daci ta NP	Típico NP	Esmeralda NP	Promedio
Realizar perforación	9,23%	8,74%	8,41%	8,23%	8,17%	8,07%	8,48%
Perforación pernos	16,84%	15,96%	15,34%	15,05%	14,83%	14,64%	15,44%
Colocación pernos	12,92%	12,33%	11,78%	11,51%	11,48%	11,36%	11,90%
Colocación malla	11,28%	10,86%	10,55%	10,34%	10,27%	10,17%	10,58%

A partir de los resultados anteriores, se puede inferir que estas cuatro actividades representan el 46,4% del tiempo de ciclo total de desarrollo de un túnel. Es por eso que estas actividades se definen como actividades críticas y debiesen tener mayor supervisión para su correcta ejecución, ya que retrasos en estas actividades en particular pueden afectar significativamente el cumplimiento de los metros de avance esperados.

Del mismo modo, se destaca que las tres actividades más representativas o críticas del ciclo de construcción de un desarrollo subterráneo minero están asociadas a actividades de soporte y fortificación. Dicho esto, es importante aumentar la preocupación, monitoreo y recursos asociados a esta etapa del ciclo de construcción, para así, permitir optimizar los tiempos de desarrollo.

Finalmente es importante mencionar que estas actividades críticas toman mayor protagonismo o relevancia a medida que la sección o túnel a desarrollar es más grande. Tal como se puede visualizar en la Tabla 3, las cuatro actividades críticas tienen un mayor

porcentaje de participación en el escenario de estudio Base NT, el cual representa una sección de 7,0 x 6,6 metros cuadrados. Mientras que en el escenario Esmeralda NP, que corresponde a una sección de 4,2 x 3,9 metros cuadrados, tienen un menor porcentaje de participación.

5.2 Tiempos de ciclo

Una vez ejecutadas las simulaciones de 1000 replicaciones para cada escenario de experimentación, se obtuvo el tiempo promedio que tomaría realizar un tiro de avance, correspondiente a aproximadamente 4 metros. Los resultados obtenidos demuestran que existe una importante diferencia en el tiempo que tomaría desarrollar un tiro de avance para un túnel con una sección pequeña con respecto a realizar el mismo tiro de avance en un túnel de mayores dimensiones. Los resultados en específico fueron los siguientes:

Tabla 5-2: Tiempo de ciclo promedio esperado para cada escenario. (TablaN)

Escenario	Dimensiones	Tiempo ciclo promedio (min)	Tiempo ciclo promedio (hrs)
Esmeralda NP	4.2 x 3.9 m ²	1346 minutos	22,4 horas
Típico NP	4.5 x 4.5 m ²	1462 minutos	23,4 horas
Dacita NP	5.1 x 4.3 m ²	1518 minutos	25,3 horas
XC-ACC NH	5.2 x 5.1 m ²	1637 minutos	27,3 horas
CRUZADO NTI	6.2 x 6.1 m ²	1866 minutos	31,1 horas
BASE NT (sección base)	7.0 x 6.6 m ²	1963 minutos	32,3 horas

En función a los resultados anteriores se evidencia que puede existir una diferencia de aprox 10 horas de desarrollo más por cada tiro de avance (4 metros) entre un túnel realizado en el nivel de producción como *Esmeralda NP*, a un túnel realizado en el nivel de transporte como *Base NT*. En base a las simulaciones realizadas, entre los dos casos mencionados anteriormente hubo un 30,6% de diferencia en los tiempos de ciclo esperados.

Lo anterior toma aún más importancia si estos resultados se extrapolan al desarrollo completo de un túnel de por ejemplo 1 kilómetro de extensión. En caso de desear desarrollar un túnel de las dimensiones de *Esmeralda NP*, en base a las simulaciones se proyectaría terminar en aproximadamente 5600 horas, equivalente a 700 turnos de 8 horas. En cambio, desarrollar un túnel de las dimensiones de *Base NT* según las simulaciones tardaría alrededor de 8075 horas, equivalente a 1010 turnos de 8 horas. Es por la magnitud de esta diferencia que es necesario un método para normalizar el avance en la construcción de desarrollos horizontales mineros en función del tamaño de la sección que se desea desarrollar. No es viable seguir planificando los avances en los desarrollos de forma lineal, ya que esta

metodología no capta el esfuerzo adicional requerido para excavar y fortificar todos los metros de frente adicionales que posee un túnel de mayor tamaño.

