



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

SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA
PREPARACIÓN MINERA EN MINERÍA TIPO BLOCK/PANEL CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

CAMILA FERNANDA CONTRERAS CARRASCO

PROFESOR GUÍA:

RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

NELSON MORALES VARELA

ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN

Cumplir con los proyectos de preparación minera asegura la continuidad operacional de los procesos de extracción de mineral, por lo tanto, la gestión de los recursos y el control de las actividades programadas son clave para obtener los resultados esperados y asegurar la producción.

La planificación de la preparación minera actualmente no considera variabilidad en sus cálculos debido a que ésta se basa principalmente en rendimientos estimados mediante planillas de cálculo. Planificar de esta manera no permite incorporar todas las interferencias que se dan en proyectos de preparación minera, y por lo tanto, cuantificarlas con anticipación.

Debido a esto, el objetivo de esta investigación es proponer una metodología para crear un modelo de simulación que incorpore interferencias operacionales enfocado a desarrollos horizontales con múltiples frentes en minería de Block/Panel Caving.

La metodología propuesta consta de 8 etapas: formulación del problema, modelo conceptual, recolección y análisis de datos, modelo computacional, verificación del modelo, validación del modelo, definición de escenarios y análisis de sensibilidad, y finalmente, documentación de los resultados.

Con el objetivo de aplicar esta metodología y analizar sus resultados se crea un modelo de simulación utilizando el software de simulación de eventos discretos ProModel. Para ello se consideró un caso base que considera el desarrollo de cuatro frentes múltiples realizadas por perforación y tronadura en un nivel de producción de una mina explotada por Block Caving.

Las principales interferencias consideradas en el modelo de simulación son: fallas, mantenimientos programados y petroleo de los equipos principales asociados al desarrollo de las calles, demoras por traslado de personal en los cambios de turno y colación, disponibilidad de servicios en la frente (aire comprimido, agua, energía eléctrica), uso de rutas exclusivas durante el traslado de marina con LHD y curva de aprendizaje que afecta los resultados al inicio de la simulación.

A pesar de que el modelo de simulación creado es un modelo optimista (roca de buena calidad), el rendimiento promedio es de 224 m/mes cuando se desarrollan las cuatro calles por completo (350 metros cada una), rendimiento que se encuentra dentro del rango esperado en proyectos de este tipo.

Dentro de las principales conclusiones se obtiene que el uso de la simulación como herramienta para planificar permite incorporar y cuantificar el impacto de las interferencias operacionales en el sistema, por lo tanto representa una mejora a lo que se realiza actualmente.

Además, la metodología propuesta deja en evidencia que la elaboración del modelo conceptual es una de las etapas más relevantes debido a que es una guía de construcción para el modelo de simulación y define también una línea base para el levantamiento de datos e información.

Si bien el modelo de simulación creado en esta investigación no considera todas las variables que debiese contener, permite comparar escenarios, y por lo tanto, los modelos de simulación son herramientas de toma de decisiones si se hacen los supuestos adecuados.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a mi familia, que sin ellos nunca hubiese logrado todo lo que he logrado hasta ahora en mi vida: papá, mamá, Arlen, a mis tatas, Benjito, y por supuesto, a mi pequeña y adorada Emilia. Los amo a todos.

A mis amigos de la vida, Pato, Carito y Héctor que me han acompañado desde que los conocí en el colegio. En las buenas y en las malas, siempre, y ahora también en la distancia.

A mis profesores por sus consejos, por el apoyo y por la paciencia que me han tenido.

A toda la gente que he conocido estos años en mi vida universitaria. Paula y Valeria en mis primeros años, a Fernando Fuenzalida por tu apoyo constante y tu cariño, a todos los mineros que conocí en los últimos años, particularmente a aquellos que me ayudaron siempre, Diego y Alan. También a la gente que conocí en BCLab y que hicieron grata mi experiencia con esta memoria.

A todos ustedes muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Alcances.....	2
1.4. Metodología de Trabajo.....	3
1.5. Contenidos por Capítulo.....	3
Capítulo 2: Antecedentes Bibliográficos.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Preparación Minera.....	5
2.3. Desarrollos Horizontales.....	5
2.3.1. Benchmarking Rendimientos.....	6
2.4. Planificación de la Preparación Minera.....	9
2.5. Simulación de la Preparación Minera.....	10
2.5.1. Simulación de Procesos.....	10
2.5.2. Simulación de la Preparación Minera.....	11
2.6. Interferencias en la Preparación Minera.....	14
2.7. Conclusiones del Capítulo.....	19
Capítulo 3: Metodología de Simulación.....	20
3.1. Introducción.....	20
3.2. Metodología Propuesta.....	20
3.2.1. Etapa 1: Formulación del Problema.....	20
3.2.2. Etapa 2: Generación de Modelo Conceptual.....	21
3.2.3. Etapa 3: Recolección y Análisis de Datos.....	31
3.2.4. Etapa 4: Generación del Modelo Computacional.....	32
3.2.5. Etapa 5: Verificación del Modelo.....	32
3.2.6. Etapa 6: Validación del Modelo.....	32
3.2.7. Etapa 7: Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad.....	33
3.2.8. Etapa 8: Documentación.....	33
3.3. Resumen.....	33
3.4. Conclusiones del Capítulo.....	34
Capítulo 4: Metodología en ProModel.....	35
4.1. Introducción.....	35

4.2.	Elementos básicos en ProModel	35
4.3.	Metodología	35
4.4.	Resumen.....	39
4.5.	Conclusiones del Capítulo	40
Capítulo 5: Aplicación de la Metodología.....		41
5.1.	Introducción	41
5.2.	Formulación del Problema.....	41
5.2.1.	Objetivo	41
5.2.2.	Alcances.....	41
5.2.3.	Límite de Batería	41
5.3.	Modelo Conceptual: Descripción del Caso Base.....	42
5.3.1.	Lugares Principales.....	42
5.3.2.	Layout.....	42
5.3.3.	Actividades del ciclo	43
5.3.4.	Equipos principales	44
5.3.5.	Estrategia de Desarrollo.....	44
5.3.6.	Estrategia de Traslado de Marina	45
5.3.7.	Parámetros de Entrada	45
5.3.8.	Variables de Salida	46
5.3.9.	Sistema de Turnos	46
5.3.10.	Horario para Tronadura	46
5.4.	Modelos Paralelos.....	47
5.5.	Criterios de Decisión	50
5.6.	Validación del Modelo.....	52
5.6.1.	Rendimiento mediante Planilla de Cálculo	52
5.6.2.	Comparación con Modelo de Simulación Base.....	52
5.7.	Conclusiones del Capítulo	54
Capítulo 6: Resultados y Análisis de Resultados		55
6.1.	Introducción	55
6.2.	Resultados Modelo de Simulación	55
6.2.1.	Impacto de las Interferencias	55
6.2.2.	Desarrollos Completos	56
6.3.	Análisis de Escenarios y Análisis de Sensibilidad.....	56
6.3.1.	Tipo de Roca.....	56
6.3.2.	Puntos de Vaciado	58
6.3.3.	Cuadrilla	59

6.3.4. Frentes de trabajo activas	60
6.4. Conclusiones del Capítulo	62
Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones.....	63
7.1. Conclusiones Generales.....	63
7.2. Recomendaciones a Futuro	63
Capítulo 8: BIBLIOGRAFÍA	65
Anexos	I
ANEXO A: CÁLCULO DEL TIEMPO DE CICLO	I
Anexo A1: Fórmulas principales.....	I
Anexo A2: Supuestos y Cálculos	III
ANEXO B: ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE PLANILLA DE CÁLCULO	IV
ANEXO C: RESULTADOS SIMULACIONES.....	VII
Anexo C1.....	VII
Anexo C2.....	VIII
Anexo C3.....	IX
Anexo C4.....	XI
Anexo C5.....	XI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Porcentaje del tiempo para actividades del ciclo constructivo de desarrollos horizontales, Obras de Preparación Mina Pilar Norte - El Teniente. Elaboración propia a partir de Camhi (2012).....	1
Figura 2: Clasificación de la Preparación Minera (Camhi, 2012).....	5
Figura 3: Rendimientos para múltiples frentes en operaciones de Rio Tinto (Li, 2012).	8
Figura 4: Ciclo constructivo de un túnel con diferentes actividades secuenciales (Nord, 2008)..	12
Figura 5: Principales etapas de la metodología propuesta.....	20
Figura 6: Variación de la velocidad de un LHD (vacío/cargado) a diferentes inclinaciones. Elaboración propia a partir de Li (2012).	24
Figura 7: Ejemplo de Estrategia de Carguío y Transporte de Marinas.	25
Figura 8: Ejemplo de procesos y criterios de decisión.	27
Figura 9: Ejemplo de un turno que considera horario especial para tronaduras.....	28
Figura 10: Resumen de las variables a considerar dentro del Modelo Conceptual en proyectos de simulación de desarrollos horizontales.....	33
Figura 11: Ejemplo de construcción de una calle en ProModel.	36
Figura 12: Límite de Batería del Modelo de Simulación Base.	41
Figura 13: Layout a desarrollar en el Modelo de Simulación Base.....	42
Figura 14: Actividades del ciclo de construcción de una galería en el Modelo de Simulación Base.	43
Figura 15: Dimensiones de las calles a desarrollar en el Modelo de Simulación Base.....	45
Figura 16: Horario para tronadura en el modelo de simulación.	46
Figura 17: Cierre de calles durante traslado de marina en Modelo de Simulación Base.	48
Figura 18: Perforación de la frente y sus criterios de decisión.....	50
Figura 19: Extracción de Marina y sus criterios de decisión.....	51
Figura 20: Esquema para Validación Inicial del Modelo de Simulación Base.	53
Figura 21: Resultados del Modelo de Simulación del rendimiento en función de la distancia al punto de vaciado.	59
Figura 22: Resultados Modelo de Simulación del rendimiento en función del número de frentes de trabajo activas, una sola cuadrilla.	60
Figura 23: Resultados Modelo de Simulación del rendimiento en función del número de frentes de trabajo activas, una sola cuadrilla hasta la 4 frente activa, luego 2 cuadrillas.....	61
Figura 24: Estimación de rendimiento mediante planilla de cálculo.....	IV

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Benchmarking de proyectos de tunelería (Stewart et al, 2006).....	7
Tabla 2: Benchmarking de proyectos mineros canadienses (Neumann, 2001).....	7
Tabla 3: Rendimientos por nivel División El Teniente (CODELCO) para múltiples frente. (Alegría, 2010).	8
Tabla 4: Interferencias Operacionales identificadas durante la preparación minera de Mina Esmeralda y Diablo Regimiento en los meses enero-agosto 2010 (Alegría, 2010).	15
Tabla 5: Problemas de Logística identificados durante preparación minera de Mina Esmeralda y Diablo Regimiento en los meses enero-agosto 2010 (Alegría, 2010).	16
Tabla 6: Interferencias atribuibles al contratista (Bustos, 2015).....	17
Tabla 7: Interferencias atribuibles al mandante (Bustos, 2015).	17
Tabla 8: Interferencias exógenas (Bustos, 2015).....	17
Tabla 9: Problemas asociados a la construcción de túneles (Gacitúa, 2012).	18
Tabla 10: Ejemplo de cuadrilla para excavaciones horizontales con fortificación pernos-malla-shotcrete.....	23
Tabla 11: Resumen de los elementos principales de ProModel y sus usos en modelos de excavaciones horizontales.	39
Tabla 12: Actividades del ciclo constructivo y sus equipos asociados en el Modelo de Simulación Base.	44
Tabla 13: Velocidad equipos principales en Modelo de Simulación Base.....	44
Tabla 14: Parámetros de entrada del Modelo de Simulación Base.	45
Tabla 15: Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base.....	46
Tabla 16: MTBF y MTTR de los equipos principales del Modelo de Simulación Base.	47
Tabla 17: Calendario de Mantenciones Programadas para los Equipos Principales.....	47
Tabla 18: Factores de ajuste para los tiempos de perforación de avance y fortificación del Modelo de Simulación.	49
Tabla 19: Tiempos utilizados en la estimación del rendimiento utilizando planilla de cálculo.	52
Tabla 20: Resultados Validación Inicial.....	54
Tabla 21: Resultados Modelo de Simulación con 4 frentes múltiples.	55
Tabla 22: Variación de los parámetros de entrada por tipo de roca.	57
Tabla 23: Tiempos de cada actividad del ciclo para cada tipo de roca.	57
Tabla 24: Rendimientos para cada tipo de roca.....	58

Tabla 25: Resultados del Modelo de Simulación con 2 Puntos de Vaciado.	58
Tabla 26: Nueva configuración de cuadrilla para análisis de sensibilidad en el Modelo de Simulación.	59
Tabla 27: Resultados Modelo de Simulación con nueva configuración de cuadrilla.	59
Tabla 28: Variables para el cálculo del tiempo de ciclo.	III
Tabla 29: Cálculo del tiempo de ciclo.	III
Tabla 30: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Disponibilidad de Servicios.	VII
Tabla 31: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Petroleo.	VII
Tabla 32: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Falla de Equipos.	VII
Tabla 33: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Todas las interferencias.	VII
Tabla 34: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Buena Calidad.	VIII
Tabla 35: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Mediana Calidad.	VIII
Tabla 36: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Mala Calidad.	VIII
Tabla 37: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 50 m.	IX
Tabla 38: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 100 m.	IX
Tabla 39: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 150 m.	IX
Tabla 40: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 200 m.	IX
Tabla 41: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 50 m.	X
Tabla 42: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 100 m.	X
Tabla 43: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 150 m.	X
Tabla 44: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 200 m.	X
Tabla 45: Resultados Modelo de Simulación con nueva cuadrilla.	XI
Tabla 46: Resultados Modelo de Simulación con 1 cuadrilla.	XI
Tabla 47: Resultados Modelo de Simulación con 1 cuadrilla hasta la 4ta. frente y 2 cuadrillas desde la 5ta. frente.	XI

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En la actualidad los proyectos de minería subterránea se han visto enfrentados al agotamiento paulatino de las reservas en roca secundaria, lo cual da paso a la explotación de reservas en roca primaria, cuya fragmentación es más gruesa, cambio que provoca un gran quiebre tecnológico donde las distintas áreas han tenido que dar soluciones integrales orientadas a asegurar la producción, y de esta manera surge continuamente la necesidad de incorporar nuevos sectores productivos al proceso.

Cumplir con los proyectos de obras de preparación minera asegura la continuidad operacional de los procesos de extracción de mineral, por lo tanto, la gestión de los recursos y el control de las actividades programadas son clave para obtener los resultados esperados de un proyecto determinado (Camhi, 2012).

1.1. Motivación

Los proyectos de ejecución perfecta y exenta de problemas son prácticamente imposibles de encontrar. En proyectos de preparación minera es indiscutible que existe una dificultad en el cumplimiento de los plazos debido principalmente a rendimientos mal estimados y plazos mal programados en la etapa de planificación (COP Ingeniería SpA, 2014).

La planificación de la preparación minera actualmente no considera variabilidad en sus cálculos, además de utilizar valores medios que se basan tradicionalmente en la experiencia de los planificadores y en datos empíricos de proyectos existentes.

Como se observa en la siguiente figura, gran parte del ciclo lo constituyen tiempos perdidos.

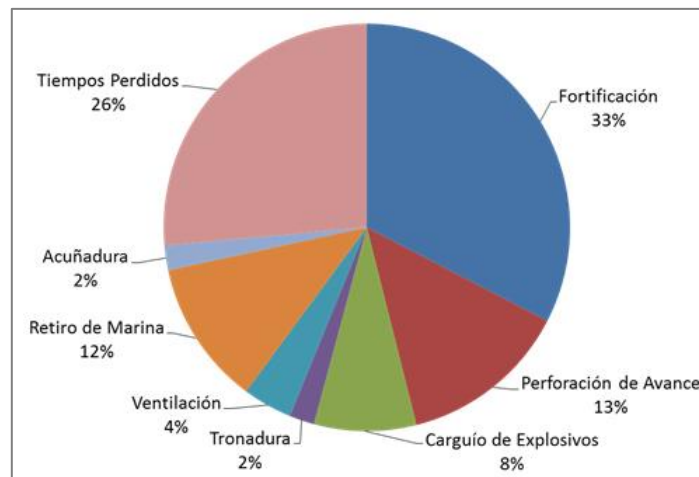


Figura 1: Porcentaje del tiempo para actividades del ciclo constructivo de desarrollos horizontales, Obras de Preparación Mina Pilar Norte - El Teniente. Elaboración propia a partir de Camhi (2012).

El inconveniente de esta metodología para planificar es que carece de precisión y confiabilidad debido a que se dejan diversos factores de lado, sobre todo factores operacionales que son difíciles de evitar y están presentes en toda operación.

Las técnicas de simulación han sido usadas exitosamente en diversas industrias durante mucho tiempo y se ha demostrado que estas técnicas son ventajosas para el proceso de planificación minera, pronosticando el rendimiento de los sistemas modelados y probando distintas alternativas a bajo costo (Li, 2012).

De esta manera, se desea construir una metodología que permita utilizar la simulación como una herramienta que complemente a la planificación de la preparación minera de manera de agregar mayor flexibilidad al plan, estimar rendimientos y plazos coherentes para la construcción de excavaciones horizontales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Proponer una metodología para crear un modelo de simulación que incorpore interferencias operacionales y que complemente a la planificación de la preparación minera de los desarrollos horizontales con múltiples frentes en minería de Block/Panel Caving.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte de la simulación aplicada a proyectos de preparación minera.
- Identificar las interferencias operacionales que deben ser consideradas en un modelo de simulación enfocado a la preparación minera.
- Elaborar una metodología para realizar un modelo de simulación que incorpore los aspectos más incidentes en el desarrollo de excavaciones horizontales.
- Estudiar el efecto de considerar distintas interferencias en el desarrollo de excavaciones horizontales con múltiples frentes.

1.3. Alcances

- La metodología propuesta está enfocada a los desarrollos horizontales del nivel de producción de una faena explotada por Block o Panel Caving.
- La construcción del modelo de simulación está realizado en el software de eventos discretos ProModel.
- El modelo de simulación está enfocado a desarrollos horizontales mediante el método convencional de perforación y tronadura y no incluye el desarrollo de labores verticales, obras civiles ni túneles de accesos principales.
- El modelo de simulación comprende el nivel de producción de una operación explotada mediante Block Caving.

1.4. Metodología de Trabajo

La metodología de trabajo planteada en esta memoria apunta a cumplir con los objetivos de esta investigación. A continuación se enlistan los pasos a seguir para efectuar lo anterior:

1. Recopilación de información para la metodología propuesta, esto es:
 - Análisis de los rendimientos actuales de los desarrollos horizontales con múltiples frentes.
 - Estudio de las aplicaciones de modelos de simulación enfocados a preparación minera.
 - Entrevistas con expertos en el área de preparación minera para recopilación de información, y posterior validación de resultados.
 - Análisis de bases de datos de proyectos de preparación minera.
2. Formulación de metodología para la creación de modelos de simulación enfocados a excavaciones horizontales en nivel de producción de minas explotadas por Block/Panel Caving.
3. Aplicación de la metodología utilizando un software de eventos discretos:
 - Definir variables de entrada, salida, y alcances del modelo de simulación.
 - Generar modelo de simulación básico y sin interferencias.
 - Incorporar de manera paulatina las interferencias operacionales.
 - Generación de escenarios.
4. Análisis de resultados.

1.5. Contenidos por Capítulo

Los contenidos de esta investigación se discuten en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1:** Corresponde a la introducción del trabajo, donde se exponen motivación del trabajo, objetivos, alcances y la metodología de trabajo.
- **Capítulo 2:** Son los antecedentes que sustentan esta investigación donde se muestra principalmente el estado del arte de los rendimientos actuales en proyectos de excavaciones horizontales, la aplicación de la simulación a la preparación minera y finalmente las interferencias que impactan este tipo de proyectos.
- **Capítulo 3:** Describe la metodología propuesta para la creación de proyectos de simulación enfocados a desarrollos horizontales con múltiples frentes en el Nivel de Producción.
- **Capítulo 4:** Se enfoca en la metodología para la creación de modelos de simulación para desarrollos horizontales mediante el uso del software de eventos discretos ProModel.
- **Capítulo 5:** Muestra un caso de aplicación de las metodologías propuestas en los capítulos 3 y 4 describiendo un modelo de simulación base.

- **Capítulo 6:** Presenta los principales resultados del modelo de simulación base junto con análisis de escenarios y análisis de sensibilidad.
- **Capítulo 7:** Conclusiones generales de esta investigación y recomendaciones a futuro.
- **Capítulo 8:** Referencias que respaldan esta investigación.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. Introducción

El siguiente capítulo tiene como objetivo contextualizar el trabajo de investigación y se enfoca en: el estado del arte de los rendimientos actuales en proyectos de excavaciones horizontales, aplicación de la simulación en preparación minera, y finalmente en un análisis de interferencias que impactan este tipo de proyectos.

2.2. Preparación Minera

La preparación minera puede ser definida como un conjunto de actividades de desarrollo de túneles y construcción de infraestructura en los diferentes niveles o sectores que serán utilizados para la incorporación de un área que permita el inicio o la continuidad de la explotación.

Estas actividades son desarrolladas de manera continua y secuencial durante toda la vida del ciclo de la operación minera, y su detención, retraso o interferencia produce impactos en todas las metas productivas.

La preparación minera puede ser dividida en 3 grandes grupos:

Excavaciones Mineras	Obras Civiles	Montaje de Infraestructura
<ul style="list-style-type: none">• Corresponden a los desarrollos horizontales y verticales y todas las actividades asociadas a éstos, como la fortificación de galerías, el saneamiento de éstas y la estabilización de sectores.	<ul style="list-style-type: none">• Son las obras cuya materialización principal es el Hormigón Armado. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento, éstos últimos cumplen la función de fortificación definitiva de una zona en producción.	<ul style="list-style-type: none">• Esta actividad corresponde a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto. Normalmente se ejecutan posteriormente a las obras civiles. Ejemplos de estas actividades son el montaje y la habilitación de buzones de carguío y plate feeders, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

Figura 2: Clasificación de la Preparación Minera (Camhi, 2012).

2.3. Desarrollos Horizontales

Las obras más relevantes de la preparación minera corresponden a aquellas que se ejecutan en mayor cantidad, como es el caso de los desarrollos horizontales y las obras civiles (Camhi, 2012). Además, el desarrollo de las excavaciones horizontales es la actividad que da pie a la posterior construcción de obras civiles.

Los desarrollos horizontales involucran excavación de cruzados y conexiones en el nivel de hundimiento, calles y zanjas en el nivel de producción, galerías de ventilación en el subnivel de ventilación y cruzados en el nivel de acarreo, además de cabeceras y accesos principales.

Por otro lado, a pesar de que en ambos casos se utilizan similares procedimientos, planos de construcción y equipos de trabajo, los accesos independientes (una sola frente de trabajo activa), con o sin inclinación obtienen rendimientos mayores (m/mes) que en el caso de desarrollos horizontales con múltiples frentes.

Para llevar a cabo la construcción de túneles independientes o múltiples galerías es necesario realizar una investigación previa y detallada que implica estudios geológicos de los terrenos, sondeos y túneles de reconocimiento. Es necesario que esta etapa de estudio y recopilación de información se siga realizando durante la construcción del proyecto.

El método utilizado para la realización de las excavaciones, además del tipo de soporte utilizado, será el resultado de un análisis multicriterio donde se tomen en cuenta los aspectos más relevantes del entorno. En términos generales, los métodos de excavación se pueden dividir en métodos convencionales mediante perforación y tronadura, y métodos mecanizados. En Chile, los túneles aún se construyen mayormente según la metodología de excavación convencional.

En el caso de las excavaciones horizontales, el método mecanizado se hace mediante el uso de máquinas tuneladoras como lo son las TBM (Tunnel Boring Machines). Hay que tener presente que este tipo de tecnología sólo aplica a túneles con largos desarrollos longitudinales y que no contengan radios de curvatura pequeños, justamente como los que son necesarios en los desarrollos horizontales en minas subterráneas (Gacitúa, 2012).

2.3.1. Benchmarking Rendimientos

Décadas atrás, si las condiciones de roca eran buenas y las condiciones de esfuerzo eran favorables, se podían obtener rendimientos de hasta 360 m/mes en excavación de túneles independientes. En la actualidad, debido a nuevas regulaciones de seguridad, a horas efectivas de trabajo menores y a sistemas más complejos, los rendimientos sufrieron una disminución y los mejores rendimientos promedio bordean los 300 m/mes (Nord, 2008).

La mayoría de los proyectos de desarrollo en minería subterránea incluyen el desarrollo de excavaciones independientes (accesos), las cuales implican por lo menos uno o dos kilómetros de desarrollo. Luxford (2000) indica que en esos casos los rendimientos reales obtenidos, además del diseño mismo, dependen principalmente de:

- La calidad de la fuerza de trabajo, la supervisión y la gestión.
- Disponibilidad de la planta (móvil y fija).
- Condiciones geotécnicas.
- Flujos de agua subterránea.
- Ventilación
- Espaciamiento y profundidad de las estocadas para acopio de marina y estocadas de maniobra a lo largo del túnel.

Según la experiencia del autor en minería australiana, los rendimientos en calidad de roca razonable y con menos de 5 L/s de entrada de agua en la frente son en promedio 160 m/mes. Sin

embargo, si todas las condiciones son favorables se pueden alcanzar valores incluso mayores a 280 m/mes.

De igual manera, el benchmarking realizado por Stewart *et al* (2006) entrega resultados similares en otros proyectos de tunelería.

Tabla 1: Benchmarking de proyectos de tunelería (Stewart et al, 2006).

Caso Estudio	País	Rendimiento promedio
Common infrastructure Project – PT Freeport (Barber <i>et al</i> , 2005).	Indonesia	9.0 m/día (270 m/mes)
Craviale Tunnel (Kalamaras <i>et al</i> , 2005).	Italia	5.5 m/día (165 m/mes)
Golden Grove Catalpa Decline (Roche Mining, 2006).	Australia	8.3 m/día (249 m/mes)

Para el caso de múltiples frentes, Luxford (2000) señala que el factor más relevante es el número de frentes independientes que se tienen disponibles para cada Jumbo de perforación debido a que esta actividad es el cuello de botella siempre y cuando el diseño, planificación o estrategia de desarrollo permitan que los traslados de los equipos no sean el mayor impacto provocando que el carguío y transporte de marina sean el cuello de botella.

La experiencia australiana revela que incluso hace más de una década, los rendimientos reales en condiciones razonables con al menos 3 frentes disponibles eran en promedio 300 m/mes utilizando barrenos de 3,2 m, lo cual puede inferirse como 100 m/mes por frente. Sin embargo, durante el año 2005 un benchmarking de rendimientos para desarrollos horizontales realizado por AMC (Australian Mining Consultants) entrega como resultado que para avances de 3,16 metros, volumen por disparo de 80,89 m³ y tiempos de ciclo promedio de 14,47 horas, se obtienen 5,25 m/día (158 m/mes) para múltiples frentes (Willcox, 2008).

De igual forma Neumann (2001) realiza un benchmarking de 9 minas canadienses que resulta en un rendimiento promedio de 6,5 m/día (195 m/mes) para desarrollos horizontales de múltiples frentes, sin especificar la cantidad de frentes, y el detalle se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2: Benchmarking de proyectos mineros canadienses (Neumann, 2001).

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

Como se observa en la Figura 3, Rio Tinto, empresa con operaciones en diversas faenas a nivel mundial, al año 2011 tenía rendimientos de entre 4.0 a 6.8 m/día por cuadrilla (120 m/mes a 204 m/mes), lo cual está dentro de lo indicado por los autores anteriores para múltiples frentes.

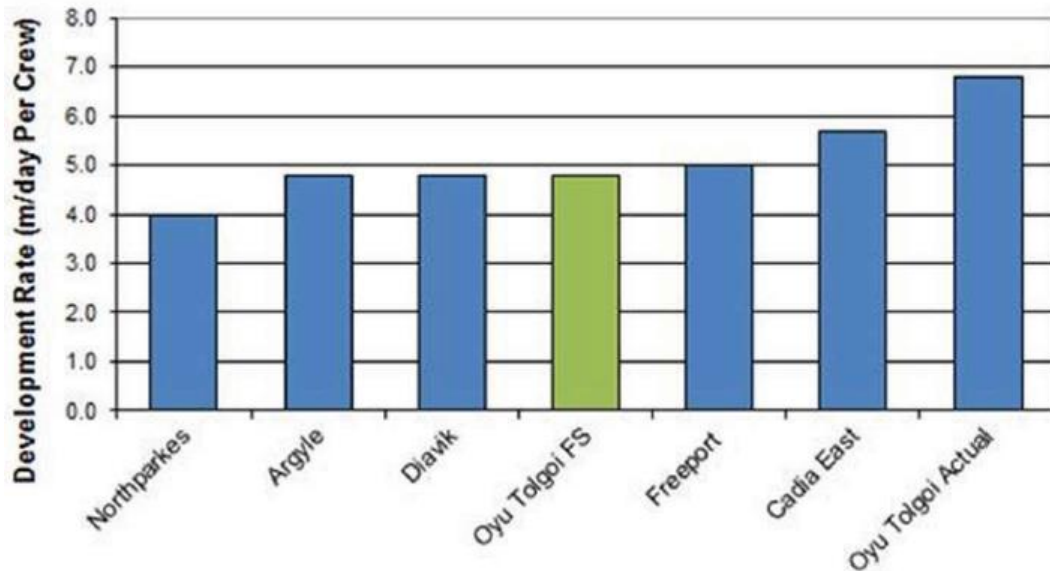


Figura 3: Rendimientos para múltiples frentes en operaciones de Rio Tinto (Li, 2012).

Por otro lado, según el análisis de los programas de obras de Mina Diablo Regimiento y Mina Esmeralda (División El Teniente, CODELCO) realizado por Alegría (2010) entre los meses de febrero y agosto del 2010 se obtuvieron los siguientes rendimientos promedio:

Tabla 3: Rendimientos por nivel División El Teniente (CODELCO) para múltiples frente. (Alegría, 2010).

Desarrollos Horizontales	m/mes por frente de avance	Nº Frentes de avance	m/mes	m/día
Nivel de Hundimiento (4,5 m x 4 m)	50	3	151	5.0
Nivel de Producción (4,5 m x 4 m)	51	6	308	10.3
Sub Nivel de Ventilación (4,5 m x 4,5 m)	31	3	94	3.1
Nivel de Transporte (5,5 m x 4 m)	48	1	48	1.6

El caso del rendimiento del nivel de hundimiento es comparable con el estudio de los desarrollos horizontales en el Nivel de Hundimiento de Mina Pilar Norte (División El Teniente, CODELCO) elaborado por Camhi (2012), el rendimiento estimado mediante el uso de Carta Gantt para planificar fue de 192 m/mes para 6 frentes activas, cuyas galerías son de 4,2 m x 4,1 m y 3,2 metros de avance por disparo. Sin embargo, en la realidad los resultados son menos favorables, entregando 22,7 metros por frente de avance, que extrapolando a 6 frentes resulta en 136 m/mes, lo cual representa un 71% de lo planificado.

Si se comparan el rendimiento mensual del estudio realizado por Alegría (2010) con el de Camhi (2012) se observa que a pesar de que existe un mayor número de frentes disponibles para trabajar en el segundo caso, el rendimiento es menor. Cabe destacar que no se especifica el número de cuadrillas que trabajan en cada caso.

2.4. Planificación de la Preparación Minera

El plan de preparación minera se realiza por medio de una secuencia de actividades programadas en función de las necesidades futuras y actuales del proyecto. A continuación se resumen las etapas para la preparación en el marco de una explotación por Block/Panel Caving (Alegría, 2010):

1. Definir el programa de obras necesarias para iniciar la explotación del sector (en el caso de inicio de explotación) y el programa de obras necesarios para dar continuidad a la explotación (sector en producción).
2. Planificar, de acuerdo a las características del proyecto y a la variante del método de explotación, la logística de preparación para el área.
3. Definir la programación de adquisiciones necesarias para la operación.
4. Estimar la flota de equipos para cumplir con el programa de obras.
5. Estimar el personal de trabajo necesario para cumplir con el programa de obras.
6. Definir las actividades críticas para establecer las rutas prioritarias de preparación de los distintos sectores.
7. Iniciar las obras correspondientes al programa de desarrollos, ya sea por medio de personal propio o mediante contratos con empresas externas.
8. Recepcionar las obras realizadas y entregar al área de producción la zona preparada.

La planificación del programa de preparación considera además una serie de criterios en su desarrollo, dentro de los más relevantes se encuentran:

- Estrategia de crecimiento del sector.
- Geología.
- Geomecánica.
- Diseño minero.
- Planificación minera.

Estos criterios condicionan la zona donde se puede preparar, las secuencias constructivas de las obras, y por ende, el tiempo empleado en desarrollar la preparación. También de acuerdo al diseño definido se implementará la logística para el proyecto, la cual debería realizarse con el objetivo de facilitar los rendimientos de preparación.

En la actualidad, la planificación de la preparación minera no considera variabilidad en sus cálculos y éstos se basan tradicionalmente en la experiencia de los planificadores utilizando rendimientos empíricos de proyectos preexistentes o bien en datos históricos del sector. Asimismo, el uso de planillas de cálculo y Cartas Gantt para la planificación tanto de desarrollos como de obras civiles es una realidad que genera planes poco flexibles.

Muchos de los problemas de la planificación en esta área se deben a modificaciones constantes de las condiciones o a la falta de información al inicio o durante el desarrollo del proyecto de construcción. Suponer que no existe aleatoriedad en el sistema es más bien una foto estática del sistema. Si se usa como foto estática un plan subestimado, es decir, con menor rendimiento al real, se estarían abriendo o incorporando áreas de manera retrasada, y por lo tanto, afecta al

negocio en el largo plazo. Por otro lado, al sobreestimar los rendimientos, la incorporación de las áreas se irá retrasando respecto a la planificación, afectando de igual forma al negocio.

2.5. Simulación de la Preparación Minera

A continuación se presenta el análisis de los antecedentes bibliográficos relacionados a la simulación aplicada a la preparación minera comenzando con una introducción a la simulación de procesos, sus ventajas y desventajas, y las variables que inciden en el éxito de un modelo de simulación de eventos discretos.

2.5.1. Simulación de Procesos

La simulación es la imitación de un proceso o sistema de la vida real en el tiempo y ésta implica la generación y observación de una historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está representando (Banks, 1999).

Entre los distintos tipos de simulación que se pueden utilizar está la simulación de eventos discretos la cual se basa en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Este proceso consiste en relacionar los diferentes eventos que pueden cambiar el estado del sistema por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas.

La simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas que es necesario tomar en cuenta al determinar si es apta para resolver un problema determinado. Dentro de las ventajas más comunes que ofrece la simulación se encuentran (García *et al*, 2006):

- Buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, lo cual puede ser riesgoso y/o costoso.
- Mejora el conocimiento del proceso actual ya que le permite al analista ver cómo se comporta el sistema bajo distintos escenarios.
- Puede utilizarse como una herramienta complementaria para la toma de decisiones.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución cuando se quiere relacionar distintas variables y conocer su impacto en una variable final.
- En la actualidad, los software de simulación tienden a ser más sencillos, lo que facilita su aplicación.
- Contar con una interfaz gráfica permite ver cómo se comportará un proceso una vez que se haya cambiado o mejorado.

Y dentro de las desventajas más relevantes se encuentran:

- La simulación no es una herramienta de optimización, a pesar de que algunos software tengan integrados paquetes que permiten utilizar la optimización para mejorar los distintos escenarios simulados.
- La simulación puede ser costosa cuando se quiere implementar en problemas relativamente sencillos de resolver.
- Para generar un buen estudio de simulación se requiere de una inversión alta de tiempo de trabajo.
- Es necesario que el analista domine el uso del software y que maneje conocimientos de estadística para el análisis de resultados.

Por otro lado, existen algunos elementos claves que se deben tener en cuenta para garantizar el éxito de un modelo de simulación. A continuación se mencionan algunas causas por las que un modelo de simulación podría no tener los resultados esperados:

- **Cantidad de réplicas o corridas.** Es necesario efectuar más de una réplica del modelo que se está analizando con el fin de obtener estadísticas de intervalo que den un mejor resultado de la variable de análisis, ya que las distintas réplicas generan diferentes escenarios que dependen de los números pseudo aleatorios iniciados en cada corrida.
- **Tamaño de la corrida.** A veces el tamaño de la corrida es insuficiente, es decir, es necesario que la simulación considere el tiempo necesario para que las variables se estabilicen en el sistema y pasen a un estado estable.
- **Variable de respuesta mal definida.** Aun cuando el modelo de simulación representa de muy buena manera la realidad, si la variable de respuesta seleccionada no es la apropiada será imposible tomar decisiones que tengan impacto en la operación del sistema bajo estudio.
- **Error al establecer las relaciones entre las variables.** Un error común es no establecer adecuadamente las relaciones lógicas entre las variables aleatorias del modelo. Una forma de evitar lo anterior es llevar el modelo hasta su máxima capacidad de análisis tanto analítico como visual y observar su comportamiento mediante análisis de sensibilidad.
- **Error al determinar el tipo de distribución asociado a las variables aleatorias del modelo.** Podrían utilizarse distribuciones que no son las más adecuadas o que responden únicamente a un intento de simplificar los estudios estadísticos, esto podría afectar de manera importante los resultados de la simulación debido a que el modelo podría alejarse de lo que sucede en la realidad.
- **Uso incorrecto de la información.** Muchas veces la información se recolecta, analiza y administra de acuerdo a las propias necesidades, lo que implica que no siempre está en el formato y la presentación que se requiere para la simulación. Si la información se utiliza para determinar los parámetros del modelo sin ser depurada y reorganizada, es muy probable que la precisión de los resultados del estudio se vea afectada. De esta manera se podría caer en el efecto de GIGO (*Garbage In, Garbage Out*), donde al ingresar parámetros de entrada errados, entonces se obtendrán resultados igualmente erróneos.
- **Falta o exceso de detalle en el modelo.** En muchas ocasiones algún proceso se simplifica tanto que tiende a verse como una “caja negra” que impide ver lo que ocurre en el interior. Por otra parte, si el modelo se hace demasiado detallado, tanto el tiempo dedicado al estudio como el costo de llevarlo a cabo podrían incrementarse sustancialmente.

2.5.2. Simulación de la Preparación Minera

En minería las técnicas de simulación son aplicadas frecuentemente a aspectos relacionados a la producción. En particular, en minas explotadas por Block/Panel Caving las técnicas de simulación han sido utilizadas generalmente para aspectos relacionados a la planificación de la producción, rendimientos de producción, disponibilidad de los puntos de extracción y fragmentación (Li, 2012).

Los proyectos de construcción de túneles son particularmente adecuados para la simulación debido a los ciclos repetitivos de construcción que se producen durante su realización (Ruwanpura *et al.*, 2001). Además, como se explica en la Figura 4 se trata de actividades

secuenciales donde no se puede iniciar una tarea sin haber finalizado la tarea inmediatamente anterior.

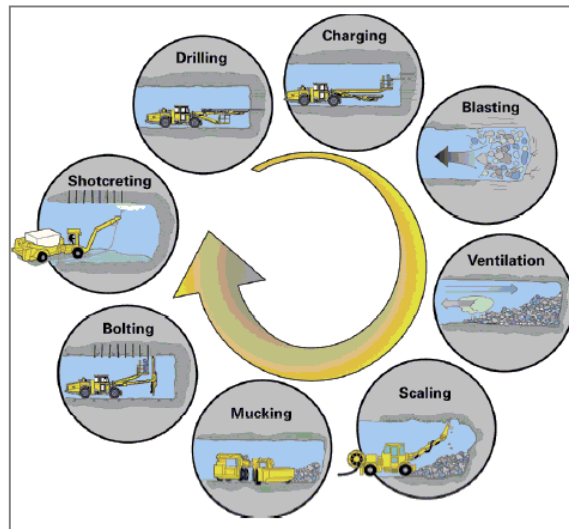


Figura 4: Ciclo constructivo de un túnel con diferentes actividades secuenciales (Nord, 2008).

Un gran número de herramientas están disponibles para realizar simulaciones y éstas se pueden dividir en cuatro categorías:

- Lenguajes de programación para fines generales.
- Lenguajes de simulación para fines generales.
- Paquetes de software de simulación para fines generales.
- Paquetes de software específicos para minería.

Los lenguajes de programación para fines generales, como Java o C++, ofrecen un alto grado de flexibilidad a un bajo costo, pero requieren habilidades altas de programación. Los lenguajes de simulación para fines generales, como SIMAN, GPSS y SLAM, son lenguajes de simulación orientados a objetos de sistemas discretos con gran flexibilidad, también requieren buenas habilidades de programación del usuario.

Dentro de la primera categoría se puede mencionar el trabajo realizado por Vargas *et al* (2013), el cual propone un algoritmo basado en simulaciones de Monte Carlo que otorga como resultado mejores estimaciones para los rendimientos de excavaciones horizontales mediante el método convencional de perforación y tronadura. Los resultados obtenidos por este método fueron comparados con un caso estudio real: el túnel de acceso horizontal de 560 metros de longitud (Mina Romero, Compañía Minera San Pedro, Chile). Luego de seis réplicas, de entre 10^5 a 10^6 iteraciones cada una, se compararon los resultados simulados, planificados y los reales. La simulación obtuvo un rendimiento similar a la realidad (en ambos casos 4.2 m/día), mientras que el rendimiento estimado por planificación era de 4.8 m/día. Esto significa una diferencia de hasta 17 días.

Los paquetes de software de simulación para fines generales, como por ejemplo Automod, ProModel, SIMUL8, Arena, Flexsim y Extend, requieren menos conocimientos de programación del usuario, pero ofrecen menor flexibilidad. Varios de los paquetes de software mencionados anteriormente han sido utilizados para simulación de las operaciones mineras:

La investigación realizada por Brunner *et al* (1999) discute la evolución de un modelo de simulación a medida que se va obteniendo más información y ésta se va incorporando en el modelo. Los autores crearon un modelo de simulación de eventos discretos utilizando Automod para representar el proceso de desarrollo y producción en una mina subterránea.

A pesar de que el modelo es una simplificación del sistema real, los autores señalan que el modelo demostró ser una buena herramienta comparativa. Lo importante es que los supuestos estén bien utilizados dentro del modelo, y de esta manera, aunque los resultados no se acerquen fielmente a la realidad, permite generar escenarios comparativos.

Botha *et al* (2008) aplica exitosamente la simulación de eventos discretos mediante el software Arena en PT Freeport Indonesia con el objetivo de validar la capacidad del sistema de manejo de minerales y para analizar el efecto de los datos geotécnicos en nuevas áreas mineras.

Una investigación que evidencia la flexibilidad del uso de estos software la realiza Runciman *et al* (1999). El artículo utiliza la simulación de eventos discretos para comparar distintos sistemas de desarrollo para minería subterránea mediante el software WITNESS. En particular, se comparó el desarrollo convencional mediante perforación y tronadura con un sistema telecomandado para los desarrollos desde una sala de control, considerando exactamente los mismos equipos y el mismo ciclo de construcción. El estudio demostró que un sistema telecomandado elimina el tiempo de viaje desde y hacia las frentes de trabajo, por lo que aumenta el tiempo de trabajo en un 20%, lo cual aumenta el rendimiento de la frente en un 45% (metros de avance por unidad de tiempo).

Finalmente, dentro de los software orientados específicamente a la minería para la simulación de los desarrollos se puede destacar el software SimMine, el cual tiene la capacidad de importar directamente los diseños de la mina y no se requiere ninguna codificación. Algunos autores han publicado estudios utilizando este software validando los modelos con casos estudio (Botha, 2009; Greberg *et al*, 2011; Li, 2012; Salama *et al*, 2012).

Greberg *et al* (2011) utiliza el software para el proceso de planificación del proyecto Newcrest Cadia East (Australia) explotada por Panel Caving durante su etapa de prefactibilidad. El objetivo de la simulación era verificar los planes para la fase de desarrollos y asignar los recursos de manera óptima en el desarrollo de los paneles. Las principales restricciones, supuestos y consideraciones del modelo fueron:

- Restricción de los desarrollos (m/mes) por falta de suministro de aire, relacionada directamente a incorporación de piques de ventilación.
- La limitación del suministro de aire fue aplicado sólo a cargadores y camiones, debido a su consumo de aire.
- Se considera personal suficiente para operar todo el tiempo.
- Se asumen equipos nuevos para tener un periodo de menor eficiencia al comienzo.

Los resultados del estudio muestran cómo los cambios en las prioridades pueden ser necesarios a fin de mantener altos los rendimientos de los desarrollos. La simulación muestra que cuando el número de frentes aumenta en el tiempo, en cierto punto se hace imposible desarrollar algunas áreas dentro del plazo determinado. En otras palabras, cuando se priorizan demasiadas áreas al mismo tiempo se hace difícil el desarrollo de todas ellas en el plazo establecido, el rendimiento

decae y el carguío y transporte de marina es el cuello de botella debido a los traslados de una frente a otra. El impacto es aún mayor si se trata de frentes paralelas.

Dado lo anterior, en la simulación se consideraron nuevas prioridades centradas en unas pocas áreas o frentes y los rendimientos aumentaron. Cuando las frentes se encontraban a distancias considerables unas de otras tenían que haber cuadrillas de trabajo separadas en distintas áreas con el fin de maximizar el tiempo de trabajo en las frentes. En esos casos, el carguío y transporte ya no era el cuello de botella, sino que pasa a ser la operación de perforación de pozos en la frente el cuello de botella.

De igual manera, Li (2012) aplica simulación de eventos discretos mediante el software SimMine durante la etapa de planificación de Hugo North Lift 1 Cave (Oyu Tolgoi Mine, Mongolia) explotada por Panel Caving.

El objetivo de la simulación en este caso es obtener rendimientos de los desarrollos de un área en Oyu Tolgoi Mine para complementar la planificación de la preparación minera durante la etapa de factibilidad del proyecto. Como outputs del modelo se definieron: los rendimientos de los desarrollos, utilización de los equipos y el número de frentes de trabajo activas.

Dentro de las conclusiones finales se extrae que el rendimiento depende del número de frentes de trabajo disponibles y de la clase de soporte requerida en cada caso. Cabe destacar que, la simulación arrojó un rendimiento de 8.2 m/día para múltiples frentes, y el autor decide disminuir el rendimiento en un 25%, utilizando finalmente 6.2 m/día en el plan debido a que ese valor se acerca más al benchmarking realizado con anterioridad en operaciones similares. Este ajuste se asume como la falta de consideración de interferencias en la simulación.

2.6. Interferencias en la Preparación Minera

Se entiende por interferencia a toda situación que genera pérdida de tiempo y que afecta el normal desarrollo de una actividad (Alegría, 2010). Aquellas pueden ser programadas o no programadas y afectarán el tiempo de trabajo efectivo. En una operación minera las interferencias se pueden generar tanto en el ámbito de la producción como en el de la preparación, en este caso el análisis está enfocado en la preparación minera.

Si bien las interferencias ocurren en todas las faenas mineras, la cantidad y el tipo de interferencias pueden llegar a ser muy distintas entre una faena y otra, esto debido a que son dependientes de las condiciones de operación y de la estrategia empleada durante la operación y/o la preparación.

Usualmente son empresas contratistas las encargadas de realizar la preparación minera, por lo que las variables que afectan el desarrollo de la actividad son versátiles y éstas pueden ser derivadas de la gestión y planificación de la empresa contratista, situaciones endógenas de la empresa contratista, externalidades atribuibles a condiciones de la empresa minera o a causas externas donde el sector minero no tiene la responsabilidad directa.

Diversos autores han identificado y descrito los posibles problemas que se pueden tener durante la preparación minera y que pueden generar demoras no planificadas, y por lo tanto, generar un incumplimiento en los plazos previamente establecidos para el proyecto.