Como resultado principal de este trabajo se obtuvo la probabilidad acumulada de las 1000 replicaciones simuladas de cada escenario de estudio. Este comportamiento estadístico de cada escenario simulado fue traducido a un gráfico que puede servir

como herramienta para que los planificadores mineros puedan estimar de con mayor certeza el tiempo de ciclo en la construcción de túneles normalizando el avance de desarrollo esperado en función de las dimensiones de éste.

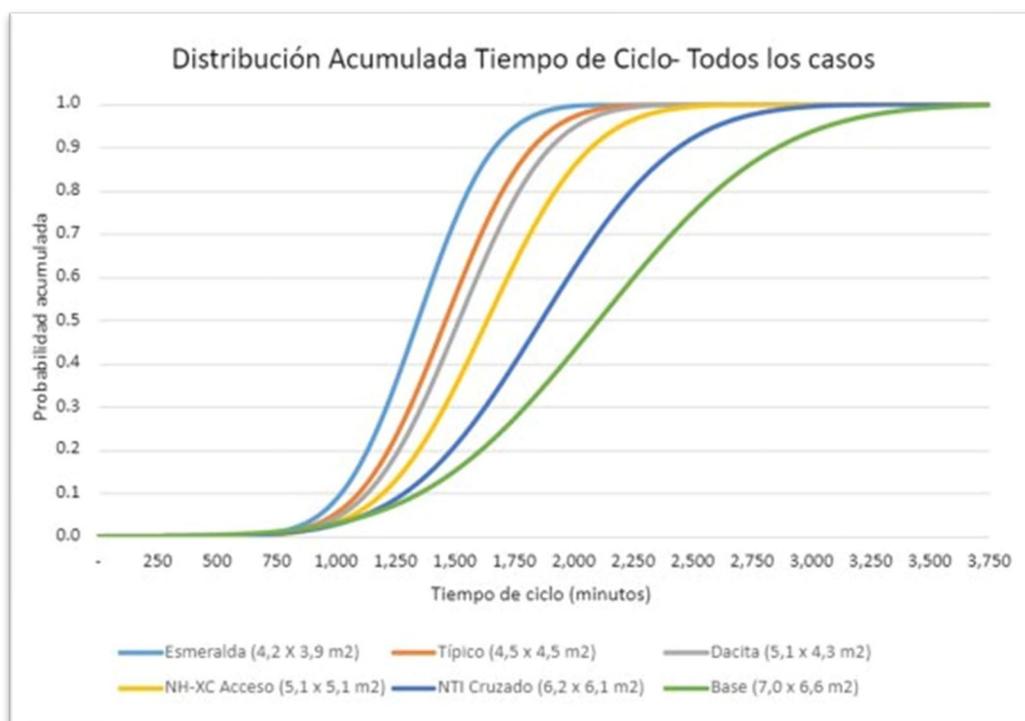


Figura 5-1: Distribución acumulada de los tiempos de ciclo de avance para cada escenario. (Elaboración propia)

(Figura N)

El gráfico anterior entrega la probabilidad que existe para lograr cierto tiempo de ciclo en función de las dimensiones del desarrollo deseado. Por ejemplo, en base al gráfico existe un 70% de probabilidad de que el tiempo de ciclo para realizar un tiro de avance para un túnel de las dimensiones de Esmeralda NP sea de aproximadamente 1450 minutos, mientras que para un túnel de las dimensiones de Base NT existe un 70% que el tiempo de ciclo tome alrededor de 2450 minutos.