Salgado (2009) identifica las principales actividades que afectan al ciclo de preparación minera en División El Teniente (CODELCO), las cuales son:

- Aislaciones post tronaduras.
- Aislaciones por alerta sísmica.
- Simulacros de incendios.
- Simulacros de estallidos de rocas.
- Interferencia con otras operaciones.
- Interferencia por cierre total de accesos.

Todas estas problemáticas pueden afectar tanto a la operación como a la preparación minera y en términos generales, son órdenes o responsabilidad de la empresa.

Un análisis más detallado de algunos sectores productivos de División El Teniente lo realiza Alegría (2010) con el objetivo de crear una línea base para el programa de preparación del proyecto Nuevo Nivel Mina en División El Teniente. El autor analiza tanto interferencias como problemas de logística que se dan en Mina Esmeralda y Diablo Regimiento.

Las principales interferencias operacionales identificadas en el estudio se muestran en la Tabla 4, mientras que los problemas de logística más relevantes se detallan en la Tabla 5.

Tabla 4: Interferencias Operacionales identificadas durante la preparación minera de Mina Esmeralda y Diablo Regimiento en los meses enero-agosto 2010 (Alegría, 2010).

Interferencias Operacionales
1. Disponibilidad de equipos
2. Corte de energía y agua
3. Clima (meteorología)
4. Movilizaciones
5. Disponibilidad de pique para vaciado de marina
6. Disponibilidad de la planta de hormigón
7. Aislaciones post-tronadura
8. Aislaciones por alerta sísmica
9. Simulacros de incendio
10. Interferencia con otros contratistas
11. Otros

Donde en la categoría Otros se pueden mencionar la falta de herramientas, ausencia de personal, y en general todas aquellas que se generan por una mala gestión de la empresa contratista. También las que hacen alusión a fallas de equipos tales como ventiladores, canchadores, ferrocarriles, etc., las cuales son responsabilidad de la empresa.

Tabla 5: Problemas de Logística identificados durante preparación minera de Mina Esmeralda y Diablo Regimiento en los meses enero-agosto 2010 (Alegría, 2010).

Lejanías de las frentes de trabajo	La lejanía de las frentes de trabajo afecta directamente en los tiempos de traslado del personal, el abastecimiento de materiales e insumos y a la extracción de marina.
Dispersión física de las obras	Cuando las actividades de preparación se encuentran concentradas físicamente, se obtienen mayores rendimientos al optimizar la utilización de los recursos.
Interacción con actividades de producción	Mientras mayor sea la cercanía entre las actividades de preparación y producción, mayores serán las interferencias mutuas.
Disponibilidad de facilidades constructivas	Disponer de accesos independientes, vaciaderos de marina exclusivos, energía eléctrica, ventilación y abastecimiento de materiales cercanos a las frentes de trabajo, mejora los rendimientos de las actividades de preparación.

De acuerdo a la evaluación de las interferencias realizadas por Alegría (2010), la interferencia que genera mayor cantidad de horas perdidas es la disponibilidad de equipos. Esta ausencia de equipos corresponde principalmente a mantenciones no programadas y a la mala gestión de la flota de equipos por parte de la empresa contratista.

La empresa encargada de la preparación minera en los niveles de Hundimiento y Producción de Mina Esmeralda, entre los meses de enero a agosto del año 2010 indicó que la interferencia por disponibilidad de equipos fue la que reportó mayor cantidad de horas perdidas, alcanzando un 88,4% del total de las horas perdidas por interferencias (el resto lo constituyen corte de energía y agua, aislación por sismicidad, clima, disponibilidad de pique y planta de hormigón).

El mismo análisis pero para Diablo Regimiento arroja que las interferencias que se generan por la disponibilidad de equipos alcanzan un 93% del total de todas las horas perdidas por interferencias.

Un análisis más reciente realizado por Bustos (2015) señala que para el año 2014 Mina Esmeralda (División El Teniente, CODELCO) obtuvo un 9% de incumplimiento del programa de obras. Según la metodología seguida por el autor, resultaron como principales causas de este incumplimiento: 18 factores atribuibles al contratista, 9 atribuibles al mandante y 3 a factores exógenos.

Tabla 6: Interferencias atribuibles al contratista (Bustos, 2015).

Factores atribuibles al contratista
1. Falta de control en la secuencia de cada actividad constructiva.
2. Clima laboral interior de la empresa contratista.
3. Subexcavaciones producto deficientes tronaduras (genera re-procesos).
4. Espera de materiales en postura o en bodega para comenzar la actividad.
5. Aumento de las interferencias por desincronización en la secuencia constructiva.
6. Mayores tiempos por traslado del personal (entrada-salida turno) y colación.
7. Fallas de equipos no previstas disminuye disponibilidad (falta de mantención).
8. Paralización de la obra por accidentes del personal contratista.
9. Subestimación del contratista de los recursos necesarios para realizar la obra.
10. Tiempos de espera por movimientos de servicios (aire-agua-eléctricos-iluminación).
11. Interferencias por múltiples trabajos simultáneos programados.
12. Escases de personal calificado en Preparación Minera en la organización superior.
13. Acumulación de marinas en galerías que interfiere con rutas de palas y obras civiles.
14. Insuficiente stock de repuestos críticos para reparación de equipos.
15. Disponibilidad de hormigón en forma oportuna (Planta y áridos).
16. Retraso en la llegada de insumos (pernos, malla, planchuelas, cables, etc.).
17. Vencimiento de exámenes ocupacionales de operadores de equipos.
18. Deficiencias en la distribución de la ventilación (mangas y ventiladores).

Tabla 7: Interferencias atribuibles al mandante (Bustos, 2015).

Factores atribuibles al mandante
1. Interferencias con la Operación (producción).
2. Interferencias por alta concentración de trabajos programados en un área reducida.
3. Insuficiente ventilación (subniveles de ventilación).
4. Escases de vaciaderos de marina.
5. Incorporación de nuevas políticas (estándares) de seguridad.
6. Reparaciones imprevistas.
7. Logística de traslado (buses) de personal dentro de la Mina.
8. Comunicaciones dentro de la Mina.
9. Espera por definición de diseños o información topográfica.

Tabla 8: Interferencias exógenas (Bustos, 2015).

Factores exógenos
1. Aparición de litologías complejas o estructuras mayores.
2. Infiltraciones mayores de agua.
3. Relaciones laborales con sindicatos transversales.

En el caso particular de los proyectos de excavaciones horizontales, durante la etapa de construcción los principales problemas que se pueden presentar se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9: Problemas asociados a la construcción de túneles (Gacitúa, 2012).

Tipo	Problema	Consecuencia
Fallas de Procedimiento	Falla en el control de las aguas subterráneas.	El agua acumulada puede dificultar el proceso de excavación y aumenta los riesgos de colapso.
	Problemas debido a la detonación.	Puede generar daño excesivo o colapsos. Es necesaria la aislación por tronadura.
	Incorrecta ubicación de barrenos.	Puede generar sobreexcavación, lo cual impacta directamente el ciclo de construcción del túnel.
	Incorrecta instalación de anclajes.	En caso de no cumplir con los requerimientos especificados en el diseño de sostenimiento se deben colocar nuevos anclajes (genera reprocesos).
	Incorrecta proyección de shotcrete.	Pueden producirse sombras (volúmenes vacíos), generando problemas posterior en cuanto a la estabilidad de la obra.
	Colapso del portal de entrada/salida.	Costo de reconstrucción elevado.
Fallas de Administración o Mantención	Dificultades de acceso a la obra.	Por ejemplo, cierre de accesos principales por condiciones climáticas.
	Problemas de suministro de materiales e insumos.	Puede haber déficit de materiales e insumos que paralizan la obra, o bien, existir problemas de logística (distancia y disponibilidad de los insumos cuando se administran por terceros (Ejemplo: planta de hormigón).
	Problemas de mantención y operación de equipos.	Generación de fallas no programadas provocan paralización de los equipos o maquinaria que puede afectar durante un periodo extenso la obra.
	Problemas con subcontratistas.	Por ejemplo, subcontratar el servicio de manejo de explosivos.
	Accidentes.	Si ocurren pueden generar paralizaciones de la faena y atrasos generales.
	Interferencias entre especialidades.	Se necesitan de diversas disciplinas que operan conjuntamente y que requieren de una cuidadosa coordinación para no intervenir entre ellas.

2.7. Conclusiones del Capítulo

Las principales conclusiones de los antecedentes mostrados en este capítulo son:

- En el caso del desarrollo de túneles independientes se esperan rendimientos mayores por frente que en el caso de múltiples frentes.
- Para múltiples frentes el rendimiento de los desarrollos es dependiente de la cantidad de frentes de trabajo disponibles.
- En el caso de desarrollos con múltiples frentes existe evidencia de rendimientos cercanos a los 300 m/mes, sin embargo, la experiencia canadiense indica un promedio de 195 m/mes para múltiples frentes, mientras que la experiencia australiana un promedio de 158 m/mes. En Chile la experiencia para múltiples frentes no es más favorable. En el caso estudio de Mina El Teniente se tiene que para el nivel de hundimiento se obtienen valores entre 136 – 151 m/mes, mientras que para el nivel de producción, en el cual se tiene mayor cantidad de frentes activas se puede obtener hasta 308 m/mes con 6 frentes activas.
- Los proyectos de excavaciones horizontales son particularmente adecuados para modelos de simulación debido a la repetitividad de los ciclos durante su construcción y existen distintos lenguajes/software para generar modelos de este tipo.
- Los software de simulación para fines generales tienen como ventaja: ser flexibles ya que permiten adaptar los modelos a los requerimientos del usuario mediante codificación, permiten analizar escenarios y realizar análisis de sensibilidad, se pueden incorporar interferencias operacionales e identificar cuellos de botella en el sistema. Sin embargo, tienen como desventaja ser exhaustivos en capacitación y tiempo para el programador y tener dificultades para importar los diseños.
- El software SimMine se presenta como una gran oportunidad para la industria debido a que está enfocado a la preparación minera y es simple de utilizar, sin embargo, es poco flexible y recibe parámetros de entrada y entrega resultados sin obtener mayor análisis de lo que pasa internamente.
- Finalmente, del análisis de las interferencias que ocurren en proyectos de preparación minera se extrae que éstas pueden ser atribuidas al mandante, al contratista o ser factores externos y, tanto la ocurrencia de ellas como su impacto en los rendimientos dependerán de cada faena en particular. La mayoría de las interferencias están directamente relacionadas a problemas de gestión una vez que ya se está en operación, y por lo tanto durante la etapa de planificación se carece de este tipo de información preliminar lo cual puede afectar los rendimientos estimados.
- Dado lo anterior, se desea proponer una metodología para la unidad básica de la preparación minera, los desarrollos horizontales, considerando interferencias que permiten estudiar el sistema con mayor realidad.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

3.1. Introducción

El siguiente capítulo presenta la metodología propuesta para la creación de un modelo de simulación de preparación minera enfocado en los desarrollos horizontales con múltiples frentes en minería tipo Block/Panel Caving.

Esta metodología incorpora además los pasos a seguir para la construcción de un modelo de simulación utilizando el software de simulación de eventos discretos ProModel.

3.2. Metodología Propuesta

La metodología se compone de 8 etapas y está basada en la metodología elaborada por Banks (1999) para proyectos de simulación con fines de generales. Sin embargo, la metodología aquí presentada se orienta a proyectos de desarrollos horizontales en minería tipo Block/Panel Caving.

Las principales etapas de la metodología propuesta se muestran en la Figura 5 y posteriormente se detallan cada una de ellas.

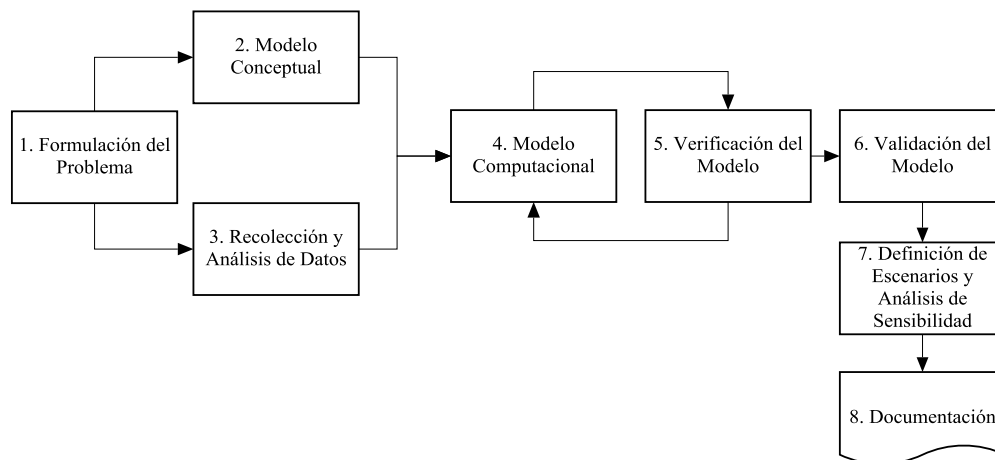


Figura 5: Principales etapas de la metodología propuesta.

3.2.1. Etapa 1: Formulación del Problema

La formulación del problema define los elementos básicos del proyecto, esto es, los objetivos (general y específicos) del modelo de simulación, los alcances y el límite de batería. Además, en esta etapa también se genera una planificación del trabajo, entregando por ejemplo, una Carta Gantt de la realización del proyecto.

a) Objetivos

Los objetivos deben estar relacionados a lo que se espera del estudio de simulación. En general los modelos de simulación enfocados en la preparación minera tienen como objetivo validar los planes de construcción entregándole variabilidad al sistema.

b) Alcances

El alcance hace mención al nivel de detalle del modelo. Es importante definir bien los alcances del modelo debido a que éstos están directamente relacionados con los supuestos, limitaciones y restricciones del modelo.

c) Límite de Batería

El límite de batería indica desde donde comienza el sistema modelado y donde termina. Lo anterior condiciona los parámetros de entrada y las variables de salida del modelo.

Es recomendable generar un esquema visual para representar cual es el límite de batería de un modelo.

Por ejemplo, si los recursos principales del modelo de simulación serán los equipos, entonces bastará con un esquema que indique el movimiento de éstos por todas las rutas posibles, y esto dará una idea de que parámetros considerar más adelante.

d) Carta Gantt

Este plan de trabajo puede incluir las etapas de la metodología o la disgregación de ellas en el caso que corresponda, desde la formulación del problema hasta la documentación e implementación.

3.2.2. Etapa 2: Generación de Modelo Conceptual

Antes de comenzar a codificar un modelo de simulación se debe confeccionar un modelo conceptual. El modelo conceptual tiene como objetivo servir como guía para la construcción del modelo computacional, definirlo es útil para identificar las interacciones que existirán en el sistema. El modelo conceptual debe ser sometido a la revisión de algún analista o experto del tema para validarlo antes de su codificación.

Los aspectos más relevantes en un modelo conceptual para los desarrollos horizontales del nivel de producción de una mina explotada mediante Block o Panel Caving son:

a) Elementos Principales del Modelo

Los elementos principales del modelo que se deben definir en esta etapa se pueden dividir en:

i. Lugares principales

Los lugares principales son aquellos que pudieran repercutir en los rendimientos de los desarrollos, como por ejemplo:

Accesos Principales

Es importante que el layout del área que se va a simular considere la ubicación y la longitud de los accesos principales del área a desarrollar.

Muchas veces se trata de un sólo acceso destinado para el ingreso del personal y para el ingreso de insumos básicos para la minería. Cuando esto ocurre, suele darse el caso de que los desarrollos más cercanos se priorizan dejando de lado los desarrollos con acceso más difícil.

Además, cuando se comparten los accesos entre el área de producción y el área de preparación minera se generan interferencias que afectan el rendimiento de preparación.

Infraestructura Principal

La ubicación del barrio cívico, de los talleres de mantención, bodegas, petrolera, polvorín, vaciaderos de marina, oficinas de producción y preparación, etc., son relevantes siempre y cuando una vez estudiado el sistema éstos repercutan de manera importante en los rendimientos.

Barrio Cívico

La lejanía entre el Barrio Cívico y las frentes de trabajo provoca que los trabajadores pierdan mucho tiempo en traslado.

Si se da el caso del uso de incorporación de oficinas y/o casinos modulares, los cuales se van moviendo a medida que se avanza con el frente de preparación para disminuir los tiempos de traslado, entonces se puede suponer que estos traslados no afectan de manera significativa el ciclo constructivo.

Vaciaderos de Marina

Contar con vaciaderos de marina es de suma importancia para la incorporación de área, y por ende, para el desarrollo de la preparación minera, ya que de no contar con un vaciadero de marina habilitado, las cuadrillas de trabajo acopian el mineral, lo cual genera re acarreo del mineral hacia los vaciaderos habilitados.

El principal problema que se genera asociado a los vaciaderos de marina es su disponibilidad debido a por ejemplo paradas de planta de procesamiento que mantienen los vaciaderos cerrados.

Otro problema relevante se genera por la lejanía de los vaciaderos en relación a la zona que se está preparando, en este caso se suele usar un sistema de traslado de marina con camiones.

En resumen, interesa conocer la cantidad, ubicación y disponibilidad de los vaciaderos de marina.

Abastecimiento de Hormigón

La lejanía de la planta de hormigón con la zona en preparación podría generar tiempos de espera muy largos afectando los rendimientos de preparación si no existe una buena gestión de este insumo.

Otro problema importante que afecta al desarrollo de la preparación minera son las paradas de la planta de hormigón no programadas, ya que impiden el desarrollo continuo de las actividades de preparación, afectando en mayor medida a las obras civiles.

Petroleras

Destinadas al abastecimiento de combustible de vehículos menores, camiones, equipos mayores y menores y buses, ya sean de la empresa contratista o del mandante.

El principal problema que se genera asociado a las petroleras, y que afecta directamente a los rendimientos de preparación, es su ubicación, debido a que cuando se aleja el frente de preparación, los equipos deben recorrer mayores distancias para su abastecimiento.

Taller de Mantenición

Las idas al taller de mantención se darán en el caso de las mantenciones programadas y para fallas mayores que no se pueden reparar en terreno.

La ubicación del taller de mantención puede ser un factor que impacta de manera significativa los rendimientos debido al traslado de los equipos.

Polvorines y bodegas

Los polvorines están destinados al abastecimiento de explosivos, el principal problema, al igual que en los casos anteriores, se genera por la lejanía de los polvorines a los frentes de trabajo, debido a que cuando se aleja el frente de preparación es necesario recorrer una mayor distancia para el abastecimiento.

Lo mismo ocurre para los pañoles (bodegas destinadas a almacenar los componentes principales de los equipos mineros, los cuales serán utilizados durante las mantenciones programadas y eventuales fallas operacionales de las máquinas) u otras bodegas de abastecimiento en general.

ii. Equipos principales y sus características

Primero es necesario definir cómo está compuesta una cuadrilla de trabajo y cuántas cuadrillas disponibles se dispondrán para trabajar. En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de los equipos principales que componen una cuadrilla de trabajo para las excavaciones horizontales.

Esta cuadrilla podría ser asignada, por ejemplo, para un máximo de cantidad de frentes de trabajo. Esto finalmente se traduce en una restricción para los rendimientos.

Tabla 10: Ejemplo de cuadrilla para excavaciones horizontales con fortificación pernos-malla-shotcrete.

Actividad	Excavación	Fortificación (Pernos)	Fortificación (Malla)	Fortificación (Shotcrete)
Equipos	Jumbo 2 brazos	Jumbo 1 brazo	Jumbo 1 brazo	Camión Mixer
	Scoop	Equipo de Levante	Equipo de Levante	Roboshot
	Equipo de Levante	Lechadora		
	Cargador Explosivos			

Luego, se debe recopilar información de los equipos a utilizar, como por ejemplo:

- Capacidad de equipo carguío/transporte.
- Capacidad de estanque (petroleo)
- Capacidad Camiones Mixer.
- Velocidad del equipo.

La velocidad de los equipos impacta en los tiempos de traslado, y al ir aumentando las distancias con los desarrollos, puede ser una variable sensible en el modelo. Debido a que los equipos transitan en vías de una sola dirección, el equipo más lento podría actuar como cuello de botella.

Es recomendable no utilizar velocidades promedio, a pesar de que es el dato más rápido de adquirir. Se sugiere utilizar, en el caso de los equipos de carguío y transporte, una distribución de

velocidad para el equipo vacío y cargado. Además, para todos los equipos se debería considerar si el equipo está recorriendo una vía inclinada u horizontal (ver Figura 6).

También se puede considerar una aceleración y una velocidad de frenado, o bien una distribución que genere ese efecto en la velocidad de los equipos.

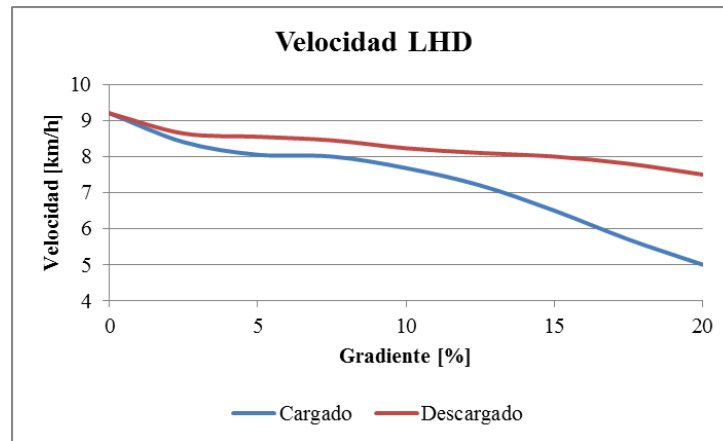


Figura 6: Variación de la velocidad de un LHD (vacío/cargado) a diferentes inclinaciones. Elaboración propia a partir de Li (2012).

iii. Actividades del ciclo constructivo

Para las excavaciones horizontales la lista de actividades por ciclo es uno de los elementos más relevantes junto con su duración debido a la repetitividad de ellas en cada ciclo. Además, en las formas de planificar los desarrollos hoy en día es una de las pocas cosas que se consideran.

Una vez realizada la lista de actividades principales por ciclo, se le asociará uno o varios equipos de los definidos anteriormente a cada actividad, tal como se indica en la Tabla 10 mostrada anteriormente.

iv. Estrategia de Desarrollo

Otro aspecto relevante cuando se prepara un área es la prioridad con que se desarrollará cada una de las frentes. Es necesario definir en el modelo cual es el plan de desarrollo que se seguirá debido a que los resultados pueden variar dependiendo de la estrategia de construcción.

La estrategia de desarrollo hace alusión a las decisiones que se toman para ir desarrollando el área. En la realidad, la estrategia está dada por los jefes de turno, los cuales generalmente intentan maximizar el número de disparos por día además de tomar otro tipo de decisiones durante el turno.

En un modelo se pueden simular estas decisiones entregando criterios, como por ejemplo priorizar las frentes que llevan mayor tiempo esperando, o bien, priorizar las frentes que estén más cercanas. En el primer caso se tenderá a realizar un avance más proporcional de los desarrollos, mientras que en el segundo caso se tendrá mayor rendimiento en las frentes cercanas y en las más lejanas el desarrollo será más lento, sin embargo, podría ser que en promedio el rendimiento del área considerando todas las frentes activas sea similar en ambos casos.

En el modelo de simulación existe la libertad de crear distintos criterios para los desarrollos y generalmente se trata de minimizar o maximizar alguna variable. Por ejemplo, se puede, entre otras:

- Maximizar el avance de las frentes.
- Minimizar la desviación del avance de las frentes.
- Maximizar la utilización de las frentes.