A partir de lo anterior, se puede inferir nuevamente la magnitud de la diferencia que existe en el tiempo de ciclo en función de las dimensiones de cada escenario estudiado. Se puede apreciar que si, por ejemplo, un planificador requiere que el tiempo de ciclo de avance no supere los 1500 minutos, existe un 80% de probabilidad que lo logre si el túnel posee dimensiones similares al escenario Esmeralda NP, pero en caso de que el túnel tenga dimensiones similares al caso Base NT es altamente probable que el planificador no logre cumplir con la meta esperada, ya que solo existe un 15% de probabilidad de que suceda.

Cabe destacar que este gráfico puede optimizarse al realizar más cantidad de replicaciones en las simulaciones y añadiendo más escenarios de estudio con otras dimensiones. Sin embargo, de todas formas, este resultado permite ser una herramienta útil para que el planificador pueda verificar si sus metas de avance son viables de ser ejecutadas eficientemente o incluso, podría definir las metas de avance iniciales a partir de esta metodología.

5.3 Radio hidráulico

El radio hidráulico se define como la razón entre el área y perímetro de la sección a desarrollar. En base a esta relación geométrica obtenida a partir de las dimensiones del túnel y las simulaciones realizadas se obtuvo una expresión matemática que

permite relacionar el tamaño del túnel a desarrollar y el tiempo de ciclo que tomaría realizar un tiro de avance en él.

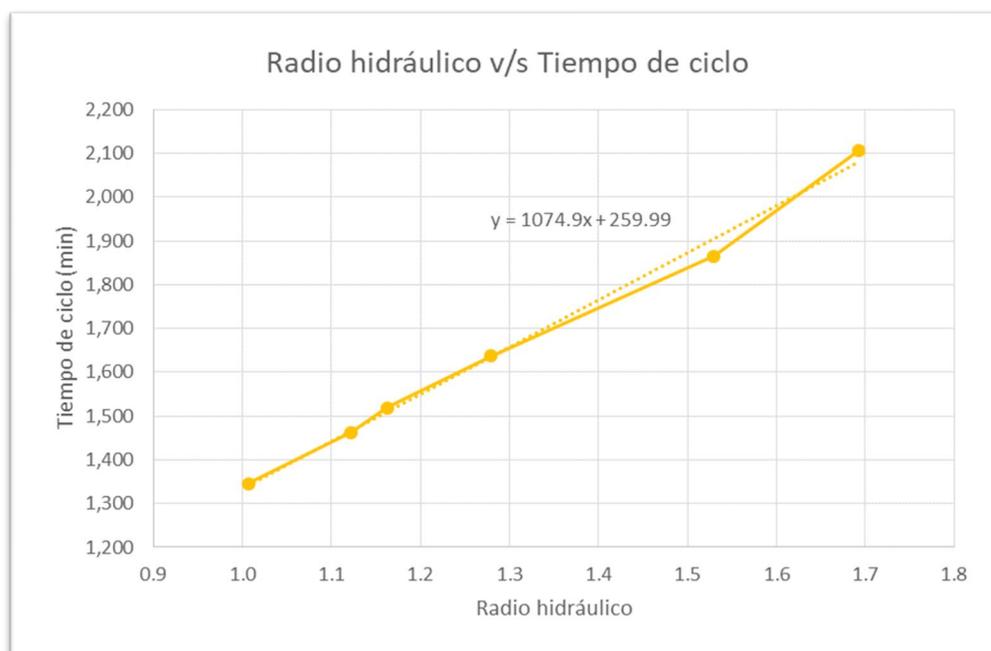


Figura 5-2: Relación entre radio hidráulico y tiempo de ciclo de avance. (Elaboración propia)

(Figura N)

El resultado anterior muestra la ecuación de la recta con la cual se puede calcular el tiempo de ciclo esperado a partir del radio hidráulico del túnel que se desea desarrollar. Por ejemplo, si un planificador desea realizar un desarrollo horizontal con

dimensiones de 4,8 x 5,2 metros, el cual tiene un radio hidráulico de 1.27, usando la expresión obtendría que el tiempo de ciclo esperado para cada tiro de avance sería de 1625 minutos aproximadamente.