Cabe destacar que esta estrategia se seguirá durante la realización de toda la simulación, pero una forma de acercarse más a la realidad del modelo es hacer que dependiendo del comportamiento del sistema durante el transcurso de la simulación se consideren distintos criterios que se vayan actualizando.

v. Estrategia de Traslado de Marina

La estrategia de extracción de marina tiene relación con las consideraciones y restricciones durante esta actividad. En principio se suelen considerar dos casos:

1. Sólo la utilización de LHD para el traslado de marina.
2. El uso de equipos de carguío y camiones.

El segundo caso es el más común debido a la lejanía de las frentes con los puntos de vaciado, sin embargo, en cualquiera de los dos casos se suelen considerar estocadas de acopio de material debido a que esto permite acortar los tiempos de traslado de marina. En ese caso se suelen poner estocadas cada cierta distancia y muchas veces se asigna un turno completo para el retiro de las marinas de esos puntos cuando éstos están llenos.

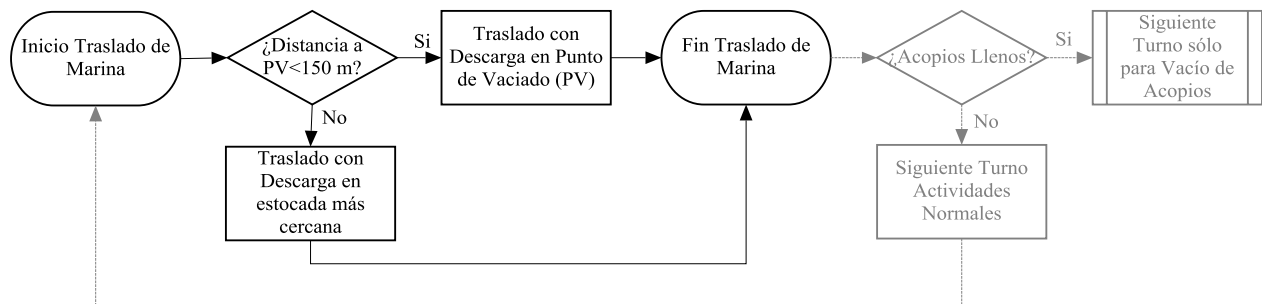


Figura 7: Ejemplo de Estrategia de Carguío y Transporte de Marinas.

Como se observa en la Figura 7, al finalizar el traslado de marina se puede tomar la decisión de seguir con las actividades con normalidad o realizar un proceso diferente, en este caso asignar un turno sólo para traslados de marina. El ejemplo anterior es tanto para el caso con equipos de carguío más el uso de camiones como para el sistema que sólo utiliza LHD para el carguío y transporte.

b) Layout

El layout determina el movimiento de los equipos, las distancias, y por ende, los tiempos de traslado.

Cuando se modelan las excavaciones mineras el sistema es dinámico, es decir, cambia con el tiempo. En el caso particular de los desarrollos horizontales existirán distancias fijas y distancias

variables en el layout, donde las distancias que varían son la longitud de las galerías que se van desarrollando. Debido a esto, en esta etapa interesa conocer:

- Tipo de malla y sus dimensiones.
- Disposición de los puntos más relevantes del sistema.

Los puntos más relevantes del sistema se identificaron con anterioridad, y en esta etapa es importante determinar su ubicación en el layout (gráficamente).

c) Parámetros de Entrada

Los parámetros de entrada son los valores, números o distribuciones de probabilidad relevantes para el sistema en general.

Los parámetros de entrada más relevantes, se definen fuera del código con el objetivo de sustituirlos con facilidad en la etapa de generación de escenarios.

Para los desarrollos horizontales interesa definir:

- Densidad de la roca [t/m^3].
- Sobreexcavación [%].
- Esponjamiento [%].
- Dimensiones de las galerías (ancho [m], alto [m], sección [m^2]).
- Avance por tronadura [m].

Lo anterior también se puede diferenciar si es mineral o estéril, y también si es para todas las galerías el mismo o valor o bien existen distintos tipo de galería (calles, zanjas, cabeceras principales, accesos, etc.).

Otros parámetros a considerar:

- Factor de llenado de los equipos de carguío/transporte [%].
- Largo inicial de las calles a desarrollar [m]

Finalmente, y no menos importante, se deben ingresar los tiempos para cada actividad del ciclo.

d) Variables de Salida

Las variables de salida se utilizan normalmente para medir el desempeño general del sistema, medir el desempeño de los equipos y/o para entregar indicadores para validar.

Al igual que los parámetros de entrada, se pueden exportar las variables más importantes a planillas de cálculo y así hacer uso de esta información más adelante.

Dependiendo de cuál sea el objetivo final de modelo se sugiere considerar como variable(s) de salida:

- Rendimientos por frente de trabajo o en total ([m/día], [m/mes]).
- Número de frentes de trabajo activas en el tiempo.
- Utilización de las frentes de trabajo.
- Estado final de las frentes de trabajo.

- Índices operacionales para los equipos de desarrollo (disponibilidad física, utilización, etc.).

El estado final de las frentes de trabajo hace referencia a que en algunos casos es útil definir las condiciones en que quedó una frente al finalizar el turno, o al finalizar la simulación. Las variables que interesan conocer en ese caso pueden ser:

- Condición de ventilación (cantidad y calidad).
- Disponibilidad de suministros.
- Actividad del ciclo en que quedó.
- Estándares de calidad cumplidos.
- Topografía.

e) Criterios de decisión y de movimiento

Los criterios de decisión son aquellos con los que se toman decisiones dentro de un sistema y normalmente son decisiones humanas, mientras que los criterios de movimiento son más bien criterios de asignación o de gestión del tráfico en el layout, como por ejemplo: el uso de semáforos.

En proyectos de preparación minera los criterios de decisión son una de las variables más relevantes debido a que generan tiempos extra en el ciclo constructivo. La generación de tiempos extra dependerá de si se origina o no una actividad adicional, y éstas se pueden dar de manera repetitiva durante todo el periodo que dure el proyecto.

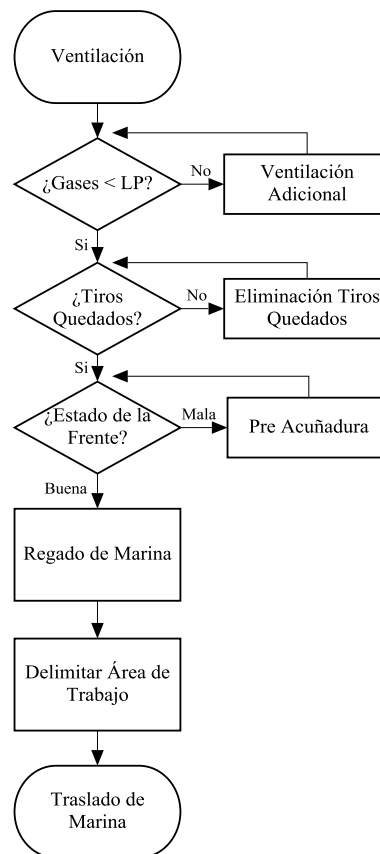


Figura 8: Ejemplo de procesos y criterios de decisión.

A modo de ejemplo, en la Figura 8 se muestra un diagrama de flujo donde se observa que el proceso desde la ventilación de la galería hasta el traslado de la marina puede variar de 4 actividades a un total de 7 actividades.

En un modelo de simulación estas actividades adicionales por lo general se pueden incluir como una probabilidad de ocurrencia por ciclo, y los tiempos, dependiendo sea el caso, serán tiempos fijos o variables (asociados a una distribución de probabilidad).

f) Modelos Paralelos

Los modelos paralelos son aquellos que acompañan al modelo base. Se utilizan para tomar decisiones o para cambiar estados que influyen en el modelo base y no tienen una ubicación física en el layout.

Modelos paralelos que se deben considerar en desarrollos horizontales son:

i. Sistema de turnos

Elaborar un calendario considerando las actividades de cambio de turno y colaciones, como por ejemplo, las charlas de seguridad y planificación, cambio de ropa, entre otras actividades, definirá las horas disponibles para trabajar por turno.

Por otro lado, si se da el caso que en la faena existen fechas en las que no se trabajará de manera planificada con anterioridad y éstas afectan el periodo del proyecto que se va a simular, también deben ser consideradas a modo de calendario.

ii. Horario para tronaduras

Debido a la evacuación antes de las tronaduras y a la ventilación post tronadura, para asegurar menor interferencia en el sistema, usualmente se trona a horarios definidos. En ese caso se pueden realizar una o varias tronaduras sólo dentro de los horarios establecidos.

Por ejemplo, en la Figura 9 se muestra un turno de 12 horas, en este caso de 06:00 a 18:00 horas. Se puede ver que descontando colación y cambio de turno se tienen 9 horas disponibles, de las cuales 1,5 horas son destinadas a evacuación, tronadura y ventilación, aprovechando el cambio de turno, y ese será el único horario en que se podrán realizar las tronaduras.

06:00 – 07:00	07:00 – 08:00	08:00 – 09:00	09:00 – 10:00	10:00 – 11:00	11:00 – 12:00	12:00 – 13:00	13:00 – 14:00	14:00 – 15:00	15:00 – 16:00	16:00 – 17:00	17:00 – 18:00	

- : cambio de turno/colación
- : trabajo
- : horario para evacuación y tronadura
- : horario para ventilación

Figura 9: Ejemplo de un turno que considera horario especial para tronaduras.

iii. Falla de equipos

Este ítem corresponde al cuello de botella de los rendimientos de preparación ya que en la práctica los equipos se encuentran fuera de servicio más tiempo de lo establecido.

Generalmente se utiliza el Tiempo Medio Entre Fallas (Mean Time Between Failures, MTBF) y el Tiempo Medio Para Reparar (Mean Time To Repair, MTTR) para replicar la frecuencia y la duración de las fallas en los distintos equipos debido a que son variables más fáciles de medir y calcular, y en muchas faenas se obtiene desde la información histórica directamente.

Otra forma de considerar la frecuencia de fallas es utilizar una distribución de probabilidad Weibull, debido a que esta distribución permite definir cualquier otra distribución cambiando sus parámetros. Para utilizar una distribución, tanto para la frecuencia de falla como para los tiempos de reparación, es necesario hacer un análisis de datos previo de las fallas de los equipos correspondientes.

iv. Mantenciones programadas de equipos.

Las mantenciones programadas son detenciones necesarias, y a diferencia de las fallas, éstas se planifican con anterioridad. Por lo tanto, para agregar las mantenciones programadas generalmente se utiliza un calendario para cada equipo con sus mantenciones, tanto con la duración de la mantención como la frecuencia con la que se realiza.

v. Petroleo

El petroleo de los equipos debe considerarse debido a que, a diferencia del caso anterior, la frecuencia del petroleo es mayor y si la petrolera se ubica a una distancia importante, el petroleo impacta de manera importante los ciclos.

La frecuencia puede definirse en función del consumo de los equipos, y al igual que en los casos anteriores, lo relevante es tanto la frecuencia como la duración de la actividad.

vi. Restricciones y otras consideraciones

Traslados de personal

Los tiempos de traslado que deben considerarse son entre:

- Barrio Cívico y la instalación en faena.
- Instalación en faena y postura.
- Postura y casino.

Cabe destacar que si en el modelo de simulación estos tiempos de traslado se consideran como un número fijo, entonces es posible considerarlo dentro del calendario del turno y restarlo a las horas disponibles del turno.

Sin embargo, aunque se resguarda que estos tiempos sean relativamente constantes, en la realidad estos tiempos siguen una distribución de probabilidad, debido a que son tiempos que dependen fuertemente del personal.

Condiciones de terreno

Un cambio en las condiciones del terreno podría cambiar el tipo de soporte utilizado o exigir actividades extra, por ejemplo, la presencia de agua o presencia de roca de mala calidad.

El efecto del agua durante la construcción se controla normalmente con medidas de drenaje generando mayores tiempos de espera y los cambios en los tipos de roca generan en algunos casos cambio de la clase de soporte, variando los tiempo de fortificación.

Además, el control topográfico por avance puede determinar si existe sobreexcavación que significará fortificación adicional y aumento en volumen de marina.

Curva de aprendizaje

La curva de aprendizaje corresponde a la habilidad de aprender mediante la realización de la misma actividad repetidas veces, por lo tanto, en proyectos de minería subterránea y sobre todo de desarrollos mineros es una variable importante de considerar. Por lo general esto se observa en gran medida durante los primeros meses de desarrollo, desde el primer día hasta una llegada a régimen de avance por parte de la empresa contratista.

Tener conocimiento de este tipo de eventualidad permite incorporar estos rendimientos en el plan de manera anticipada y ofertar valores más bajos para los rendimientos contractuales al inicio de los desarrollos.

Cierre de calles durante traslado de marina

En algunos casos durante el traslado de marina se considera una ruta exclusiva para esta actividad debido a que cuando las distancias son elevadas, el traslado de marina es un tiempo que impacta fuertemente el ciclo.

Esta restricción permite obtener tiempos menores de traslado de marina pero a su vez afecta las actividades de otras frentes.

Disponibilidad de suministros

Cuando se realizan tronaduras cercanas a las redes de agua y aire comprimido, éstas se dañan provocando corte en las redes o una disminución de presión.

Debido a que muchas actividades del ciclo constructivo de excavaciones horizontales dependen de la conexión a electricidad, agua o aire comprimido, la disponibilidad de estos suministros es un aspecto que debe considerarse debido a que la falta de cualquiera de ellos significa una detención en la frente.

Falta de insumos/materiales en la frente

La falta de insumos/materiales o herramientas una vez que ya se está en postura, genera traslados innecesarios que se traducen en tiempos en que la frente de trabajo se encontrará detenida.

Interferencia con la Producción

Este aspecto aplica a los casos de Panel Caving. Básicamente la interferencia que existe impacta en la disponibilidad de los puntos de vaciado y rutas que comparten los equipos.

Zona de transición

Esto aplica en el caso de un Panel Caving. La Zona de Transición es la más riesgosa desde el punto de vista de exposición del personal y equipos a los daños asociados a la actividad sísmica, por lo tanto, debe evitarse el operar dentro de ella y esta genera una distancia que restringe los

desarrollos. Por lo tanto, se da el caso que la producción exige los desarrollos para seguir avanzando, y a su vez los desarrollos exigen el avance del hundimiento para poder seguir incorporando áreas.

Otras consideraciones

Otros aspectos relevantes a considerar pueden ser, la probabilidad de:

- Falta de operarios.
- Aislaciones (por alerta sísmica o post tronadura).
- Problemas por clima.
- Movilizaciones.
- Simulacros de incendio.
- Accidentes.

3.2.3. Etapa 3: Recolección y Análisis de Datos

De manera paralela a la generación del modelo conceptual es posible comenzar la recopilación de la información estadística de las variables del modelo.

Para analizar los parámetros de entrada primero se debe conocer la proveniencia de los datos, los cuales pueden provenir de:

- Opinión de expertos
- Base de datos
- Toma de datos empíricos

Todos los casos son igual de válidos y los parámetros de entrada pueden provenir de uno o de varios de los casos anteriores, no son excluyentes.

Si se desea utilizar una recopilación de parámetros de entrada mediante la opinión de expertos primero se debe probar que no exista otra vía de encontrar información.

La metodología para utilizar este tipo de información es entrevistar a la mayor cantidad de expertos, donde se debe generar un set de preguntas del proceso en detalle y definir si los parámetros se mueven en rangos o son más bien estáticos.

En el caso de ser valores estáticos entonces se pueden utilizar valores determinísticos y se insertan directamente en el modelo de simulación. Si el comportamiento se mueve dentro de un rango de valores entonces se define como una variable estocástica y se busca con el o los expertos el comportamiento del dato y se intenta acotar su variación.

Muchas veces se pueden considerar distribuciones de probabilidad utilizadas para algunos comportamientos típicos. Por ejemplo para los tiempos entre llegadas se sugiere utilizar una distribución de probabilidad exponencial, mientras que para el tiempo entre fallas se sugiere utilizar una distribución de probabilidad Weibull.

Por otro lado, si la información se obtiene de un levantamiento de datos empíricos o de bases de datos, la información debe ser organizada para realizar primero un filtrado de datos y así generar distribuciones de probabilidad mediante un ajuste de datos. A estos ajustes se deben aplicar test de bondad de ajuste para finalmente agregar estas distribuciones al modelo.

Al finalizar la recolección y análisis de datos para todas las variables del modelo, se tendrán las condiciones necesarias para generar una versión preliminar del problema que se está simulando.

3.2.4. Etapa 4: Generación del Modelo Computacional

En esta etapa se integra la información obtenida a partir del análisis de los datos, los supuestos del modelo y todos los datos que se requieran para tener un modelo lo más cercano posible a la realidad del problema bajo estudio.

La elección del software a utilizar se debe haber determinado con anterioridad y esta decisión estará influenciada por los objetivos y alcances del proyecto, además de la habilidad y experiencia del equipo de trabajo con la simulación.

En el siguiente capítulo se detalla una metodología para la generación de un modelo computacional para los desarrollos horizontales en minería tipo Block/Panel Caving mediante el software de simulación ProModel.

3.2.5. Etapa 5: Verificación del Modelo

Una vez que se han identificado las distribuciones de probabilidad de las variables del modelo y se han implantado los supuestos, es necesario realizar un proceso de verificación y comprobar que todos los parámetros usados en la simulación funcionen correctamente.

Se trata de un proceso iterativo y se realiza hasta que se termina la construcción del modelo computacional y se pasa a la siguiente etapa de validación del modelo.

En términos simples, la verificación del modelo consiste en determinar si el modelo está haciendo lo que debería estar haciendo. Esto puede ser analizando el comportamiento de algunas variables, de los resultados finales de la simulación o también observando la animación del sistema modelado.

3.2.6. Etapa 6: Validación del Modelo

La validación es el proceso que sirve para determinar el grado de semejanza entre el modelo de simulación y la realidad que se pretende representar, por lo tanto es de las etapas más relevantes del proyecto.

En el caso de que se requiera validar un modelo que no existe en la realidad éste se debe validar de manera conceptual. Una forma de realizarlo es validar el modelo por partes y otra forma es mediante datos históricos de sistemas similares.

Validar por partes es aplicable cuando el sistema a simular es el conjunto de varios sub sistemas, algunos de ellos existen ya en la actualidad. De esta manera se puede validar su comportamiento de manera separada.

Validar mediante datos históricos tiene relación con que los resultados estén dentro de rangos previamente estudiados mediante un benchmarking de proyectos con condiciones similares u otros estudios similares.

3.2.7. Etapa 7: Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad

Tras validar el modelo es necesario establecer los escenarios que se quieren analizar. Una manera muy sencilla de determinarlos consiste en utilizar un escenario pesimista, uno optimista y uno intermedio para la variable de respuesta más importante.

Sin embargo, es preciso tomar en cuenta que no todas las variables se comportan igual ante los cambios en los distintos escenarios, por lo que tal vez sea necesario que más de una variable de respuesta se analice bajo las perspectivas pesimista, optimista e intermedia.

Una vez que se obtienen los resultados de los escenarios es importante realizar pruebas estadísticas que permitan comparar los escenarios con los mejores resultados finales mediante análisis de sensibilidad. Si dos de ellos tienen resultados similares será necesario comparar sus intervalos de confianza respecto de la variable de respuesta final.

3.2.8. Etapa 8: Documentación

Finalmente, se debe realizar el reporte de los resultados juntos con los análisis de los mismos en base a los objetivos del proyecto.

Posteriormente, si el modelo de simulación base está validado se puede implementar a distintos casos estudio.

3.3. Resumen

Con el objetivo de ordenar lo presentado en este capítulo se muestra una tabla resumen de toda la información relevante que debe ser tomada en cuenta antes de la codificación del modelo de simulación.

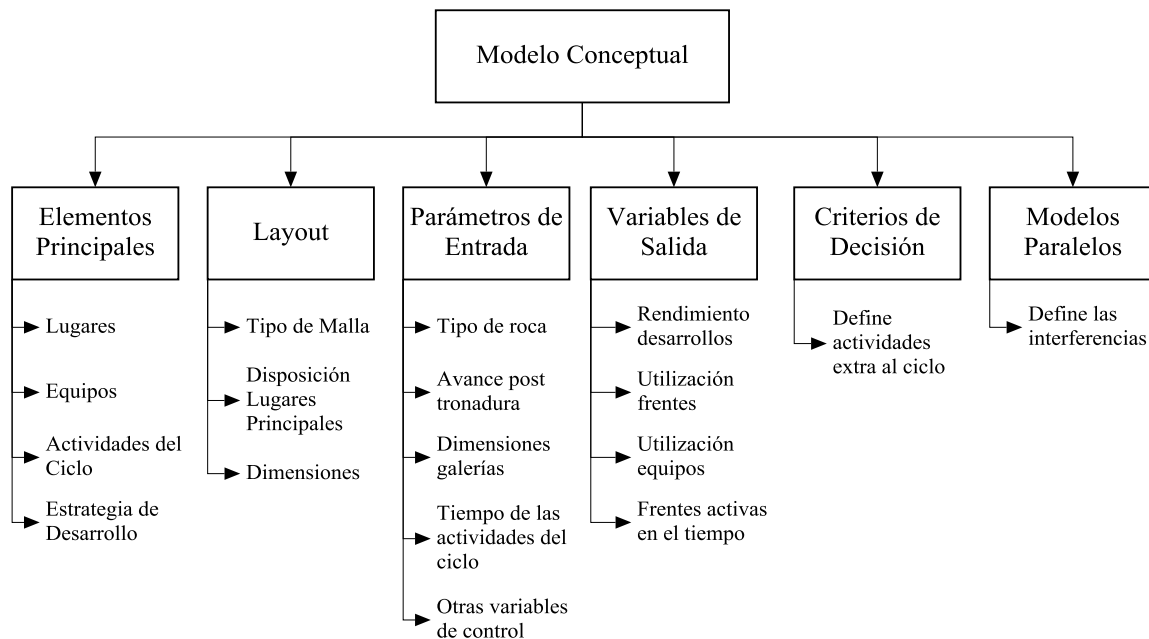


Figura 10: Resumen de las variables a considerar dentro del Modelo Conceptual en proyectos de simulación de desarrollos horizontales.

3.4. Conclusiones del Capítulo

Las conclusiones asociadas a la metodología propuesta se enlistan a continuación:

- La metodología propuesta aplica a proyectos de preparación minera enfocada a desarrollos horizontales en minería tipo Block/Panel Caving.
- El modelo conceptual es la etapa más exhaustiva en cuanto a recopilación y análisis de la información, y permite definir una línea base para un posterior levantamiento de datos en terreno.
- El modelo conceptual es la guía constructiva para la codificación del modelo de simulación independiente del software a utilizar y define qué variables deben ser incorporadas en el modelo de simulación mientras que la etapa de construcción del modelo de simulación define cómo se usarán.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EN PROMODEL

4.1. Introducción

En el capítulo anterior se mencionó la codificación del modelo de simulación, posterior a la etapa de la creación del modelo conceptual.

La codificación del modelo se puede realizar en diversos tipos de software o lenguajes. En este caso se presenta una metodología para la creación de un modelo de simulación orientado a proyectos de desarrollos horizontales mediante el software ProModel, el cual corresponde a un software de simulación de eventos discretos para fines generales.

4.2. Elementos básicos en ProModel

Primero se enlistan los elementos básicos que utiliza el software, y que permitirán definir la metodología:

- Entidades (*Entities*)
- Locaciones (*Locations*)
- Rutas (*Path Networks*)
- Recursos (*Resources*)
- Llegadas (*Arrivals*)
- Procesos (*Process*)
- Asignación de Turnos (*Shift Assignments*)
- Variables (*Variables*)

4.3. Metodología

1) Definir las entidades

Una entidad es cualquier elemento que el modelo procese. En este caso se definirán como entidades las actividades principales del ciclo constructivo. Por ejemplo:

Entidad 1 → Actividad 1: perforación
Entidad 2 → Actividad 2: carguío explosivos
Entidad 3 → Actividad 3: tronadura
Entidad 4 → Actividad 4: marina
Entidad 5 → Actividad 5: acuñadura
Entidad 6 → Actividad 6: fortificación

Estas actividades se desencadenarán en las frentes de manera secuencial, donde cada una de ellas estará en la frente por un tiempo determinado o dado por una distribución.

El tiempo en que estén estas actividades (entidades) en la frente será definida por el usuario (número o distribución) y se verá afectada por sucesos paralelos en el sistema (cambios de turno, mantenciones, etc.).