Del mismo modo que lo descrito anteriormente, pero despejando el valor “x”, este resultado permite obtener la dimensión del túnel a desarrollar a partir de un tiempo de ciclo de avance. Por ejemplo, si un planificador requiere tener un ritmo de avance de 1750 minutos por tiro, usando esta expresión podría determinar que para lograr eso tendría que desarrollar un túnel de dimensiones que entreguen un radio hidráulico (relación área versus perímetro) igual o menor a 1,38.

Analizando la ecuación de la recta obtenida a partir de la simulación de los escenarios de estudio se puede mencionar que la pendiente de la recta obtenida fue de 1074.9, es decir una pendiente positiva que es coherente al hecho que a mayor radio hidráulico (dimensiones más grandes) mayor debiese ser el tiempo de ciclo de avance. Esta pendiente en conjunto con el valor independiente que corta el eje de

259.99 indica que el tiempo de ciclo prácticamente nunca sería menor a 1200 minutos, ya que para que eso ocurra el túnel a desarrollar debiese tener una dimensión menor a 3.5 x 3.5 metros, dimensión poco utilizada en minería debido a su reducido tamaño.

Es importante destacar que esta expresión matemática encontrada puede mejorar su precisión al añadir más escenarios de estudio a las simulaciones realizadas. Lo anterior debido a que esta expresión solo considera túneles con dimensiones iguales o mayores a Esmeralda NP (4.2 x 3.9 metros) y dimensiones iguales o menores a Base NT (7.0 x 6.6 metros). Si se deseara estimar el tiempo de ciclo de un túnel con dimensiones fuera de este rango, la expresión podría presentar algún porcentaje de

error menor. Es por esto que sería relevante añadir más datos para complementar y/o continuar los resultados obtenidos en esta investigación.

5.4 Validación según variabilidad

A modo de validar los resultados expuestos anteriormente y la precisión de las simulaciones ejecutadas, se realizó un análisis de la variabilidad o dispersión de los tiempos de cada actividad unitaria simulada. Para esto se calculó el coeficiente de variación, definido como la relación entre la desviación estándar y la media aritmética de los datos (Gutiérrez, 2012). Cabe recordar que la desviación estándar es una medida que se utiliza para cuantificar la dispersión de un conjunto de datos numéricos, indicando una baja desviación estándar cuando la mayor parte de los datos de la muestra tienden a estar agrupados cerca de su media, y una alta desviación estándar cuando los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio (Bland & Altman; 1996; Dodge & Yadolah, 2010).

De las 19 actividades unitarias del ciclo de construcción de un

desarrollo horizontal minero, solamente una de las actividades tuvo un coeficiente de variación alto, es decir, mayor a 100% de variación. De las 18 actividades simuladas restantes, 13 de ellas tuvieron un coeficiente de variación moderado (entre 30% y 100%) y 5 de ellas un coeficiente de variación bajo (menor a 30%).

La actividad unitaria que presentó alta dispersión de su tiempo de ciclo simulado entre las 1000 replicaciones para cada escenario de estudio fue la actividad de

“Instalación Malla Metálica”. Esta actividad entregó un coeficiente de variación del 273%, sin embargo, al analizar en detalle los datos asociados a esta actividad se puede afirmar que esta dispersión de datos fue causada por una proporción menor de datos que se escaparon mucho de la media (*outliers*). Tal como se evidencia en el histograma de la Figura 5-3 más del 85% de los tiempos simulados para esta actividad eran iguales o menores a 120 minutos, lo cual es un valor normal considerando la que media de tiempo de esta actividad es aproximadamente 94 minutos según los tiempos obtenidos en terreno en la mina El Teniente.

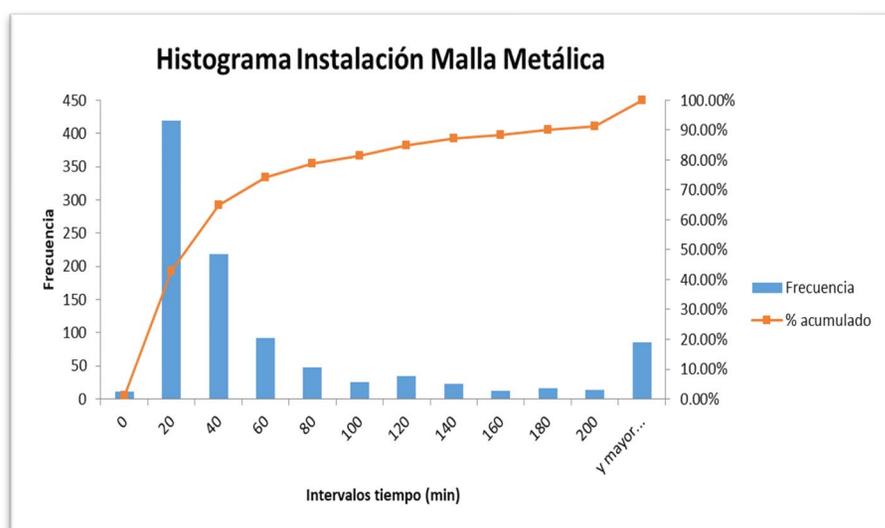


Figura 5-3: Histograma del tiempo que demora la actividad

instalación malla metálica. (Elaboración propia)

(Figura N)

Es importante resaltar también que esta actividad representa solo el 5,13% del tiempo de ciclo total que toma realizar un tiro de avance en la construcción de un túnel. Por lo tanto, puede catalogarse como una variación marginal que puede

corregirse al incorporar más datos de tiempo asociados a esta actividad en la base de datos con la cual se construyó el modelo de simulación.

Finalmente, otro aspecto relevante obtenido de este análisis de la variabilidad de los datos simulados es que las cinco actividades que representan el 45% del tiempo de ciclo de avance total tuvieron coeficientes de variación dentro del rango normal. Es decir, las actividades unitarias más significativas para el estudio obtuvieron resultados con una dispersión baja o media.

Tabla 5-2: Coeficiente de variación actividades con mayor participación. (TablaN)

Actividad unitaria	Coeficiente variación (%)	Porcentaje participación (%)
Realizar perforación	11 %	8,5 %
Retiro marina	14 %	7,6 %
Colocación malla	21 %	10,6 %
Colocación pernos	32 %	11,9 %
Perforación pernos	62%	15,4 %

6. CONCLUSIONES

Esta investigación describe una nueva metodología para normalizar el avance de los desarrollos horizontales mineros, para así, mejorar la eficacia en la planificación de este tipo de trabajos. La metodología propuesta considera la incertidumbre en los tiempos de ejecución de cada una de las actividades unitarias del ciclo de construcción y permite evaluar la diferencia existente para distintas dimensiones de desarrollo. Esta metodología está basada en un análisis estadístico y el uso de herramientas de simulación de datos reales obtenidos por parte de la Gerencia Obras Minas de la División El Teniente, Codelco. Esta operación minera corresponde a la mina subterránea más grande a nivel mundial y busca mantener su producción de 137.000 toneladas de cobre por día a través de la explotación cada vez más profunda del yacimiento mineral. Para lograr lo anterior, es fundamental la planificación y construcción eficiente de nuevos desarrollos horizontales que permitan dar continuidad a la producción actual o incluso mejorarla.

Los escenarios de estudio utilizados corresponden a dimensiones de galerías reales utilizadas en la operación El Teniente y otras dimensiones intermedias estándar de la industria. Los resultados de

cada escenario simulado, para cada una de las actividades unitarias que componen el ciclo de construcción son comparados con datos reales medidos en terreno como medio de validación. De los resultados, se puede concluir que:

- Los tiempos de ciclo obtenidos mediante la metodología descrita en este trabajo son coherentes en comparación a los datos de tiempo reales medidos en terreno.