2) Definir las locaciones

Las locaciones corresponden a los lugares en el sistema en el que las entidades son procesadas, almacenadas o alguna otra actividad de toma de decisiones.

En este caso, las locaciones son los lugares principales detallados en el Modelo Conceptual del capítulo anterior (puntos de vaciado, talleres, petroleras, etc.), además de cada frente.

Para cada locación se define:

- Capacidad (capacidad de entidades por locación).
- Cantidad (número de locaciones con las mismas características).
- Disponibilidad (puede ser definida por horario, por uso, por cantidad de entidades procesadas, entre otras).

Dada la particularidad de las excavaciones horizontales se debe definir como capacidad de una frente de trabajo (locación) una (1) sola entidad, esto significa que no se realizarán dos actividades de manera simultánea en una frente.

3) Definir rutas (Path Networks)

La definición de las rutas es equivalente a construir el layout que se va a modelar considerando la ubicación y las distancias de los elementos más relevantes. El layout a desarrollar se debe construir manualmente, nodo por nodo. Cada segmento de una galería representa un avance de la galería post tronadura.

Por ejemplo, en la Figura 11 se observa una calle de 30 metros de largo, sin embargo, si el avance por tronadura es de 3 metros, se deberán realizar 11 nodos donde cada nodo representa la frente actual. En cada nodo se realiza el ciclo completo de actividades.

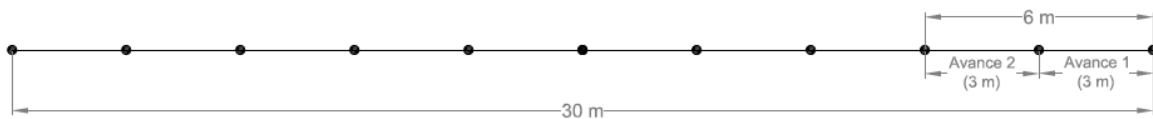


Figura 11: Ejemplo de construcción de una calle en ProModel.

4) Recursos (Resources)

Un recurso es una persona, equipo o cualquier otro mecanismo que transporte entidades o asista operaciones de entidades en locaciones.

Los recursos pueden ser dinámicos, lo que significa que se mueven a lo largo de una ruta definida, o estáticos, en la que no se produce ningún movimiento.

Los recursos entonces serán los equipos que componen las cuadrillas de trabajo de desarrollo y para los proyectos de este tipo se sugiere utilizar recursos dinámicos de modo que estos estén influenciados por sus velocidades y a la ruta que van recorriendo.

A los recursos se les puede agregar “tiempos de espera” agendados o no agendados. Por lo tanto, aquí se asignarán mantenciones programadas, fallas, petróleo etc., cada una con su respectiva frecuencia, tiempos de espera y lugar al que se dirigirán en caso de su ocurrencia.

Además, se le asignará a cada equipo sus especificaciones relativas a la velocidad (velocidad lleno, vacío, aceleración, velocidad de frenado, entre otros).

5) Llegadas (Arrivals)

En ProModel esta función define la llegada de las entidades al sistema por primera vez. Como se definieron las entidades como las actividades del ciclo, aquí se ingresa la primera actividad del ciclo, por ejemplo, la perforación en las frentes. Una vez que el modelo de simulación comienza a correr, llegan estas entidades al modelo de simulación y comienza el ciclo de construcción de manera cíclica (definidas por el usuario).

Además se define el momento en que llegan, la locación a la que llegan, la cantidad de entidades, el número de ocurrencias y su frecuencia. Por lo tanto, aquí se puede modelar la estrategia de desarrollo, es decir, la secuencia en que se irán desarrollando las calles y se utilizará como detonador de los desarrollos en una calle.

6) Procesamiento (Processing)

El procesamiento define el enrutamiento de las entidades a través del sistema y las operaciones que tienen lugar en cada locación que entran. Una vez que las entidades han entrado en el sistema, tal como se define en la tabla de llegadas (arrivals), el proceso especifica todo lo que les sucede hasta que salen del sistema.

En esta etapa se realiza la codificación de acuerdo a los requerimientos del usuario. En general se define la precedencia de las actividades, tiempos de espera (tiempos de las actividades en la frente) y condiciones de control.

7) Asignación de Turnos (Shift Assignments)

Tal como se infiere del título, la asignación de turnos consiste en insertar un calendario en el modelo de simulación que determinará las horas disponibles por día.

8) Variables

Cada frente, o galería a desarrollar, tendrá una serie de variables que indican las características principales de éstas. Como se mencionó en el capítulo anterior, estas variables pueden tener los mismos valores para cada frente o ser distintos, por ejemplo, la densidad de la roca, el largo inicial, o cualquier otra característica que se requiera definir.

Además de las variables auxiliares que sirven para controlar el modelo de simulación, como aquellas que permiten darle secuencia al ciclo de construcción y que generalmente se tratan de variables binarias, las principales variables son:

- Sección de la galería [m^2].
- Avance por tronadura [m].
- Densidad de la roca [t/m^3].
- Sobreexcavación [%].
- Esponjamiento [%].

- Factor de llenado [%].
- Capacidad de los equipos [#].
- Largo inicial de los desarrollos [m].
- Tiempo de las actividades [h].

9) Otros Elementos

a) Tiempo

Hace alusión al tiempo que durará la simulación en unidad de horas, días, meses, dependiendo del caso. También es posible realizar una simulación terminal que se detenga cuando se cumpla una condición, como por ejemplo, cuando se termine de desarrollar el área.

b) Número de réplicas

El número de corridas o réplicas es relevante cuando se consideran variables aleatorias en el modelo de simulación. Una forma de analizar si la cantidad de réplicas es suficiente es de la siguiente forma:

1. Definir la variable de salida a analizar.
2. Realizar una cantidad arbitraria de réplicas.
3. Calcular la media y la desviación estándar de la variable de salida.
4. Sustituir en la siguiente fórmula:

$$N = \left(\frac{\sigma \cdot Z}{Error \cdot X} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

N = Número de réplicas.

σ = Desviación estándar de la variable de respuesta a analizar.

Z = Estadístico normal estándar (Ejemplo: Para un nivel de confianza de 95%, Z = 1.96).

Error = Error máximo admitido.

X = Promedio de la variable de respuesta a analizar.

5. Si el número de corridas obtenido de la fórmula se cubrió con el número de corridas preliminares significa que ya no es necesario hacer más corridas, pero si el número de corridas calculado es superior al que se consideró de manera preliminar entonces deberán realizarse las corridas que sean necesarias.

c) Modelos Paralelos

Existen diversas formas de incorporar eventos paralelos en el modelo de simulación utilizando ProModel. Algunos ejemplos son:

- Asignación de Turnos (*Shift Assignments*): tal como se agregan los horarios de colación y cambios de turno, se pueden agregar tiempos de traslado e incluso los horarios para la tronadura o cualquier actividad que se desee establecer en momentos definidos del día.
- Subrutinas (Subroutines): las subrutinas permiten detonar eventos paralelos, como por ejemplo, que los tiempos de ciclo varíen en determinadas ocasiones como lo es cuando se

agrega la curva de aprendizaje o bien para que la simulación termine cuando los desarrollos finalicen.

- Tiempos de Espera (*Downtimes*): este ítem, como fue mencionado anteriormente, permite agregar directamente en los recursos (equipos) o en las locaciones eventos como fallas, mantenciones, petroleo, etc.
- Procesamiento (*Processing*): aquí la codificación es libre y se puede adaptar a los requerimientos del usuario.

4.4. Resumen

Tabla 11: Resumen de los elementos principales de ProModel y sus usos en modelos de excavaciones horizontales.

Elemento de ProModel	Usos
Entidades (<i>Entities</i>)	Actividades del ciclo.
Locaciones (<i>Locations</i>)	Lugares Principales y Frentes de Trabajo.
Rutas (<i>Path Networks</i>)	Diseño (layout).
Recursos (<i>Resources</i>)	Equipos.
Llegadas (<i>Arrivals</i>)	Primera actividad del ciclo.
Procesamiento (<i>Processing</i>)	Define: <ul style="list-style-type: none"> • Secuenciamiento de las actividades. • Tiempos de Espera. • Condiciones de Control (Ej.: cierre de calles).
Asignación de Turnos (<i>Shift Assignments</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Horas disponibles. • Interferencias (Ej.: horario para tronadura, tiempos de traslados).
Subrutinas (<i>Subroutines</i>)	Interferencias (Ej.: curva de aprendizaje, disponibilidad de servicios).
Otros	Definir: <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de la simulación (en función de los objetivos del modelo). • Número de corridas.

4.5. Conclusiones del Capítulo

De la construcción de modelos enfocados a desarrollos horizontales mediante el uso de ProModel se extrae lo siguiente:

- Es posible crear una guía de construcción de modelos de desarrollos de excavaciones horizontales utilizando ProModel dado que los elementos principales del software son fácilmente asociables a las componentes básicas del modelo conceptual propuesto en el capítulo anterior.
- Para la incorporación de interferencias el usuario tiene a su disposición diversas alternativas para incluirlas en el modelo, es decir, es una herramienta flexible y está sujeta a la experiencia en simulación/programación del usuario.
- La etapa más compleja de la metodología propuesta es la construcción del layout a desarrollar debido a que se crea nodo por nodo, teniendo hasta más de 100 nodos por calle cuando éstas superan los 300 metros de longitud. Para el caso de simulaciones a largo plazo este proceso es una limitante debido a la cantidad de nodos a incorporar manualmente. En estos casos, una oportunidad es poder cargar un layout en su etapa final de construcción que se quiere simular de manera automática y que éste se discretice de acuerdo a los avances post tronadura que corresponda en cada galería.

CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

5.1. Introducción

A continuación se presenta la aplicación de las metodologías propuestas en los capítulos 3 y 4, esto es, desde la formulación del problema hasta la validación del modelo.

5.2. Formulación del Problema

5.2.1. Objetivo

El objetivo de este estudio es crear un modelo de simulación que incorpore interferencias operacionales utilizando la metodología propuesta en los capítulos 3 y 4.

5.2.2. Alcances

- El modelo de simulación está enfocado a desarrollos horizontales realizados con el método convencional de perforación y tronadura.
- No incluye el desarrollo de labores verticales, construcción de obras civiles ni desarrollo de túneles de acceso.
- El sistema simulado comprende el nivel de producción de una operación explotada mediante Block Caving.

5.2.3. Límite de Batería

El límite de batería del modelo es desde las frentes hacia las diferentes lugares que puede ir el equipo en el Nivel de Producción (ver Figura 12).

Además, en las frentes de trabajo es donde se realizarán las operaciones unitarias del ciclo constructivo de las galerías, las cuales se detallarán más adelante.

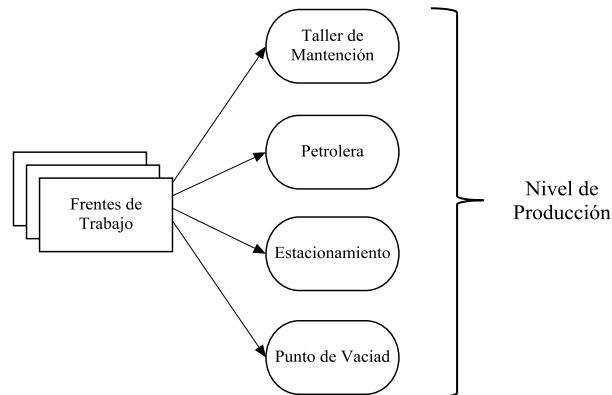


Figura 12: Límite de Batería del Modelo de Simulación Base.

5.3. Modelo Conceptual: Descripción del Caso Base

5.3.1. Lugares Principales

- **Frentes de trabajo:** las frentes de trabajos son móviles, van avanzando a medida que se generan los disparos y es en ellas donde se realizan las operaciones unitarias del ciclo constructivo.
- **Punto de vaciado:** lugar donde se vacía la marina generada post disparo, este lugar sólo es visitado por el LHD durante el traslado de marina.
- **Acceso principal:** este lugar actúa como un “estacionamiento” de equipos cuando éstos no están realizando ninguna actividad. Cuando los equipos llegan a este lugar esperan ser asignados y se encuentra fuera del área de trabajo (Figura 13).
- **Petrolera:** lugar al cual se dirigen los equipos cuando les corresponde realizar petróleo.
- **Taller de Mantenimiento:** lugar al cual se dirigen los equipos para las mantenencias programadas.

Cuando los equipos salen del área a petroler o a mantención se asume que se dirigen a punto en común (ver Figura 13).

5.3.2. Layout

El modelo de simulación considera el desarrollo de 4 calles paralelas entre sí, unidas mediante una cabecera principal. El punto de vaciado para la marina está ubicado en un punto fijo del layout. Se asume que la cabecera y la ruta hacia el punto de vaciado, más el punto mismo, ya se encuentran construidos.

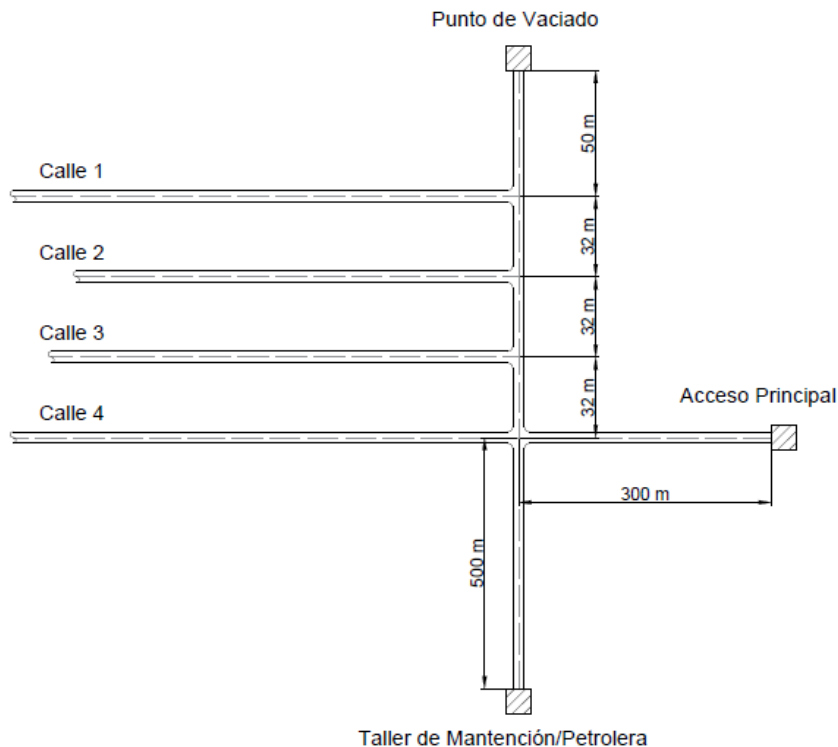


Figura 13: Layout a desarrollar en el Modelo de Simulación Base.

5.3.3. Actividades del ciclo

Se consideraron 8 actividades para completar un ciclo en la construcción de una galería, las cuales se detallan a continuación:

1. **Perforación de avance:** esta actividad incorpora el marcado de la frente, la perforación de la frente y la utilización de la bomba de drenaje producto del agua industrial utilizada durante la perforación.
2. **Carguío de Explosivos:** considera el tiempo en cargar de explosivos la frente ya perforada.
3. **Evacuación por tronadura, Tronadura y Ventilación:** estas tres actividades se unieron en una sola, sin embargo, la evacuación y la tronadura tienen un tiempo predefinido y son tratadas como una sola actividad donde los equipos cercanos detienen su actividad, y la ventilación cuenta con otro tiempo y los equipos circundantes siguen detenidos.
4. **Extracción de marina:** se considera tiempo para actividades previas como revisión de la frente, acuñadura previa y el riego de marinas. Posterior a eso se procede al traslado de las marinas al punto de vaciado.
5. **Acuñadura:** considera el tiempo de limpieza de la frente antes de la fortificación.
6. **Pernos:** esta actividad considera tanto perforación como la instalación de pernos en la frente.
7. **Malla:** considera la instalación y la sujeción de la malla en la frente.
8. **Proyección de Shotcrete:** considera el tiempo de vaciado de hormigón al equipo Roboshot y la proyección de shotcrete.

Además, en todos los casos se considera el (des)posicionamiento de los equipos en la frente.

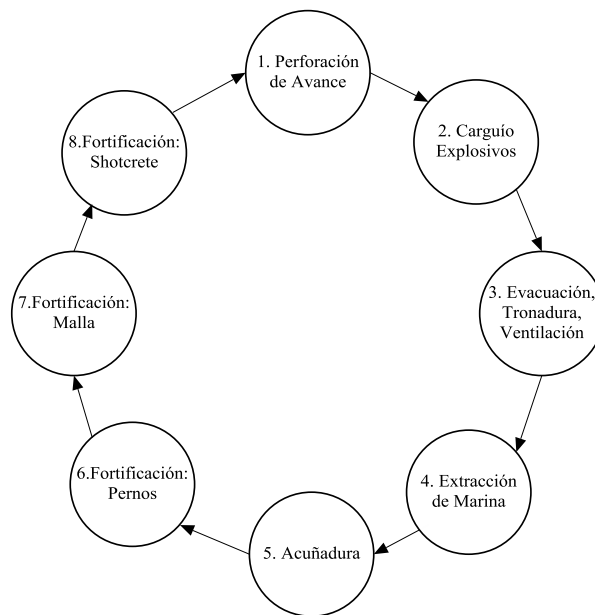


Figura 14: Actividades del ciclo de construcción de una galería en el Modelo de Simulación Base.

5.3.4. Equipos principales

Cada actividad tiene un equipo principal asociado, o más de uno dependiendo del caso, a excepción de la Evacuación, Tronadura y Ventilación. Esto representa un caso teórico y optimista debido a que por lo general las actividades no tienen a su disposición equipo exclusivo para su trabajo.

Tabla 12: Actividades del ciclo constructivo y sus equipos asociados en el Modelo de Simulación Base.

Actividad		Equipos
1	Perforación de Avance	Jumbo 2 brazos
2	Carguío de Explosivos	Equipo de Levante
3	Evacuación, Tronadura y Ventilación	-
4	Extracción de Marina	Equipo de Levante LHD
5	Acuñadura	Equipo de Levante
6	Fortificación: Pernos	Jumbo 1 brazo Equipo de Levante
7	Fortificación: Malla	Equipo de Levante
8	Fortificación: Proyección de Shotcrete	Camión Mixer Proyector de Shotcrete

Lo anterior implica un total de 10 equipos principales. No se consideran herramientas y otros equipos utilizados durante el desarrollo de las actividades.

Además de lo anterior se considera la capacidad del LHD es de 7 yd³, y las velocidades de los equipos principales se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Velocidad equipos principales en Modelo de Simulación Base.

Equipo	Velocidad (km/h)
Jumbo 2 brazos	5
Jumbo 1 brazo	5
LHD	9
Camión Mixer	6
Proyector de Shotcrete	6
Equipo de Levante	7

5.3.5. Estrategia de Desarrollo

Una vez iniciados los desarrollos, la estrategia de construcción que sigue el modelo es el de priorizar las calles que llevan mayor tiempo esperando por la misma actividad, de esta manera el desarrollo de las cuatro calles es regular.

El orden del desarrollo (inicial) es de la calle 1 a la calle 4, y éstas se desarrollan desde la cabecera principal hacia la izquierda.

5.3.6. Estrategia de Traslado de Marina

Se considera sólo la utilización de un LHD para el carguío y traslado de marina el que descarga directamente en el punto de vaciado.

5.3.7. Parámetros de Entrada

Se definieron los mismos parámetros de entrada para todas las frentes.

Tabla 14: Parámetros de entrada del Modelo de Simulación Base.

Variable	Valor
Densidad de la roca [t/m^3]	2.62
Sobreexcavación [%]	10
Esponjamiento [%]	30
Dimensiones Galería [m x m]	4.6 x 4.2
Sección Galería [m^2]	18.15
Avance por tronadura [m]	3.04
Factor de llenado	0.9
Largo inicial de las calles [m]	0

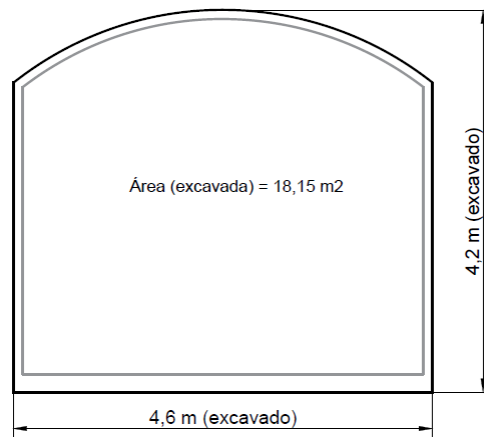


Figura 15: Dimensiones de las calles a desarrollar en el Modelo de Simulación Base.

Además, las actividades y sus tiempos correspondientes se muestran en la Tabla 15. Todos estos tiempos fueron calculados teóricamente (Ver Anexo A).

El tiempo del traslado de marinas no se considera como input del modelo debido a que el modelo calcula este tiempo de acuerdo a la velocidad de los equipos, la distancia, y de acuerdo a eventualidades que podrían afectar la actividad (interferencias).

Tabla 15: Tiempo de las actividades del ciclo constructivo del Modelo de Simulación Base.

Actividad		Tiempo [h]	Tiempo [min]
1	Marcar Frente	2.5	152
	Perforación Frente		
	Utilización de Bomba Drenaje		
2	Carguío de Tiros	0.8	46
3	Evacuación y Tronadura	1.3	75
	Ventilación		
4	Revisión Frente	2.0	117
	Pre-Acuñadura		
	Riego de Marinas		
	Traslado de Marinas		
5	Acuñadura	1.0	57
6	Pernos	4.6	278
7	Malla	1.2	74
8	Proyección de Shotcrete	1.6	97

5.3.8. Variables de Salida

Se establecieron como indicadores del desempeño del sistema:

- Rendimientos, por frente y total (m/día, m/mes, disparos/día, disparos/mes).
- Largo final de los desarrollos (m).

5.3.9. Sistema de Turnos

El modelo considera 2 turnos por día (12 horas cada uno), con 8 horas disponibles por turno. Se descontó tanto el horario de colación como las actividades de inicio y fin de turno.

5.3.10. Horario para Tronadura

Otra restricción considerada en el modelo es la realización de tronaduras al final del turno o durante el horario de colación como se muestra en la Figura 16.

06:00 – 07:00	07:00 – 08:00	08:00 – 09:00	09:00 – 10:00	10:00 – 11:00	11:00 – 12:00	12:00 – 13:00	13:00 – 14:00	14:00 – 15:00	15:00 – 16:00	16:00 – 17:00	17:00 – 18:00



 : cambio de turno/colación
 : horario para evacuación/tronadura/ventilación

Figura 16: Horario para tronadura en el modelo de simulación.

5.4. Modelos Paralelos

Una vez descrito el caso base, se presentan los modelos paralelos. Es decir, los eventos que se desencadenan paralelamente al caso base y afectan como interferencias en el sistema.

5.4.1. Falla de Equipos

La frecuencia de fallas se caracterizó mediante el tiempo medio entre fallas (MTBF), mientras que para el tiempo de reparación se utilizó el tiempo medio para reparar (MTTR). Los datos utilizados pertenecen a la información entregada por Li (2012) y a los datos facilitados por los expertos consultados en esta investigación (Constructora Gardilicic).

Tabla 16: MTBF y MTTR de los equipos principales del Modelo de Simulación Base (Li, 2012; Constructora Gardilicic, 2015).

Equipo	MTBF	MTTR	Unidad
Jumbo 2 brazos	11.3	2.3	horas
Jumbo 1 brazo	16.1	2.2	horas
LHD	27.3	2.6	horas
Camión Mixer	65.0	2.6	horas
Proyector de Shotcrete	34.1	2.7	horas
Equipos de Levante	47.5	2.3	horas

En el modelo de simulación se utilizó una distribución normal para ambos casos (frecuencia de fallas y tiempo de reparación), cuyos promedios corresponden al MTBF y el MTTR. Además se considera la desviación estándar de la frecuencia de falla como un 5% del MTBF y un 1% del MTTR como desviación estándar del tiempo de reparación, estos valores fueron calculados con la información disponible. Cabe destacar que la falla de equipos ocurren cuando el equipo está necesariamente operando y su impacto es directo en las horas disponibles de trabajo.

5.4.2. Mantenciones Programadas

Las mantenciones programadas de los equipos se realiza en función de las horas de operación de los equipos y además semanal o cada dos semanas según sea el caso tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17: Calendario de Mantenciones Programadas para los Equipos Principales (Li, 2012).

Equipo	Semanal	Bisemanal	250 HR	500 HR	1000 HR	2000 HR	Unidad
Jumbo 2 brazos	10		12	12	12	12	horas
Jumbo 1 brazo		10	12	12	12	12	horas
LHD		6	8	12	12	12	horas
Proyector de Shotcrete		6	10	12	12	12	horas
Camión Mixer		6	8	12	12	12	horas
Equipos de Levante		6	8	12	12	12	horas

Estas mantenciones se realizan el taller de mantención ubicado a 500 metros de los desarrollos (ver Figura 13) y afectan las horas disponibles del equipo.

5.4.3. Petroleo

Se realiza petroleo 1 vez por turno de manera aleatoria dentro del turno y con una duración de 15 minutos para todos los equipos. El lugar donde se realiza el petroleo está a 500 metros en el layout (ver Figura 13).

5.4.4. Otras Restricciones y Consideraciones

Traslado de Personal

Los traslados de personal a postura, colación, y otras actividades, no son constantes. Sin embargo, debido a que esto es debido a problemas de gestión, se asume en la planificación que estos tiempos se mantendrán en fijos.

En este caso se consideró tiempo de traslado (antes y después) de colación de 15 minutos, y de la misma forma se consideraron 15 minutos para el cambio de turno. Esto provoca que las horas disponibles por turno bajen de 8 horas a 7 horas.

Cierre de calles durante el traslado de marina

Si la calle 3 está realizando traslado de marina (ver Figura 17), entonces se pueden dar tres casos:

1. Hay equipos trabajando en la calle 1 o calle 2. Estos equipos terminan de realizar sus actividades y al finalizar esperan hasta que el traslado de marina termine.
2. Hay un equipo trabajando en la calle 4. Hay dos opciones, el equipo vuelve a la zona de estacionamiento si no necesita ir a otra frente o espera hasta que termine el traslado de marina para trasladarse y comenzar la actividad en la otra frente.
3. Equipo en estacionamiento. Si tiene que ir a la calle 4 no hay restricción, si debe ir a las otras frentes entonces espera a que finalice el traslado de marina.

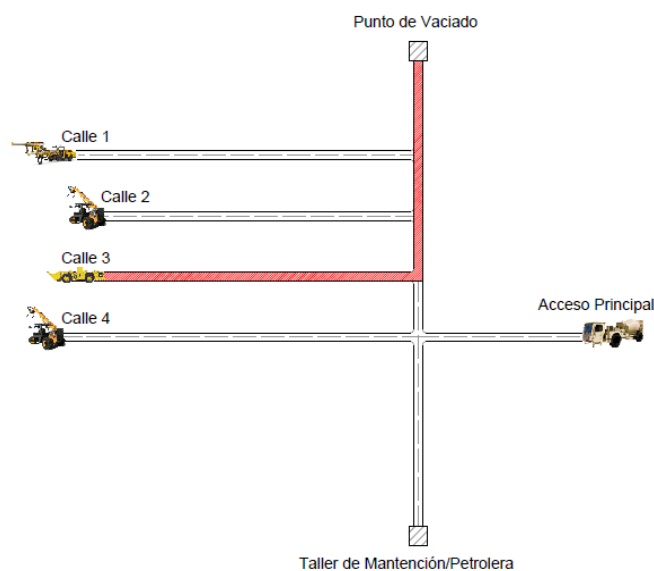


Figura 17: Cierre de calles durante traslado de marina en Modelo de Simulación Base.

Esta restricción aplica a todas las operaciones unitarias con excepción de la tronadura porque no tiene equipo asociado y en ese momento no se realiza ninguna actividad, y al mismo traslado de marina debido a que sólo se realiza en una calle a la vez.

Disponibilidad de Servicios

Según el análisis de una base de datos proveniente de Mina Esmeralda (División El Teniente, CODELCO) la probabilidad de que exista algún tipo de interferencia relacionada a la disponibilidad de servicios en la frente es de un 2.6% si se considera el abastecimiento de hormigón dentro de los eventos, y si no se considera el abastecimiento de hormigón la probabilidad baja a un 1.6%, es decir que el abastecimiento de hormigón representa aproximadamente un 38.5% de los eventos relacionados a la disponibilidad de servicios en la frente. Considerando el abastecimiento de hormigón, el tiempo promedio de los eventos es de 22 minutos.

Dado lo anterior, se decidió utilizar un 2.6% de probabilidad de que ocurra un evento de este tipo, con un tiempo representado por una distribución de probabilidad Exponencial de 22 minutos luego del ajuste de los datos. Esta restricción se consideró para todas las operaciones unitarias menos el traslado de marina. Cada vez que un equipo se posiciona en la frente se detona la probabilidad de ocurrencia.

Curva de Aprendizaje

De acuerdo a la información entregada por expertos en la etapa de recopilación de información, se determina que las actividades más afectadas por inexperiencia del personal las primeras semanas de trabajo son la perforación de avance y la fortificación.

Esta restricción se aplica directamente a los tiempos de las actividades (perforación y tres tipos de fortificación) y sólo afecta al comienzo de la simulación, es decir, afecta el rendimiento de las primeras semanas de desarrollo. En la siguiente tabla se muestran los factores de ajuste que se utilizaron en la simulación con el fin de aumentar el tiempo de perforación y de fortificación, los cuales van disminuyendo semana a semana hasta llegar a la semana 6, donde no se ajustan los tiempos (factor = 1) de esa semana en adelante.

Tabla 18: Factores de ajuste para los tiempos de perforación de avance y fortificación del Modelo de Simulación.

Semana	Factor de Ajuste
1	1.5
2	1.4
3	1.3
4	1.2
5	1.1
6	1.0

5.5. Criterios de Decisión

Debido a que ya se ha descrito el modelo base y sus interferencias, a continuación se muestran los criterios de decisión que se dan en cada actividad del ciclo generando actividades extra que se traducen en demoras en el ciclo.

En la Figura 18 se muestra la lógica desde que inicia la actividad de perforación de avance en la frente hasta que termina. Esta secuencia es idéntica para el carguío de explosivos, acuñadura, perforación e instalación de pernos, instalación y sujeción de la malla, y la proyección de shotcrete.

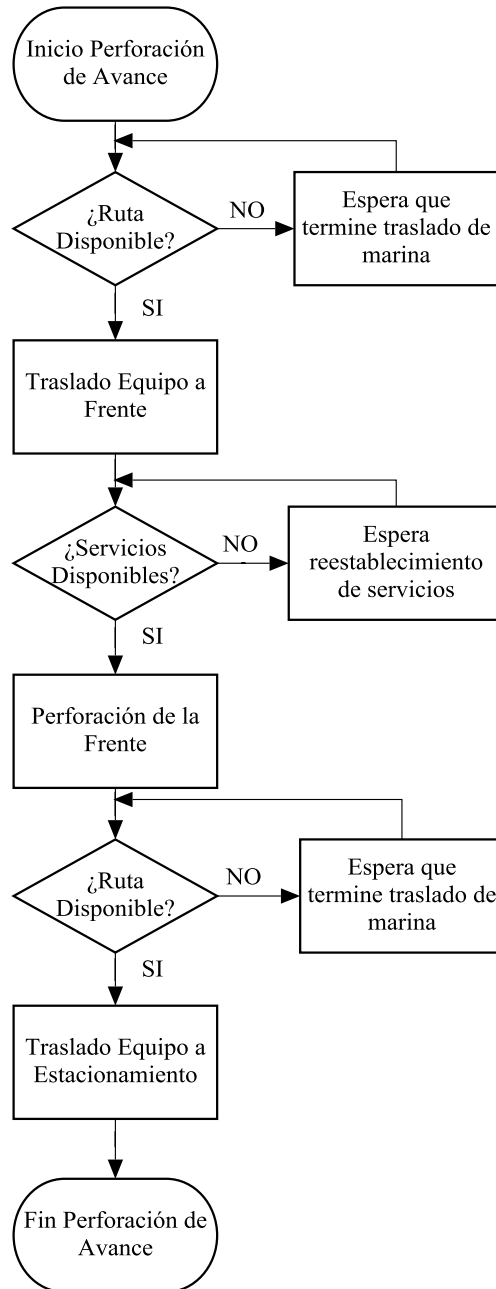


Figura 18: Perforación de la frente y sus criterios de decisión.

Ruta disponible indica que la ruta está completamente libre de LHD trasladando marina y como hipótesis del modelo la decisión se toma en la frente.

En el caso de la evacuación, tronadura y posterior ventilación, el único criterio asociado es la espera por el cumplimiento del horario establecido por la tronadura. Mientras que para el traslado de marina es un proceso iterativo condicionado a si existe marina restante en la frente de trabajo o no.

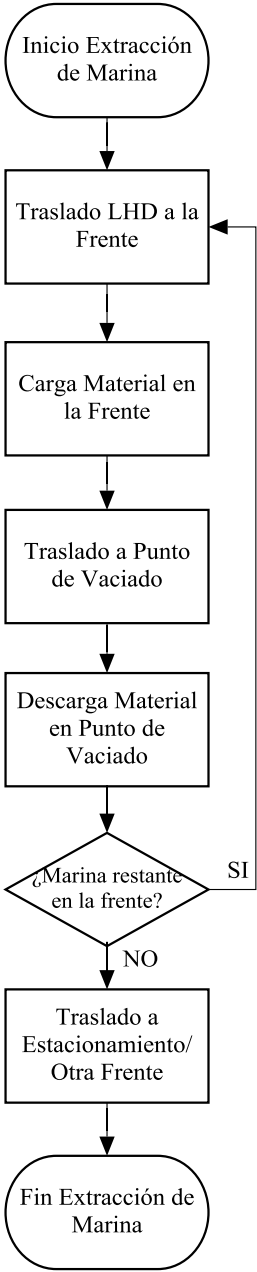


Figura 19: Extracción de Marina y sus criterios de decisión.

5.6. Validación del Modelo

A continuación se muestran los resultados de la validación inicial de modelo de simulación base, es decir, del modelo de simulación sin interferencias. Para esto, se compararon los resultados del modelo con los calculados mediante planillas de cálculo.

5.6.1. Rendimiento mediante Planilla de Cálculo

En el Anexo B se encuentra el cálculo del rendimiento (m/mes) para el desarrollo de cuatro frentes múltiples mediante planillas de cálculo.

Para este tipo de estimaciones es necesario redondear el tiempo de cada actividad a intervalos cortos. En este caso se utilizaron intervalos de 30 minutos, y cabe destacar que estos tiempos no consideran el tiempo de traslado de los equipos hacia las frentes de trabajo.

Tabla 19: Tiempos utilizados en la estimación del rendimiento utilizando planilla de cálculo.

	Actividad	Tiempo [min]
1	Marcar Frente	210
	Perforación Frente	
	Utilización de Bomba Drenaje	
2	Carguío de Tiros	60
3	Evacuación y Tronadura	90
	Ventilación	
4	Revisión Frente	120
	Pre-Acuñadura	
	Riego de Marinas	
	Traslado de Marinas	60
5	Acuñadura	60
6	Pernos	300
7	Malla	90
8	Proyección de Shotcrete	120

El tiempo de traslado de marina se calculó utilizando un rendimiento de 100 tph.

Además, se utiliza el supuesto de que a cada actividad le corresponde un único equipo, por lo tanto, no puede darse el caso de que se realice la misma actividad al mismo tiempo.

Otra consideración es que se utiliza un horario que considera cambio de turno y colación dejando 2 turnos diarios de 8 horas disponibles para trabajar, y las tronaduras se pueden realizar tanto en el cambio de turno como en el horario de colación.

Todo lo anterior resulta en un rendimiento de 289 m/mes para cuatro frentes múltiples considerando 30 días.

5.6.2. Comparación con Modelo de Simulación Base

Dado todo lo anterior, la primera etapa de validación consiste en comparar el modelo de simulación base (modelo de simulación sin interferencias), y se evalúan tres casos:

Caso 1:

- La distancia entre la zona donde se estacionan los equipos sin uso y los desarrollos es cero (distancia “x” en la Figura 20).
- Se ajusta el rendimiento del traslado de marina (100 tph promedio) para evaluar el mismo tiempo de traslado de marina que se considera en la planilla de cálculo.
- Se consideran los tiempos utilizados en la planilla (Tabla 19).
- El objetivo de comparar este caso es que los equipos no recorren distancias extra aparte del traslado entre una frente y otra, y se ajusta el tiempo de traslado de marina para emular lo que se planifica en la planilla de cálculo.

Caso 2:

- Distancia “x” igual a 300 metros (distancia del caso base).
- No se ajusta el rendimiento del traslado de marina.
- Se consideran los tiempos utilizados en la planilla (Tabla 19).
- El objetivo de este caso es evaluar el modelo de simulación base con los tiempos de la planilla para identificar el impacto de considerar que los equipos se estacionen a una distancia mayor a cero de los desarrollos.

Caso 3:

- Distancia “x” igual a 300 metros (distancia del caso base).
- No se ajusta el rendimiento del traslado de marina.
- Se consideran los tiempos del caso base (Tabla 15).
- El objetivo de evaluar este caso es comparar los resultados de la planilla de cálculo con el modelo de simulación sin ajustar ningún parámetro.

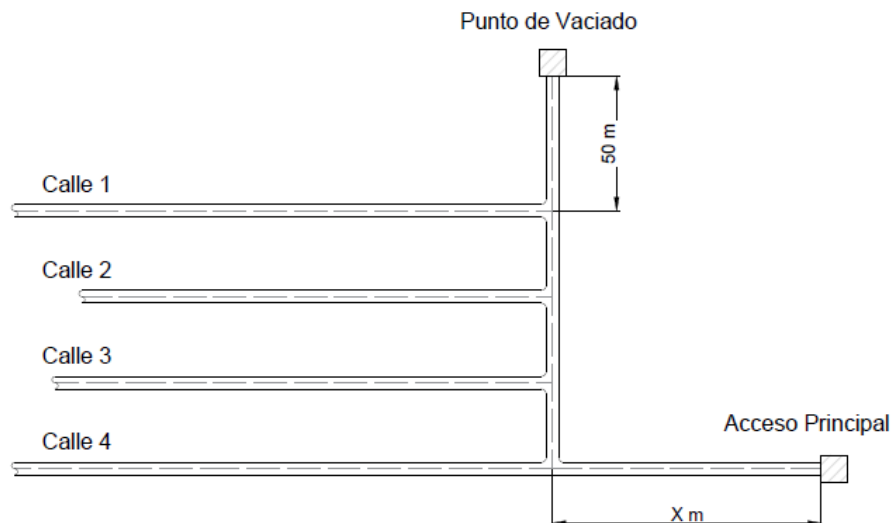


Figura 20: Esquema para Validación Inicial del Modelo de Simulación Base.

El tiempo de simulación es de 30 días en todos los casos, al igual que como se consideró para el cálculo de rendimientos en la planilla.

Tabla 20: Resultados Validación Inicial.

	Planilla	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Nº Disparos al mes	95	95	95	111
Avance por disparo (m)	3.04	3.04	3.04	3.04
Rendimiento (m/mes)	289	289	289	337

Como se observa en los resultados el número de disparos al cabo de los 30 días es el mismo en los dos primeros casos comparados con los resultados de planilla.

El Caso 1 intenta replicar lo que hace la planilla pero considerando el traslado de una frente a otra. Como los desarrollos no se encuentran lo suficientemente avanzados al cabo de 30 días (72 metros cada calle aproximadamente), estos traslados no afectan el rendimiento del sistema de manera significativa debido a que, como se observa en las planillas, existen tiempos muertos en las frentes cuando no hay equipo disponible o cuando se está esperando por tronadura y esto genera una holgura en el plan.

Lo mismo sucede con el Caso 2, agregar un tiempo de traslado hacia las frentes cuando el equipo se encuentra estacionado no impacta los desarrollos, al menos considerando 30 días de simulación.

Por otro lado, el resultado del Caso 3 representa el Caso Base descrito en el capítulo anterior pero sin interferencias y considera un tiempo de ciclo más corto que el usado en la planificación por planilla, por lo tanto tiene un mejor rendimiento.

5.7. Conclusiones del Capítulo

Las conclusiones principales de este capítulo se muestran a continuación:

- La formulación del problema, es decir, definir los objetivos y alcances, condiciona los parámetros de entrada y las variables de salida del modelo.
- El modelo conceptual funciona como una guía constructiva para el programador, y por lo tanto, es la etapa que debe realizarse con mayor detalle. Además, como se mencionó en el capítulo anterior, define una línea base para un posterior levantamiento de datos.
- Los criterios de decisión son los que finalmente otorgan al sistema generación de tiempos extra que afectan directamente a las actividades del ciclo. Mientras que los modelos paralelos afectan generalmente a un conjunto de actividades.
- En periodos cortos de tiempo de simulación el traslado de los equipos no es significativo debido al poco avance en los desarrollos.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Introducción

El presente capítulo muestra los principales resultados del modelo de simulación junto con un análisis de escenarios para finalmente presentar las conclusiones relacionadas al análisis de los resultados obtenidos.

6.2. Resultados Modelo de Simulación

6.2.1. Impacto de las Interferencias

Como se mencionó con anterioridad el caso base del modelo de simulación es el modelo sin interferencias.

Los primeros resultados de este estudio buscan cuantificar el impacto de las interferencias respecto al caso base. Para esto, el procedimiento fue simular durante 90 días e ir agregando interferencias por separado para comparar los rendimientos.

La razón por la que se simulan 90 días es porque interesa analizar el efecto en el mediano plazo y además, porque no se puede considerar un periodo muy corto de tiempo debido a que la simulación pasa por un periodo de estabilización al comienzo, sobre todo porque la curva de aprendizaje afecta los primeros 35 días de la simulación.

Tabla 21: Resultados Modelo de Simulación con 4 frentes múltiples.

	disparos/mes	disparos/día	m/mes	m/día	%CB
Caso Base (CB)	101.0	3.4	307.0	10.2	100%
CB + Cierre de Calles	98.0	3.3	297.9	9.9	97% (↓3%)
CB + Traslado Personal	97.7	3.3	296.9	9.9	97% (↓3%)
CB + Disponibilidad de Servicios*	99.6	3.3	302.7	10.1	99% (↓1%)
CB + Petroleo*	98.0	3.3	298.0	9.9	97% (↓3%)
CB + Mantenciones Programadas	97.0	3.2	294.8	9.8	96% (↓4%)
CB + Fallas*	97.0	3.2	294.9	9.8	96% (↓4%)
CB + Curva Aprendizaje	94.3	3.1	286.8	9.6	93% (↓7%)
CB + Todas las interferencias	79.5	2.6	241.6	8.1	79% (↓21%)

* 50 réplicas, ver Anexo C1.

Es importante mencionar que esta vez el caso base tiene como rendimiento 307 m/mes, menor a los 337 m/mes mostrados en la Tabla 20 debido a que al aumentar los días de la simulación de 30 a 90 días esto impacta el tiempo de ciclo de manera paulatina debido a que los traslados son mayores.

Como se observa en la Tabla 21, la interferencia de mayor impacto es la curva de aprendizaje. Esto se debe a que ésta impacta directamente en el tiempo de ciclo, ya que se considera como un aumento de los tiempos de perforación y fortificación al comienzo de la simulación, mientras que el resto de las interferencias afectan indirectamente.

Se observa que la interferencia con menor impacto es la disponibilidad de servicios. Debido a que se utilizó una probabilidad de ocurrencia y duración del evento de una faena en particular este resultado sólo sirve para tener una idea preliminar. La disponibilidad de servicios y las fallas en los equipos son interferencias completamente estocásticas en el modelo de simulación, por lo tanto, en ambos casos este tipo de interferencias estarán sujetas al análisis de datos que se haga del lugar que será estudiado.

Luego se tienen las interferencias que son necesarias en el sistema y que sólo por considerarlas ya impactan los rendimientos, éstas son el traslado de personal, petróleo y mantenciones programadas. En todos los casos se consideraron casos optimistas y con baja variabilidad, por lo tanto, si ocurrieran además problemas de gestión en cualquiera de estos ámbitos entonces el impacto en los rendimientos sería aún mayor.

Finalmente cabe destacar que los impactos de las interferencias no son aditivos. Es decir, la suma de los porcentajes de variabilidad con respecto al caso base asociado a cada interferencia (25%) no es igual a los resultados del modelo de simulación con todas las interferencias juntas (21%).

6.2.2. Desarrollos Completos

Para obtener el tiempo en que se demora en terminar todos los desarrollos, se realiza una simulación terminal, esto es, que el modelo de simulación finalice cuando los desarrollos estén completos.

La situación final que se consideró fue desarrollar las cuatro calles hasta los 350 metros de longitud.

El tiempo obtenido fue 187 días (6.3 meses) en construir las cuatro calles completas, esto significa un rendimiento de 224 m/mes.

6.3. Análisis de Escenarios y Análisis de Sensibilidad

A continuación se muestran los resultados de los escenarios que fueron evaluados:

- Tipo de Roca (buena, regular, mala)
- Distancia y cantidad de puntos de vaciado.
- Variación de configuración de la cuadrilla de trabajo.
- Variación del número de frentes de trabajo activas.

En todos los casos se consideró el modelo de simulación con todas las interferencias incluidas.

6.3.1. Tipo de Roca

Par este análisis se asumieron 3 tipos de roca: roca buena, roca regular y roca mala, donde el tipo de roca buena corresponde al modelo de simulación base con las interferencias.

En la siguiente tabla se muestran las diferencias en las variables que se consideraron dependiendo del tipo de roca, el resto de las variables se considera igual en los tres casos.

Tabla 22: Variación de los parámetros de entrada por tipo de roca.

	Roca Buena	Roca Regular	Roca Mala
Sobreexcavación	10%	15%	20%
Espesor de Shotcrete [m]	0.08	0.10	0.30

De acuerdo a la tabla anterior, el o los tiempo(s) de:

- Perforación, carguío de explosivos y tronadura se mantienen constantes en los tres casos.
- Pre-acuñadura, carguío de marina, acuñadura, enmallado y shotcrete varían en los tres casos.
- Apernado varía sólo para Roca Mala.

Los tiempos de pre-acuñadura y acuñadura aumentan debido a que se consideró sobreexcavación mayor al cambiar el tipo de roca de más a menos competente, y por ende, el perímetro de la excavación aumentó. Un aumento en el perímetro de la excavación afecta de la misma manera el enmallado.

Debido a lo mismo, el volumen de marina por disparo aumenta afectando el tiempo de extracción de marina.

En el caso del apernado se consideró la misma cantidad de pernos para roca buena y regular, mientras que para roca mala se consideró una cantidad mayor y por ende, el tiempo de apernado aumenta en el caso de roca poco competente (ver Anexo A).

Finalmente, el tiempo de shotcreteado aumenta por el aumento de perímetro y porque se consideró un espesor de shotcrete mayor.

Tabla 23: Tiempos de cada actividad del ciclo para cada tipo de roca.

Actividad	Roca Buena	Roca Regular	Roca Mala	Unidad
Perforación de Avance	152	152	152	[min]
Carguío de Explosivos	46	46	46	[min]
Evacuación, Tronadura y Ventilación	75	75	75	[min]
Revisión Frente, Preacuñadura, Riego Marina	117	119	121	[min]
Extracción de Marina	-	-	-	-
Acuñadura	57	59	61	[min]
Pernos	278	278	444	[min]
Malla	74	75	77	[min]
Proyección de Shotcrete	97	132	403	[min]

Considerando estos tiempos, los rendimientos obtenidos son los siguientes:

Tabla 24: Rendimientos para cada tipo de roca.

	disparos/mes	disparos/día	m/mes	m/día	%CB
Roca Buena	80	2.6	242	8.1	100%
Roca Regular*	76	2.5	231	7.7	96% (↓4%)
Roca Mala*	51	1.7	156	5.2	64% (↓36%)

* 50 réplicas, ver Anexo C2.