- Las actividades unitarias de fortificación y soporte son las más críticas en el ciclo de construcción de un desarrollo horizontal representando alrededor del 37.9%. Hay que priorizar la correcta ejecución de estas actividades si se desea mejorar o mantener el tiempo de ciclo de avance.
- Los tiempos de ciclo simulados entregaron una gran diferencia entre los escenarios con dimensiones reducidas, como los desarrollos en niveles de producción, frente a aquellos escenarios con dimensiones grandes, como los desarrollos en el nivel de transporte (Ver Tabla 4). Esta diferencia fue de alrededor de un 30.6% que se traduce en 10 horas por cada tiro de avance.
- Utilizando el concepto de radio hidráulico que relaciona el área y perímetro del desarrollo horizontal, se determinó que la expresión matemática $y = 1074.9x + 259.99$ correlaciona el tiempo de ciclo de un tiro de avance con respecto al radio hidráulico de la sección a desarrollar.
- El 94,7% de las actividades unitarias simuladas entregaron

un coeficiente de variación bajo o normal.

Este trabajo representa una propuesta válida para la evaluación del impacto que tiene el tamaño de la sección que se desea desarrollar en la etapa de planificación de la construcción de desarrollos horizontales mineros. Además, entrega herramientas visuales y expresiones matemáticas útiles para implementar de forma práctica en la operación. Investigaciones anteriores solo normalizaban de forma lineal y no habían implementado la simulación como herramienta de optimización minera para estudiar y cuantificar la

relación entre los tiempos de construcción de los túneles de una mina subterránea y el cambio de dimensión de la sección a desarrollar, ni tampoco habían propuesto factores de normalización de área/perímetro específicos para cada actividad unitaria del ciclo.

Como trabajo futuro sería útil añadir más mediciones de tiempo de cada actividad unitaria del ciclo de construcción en la base de datos e incorporar más escenarios de experimentación con dimensiones intermedias a las utilizadas en este trabajo, para así, mejorar la precisión de las simulaciones realizadas. Al tener una mayor cantidad de datos se podrá mejorar el ajuste estadístico de las actividades del ciclo y, por ende, las simulaciones entregarán resultados más cercanos al óptimo.

BIBLIOGRAFIA

Ahmed Eissa, H., Scoble, M. y Dunbar, S. (2014). A comparison between Offset Herringbone and El Teniente underground cave mining extraction layouts using a discrete event simulation technique. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-21.

Bland, J.M.; Altman, D.G. (1996). «Statistics notes: measurement error». *BMJ* 312 (7047): 1654. PMC 2351401. PMID 8664723. doi:10.1136/bmj.312.7047.1654.

Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (1993). *Rock mechanics: for underground mining*. London; New York : Chapman & Hall.

Calvo, G., Mudd, G., Valero, A. y Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grade in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*.

Chitombo, G. (2010). Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining - State of the art'. *Mining Technology*, 132-141.

CODELCO. (2022). Definición de metro equivalente, sección base y aplicación M1 PNNM. Nota técnica Proyecto Nuevo Nivel Mina.

Consejo Minero. (2022). *Mining in Numbers*. Santiago.

Díaz, G., Morales, E. (2008). Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day – El Teniente mine – Codelco Chile. En: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE and Exhibition on Mass Mining. Lulea Sweden 9-11 June 2008. Lulea University of Technology. 14 p.

Díaz, M., Rojas, P. y Vargas, M. (2019). Construction of Mining Projects in El Teniente. En E. Campos y N. Morales. *6th International Conference on Geology and Mine Planning*. Artículo presentado en Geomin Mineplanning 2019, Santiago, 7-9 agosto.

Dodge, Yadolah (2010). *The Concise Encyclopaedia of Statistics*. New York: Springer. p. 60 de 622.

Dorin, I., Diaconescu, C. y Topor, D. (2014). The Role of Mining in National Economies. *International Journal of Academic Research in*

Accounting, Finance and Management Sciences, 4(3), 155-160.

Dowd, P.A., Xu, C. y Coward, S. (2016). Strategic mine planning and design: some challenges and strategies for addressing them. *Mining Technology*.

Flores, G. y Catalan, A. (2019). A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11, 549-561.