El cambio en el tipo de roca puede significar un cambio en el tipo de soporte. Esta es una de las consideraciones que más afecta los rendimientos dado que la fortificación es la actividad que tiene mayor duración en los ciclos constructivos.

Es común que exista falta de información exploratoria al inicio de los proyectos de este tipo, por lo tanto, en la planificación será necesario por lo menos considerar distintos escenarios para generar rangos de rendimientos de acuerdo a las condiciones del terreno.

Se observa que el cambio de roca buena a roca de mala calidad es de un 36% de diferencia, lo que puede significar hasta 3 meses de diferencia en el caso que se quieran construir las cuatro calles de 350 metros (1400 metros totales) a esos rendimientos.

6.3.2. Puntos de Vaciado

El primer análisis relacionado a los puntos de vaciado fue considerar 2 puntos de vaciado en vez de 1 punto como en el caso base.

La ubicación del segundo punto de vaciado será en la parte inferior del layout de manera simétrica al punto de vaciado existente.

Tabla 25: Resultados del Modelo de Simulación con 2 Puntos de Vaciado.

Distancia a Punto de Vaciado	m/mes (1 PV)	m/mes (2 PV)	Diferencia Porcentual
50 m	242	245	1.3%
100 m	237	242	2.1%
150 m	233	236	1.2%
200 m	228	232	1.9%

* Todos 50 réplicas, ver Anexo C3.

Según los resultados, para esta configuración el impacto de tener 1 o 2 puntos de vaciado varía entre un 1% y un 2%. La diferencia no es significativa debido a que el layout es simétrico y por lo tanto tampoco afecta si ambos se encuentran a distancias mayores.

Por lo tanto, se realiza un segundo análisis, el cual es obtener el rendimiento del sistema (m/mes) a diferentes distancias del punto de vaciado, donde el caso base considera esta distancia como 50 metros (ver Figura 13).

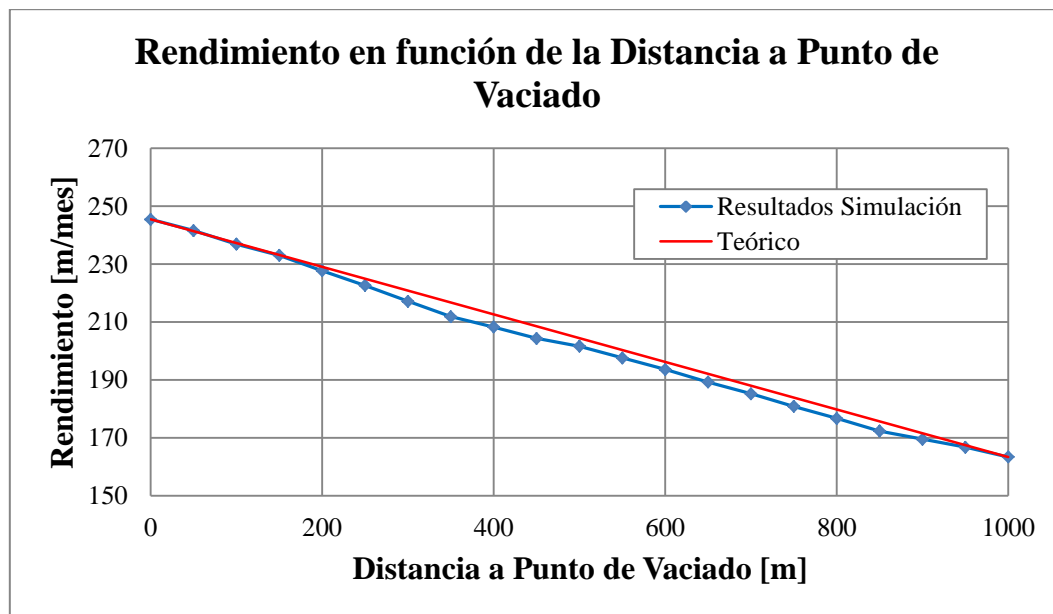


Figura 21: Resultados del Modelo de Simulación del rendimiento en función de la distancia al punto de vaciado.

En la figura anterior se observa que el rendimiento tiene un comportamiento lineal, el cual va disminuyendo a medida que el punto de vaciado se va alejando. La línea roja representa una línea recta que va desde el punto inicial al final. Es importante mencionar que el gráfico tiene fines académicos y las distancias consideradas están por sobre lo que se da en la realidad, además no se considera interferencia con la producción.

6.3.3. Cuadrilla

El caso base considera un equipo para cada actividad, y en la realidad lo anterior es poco probable que ocurra. En relación a esto, se realiza una simulación con una cuadrilla como la que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 26: Nueva configuración de cuadrilla para análisis de sensibilidad en el Modelo de Simulación.

Actividad	Excavación	Fortificación (Pernos)	Fortificación (Malla)	Fortificación (Shotcrete)
Equipos	Jumbo 2 brazos	Jumbo 1 brazo	Equipo de Levante	Camión Mixer
	LHD	Equipo de Levante		Roboshot
	Equipo de Levante			

Los resultados con este cambio se observan en la Tabla 27.

Tabla 27: Resultados Modelo de Simulación con nueva configuración de cuadrilla.

	disparos/mes	disparos/día	m/mes	m/día	%CB
Un equipo para cada actividad	79.5	2.6	243	8.1	100%
Nueva configuración*	80.8	2.7	246	8.2	102% (↑ 2%)

* 50 réplicas, ver Anexo C4.

En el primer caso se tienen 10 equipos para 8 actividades, mientras que en el segundo caso se tienen 8 equipos para 8 actividades.

Aunque existen menos equipos en el segundo caso, el rendimiento es mayor (1.6% mayor). Lo anterior cuantifica las interferencias que otorgan los equipos en los desarrollos.

El modelo de simulación está construido de manera que los equipos respeten las vías que tienen un solo sentido y no permite tampoco el adelantamiento de los equipos. Por ende, tener más equipos genera mayores tiempos de espera, sobre todo si son equipos con velocidades bajas.

6.3.4. Frentes de trabajo activas

El caso base considera cuatro frentes activas, sin embargo, se hace el análisis de tener de a 1 a 8 frentes múltiples. En todos los casos se consideran calles paralelas unidas por la cabecera principal.

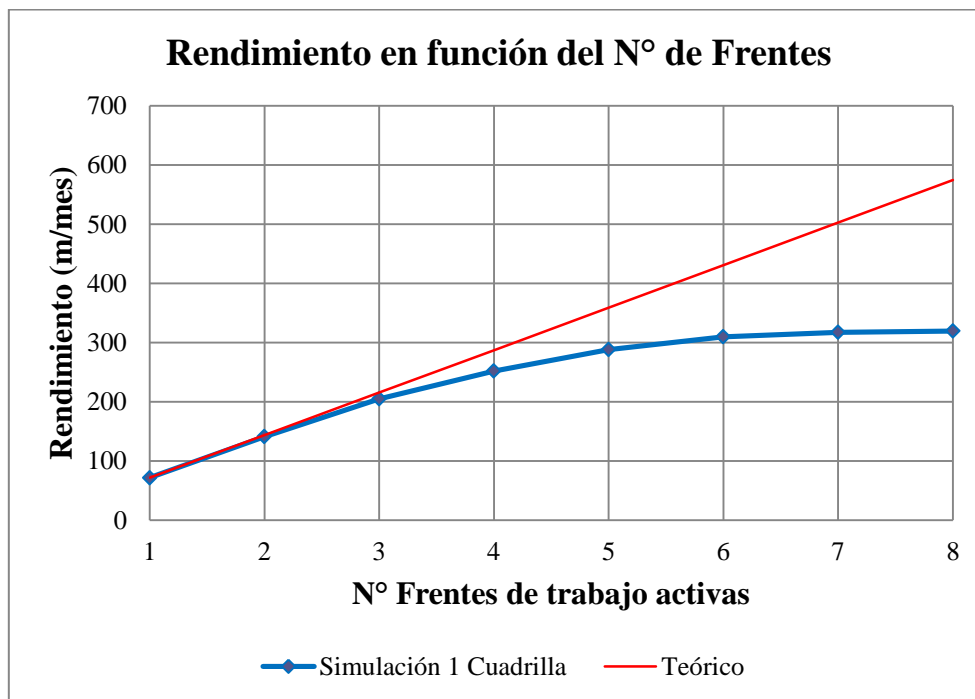


Figura 22: Resultados Modelo de Simulación del rendimiento en función del número de frentes de trabajo activas, una sola cuadrilla.

Como los recursos son limitados, al ir aumentando el número de frentes de trabajo activas el rendimiento del sistema tiende a estabilizarse después de la quinta frente en torno a los 300 m/mes (curva azul).

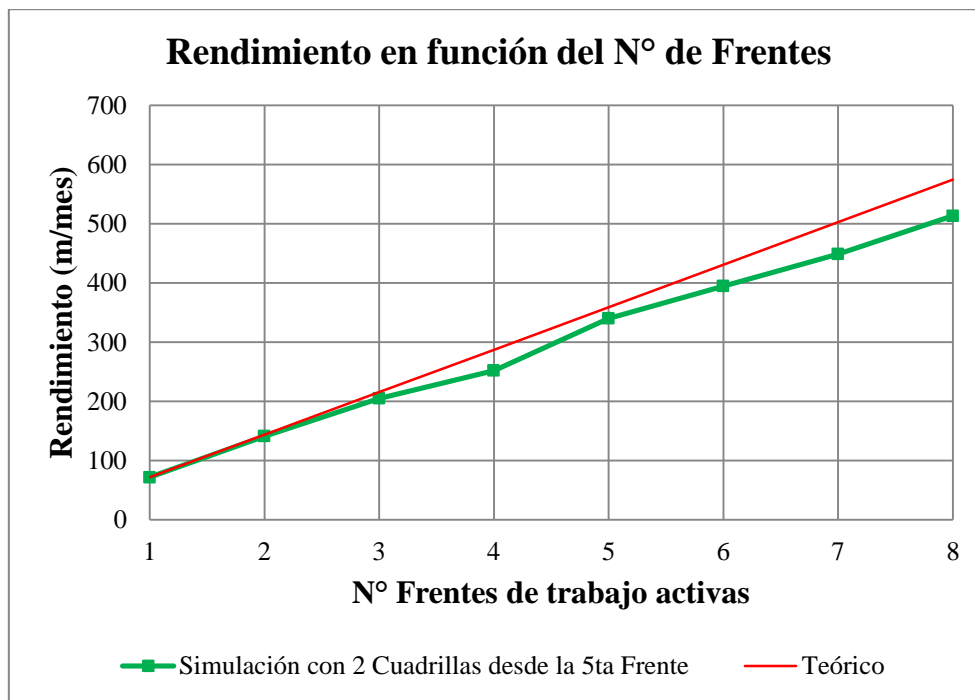


Figura 23: Resultados Modelo de Simulación del rendimiento en función del número de frentes de trabajo activas, una sola cuadrilla hasta la 4 frente activa, luego 2 cuadrillas.

Si se agrega una segunda cuadrilla luego de incorporar una quinta frente de trabajo, entonces el rendimiento tiende a comportarse de manera lineal cercano a lo teórico.

La curva roja (teórica) se construye en base al resultado de la simulación con una sola frente (72 m/mes) y se multiplica por el número de frentes que corresponda (de 1 a 8). Para más detalles de los resultados ver Anexo C5.

6.4. Conclusiones del Capítulo

Las conclusiones más relevantes de los resultados del modelo de simulación y sus análisis son:

- El modelo de simulación es útil para cuantificar el impacto de las interferencias por separado en el sistema.
- Se observa que los impactos (porcentajes de incidencia con respecto al caso base) no son aditivos.
- Es importante definir el tiempo de la simulación de acuerdo a los objetivos del modelo. Debido a que los rendimientos promedio están relacionados a las distancias que recorren los equipos, cuando se simulan periodos cortos de tiempo los rendimientos suelen ser mayores que cuando se realizan simulaciones hasta que se finalizan los desarrollos, los cuales tienen tiempos de meses de duración y rendimientos menores.
- Además, existe un periodo de estabilización del sistema al comienzo de la simulación, sobre todo cuando se consideran aspectos como la curva de aprendizaje.
- El análisis por tipo de roca deja en evidencia que como la falta de información del terreno es escasa durante el periodo de planificación, esto puede afectar en gran medida los rendimientos estimados debido a que se suelen considerar porcentajes de tipo de roca asociados a una clase de soporte en particular y cuando éstos varían pueden aumentar (o disminuir) el tiempo de ciclo de manera significativa.
- Cuando se tienen más de 4 o 5 frentes múltiples se observa una baja en los rendimientos debido a que las frentes esperan por equipos disponibles en mayor medida, una solución es considerar dos cuadrillas cada 4 frentes para obtener un comportamiento lineal de los rendimientos.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones Generales

El uso de la simulación permite incorporar variabilidad en los planes, y de este modo resulta ser un intermedio entre la planilla de cálculo y la realidad, por lo tanto representa una mejora a lo que se realiza actualmente. Sin embargo, el uso de la simulación para planificar aún no es una herramienta de uso diario para el planificador debido a que uno de los inconvenientes del uso de modelos de simulación es el tiempo requerido y el alto grado de procesamiento de datos de entrada provenientes de distintas fuentes para asegurar que los resultados de la simulación sean válidos. Si bien un modelo no debe ser demasiado detallado, aun así el nivel de detalle debe ser suficiente para crear un modelo que represente en mejor medida el sistema real.

La metodología propuesta en esta investigación permite generalizar el proceso de creación de un modelo de simulación para poder realizarlos de manera más simple y rápida. En la actualidad hacen falta herramientas que sean flexibles y a la vez fáciles y rápidas de manejar.

A pesar de que el modelo de simulación creado no considera todas las variables que debiese contener, permite comparar escenarios y cuantificar las interferencias. Por lo tanto, los modelos de simulación son herramientas de toma de decisiones si se hacen los supuestos adecuados, además, es también una herramienta para evaluar riesgos y detectar cuellos de botella con anticipación.

Cabe destacar que la visualización en este tipo de modelos, ya sea 2D o 3D, es útil no sólo para ir verificando el modelo de simulación si no que mediante el uso de animación se aumenta la confianza del cliente, ya que permite ver realmente cómo se comporta el modelo respecto a la realidad.

Finalmente, a pesar de que el modelo de simulación creado es un modelo que representa un escenario optimista, el rendimiento promedio es de 224 m/mes cuando se desarrollan las cuatro calles por completo (350 metros cada una), rendimiento que se encuentra dentro del rango esperado en proyectos de este tipo.

7.2. Recomendaciones a Futuro

Se recomienda ampliar la metodología planteada para proyectos de preparación minera que incluyan desarrollos horizontales, verticales y obras civiles, además de extender el análisis para otros niveles, debido a que esas son las actividades que conviven en la realidad.

En cuanto el modelo de simulación, se recomienda replicar el modelo en un lenguaje universal de programación que permita cargar el layout de manera automática, esto permite crear modelos de simulación de manera más eficiente y rápida, enfocándose en los distintos escenarios y no en el tiempo de programación.

Respecto de los alcances del modelo de simulación, es necesario:

- Incorporar restricciones asociadas a la ventilación.
- Estudiar otro tipo de estrategia de extracción de marina.
- Agregar interferencia con la producción.

Se propone además parametrizar los tiempos de las actividades del ciclo respecto a sus variables más relevantes de diseño y además incorporar las interferencias que ocurren a ese nivel de detalle, como por ejemplo, un modelo de ajuste estadístico para los tiempos de cada operación unitaria.

En último lugar, es necesario validar el modelo de simulación con un caso estudio real, realizando un levantamiento de datos basado en el modelo conceptual y que luego se comparen los resultados con rendimientos reales del lugar bajo estudio.

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alegría, J.P. 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.
- [2] Banks, J. 1999. Discrete Event Simulation. In Proceedings 1999 Winter Simulation Conference, pp 7-13.
- [3] Botha J., Nichol S. & Swarts S. 2009. Rapid underground development optimization at Cullinan Diamond Mine using computer simulation. Diamonds – Source to use 2009, Gaborone, Botswana.
- [4] Brunner D., Yazici H. J. & Baiden G. R. 1999. Simulating development in an underground hardrock mine. In 1999 SME Annual Meeting, Denver, Colorado. 4-11.
- [5] Bustos, O. 2015. Estado del Arte de la Preparación Minera en Esmeralda, Mina El Teniente. Diploma en Ingeniería en Block Caving. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [6] Camhi, J. 2012. Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving Caso Estudio Mina El Teniente Codelco Chile. Tesis para Optar al Grado de Magíster en Minería. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [7] COP Ingeniería SpA. Junio de 2014. Informe Final. Levantamiento línea base de preparación minera. Elaborado para el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia IM2 S.A. Filial CODELCO Chile.
- [8] Díaz G. & Morales E. 2008. Tunneling and Construction for 140,000 tonnes per day – El Teniente Mine – Codelco Chile. In 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea Sweden.
- [9] Gacitúa, J.M. 2012. Análisis Cualitativo y Jerárquico de Incertezas en la Construcción de Túneles. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Mención Estructuras-Construcción-Geotecnia. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [10] García E., García H. & Cárdenas L. 2006. Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel. Pearson Educación, Primera Edición. México.
- [11] Greberg J. & Sundqvist F. Simulation as a Tool for Mine Planning. Sweden. Lulea University of Technology.
- [12] Green Ingeniería y Consultoría Limitada. Enero 2013. Informe Final. Estudio de Tiempos de Empresas Contratistas de Obras. Elaborado para CODELCO Chile División El Teniente.
- [13] Hall, B. 2000. Simulation Modelling of Mining Systems. In Proceedings MassMin 2000. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Melbourne. pp 83-95.

- [14] Lavado, D. 2014. Metodología de Asignación de Recursos en Desarrollos de Minería Subterránea. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [15] Li, Z. 2012. Application of Simulation Techniques in Development Planning for Caving Methods. Thesis for the degree of master of applied science. The University of British Columbia.
- [16] Luxford, J. 2000. Reflections of a Mine Scheduler. In Proceedings MassMin 2000. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Melbourne. pp 119-128.
- [17] Neumann, M. 2001. CAMIRO Safe and Rapid Development Project – Benchmarking of Canadian Mine. Neumann Engineering and Mining Services.
- [18] Nord, G. 2008. Faster Drifting in Mining, Some Aspects. In 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea Sweden.
- [19] Rodríguez, F. 2014. Determinación de una Metodología que permita estimar el Tiempo de Construcción de una Batea, Tiempos de Ciclo, Actividades Críticas y Productividades incorporando Back-Análisis. Tesis para Optar al Grado de Magíster en Minería. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [20] Runciman N., Vagenas N. & Baiden G. 1999. Evaluation of Underground Development Mining Systems Using Discrete-Event Simulation. Simulation Councils, Inc.
- [21] Ruwanpura J. Y., AbouRizk S. M., Er K. C. & Fernando S. 2001. Special Purpose Simulation Templates for Tunnel Construction Operations. In Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, pp 222-237.
- [22] Salama A. & Greberg J. 2012. Optimization of Truck-Loader haulage system in an underground mine: A simulation approach using SimMine. In MassMin 2012: 6th International Conference & Exhibition on Mass Mining. Sudbury, Canada.
- [23] Salgado, J. 2009. Secuenciamiento Genérico de Obras para la Planificación de Preparación Minera, Mina El Teniente. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería.
- [24] Srisuwanrat C., Ioannou P. & Tsimhoni O. 2008. Simulation and Optimization for Construction Repetitive Projects Using ProModel and SimRunner. In Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, pp 2402-2412.
- [25] Stewart P., Ramezanzadeh A. & Knights P. 2006. Benchmark Drill and Blast and Mechanical Excavation Advance Rates for Underground Hard-Rock Mine Development. In Proceedings Ninth Underground Operators' Conference, pp 255-263.
- [26] Vargas J.P., Koppe J.C. & Pérez S. 2013. Monte Carlo simulation as a tool for tunneling planning. In Tunnelling and Underground Space Technology 40 (2014), 203–209.
- [27] Willcox, P. 2008. Rapid Tunnelling Technologies at Cadia East. In Proceedings Tenth Underground Operators' Conference, pp 263-267.

ANEXOS

ANEXO A: CÁLCULO DEL TIEMPO DE CICLO

A continuación se presentan las fórmulas, supuestos y cálculos para el tiempo de ciclo del caso base del modelo de simulación (roca de buena calidad). Además se muestra el cálculo para tipo de roca regular y mala calidad.

Anexo A1: Fórmulas principales

- **Perforación de Avance**

$$\text{Tiempo en Marcar Frente} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ Tiros}}{\text{disparo}} \cdot N^{\circ} \text{ disparos} \cdot \text{Tiempo Marcar 1 tiro} \right) [h]$$

$$\text{Metros Barrenados (mb)} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ Tiros}}{\text{disparo}} \cdot N^{\circ} \text{ disparos} \cdot \text{Largo tiros [m]} \right) [m]$$

$$\text{Tiempo Perforación de Avance} = \left(\frac{\text{mb [m]}}{\text{Velocidad Perforación} \left[\frac{m}{h} \right] \cdot N^{\circ} \text{ brazos Equipo}} \right) [h]$$

$$\text{Tiempo drenaje} = \left(\frac{\text{Agua recuperable en la frente [m}^3\text{]}}{\text{Rendimiento Bomba} \left[\frac{m^3}{h} \right]} \right) [h]$$

- **Carguío Explosivos**

$$\text{Tiempo carguío explosivos} = \left(\frac{N^{\circ} \text{ Tiros cargados}}{\text{disparo}} \cdot N^{\circ} \text{ disparos} \cdot \text{Tiempo Cargar 1 tiro [h]} \right) [h]$$

- **Acuñadura**

$$\begin{aligned} \text{Tiempo Acuñadura} \\ &= \left(\left(\text{Área Excavada [m}^2\text{]} \cdot \left(1 + \frac{\text{Sobreexcavación}}{100} [\%] \right) + \text{Perímetro Excavado [m]} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \text{Avance post tronadura [m]} \right) \cdot \text{Rendimiento} \left[\frac{h}{m^2} \right] [h] \end{aligned}$$

- **Fortificación: Pernos**

$$\text{Metros Barrenados (mb)} = (\text{Longitud efectiva pernos [m]} \cdot N^{\circ} \text{pernos}) [m]$$

$$\text{Tiempo Perforación de Pernos} = \left(\frac{\text{mb [m]}}{\text{Velocidad Perforación} \left[\frac{m}{h} \right] \cdot N^{\circ} \text{ brazos Equipo}} \right) [h]$$

$$\text{Pérdidas} = \left(\text{Tiempo perdido por cambio de postura} \left[\frac{h}{\text{tiro}} \right] \cdot N^{\circ} \text{ tiros} \right) [h]$$

$$\text{Tiempo drenaje} = \left(\frac{\text{Agua recuperable en la frente } [m^3]}{\text{Rendimiento Bomba } \left[\frac{m^3}{h} \right]} \right) [h]$$

$$\text{Tiempo instalación pernos lechados} = \left(\text{Rendimiento } \left[\frac{h}{m \text{ de perno}} \right] \cdot mb \right) [h]$$

- **Fortificación: Malla**

$$\begin{aligned} \text{Área Malla} = & \left(\text{Avance Efectivo } [m] \cdot \text{Périmetro Excavado } [m] \right. \\ & \left. \cdot \left(1 + \frac{\text{Traslape por paño de malla } [m]}{\text{Ancho de rollo de malla } [m]} \right) \right) [m^2] \end{aligned}$$

$$\text{Tiempo instalación malla} = \left(\frac{\text{Área Malla } [m^2]}{\text{Rendimiento postura malla } \left[\frac{m^2}{h} \right]} \right) [h]$$

- **Fortificación: Shotcrete**

$$\begin{aligned} \text{Volumen de Shotcrete } [m^3] \\ = & \left(\text{Perímetro Excavado } [m] \cdot \text{Espesor Shotcrete } [m] \cdot \text{Avance Efectivo } [m] \right. \\ & \left. \cdot \left(1 + \frac{\text{rechazo } [\%]}{100} \right) \right) [m^3] \end{aligned}$$

$$\text{Tiempo proyección shotcrete} = \left(\frac{\text{Volumen de Shotcrete } [m^3]}{\text{Rendimiento shotcretera } \left[\frac{m^3}{h} \right]} \right) [h]$$

Anexo A2: Supuestos y Cálculos

Tabla 28: Variables para el cálculo del tiempo de ciclo.