Gutiérrez, A. (2012). La variación y su significado. *Revista Universidad EAFIT*, 32(101), 87–96. Recuperado a partir de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1216>.

Harraz, H. (2010b). *Underground Mining Methods*. [Presentación] Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/301833045_Underground_mining_Methods.

Kaiser, P. y Cai, M. (2012). Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3), 215-227.

King, B., Goycoolea, M. y Newman, A. (2016). Optimizing the open pit-to-underground mining transition. *European Journal of Operational Research*, 1-13.

Leiva, F. (2015). *Desarrollo de una metodología para la obtención de la mejor configuración de turnos para la construcción de un túnel horizontal, Minera San Pedro* [Tesis de Pregrado, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile].

Maidl, B., Thewes, M. y Maidl, U. (2014). *Handbook of Tunnel Engineering I*. John Wiley & Sons. Masosonore, M. y Hanane, D. (2018). *Consequences of tunneling by the New Austrian Tunneling Method (NATM) in urban areas of ground surface*.

Maybee, B., Dunn, P., Dessureault, S. y Robinson, D. (2009). Impact of development strategies on the value of underground mining projects. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*.

Navarro, C. (2012). *Simulación de ciclos de construcción de labores subterráneas mediante el método de Montecarlo, Proyecto Olivo Minera San Pedro* [Tesis de Pregrado, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile].

Nord, G. (2008). Faster drifting in mining, some aspects. En: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE and Exhibition on Mass Mining. Lulea Sweden 9-11 June 2008. Lulea University of Technology. 10 p.

Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z. y Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201.

Oddie, M. E., Jones, C. I., Labrecque, P., & Delabbio, F. C. (2014). *U.S. Patent No. 8,820,847*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Olavarria, S., Adriasola, P. y Karzulovic, A. (2006). Transition from open pit to underground mining at Chuquicamata, Antofagasta, Chile. *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*. 421-434.

Paithankar, A. y Chatterjee, S. (2017). Grade and Tonnage Uncertainty Analysis of an African Copper Deposit Using Multiple-Point Geostatistics and Sequential Gaussian Simulation. *Natural Resources Research*.

Ramírez, M. y Tarigan, A. (2014). History of PT Freeport's "DE Equivalent": A Method for Normalizing Drift of Different Sizes of Cross Sections. *PTFI Freeport-McMoRan Inc.*

Rashidi, F., Suorineni, F. y Asi, B. (junio 2014). Open pit or block caving? A numerical ranking method for selection. En R. Webber (Presidencia). *A Southern Africa Silver Anniversary*. Conferencia llevada a cabo en Gauteng, Sudáfrica.

Raychaudhuri, S. (2008). "Introduction to Monte Carlo simulation," *2008 Winter Simulation Conference*, Miami, FL, USA, 2008, pp. 91-100, doi: 10.1109/WSC.2008.4736059.

Rocher, W., Rubio, E. y Morales, N. (2011). Eight-Dimensional Planning – Construction of an Integrated Model for Mine Planning Involving Constructability. *35TH APCOM SYMPOSIUM*, (pp. 393-406). Wollongong.

Rodríguez, F. (2014). *Metodología que estima el tiempo de construcción y ciclo de una batea, actividades críticas y productividad mediante back-análisis*. [Tesis Magíster, Universidad de Chile, Santiago, Chile].

Satici, O. (2000). *Drilling and blasting as a tunnel excavation method*. [Presentación] Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/285057345_Drilling_and_blasting_as_a_tunnel_excavation_method.

Singer, D. y Kouda, R. (1999). Examining Risk in Mineral Exploration. *Natural Resources Research*.

Stewart, P., Ramezanzadeh, A. y Knights, P. (2006). Benchmark Drill and Blast and Mechanical Excavation Advance Rates for Underground Hard-Rock Mine Development. *Australian Mining Technology Conference*, 41-63.

ANEXOS

ANEXO A : TITULO DEL ANEXO (*Heading 1*)

Paper en Desarrollo paralelo. Al finalizar su redacción será añadido como anexo.