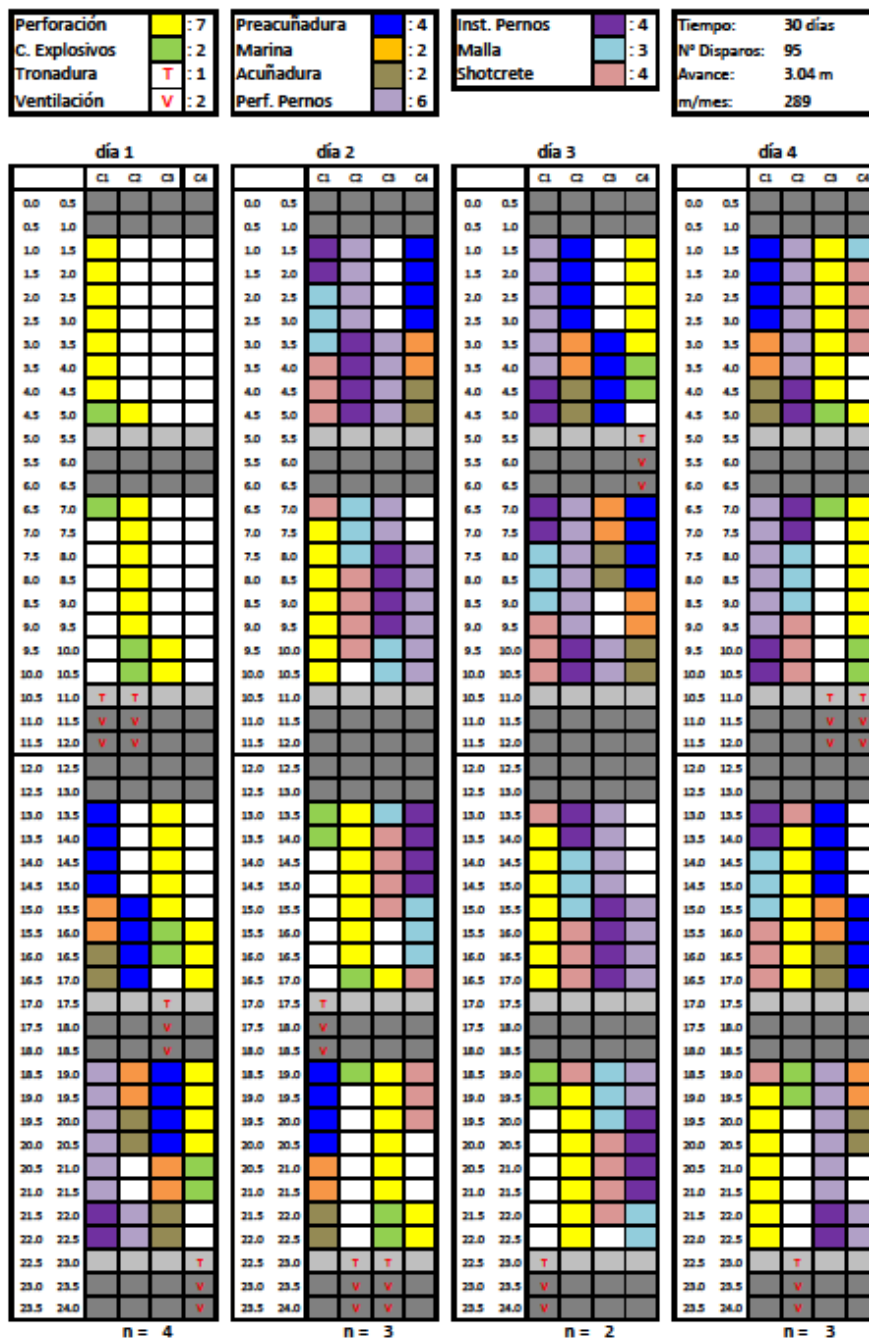
Variable	Buena	Regular	Mala	Unidad
Densidad Roca	2.62	2.62	2.62	[t/m3]
Alto Galería	4.2	4.2	4.2	[m]
Sección Excavada	18.15	18.15	18.15	[m2]
Sobreexcavación	10%	15%	20%	[%]
Perímetro de sección	12.3	12.6	12.8	[m]
Perforación por Tiro	3.80	3.80	3.80	[mb/tiro]
Factor de Avance	80%	80%	80%	[%]
Avance Esperado	3.04	3.04	3.04	[m/disp]
Avance Efectivo	3.04	3.04	3.04	[m]
Tiros Huecos Rainura	1	1	1	[#]
Rainura	12	12	12	[Tiros]
Auxiliares	9	9	9	[Tiros]
Zapateras	6	6	6	[Tiros]
Cajas	6	6	6	[Tiros]
Coronas	8	8	8	[Tiros]
N° Tiros Frente	42	42	42	[#]
Tiros Cargados	41	41	41	[#]
Disparos	1	1	1	[un]
Número de Brazos Jumbo de Avance	2	2	2	[#]
Número de Brazos Jumbo Apernador	1	1	1	[#]
Espesor Shotcrete	0.08	0.10	0.30	[m]
Marinas	159.0	166.2	173.5	[t]

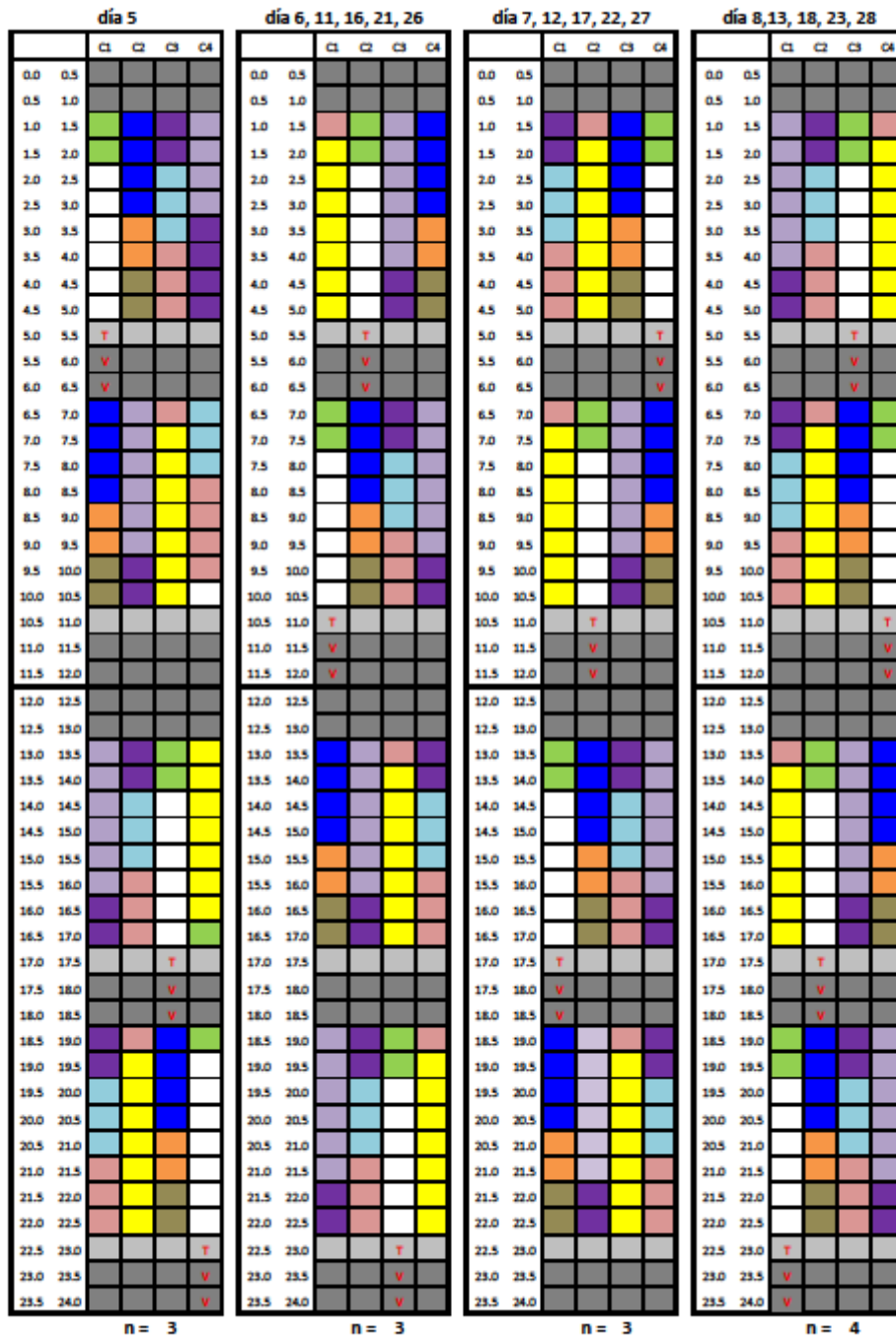
Tabla 29: Cálculo del tiempo de ciclo.

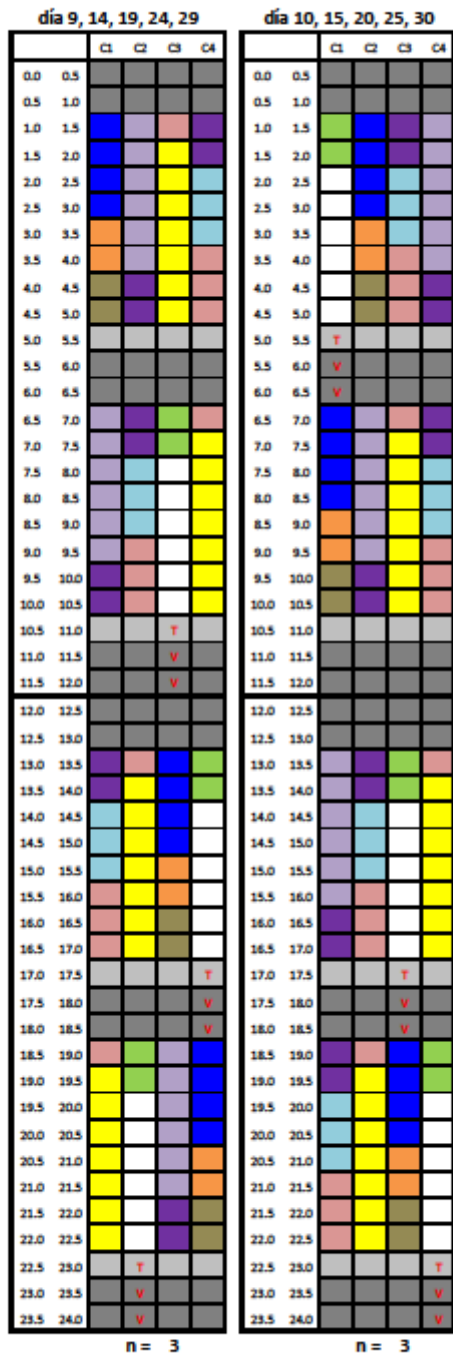
Supuestos			Actividad	Buena	Regular	Mala	Unidad
Tiempo Marcar Frente	60	[s]	Marcar Frente	0.7	0.7	0.7	[h]
Diámetro Perforación	51	[mm]	Metros Barrenados	159.6	159.6	159.6	[mb]
Velocidad Perforación	1.00	[mb/min]	Tiempo de Perforación (1)	1.3	1.3	1.3	[h]
Cambio Postura	0.33	[min/tiro]	Pérdida Operacional Perforación (2)	0.2	0.2	0.2	[h]
Agua Industrial Recuperable	9.5	[m3]	Tiempo Total Perforación Avance (1)+(2)	1.6	1.6	1.6	[h]
Rendimiento Bomba	36.0	[m3/h]	Utilización de Bomba Drenaje	0.3	0.3	0.3	[h]
Pérdidas posicionamiento	12	[min/disparo]	Posicionamiento Equipo	0.2	0.2	0.2	[h]
Tiempo Carguío de tiros	50	[s]	Carguío de Tiros	0.6	0.6	0.6	[h]
Evacuación y Tronadura	30	[min/disparo]	Evacuación y Tronadura	0.5	0.5	0.5	[h]
Ventilación	45	[min/disparo]	Ventilación	0.8	0.8	0.8	[h]
Tiempo Revisión Frente	30.0	[min/disparo]	Revisión Frente	0.5	0.5	0.5	[h]
Tiempo de Acuñaer Frente	1.0	[min/m2]	Pre-Acuñadura	1.0	1.0	1.0	[h]
Tiempo de Riego Frente	30.0	[min/disparo]	Riego de Marinas	0.5	0.5	0.5	[h]
Rendimiento LHD	100.0	[tph]	Carguío de Marinas	1.6	1.7	1.7	[h]
Tiempo de Acuñaer Frente	0.6	[min/m2]	Acuñaer	1.0	1.0	1.0	[h]
Longitud pernos	2.7	[m/perno]	Perforación de Apernado	96.0	96.0	96.0	[mb]
Longitud efectiva de pernos	2.4	[m/perno]	Pernos de 2.4 metros + 10 cm	40	40	40	[un]
			Planchuelas	40	40	40	[un]
			Tuercas	40	40	40	[un]
Pérdidas posicionamiento	12.00	[min/disparo]	Posicionamiento Equipo	0.2	0.2	0.2	[h]
Velocidad Perforación	1.00	[mb/min]	Tiempo de Perforación (1)	1.6	1.6	1.6	[h]
Cambio Postura	1.00	[min/tiro]	Pérdida Operacional Perforación (2)	0.7	0.7	0.7	[h]
Agua Industrial Recuperable	5.7	[m3]	Tiempo Total Perforación Pernos (1)+(2)	2.3	2.3	2.3	[h]
Rendimiento Bomba	36.0	[m3/h]	Utilización de Bomba Drenaje	0.2	0.2	0.2	[h]
Rend. Instalación de pernos	1.25	[min/m-perno]	Tiempo de Instalación Perno Lechado	2.00	2.00	2.00	[h]
Ancho de Rollo Malla	2.00	[m/postura]	Perímetro a Cubrir con Malla	12.29	12.55	12.82	[m]
Traslape por paño de Malla	0.30	[m/postura]	Área Malla	43.0	43.9	44.8	[m2]
Rendimiento Postura de Malla	35.0	[m2/h]	Tiempo Enmallado	1.2	1.3	1.3	[h]
			Perímetro a Cubrir con Shotcrete	12.29	12.55	12.82	[m]
Rechazo	15%	[%]	Volumen Shotcrete	3.2	4.4	13.4	[m3]
Rendimiento Shotcretera	2.00	[m3/h]	Tiempo Shotcreteado	1.6	2.2	6.7	[h]
Tiempo de Ciclo				16.5	17.3	21.9	[h]

ANEXO B: ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO MEDIANTE PLANILLA DE CÁLCULO

Figura 24: Estimación de rendimiento mediante planilla de cálculo.







ANEXO C: RESULTADOS SIMULACIONES

Anexo C1

En las siguientes tablas se muestran los resultados del modelo de simulación con interferencias en los casos en que se utilizaron variables aleatorias y se realizaron 50 réplicas en cada caso.

Tabla 30: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Disponibilidad de Servicios.

CB + Disponibilidad de Servicios	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	232.2	225.0	240.2	4.5
Largo Final Calle 2 (m)	213.2	206.7	218.9	2.6
Largo Final Calle 3 (m)	231.5	225.0	240.2	4.0
Largo Final Calle 4 (m)	231.1	221.9	240.2	4.2
Rendimiento (m/mes)	302.7	294.9	311.1	3.9

Tabla 31: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Petroleo.

CB + Petroleo	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	227.8	218.9	246.2	9.2
Largo Final Calle 2 (m)	213.2	185.4	218.9	9.6
Largo Final Calle 3 (m)	227.1	218.9	243.2	8.8
Largo Final Calle 4 (m)	226.0	218.9	243.2	9.2
Rendimiento (m/mes)	298.0	291.8	314.1	6.4

Tabla 32: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Falla de Equipos.

CB + Fallas	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	221.9	217.7	236.2	9.1
Largo Final Calle 2 (m)	218.9	199.4	238.0	8.6
Largo Final Calle 3 (m)	221.9	210.9	233.1	8.5
Largo Final Calle 4 (m)	224.0	219.8	242.3	8.2
Rendimiento (m/mes)	294.9	283.7	311.0	5.6

Tabla 33: Resultados del Modelo de Simulación Caso Base + Todas las interferencias.

CB + Todas las interferencias	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	183.9	173.3	188.5	3.7
Largo Final Calle 2 (m)	173.8	164.2	182.4	3.7
Largo Final Calle 3 (m)	184.0	173.3	191.5	3.9
Largo Final Calle 4 (m)	183.1	170.2	188.5	4.1
Rendimiento (m/mes)	241.6	228.0	249.3	4.4

Anexo C2

Los siguientes resultados muestran la estadística descriptiva del análisis de escenarios para distintos tipo de roca, donde la roca de buena calidad corresponde al caso base más las interferencias. Se realizaron 50 réplicas en cada caso.

Tabla 34: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Buena Calidad.

Roca Buena	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	183.9	173.3	188.5	3.7
Largo Final Calle 2 (m)	173.8	164.2	182.4	3.7
Largo Final Calle 3 (m)	184.0	173.3	191.5	3.9
Largo Final Calle 4 (m)	183.1	170.2	188.5	4.1
Rendimiento (m/mes)	241.6	228.0	249.3	4.4

Tabla 35: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Mediana Calidad.

Roca Regular	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	176.0	167.2	185.4	3.9
Largo Final Calle 2 (m)	166.5	158.1	173.3	4.0
Largo Final Calle 3 (m)	176.0	167.2	185.4	3.9
Largo Final Calle 4 (m)	175.0	167.2	185.4	3.6
Rendimiento (m/mes)	231.2	220.9	243.2	4.6

Tabla 36: Resultados Modelo de Simulación para Roca de Mala Calidad.

Roca Mala	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	118.3	115.5	121.6	1.4
Largo Final Calle 2 (m)	115.0	112.5	118.6	1.5
Largo Final Calle 3 (m)	117.6	112.5	118.6	1.6
Largo Final Calle 4 (m)	116.4	112.5	118.6	1.5
Rendimiento (m/mes)	155.7	151.0	159.1	1.5

Anexo C3

Las siguientes tablas exponen los resultados variando la cantidad de puntos de vaciado (1PV o 2PV) y sus distancias a los desarrollos (50, 100, 150 y 200 metros).

Tabla 37: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 50 m.

1 PV - 50 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	183.9	173.3	188.5	3.7
Largo Final Calle 2 (m)	173.8	164.2	182.4	3.7
Largo Final Calle 3 (m)	184.0	173.3	191.5	3.9
Largo Final Calle 4 (m)	183.1	170.2	188.5	4.1
Rendimiento (m/mes)	241.6	228.0	249.3	4.4

Tabla 38: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 100 m.

1 PV - 100 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	180.0	173.3	185.4	2.9
Largo Final Calle 2 (m)	171.0	161.1	179.4	3.7
Largo Final Calle 3 (m)	180.5	173.3	188.5	3.0
Largo Final Calle 4 (m)	179.2	173.3	185.4	2.7
Rendimiento (m/mes)	236.9	229.0	243.2	3.2

Tabla 39: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 150 m.

1 PV - 150 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	177.0	164.2	185.4	5.2
Largo Final Calle 2 (m)	167.9	155.0	173.3	4.8
Largo Final Calle 3 (m)	177.6	167.2	185.4	4.7
Largo Final Calle 4 (m)	176.6	167.2	185.4	4.5
Rendimiento (m/mes)	233.0	219.9	241.2	5.8

Tabla 40: Resultados Modelo de Simulación caso 1PV - 200 m.

1 PV - 200 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	172.3	161.1	179.4	5.3
Largo Final Calle 2 (m)	165.0	158.1	176.3	4.3
Largo Final Calle 3 (m)	173.5	164.2	182.4	4.9
Largo Final Calle 4 (m)	172.3	161.1	179.4	5.1
Rendimiento (m/mes)	227.7	215.8	238.1	6.0

Tabla 41: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 50 m.

2 PV - 50 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	185.9	179.4	191.5	3.3
Largo Final Calle 2 (m)	176.1	167.2	182.4	3.4
Largo Final Calle 3 (m)	186.3	179.4	191.5	3.0
Largo Final Calle 4 (m)	185.9	179.4	191.5	3.4
Rendimiento (m/mes)	244.7	235.1	251.3	3.4

Tabla 42: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 100 m.

2PV - 100 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	183.7	176.3	191.5	2.6
Largo Final Calle 2 (m)	173.8	164.2	182.4	3.9
Largo Final Calle 3 (m)	184.4	179.4	188.5	2.7
Largo Final Calle 4 (m)	183.7	176.3	188.5	2.6
Rendimiento (m/mes)	241.9	234.1	246.2	3.0

Tabla 43: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 150 m.

2 PV - 150 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	178.8	167.2	185.4	4.5
Largo Final Calle 2 (m)	168.8	161.1	179.4	4.4
Largo Final Calle 3 (m)	179.8	170.2	185.4	4.2
Largo Final Calle 4 (m)	179.9	170.2	185.4	4.1
Rendimiento (m/mes)	235.8	226.0	244.2	4.5

Tabla 44: Resultados Modelo de Simulación caso 2PV - 200 m.

2 PV - 200 m	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	175.0	167.2	182.4	4.0
Largo Final Calle 2 (m)	167.5	161.1	176.3	3.8
Largo Final Calle 3 (m)	177.5	170.2	182.4	3.2
Largo Final Calle 4 (m)	176.2	170.2	182.4	3.4
Rendimiento (m/mes)	232.1	223.9	238.1	3.8

Anexo C4

A continuación se muestra la estadística de los resultados obtenidos cambiando la configuración de la cuadrilla del caso base por una con 2 equipos menos.

Tabla 45: Resultados Modelo de Simulación con nueva cuadrilla.

Nueva Cuadrilla	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Largo Final Calle 1 (m)	184.8	175.4	191.5	4.0
Largo Final Calle 2 (m)	179.0	167.8	185.4	4.1
Largo Final Calle 3 (m)	186.0	178.8	191.5	4.2
Largo Final Calle 4 (m)	185.9	179.4	191.5	3.7
Rendimiento (m/mes)	245.9	218.9	258.1	3.7

Anexo C5

En las tablas a continuación se exponen los datos obtenidos mediante el modelo de simulación para la creación de la Figura 22.

Tabla 46: Resultados Modelo de Simulación con 1 cuadrilla.

N° Frentes	disparos/mes	disparos/día	m/mes	m/día
1	23.6	0.8	72	2.4
2	46.5	1.5	141	4.7
3	67.4	2.2	205	6.8
4	82.9	2.8	252	8.4
5	94.8	3.2	288	9.6
6	102.0	3.4	310	10.3
7	104.4	3.5	317	10.6
8	105.1	3.5	319	10.6

Tabla 47: Resultados Modelo de Simulación con 1 cuadrilla hasta la 4ta. frente y 2 cuadrillas desde la 5ta. frente.

N° Frentes	disparos/mes	disparos/día	m/mes	m/día
1	23.6	0.8	72	2.4
2	46.5	1.5	141	4.7
3	67.4	2.2	205	6.8
4	82.9	2.8	252	8.4
5	111.8	3.7	340	11.3
6	129.8	4.3	395	13.2
7	147.6	4.9	449	15.0
8	168.9	5.6	513	17.1